

## FICHE PROJET EUROPEEN

ACRONYME : SAT-MET

|  |  |                  |                 |
|--|--|------------------|-----------------|
| NOM COMPLET DU PROJET                  | SAT-MET : Implémentation d'une SAT sur un MET pour la plateforme GENESIS       |                  |                 |
| NUMERO DE CONVENTION                   | 21 <sup>E</sup> 03581  |                  |                 |
| DATE DE DEBUT                          | 01/09/2021   |                  |                 |
| DATE DE FIN                            | 31/12/2022   |                  |                 |
| COORDINATEURS                          | SAUVAGE Xavier   |                  |                 |
| • Etablissement(s)                     | • Laboratoire(s)   | • Responsable(s) | • Partenaire(s) |
| URN                                    | GPM  |                  |                 |
|  |  |                  |                 |
|  |  |                  |                 |
|  |  |                  |                 |
| CONTACT                                | <a href="mailto:xavier.sauvage@univ-rouen.fr">xavier.sauvage@univ-rouen.fr</a> |                  |                 |
| SITE INTERNET DU LABORATOIRE ET PROJET |  |                  |                 |

### DESCRIPTION DU PROJET

|        |  |
|--------|--|
| RESUME | <p>Le Groupe de Physique des Matériaux (GPM) est reconnu internationalement pour sa contribution majeure au développement de la caractérisation des matériaux à l'échelle atomique en 3 dimensions au moyen de la sonde atomique tomographique (SAT). Cette technique de caractérisation ultime est aujourd'hui répandue dans le monde entier et représente un outil indispensable pour l'étude de matériaux actuels ou futurs qui devront accompagner la transition énergétique. Le GPM forme des spécialistes de la SAT (doctorants, post-doctorants et école internationale annuelle), donne accès à cette technique au niveau national via la fédération de recherche METSA et demeure à la pointe de l'innovation mondiale sur cet instrument (e.g. nouveaux détecteurs, utilisation de lasers ultra-rapides).</p> <p>Le principe de la SAT repose sur l'évaporation par effet de champ des atomes d'un échantillon préalablement préparé sous forme d'une pointe. Une reconstruction du volume analysé est ensuite effectuée en post-traitement. Les algorithmes utilisés reposent sur des hypothèses simples qui donnent généralement un excellent résultat. Néanmoins, pour certains matériaux complexes (e.g. matériaux nanostructurés pour stockage d'hydrogène, matériaux pour batteries, dispositifs semi-conducteurs, alliages irradiés contenant des cavités), la géométrie de l'échantillon évolue de manière complexe au cours de son évaporation et sans cette connaissance, les reconstructions peuvent être fortement biaisées. Nous avons donc pour objectif sur la plateforme GENESIS de mettre en place un nouvel outil permettant d'accéder à cette information complémentaire. Ceci sera réalisé grâce au couplage de la SAT avec un microscope électronique à transmission (MET).</p> <p>Une étude préliminaire a permis de valider le concept d'un tel instrument. En effet, l'équipe d'instrumentation scientifique du GPM a développé des dispositifs de type SAT miniaturisée adaptable à un MET commercial. Il a ainsi été démontré qu'il était possible de suivre la dynamique d'évaporation d'un échantillon et de cartographier le champ électrostatique (information cruciale pour optimiser les reconstructions 3D). Pour pleinement exploiter ce concept, il est maintenant nécessaire</p> |
|--------|--|

d'implémenter le dispositif sur une colonne électronique moderne et dédiée offrant notamment une option de balayage (STEM) et des caractéristiques spécifiques permettant d'exploiter au mieux le potentiel de la combinaison SAT et MET. Notons enfin que cet instrument unique au monde permettra de conforter la place de la plateforme GENESIS et du GPM parmi les leaders mondiaux de l'analyse de la matière à l'échelle atomique.

#### HEI : HYDROGENE ET ENJEUX INTERDISCIPLINAIRES (CPER/CPIER)

Le projet HEI vise en région à accompagner les programmes liés à la transition énergétique vers les énergies décarbonées. Il s'inscrit donc à l'échelle régionale mais aussi dans l'axe prioritaire de l'état « Transition environnementale et énergétique ». HEI s'appuie sur une nouvelle structuration qui fait suite à la réunification de la Normandie. Dans la période 2014-2020, bien que les CPER étaient bas- et haut-normands, plusieurs structures de recherche étaient déjà normandes voire étendues à la Vallée de Seine : le Laboratoire d'Excellence EMC3 associant 7 UMR normandes et l'Institut CARNOT Energie et Systèmes de Propulsion pour le thème Energie et Matériaux, la fédération CNRS IRMA et l'EquipEx GENESIS pour les matériaux, sur lequel s'est articulé le CPIER Matériaux en Seine-1, la fédération CNRS I-EPE pour le thème Energie et propulsion.

Par leurs actions conjointes, les acteurs du projet HEI participent à fédérer la recherche en Normandie, au transfert de la recherche vers le monde socio-économique, et à l'attractivité de la Normandie pour y accroître la formation par la recherche. Le LabEx EMC3 a joué un rôle moteur quant à la structuration de la recherche normande puisque la COMUE Normandie Université a suivi ses propositions de structuration de la recherche locale en 5 Pôles Stratégiques de Formation et de Recherche, construits pour correspondre aux 5 Réseaux d'Intérêt Normands de la Région. Ainsi le pôle EP2M est le pendant du RIN Matériaux et Energie. À ce titre, les animateurs d'EP2M s'impliquent dans la construction du futur SRESRI en participant aux ateliers de travail de définition de la S3 : Energies, Mobilité, Industrie et Gestion des risques, 4 des 6 spécialisations retenues.

L'ambition du pôle EP2M pour les prochains CPER et CPIER est d'amplifier les effets transformant du Programme d'Investissement d'Avenir en termes d'attractivité, d'excellence et d'innovation ; à l'échelle de la Normandie (CPER) avec HEI et à celle de la Vallée de la Seine (Normandie et IDF, CPIER) avec les projets MS-2, Matériaux en Seine 2 et MOBISEINE, Mobilité en Seine. Cette ambition s'inscrit dans la stratégie européenne (Horizon Europe, cluster « Climate, Energy and Mobility », Pilar II) et vise à accompagner en région la transition énergétique vers les énergies décarbonées, de leurs productions aux usages, pour la « transition industrielle » avec les filières labellisées du territoire, automobile (MOVEO) et aéronautique (NAE/ASTECH). Le projet s'inscrit dans l'ODD 7 de l'ONU (garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable). En effet, la Normandie présente la particularité d'être un producteur d'électricité à faible émissions de CO2 grâce à son parc nucléaire. Elle est la seconde Région de France en termes de production électrique et deviendra la première au démarrage de l'EPR. Grâce à son potentiel littoral pour le développement des EMR, cette montée en puissance sera encore amplifiée par le démarrage de l'éolien offshore (3 usines de production en cours de construction), puis dans un avenir plus lointain de l'hydrolien. Cette production d'électricité propre en croissance est une opportunité unique au niveau européen pour mettre en œuvre le mix énergétique, le caractère intermittent des énergies renouvelables nécessitant la mise au point de nouveaux moyens de stockage et de conversion de l'énergie. La région Normandie possède donc les moyens d'être un acteur fort de production d'énergie sur un mix énergétique varié, pour un objectif zéro carbone en 2050.

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
|                                     | <p>Le projet présenté dans cette demande est dans l'Axe Matériaux : Sciences des matériaux pour les énergies bas carbone ou Matériaux en Seine-2. Cet investissement sur la plateforme GENESIS en Normandie a pour objectif d'assembler en un seul instrument, une sonde atomique et un MET ce qui constituera une première mondiale pour l'étude des matériaux à l'échelle ultime de l'atome. Ce projet a été classé en priorité 1 par le pôle EP2M sur le CPIER.</p>   |
| <p>OBJECTIFS</p>                    | <p>Afin de mettre en lien les propriétés de matériaux avec leur architecture interne, MET et SAT peuvent être utilisées séparément afin que les informations qu'elles fournissent (d'ordre structurale et chimique respectivement) soient combinées. Mais ceci est rarement fait de manière univoque. Comment attester qu'un pic de concentration en hydrogène en SAT est associable à une phase de structure différente ? Comment mesurer des ségrégations d'hydrogène, d'azote, de carbone sur des dislocations ou interfaces pourtant clairement identifiées en MET ? Pour lever ces limitations, analyser strictement le même échantillon par ces deux techniques est une possibilité que l'e-SAT offrira.</p> <p>La disponibilité d'une e-SAT dans la plateforme GENESIS du GPM permet d'envisager des applications sur différentes classes de matériaux et différentes problématiques. Les matériaux concernés sont principalement ceux envisagés dans les thématiques de production, stockage et transport de l'énergie (matériaux nanostructurés pour stockage d'hydrogène, matériaux pour batteries, conducteurs aériens) et de l'efficacité énergétique (jonctions semi-conductrices, interfaces métal-oxyde, dispositifs à boîtes quantiques). Le nouvel instrument s'inscrit donc dans la continuité des travaux menés dans la plateforme GENESIS et accroîtra les compétences expérimentales de la plateforme dans le domaine des matériaux en lien avec la nécessaire transition énergétique.</p> <p>Une liste d'objectifs scientifiques à atteindre, conférant un caractère unique à la plateforme, est dressée ci-après :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) Corrélation univoque entre structure et composition chimique en 3D à l'intérieur du même matériau ;</li> <li>ii) Amélioration des reconstructions 3D de SAT grâce à la connaissance des dynamique d'évaporation des échantillons ;</li> <li>iii) Utilisation de l'illumination électronique pour assister l'évaporation de matériaux mauvais conducteurs électriques et meilleure compréhension de ce phénomène ;</li> <li>iv) Cartographie du champ électrostatique dans et à proximité des échantillons polarisés pour mieux comprendre le comportement en évaporation par effet de champs de matériaux complexes ;</li> <li>v) Reconstruction morphologique de cavités nanométriques et des champs de concentration à leur proximité dans des matériaux irradiés grâce au couplage de la MET et de la SAT.</li> </ul> <p>La corrélation des analyses SAT avec les informations en MET seront au cœur de ces travaux. L'expertise des chercheurs du GPM sur cette thématique [1-5] bénéficiera à l'avancée rapide de ces recherches.</p> |
| <p>IMPACTS ATTENDUS ET FINALITE</p> | <p>- pour l'équipe de recherche :</p> <p>La stratégie de recherche du GPM à l'origine de cette demande s'appuie sur son expérience et son expertise attestées dans le domaine de l'instrumentation scientifique. Grâce à cela, des dispositifs originaux ont été conçus, testés pour valider le concept sur un MET commercial d'ancienne génération. En implémentant ceux-ci sur une colonne MET parfaitement adaptée, il sera possible d'exploiter pleinement cette nouvelle approche pour l'étude des matériaux complexes.</p>   |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>Les chercheurs du GPM jouiront ainsi de la disponibilité d'un nouvel instrument, unique au monde, permettant de mener des projets extrêmement originaux.</p> <p>Le GPM pourra ainsi conserver son rôle de leader mondial dans le développement et l'application de la SAT pour l'analyse des matériaux complexes à l'échelle atomique. Les retombées attendues pour le laboratoire sont nombreuses : une visibilité régionale, nationale et internationale accrue ; une originalité de plateforme offrant potentiellement davantage de succès aux financements via des appels à projets nationaux ou internationaux ; la possibilité de nouvelles collaborations (industrielles ou académiques) sur des matériaux complexes d'intérêt technologique en lien avec la transition énergétique ; un soutien renouvelé des tutelles du laboratoire pour le recrutement de personnels permanents.</p> <p>- pour les prestataires extérieurs :</p> <p>Bien que le fonctionnement par prestation ne soit pas privilégié sur la plateforme (au maximum 5 % du taux d'utilisation des instruments), l'e-SAT offrira de nombreux moyens rares ou uniques d'analyser des matériaux : quantification de champs électrique ou magnétique à l'intérieur de nanostructures ou composants électroniques, distribution de dopants à proximité de défauts dans les semi-conducteurs, analyse microstructurale fine dans des matériaux de de structure... La plateforme pourra ainsi répondre positivement à des sollicitations ayant un caractère de confidentialité, comme ce fût le cas par le passé avec de grands groupes industriels (e.g. Safran, IBM, Thalès).</p> <p>- pour le territoire :</p> <p>Dans un contexte de compétition scientifique au niveau mondial, la présente demande ambitionne de conférer au territoire normand une visibilité de niveau mondial pour la caractérisation de matériaux complexes de haut intérêt technologique, en lien avec la transition énergétique. Via la plateforme GENESIS, des expériences de très haute technicité offriront de nouveaux moyens d'investigation aux chercheurs français et internationaux.</p> <p>En disposant de cette nouvelle technologie au GPM et par la diffusion des résultats obtenus, de nouvelles collaborations verront le jour dans le but de caractériser de manière unique des matériaux d'intérêt technologiques ou pour étudier des phénomènes physiques plus fondamentaux liés aux interactions rayonnement matière. Ce nouvel équipement attirera donc des chercheurs et doctorants de France et de l'étranger qui viendront travailler ou se former à Rouen sur ce nouveau moyen d'analyser la matière.</p> <p>Dans le même temps, comme c'est le cas chaque année, les avancées des travaux que mène le GPM en microscopie seront vulgarisées à l'occasion de la fête de la science. En cas de fort succès du projet et de transfert de technologie, une communication par le biais de la presse régionale sera mise en place afin de faire connaître au plus large public les avancées scientifiques qui naissent dans la région.</p> |
| RESULTATS  |  |
| <b>MODALITES DE FINANCEMENT</b>  | BUDGET TOTAL : 1 550 000 €   |
| <i>Niveau de soutien FEDER / FSE / FAEDER</i>  | 1 550 000 €  |
| <i>Niveau de soutien Région</i>  |  |
| <i>Nombres de personnes travaillant sur le projet</i>                                  |  |
| <b>L'Europe s'engage en Normandie avec le Fonds Européen de Développement Régional</b> |  |