



Ion Beam Applications Francophone

Namur (Belgique)

8 – 11 septembre 2026



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

iseq

HIGH VOLTAGE .EXACTLY.

HIGH VOLTAGE POWER SUPPLIES FOR RESEARCH AND SCIENCE



- ▶ High precision SourceMeasureUnits (SMU)
- ▶ Large number of detector bias supplies
- ▶ Custom design for special applications
- ▶ Wide range of product series and configurations

Our exclusive sales partner in France:

WWW.PHYSICAL-INSTRUMENTS.FR

Physical
instruments

Comité Scientifique et d'Organisation

Julien COLAUX <i>Président</i>	UNamur	Namur (Belgique)
<u>Membres</u>		
Philippe BARBERET	LP2i, Univ. Bordeaux	Gradignan
Lucile BECK	LMC14, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Frederico GARRIDO	IJCLab, Univ. Paris-Saclay	Orsay
Gaëlle GUTIERREZ	JANNuS, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Gweltaz HIREL	SFV	Paris
Denis JALABERT	IRIG, CEA Grenoble	Grenoble
Hicham KHODJA	IRAMIS, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Nathalie MONCOFFRE	IP2I Lyon	Villeurbanne
Dominique MULLER	ICube, Univ. Strasbourg	Strasbourg
Claire PACHECO	C2RMF	Paris
Stéphanie PELLEGRINO	INSTN, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Thierry SAUVAGE	CEMHTI	Orléans
Ian VICKRIDGE	INSP, Sorbonne Univ.	Paris

Comité Local d'Organisation

Julien COLAUX (UNamur)	
Lucas BASEIL (UNamur)	Anne-Catherine HEUSKIN (UNamur)
Richard COOS (UNamur)	David STRIVAY (ULiège)
Paul-Louis DEBARSY (UNamur)	Tijani TABARRANT (UNamur)
Karin DEROCHETTE (UNamur)	Romain TONNEAU (UNamur)

© Editions SFV 2026

19 rue du Renard – 75004 Paris

Les textes de ce volume sont la propriété exclusive de la Société Française du Vide.

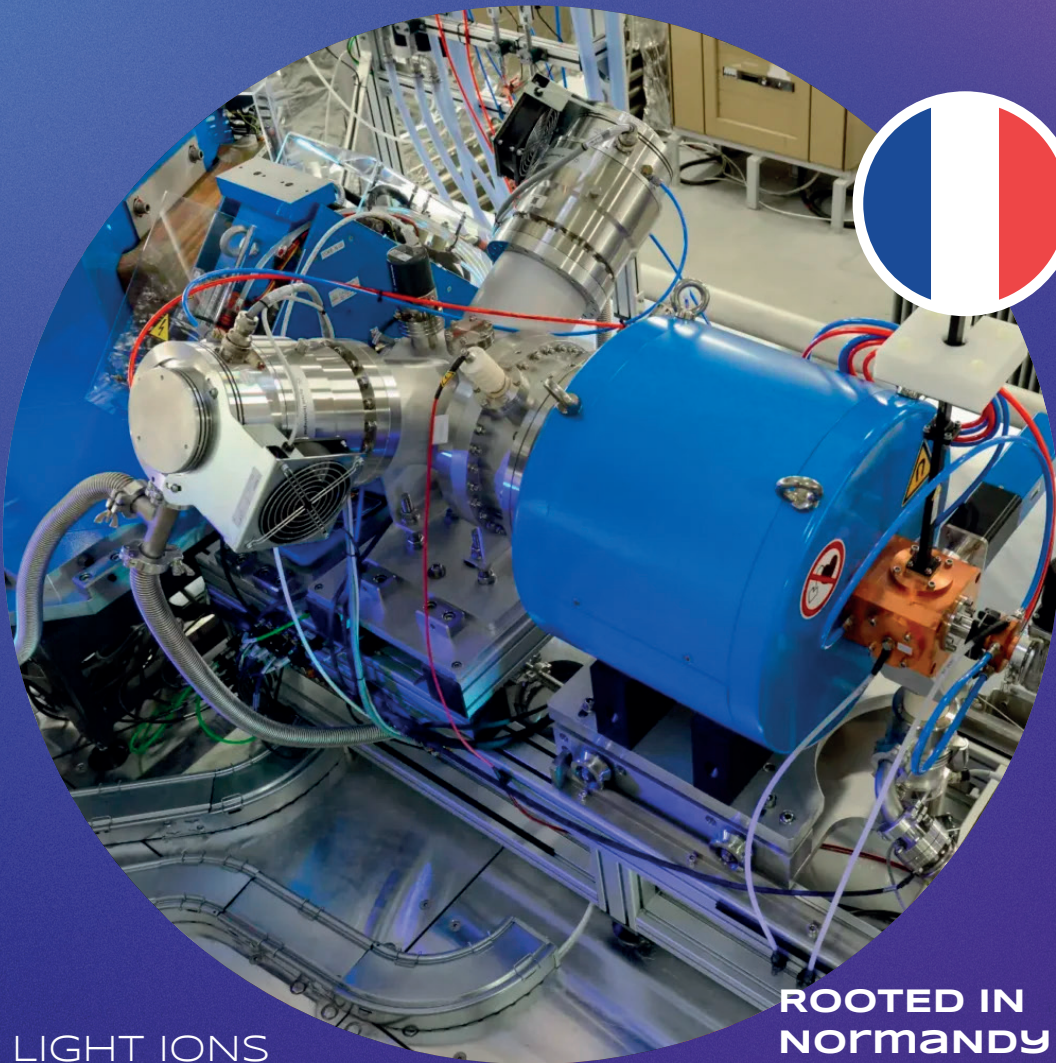
Toute reproduction est interdite sans son accord.

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

YOUR BEST **PARTNER**

FOR **ECR ion sources** &
turkney ion injectors

**NEED IONS ? NEED PARTS ? NEED SERVICES ?
ONE EXPERT. COMPLETE SOLUTIONS.**



FROM LIGHT IONS
HIGH CURRENT
TO HEAVY IONS

**ROOTED IN
Normandy**

Based in Bayeux, in the heart of Normandy,
Pantechnik designs and manufactures its
solutions in France, contributing to a dynamic
and internationally recognized ecosystem in
advanced nuclear and accelerator technologies.



EDITORIAL

Les onzièmes Rencontres Ion Beam Applications Francophones (IBAF) se tiennent du 8 au 11 septembre 2026 à l'Université de Namur. Seize ans après l'édition 2010, l'UNamur est heureuse d'accueillir à nouveau cette communauté.

Ces journées portent sur l'ensemble des aspects liés à la production et à l'exploitation de faisceaux de particules chargées dans le domaine du MeV. Y seront représentés les instruments et techniques des faisceaux d'ions, la physique des interactions ions-matière, l'analyse et la modification de matériaux, ainsi que les applications aux sciences de la vie, de la Terre et de l'environnement, et aux sciences du patrimoine.

Au-delà des échanges scientifiques, IBAF reste aussi l'occasion pour la communauté francophone de se retrouver dans une atmosphère conviviale et constructive. Nous y attachons une importance particulière et espérons que chacun pourra profiter pleinement de ces moments de partage.

Nous sommes très heureux de vous accueillir pour IBAF 2026 et vous souhaitons une excellente conférence.

Le Comité IBAF

DONNEZ UNE SECONDE VIE À VOS ÉQUIPEMENTS DE GRAVURE

Application Système redonne **performance**, fiabilité et conformité à vos systèmes de gravure devenus obsolètes.

Préservez votre procédé, maîtrisez votre budget, pérennisez votre savoir-faire.



VOTRE ÉQUIPEMENT VOUS LIMITE ?



Constructeur absent ou support arrêté



Électronique obsolète



Maintenance difficile et pièces rares



Sécurité non conforme



Performances limitées



Investissement dans un neuf trop élevé

**NE JETEZ PAS.
RÉNOVEZ INTELLIGEMMENT.**

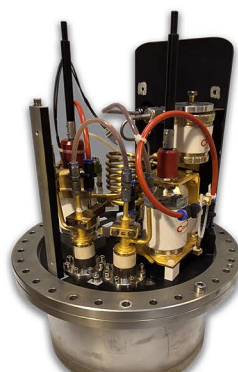


**LE MEILLEUR INVESTISSEMENT
EST SOUVENT LA MACHINE
QUE VOUS POSSÉDEZ DÉJÀ.**



NOTRE APPROCHE

- ✓ Mise aux normes CE et sécurité
- ✓ Remplacement complet du contrôle-commande
- ✓ Nouvel automatisme Siemens et supervision moderne
- ✓ Conservation des sous-ensembles encore performants
- ✓ Évolutivité et adaptabilité à vos besoins futurs
- ✓ Installation, mise en route et formation
- ✓ Maintenance préventive et SAV réactif



AVANT



APRÈS

Source COPRA – Avant / Après

Exemple de reconditionnement complet : résolution de toutes les fuites par brasure, remplacement de l'ensemble des accords et tuyauteries de refroidissement, remise à neuf des sous-ensembles et nouvelle dorure des composants.

Programme des conférences

MARDI 8 SEPTEMBRE 2026

- 13:00 Accueil des participants
- 14:00 Ouverture des Journées
Julien Colaux, *Président du Comité IBAF 2026*
- Chair :** **G. Gutierrez**
- 14:20 **INV-1 - Canalisation d'ions dans les oxydes d'uranium**
Conférence Invitée
F. Garrido
IJCLab, Univ. Paris Saclay, Orsay (France)
- 15:00 **#08 - Matrices de diodes GaN pour la caractérisation et l'imagerie de faisceaux d'ions**
S. Higuere¹, **N. Brosda²**, **F. Catania³**, **J.Y. Duboz³**, **E. Frayssinet³**, **M. Hugues³**,
M. Siviero³
¹ *IPHC / IN2P3 / CNRS / Univ. Strasbourg (FR)*
² *Ruhr-Univ. Bochum (DE)*
³ *Univ. Côte d'Azur CRHEA-CNRS (FR)*
- 15:20 **#23 - Et pourquoi pas EPICS ?**
J. Jouve¹, **L. Daudin¹**, **P. Alfaut¹**, **S. Sorieul¹**, **I. Tsekhanovich²**
¹ *CNRS - LP2iB - Gradignan (FR)*
² *Univ. Bordeaux - LP2iB - Gradignan (FR)*
- 15:40 **#55 - Cibles référence pour RBS**
I. Vickridge¹, **R. Webb²**, **J. Meerschaut³**
¹ *SAFIR, INSP, CNRS et SU - Paris (FR)*
² *UKNIBC - Surrey (UK)*
³ *IMEC - Leuven (BE)*
- 16:00 **#56 - Résolution en énergie d'un détecteur PIPS : définition et spectroscopie IBA**
T. Sauvage, **A. Bellamy**, **O. Wendling**, **P. Sigot**, **W. Hate**, **F. Foucher**, **B. Diallo**
CNRS CEMHTI UPR 3079, Univ. Orléans (FR)
- 16:20 **Pause (40')**
- 17:00 Présentation flash Posters
- 17:20 Présentation flash Exposants-Sponsors
- 19:00 Soirée belge « cheese & beers »

MERCREDI 9 SEPTEMBRE 2026

Chair : **A-C. Heuskin**

08:40 **INV-2** - Emerging particle therapy strategies: proton minibeam radiation therapy, ion minibeam radiation therapy and particle FLASH radiotherapy

Conférence Invitée

Y. Prezado

CiMUS, St-Jacques de Compostelle (ES)

09:20 **#04** - Comparison of cells responses upon irradiation with α -particles vs X-rays

E. Rapport^{1,2}, N.R. Reynaert¹, S.P. Penninckx¹, C.M. Michiels²

¹ *Radiophysics Laboratory, Institut Jules Bordet, Univ. Libre de Bruxelles (BE)*

² *Unité de Recherche en Biologie Cellulaire (URBC), NARILIS, Univ. Namur (BE)*

09:40 **#13** - Influence du transfert linéique d'énergie sur l'effet flash par irradiation d'embryons de caenorhabditis elegans

H. Stimoli, L. Schoenauen, A.C. Heuskin

NAmur Research Institute for Life Sciences, Univ. Namur (BE)

10:00 **Pause (40')**

Chair : **I. Vickridge**

10:40 A flexible parametrization for the electronic stopping cross section

Conférence Invitée

J. Meersschaut

IMEC, Leuven (Belgique)

11:20 **#03** - Étude en microphotoluminescence et ODMR de centres colorés du 4H SiC pour les technologies quantiques

J. Tribollet, E. Donadio, D. Muller, S. Roques, W. Uhring, C. Hofmann, L. Werling

Laboratoire ICube - CNRS – Univ. Strasbourg (FR)

11:40 **#05** - Formation of ultra-thin SC silicide layers: a medium-energy ion scattering study

A. Vantomme¹, R. Holenak², K. Vomschee², E. Ntemou², T. Tran², B. Pollefliet³, C. Porret³, R. Loo³, C. Merckling³, D. Primetzhofer²

¹ *Quantum Solid State Physics, KU Leuven (BE)*

² *Department of Physics and Astronomy, Uppsala Univ. (SE)*

³ *IMEC - Leuven (BE)*

12:00 **#11** - Rôle du couplage impuretés-défauts dans la structure électronique des oxydes à large bande interdite déposés par ALD

B. Xia, E. Briand, S. Steydli, J-J. Ganem, I. Vickridge

Institut des NanoSciences de Paris (FR)

12:20 **#09** - Analyse par faisceaux d'ions : contribution à l'étude de la résistance à l'oxydation à haute température d'alliages commerciaux de titane α et quasi- α pour l'aéronautique

L. Lavisse¹, V. Optasanu¹, C. Marco De Lucas¹, S. Sorieul², J. Jouve², D. Kuczinska-Zemla³, P. Berger⁴, J.M. Jouvard¹, T. Montesin¹

¹ *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne -UBE - Dijon (FR)*

² *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne -UBE - Bordeaux (FR)*

³ *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne -UBE - Varsovie (PL)*

⁴ *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne -UBE - Saclay-Dijon (FR)*

12:40 Déjeuner

MERCREDI 9 SEPTEMBRE 2026

Chair : **H. Khodja**

- 14:20 **#26** - Quantification de l'azote sur titane grenaillé exposé à haute température
V. Optasanu¹, L. Lavisse¹, T. Sauvage²
¹ ICB UMR 6303 CNRS, UBE - Dijon (FR)
² CEMHTI, Univ. Orléans (FR)
- 14:40 **#43** - Caractérisation par IBA Des éléments légers dans le film passif de l'acier inoxydable 316L
B. Lathuilière¹, N. Bérerd¹, N. Moncoffre², E. Ramet², J. Colaoux³, P.L. Debarsy⁴, B. Xia⁵, E. Briand⁵, I. Vickridge⁵
¹ Univ. Lyon 1, IUT Lyon 1 - Département de Chimie, Villeurbanne (FR)
² Univ. Lyon, IP2I UMR 5822 CNRS Villeurbanne, France - Lyon (FR)
³ Univ. Namur, Namur Institute of Structured Matter, Namur (BE)
⁴ Univ. Namur, Synthesis, Irradiation and Analysis of Materials (SIAM) platform, Namur (BE)
⁵ Sorbonne Univ., CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, SAFIR, Paris (FR)
- 15:00 **#31** - Étude de sorption d'éléments légers issus de $^{13}\text{CO}_2$, $^{12}\text{CD}_4$ et $^{13}\text{CH}_4$ dans des films getter yttrium et $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$
H. Nabil¹, T. Sauvage², C. Kutyla¹, C. Bessouet¹, M. Alfazzaa², A. Bosseboeuf¹, A. Bellamy², O. Wendling², J. Moulin¹
¹ Centre des nanosciences et nanotechnologies - Paris (FR)
² Conditions extrêmes et matériaux : Haute température et irradiation - Orléans (FR)
- 15:20 **#22** - CRM characterisation by ERD for higher-accuracy RNRA hydrogen quantification
L. Dupont¹, J. Meersschaut², A. Vantomme³, P.L. Debarsy⁴, J.L. Colaoux¹
¹ Physics Department, Namur Institute of Structured Matter (NISM), UNamur, Namur (BE)
² IMEC, Leuven (BE)
³ Quantum Solid State Physics, KU Leuven, Leuven (BE)
⁴ SIAM technological platform, UNamur, Namur (BE)
- 15:40 **#49** - absolute quantification of minute quantities of aluminium on Si Substrates using the $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$ reaction
T. Vanmeerbeek^{1,2}, A. Vantomme¹, J. Meersschaut², I. Vickridge³
¹ KU Leuven (BE)
² IMEC - Leuven (BE)
³ INSP, CNRS & Sorbonne Univ. - Paris (FR)
- 16:00 **Pause (20')**
- 16:20 **Ateliers**
- #1** - L'Intelligence Artificielle : impacts, opportunités et menaces pour la science autour des faisceaux de particules chargées
- #2** - Aspects Institutionnels des activités autour des faisceaux d'ions
- 18:20 **Session poster (avec restauration typiquement belge...)**

JEUDI 10 SEPTEMBRE 2026

Chair : **C. Pacheco**

- 08:40 **INV-4 - Following the beam: Ion Beam Analysis and mobile approaches for cultural heritage**
Conférence Invitée
D. Strivay¹, G. Chêne¹, L. Van Wersch¹, N. De Vries¹, E. Derzelle¹, M. Souris¹, C. Defeyt^{1,2}
¹ Univ. Liège - Liège (BE) - ² Musées Royaux des Beaux-Arts de Belgique - Liège (BE)
- 09:20 **#07 - Activation par faisceaux de protons d'une brasure médiévale à l'étain et au plomb**
A. Gillon¹, C. Koumeir², C. Pelé-Méziani³, L. Rossetti³, G. Louarn⁴, F. Haddad⁵
¹ Indépendant - Tours (FR) ² GIP ARRONAX - Nantes (FR)
³ Arc'Antique (GPLA) - Nantes (FR) ⁴ Institut des Matériaux Jean Rouxel - Nantes (FR)
⁵ SUBATECH, CNRS/IN2P3 - Nantes (FR)
- 09:40 **#10 - Analyse par activation protonique et P-XRF d'un couteau en fer de l'âge de Bronze**
J. Luabanya¹, C. Koumeir², F. Haddad², C. Pele-Meziani³, S. Muanza⁴, J. Dias⁵
¹ SUBATECH, ARRONAX, CGEA - Nantes (FR)
² SUBATECH, ARRONAX - Nantes (FR)
³ Lab'Arc-Antique - Nantes (FR)
⁴ CGEA - Kinshasa (CG)
⁵ Musée-Maison du Patrimoine Hieres-sur-Amby - Hières-Sur-Amby (FR)
- 10:00 **#40 - Production des émaux gallo-romains : apport des analyses micro-IBA à l'étude des verres blancs et des motifs colorés complexes**
L. Baseil¹, G. Morabito¹, M. Callewaert², F. Cecchet¹, J.L. Colaux¹
¹ Département de Physique, Instituts NISM - PaTHs, Univ. Namur (BE)
² Direction du Patrimoine Culturel, Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Bruxelles (BE)
- 10:20 **Pause (40')**
- Chair : **J. Colaux**
- 11:00 **INV-5 - High-energy electron beam degradation of PFAS and persistent organic pollutants in water: experimental and modeling insights**
Conférence Invitée
S. Lucas^{1,2}
¹ Ion Beam Applications, Louvain-la-Neuve (BE) - ² Univ. Namur (BE)
- 11:40 **#15 - Stratégie numérique d'AGLAÉ : de l'instrument scientifique au système socio-technique**
C. Pacheco
C2RMF - Lab-BC – Paris (FR)
- 12:00 **#38 - Fusion multimodale PIXE–RBS–RAMAN et apprentissage automatique pour la reclassification du monnayage en argent d'argos**
M.P. Bart¹, N. Gros¹, L. Baseil¹, C. Flament², F. Cecchet¹, J.L. Colaux¹, A. Mayer¹
¹ Département de Physique, Instituts NISM/PaTHs/naXys, Univ. Namur (BE)
² Département de Langues et Littératures Llassiques, Institut PaTHs, Univ. Namur (BE)
- 12:20 **#54 - Addressing corrosion in archaeological glass: multi-analytical protocol applied to gallo-roman glass for reliable data interpretation**
G. Morabito¹, L. Baseil¹, F. Cecchet¹, H. Laurent¹, J. Colaux¹
Univ. Namur (BE)
- 12:40 **Déjeuner**

JEUDI 10 SEPTEMBRE 2026

14:20 **Programme social**

Départ en autocar vers l'Abbaye de Maredsous (<https://tourisme-maredsous.be/>)

Croisière fluviale sur la Meuse en direction de Namur

19:45 Dîner de convivialité au restaurant Le Panorama (<https://www.panoramanamur.be/>)

VENDREDI 11 SEPTEMBRE 2026

Chair : **N. Moncoffre**

- 08:40 **INV-6 - La chimie sous rayonnement à l'interface (U,Pu)O₂/eau : de l'expérience à la modélisation**
Conférence Invitée
C. Jégou
LCLT, CEA Marcoule (FR)
- 09:20 **#12 - Accélération de l'évolution des défauts étendus dans la céramique combustible sous l'effet d'un apport d'énergie électronique**
G. Gutierrez¹, A. Georgesco¹, B. Ridard¹, F. Garrido², R. Nielsen¹, C. Onofri³
¹ *Univ. Paris-Saclay, CEA, SRMP, Gif Sur Yvette (FR)*
² *Univ. Paris-Saclay, CNRS, IJCLab Orsay, Gif Sur Yvette (FR)*
³ *CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache, St Paul lez Durance (FR)*
- 09:40 **#02 - Migration vers un système d'acquisition numérique pour l'analyse par faisceaux d'ions : retour d'expérience avec les numériseurs CAEN et gestion du bruit électronique**
P. Couture, G.W. Grime, V.V. Palitsin
Surrey Ion Beam Centre - Guildford (UK)
- 10:00 **#29 - Vers une simulation rapide des spectres en IBA : une nouvelle approche combinant physique de l'interaction et apprentissage automatique**
H. Khodja¹, F. Ammari
NIMBE CEA-CNRS - Saclay (FR)
- 10:20 *Pause (40')*
- 11:00 Clôture des Journées
- 11:30 Visite ALTAÏS
- 12:40 Déjeuner (pique-nique)

Merci à nos exposants partenaires :

GOLD sponsors :



SILVER sponsors :



BRONZE sponsors :



PROGRAMME POSTERS

MERCREDI 9 SEPTEMBRE 2026

1. Instruments et techniques de faisceaux d'ions

- #01** - Vingt ans d'innovations techniques et perspectives futures de la plateforme JANNuS-Saclay
B. Ridard¹, P. Billaud¹, G. Gutierrez¹, C. Bernard¹, H. Martin¹, F. Nozais¹, G. Sagnes¹, M. Thiebault¹, J.L. Bechade²
¹ CEA - S2CM/SRMP/JANNuS - Gif-Sur-Yvette (FR)
² CEA - INSTN Saclay - Gif-Sur-Yvette (FR)
- #51** - Complementary PIXE–RBS analysis for complex semiconductor nanostructures using multi-detector configurations
T. Vanmeerbeek^{1,2}, A. Vantomme¹, J. Meersschaut²
¹ KU Leuven - Leuven (BE)
² IMEC - Leuven (BE)

2. Physique des interactions ions-matière à toutes les échelles

- #06** - Proton-induced cross-section measurements for the characterization of Li-, F-, and B-based thin films
S. Sorieul¹, S. Pellegrino², S. Vaubailon³
¹ CNRS/LP2iB - Gradignan (FR)
² CEA - Saclay (FR)
³ UB/LP2iB - Saclay (FR)

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

- #17** - Approche métrologique pour fiabiliser le profilage de l'hydrogène par RNRA
C. Forgione¹, L. Dupont², P.L. Debarsy³, J.L. Colaux²
¹ Département de Physique, UNamur - Namur (BE)
² Département de Physique, NISM, UNamur - Namur (BE)
³ SIAM, UNamur - Namur (BE)
- #18** - Nettoyage contrôlé de l'extrême surface pour le profilage RNRA sur acier inox en contexte nucléaire
M. Fromont¹, L. Dupont², P.L. Debarsy³, J.L. Colaux²
¹ Département de Physique, UNamur - Namur (BE)
² Département de Physique, NISM, UNamur - Namur (BE)
³ SIAM, UNamur - Namur (BE)
- #32** - Films minces de SnO₂ à chimie des défauts contrôlée par ALD thermique : élucidation de la structure électronique gouvernée par les défauts pour le transport de charge
B. Xia, I. Vickridge, J.J. Ganem, E. Briand, S. Steydli
Institut des NanoSciences de Paris - Paris (FR)
- #57** - AI-assisted ion beam analysis: toward explainable and uncertainty-aware spectrum interpretation
M. Han¹, F. Garrido¹, H. Khodja²
¹ IJCLab - Orsay (FR)
² CEA/Saclay - Gif-Sur-Yvette (FR)
- #61** - Effet de l'élément d'alliage de fer sur la cinétique des défauts d'irradiation dans Ni-Fe
T. Bilyk, X. Glad, F. Nozais, G. Gutierrez, C.C. Fu
CEA Saclay - Gif-Sur-Yvette (France)

PROGRAMME POSTERS (SUITE)

5. Faisceaux d'ions pour les sciences de la Terre et de l'environnement

- #14** - Development of a compact low-background set-up for gamma spectroscopy
P-L. Debarsy¹, C. Stasser², G. Terwagne²
¹ SIAM – Univ. Namur (BE)
² Univ. Namur (BE)
- #19** - Study of the degradation of biosignatures under simulated martian irradiation using GEANT4
B. Duarte Dos Santos¹, A. Canizarès², P. Sigot², O. Wendling², A. Bellamy², W. Hate², T. Sauvage², F. Foucher²
¹ Univ. Orléans, CNRS, CEMHTI UPR 3079 - Orléans (FR)
² CNRS, Univ. Orléans, CEMHTI UPR 3079 - Orléans (FR)
- #20** - Au-delà des compositions moyennes : apport des cartographies μ -PIXE à l'étude des colorations exceptionnelles des spéléothèmes issus de la grotte de la Cigalère (Ariège, France)
M. Labruyère¹, L. Baseil², M. Vlieghe³, J. Yans³, J.L. Colaux²
¹ Département de Physique, UNamur (BE)
² Département de Physique, NISM, UNamur (BE)
³ Département de Géologie, ILEE, UNamur (BE)
- #53** - Traitement des PFAS par faisceau d'électrons à très haut débit de dose : une approche de modélisation radio-cinétique pour élucider la chimie radicalaire dépendante du débit de dose
R. Tonneau¹, R. Labarbe², S. Aude², G. Eppe³, J. Aline⁴, L. Stéphane¹, A.C. Heuskin¹
¹ Univ. Namur (BE)
² IBA - Louvain-la-Neuve (BE)
³ Univ. Liège (BE)
⁴ Haemers Technologies - Nivelles (BE)

SESSIONS CONFÉRENCES

Conférence invitée

CANALISATION D'IONS DANS LES OXYDES D'URANIUM

F. Garrido

Université Paris-Saclay, CNRS, IJCLab, Vallée des accélérateurs, Orsay Campus

Découverte dans les années 1960 par des études de simulation numérique et confirmée expérimentalement, la canalisation de projectiles chargées dans les solides monocristallins est l'une des manifestations les plus élégantes de l'interaction particule-matière. Elle permet l'étude de phénomènes physiques aussi différents que la cristallographie dans l'espace direct, la qualité surfaces et interfaces, l'endommagement consécutif à l'irradiation, la localisation d'hétéroatomes, la mesure du temps de vie de noyaux radioactifs, ou la déflexion d'un faisceau de particules au travers d'un cristal courbé. Parmi les solides d'intérêt, le dioxyde d'uranium a fait l'objet dès cette époque d'études pionnières, portés par son intérêt comme combustible nucléaire innovant, la richesse et complexité de la cristalochimie des oxydes d'uranium, mais également comme l'un des systèmes de choix pour l'étude fondamentale de la canalisation d'ions, en tant que solide diatomique associant des noyaux de grand et petit numéros atomiques. J'illustrerai cet exposé à l'aide d'exemples de l'utilisation de la canalisation d'ions issus de notre communauté et appliqués à différentes fins.

IBAF00008

MATRICES DE DIODES GaN POUR LA CARACTÉRISATION ET L'IMAGERIE DE FAISCEAUX D'IONS

S. Higuieret¹, N. Brosda², F. Catania³, J.Y. Duboz³, E. Frayssinet³, M. Hugues³, M. Siviero³

¹ IPHC / IN2P3 / CNRS / Université Strasbourg (France)

² Ruhr-Universität Bochum (Germany)

³ Université Côte d'Azur CRHEA-CNRS (France)

Les faisceaux de protons permettent un dépôt d'énergie hautement localisé, ce qui les rend intéressants pour des applications d'imagerie et d'irradiation. Leur caractérisation requiert des détecteurs combinant une excellente résolution spatiale, une mesure de l'intensité sur cible et une stabilité sous irradiation dans la gamme 1 à 230 MeV. Dans ce contexte, nous étudions l'utilisation de matrices de diodes pin en nitrure de gallium (GaN) [1], pour la caractérisation et l'imagerie. Le principe de détection repose sur la collecte des charges générées par les paires électron-trou créées dans la zone déplétée du composant. Des matrices linéaires de 128 pixels ainsi que bidimensionnelles de 11×11 pixels ont été développées, avec des résolutions spatiales atteignant 250×500 μm², et une augmentation de cette résolution est en cours. Les détecteurs ont été caractérisés sous irradiation protonique sur la plateforme CYRCé (IPHC, Strasbourg, 4-25 MeV). En combinant la géométrie des matrices à des platines de translation, des images d'objets placés dans la ligne de faisceau ont pu être reconstruites, puis comparées à des mesures de référence réalisées avec des films Gafchromic. Une imagerie résolue en temps du faisceau a également été démontrée, mettant en évidence le potentiel de ces détecteurs pour le suivi dynamique du faisceau. La sensibilité en énergie a été évaluée à l'aide de mesures effectuées derrière un absorbeur en coin, montrant que les matrices sont capables de résoudre des variations du profil liées à l'énergie des protons [2]. Des expériences menées sur les plateformes de faisceau extrait AIFIRA (Bordeaux) et ACACIA (Strasbourg) (< 4 MeV) ont en outre montré que ces matrices permettent de mesurer précisément l'intensité du faisceau sur cible et de déterminer son profil latéral au point d'impact, pour en vérifier la forme et l'homogénéité. Une étude de la diffusion a été réalisée. Les études en cours portent sur l'étude de la tenue aux radiations, l'évaluation des performances sous différentes conditions de faisceau et la simulation détaillée de la réponse détecteur afin d'optimiser de futurs systèmes d'imagerie basés sur le GaN. Deux nouveaux détecteurs matriciels, dédiés aux micro- et macro-faisceaux, avec des résolutions à une dimension inférieures à 10 μm, et à deux dimensions de 100 à 500 μm, sont actuellement en développement. Les premiers résultats seront présentés lors de la conférence.

Références

[1] GaN diodes comparative study for high energy protons detection

Journal of Semiconductors, 46, 092503, (2025)

[2] Developing a Gallium Nitride Detector for High-Energy Proton Beam Dosimetry and Imaging

2025 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS)

10.1109/NSS/MIC/RTSD57106.2025.11287133

IBAF00023

ET POURQUOI PAS EPICS ?

J. Jouve¹, L. Daudin¹, P. Alfaut¹, S. Sorieul¹, I. Tsekhanovich²

¹ CNRS - LP2IB - Gradignan (France)

² Université de Bordeaux - LP2IB - Gradignan (France)

La plateforme AIFIRA [1] (Applications Interdisciplinaires des Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine), exploite les faisceaux d'ions légers produits au LP2I-Bordeaux par un accélérateur électrostatique (Singletron, HVEE 3.5MV) couplé à 5 lignes de faisceaux pour l'analyse et l'irradiation d'échantillons biologiques, matériaux, détecteurs ...

Cette plateforme est opérationnelle depuis près de 20 ans. Actuellement des travaux de rénovation sont en cours afin de (i) remplacer progressivement les équipements devenus obsolètes, (ii) améliorer les performances des outils d'analyses et d'irradiation (optimisation des temps d'analyse, fiabilité accrue, automatisation, ...).

Concernant les chambres d'analyses, le déploiement du système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) EPICS permet de remplacer progressivement les anciennes interfaces principalement développées sous LabView tout en bénéficiant d'un système de contrôle distribué, modulaire, flexible, évolutif, open source proposant des outils développés collaborativement par la communauté EPICS

Nous proposons, de revenir sur les premières années de la mise en œuvre de ce système sur la plateforme, les apports des nouveaux outils mis en place (contrôle d'instruments, monitoring & archivage de données), ainsi que les perspectives de développement que nous envisageons pour AIFIRA.

Références

[1] P. Barberet, J. Jouve, S. Sorieul, P. Alfaut, L. Mathieu, AIFIRA: a light ion beam facility for ion beam analysis and irradiation, Eur. Phys. J. Plus 136:67. DOI : 10.1140/epjp/s13360-020-01045-9

IBAF00055

CIBLES RÉFÉRENCE POUR RBS

I. Vickridge¹, R. Webb², J. Meerschaut³

¹ SAFIR, INSP, CNRS et SU - Paris (France)

² UKNIBC - Surrey (United Kingdom)

³ IMEC - Leuven (Belgium)

La quantitativité absolue de la RBS découle de la section efficace de diffusion élastique de Rutherford WR, connue analytiquement. Dans un spectre présentant plusieurs pics isolés correspondant à différents éléments dans une couche mince superficielle, le rapport des surfaces des pics donne directement le rapport des densités surfaciques des atomes concernés. Pour les cibles épaisses, c'est le rapport des hauteurs de signaux qui donne le rapport des concentrations volumiques (et les profils de concentration). Mais dans les deux cas des mesures absolues nécessitent la connaissance quantitative de l'angle solide et l'angle de diffusion défini par le détecteur de particules, l'énergie absolue et le nombre de particules incidents du faisceau. Il est notoirement difficile d'établir la valeur de ces paramètres avec précision. C'est pour cela que, depuis les premiers pas de la RBS, les expérimentateurs ont eu recours à des cibles de référence [1–4] composées d'une couche fine (déposée ou implantée) d'un élément lourd, dont la densité surfacique est connue, sur ou dans un substrat léger. La surface du pic isolé permet d'établir le lien quantitatif entre les surfaces des pics et les densités surfaciques. Ces cibles références sont aujourd'hui épuisées. Il a été montré que la hauteur du plateau du Si obtenue sur une plaquette de Si dont la surface a été amorphisée peut aussi servir de signal référence pour la RBS [5], mais cette méthode est sensible aux erreurs d'étalonnage en énergie du spectre, et aux incertitudes dans le pouvoir d'arrêt du Si.

Dans le cadre du projet européen RADIATE [6] nous avons préparé des cibles références avec $(6.0 \pm 2\%) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ de ^{209}Bi implanté à 30 keV (R_p 18 nm, ΔR_p FWHM= 7.8nm) (Surrey Ion Beam Centre) dans une couche amorphe de 100nm Si_3N_4 sur 10 plaquettes 100mm de Si (University Wafer, états unis). Des mesures RBS (SAFIR) montrent sur une plaquette un écart type σ de 0.85% dans la quantité de Bi, devant un écart type attendu du statistique de comptage de 0.64%. Par ailleurs des mesures par ellipsométrie montrent des fluctuations d'épaisseur de la couche Si_3N_4 intra- and inter-plaquette inférieures à 1% (1σ). Les plaquettes sont découpées dans un total de plus de 500 échantillons de 1x1 cm (IMEC, Leuven). Ces échantillons peuvent servir aussi bien comme références RBS que comme références pour la quantité d'azote en NRA.

Références

- [1] S. Rigo, C. Cohen, A. L'Hoir, E. Backelandt, Nucl Instrum Methods. 149 (1978) 721.
- [2] U. Wätjen, H. Bax, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 85 (1994) 627–632
- [3] C. Cohen, J.A. Davies, A. V Drigo, T.E. Jackman, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. 218 (1983) 147.
- [4] J.L. Colaux, C. Jeynes, Anal. Methods. 6 (2014) 120–129.
- [5] M. Bianconi, F. Abel, J.C. Banks, A.C. Font, C. Cohen, B.L. Doyle, R. Lotti, G. Lulli, R. Nipoti, I.C. Vickridge, D. Walsh, E. Wendler, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 161–163 (2000) 293–296.
- [6] RADIATE, Grant Agreement 824096 from the EU Research and Innovation programme HORIZON 2020.

Remerciements

This work benefitted from Transnational Access to the Surrey Ion Beam Centre for high precision ion implantation, within the RADIATE consortium (see [6] above).

IBAF00056

RÉSOLUTION EN ÉNERGIE D'UN DÉTECTEUR PIPS : DÉFINITION ET SPECTROSCOPIE IBA

T. Sauvage, A. Bellamy, O. Wendling, P. Sigot, W. Hate, F. Foucher, B. Diallo

CNRS CEMHTI UPR 3079, Université d'Orléans - Orléans (France)

Les détecteurs PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) sont les détecteurs semi-conducteurs les plus utilisés pour la détection de particules nucléaires lors de la mise en œuvre des techniques IBA (Ion Beam Analysis). Ils détectent les particules nucléaires légères, issues de réactions nucléaires élastiques ou inélastiques avec un intérêt principal, qui est leur excellente résolution en énergie.

Les techniques IBA, particulièrement RBS et NRA 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. Dans ces problématiques, l'objectif de l'utilisateur est de réaliser des profils en profondeur avec une résolution en profondeur optimisée pour en extraire des données fondamentales, telles que coefficients de diffusion et énergie d'activation. Plusieurs paramètres intrinsèques à l'analyse RBS et NRA conditionnent la résolution en énergie du spectre et directement la résolution en profondeur du profil en profondeur. Les principaux sont les pouvoirs d'arrêts des particules incidentes et détectées, la cinématique de la réaction nucléaire, les paramètres géométriques (angles d'entrée et de sortie, ainsi que l'intégration de la cinématique dans l'angle solide de détection). Un autre paramètre primordial est la résolution en énergie du détecteur PIPS. Il dépend de l'épaisseur des zones morte et déplétée, de la physique de détection d'une particule nucléaire (importance du terme de perte d'énergie nucléaire), mais aussi du bruit. Les sources de bruit sont multiples (i) intrinsèques au détecteur et à l'électronique nucléaire et (ii) extérieures telles que boucle de masse, qualité du blindage des câbles et des connecteurs, bruit microphonique (vibrations mécaniques du détecteur) et présence d'émetteurs haute fréquence à proximité de l'expérience (contrôleurs de turbopompes, ...).

Les objectifs de cette présentation sous forme de revue est (i) de qualifier les différents termes composant la résolution en énergie d'un détecteur PIPS avec un rappel sur la physique de détection, (ii) de peser l'importance de chaque terme, (iii) de présenter des mesures de résolution en énergie d'un détecteur PIPS 25mm² (300μm) avec une source alphas ²⁴¹Am dans différentes configurations expérimentales (avec et sans boucle de masse, turbopompe ON/OFF...) et (iv) de présenter des spectres RBS et NRA pour mettre en exergue la nécessité d'une bonne connaissance des différents termes composant la résolution en énergie d'un détecteur PIPS pour éviter les biais d'interprétations.

Conférence invitée

EMERGING PARTICLE THERAPY STRATEGIES: PROTON MINIBEAM RADIATION THERAPY, ION MINIBEAM RADIATION THERAPY, AND PARTICLE FLASH RADIOTHERAPY

Y. Prezado

CiMUS, St-Jacques de Compostelle (Espagne)

Particle therapy is undergoing a major transformation driven by the development of innovative irradiation strategies aimed at increasing the therapeutic index by enhancing tumor control while minimizing normal tissue toxicity. Among the most promising approaches are Proton Minibeam Radiation Therapy (pMBRT), Ion Minibeam Radiation Therapy (iMBRT), and particle FLASH radiotherapy, all of which have demonstrated remarkable potential in preclinical studies.

Proton Minibeam Radiation Therapy employs arrays of submillimetric proton beams to create highly spatially modulated dose distributions. This approach has been shown to significantly improve normal tissue preservation while maintaining, and in some cases enhancing, tumor control. Building upon this concept, Ion Minibeam Radiation Therapy extends spatial fractionation to heavier ions, combining the favorable radiobiological properties of charged particles with the tissue-sparing benefits of minibeam irradiation. These characteristics make iMBRT particularly attractive for the treatment of radioresistant and deep-seated tumors.

In parallel, particle FLASH radiotherapy delivers therapeutic doses at ultra-high dose rates, typically exceeding 40 Gy/s, producing the so-called FLASH effect: a remarkable reduction in radiation-induced damage to normal tissues while preserving antitumor efficacy. The integration of spatially fractionated minibeam with ultra-high dose rate delivery has recently emerged as an exciting research avenue, with the potential to further enhance the therapeutic window of particle therapy.

This lecture will provide an overview of the physical, dosimetric, and radiobiological principles underlying these emerging modalities. Key preclinical findings, proposed biological mechanisms, technological challenges, and ongoing efforts toward clinical translation will be discussed. Particular attention will be given to the opportunities offered by combining spatial fractionation and ultra-high dose rate irradiation, highlighting how these strategies may contribute to the next generation of precision radiotherapy treatments.

IBAF00004

COMPARISON OF CELLS RESPONSES UPON IRRADIATION WITH α -PARTICLES VS X-RAYS

E. Rapport^{1,2}, N.R. Reynaert¹, S.P. Penninckx¹, C.M. Michiels²

¹ Radiophysics Laboratory, Institut Jules Bordet, Université Libre de Bruxelles (Belgium)

² Unité de Recherche en Biologie cellulaire (URBC), Namur Research Institute for Life Sciences (NARILIS), Université de Namur - Namur (Belgium)

Introduction: While conventional radiotherapy has achieved a high degree of precision, its reliance on radiation with low linear energy transfer (LET) limits its relative biological effectiveness (RBE), which complicates the treatment of aggressive or radiation-resistant tumours. In order to achieve more efficient treatment, i.e. as precise but with a higher RBE, numerous therapies are currently under development, such as BNCT (boron neutron capture therapy), which generates α -particles from an interaction between low-energy neutrons and a boron compound. The aim of this project was therefore to evaluate the effects of external α -particle radiotherapy, both as a model for this technique and as a form of hadrontherapy using heavy particles.

Methods: SCC-VII cells were irradiated with X-rays or α -particles (at 1.47 MeV, LET = 198 keV/ μ m). Clonogenic assays assessed cell survival. DNA double-strand break induction and repair were studied via H2AX phosphorylation immunofluorescence labeling. Immunogenic cell death was evaluated by calreticulin exposure (FACS) and HMGB1 release (ELISA). Apoptosis and necrosis were measured using Annexin-V/PI, and ferroptosis, for which lipid peroxidation was assessed using BODIPY C11 dye (FACS).

Results: A RBE of 1.5 was observed for α -particles. DNA damage induction and repair were greater after α -particle irradiation. X-rays induced early calreticulin exposure (24h) decreasing by 72h, while α -particle caused a delayed, weaker increase (48h-72h). HMGB1 release was higher following X-rays. Neither apoptosis nor necrosis was induced by α -particle, with many cells remained viable. Ferroptosis was strongly induced at 96h after α -particle, whereas X-ray caused a moderate increase from 72h.

Conclusions: Our results indicate marked differences in cellular responses upon irradiation with α -particles compared to X-rays. α -particles appear more effective at inducing clonogenic cell death. This effect is not explained by necrosis or apoptosis and is associated with a stronger induction of ferroptosis, while X-rays preferentially induced immunogenic cell death. Analyses of additional markers will be performed to further characterize responses to high-LET radiation.

IBAF00013

INFLUENCE DU TRANSFERT LINÉIQUE D'ÉNERGIE SUR L'EFFET FLASH PAR IRRADIATION D'EMBRYONS DE CAENORHABDITIS ELEGANS

H. Stimoli, L. Schoenauen, A.C. Heuskin

Namur Research Institute for Life Sciences, University of Namur, Belgium - Namur (Belgium)

Contexte et objectifs

La radiothérapie FLASH est une approche émergente reposant sur l'administration d'une dose de rayonnement à des débits de dose ultra-haut (UHDR, >40 Gy/s), par opposition aux débits de dose conventionnels (CDR, 2 Gy/min) utilisés en radiothérapie. De nombreuses études rapportent qu'une irradiation en UHDR réduit les dommages aux tissus sains tout en maintenant un contrôle équivalent à celui observé après une irradiation en CDR, phénomène désigné sous le terme d'« effet FLASH ». Cet effet a été décrit pour plusieurs types de particules (électrons, protons, alphas, ions carbone, rayons X), mais les mécanismes sous-jacents à cet effet sont encore largement débattus. Notre objectif est d'étudier l'impact du transfert linéique d'énergie (LET) sur l'induction de l'effet FLASH, en utilisant un faisceau de protons d'une énergie de 4 MeV (LET = 10 keV/μm) et 1,5 MeV (LET = 25 keV/μm), ainsi qu'un faisceau d'ions hélium d'une énergie de 6 MeV (LET = 100 keV/μm). Pour ce faire, nous avons utilisé *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) comme modèle *in vivo*. *C. elegans* est un nématode microscopique et a été choisi en raison de sa facilité d'entretien, de son cycle de développement rapide et de ses réponses comportementales bien caractérisées.

Méthodes

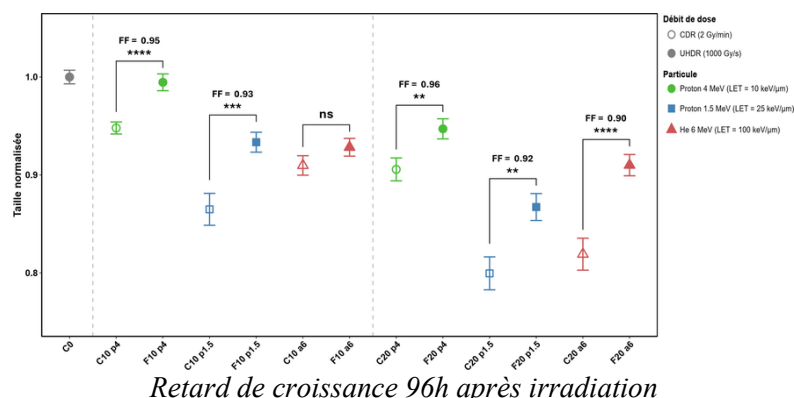
Des embryons de *Caenorhabditis elegans* ont été irradiés au laboratoire LARN (UNamur) à l'aide de l'accélérateur linéaire tandetron ALTAIS, à des doses de 10 et 20 Gy, selon deux modalités de débit de dose : conventionnel (CDR, 2 Gy/min) et ultra-haut (UHDR, 1000 Gy/s). Trois faisceaux distincts ont été utilisés : des protons de 4 MeV, des protons de 1,5 MeV et des ions hélium de 6 MeV. Quatre jours après l'irradiation, le retard de croissance des vers adultes a été évalué par mesure de leur taille (n = 200 vers par condition). L'effet FLASH a été quantifié en calculant un facteur FLASH (FF), défini comme le rapport de la taille moyenne normalisée de la population en CDR sur celle en UHDR à dose équivalente. Un FF < 1 indique une meilleure préservation des tissus après une irradiation en UHDR.

Résultats

Un effet FLASH significatif sur la croissance a été observé pour les trois types de faisceaux à 20 Gy, avec des FF de 0,96 (protons 4 MeV, $p \leq 0,01$), 0,92 (protons 1,5 MeV, $p \leq 0,01$) et 0,90 (ions hélium, $p \leq 0,0001$) (Figure 1). À 10 Gy, un effet significatif est observé pour les protons de 4 MeV (FF = 0,95, $p \leq 0,0001$) et les protons de 1,5 MeV (FF = 0,93, $p \leq 0,001$), tandis qu'aucune différence significative n'est détectée pour les ions hélium à cette dose. Dans tous les cas où l'effet est significatif, les vers irradiés en UHDR présentent une taille supérieure à ceux irradiés en CDR, indiquant une meilleure préservation du développement sous conditions FLASH.

Conclusions

Ces résultats montrent qu'une irradiation UHDR avec des particules de haut LET, y compris des ions hélium, peut préserver le développement de *C. elegans*. L'effet FLASH sur la croissance est observé pour les trois faisceaux testés à 20 Gy, et pour les deux faisceaux protons à 10 Gy. Ces travaux démontrent que *C. elegans* est un modèle *in vivo* pertinent pour étudier l'effet FLASH en fonction du LET, et ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension des mécanismes radiobiologiques impliqués dans la radiothérapie FLASH.



Conférence invitée

A FLEXIBLE PARAMETRIZATION OF THE ELECTRONIC STOPPING CROSS SECTION

J. Meersschaut

imec, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium

To accurately describe and predict experiments involving ion-beam modification or ion-beam analysis, it is essential to have reliable knowledge of fundamental physical parameters such as the scattering cross section, the nuclear reaction cross section, and the stopping cross section. Continuous improvements in these quantities are being realized through many experimental and theoretical contributions. The experimental data are accessible on the web through the Nuclear Data Section of the International Atomic Energy Agency [1].

The stopping cross section describes the rate of energy loss of an ion per unit path, normalized to the atomic density, and is often expressed in units of $\text{eV}/(10^{15} \text{ atoms}/\text{cm}^2)$. Its value depends on the type and velocity of the moving ion and on the target atoms. For practical use, empirical parametrization is needed because theoretical models cannot yet describe the stopping cross section with the required accuracy.

However, widely used stopping-data implementations such as ASTAR [1] and SRIM [2] have not been updated beyond 2003 [3]. At the same time, alternative modern implementations appear difficult to adopt in practical applications because they lack a standardized representation [4 - 6]. Therefore, we present a new analytical parametrization for the stopping cross section, called the double-Konac (dK) parametrization, and propose expressing its parameters in a uniform, open JSON format. In this way, parametrizations become traceable and facilitate intercomparison between different versions. This approach also enables swift adoption of new results as they become available.

We first demonstrate compatibility with existing work by presenting the parametrization for ASTAR, SRIM, and ESPNN. We then discuss the fidelity of the parametrization quantitatively in terms of the absolute percentage error.

To illustrate how the dK representation can incorporate new results, we present a version that accounts for experimental stopping-power data published between 2003 and 2025. As an example, Fig. 1 shows the stopping cross section for He in Si. The data points are taken from the IAEA database. The green dashed curve shows the SRIM-2003 output, while the red solid curve shows a fit that includes the experimental data published between 2003 and 2025. The various parameter sets are shared as open data [7] and can be downloaded from the web [8]. Each JSON file contains a complete set of parameters for estimating the stopping cross section for all ions in all elementary matrices. The new dK representation has been adopted in several simulation and data-analysis software programs, including software for the analysis of RBS spectra [9]. The importance of using an up-to-date parametrization of the stopping cross section will be discussed.

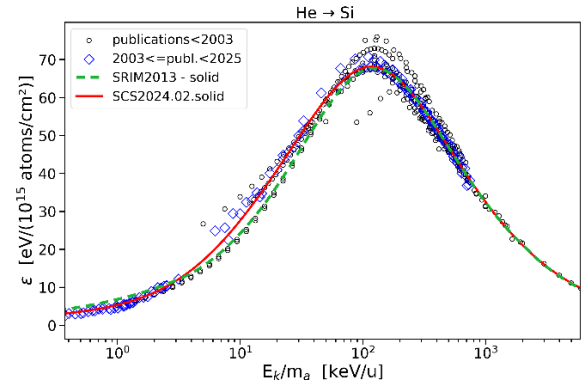


Fig. 1. Stopping cross section for He in Si as a function of the reduced energy. The data points are extracted from the IAEA database. The green dashed and red solid lines are two versions of the parametrization.

References

- [1] C.C. Montanari and P. Dimitriou, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 408 (2017) 50.
- [2] M.J. Berger et al. Journal of the ICRU 25 (1993) 1-68
- [3] J.F. Ziegler et al. The stopping and ranges of ions in matter Vol. 1 (1985), Pergamon press
- [4] W. A. Parfitt and R.B. Jackman, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 478 (2020) 21
- [5] X. Gou, H. Wang, C. Li, S. Zhao, K. Jin, and J. Xue, Chin. Phys. B 31 (2022) 073402
- [6] F. Bivort Haiek, A.M.P. Mendez, C.C. Montanari and D.M. Mitnik, J. Appl. Phys. 132 (2022) 245103
- [7] J. Meersschaut and S. Meersschaut, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 574 (2026) 166088.
- [8] <https://johan.meersschaut.net/scs/files>
- [9] R. Heller et al., J. Appl. Phys. 132 (2022) 165302

IBAF00003

ÉTUDE EN MICROPHOTOLUMINESCENCE ET ODMR DE CENTRES COLORÉS DU 4H SiC POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

J. Tribollet, E. Donadio, D. Muller, S. Roques, W. Uhring, C. Hofmann, L. Werling

Laboratoire ICube - CNRS - Université de Strasbourg - Strasbourg (France)

On présente ici la fabrication de centres colorés du 4H SiC de type mono-lacunes de silicium par implantation et recuit thermique, d'abord dans le SiC massif, puis dans des structures photoniques en SiCOI, ie SiC sur isolant (SiC On Insulator), de type guide d'onde optique. Ces lacunes de silicium sont à la fois des émetteurs de lumière et des centres paramagnétiques, avec une corrélation entre les propriétés optiques et les propriétés de spin permettant la détection optique par photoluminescence de leur résonance magnétique comme présentée ici (spectroscopie ODMR). Ces mono-lacunes de silicium du SiC 4H sont considérées comme d'excellents candidats pour des qubits de spins interfacés via la photonique intégrée [1,2,3]. On montre ici l'influence du choix des ions implantés permettant de les créer sur les températures optimales de recuit associées. On montre également comment la micro-photoluminescence confocale infra-rouge sur la tranche du SiC implanté en lacunes permet de vérifier le profil d'implantation dans le SiC. On présente également nos premiers résultats démontrant le guidage de la lumière de photoluminescence des lacunes de silicium du 4H SiC en guide d'onde SiCOI. La microphotoluminescence confocale infra-rouge en guide d'onde SiCOI combinée à l'ODMR, en développement à ICube, s'avère donc être un outli clé pour la caractérisation des qubits de centres colorés fabriqués par implantation ionique dans de futur dispositifs quantiques de photonique intégrée en SiCOI.

Références

- [1] D. M. Lukin, et al, Integrated Quantum Photonics with Silicon Carbide: Challenges and Prospects, Physical Review X 1, 020102 (2020)
- [2] J. Tribollet, et al., Shallow implanted SiC spin qubits used for sensing an internal spin bath and external YIG spins, Nanoscale 13, 13827 (2021)
- [3] S Castelletto, et al., Quantum systems in silicon carbide for sensing applications , Rep. Prog. Phys. 87, 014501 (2024)

Remerciements

Remerciements au laboratoire ICube pour les premiers financements interne type API, remerciement à l'Université de Strasbourg pour le financement IDEX du projet "CARSILIQ", remerciement à la Satt Conectus, pour le financement d'un projet de prématuration SiCOI, puis pour le financement du projet de Maturation SiCOI (en cours) visant au développement des Technologies Quantiques avec les centres colorés du SiC. Remerciements également au réseau RENATECH. Remerciements à Lucas Mari pour sa contribution durant son stage de master 2ème année.

IBAF00005

FORMATION OF ULTRA-THIN SC SILICIDE LAYERS: A MEDIUM-ENERGY ION SCATTERING STUDY

A. Vantomme¹, R. Holenak², K. Vomschee², E. Ntemou², T. Tran², B. Pollefliet³, C. Porret³,
R. Loo³, C. Merckling³, D. Primetzhofer²

¹ Quantum Solid State Physics, KU Leuven - Leuven (Belgium)

² Department of Physics and Astronomy, Uppsala University - Uppsala (Sweden)

³ imec - Leuven (Belgium)

Metal silicides (i.e., compounds of a metal with Si) are widely used as contact materials in CMOS devices. Moreover, they provide an ideal platform for studying thin-film reactions, whereby ion beam analysis (IBA) has been playing a key role. As device dimensions shrink and film thicknesses approach only several nanometer, new challenges emerge. In particular, resolving the various reaction stages requires significantly improved depth resolution. Recently, Sc-based silicides have been proposed as a promising contact material for NMOS technology, for reducing contact resistance to phosphorus-doped Si [1,2]. However, the reactivity of scandium with oxygen requires using a protective capping layer, which complicates IBA.

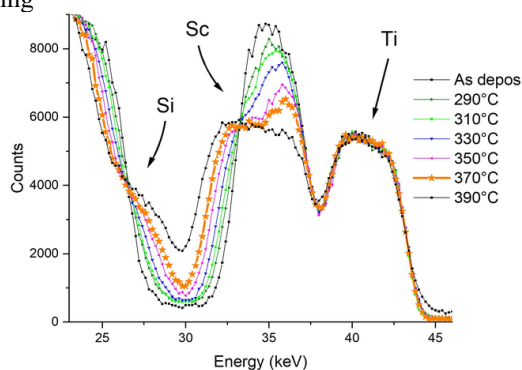
In this work, 15 nm Sc thin films were sputter-deposited and capped with 10 nm TiN without breaking the vacuum, using bare Si(100) substrates or Si(100) with a 40 nm, highly P-doped epitaxial Si:P layer (3%P), known to improve contact resistivity [1]. The film thickness and composition were verified using Rutherford backscattering spectrometry (using 2 MeV He), heavy ion elastic recoil detection analysis (using 36 MeV I⁸⁺), and transmission electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy. Silicide formation was studied after ex situ annealing in forming gas (N₂ + 5% H₂) between 310°C and 450°C using time-of-flight medium energy ion scattering (MEIS) with a pulsed 60 keV He⁺ beam [3].

Already in the as-deposited state, a thin intermixed Sc-Si interfacial layer is detected. This layer is amorphous and grows during the initial annealing stages, indicating solid-state amorphization. With increasing temperature, a gradually thicker (amorphous) silicide layer develops (Fig. 1). From the MEIS analysis, it is deduced that this silicide is slightly off-stoichiometric compared to ScSi. For both substrate types, growth proceeds in a layer-by-layer fashion, consistent with diffusion-limited kinetics. Via isothermal annealing (as a function of annealing duration) at various temperatures, the activation energy for diffusion is deduced. In the case of reaction with a Si:P layer, phosphorus redistributes non-uniformly during the reaction. Additionally, P incorporation leads to a slight reduction of the reaction rate (compared to pure Si), most pronounced at higher annealing temperatures.

Quantitative analysis of MEIS spectra is challenged by the lack of reference stopping power data for He in Sc [4]. Therefore, dedicated measurements were performed over a broad energy range. Preliminary results indicate that the stopping power at 60 keV is approximately 20-25% higher than predicted by SRIM, which allowed accurate analysis the MEIS data.

Références

- [1] C. Porret et al., IEEE IEDM Meeting (2022) p. 34.1.1.
- [2] B. Pollefliet et al., Jap. J. Appl. Phys. 63 (2024) 02SP97
- [3] M.K. Linnarsson et al., Rev. Sci. Instrum. 83 (2012) 095107.
- [4] <https://www-nds.iaea.org/stopping>



60 keV He MEIS spectra of <Si>/Si:P(3 at.%)/Sc/TiN

IBAF00011

RÔLE DU COUPLAGE IMPURETÉS–DÉFAUTS DANS LA STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DES OXYDES À LARGE BANDE INTERDITE DÉPOSÉS PAR ALD

B. Xia, E. Briand, S. Steydli, J-J. Ganem, I. Vickridge

Institut des NanoSciences de Paris (France)

La structure électronique des oxydes à large bande interdite n'est généralement pas déterminée uniquement par la stœchiométrie idéale du volume, mais résulte d'interactions complexes entre défauts et impuretés extrinsèques. Nous montrons ici que, dans des films de ZrO_2 déposés par dépôt de couches atomiques (ALD, atomic layer deposition), l'incorporation de l'hydrogène et les défauts liés à l'oxygène sont intrinsèquement couplés et modifient collectivement la densité d'états électroniques à proximité des bords de bande. Les analyses compositionnelles absolues par faisceaux d'ions (IBA) révèlent des concentrations importantes d'hydrogène corrélées à la non-stœchiométrie, tandis que les mesures spectroscopiques mettent en évidence l'émergence d'états de queue de bande induits par les défauts, à la fois dans les états électroniques occupés et inoccupés.

Ces observations ne peuvent pas être décrites par des modèles de défauts ponctuels isolés, mais indiquent plutôt une réorganisation de la structure électronique induite par le désordre, médiée par des complexes impureté–défaut. Nos résultats établissent la physique des défauts contrôlés par les impuretés comme un mécanisme clé gouvernant le comportement électronique du ZrO_2 non stœchiométrique, avec des implications pour une large classe d'oxydes diélectriques.

IBAF00009

ANALYSE PAR FAISCEAUX D'IONS : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE À L'OXYDATION À HAUTE TEMPÉRATURE D'ALLIAGES COMMERCIAUX DE TITANE α ET QUASI- α POUR L'AÉRONAUTIQUE

L. Lavis¹, V. Optasanu¹, C. Marco De Lucas¹, S. Sorieul², J. Jouve², D. Kuczynska-Zemla³, P. Berger⁴, J.M. Jouvard¹, T. Montesin¹

¹ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - UBE - Dijon (France)

² Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - UBE - Bordeaux (France)

³ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - UBE - Varsovie (Pologne)

⁴ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne - UBE - Saclay-Dijon (France)

Il est toutefois largement utilisé en raison de ses propriétés physico-chimiques intéressantes, parmi lesquelles se distinguent sa résistance à la corrosion humide — en particulier dans les environnements salins — et à la corrosion sèche — à des températures moyennes, légèrement inférieures à 600 °C —, ainsi que ses propriétés mécaniques et sa résistance à la fatigue. De plus, puisque la densité du titane est presque moitié moindre que celle des superalliages à base nickel, son utilisation dans les parties médianes en termes de température dans les turboréacteurs d'avion est assez intéressante. Pourtant l'extension de son usage à des zones plus chaudes se heurte à une perte de ses propriétés particulièrement rapide au-delà de 600°C. C'est pour cela que plusieurs voies d'études sont conduites en vue d'augmenter le domaine d'utilisation des alliages de titane à haute température, comme le développement de nouveaux alliages et de prétraitements thermomécaniques.

Cette communication présente deux études portant chacune sur un alliage de titane quasi- α :

La première étude a exploré la réalisation d'un nouvel alliage pour l'aéronautique de composition proche à l'alliage commercial Ti6242S, mais plus résistant à l'oxydation jusqu'à 650°C sur des durées allant jusqu'à 3000 h, en conservant un bon comportement en dwell-fatigue.

La deuxième étude porte sur la mise au point de prétraitements laser de surface susceptible d'améliorer la tenue en oxydation de l'alliage Ti834 à 650°C. Il s'agit d'un travail en collaboration entre le Dr. D. Kuczynska-Zemla du MRC (Université Cardinal Stefan Wyszyński, Varsovie) à travers un projet financé par la National Research Agency (Pologne).

Les analyses par faisceaux d'ions ont permis de localiser en profondeur et latéralement, l'azote inséré au cours des expositions à haute température à l'air jusqu'à 3000 h, ainsi qu'au cours des prétraitements laser de surface. On a également pu suivre la quantité d'azote insérée avec la durée d'exposition et montrer son évolution en fonction des éléments d'addition présents et de leurs concentrations, ou en fonction des conditions des traitements laser de surface. Des analyses complémentaires par MEB et MET ainsi que des analyses de phases ont été aussi conduites conjointement.

Ces deux études complémentaires ont permis d'une part, au niveau fondamental, de mieux comprendre le rôle de l'azote atmosphérique sur la résistance à l'oxydation à haute température des alliages de titane quasi- α , et d'autre part, de valider des associations d'éléments d'addition qui améliorent leur tenue à haute température.

Références

- [1] B. Vincent, V. Optasanu, F. Herbst, S. Chevalier, I. Popa, T. Montesin, L. Lavis, Comparison between the oxidation behaviors of Ti6242S, Ti6246, TiXT alloys, and pure titanium, *Oxid. Met.* 96 (3–4) (2021) 283–294, <http://dx.doi.org/10.1007/s11085-021-10051-w>.
- [2] L. Lavis et al., « Tracking the role of nitrogen in the improvement of the high temperature oxidation resistance of titanium by mechanical treatments », *Corrosion Science*, vol. 197, p. 110080, avr. 2022, doi: 10.1016/j.corsci.2021.110080.
- [3] D. Kuczyńska-Zemla et al, Microstructural influence on high-temperature oxidation of near- α titanium alloys: Timetal 834 and 6242S, *Corrosion Science* 255 (2025) 113081
- [4] V. Optasanu, B. Vincent, P. Berger, M.C. Marco de Lucas, T. Montesin, L. Lavis, The influence of Si on the high-temperature oxidation of near-alpha titanium alloys, *High Temp. Corros. Mater.* (2024) <http://dx.doi.org/10.1007/s11085-024-10310-6>.

Remerciements

Les auteurs remercient particulièrement les équipes de sondes nucléaires, d'une part de la plateforme AIFIRA à Gradignan et celle du LEEL-NIMBE au CEA de Saclay pour leur aide et leur disponibilité.

IBAF00026

QUANTIFICATION DE L'AZOTE SUR TITANE GRENAILLÉ EXPOSÉ À HAUTE TEMPÉRATURE

V. Optasanu, L. Lavis, T. Sauvage

ICB UMR 6303 CNRS, UBE - Dijon (France)

Ce travail expose la quantification de l'azote d'un titane commercialement pur (>99,6 %) traité sous azote après un traitement mécanique de surface. Le traitement de grenaillage produit une intense fracturation des grains de titane en sous-surface et introduit une forte densité de dislocations, qui sont susceptibles de modifier la réactivité du matériau à haute température. Du fait de l'occupation des mêmes sites interstitiels par les atomes d'azote et d'oxygène [1], la présence renforcée d'azote peut modifier la réactivité du Titane sous une atmosphère oxydante. Nos précédents travaux ont montré qu'après une oxydation de 100h sous air, le titane grenaillé s'oxydait moins que le titane non-traité mécaniquement et présentait une couche riche en azote continue à l'interface entre l'oxyde et le métal [2–4]. Nous avons donc souhaité étudier l'effet du grenaillage sur l'insertion d'azote lors des premiers instants d'oxydation.

Le traitement de grenaillage a été effectué à l'aide d'un système rotatif FlapSpeed à une vitesse de rotation de 6000 tr/min en utilisant de petites billes de WC collées sur une hélice de kevlar. L'intensité du traitement a été variée en maîtrisant le taux de recouvrement. Des recouvrements de 100%, 500%, 1000%, 2000% et 3000% ont été effectués. Les échantillons ont été exposés sous azote à 650°C pendant 1h.

La concentration d'azote dans les échantillons a été mesurée par faisceau d'ions au laboratoire CEMHTI d'Orléans (réseau EMIR&A). Un faisceau de deutérons de 0,95MeV a été utilisé pour enregistrer les spectres RBS et NRA. Le logiciel SIMNRA a servi pour quantifier les éléments légers et retrouver le profil de concentration en profondeur.

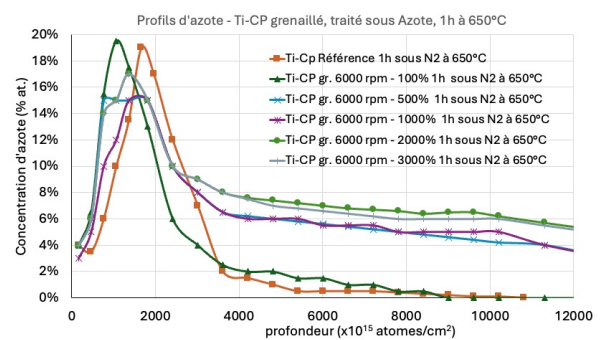
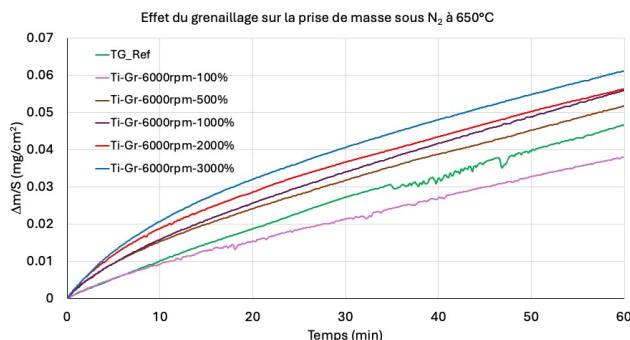
Une prise de masse d'autant plus importante que l'intensité du grenaillage a été fort a été constatée (Figure 1). Les mesures NRA montrent une oxydation des échantillons accompagnée d'une diffusion d'oxygène et azote en solution solide dans le titane. Les épaisseurs d'oxyde se situent entre 110 nm et 160 nm. La concentration maximale d'azote mesurée est de ~20% atomique, le pic maximum se situant à l'interface oxyde/métal. Les profils de diffusion suggèrent une composition moyenne de la solution solide d'azote et oxygène allant jusqu'à 25% d'oxygène et 8% d'azote.

L'étude des profils de diffusion de l'azote (Figure 2), combiné avec les études par DRX, les analyses MEB et les analyses par nanoindentation des section transverse des échantillons ont pu montrer la complexité des phénomènes apparaissant dans les échantillons grenaillés exposés à une atmosphère riche en azote.

Cette étude ouvre la voie à de nouveaux traitements destinés à faciliter la diffusion de l'azote dans le titane, dans le but de limiter l'accès de l'oxygène en favorisant l'occupation par l'azote des sites octaédriques de la maille cristalline du métal et appauvrissant ainsi la place disponible pour l'oxygène. Du fait que l'azote diffuse beaucoup plus difficilement dans le titane que l'oxygène [5], sa présence pourrait représenter un frein à la formation d'alpha-case et ainsi diminuer la fragilité des pièces exposées à haute température.

Remerciements

Remerciements au réseau AMIR&A et au laboratoire CEMHTI pour le temps de faisceau nécessaire à cette étude.



IBAF00043

CARACTÉRISATION PAR IBA DES ÉLÉMENTS LÉGERS DANS LE FILM PASSIF DE L'ACIER INOXYDABLE 316L

B. Lathuilière¹, N. Bérerd¹, N. Moncoffre², E. Ramet², J. Colaux³, P.L. Debarsy⁴, B. Xia⁵, E. Briand⁵, I. Vickridge⁵

¹ Université de Lyon, université Lyon 1, IUT Lyon 1-département de chimie, Villeurbanne, France - Lyon (France)

² Université de Lyon, IP2I UMR 5822 CNRS Villeurbanne, France - Lyon (France)

³ Université de Namur, Namur Institute of Structured Matter, Namur, Belgique - Namur (Belgium)

⁴ Université de Namur, Synthesis, Irradiation and Analysis of Materials (SIAM) platform, Namur, Belgique - Namur (Belgium)

⁵ Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, SAFIR, F-75005 Paris, France - Paris (France)

L'objectif de cette étude vise à caractériser les éléments légers présents dans le film passif formé à la surface de l'acier inoxydable 316L. Ce film passif, d'une épaisseur de quelques nanomètres, présente une structure duplex composée d'une couche interne dense riche en oxyde de chrome, assurant la protection contre la corrosion, et d'une couche externe d'hydroxyde de fer [1].

Cette étude s'inscrit dans un projet étudiant l'impact de la radiolyse d'une solution aqueuse à l'interface avec l'acier inoxydable 316L. Sous irradiation, la radiolyse de l'eau génère des espèces réactives susceptibles de modifier localement la composition chimique et la structure du film passif. Or, le modèle proposé par Okamoto suggère la présence de molécules d'eau liées au sein du film passif [2]. Ces dernières peuvent être irradiées et les produits de radiolyse créés au sein même du film sont susceptibles d'influencer les mécanismes de corrosion. L'étude des éléments légers, en particulier l'hydrogène et l'oxygène, permet de caractériser l'évolution du film passif en fonction de différentes conditions expérimentales. Elle constitue un défi expérimental en raison de la très faible épaisseur du film passif ainsi que de la cinétique rapide des phénomènes de radiolyse à l'interface solide-liquide. Dans ce travail, la caractérisation du film passif a été réalisée à l'aide de techniques d'analyses par faisceaux d'ions : ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) et analyse par réaction nucléaire. Les expériences ont été menées à l'Institut Namurois de la Matière Structurée (Université de Namur), dans le cadre du réseau NFFA (Nanoscience Foundries and Fine Analysis), ainsi qu'à l'Institut des NanoSciences de Paris (Sorbonne Université), dans le cadre du réseau EMIR&A.

Pour étudier la présence de l'eau liée dans le film passif, une approche comparative de l'analyse d'hydrogène par ERDA [3] a été mise en place sur des échantillons préparés dans deux électrolytes différents : un électrolyte à base d'eau ultrapure contenant du Na₂SO₄ et un électrolyte équivalent réalisé à partir d'eau deutérée (D₂O, 99,90 %). L'utilisation du deutérium permet de distinguer les contributions associées à l'hydrogène provenant du milieu aqueux de celles présentes dans l'échantillon avant le début de l'expérience. Parallèlement, afin d'évaluer l'influence des conditions de préparation des échantillons sur la quantité d'eau liée au sein du film passif, la distribution de l'oxygène a été étudiée grâce à la réaction nucléaire ¹⁶O(d,p)¹⁷O [3]. Cette technique permet une analyse quantitative de l'oxygène dans les premières dizaines de nanomètres de l'échantillon.

Par ailleurs, la caractérisation de l'hydrogène a également été réalisée à l'aide de la réaction nucléaire résonante ¹H(¹⁵N, αγ)¹²C [4] sur des échantillons irradiés in situ dans un électrolyte. Ces expériences ont été menées en faisant varier la dose déposée à l'aide d'un faisceau de protons à l'interface acier-solution afin d'estimer l'influence de la radiolyse sur la concentration de l'hydrogène au sein du film passif.

L'ensemble de ces résultats est discuté afin de dégager des mécanismes d'évolution du film passif sous irradiation.

Références

[1] B. Baroux, G.B., & C. Lemaitre, Passivité et rupture de la passivité des acier inoxydable, chapitre : 5. Aciers Inox. (Les éditions de physique, 1990), pp. 161–182. 1990.

[2] Okamoto, G., Passive film of 18-8 stainless steel structure and its function. Corrosion Science, 1973.

[3] V. Quillet, F. Abel, and M. Schott, Absolute cross section measurements for H and D elastic recoil using 1 to 2.5 MeV 4He ions, and for the ¹²C(d,p)¹³C and ¹⁶O(d,p)¹⁷O nuclear reactions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1993. 83(1): p. 47-61

[4] M. Wilde & K. Fukutani, Hydrogen detection near surfaces and shallow interfaces with resonant nuclear reaction analysis. Surface Science Reports, 69 (2014) 196–295. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.08.002>.

IBAF00031

ÉTUDE DE SORPTION D'ÉLÉMENTS LÉGERS ISSUS DE $^{13}\text{CO}_2$, $^{12}\text{CD}_4$ ET $^{13}\text{CH}_4$ DANS DES FILMS GETTER YTTRIUM ET $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$

H. Nabil¹, T. Sauvage², C. Kutyla¹, C. Bessouet¹, M. Alfazzaa³, A. Bosseboeuf¹, A. Bellamy³,
O. Wendling³, J. Moulin¹

¹ Centre des nanosciences et nanotechnologies - Paris (France)

² Conditions extrêmes et matériaux : Haute température et irradiation (France)

³ Conditions extrêmes et matériaux : Haute température et irradiation - Orléans (France)

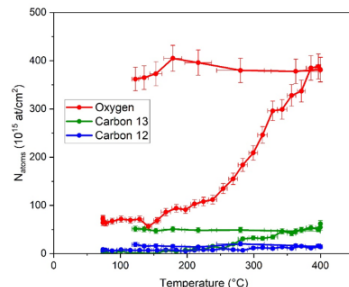
Les getters sont des matériaux capables de sorber des molécules gazeuses. Ils sont principalement utilisés dans les instruments de grande taille pour maintenir un vide extrême ($P < 10^{-10}$ mbar)[1], mais aussi dans le domaine des systèmes micro électromécaniques (MEMS), pour certains dispositifs qui doivent être maintenus sous vide pour fonctionner de manière optimale tout au long de leur durée de vie (20 ans)[2]. Pour ce faire, des films getter en couche mince sont déposés dans la microcavité afin de compenser les fuites et le dégazage lors du scellement. Pour acquérir leur capacité de sorption, les films getter doivent être chauffés au-delà de leur température d'activation, ce qui entraîne une diffusion profonde de l'oxygène de la couche de passivation superficielle. Les atomes métalliques ainsi présents à la surface seront alors capables de sorber toute nouvelle molécule de gaz qui apparaîtrait, et de maintenir ainsi le vide. Dans cette application, la sorption de tous les gaz est essentielle. Les développements actuels concernent en particulier la sorption irréversible de l'hydrogène et des hydrocarbures. Des travaux antérieurs ont montré que l'yttrium et l'alliage $\text{Y}_x\text{Ti}_{1-x}$ sont de très bons matériaux getter, capables de sorber massivement des molécules d'oxygène[3] et de sorber de manière irréversible l'hydrogène[3]. Dans ce travail, nous étudions la sorption du carbone à partir de gaz isotopiques $^{13}\text{CO}_2$, $^{12}\text{CD}_4$ et $^{13}\text{CH}_4$ dans deux films getter de 200 nm d'épaisseur : un film d'yttrium pur et un film d'alliage $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$. Les deux films getter ont été caractérisés par analyse des réactions nucléaires in situ (NRA) lors d'une rampe de température de 5 °C/min, de la température ambiante à 400 °C. La pression partielle des gaz contenant du carbone a été maintenue à 10^{-4} mbar pendant les mesures. Les analyses NRA ont été réalisées à l'aide d'un faisceau de deutérons de 900 keV et d'un angle de détection de 178°. Des mesures par (RBS) ont été effectuées afin d'évaluer le rapport Y/Ti de l'alliage $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$. Les réactions nucléaires $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O}(\text{d},\alpha)^{14}\text{N}$ et $^{13}\text{C}(\text{d},\alpha)^{11}\text{B}$ ont été utilisées pour mesurer respectivement les teneurs en ^{12}C , ^{16}O et ^{13}C . Dans le cas de l'yttrium, tant sous $^{13}\text{CO}_2$ que $^{12}\text{CD}_4$, seule une faible sorption de carbone, d'oxygène et de deutérium se produit, et uniquement au-delà de 300 °C (pour C et O) et de 350 °C (pour D). En revanche, pour le film $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$, la sorption de carbone et d'oxygène commence à partir de 200 °C, et à 400 °C, les quantités de ^{13}C et de ^{16}O atteignent respectivement 50.10^{15} at/cm² et 300.10^{15} at/cm². Dans le $^{12}\text{CD}_4$, la température de début de sorption d'oxygène est d'environ 210 °C, alors qu'elle est d'environ 270 °C pour le deutérium. A 400 °C, la quantité d'oxygène sorbé est d'environ 170.10^{15} at/cm², 80.10^{15} at/cm² pour le ^{12}C et 30.10^{15} at/cm² pour le deutérium. L'analyse des spectres NRA est en cours afin de déterminer les variations des profils de concentration en carbone, oxygène et en deutérium dans les films yttrium et $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$.

Références

[1] C. Benvenuti, « Non-Evaporable Getters : from Pumping Strips to Thin Film Coatings ».

[2] A. Bosseboeuf et al., « Effect of Environment on Activation and Sorption of Getter Alloys and Multilayers for Hybrid Wafer-level Vacuum Packaging », Sensors and Materials

[3] C. Kutyla et al., « Hydrogen sorption in yttrium-based getter thin films », Vacuum, vol. 207, p. 111655, janv. 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111655.



Evolution du nombre d'atomes d'oxygène, carbone 13 et carbone 12 dans le film $\text{Y}_{61}\text{Ti}_{39}$ en fonction de la température sous $^{13}\text{CO}_2$

IBAF00022

CRM CHARACTERISATION BY ERD FOR HIGHER-ACCURACY RNRA HYDROGEN QUANTIFICATION

L. Dupont¹, J. Meersschaut², A. Vantomme³, P.L. Debarsy⁴, J.L. Colaux¹

¹ Physics Department, Namur Institute of Structured Matter (NISM), UNamur, rue de Bruxelles 61, 5000 Namur, Belgium - Namur (Belgium)

² imec, Kapeldreef 75, 3001 Leuven, Belgium - Leuven (Belgium)

³ Quantum Solid State Physics, KU Leuven, Celestijnenlaan 200d, 3001 Leuven, Belgium - Leuven (Belgium)

⁴ Synthesis, Irradiation and Analysis of Materials (SIAM) technological platform, UNamur, rue de Bruxelles 61, 5000 Namur, Belgium - Namur (Belgium)

Hydrogen readily diffuses through interstitial sites in metallic crystal lattices, where it can be trapped at defects, interfaces, or other microstructural features, significantly altering physical, mechanical, and electrical properties. Such behaviour can lead to material degradation, increased wear rate, or performance losses in critical systems ranging from nuclear reactors to microelectronic devices. Accurate quantification and depth profiling of hydrogen are therefore of growing importance, while remaining a major analytical challenge.

Thanks to its excellent sensitivity and depth resolution, Resonant Nuclear Reaction Analysis (RNRA) using the narrow and intense 6385 keV resonance of the $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ reaction is a powerful technique for hydrogen depth profiling. Absolute hydrogen quantification by RNRA relies on comparison with a Certified Reference Material (CRM) exhibiting a well-known, depth-uniform, and irradiation-stable hydrogen concentration. Any uncertainty in the CRM composition directly propagates to the analysed samples. Our current CRM, an a-Si:H coating deposited on a Si substrate by PECVD (LPICM, Paris), contains 16 ± 1 at.% of hydrogen, introducing an unacceptable level of uncertainty for many applications.

This work therefore focuses on improving the accuracy of this CRM hydrogen content, using He-based Elastic Recoil Detection (ERD). To this end, we identified and evaluated multiple sources of errors such as charge collection, solid angle determination, energy calibration of the detector and geometry control. To address charge collection issues arising from grazing incidence angle, Rutherford backscattering (RBS) was employed simultaneously with ERD to determine the $Q\Omega$ (charge $\times$ solid angle) product. The influence of geometry control on these parameters, including energy calibration of the detectors was assessed with SimNRA simulations [1]. The results obtained highlight the importance of accurate geometry control. To complement this study, a cross-laboratory comparison between UNamur and KU Leuven will be performed to identify discrepancies and residual systematic errors, contributing to a comprehensive uncertainty budget following the approach of Colaux *et al.* for RBS [2]. This enhanced CRM characterisation, as part of a new metrological approach, reduces a major source of error in the RNRA uncertainty budget, directly enabling higher-accuracy hydrogen characterisation. Quantitatively interpreting these results, however, requires reconstruction of depth profiles from experimental excitation curves (γ -yield versus beam energy). To address this need, the open-source Python code HyProC (Hydrogen Profiling by Convolution) is being developed at UNamur, thereby allowing accurate depth profiling.

Références

- [1] Mayer, M. SIMNRA User's Guide. Tech. rep. IPP 9/113. Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (1997)
- [2] Colaux, J. et al. Analytical Methods 6, 120–129 (2014)

IBAF00049

ABSOLUTE QUANTIFICATION OF MINUTE QUANTITIES OF ALUMINIUM ON Si SUBSTRATES USING THE $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ REACTION

T. Vanmeerbeek¹, A. Vantomme², J. Meersschaut³, I. Vickridge⁴

¹ KU Leuven/IMEC - Leuven (Belgium)

² KU Leuven - Leuven (Belgium)

³ IMEC - Leuven (Belgium)

⁴ INSP, CNRS & Sorbonne Université - Paris (France)

With the increasing importance of ultra-thin high-k dielectric films such as Al_2O_3 for gate applications and future 2D transistors [1], the need for more sensitive and quantitative characterization of these layers also increases. Ion beam analysis techniques such as Rutherford backscattering spectrometry (RBS) are widely used in nanotechnology. However, the existing methods face challenges in the case of thin films containing elements which have a similar mass as the substrate elements, such as Al_2O_3 on silicon. Nuclear reaction analysis depth profiling (NRA) is recognized for its isotopic selectivity and sensitivity to light elements. The 105 eV narrow nuclear reaction at 992 keV for $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ is often employed for energy calibration. Here, we study the potential of using the resonance to quantify minute quantities of aluminum-oxide deposited on complex semiconductor device layer stacks. The experiments are executed at the SAFIR platform of Sorbonne University (Paris).

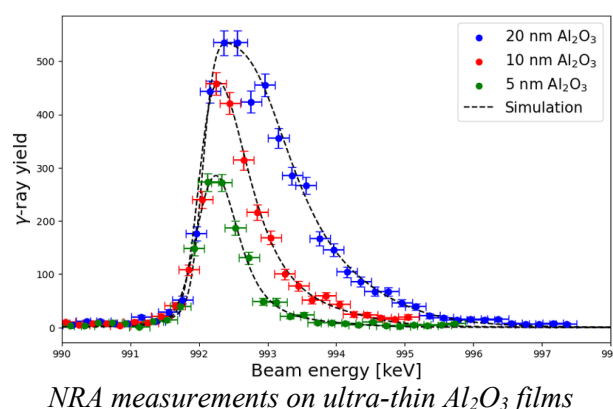
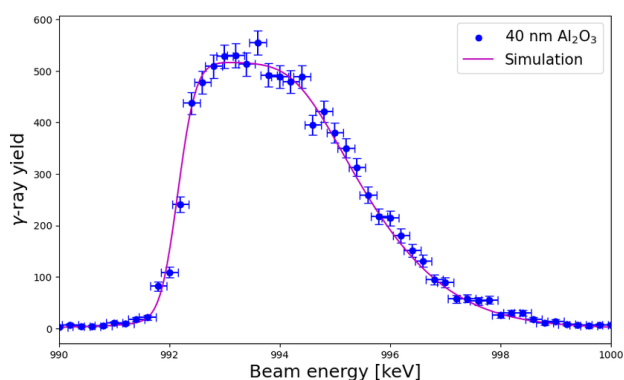
First, a 40 nm thick Al_2O_3 film was deposited on a carbon substrate with atomic layer deposition. The RBS measurement showed a well-defined aluminum signal which enabled quantification with an accuracy of 1 %. Second, the 40 nm thick Al_2O_3 film was utilized to calibrate the nuclear reaction analysis set-up for absolute quantification of aluminum using $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$. To achieve this, the energy of the proton beam was varied from 990 keV to 1000 keV with energy steps of 200 eV, and the gamma ray spectra were recorded. The gamma ray spectra were integrated between 9 MeV and 13 MeV, and resulted in an energy dependence as shown in Figure 1. Here, the incident beam energy spread is taken into account with a Gaussian of width 350 eV. The total gamma ray yield in Figure 1 can be related to the aluminum areal density obtained from RBS.

Third, we studied Al_2O_3 thin films (thickness between 5 nm and 80 nm) on silicon substrates. Exemplary NRA depth profiles are shown in Figure 2. The depth profiles are quantitatively analysed with the SPACES software, as shown in Figure 2. Thanks to the calibration of the NRA set-up, the aluminum areal density in the Al_2O_3 thin films is quantified with an accuracy of 1 %.

We will discuss the strengths and limitations of the method by comparing with other analytical methods and by studying the limit of quantification. We will report about the successful application of the method by characterizing ultra-thin films of a few nm deposited on a monolayer of WS_2 .

Références

[1] H. Zhang et al., J. Chem. Physics 146 (2017) 052810, <http://dx.doi.org/10.1063/1.496740>.



Conférence invitée

FOLLOWING THE BEAM: ION BEAM ANALYSIS AND MOBILE APPROACHES FOR CULTURAL HERITAGE

D. Strivay¹, G. Chêne¹, L. Van Wersch¹, N. De Vries¹, E. Derzelle¹, M. Souris¹, C. Defeyt^{1,2}

¹ Université de Liège - Liège (Belgique)

² Musées Royaux des Beaux-Arts de Belgique - Liège (Belgique)

Depuis plus de trente ans, l'Université de Liège joue un rôle actif dans l'application des techniques d'analyse par faisceaux d'ions et dans le développement d'instruments analytiques mobiles dédiés à l'étude du patrimoine culturel. Grâce à nos plateformes FixLab et MoLab, nous avons acquis une expertise reconnue dans l'utilisation de ces méthodes pour étudier la composition, la structure et l'histoire des matériaux d'intérêt artistique et archéologique.

Nous illustrerons le potentiel des IBA à travers plusieurs études de cas consacrées à la caractérisation et à la détermination de la provenance d'artefacts archéologiques, tels que des pierres précieuses, des perles de verre et des verres anciens. Ces exemples montreront comment les analyses physico-chimiques permettent d'éclairer l'origine des matériaux, les procédés de fabrication et les réseaux d'échanges qui ont façonné les sociétés anciennes.

Toutefois, tous les objets patrimoniaux ne peuvent être transportés en laboratoire. Les œuvres monumentales ou inamovibles, comme les peintures murales, ainsi que les tableaux de chevalet de très grande valeur, nécessitent d'amener le laboratoire jusqu'à l'œuvre. Pour répondre à cette contrainte, nous avons développé une gamme d'instruments portables et mobiles, parmi lesquels notre système de MA-XRF (fluorescence X macro), capable de réaliser des analyses détaillées, non invasives et directement sur site.

Nous présenterons également les dernières évolutions de ces systèmes mobiles, qui ont permis d'améliorer à la fois leurs performances analytiques et leur ergonomie sur le terrain. Ces développements seront illustrés par plusieurs projets récents, notamment des investigations en histoire technique de l'art consacrées au peintre surréaliste René Magritte, ainsi que des études portant sur des peintures murales romaines et égyptiennes.

À travers ces différents exemples, nous montrerons comment la complémentarité entre les analyses réalisées en laboratoire et les techniques mobiles offre de nouvelles perspectives pour mieux comprendre, préserver et interpréter notre patrimoine culturel commun.

IBAF00007

ACTIVATION PAR FAISCEAUX DE PROTONS D'UNE BRASURE MÉDIÉVALE À L'ÉTAIN ET AU PLOMB

A. Gillon¹, C. Koumeir², C. Pelé-Méziani³, L. Rossetti³, G. Louarn⁴, F. Haddad⁵

¹ Indépendant - Tours (France)

² GIP ARRONAX - Nantes (France)

³ Arc'Antique (GPLA) - Nantes (France)

⁴ Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN) - Nantes (France)

⁵ SUBATECH, CNRS/IN2P3 - Nantes (France)

La brasure à l'étain d'une canalisation d'époque médiévale en plomb recouverte d'une épaisse couche de corrosion fut sondée par activation protonique (PAA). L'objectif étant d'évaluer la maîtrise du procédé de brasure à l'étain appliquée sur la conduite en déterminant si un alliage Sn-Pb en proportion spécifique a été employé et si la répartition de cet alliage dans l'épaisseur de la brasure est homogène.

Des analyses physico-chimiques (MEB-EDS, XRF) effectuées par le laboratoire Arc'Antique sur une section de conduite et sur plusieurs échantillons ont révélé la présence d'étain allié au plomb dans la brasure en proportions variables [1]. L'intérêt de nouvelles études sur l'objet repose sur la possibilité d'avoir accès au profil de concentration Pb/Sn dans toute l'épaisseur de la brasure sur des zones plus ou moins corrodées avec une méthode d'analyse par faisceaux d'ions innovante.

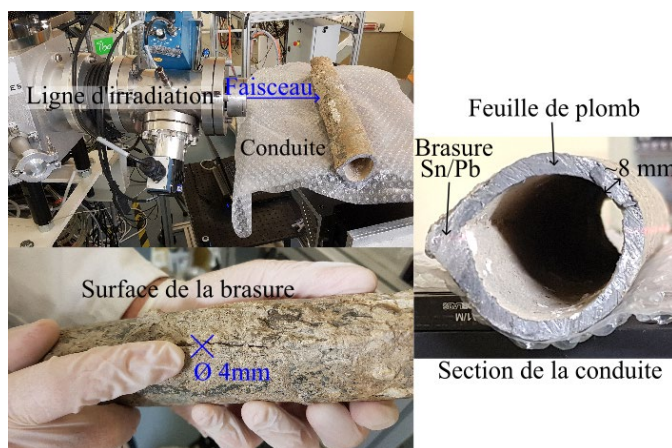
Nous avons analysé une section de conduite par activation protonique avec le faisceau du cyclotron ARRONAX (Nantes, France) [2]. Cette technique permet l'analyse volumique d'objets fabriqués à base de matériaux denses (tel que le plomb) à travers une épaisse couche de corrosion. L'irradiation par des faisceaux de protons d'énergie croissante de 17 à 68 MeV, permet de sonder la conduite par pas millimétriques, jusqu'à 8 mm d'épaisseur (Figure 1) L'analyse par spectroscopie gamma hors-ligne offre une mesure non-destructive du rayonnement émis par les radio-isotopes produits en profondeur sur le parcours du faisceau incident. Deux points espacés dans l'axe de la brasure ont été analysés pour évaluer l'impact de la corrosion en surface et montrer la répétabilité des mesures sur la longueur de la conduite. Plusieurs isotopes d'intérêt ont été identifiés en fonction de leur section efficace de production, de l'intensité intrinsèque et l'énergie d'émission des rayonnements γ associés. Les résultats obtenus se concentrent sur la mesure des rapports d'intensité des rayons γ émis par le Sb118m et le Bi206.

Nous avons observé que les proportions Pb/Sn varient dans l'épaisseur de la brasure en comparant avec le cas d'un alliage eutectique. Cela fournit des informations cruciales pour comprendre les techniques de fabrication utilisées à l'époque.

Références

[1] Alexandre Gillon, et al. Proton Activation Analysis of medieval lead pipes. European Conference on X-ray Spectrometry 2022, Jun 2022, Bruges, Belgium. (hal-03821657)

[2] Ragheb, D. M. et al. "Development of a PIXE method at high energy with the ARRONAX cyclotron." Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 302 (2014): 895-901.



Conduite irradiée à Arronax

IBAF00010

ANALYSE PAR ACTIVATION PROTONIQUE ET P-XRF D'UN COUTEAU EN FER DE L'ÂGE DE BRONZE

J. Luabanya¹, C. Koumeir², F. Haddad², C. Pele-Meziani³, S. Muanza⁴, J. Dias⁵

¹ SUBATECH, ARRONAX, CGEA - Nantes (France)

² SUBATECH, ARRONAX - Nantes (France)

³ Lab'Arc-Antique - Nantes (France)

⁴ CGEA - Kinshasa (Congo, the Democratic Republic of the)

⁵ Musée-Maison du Patrimoine Hieres-sur-Amby - Hières-Sur-Amby (France)

Les techniques non destructives telles que la fluorescence des rayons X [1] et les méthodes d'analyse par faisceau d'ions [2], permettent à déterminer les compositions élémentaires des objets tout en préservant leur intégralité. Les résultats peuvent révéler des informations essentielles sur les techniques de fabrication ainsi que sur l'origine des matériaux constitutifs. En revanche, certaines de ces techniques se limitent généralement à une analyse de surface ou proche de la surface ; ce qui est un désavantage dans le cas des objets ayant une surface généralement corrodée. En effet, ces zones altérées ne reflètent pas la composition réelle d'objet et rend ainsi difficile la détermination de son origine. Dans notre étude, le couteau en fer daté de l'âge de Bronze final (800 à 850 av J.C) [3] a été analysé par la spectrométrie XRF du laboratoire Arc'Antique [4] pour avoir une information des concentrations du fer, nickel et cobalt en surface et identifier quelques zones pour faire l'analyse à l'aide de la spectrométrie gamma après activation protonique au cyclotron d'ARRONAX [5]. Grâce à un choix judicieux de l'énergie du faisceau (50 MeV), l'activation se fait sur tout le volume de l'échantillon et permet d'accéder à la concentration massique en profondeur. Les résultats démontrent qu'il est possible d'obtenir une composition fiable des éléments constitutifs de ce couteau et ainsi de déterminer l'origine [6] (terrestre ou météoritique) du fer. Cette étude met en évidence le potentiel des faisceaux ioniques non seulement pour l'analyse de surface, mais aussi pour la caractérisation en profondeur, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'étude des matériaux ayant une surface corrodée.

Références

- [1] M. Sarkar and M.L. Garg. Application of Scattering for the Quantitative Estimation of Elements in X-Ray Spectrometry, 1993.
- [2] Jeynes, C. et al, A. Ion Beam Analysis: A Century of Exploiting the Electronic and Nuclear Structure of the Atom for Materials Characterisation. Rev. Accl. Sci. Tech. 2011, 04 (01), 41–82.
- [3] J.-P. G. Stephane Verger, Les tumulus de Saint-Romain-de-Jalionas (Isère) : premières observations. Documentation française, 1988.
- [4] www.laboratoire-arc-antique.fr
- [5] J. Martino. ARRONAX*, A HIGH INTENSITY CYCLOTRON IN NANTES, 2007.
- [6] Jambon, A. Bronze Age Iron: Meteoritic or Not? A Chemical Strategy. Journal of Archaeological Science 2017, 88, 47–53.

IBAF00040

PRODUCTION DES ÉMAUX GALLO-ROMAINS : APPORT DES ANALYSES MICRO-IBA À L'ÉTUDE DES VERRES BLANCS ET DES MOTIFS COLORÉS COMPLEXES

L. Baseil¹, G. Morabito¹, M. Callewaert², F. Cecchet¹, J.L. Colaux¹

¹ Département de Physique, Instituts NISM - PaTHs, Université de Namur - Namur (Belgium)

² Direction du Patrimoine Culturel, Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles - Bruxelles (Belgium)

À l'instar des monnaies et des céramiques, les fibules constituent un témoignage essentiel pour explorer les pratiques socio-économiques des sociétés anciennes. Ces objets utilitaires et décoratifs, ancêtres de l'épingle de sûreté moderne, sont attestés dans de nombreuses régions dès le VII^e siècle av. J.-C. À partir du I^{er} siècle ap. J.-C., les provinces de Gaule Belgique et de Germanie Inférieure voient toutefois apparaître un type particulier de fibules, mêlant travail du métal et du verre : la fibule émaillée, qui s'impose progressivement comme le type dominant dans ces régions.

Nous avons aujourd'hui beaucoup d'informations sur le schéma de production des émaux présents sur ces fibules. La base est un verre translucide en provenance du Proche-Orient, transformé dans des ateliers secondaires dispersés dans l'Empire romain. Certaines questions demeurent cependant ouvertes, comme le rôle précis de l'émailleur ou les matériaux exploités pour la coloration et l'opacification de ces émaux. Ce travail s'intéresse à deux problématiques distinctes en particulier.

La première concerne les émaux blancs opaques, datés entre le I^{er} et le IV^e siècle ap. J.-C., et dont la teneur en magnésium atteint souvent plusieurs pourcents massiques, des valeurs nettement supérieures à celles observées pour d'autres types d'objets en verre blanc. Ce phénomène, documenté dans de nombreuses régions de l'Empire, ne bénéficie à ce jour d'aucune explication consensuelle. Dans ce contexte, une base de données de compositions élémentaires a été constituée à partir d'un large corpus d'objets en verre blanc, émaillés ou non, en combinant des données issues de la littérature à nos analyses élémentaires. Les résultats obtenus confirment le surplus de MgO dans certains ensembles et permettent d'émettre de nouvelles hypothèses quant à son origine. L'existence de tendances chronologiques, typologiques ou géographiques est également discutée.

La seconde problématique porte sur les motifs émaillés complexes, tels que les émaux flottants ou le millefiori. De précédentes études ont montré qu'il était peu probable que les artisans émailleurs aient été à l'origine de la fabrication des verres colorés utilisés pour décorer les fibules. Ils auraient en réalité utilisé du verre coloré produit dans des ateliers secondaires puis distribué sous forme de lingots ou de tesselles, dont les propriétés physico-chimiques étaient ensuite ajustées en fonction de l'effet décoratif recherché. L'ajout d'éléments tels que le plomb permet notamment d'abaisser la température de fusion, favorisant la formation de frontières nettes entre zones colorées. Ce travail vise ainsi à caractériser finement la composition élémentaire de ces émaux ainsi que la distribution spatiale des éléments chimiques aux interfaces entre les différentes zones colorées. Ces analyses doivent permettre de clarifier le rôle respectif des ateliers secondaires et des artisans émailleurs dans la production des fibules émaillées.

Afin de répondre à ces deux problématiques, un ensemble d'objets caractérisé par un ancrage régional fort a été étudié à l'aide du système d'analyse microsonde IBA développé autour de l'accélérateur ALTAÏS de la plateforme SIAM. Ce corpus, fourni par la Société Archéologique de Namur, est composé de fibules émaillées complètes ou fragmentaires, de jetons de jeu et de tessères, tous issus de contextes funéraires de Gaule Belgique. Des cartographies PIXE bidimensionnelles ont permis de déterminer la composition élémentaire de motifs submillimétriques avec une résolution spatiale d'environ 10 µm et une excellente sensibilité. L'ensemble des résultats obtenus contribue à mieux contraindre les schémas de production des verres colorés destinés à l'émaillage et à préciser le rôle des différents acteurs impliqués dans ce processus.

Conférence invitée

HIGH-ENERGY ELECTRON BEAM DEGRADATION OF PFAS AND PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS IN WATER: EXPERIMENTAL AND MODELING INSIGHTS

S. Lucas

*Ion Beam Applications & University of Namur,
Louvain-La-Neuve, B1348, Belgium / Rue de Bruxelles 61, Namur -5000, Belgium*

Persistent organic pollutants (POPs) are a group of organic compounds that have toxic properties, persist in the environment, accumulate in food chains and present a risk to human health and the environment. Most of them are of anthropogenic origin, associated with industrial processes, product use and applications, waste disposal, leaks and spills, fuel combustion and waste incineration. Among alternative techniques to incineration, high energy electron beam (e-beam) accelerators has been used for water treatment to degrade a wide range of recalcitrant POP. The interaction between primary e-beam and water generates water radiolysis which produces secondary electrons called hydrated electrons as well as free radicals. These hydrated electrons play a determining role in the degradation of the POP, and the free radicals from water radiolysis induce oxidative and reductive degradation of organic pollutant. Although the mechanism of water radiolysis is well known, there is no multi-purpose general experimental and simulation framework for predicting the destruction rate of the POP as a function of primary e-beam characteristics.

This invited lecture aims to review the current state of literature regarding the experimental method and modelling of POP destruction. Our objective is to introduce a pioneering multidisciplinary and multiscale methodology, encompassing the integration of dedicated experimental device together with a multi-scale modelling used to understand the process and predict the best recipe for POPs destruction. As a Proof of Concept (POC), we will apply our methodology to the case of PFAS. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are a group of synthetic chemicals used since the 1950s in a wide variety of applications due to their water-repellent, grease-repellent, and dirt-repellent properties. PFAS compounds contain at least one fully fluorinated carbon (CF₃- or -CF₂-) and usually a functional (terminal) group that differs between PFAS groups and subgroups. Due to the strength of their carbon-fluorine bonds, they are called “Forever Chemicals” because they are very difficult to degrade in the environment. Currently, there are no effective technologies for treating PFAS on an industrial scale, other than expensive thermal or chemical treatments that have known environmental impacts.

Experimental results are provided for various samples with different matrices and starting concentrations, irradiated at doses ranging from 250 kGy to 2 MGy using an accelerator TT300 Rhodotron® 10 MeV e-beam accelerator. Water samples underwent analysis through Solid Phase Extraction (SPE) and LC-MS/MS using an Aquity Iclass LC and Orbitrap Q Exactive MS/MS. In addition to experimental analysis, a radio-kinetic model based on ordinary differential equations was employed to monitor the transformation of PFAS parent and descendant compounds. This approach specifically assessed the degradation of PFOA or PFOS through interactions with aqueous electrons and OH• radicals. Moreover, this modeling approach—when integrated with physics-informed AI—can forecast the irradiation dose necessary to achieve a tenfold reduction in PFAS concentrations.

Other results related to new PFAS and halogenated compounds will also be presented.

IBAF00015

STRATÉGIE NUMÉRIQUE D'AGLAÉ : DE L'INSTRUMENT SCIENTIFIQUE AU SYSTÈME SOCIO-TECHNIQUE

C. Pacheco

C2RMF - Lab-BC - Paris

La transformation numérique des grands instruments d'analyse ne relève plus uniquement de l'évolution technologique des équipements, mais engage une reconfiguration profonde des pratiques scientifiques, des chaînes opératoires et des responsabilités associées. L'accélérateur AGLAE (Accélérateur Grand Louvre pour l'Analyse Élémentaire), infrastructure unique dédiée aux sciences du patrimoine, constitue à ce titre un observatoire privilégié de ces mutations.

Cette communication présente la stratégie numérique développée autour d'AGLAE, en l'analysant comme un passage de l'instrument expérimental vers un système socio-technique intégré, articulant instrumentation, données, méthodes numériques et gouvernance scientifique. Elle s'appuie sur plusieurs jalons structurants : la montée en puissance de l'imagerie multi-modale, la structuration des chaînes de traitement et d'archivage des données, l'intégration de méthodologies d'intelligence artificielle dans la chaîne opératoire, ainsi que le développement de dispositifs numériques de partage et d'aide à la décision.

L'exposé mettra particulièrement l'accent sur les enjeux méthodologiques et épistémologiques de cette transformation : formalisation de l'expertise, reproductibilité des analyses, traçabilité des traitements, mais aussi l'éventuelle redéfinition des rôles du chercheur et de l'ingénierie scientifique. Enfin, la communication abordera les enjeux de résilience et de responsabilité associés aux systèmes numériques et expérimentaux complexes, en montrant comment les situations de crise constituent des révélateurs essentiels pour penser la robustesse et la gouvernance des infrastructures de recherche patrimoniale.

Cette réflexion vise à nourrir les débats actuels sur la place du numérique dans les grands instruments analytiques, en défendant une approche où le numérique est conçu non comme une couche technique additionnelle, mais comme un levier structurant de la production de connaissances en sciences du patrimoine.

IBAF00038

FUSION MULTIMODALE PIXE–RBS–RAMAN ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA RECLASSIFICATION DU MONNAYAGE EN ARGENT D'ARGOS

M.P. Bart¹, N. Gros¹, L. Baseil¹, C. Flament², F. Cecchet¹, J.L. Colaux¹, A. Mayer^{1,*}

¹ Département de Physique, Instituts NISM/PaTHs/naXys, Université de Namur - Namur (Belgium)

² Département de langues et littératures classiques, Institut PaTHs, Université de Namur - Namur (Belgium)

Le monnayage en argent de la cité grecque d'Argos (V^e–II^e siècle av. J.-C.) demeure encore insuffisamment caractérisé, les chronologies existantes reposant principalement sur des critères propres à la numismatique (analyse stylistique, étude des matrices). Une réévaluation de ce cadre peut être envisagée grâce à l'apport de données physico-chimiques quantitatives permettant de contraindre à la fois la composition des alliages et l'état d'altération de surface.

Dans ce travail, 80 monnaies issues de la collection du numismate Tony Hackens (1939–1997) ont été étudiées par analyse par faisceau d'ions (μ -IBA) sur l'accélérateur ALTAIS, en combinaison avec des analyses μ -Raman. L'IBA permet de déterminer la composition (éléments majeurs et traces), tandis que la spectroscopie Raman identifie les produits de corrosion en surface. Des cartographies bidimensionnelles ont été acquises avec ces deux techniques sur des zones identiques des échantillons, produisant des jeux de données multimodaux spatialement résolus.

La richesse de ces jeux de données, comprenant plusieurs milliers de spectres par pièce (i.e., un spectre par pixel), nécessite l'usage d'approches adaptées. Des méthodes de réduction de dimension non linéaire (UMAP) et de clustering non supervisé (HDBSCAN) sont utilisées pour identifier des structures pertinentes dans ces données multidimensionnelles et bruitées, et ainsi réduire le travail de post-traitement lié à l'extraction des compositions élémentaires. Au-delà d'une exploitation séparée des données, leur combinaison est susceptible de révéler des structures inédites, en particulier pour des objets hétérogènes tels que les monnaies corrodées. Nous proposons une stratégie d'analyse multi-échelle en trois étapes combinant fusion de données et apprentissage automatique.

Dans une première étape, une analyse globale est réalisée à l'échelle de la pièce : pour chaque technique, les spectres acquis sur l'ensemble des pixels sont sommés afin de construire un spectre global unique par pièce. Les spectres PIXE et RBS sont ensuite concaténés pour former des descripteurs IBA, tandis que les spectres Raman globaux sont analysés séparément. Cette approche macroscopique permet d'évaluer si une information moyenne suffit à identifier des regroupements de monnaies, et de comparer ces clusters avec les classifications numismatiques existantes fondées sur des critères stylistiques et métrologiques.

Dans une deuxième étape, l'analyse globale est étendue par fusion multimodale en concaténant les spectres globaux IBA et Raman. L'objectif est d'évaluer l'apport de l'information Raman (corrosion) à la discrimination des groupes et de déterminer si l'intégration conjointe améliore la structuration des données ou fait émerger de nouveaux regroupements. L'analyse de l'importance relative des différentes contributions permet d'identifier le rôle de chaque technique.

Dans une troisième étape, une analyse résolue spatialement est menée à l'échelle du pixel afin de prendre en compte l'hétérogénéité de surface. Les données Raman sont d'abord utilisées pour cartographier les états de corrosion et identifier les zones les moins altérées. Les pixels correspondants sont sélectionnés, et leurs spectres IBA concaténés sont analysés par réduction de dimension et clustering afin d'identifier des sous-domaines homogènes. Pour chaque groupe, des spectres médians sont extraits et soumis à des procédures de simulation pour l'analyse quantitative. Cette stratégie permet de réduire significativement le nombre de spectres à traiter tout en améliorant la robustesse des compositions obtenues.

Les résultats attendus incluent l'identification de clusters physico-chimiques fiables, comparables ou complémentaires aux classifications numismatiques, ainsi que la mise en évidence de signatures révélatrices de variations des pratiques métallurgiques. En identifiant les stratégies d'analyse les plus pertinentes pour l'exploitation conjointe des données IBA et Raman, cette approche vise à proposer des méthodologies transférables à d'autres matériaux patrimoniaux complexes.

IBAF00054

ADDRESSING CORROSION IN ARCHAEOLOGICAL GLASS: MULTI-ANALYTICAL PROTOCOL APPLIED TO GALLO-ROMAN GLASS FOR RELIABLE DATA INTERPRETATION

G. Morabito¹, L. Baseil¹, F. Cecchet¹, H. Laurent¹, J. Colaux¹

Université de Namur - Namur (Belgium)

The awareness that Cultural Heritage materials change inexorably over time, driven by both their intrinsic composition and their interaction with the surrounding environment, increasingly motivates the development of advanced approaches to study not only the original composition, but also the effects induced by ageing and alteration processes. In this context, the study of ancient glass is often challenging, as glass is a thermodynamical unstable material and its surface is often affected by corrosion processes such as alkali leaching, network dissolution, and the formation of hydrated silica layers, which can severely bias analytical results.

This work aims to address the impact of corrosion on the analytical investigation of archaeological glass objects, by proposing a methodological approach explicitly accounting for glass alteration phenomena. A set of Gallo-Roman glass objects from the collections of the Société Archéologique de Namur was selected to evaluate the nature of the corrosion, its thickness, and its degree of homogeneity, and to evaluate its impact on compositional analysis.

Ion Beam Analysis (IBA) plays a central role in this study due to its non-destructive elemental characterisation capabilities and its depth-resolved analytical potential. However, the effective probed depth is typically limited to a few tens of micrometres, which implies that when corrosion layers exceed this thickness, IBA predominantly probes the altered material, preventing direct access to the pristine bulk composition of the glass.

To overcome this limitation, the proposed approach combines Raman spectroscopy and IBA in a complementary manner. Raman spectroscopy is employed to identify structural modifications of the glass network and to support the interpretation of the different corrosion mechanisms, while IBA provides the elemental composition of the altered surface layers. Based on the corrosion processes identified by Raman spectroscopy, an extrapolation strategy is proposed to infer the original composition of the unaltered glass from the measured composition of the corroded layer.

The implementation of this approach aims to evaluate how alteration mechanisms influence elemental composition and affect the analytical results, supporting also the understanding under which reliable compositional information can be obtained, and to which pristine glass and corrosion layer characteristics can be identified. Particular attention will be given to the intrinsic features of the corrosion (i.e. thickness, homogeneity...) and the reliability of the analytical signals, to assess how the measured composition deviates from the original bulk glass. This challenging target will be possible thanks to the systematic comparison of analytical results obtained from multiple points across the corroded surface and from the underlying bulk glass, driving to better assess the effects of alteration processes together with ensuring a rigorous evaluation of compositional data. By integrating structural and compositional information, this study proposes the first steps towards the development of a structured analytical protocol aimed at improving the reliability of compositional data collected on ancient glass, contributing to a more accurate reconstruction of ancient glassmaking technologies and to a better understanding of long-term alteration processes in Cultural Heritage materials.

Conférence invitée

LA CHIMIE SOUS RAYONNEMENT À L'INTERFACE (U,Pu)O₂/EAU : DE L'EXPÉRIENCE À LA MODÉLISATION

C. Jégou

CEA, DES, ISEC, DPME, Univ Montpellier, Bagnols sur Cèze, France

La compréhension des mécanismes d'altération des oxydes d'actinides et plus particulièrement des composés du type (U,Pu)O₂ reste un sujet d'étude important dans le cadre de l'entreposage et du stockage en situation géologique profonde des combustibles nucléaires UOX et MOx. Cette compréhension nécessite d'étudier le comportement d'interfaces réactionnelles (U,Pu)O₂/eau sous irradiation dans le cadre de scénarios d'évolution plus ou moins complexes tant du point de vue des conditions d'irradiation que des conditions physico-chimiques du milieu d'altération. Dans ce contexte, la radiolyse de l'eau et plus largement la chimie sous rayonnement sont des points essentiels à prendre en considération pour décrire correctement les processus d'altération et in fine la production / consommation de certaines espèces radiolytiques (molécules stables et radicaux) et les relâchements en radionucléides vers le milieu environnant. Cette présentation vise à rappeler les différentes approches expérimentales et la modélisation associée développées ces vingt dernières au travers d'exemples illustrant une démarche progressive allant de l'étude de systèmes simples et modèles à des systèmes intégrant toute la complexité de situations réelles d'évolution.

Concernant l'influence de l'irradiation de nombreux travaux expérimentaux ont cherché à mieux comprendre les mécanismes de dissolution oxydante des composés (U,Pu)O₂ sous radiolyse de l'eau selon la nature du rayonnement et la chimie de l'oxyde. Pour ce faire des études complémentaires associant la mise en œuvre de sources d'irradiation gamma ou alpha, de faisceaux de particules instrumentés et l'utilisation de composés d'actinides modèles ont permis d'étudier spécifiquement ces différents effets. Les limites et les avantages de ces différentes approches seront discutés ainsi que les derniers développements mettant en œuvre des isotopes et des outils de caractérisation originaux basés sur la spectroscopie Raman.

La prise en compte des conditions environnementales est également un sujet d'étude important qui sera abordé. La présence de matériaux d'environnement en situation de stockage géologique contribue à modifier fortement le comportement des interfaces réactionnelles sous irradiation via l'apport d'espèces chimiques réactives pouvant jouer notamment sur des paramètres importants comme le pH et le potentiel redox.

Ces développements expérimentaux seront mis en regard de différents outils de modélisation (déterministe et stochastique) associant différentes échelles d'espace et de temps. La complexité des phénomènes étudiés rend également nécessaire le développement d'outils spécifiques couplant la chimie au transport et impliquant des passerelles entre différentes communautés scientifiques comme celle des géochimistes et les spécialistes de la chimie sous rayonnement.

IBAF00012

ACCÉLÉRATION DE L'ÉVOLUTION DES DÉFAUTS ÉTENDUS DANS LA CÉRAMIQUE COMBUSTIBLE SOUS L'EFFET D'UN APPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRONIQUE

G. Gutierrez¹, A. Georgesco¹, B. Ridard¹, F. Garrido², R. Nielsen¹, C. Onofri³

¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service de recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP, Gif-sur-Yvette 91191, France, France - Gif Sur Yvette (France)

² Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab), 91405, Orsay, France - Gif Sur Yvette (France)

³ CEA, DES, IRESNE, DEC, Cadarache, F-13108 St Paul lez Durance, France - Paul Lez Durance (France)

Pendant le fonctionnement du réacteur, le dioxyde d'uranium est exposé à un rayonnement combiné provenant des fragments de fission, des désintégrations alpha et bêta, des neutrons... Au sein des pastilles de combustible UO₂ un endommagement massif se produit principalement lié à la perte d'énergie des produits de fission. Au cours de leur trajectoire, leur rapport de perte d'énergie évolue d'une contribution électronique prédominante vers une contribution nucléaire. Une façon d'étudier ces phénomènes, sans avoir à gérer la radioactivité élevée du combustible nucléaire utilisé, consiste à réaliser des irradiations par faisceaux d'ions, aussi bien en mode à faisceau unique qu'en mode à double faisceau. Des études antérieures ont montré que le désordre cristallin et le niveau de contrainte sont tous deux plus faibles en mode à double faisceau par rapport à l'irradiation ionique à faible énergie correspondante [1]. De plus, des observations microstructurales révèlent une évolution des défauts étendus dues aux ionisations électroniques variant en fonction du niveau de perte d'énergie électronique et de la température d'irradiation [2-4].

Cette étude porte sur l'effet de la dissipation d'énergie électronique sur l'évolution des défauts induits par le dépôt d'énergie nucléaire dans l'UO₂. Une étude systématique a été menée à l'aide d'irradiations aux ions en simple et double faisceau. Un couplage entre différentes techniques d'analyse (spectroscopie Raman, MET...) a permis de mettre en évidence que le désordre cristallin ainsi que les défauts étendus évoluent. Une augmentation du taux de recombinaison des défauts s'accompagne ainsi d'une accélération de la cinétique d'évolution des boucles de dislocation. L'ampleur de ce phénomène dépend du niveau de perte d'énergie électronique et de la température. Ces résultats apportent un nouvel éclairage sur l'influence du dépôt d'énergie électronique sur la formation et l'évolution des défauts étendus.

Références

- [1] M. Bricout et al., Journal of Nuclear Materials 531 (2020) 151967.
- [2] G. Gutierrez et al., Journal of the European Ceramic Society 42 (2022) 6633.
- [3] A. Georgesco et al., Journal of Nuclear Materials 599 (2024) 155202.
- [4] A. Georgesco et al., Journal of Nuclear Materials 604 (2025) 155493.

IBAF00002

MIGRATION VERS UN SYSTÈME D'ACQUISITION NUMÉRIQUE POUR L'ANALYSE PAR FAISCEAUX D'IONS : RETOUR D'EXPÉRIENCE AVEC LES NUMÉRISSEURS CAEN ET GESTION DU BRUIT ÉLECTRONIQUE

P. Couture, G.W. Grime, V.V. Palitsin

Surrey Ion Beam Centre - Guildford (United Kingdom)

De nombreux laboratoires d'Analyse par Faisceaux d'Ions (IBA) s'appuient encore sur des chaînes d'acquisition analogiques dont les cartes et composants ne sont plus fabriqués. Cette obsolescence pose des problèmes croissants de maintenance et de pérennité. Afin de garantir la continuité et l'évolution de notre installation, nous avons débuté une migration progressive de nos systèmes d'acquisition vers le numérique, en nous appuyant sur les numériseurs CAEN N6724F (module NIM) et DT5724 (version autonome).

Cette transition soulève plusieurs défis pratiques, tels que la dépendance aux mises à jour des logiciels, le support limité de la part du fabricant, l'intégration logicielle dans les systèmes d'acquisition préexistant et une sensibilité accrue au bruit électronique. Nous présentons ici un compte rendu détaillé de l'intégration de ces numériseurs dans notre chaîne IBA.

Nous avons conçu et mis en place une unité d'acquisition de données électroniquement isolée afin de limiter les parasites électroniques provenant du reste du système d'instrumentation. Cette unité contient les modules NIM et numérique de CAEN, la source de tension de polarisation et son control à distance, et un pulser électronique. Les données sont transmises par fibre optique. Nos mesures systématiques ont montré que la principale source de bruit provient des moteurs du porte échantillon lorsqu'ils sont alimentés. En corrélant l'activité des moteurs avec les spectres RBS enregistrés, nous avons observé une dégradation de la résolution spectrale, e.g., sans alimentation des moteurs, la largeur du pic du pulser est d'environ 100 moindres que lorsque les moteurs sont alimentés. Nous proposons des stratégies d'atténuation de cet effet telles que la gestion de l'alimentation des moteurs, l'optimisation des séquences de positionnement ainsi que du câblage et de la mise à la terre.

Dans cette présentation, nous discuterons des performances obtenues avec la nouvelle chaîne d'acquisition numérique par rapport au système analogique traditionnel. Ce retour d'expérience vise à fournir des éléments concrets aux laboratoires IBA confrontés à l'obsolescence de leurs systèmes analogiques et envisageant une migration vers des solutions numériques.

Remerciements

Nous souhaitons remercier l'EPSRC pour son soutien financier au UK National Ion Beam Centre, qui a permis de financer le temps de faisceau dédié à cette recherche, ainsi qu'au personnel du Surrey Ion Beam Centre pour son aide précieuse lors des mesures.

IBAF00029

VERS UNE SIMULATION RAPIDE DES SPECTRES EN IBA : UNE NOUVELLE APPROCHE COMBINANT PHYSIQUE DE L'INTERACTION ET APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

H. Khodja, F. Ammari

NIMBE CEA-CNRS - Saclay (France)

Les approches de traitement des données issues d'expériences IBA s'appuyant sur les techniques d'apprentissage automatique gagnent en popularité au sein d'un nombre croissant d'équipes. Ces méthodes offrent un gain de temps significatif pour l'extraction d'informations pertinentes à partir de données expérimentales. Elles reposent généralement sur l'entraînement d'une fonction paramétrique à partir de jeux de données, souvent issus de simulations. Pour un échantillon multi-élémentaire, cela implique de simuler différentes compositions parmi l'infinité de combinaisons possibles et de générer les spectres correspondants.

Cependant, cette approche se heurte rapidement à des limites lorsque le nombre d'éléments vient à augmenter en raison de la quantité croissante de simulations nécessaires, ce qui réduit la portée de la méthode.

Nous proposons de reconsidérer cette approche en développant une méthodologie de simulation des spectres s'appuyant sur un très faible nombre d'opérations numériques. Nous partons du principe qu'un spectre multi-élémentaire est toujours la superposition algébrique des contributions spectrales de chaque élément, quand celles-ci sont évaluées dans le matériau lui-même. Cela signifie que ces contributions doivent être calculées dans un matériau qui possède le pouvoir d'arrêt cible. Nous avons donc créé une base de données de contributions élémentaires pour un nombre limité de pouvoirs d'arrêt, et par des apprentissages de complexité modeste, nous pouvons calculer ces contributions pour tout élément et tout pouvoir d'arrêt d'intérêt.

Nous présenterons cette méthodologie, les premiers résultats obtenus, les limitations identifiées et les perspectives associées.

SELECT YOUR PERFECT ECR SOURCE

World Leader in
Electron Cyclotron
Resonance Sources

No Cooling

<1% Extremely Stable Beam
current variation over 24h

One-Button Start

Turnkey Solution

Up To 15,000 h+ Continuous Operation
without maintenance

Find the ideal TES or
HEXAR configuration.



SESSIONS AFFICHES

IBAF00001

VINGT ANS D'INNOVATIONS TECHNIQUES ET PERSPECTIVES FUTURES DE LA PLATEFORME JANNUS-SACLAY

**B. Ridard¹, P. Billaud¹, G. Gutierrez¹, C. Bernard¹, H. Martin¹, F. Nozais¹, G. Sagnes¹,
M. Thiebault¹, J.L. Bechade²**

¹ CEA - S2CM/SRMP/JANNuS - Gif-Sur-Yvette (France)

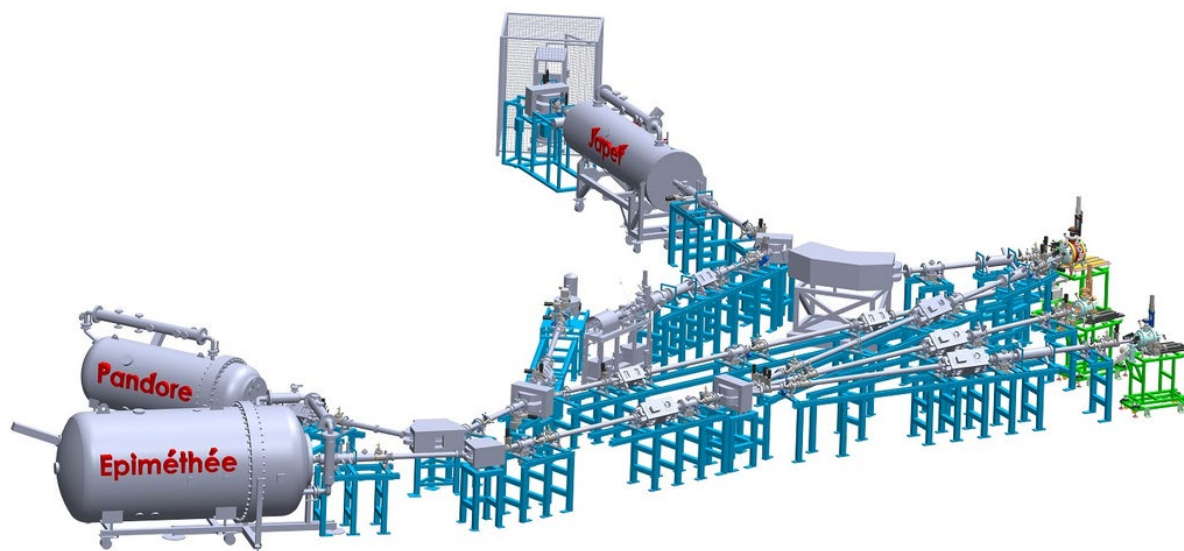
² CEA - INSTN Saclay - Gif-Sur-Yvette (France)

Créée en 2006 au sein de la SRMP (Section de Recherches en Métallurgie Physique) du CEA Saclay, la plateforme JANNuS-Saclay (Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation) intègre trois accélérateurs électrostatiques — EPIMETHEE, JAPET et PANDORE — capables de générer des faisceaux d'ions légers et lourds, allant du proton à l'or, avec des énergies allant de quelques centaines de keV à plusieurs dizaines de MeV. Les dispositifs installés permettent la réalisation d'irradiations simples, doubles ou triples, ainsi que des analyses par faisceaux d'ions dans une chambre expérimentale dédiée.

Motivée par une forte ambition scientifique, JANNuS-Saclay se consacre à l'étude approfondie des effets de l'irradiation sur les matériaux destinés aux applications nucléaires, à l'implantation ionique et à la caractérisation. Grâce à l'expertise du personnel technique et le développement constant des équipements, JANNuS-Saclay s'impose comme un acteur majeur dans le domaine des irradiations et possède une reconnaissance internationale.

Cette communication présentera les caractéristiques de la plateforme, dressera un bilan des avancées techniques réalisées au cours des deux dernières décennies, et détaillera les projets futurs visant à répondre aux besoins expérimentaux émergents pour la décennie à venir.

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



Plateforme JANNuS-Saclay

IBAF00051

COMPLEMENTARY PIXE–RBS ANALYSIS FOR COMPLEX SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES USING MULTI-DETECTOR CONFIGURATIONS

T. Vanmeerbeek¹, A. Vantomme², J. Meersschaut³

¹ KU Leuven/IMEC - Leuven (Belgium)

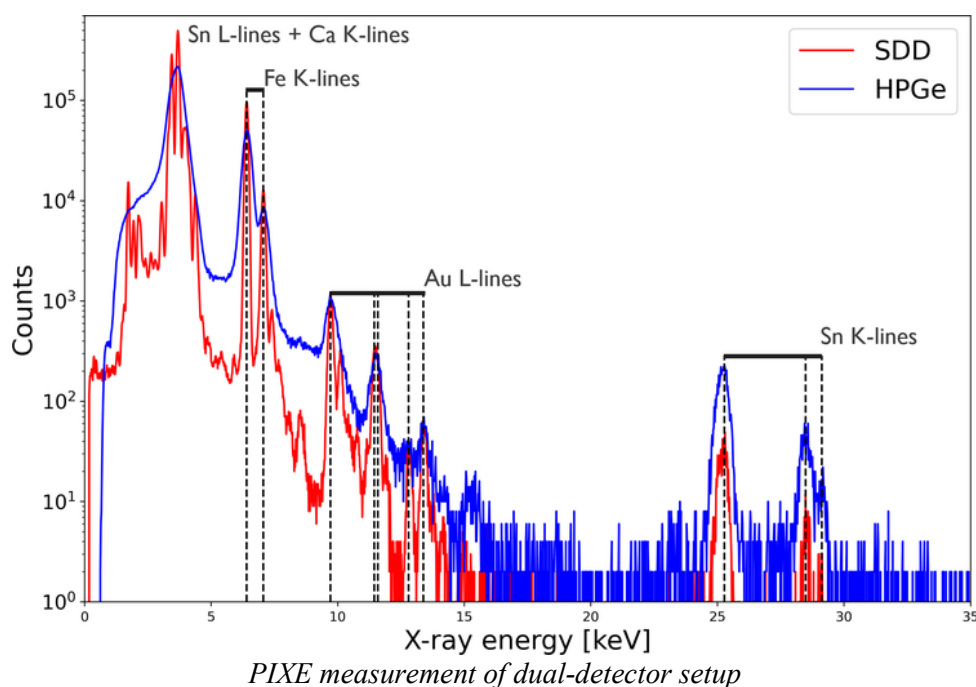
² KU Leuven - Leuven (Belgium)

³ IMEC - Leuven (Belgium)

In the semiconductor industry, nanoscale structures are becoming increasingly complex and often contain trace quantities of elements that are challenging to quantify. In this context, particle-induced X-ray emission (PIXE) can effectively complement established ion beam analysis (IBA) techniques, particularly for the detection of low-concentration elements in complex nanostructures.

In this work, we investigate the potential of different X-ray detection strategies to optimize PIXE as a complementary technique to Rutherford backscattering spectrometry (RBS). For this reason, a dual-detector setup combining a silicon drift detector (SDD) and a high-purity germanium (HPGe) detector was developed. The advantage of this combined energy-dispersive approach is illustrated through an exemplary PIXE spectrum shown in Figure 1, highlighting the complementary sensitivity and resolution of both detectors across a wide energy range. In addition, PIPS detectors are integrated into the same chamber to enable simultaneous RBS–PIXE measurements.

The strengths and limitations of this combined setup for quantitative analysis are discussed. For absolute quantification, a rotating vane which periodically intersects the beam will be included to provide an accurate measurement of the beam current. Finally, possible extensions of the setup towards wavelength-dispersive PIXE (WD-PIXE) are considered. These considerations demonstrate the potential of multi-detector PIXE configurations to enhance elemental characterization in advanced semiconductor nanostructures.



IBAF00006

PROTON-INDUCED CROSS-SECTION MEASUREMENTS FOR THE CHARACTERIZATION OF Li-, F-, AND B-BASED THIN FILMS

S. Sorieul¹, S. Pellegrino², S. Vaubaillon³

¹ CNRS/LP2iB - Gradignan (France)

² CEA - Saclay (France)

³ UB/LP2iB - Saclay (France)

In recent years, the AIFIRA facility (LP2iB, Bordeaux, France) has seen increasing demand for beamtime dedicated to the quantification of lithium, phosphorus, oxygen and nitrogen—and more recently, boron—in thin-film solid ion conductors such as Li_xPyOzNd materials. These materials are indeed considered among the most suitable chemistries in the development of all-solid-state microsensors and microbatteries. As the chemical composition of those materials plays a key role for their functional performances, efficient characterization of large sample sets is required. Hence, optimizing analytical conditions is crucial to obtaining reliable statistics within reduced acquisition times.

Among ion beam analysis methods, Nuclear Reaction Analysis (NRA) stands out as a powerful tool for probing light elements with high sensitivity and depth resolution. While its elemental and isotopic selectivity is a significant advantage, it can also pose limitations for routine analytical applications, as it often requires multiple beam conditions tailored to the elements of interest even for a single sample. A recent study has highlighted the potential of proton beams for the simultaneous detection of ^7Li and ^{18}O [1]. These proton beams are particularly valuable when used in conjunction with techniques such as PIXE and PIGE, complementing RBS and NRA to enable comprehensive elemental quantification, from light to heavier elements. However, the reliability of NRA strongly depends on the availability and accuracy of nuclear reaction cross-section data.

In this work, we present the first results of a study combining experimental methodology and data analysis for the determination of proton-induced reaction cross sections for lithium, fluorine, and boron. The detailed experimental methodology is described including used standard, beam energy calibration, detector setup, and uncertainty assessment. Special attention is given to the optimization of measurement conditions to ensure reproducibility and minimize systematic errors.

Beyond the measurements themselves, this work addresses the improvement of data processing strategies for thin film characterization. By integrating newly measured cross sections into high-throughput analysis routines for thin film elaboration, this work allows an enhanced accuracy in Li, F, and B depth profiling and quantification. This methodological advancement directly contributes to more reliable interpretation of NRA spectra, particularly for complex or multi-layered samples.

Références

[1] N. De La Rosa, P. Kristiansson, E.J. Charlotta Nilsson, L. Ros, J. Pallon and H. Skogby, *J Radioanal Nuc Chem* 317 (2018) 253

IBAF00017

APPROCHE MÉTROLOGIQUE POUR FIABILISER LE PROFILAGE DE L'HYDROGÈNE PAR RNRA

C. Forgione¹, L. Dupont², P.L. Debarsy³, J.L. Colaux²

¹ Département de Physique, UNamur - Namur (Belgium)

² Département de Physique, NISM, UNamur - Namur (Belgium)

³ SIAM, UNamur - Namur (Belgium)

L'analyse par réaction nucléaire résonante (RNRA) basée sur la réaction $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ est reconnue pour sa capacité à profiler l'hydrogène avec une excellente résolution en profondeur et une grande sensibilité. Néanmoins, l'exploitation quantitative de cette technique requiert une maîtrise rigoureuse de sa reproductibilité, condition indispensable à toute démarche métrologique avancée.

Lors d'un premier travail [1], nous avons entrepris une évaluation « top-down » de la reproductibilité de notre système RNRA par le biais d'une analyse de variance (ANOVA) appliquée à un ensemble de mesures répétées sur un échantillon de référence (i.e., pastille de TiH_2), réalisées sur l'accélérateur ALTAÏS hébergé par la plateforme SIAM. Cette étude a mis en évidence une reproductibilité globale de l'ordre de 2,2 %, valeur jugée insuffisante au regard des exigences attendues pour une quantification fiable et traçable de l'hydrogène.

Le travail présenté ici s'inscrit dans une approche complémentaire « bottom-up », visant à identifier systématiquement les différentes sources d'erreur contribuant à cette dispersion et à en évaluer l'impact relatif pour finalement mettre en œuvre des améliorations ciblées sur le dispositif expérimental et les procédures d'analyse. Cette démarche a conduit à l'identification de contributions majeures liées, entre autres, à l'intégration de la charge incidente, au bruit de fond induit par les éléments définissant la taille du faisceau, ainsi qu'aux procédures d'étalonnage du détecteur gamma et de traitement des données brutes.

Afin d'évaluer quantitativement l'impact de ces améliorations expérimentales, une nouvelle étude de reproductibilité été menée sur base d'un protocole expérimental rigoureux et d'un traitement des données brutes automatisé. Les résultats de cette seconde analyse ANOVA permettent de quantifier objectivement le gain en reproductibilité obtenu, et d'évaluer la pertinence de la stratégie combinant approches « top-down » et « bottom-up » pour la fiabilisation des mesures IBA.

Ce travail constitue une étape importante vers l'établissement d'un cadre métrologique robuste pour la quantification absolue de l'hydrogène par RNRA dans des domaines applicatifs exigeants tels que la microélectronique ou l'énergie nucléaire.

Références

[1] « Profilage de l'hydrogène par RNRA : incertitudes et limites de détection », P.-L. Debarsy et al., communication orale IBAF 2024.

IBAF00018

NETTOYAGE CONTRÔLÉ DE L'EXTRÊME SURFACE POUR LE PROFILAGE RNRA SUR ACIER INOX EN CONTEXTE NUCLÉAIRE

M. Fromont¹, L. Dupont², P.L. Debarsy³, J.L. Colaux²

¹ Département de Physique, UNamur - Namur (Belgium)

² Département de Physique, NISM, UNamur - Namur (Belgium)

³ SIAM, UNamur - Namur (Belgium)

Dans les réacteurs nucléaires à eau pressurisée, la radiolyse de l'eau génère une variété d'espèces réactives susceptibles d'altérer le comportement électrochimique des aciers inoxydables, favorisant ainsi l'incorporation d'hydrogène dans ces matériaux et, par conséquent, leur fragilisation. Dans ce contexte, le profilage de l'hydrogène en extrême surface (~10-20 nm) constitue un enjeu important pour relier conditions d'irradiation, état du film passif et mécanismes d'incorporation de l'hydrogène dans ces matériaux.

La RNRA basée sur la réaction résonante $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ est particulièrement adaptée à ce problème grâce à son excellente résolution en profondeur et à sa grande sensibilité. Toutefois, le signal d'une contamination de surface peut masquer la signature de l'hydrogène recherchée dans les tout premiers nanomètres du matériau. Afin de quantifier cette limitation, nous nous sommes appuyés sur le code HyProc développé au LARN pour simuler l'effet d'une couche d'eau de quelques monocouches sur la courbe d'excitation obtenue par RNRA, et évaluer son impact sur l'extraction du profil d'hydrogène propre au film passif.

Le présent travail explore une stratégie expérimentale visant à réduire la contamination de surface sans perturber le film passif naturellement formé en extrême surface de l'acier inox. Dans un premier temps, la variabilité de la contamination de surface a été évaluée sur une série d'échantillons issus d'un même feuillet, mettant en évidence une non-uniformité de la contamination malgré un historique d'exposition à l'atmosphère identique. Dans un second temps, un nettoyage UV-ozone a été mis en œuvre à proximité immédiate de la ligne d'analyse RNRA, opérée sur l'accélérateur ALTAÏS hébergé par la plateforme SIAM, afin de minimiser le temps d'exposition à l'air lors du transfert. Ce procédé, reposant sur l'oxydation photo-activée des contaminants organiques en produits volatils (CO_2 , H_2O ...), permet de réduire significativement (i.e., ~50%) le signal hydrogène attribuable à la contamination de surface. Nous observons cependant une saturation de cet effet, compatible avec la présence d'espèces hydrogénées intrinsèques au film passif développé en extrême surface du substrat d'acier inox.

Les limites du nettoyage l'UV-ozone (i.e., passage inévitable par l'atmosphère entre nettoyage et analyse) motivent l'exploration d'une solution alternative consistant en un décapage ionique doux in-situ, réalisé par plasma d'argon basse puissance directement sur la ligne d'analyse RNRA afin d'éviter toute réexposition de l'échantillon à l'atmosphère. Les principes de qualification de cette méthode, ainsi que les stratégies envisagées pour vérifier l'intégrité de la couche d'extrême surface étudiée, seront discutés.

IBAF00032

FILMS MINCES DE SnO_2 À CHIMIE DES DÉFAUTS CONTRÔLÉE PAR ALD THERMIQUE : ÉLUCIDATION DE LA STRUCTURE ÉLECTRONIQUE GOUVERNÉE PAR LES DÉFAUTS POUR LE TRANSPORT DE CHARGE

B. Xia, I. Vickridge, J.J. Ganem, E. Briand, S. Steydli

Institut des NanoSciences de Paris - Paris (France)

Le dépôt par couches atomiques (ALD) a été utilisé pour élaborer des films minces de SnO_2 à partir de tétrakis(diméthylamino)étain (TDMASn) et de H_2O dans une gamme de températures comprise entre 50 et 200 °C, afin d'élucider l'interaction entre la température de croissance, la chimie des défauts et la structure électronique. Une caractérisation approfondie par spectroscopie photoélectronique, analyse par faisceau d'ions (IBA) et cartographie de structure de bandes (UPS et LEIPS) révèle que les propriétés électroniques du SnO_2 ne sont pas uniquement déterminées par la largeur de bande interdite, mais sont fortement influencées par les restructurations électroniques induites par les défauts.

À basse température de dépôt (50–100 °C), les films présentent des compositions riches en oxygène, des ligands organiques résiduels et une incorporation importante d'hydrogène, conduisant à la formation d'états dans la bande interdite, de signatures pseudo- Sn^{2+} et de niveaux accepteurs peu profonds. Ces défauts favorisent l'émission électronique de surface mais limitent le transport de charge dans le volume du matériau. Des températures de dépôt plus élevées (150–200 °C) favorisent la décomposition des ligands et une oxydation plus efficace, réduisant les niveaux d'impuretés et améliorant la cristallinité.

En particulier, la température de 150 °C offre le meilleur compromis, avec une fonction travail élevée (4,56 eV), une forte affinité électronique (3,31 eV) et une position favorable de la bande de conduction ($E_{\text{CB}} = 1,25$ eV), attribuées à des états pièges électroniques liés à l'hydrogène. À l'inverse, à 200 °C, les lacunes d'oxygène et la réapparition d'états Sn^{2+} abaissent la barrière d'injection vers le volume du matériau mais diminuent la conductivité de surface.

Le marquage au deutérium combiné aux analyses ERDA confirme l'incorporation de l'hydrogène ainsi que ses distributions spécifiques en profondeur. Des mesures HER sensibles à la surface et des analyses de transport électrique permettent également de dissocier les effets concurrents des défauts de surface et de volume sur la conductivité.

Ce travail apporte de nouvelles stratégies de synthèse basées sur l'ingénierie des défauts et fournit des mécanismes fondamentaux pour ajuster les propriétés des films de SnO_2 élaborés par ALD, en vue d'applications telles que les couches de transport d'électrons, les catalyseurs et les conducteurs transparents.

Références

Defect Chemistry Engineered SnO_2 Thin Films via Thermal ALD: Unraveling Defect-Controlled Electronic Structure for Charge Transport

IBAF00057

AI-ASSISTED ION BEAM ANALYSIS: TOWARD EXPLAINABLE AND UNCERTAINTY-AWARE SPECTRUM INTERPRETATION

M. Han¹, F. Garrido¹, H. Khodja²

¹ IJCLab - Orsay (France)

² CEA/Saclay - Gif-Sur-Yvette (France)

L'interprétation des spectres IBA requiert souvent des simulations itératives basées sur la physique et un ajustement par des experts, notamment pour les échantillons multicouches, les techniques couplées et les grands espaces de paramètres. Ce projet vise à développer des modèles d'intelligence artificielle explicables, rigoureux et fiables afin d'accélérer l'interprétation des spectres IBA tout en préservant la cohérence physique. Nous formulons l'analyse IBA comme un problème inverse, où les propriétés de l'échantillon, telles que sa composition, son épaisseur et ses profils de profondeur, sont déduites des spectres mesurés. Des approches d'apprentissage automatique seront explorées à la fois comme modèles de substitution pour une simulation directe rapide et comme modèles inverses probabilistes fournissant des estimations d'incertitude. Les connaissances physiques, notamment les pouvoirs d'arrêt, les sections efficaces de diffusion, la réponse des détecteurs, la géométrie expérimentale et les contraintes spécifiques à la technique, seront intégrées au processus d'apprentissage. Les travaux actuels portent sur la compréhension du flux de travail IBA à travers des échantillons de référence, des simulations basées sur SIMNRA et des stratégies d'automatisation pour la génération d'ensembles de données validés en vue d'analyses futures assistées par l'IA.

IBAF00061

EFFET DE L'ÉLÉMENT D'ALLIAGE DE FER SUR LA CINÉTIQUE DES DÉFAUTS D'IRRADIATION DANS Ni-Fe

T. Bilyk, X. Glad, F. Nozais, G. Gutierrez, C.C. Fu

CEA Saclay - Gif-Sur-Yvette (France)

L'extension de la durée de vie des réacteurs nucléaires actuels ainsi que le développement des systèmes de nouvelle génération reposent sur la capacité à prédire l'évolution des matériaux soumis à des environnements irradiants sur des échelles de temps et de longueur inaccessibles à l'expérimentation directe. Les approches de modélisation multi-échelles constituent aujourd'hui un outil essentiel pour relier les mécanismes atomiques induits par l'irradiation aux propriétés macroscopiques des matériaux. Leur fiabilité dépend toutefois fortement de la qualité des données d'entrée décrivant les défauts cristallins, telles que les énergies de formation, de migration ou de liaison des défauts ponctuels et étendus.

Dans ce contexte, produire des données expérimentales de référence destinées à alimenter et valider ces modèles est indispensable. Parmi les méthodes disponibles, le recuit de résistivité permet de déterminer les seuils énergétiques de migration/recombinaison des différents types de défauts induits par irradiation. Cette technique est fondée sur la dépendance de la résistivité électrique d'un matériau à la densité de défauts dans celui-ci. Ainsi, lors d'une expérience de recuit de résistivité, un échantillon est irradié une température proche du zéro absolu, ce qui permet de figer les défauts créés, puis de mesurer sa résistivité résiduelle. Afin d'observer les différents stades de relaxation des défauts d'irradiation, des cycles se succèdent : augmentation de la température du matériau ; plateau en température ; retour à la température d'irradiation et mesure de résistivité. La variation de la résistivité, relative à la résistivité résiduelle après irradiation, permet de suivre les relaxations associées à la migration, la recombinaison ou l'agglomération des défauts, et ainsi d'estimer les barrières énergétiques gouvernant ces mécanismes.

En plus de ces rappels de contexte et de méthode, le dispositif de la plateforme JANNuS sera présenté, ainsi que les premières études envisagées. Ces dernières porteront sur l'influence de la composition chimique sur la cinétique des défauts dans des alliages dilués modèles Ni-Fe contenant différents teneurs en fer (0 à 3%at), avec pour objectif de quantifier l'effet des éléments d'alliage sur les mécanismes élémentaires de migration et de recombinaison des défauts d'irradiation.

Références

- [1] Gómez-Ferrer, Begoña. Resistivity recovery in Fe and FeCr alloys. Springer International Publishing, 2016.
- [2] Fu, Chu Chun et al., Multiscale modelling of defect kinetics in irradiated iron, Nature Materials 4 (2004): 68-74.

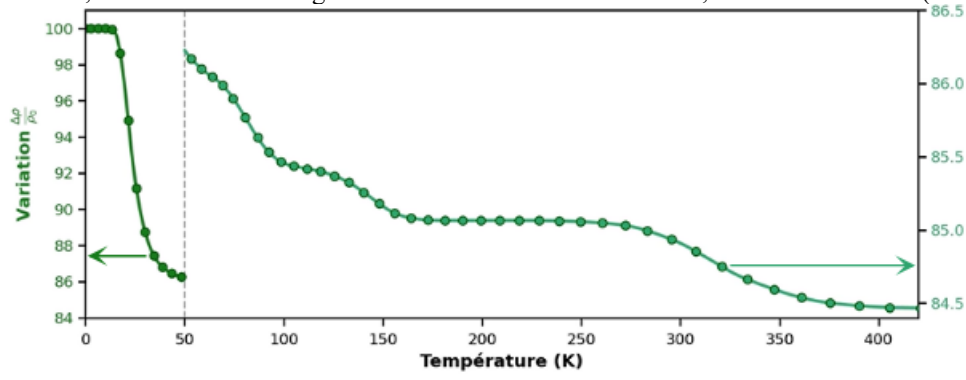


Figure – Résultat typique de recuit de résistivité obtenu en considérant une matrice de fer. La variation de la résistivité par rapport à la résistivité initiale décroît par sauts en température, mettant en évidence des phénomènes thermiquement activés. Courbe adaptée de [2].

IBAF00014

DEVELOPMENT OF A COMPACT LOW-BACKGROUND SET-UP FOR GAMMA SPECTROSCOPY

P-L. Debarsy¹, C. Stasser², G. Terwagne²

¹ Siam-Université De Namur - Namur (Belgium)

² Université De Namur - Namur (Belgium)

Gamma-ray spectroscopy is widely employed in fields such as particle-induced gamma-ray emission (PIGE), astrophysics, geology, nuclear decommissioning, and nuclear waste management. In the context of waste characterization, the accurate determination of the activity of specific radionuclides is essential, as it directly impacts regulatory decisions regarding the release or long-term storage of materials.

The sensitivity of gamma-ray spectroscopy measurements is frequently limited by background noise, which degrades detection limits and complicates spectral analysis. This background originates from several sources, including natural radioactivity present in the environment and interactions induced by cosmic radiation. In addition to these external contributions, intrinsic detector-related effects also play an important role. In particular, the Compton effect produces a continuous background that can extend into energy regions of interest and mask weak gamma-ray lines. While background induced by natural radioactivity can be efficiently reduced using dense passive shielding materials such as lead or iron [1], the Compton contribution cannot be eliminated by passive shielding alone. An effective approach to reduce this intrinsic background is the use of an active anti-Compton (AC) veto system [2].

In this work, we present a compact low-background gamma-ray spectroscopy setup designed to efficiently suppress both environmental and intrinsic background components. The system is based on a 132% relative efficiency HPGe coaxial detector surrounded by an active AC veto and enclosed in passive shielding. The passive shield consists of 5 cm of low-activity lead (≈ 10 Bq/kg), assembled in modular elements to allow easy dismantling and portability. The AC veto is implemented using a NaI(Tl) scintillator detector in a well geometry, with a thickness of 50 mm on the sides and 26 mm at the front. A 60 mm diameter aperture is drilled in the front of the NaI(Tl) crystal to achieve a compromise between shielding efficiency and detector acceptance. In addition, a 4 mm thick copper layer is inserted between the lead shielding and the NaI(Tl) detector to suppress characteristic X-rays emitted by the lead.

The detector geometry and the thicknesses of the shielding components were optimized using GEANT4 Monte Carlo simulations, taking into account practical constraints such as weight, compactness, and cost. Data acquisition is performed using a CAEN DT5724 digitizer, allowing simultaneous acquisition of spectra with and without application of the AC veto.

Experimentally, the passive lead shielding alone reduces background from natural radioactivity by approximately one order of magnitude in the 0–3 MeV energy range. The addition of the AC veto further reduces the background by about a factor of two, resulting in an overall reduction close to a factor of 20. For energies above 3 MeV, where the background is dominated by cosmic-ray muons, the veto achieves a suppression factor close to 60 in the 3–10 MeV range. Following this initial characterization, more realistic measurement conditions were investigated using calibrated ^{152}Eu sources embedded in different matrices to simulate nuclear waste stored in tanks. These measurements show an improvement of the detection limits ranging from 62% to 78% for several isotopes of interest, clearly demonstrating the benefit of the AC veto for waste characterization applications.

These results demonstrate the strong potential of this compact and transportable setup for low-background gamma-ray spectroscopy. In addition, complementary GEANT4 studies are carried out to explore alternative shielding configurations aimed at extending the use of the system to other applications.

Références

- [1] P.L. Debarsy et al., AIP Adv 13 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0178215>.
- [2] M. Tsutsumi et al., J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 957–963.
<https://doi.org/10.1080/18811248.2002.9715282>.

Remerciements

The authors thank Mr. Tijani Tabarrant and Louis Lambotte for their invaluable help in developing the set-up, as well as Benjamin Hennebert (DSI) for his support for measurements. Authors would also thank the Wallonic recherche SPW to accept to fund this project.

IBAF00019

STUDY OF THE DEGRADATION OF BIOSIGNATURES UNDER SIMULATED MARTIAN IRRADIATION USING GEANT4

B. Duarte Dos Santos¹, A. Canizarès², P. Sigot², O. Wendling², A. Bellamy², W. Hate², T. Sauvage², F. Foucher²

¹ Université d'Orléans, CNRS, CEMHTI UPR 3079 - Orléans (France)

² CNRS, Université d'Orléans, CEMHTI UPR 3079 - Orléans (France)

Approximately 4 Ga ago, liquid water was an available resource on the surface of Mars, which could have enabled life to appear and proliferate on the red planet. As a result, biosignatures of past life (e.g., biotic molecules) could have been preserved in ancient rocks, despite the present uninhabitable surface environment due to a decrease in atmospheric pressure over time, which led to the loss of all surface liquid water [1]. Due to Mars' present-day low-pressure atmosphere and lack of a magnetosphere, the surface has been heavily irradiated by Solar Energetic Particles (SEPs) and Galactic Cosmic Rays (GCRs), which are able to penetrate multiple layers into the subsurface [2]. However, shielding at depth could still preserve organic molecules (e.g., amino acids) despite several Ga of this ionizing radiation [3]. Therefore, the upcoming Rosalind Franklin rover of the ExoMars mission is equipped with a drill capable of sampling up to two meters below the surface [4].

This work aims to simulate and evaluate the combined effects of SEP and GCR irradiation over several Ga on Mars analogue rocks enriched in organic matter, in order to investigate the protective role of different minerals in biosignature preservation. Monte Carlo simulations of Martian surface and subsurface radiation environments are currently being performed using the GEANT4 toolkit [5], with atmospheric pressure and column depth, as well as regolith composition and density being the main variable parameters. These simulations will guide the design and validation of upcoming laboratory experiments, by providing detailed information on energy deposition and dose profiles within the Martian regolith. Analogue samples from the ISAR (International Space Analogue Rockstore) collection (Orléans, France), along with synthetic organo-mineral mixtures representative of Martian regolith, will be irradiated with protons at the CEMHTI Pelletron light ion accelerator (CNRS, Orléans) and characterized in situ and ex situ. In situ analyses will rely on the use of an in-house developed Raman spectrometer [6], complemented by Ion Beam Analysis techniques such as RBS, NRA, and ERDA.

Références

- [1] Westall F. et al., *Astrobiology* 2015, 15, 998–1029.
- [2] Dartnell L.R. et al., *Biogeosciences* 2007, 4, 545–558.
- [3] Kminek G. et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006, 245, 1–5.
- [4] Altieri F. et al., *Adv. Space Res.* 2023, 71, 4895–4903.
- [5] Agostinelli S. et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 2003, 506, 250–303.
- [6] Canizarès A. et al., *Appl. Spectrosc.* 2022, 76, 723–729.

Remerciements

Financial support was equally provided by the Université d'Orléans and the Centre National d'Études Spatiales (CNES) for the development of this doctoral research project.

IBAF00020

AU-DELÀ DES COMPOSITIONS MOYENNES : APPORT DES CARTOGRAPHIES μ -PIXE À L'ÉTUDE DES COLORATIONS EXCEPTIONNELLES DES SPÉLEOTHÈMES ISSUS DE LA GROTTE DE LA CIGALÈRE (ARIÈGE, FRANCE)

M. Labruyère¹, L. Baseil², M. Vlieghe³, J. Yans³, J.L. Colaux²

¹ Département de Physique, UNamur - Namur (Belgium)

² Département de Physique, NISM, UNamur - Namur (Belgium)

³ Département de Géologie, ILEE, UNamur - Namur (Belgium)

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la calcite et l'aragonite (CaCO_3) sont des minéraux généralement blancs à incolores. Toutefois, dans certains environnements souterrains particuliers, des minéralisations présentent des colorations atypiques (jaune, bleu, noir, ...), suggérant l'intervention de processus géochimiques complexes, notamment liés à la circulation de fluides enrichis en éléments traces métalliques. La grotte de la Cigalère (Ariège, France), développée dans un environnement métallogénique riche en sulfures de plomb et de zinc, constitue à cet égard un site d'étude remarquable.

Les techniques d'analyse par faisceau d'ions constituent un outil de choix pour l'étude des spéléothèmes colorés, grâce à leur excellente sensibilité aux éléments traces, leur caractère non destructif et leur capacité à fournir des informations quantitatives spatialement résolues. Lors de travaux antérieurs [1], nous avons montré que les concentrations moyennes en éléments métalliques déterminées par micro-PIXE dans des spéléothèmes carbonatés étaient cohérentes avec celles obtenues par LA-ICP-MS.

Dans le cadre de ce travail consacré à l'étude d'échantillons colorés issus de la grotte de la Cigalère, nous discuterons principalement des résultats semi-quantitatifs obtenus à partir de cartographies élémentaires μ -PIXE bidimensionnelles acquises avec une résolution spatiale d'environ 30 μm à l'aide de la microsonde opérée sur l'accélérateur ALTAÏS de la plateforme SIAM. Ces cartographies révèlent des structures et des associations minéralogiques clairement corrélées aux zones colorées observées optiquement, telles que des séparations nettes entre matrices sulfatées/carbonatées et phases secondaires riches en métaux (Fe, Mn, Zn...), l'existence d'épisodes distincts de minéralisation au sein d'un même échantillon, ou encore des distributions spatiales structurées d'éléments traces liées à la croissance des spéléothèmes et à la dynamique des fluides météoriques riches en métaux.

Enfin, nous discuterons également de la quantification élémentaire réalisée par micro-PIXE sur des régions d'intérêt finement définies à partir des cartographies 2D, permettant d'accéder à des concentrations représentatives des différentes phases minérales identifiées. Ces résultats seront comparés à ceux obtenus par ICP-MS ou p-XRF sur les mêmes échantillons [2], afin d'évaluer la complémentarité de ces différentes approches analytiques et l'apport spécifique des cartographies μ -PIXE pour l'étude de spéléothèmes chimiquement et texturalement complexes.

Références

[1] « Développement d'un système d'analyse microsonde IBA au LARN (UNamur) : application à l'étude de colorations exceptionnelles dans les spéléothèmes », L. Baseil et al., contribution orale IBAF 2024.

[2] M. Vlieghe et al., "Non-destructive characterization of variously colored gypsum and aragonite/calcite speleothems from the Cigalère Cave (Ariège, France)", International Journal of Speleology, vol. 55, n°1, ijs2564, doi: 10.5038/1827-806X.ijs2564

IBAF00053

TRAITEMENT DES PFAS PAR FAISCEAU D'ÉLECTRONS À TRÈS HAUT DÉBIT DE DOSE : UNE APPROCHE DE MODÉLISATION RADIO-CINÉTIQUE POUR ÉLUCIDER LA CHIMIE RADICALAIRE DÉPENDANTE DU DÉBIT DE DOSE

R. Tonneau¹, R. Labarbe², S. Aude², G. Eppe³, J. Aline⁴, L. Stéphane¹, A.C. Heuskin¹

¹ Université de Namur - Namur (Belgium)

² IBA - Louvain-La-Neuve (Belgium)

³ Université de Liège - Liège (Belgium)

⁴ Haemers Technologies - Nivelles (Belgium)

Introduction :

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) constituent une famille de polluants persistants dont la remarquable stabilité chimique, conférée par la force des liaisons C–F, les rend réfractaires aux procédés de traitement conventionnels. Le traitement par faisceau d'électrons de haute énergie représente une voie prometteuse pour leur dégradation. La radiolyse de l'eau génère des espèces radicalaires hautement réactives, telles que électrons hydratés (e^-_{aq}), les radicaux hydroxyles ($\bullet OH$) et les radicaux hydrogène ($H\bullet$), capables d'initier la minéralisation des PFAS. Toutefois, l'utilisation de débits de dose ultra-élevés (UHDR, > 50 Gy/s), modifie profondément la chimie radicalaire et remet en question les rendements radiolytiques (G-values) établis à débit de dose conventionnel. À ce jour, aucun modèle numérique ne permet de décrire quantitativement l'impact du débit de dose sur ces rendements primaires, ce qui constitue le verrou scientifique central adressé dans ce travail.

Matériels et méthodes :

Nous présentons une approche de modélisation radio-cinétique articulée en deux étapes couplées. La première vise à décrire la dépendance des G-values au débit de dose, pour laquelle deux approches complémentaires sont proposées. La première approche est un modèle semi-empirique calibré sur des mesures expérimentales de rendement de production de H_2O_2 issues de la littérature, permettant d'extrapoler les G-values effectives sur une large gamme de débits de dose. La seconde approche repose sur des simulations Monte Carlo par Geant4-DNA, qui modélisent les phases précoces de la radiolyse de l'eau (physique et physico-chimique, jusqu'à 0,1–1 μs), afin de capturer ab initio l'effet du débit de dose sur la distribution des espèces radicalaires primaires avant l'entrée en régime homogène. La seconde composante du modèle intègre ces rendements adaptés dans un solveur ODE (Python/scipy-LSODA), décrivant la phase de chimie homogène à travers un système complexe d'équations différentielles ordinaires. Ce solveur couple la chimie de la radiolyse de l'eau aux cinétiques de dégradation des PFAS, dont les constantes de réaction sont issues de la littérature.

Résultats :

La validité du modèle est établie par comparaison directe avec des données expérimentales. D'une part, l'évolution simulée des concentrations en e^-_{aq} , $\bullet OH$ et H_2O_2 en fonction du débit de dose reproduit fidèlement les mesures expérimentales disponibles et validerait ainsi la chaîne de modélisation Geant4-DNA / G-values semi-empiriques. D'autre part, les cinétiques de dégradation de l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) simulées à pH 6 s'accordent quantitativement avec les données expérimentales issue de la littérature [1].

Discussion et conclusion :

Ce travail fournit ainsi le premier cadre de modélisation intégré capable de prédire la dégradation des PFAS par faisceau d'électrons en tenant compte explicitement de la dépendance au débit de dose de la chimie radicalaire primaire. Au-delà du cas du PFOA, l'outil développé est générique et peut être étendu à d'autres contaminants ou conditions opératoires (pH, concentration en O_2 , matrice aqueuse), ouvrant la voie à une optimisation rationnelle des procédés de traitement par irradiation à très haut débit de dose.

Références

[1] Londhe, K. et al. Energy Evaluation of Electron Beam Treatment of Per fluoroalkyl Substances in $[H_2O]$: A Critical Review. ACS EST Engg. 1, 827–841 (2021).

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien de la Région wallonne (Belgique) dans le cadre du partenariat d'innovation technologique n° C9020 (PFAS-blaster), co-dirigé par les clusters MecaTech et Greenwin.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

The Largest and Most Diverse Designer and Manufacturer of
Electrostatic Particle Accelerators for Scientific and Industrial
Applications

Ion Accelerators

- Air-insulated Ion Accelerators with TV up to 500 kV
- SF₆-insulated Singletron Single-ended Ion Accelerators with TV up to 6.0 MV
- SF₆-insulated Tandetron Tandem Ion Accelerators with TV up to 6.0 MV
- Vacuum-insulated Tandem Ion Accelerators with TV up to 300 kV

Electron Accelerators

- Singletron Electron Accelerators with TV up to 6.0 MV/TV

Ion Implanters

- Beam energies 10 - 60 MeV and higher
- Beam powers up to 25 kW

Ion Beam Analysis Systems

- Rutherford Backscattering Spectroscopy (RBS)
- Particle Induced X-ray Emission (PIXE)
- Particle Induced Gamma-ray Emission (PIGE)
- Nuclear Reaction Analysis (NRA)
- Elastic Recoil Detection (ERD)
- Medium Energy Ionscattering Spectroscopy (MEIS)

Accelerator Mass Spectrometers

Vacuum-insulated Tandem and SF₆-insulated Tandetron based Systems for the measurement of ³H, ¹⁰Be, ¹⁴C, ²⁶Al, ³⁶Cl, ⁴¹Ca, ¹²⁹I and actinides for application in

- Archeology
- Oceanography
- Geosciences
- Material sciences
- Biomedicine
- Etc.

Ion Microbeam Systems

- Tandetron and Singletron based Systems

Neutron Generator Systems

- Air-insulated, Tandetron and Singletron based DC and Pulsed-beam Systems

Components

Ion and Electron Accelerator Tubes, Ion and Electron Sources,
Beam Handling & Monitoring Equipment, Etc.



MORE
ENERGY
FOR
RESEARCH

High Voltage Engineering Europa B.V.

P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands

Phone: +31-33-4619741 Email: info@highvolteng.com

Internet: www.highvolteng.com

PLANNING GENERAL IBAF 2026

Mardi 8 septembre		Mercredi 9 septembre		Jeudi 10 septembre		Vendredi 11 septembre	
		08:40 - 09:20	INV 2 - Y. PREZADO	08:40 - 09:20	INV 4 - D. STRIVAY	08:40 - 09:20	INV 6 - C. JÉGOU
		09:20 - 09:40	#04 - E. Rapport	09:20 - 09:40	#07 - A. Gillon	09:20 - 09:40	#12 - A. Georgesco
		09:40 - 10:00	#13 - H. Stimoli	09:40 - 10:00	#10 - J.S. Luabanya	09:40 - 10:00	#02 - P. Couture
		10:00 - 10:40	pause 40'	10:00 - 10:20	#40 - L. Baseil	10:00 - 10:20	#29 - H. Khodja
		10:40 - 11:20	INV 3 - J. MEERSCHAUT	10:20 - 11:00	pause 40'	10:20 - 11:00	pause 40'
		11:20 - 11:40	#03 - J. Tribollet	11:00 - 11:40	INV 5 - S. LUCAS	11:00 - 11:20	Clôture
		11:40 - 12:00	#05 - A. Vantomme	11:40 - 12:00	#15 - C. Pacheco	11:30 - 12:40	Visite ALTAIS
		12:00 - 12:20	#11 - B. Xia	12:00 - 12:20	#38 - M. Bart		
		12:20 - 12:40	#09 - L. Lavisse	12:20 - 12:40	#54 - G. Morabito		
	13:00 - 14:00	Accueil des participants	Déjeuner	12:40 - 13:45	Déjeuner	12:40 - 14:20	Déjeuner (plaque-nique)
	14:00 - 14:20	Ouverture					
	14:20 - 15:00	INV 1 - F. GARRIDO					
	15:00 - 15:20	#08 - S. Higuere					
	15:20 - 15:40	#23 - J. Jouve					
	15:40 - 16:00	#55 - I. Vickridge	H. Khodja				
	16:00 - 16:20	#56 - T. Sauvage					
	16:20 - 17:00	pause 40'		14:10 - 19:30	Programme social		
	17:00 - 17:20	Flash Posters					
	17:20 - 17:40	Exposants		19:30 - 23:00	Dîner de convivialité		
			Session poster				
	19:00 - 23:00	Soirée belge					