

FICHE PROJET EUROPEEN			
ACRONYME : SPIDER			
NOM COMPLET DU PROJET		SPIDER : Sources lasers ultrarapides haute cadence pour la spectroscopie des écoulements réactifs	
NUMERO DE CONVENTION		17P04308 / 17E04305 / 17P04305	
DATE DE DEBUT		01/10/2017	
DATE DE FIN		30/09/2019	
COORDINATEURS		Ammar HIDEUR	
• Etablissement(s)	• Laboratoire(s)	• Responsable(s)	• Partenaire(s)
	CORIA	NEM	ENSICAEN
CONTACT			
SITE INTERNET DU LABORATOIRE ET PROJET			
DESCRIPTION DU PROJET			
RESUME	<p>Contexte, présentation générale de l'opération :</p> <p>L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de production d'énergie ou de propulsion requiert une meilleure compréhension des multiples processus mis en jeu, point clé des innovations pertinentes. Cet objectif, qui s'appuie sur la capacité à caractériser l'avancement des réactions et la production des polluants in-situ, repose sur la disponibilité de diagnostics lasers performants. Ce projet vise ainsi à créer un pôle d'expertise de niveau international sur le développement et l'exploitation des sources lasers ultra-rapides dans le domaine de l'énergie. Il s'appuie sur les expertises uniques de trois laboratoires Normands : le Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP), le Complexe de Recherche Interdisciplinaire en Aérothermochimie (CORIA) et le Laboratoire de Catalyse et de Spectrochimie (LCS), qui possèdent des expertises allant de l'élaboration de nouveaux matériaux et le développement de lasers ultrarapides jusqu'à la mise en œuvre de diagnostics optiques innovants dans les systèmes de combustion et l'étude des procédés de dépollution par catalyse. Le laboratoire CORIA est porteur de la chaire industrielle PERCEVAL (ANR/SAFRAN Tech) qui vise à développer et analyser les technologies aéronautiques de demain et l'utilisation de diagnostics laser ultrarapides pour l'étude de la combustion haute-pression. Les sources ultrarapides opérant à hautes cadences au-delà du kHz tout en conservant des énergies importantes ouvrent des perspectives pour le suivi temporel de l'évolution des grandeurs physiques mesurées dans des milieux complexes, ce qui représente une avancée majeure par rapport aux mêmes diagnostics fonctionnant en régime nanoseconde à la cadence de la dizaine de Hz. Une autre application très prometteuse de ces sources hautes cadences concerne l'étude dynamique</p>		

des mécanismes réactionnels dans les procédés de dépollution par voie de catalyse.

Les développements actuels dans ces domaines s'appuient sur les systèmes lasers commerciaux qui sont à base de cristaux massifs principalement de saphir dopé titane. Cependant, ces systèmes sont limités en cadence à cause des problèmes thermiques dans les cristaux. Des technologies émergentes, s'appuyant sur des fibres optiques ou des architectures cristallines avancées pompées par diodes, ouvrent la voie à la production d'impulsions lumineuses ultracourtes de fortes énergies à des cadences de plusieurs dizaines de KHz. Dans ce contexte, l'équipe laser du CORIA a acquis une forte expérience sur le développement de sources laser ultrarapides à base de fibres optiques comme l'attestent ses nombreuses innovations dans le domaine (trois brevets d'invention dont un faisant l'objet d'une licence d'exploitation industrielle). De plus, l'équipe MIL du CIMAP est leader en Europe sur l'élaboration de cristaux lasers particulièrement performants pour la génération et l'amplification d'impulsions ultracourtes avec également des innovations brevetées dans le domaine des matériaux lasers. En s'appuyant sur ces compétences, ce projet vise à développer un système laser ultrarapide hybride combinant des fibres optiques et des cristaux massifs pour atteindre des performances inédites en termes d'énergie et de cadence et à démontrer son exploitation en spectroscopie dans les milieux réactifs et les procédés de dépollution par catalyse.

Ce projet sera structuré autour des trois laboratoires pour la conception de sources laser, allant de la conception de cristaux, à la caractérisation de milieux réactifs, point clé de nouvelles voies de développement pour l'efficacité énergétique des systèmes de production d'énergie, d'utilisation de combustibles alternatifs (biocombustibles, gaz résiduels,), de dépollution, ou de valorisation du CO₂. Basée sur la reconnaissance internationale des équipes impliquées, son originalité offrira les moyens de nouveaux projets d'envergure à l'échelle nationale ou européenne participant ainsi au rayonnement et à l'attractivité.

Caractère innovant de l'opération :

Il est important de noter que la maîtrise des diagnostics développés dans le présent projet de recherche, c'est-à-dire les techniques de spectroscopie Raman cohérent (DRASC fs/ps) et de fluorescence induite par laser haute cadence en régime d'impulsions ultra-courtes (fs) pour étudier les écoulements réactifs (combustion, plasma,) n'existe dans aucun laboratoire de recherche français autre que le CORIA. Au niveau international, il existe trois principales équipes de recherche qui développent la DRASC femtoseconde pour analyser les écoulements réactifs. Elles sont toutes implantées aux Etats Unis : l'équipe du Dr. Jim Gord au laboratoire Wright-Patterson de l'USAF Dayton (USA), leader dans l'utilisation de sources laser ultra-courtes pour étudier les écoulements réactifs; celle du Pr. Robert Lucht de l'Université de Purdue avec des premières expériences réalisées en 2013 sur des flammes laminaires et celle du Dr C.J. Kliwer du laboratoire SANDIA-Livermore spécialisé dans une approche expérimentale d'imagerie Raman cohérente. Concernant les études en fs-LIF, seule l'équipe du Dr. J. Gord a réalisé quelques études fondamentales.

	<p>Il est également à noter qu'aucune équipe européenne n'est actuellement présente dans ce domaine d'étude ce qui place le CORIA comme le laboratoire de référence au niveau européen dans le développement de diagnostics de spectroscopie ultra-rapides pour l'étude d'écoulements réactifs.</p> <p>A notre connaissance, aucune de ces équipes américaines ne dispose de systèmes de mesure DRASC ou LIF utilisant une source laser femtoseconde haute énergie et haute cadence pour entreprendre des études détaillées sur les écoulements réactifs. La réalisation de ce projet de recherche constituerait ainsi une avancée indéniable dans ce domaine et permettrait, grâce à une synergie entre les laboratoires CORIA, CIMAP et LCS, de créer un pôle normand leader mondial en métrologie optique et en conception de sources lasers fibrés ultra-rapides</p> <p>Concernant la métrologie sous flux réactionnel, le LCS est le laboratoire de référence au niveau international pour l'analyse des catalyseurs hétérogènes en fonctionnement, notamment pour les matériaux mis en forme. Les techniques analytiques développées (approche operando, couplage de techniques, cellules-réacteurs, modélisation, ...) sont uniques et font référence auprès du monde académique et industriel. Ce projet permettrait donc de consolider cette position prééminente et de confirmer le site normand comme le pivot des développements spectroscopiques au niveau national et international.</p>
OBJECTIFS	<p>Objectifs recherchés, résultats escomptés et public visé :</p> <p>Avec ce projet, nous visons des performances laser inédites pour des applications en spectroscopie DRASC (Diffusion Raman Anti-Stokes Cohérente) et de fluorescence induite par laser (LIF) dans les écoulements réactifs. Dans le cadre du projet PICOLIBS, l'équipe laser du CORIA a développé un système laser ultrarapide délivrant des énergies de plusieurs J dédié à la spectroscopie par plasma d'ablation. La première phase du projet s'appuiera sur ce système, qui servira à injecter deux étages d'amplification pour atteindre quelques centaines de J d'énergie et ainsi réaliser les premières études de faisabilité en spectroscopie. Cette phase devra être complétée avant la fin de la première année. En parallèle, le CIMAP travaillera sur l'élaboration et la caractérisation de cristaux massifs ou en disques minces à base de cristaux de fluorures dopés Yb qui serviront dans les étages de puissance. Le développement du système haute énergie (>1mJ) fera appel à des taux d'étirements et de compression plus importants en exploitant des réseaux de Bragg fibrés et des réseaux de compression de haute efficacité disponibles dans le commerce. L'implémentation du concept d'amplification par division temporelle sera étudiée en exploitant différents amplificateurs à base de fibres optiques à larges aires modales, des fibres cristallines, des cristaux de fluorure du CIMAP ou des systèmes hybrides. La réalisation d'un système compact délivrant 50W de puissance moyenne à 50 KHz, correspondant à 1 mJ d'énergie, est un premier objectif pour satisfaire les applications visées. La réalisation de cette plateforme sera aussi l'opportunité de mener des études plus fondamentales, notamment pour l'étude de nouveaux matériaux ou le développement de</p>

	<p>nouveaux concepts de mise en forme spatiale et temporelle d'impulsions ultracourtes dans les chaînes d'amplification ultrarapides.</p> <p>Une fois la source laser réalisée et caractérisée, celle-ci sera intégrée à une chaîne de mesure DRASC, de manière à évaluer, en configuration réaliste, ses performances par rapport aux sources lasers fs actuellement utilisées.</p> <p>De plus, la forte compacité qu'offrira cette nouvelle technologie facilitera sa valorisation avec le LCS lors de l'étude de la dynamique des mécanismes réactionnels de dépollution par voie de catalyse. Plusieurs diagnostics lasers ultra-rapides (dont la technique FTIR développée au LCS et les techniques de spectroscopie femtoseconde/picoseconde fs/ps DRASC, fs LIF développées au CORIA) ont pour vocation à être combinés entre eux sur une cellule-réacteur intégrant un catalyseur hétérogène maintenu sous flux de gaz et en température, dans le but de suivre des processus réactionnels transitoires à haute fréquence et déceler des intermédiaires réactionnels de courtes durées de vies, afin d'expliquer les mécanismes de dépollution par voie de catalyse. Aucune technique à travers le monde ne permet à ce jour d'accéder à ce type d'informations.</p>
<p>IMPACTS ATTENDUS ET FINALITE</p>	<p>Impacts attendus – diffusion et capitalisation des résultats :</p> <p>L'implémentation d'un système fibré haute cadence et haute énergie sur une chaîne de mesure de diffusion Raman anti-Stokes cohérente haute cadence (DRASC/CARS) constituera en soi une première au niveau mondial. En effet, l'utilisation d'une telle source laser fs énergétique et ultra-rapide pour la métrologie laser DRASC représentera un saut technologique de première importance car, outre les performances techniques attendues, il rendra le système de mesure DRASC compact, aisément transportable autour d'installations expérimentales de grandes dimensions (bancs de combustion aéronautique et automobile haute pression, banc plasma, bancs d'analyse operando du LCS) et nettement plus fonctionnel par rapport aux chaînes de mesure DRASC fs actuelles, équipées de sources lasers énergétiques commerciales mais encombrantes. Des publications dans des revues à hauts facteurs d'impacts sont attendues. Concernant la réalisation du système laser haute énergie et haute cadence, l'exploration d'architectures originales sera directement valorisable par des publications de premier rang. De même, les retombées en formation par la recherche de plusieurs doctorants et post-doctorants dans des domaines de recherche variés participeront également à l'attractivité internationale de la région Normandie.</p> <p>Ce projet vise à renforcer la place du CORIA parmi les leaders mondiaux en termes de diagnostics optiques pour les écoulements réactifs. Au-delà d'une visibilité nationale et internationale accrue, la création de cette plateforme DRASC fibrée haute énergie et haute cadence permettra d'instaurer une réelle synergie entre deux groupes du laboratoire (Sources Lasers et Ecoulements Réactifs) reconnus internationalement pour leurs expertises respectives. L'intégration du LCS, grâce à son expertise dans le domaine de la catalyse, permettra de valoriser le système grâce au couplage des diagnostics permettant une analyse plus complète des mécanismes catalytiques, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension des mécanismes complexes mis en jeu et de leurs dynamiques. Ce projet exploratoire permettra de plus d'obtenir les premières preuves de concepts</p>

	<p>nécessaires au dépôt d'un projet de plus grande envergure au niveau Européen (H2020 ou ERC).</p> <p>Ce projet de recherche permettra d'entreprendre des collaborations scientifiques et techniques tant dans le monde aéronautique, que dans le monde automobile. D'autres collaborations permettront aussi de valoriser les acquis scientifiques issus de ce projet par l'application de ces outils de mesures sur des thèmes d'activité touchant ces secteurs. Les problématiques mises en jeu dans ce projet s'inscrivent de plus au cur du Labex EMC3, selon son axe transversal « instrumentation. Sur des échelles de temps plus longues, ce projet pourra ouvrir de nouveaux champs d'actions en recherche fondamentale, comme la compréhension des phénomènes de transport dans les solides. Via la génération d'impulsions lasers hautement reproductibles d'énergie définie, il sera possible de mener des études spectroscopiques sur la formation et la relaxation de quanta d'énergie dans les réseaux cristallins, tels que les polaritons (ou d'autres excitons), soupçonnés d'être des médiateurs d'effets comme la supraconductivité ou la thermorésistance.</p> <p>Outre le fait que la mise en œuvre de cette plateforme de diagnostics innovante pourra potentiellement donner lieu à des valorisations par voies de brevet avec un fort potentiel de transfert vers l'industrie, son exploitation aura vocation à attirer de nombreux partenaires, aussi bien industriels qu'académiques, et ainsi à accroître la visibilité des sites du Technopole du Madrillet, du pôle scientifique autour du Plateau Nord de Caen et de leurs acteurs scientifiques. Ce projet s'intégrera ainsi très naturellement dans le projet d'Ecole Universitaire de Recherche souhaité comme développement du Labex EMC3 dans un continuum formation recherche.</p>
<p>RESULTATS</p>	<p>Principales actions présentées :</p> <p>Action 1 : Développement d'un système laser ultrarapide haute énergie et haute cadence</p> <p>Cette action sera menée en deux étapes qui impliqueront principalement les équipes laser du CORIA et du CIMAP. La première étape s'appuiera sur le système laser développé dans le cadre du projet Labex PICOLIBS qui servira pour l'injection de deux étages d'amplification pour atteindre quelques centaines de J d'énergie et permettra la réalisation des premières études de faisabilité en spectroscopie. Ce prototype servira également pour le test des amplificateurs cristallins qui seront développés par le CIMAP. La deuxième étape concernera le développement d'un système millijoule après conception et simulation de l'ensemble de la chaîne en utilisant des taux d'étirements et de compression élevés. Nous comptons également implémenter le concept d'amplificateur à division temporelle pour simplifier l'architecture du système. L'étude portera sur différents amplificateurs à base de fibres optiques, des fibres cristallines ou des cristaux massifs fabriqués durant le projet. La configuration la plus performante sera optimisée avant implémentation sur les plateformes de spectroscopie.</p> <p>Action 2 : Implémentation sur les plateformes de spectroscopie</p> <p>Cette action qui impliquera l'ensemble des partenaires concernera d'abord la mise en place du système laser millijoule haute cadence sur la plateforme</p>

de diagnostic DRASC/LIF du CORIA. Ceci passera par la réalisation du système optique permettant un recouvrement spatial optimal des faisceaux lasers considérés et la génération d'un faisceau sonde en exploitant un étage d'amplification paramétrique. L'implémentation du nouveau système laser pour les mesures DRASC haute cadence pour sonder la phase gazeuse au-dessus du matériau catalytique permettra d'obtenir un système compact permettant de réaliser des mesures multi-diagnostics en phases gazeuse et solide (DRASC et FTIR). De plus, le laser pourra générer des concentrations importantes d'intermédiaires activés via des impulsions calibrées, afin d'alimenter les sites réactionnels des catalyseurs par des espèces à courte durée de vie (non décelables par d'autres techniques en conditions de flux réel) et vérifier leur rôle dans le processus réactionnel.

Action 3 : Valorisation du projet

Les résultats escomptés permettent d'ores-et-déjà d'envisager des applications périphériques à forts potentiels à travers différentes collaborations, mentionnées dans la suite de ce document. Une valorisation par voie de brevet pourra également être envisagée. Enfin, la finalité de ce projet sera de créer en Normandie, grâce à la synergie de trois laboratoires d'excellence que sont le CORIA, le LCS et le CIMAP, un pôle d'expertise mondiale en termes de développement de diagnostics optiques des écoulements réactifs. Cet objectif pourra être réalisé de façon pérenne par le biais d'un projet européen de grande envergure. Pour le LCS, l'accès à des techniques de mesures uniques au monde permettra d'obtenir une connaissance approfondie des mécanismes réactionnels et ainsi renforcer l'expertise du laboratoire dans le domaine de la dépollution par voie de catalyse et la formulation des matériaux.

MODALITES DE FINANCEMENT

BUDGET TOTAL	311 000€
<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de soutien FEDER / FSE / FAEDER 	155 500€
<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de soutien région 	155 500€
<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de soutien Etat 	
<ul style="list-style-type: none"> • Autofinancement 	
<ul style="list-style-type: none"> • Autre 	
NOMBRE D'ALLOCATIONS DOCTORANTS	0
NOMBRE D'ALLOCATIONS ET POST-DOCTORANTS	0

L'Europe s'engage en Normandie avec le Fonds Européen de Développement Régional