

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES (CCTP)

Acquisition d'un ensemble d'équipements pour
l'institut FOTON (CPER Photbreizh phase 1 ; ENSSAT
de Lannion)

Cahier des Clauses Techniques Particulières

1 Contexte et de l'opération

Le projet **PHOT-BREIZH** participe aux efforts de transformation numérique (axe 1 de PHOT-BREIZH), de transitions environnementale, énergétique et écologique (axe 2 de PHOT-BREIZH) et est vecteur d'innovation (axe 3 de PHOT-BREIZH) dans les domaines de la santé, de la défense, des STICs, des transports, des applications industrielles.

Il a pour objectif de poser les bases permettant le transfert de technologies photoniques répondant aux enjeux sociétaux, au travers d'un hub recherche académique - industrie.

Dans le cadre de **PHOT-BREIZH**, les équipements permettront de renforcer une identité nationale et européenne dans des domaines spécifiques de la photonique, du fondamental à l'appliqué.

Cette opération concerne le département « Systèmes Photoniques » de l'Institut Foton (<https://www.institut-foton.eu/>), localisé à Lannion (22, France).

Le CPER permettra également par l'expertise acquise des enseignants-chercheurs, d'accompagner l'évolution des formations.

Le projet **PHOT-BREIZH** Phase 1 Lannion est constitué de 3 sous-projets dans cet appel

1. Projet Luciol

Le projet Luciol accompagne le développement de la thématique sources visibles dans le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton. Ainsi de nouveaux projets ont démarré avec la conception de sources dans le visible pour le quantique : sources à des longueurs d'ondes très précises (460 nm, 520 nm) pour répondre aux applications quantiques ; sources à photon unique à base de fibre étirée. Le CPER **PHOT-BREIZH** va permettre sur cette opération d'accompagner ces évolutions par l'achat de tables optiques dédiées.

2. Projet HIR

Le projet HIR est liée la thématique de l'imagerie hyperspectrale, qui est développée dans le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton. Cette thématique adresse le domaine de longueurs d'ondes du moyen infra-rouge (3-11 μm), qui lui confère une originalité. Le CPER **PHOT-BREIZH** accompagne le développement de cette thématique par l'achat de matériel de pointe pour l'imagerie.

3. Projet BAPEGE

Le projet BAPEGE s'inscrit dans la thématique de lasers dits ultra-cohérents et stables. Il est lié à l'équipex T-REFIMEVE, qui est un TGIR (très grand instrument de recherche). Avec cet équipex, l'Institut Foton va recevoir un signal optique métrologique du SYRTE. Ce signal est déjà arrivé à l'Institut Foton sur le site de de Rennes au département DOP, Département Optique cohérente et Photonique hyperfréquence (DOP). Il doit arriver en 2026 au département « Systèmes Photoniques ». L'un des objectifs de ce projet est de produire des lasers ayant un bruit quantique dit « spontané » extrêmement faible, au meilleur état de l'art.

Cela nécessite des équipements de pointe. Ainsi un peigne de fréquences va être acheté via l'équipex T-REFIMEVE (<https://www.refimeve.fr/>) et le CPER **PHOT-BREIZH**. Cet achat est géré par le CNRS.

Des outils complémentaires sont nécessaires comme deux lasers à fibre Brillouin identiques, un générateur micro-onde très bas bruit, un modulateur optique, un module optique permettant l'analyse de très bas bruit, des amplificateurs optiques.

Il y a également une nécessité d'achat de tables optiques pour le peigne de longueurs d'onde, l'analyse du bruit, la mise en place des lasers Brillouin.

L'opération est divisée en 7 lots :

1. Lot 1 Tables optiques pour les projets Luciol et BAPEGE

Les tables optiques permettent d'installer de nouvelles expériences dans le visible et aussi d'accompagner l'arrivée du signal R-REFIMEVE.

2. Lot 2 Imageur moyen infrarouge et son environnement pour le projet HIR

Il s'agit de permettre une analyse du visible au moyen infra-rouge en s'équipant sur la gamme de longueur d'onde entre 400 et 1700 nm.

3. Lot 3 Module optique pour l'analyse du bruit de phase de laser monofréquence très bas bruit pour le projet BAPEGE

Le département Systèmes photoniques produit des lasers très cohérents au meilleur état de l'art. L'analyse du bruit de phase se fait généralement de manière hétérodyne ou homodyne à l'aide d'un interféromètre. Nous avons déjà de très bonnes performances en pouvant mesurer des largeurs de raie intrinsèques aussi basse au 300 Hz. L'objectif est de descendre à des capacités de mesure du μHz , ce qui nécessite un interféromètre dédié.

4. Lot 4 Lasers Brillouin stabilisés pour le projet BAPEGE

Les lasers cohérents utilisés au département « Systèmes Photoniques » peuvent être des lasers utilisant l'effet Brillouin. Cet effet produit un signal optique décalé en fréquence d'environ 11 GHz dans une fibre classique (SMF28) lorsqu'elle est éclairée par un signal optique.

Afin de pouvoir gagner en performances, nous souhaitons acquérir deux lasers Brillouins identiques placés dans un boîtier de stabilisation thermique.

5. Lot 5 Modulateur optique pour le projet BAPEGE

Il est parfois nécessaire de décaler la fréquence optique laser du décalage Brillouin. Cela nécessite un modulateur optique.

6. Lot 6 Générateur électrique d'oscillation microonde pour le projet BAPEGE

Le modulateur optique nécessite un générateur de fréquence micro-ondes à la fréquence Brillouin ($\sim 11 \text{ GHz}$) ayant de très bonnes performances en termes de bruit de phase.

7. Lot 7 Bobines de fibres à maintien de polarisation pour le projet BAPEGE

Afin de pouvoir analyser le signal optique en termes de cohérence, plusieurs bobines de fibres optiques à maintien de polarisation sont nécessaires.

2 Conditions communes aux lots

2.1 Démonstration des équipements

L'équipement fera l'objet d'une vérification d'aptitude lors de son installation. L'installation et la vérification d'aptitude seront effectuées en présence du représentant technique de la plateforme.

Si la livraison répond aux spécifications techniques et si les essais sont satisfaisants, la réception provisoire du matériel sera prononcée immédiatement. Un Procès-verbal (PV) sera alors établi par le représentant technique de la plateforme et sera notifié au titulaire. La réception définitive aura lieu dans un délai de 2 mois maximum après la réception provisoire. Un Procès-verbal sera alors établi par le représentant technique du Pouvoir Adjudicateur et sera notifié au titulaire. Si les essais révèlent que tout ou partie de la fourniture ne correspond pas aux spécifications techniques ou n'est pas d'un fonctionnement satisfaisant, la réception sera ajournée, et le titulaire devra notifier une seconde mise en ordre de marche. Les matériels reconnus défectueux ou non conformes à la commande devront être repris par le titulaire, aux frais de celui-ci. Le titulaire a la charge complète de remplacer également les matériels en cause, à ses frais, dans un délai maximum de quinze (15) jours à partir de la date de notification du rejet.

2.2 Accompagnement de l'offre

2.2.1 Transport et emballage

Les frais de transports et d'emballage seront inclus dans l'offre.

Conformément à l'article 20.3 du CCAG/FCS, les risques afférents au transport jusqu'au lieu de destination incombent au titulaire.

Les fournitures seront livrées à destination franco de port. Le transport s'effectuera sous la responsabilité du titulaire du marché jusqu'au lieu de livraison spécifié ci-après.

Le conditionnement, le chargement, l'arrimage, le déchargement et le déballage seront effectués sous sa responsabilité.

2.2.2 Garantie, maintenance et réparation (service après-vente, calibrage)

Une garantie d'au moins 1 an pièces et main-d'œuvre est demandée.

Les délais de dépannage ne pourront dépasser 4 semaines, temps de transport inclus.

Il est demandé au candidat de décrire précisément les services couverts par l'extension de garantie notamment le remplacement des pièces, la main d'œuvre et les déplacements.

Le candidat décrira aussi son service Après-vente (SAV) notamment les délais d'intervention et l'assistance technique, le nombre de personnes en France et en Europe (localisation et langue parlée).

Le candidat précisera ses engagements concernant la disponibilité des pièces détachées du système concerné (durée, délais de livraisons ...).

2.3 Lieu de livraison et conditions de livraison

Excepté pour le lot 1 (tables optiques), pour lequel deux lieux de déchargements sont indiqués, le lieu de livraison est à l'ENSSAT :

ENSSAT

Institut Foton, « Département Systèmes Photoniques »

6 rue de Kerampont

Consultation 2025064AOF – Acquisition d'un ensemble d'équipements pour l'institut FOTON (CPER Photbreizh phase 1 : ENSSAT de Lannion)

CS 80518

22305 Lannion.

L'ensemble de la documentation sera livré avec l'appareil.

2.3.1 Calendrier d'exécution

La livraison du matériel est effectuée dans un délai maximum de 4 mois à compter de la notification du marché.

Toutefois, si le délai proposé par le titulaire dans l'annexe 1 à son acte d'engagement est inférieure à celui précité ci-dessus, il est tenu de s'y engager.

2.4 Variantes alternatives

Les variantes alternatives à l'initiative des candidats sont autorisées dans les limites du dossier de consultation. Conformément à l'article R.2151-10 du code de la commande publique, elles devront respecter les spécifications minimales du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) et répondre aux mêmes qualités d'utilisation.

3 Lot n°1 Tables optiques (Projets LUCIOL et BAPEGE)

3.1 Contexte de l'opération lot 1 : tables optiques

Les applications quantiques, telles que les capteurs, le calcul, les communications, reposent sur le développement de technologies habilitantes et en particulier de sources de lumière (lasers à faible bruit, sources de photons uniques ou intriqués, peignes de fréquence). Aujourd'hui, il est fréquent, pour obtenir des lasers aux longueurs d'onde visibles, de convertir en fréquence des sources laser émettant aux longueurs d'onde télécoms (pour bénéficier de leur maturité en termes de stabilité et de faible bruit). Dans le cadre de nos activités de recherche, nous investiguons des approches alternatives pour développer des sources lasers visibles performantes, à plus bas coût et plus faible impact écologique. En outre, nous développons des sources de photons uniques basées sur des fibres effilées dopées aux ions de terres rares, également aux longueurs d'onde visibles. Cette gamme de longueur d'onde permet de les exciter avec les lasers visibles que nous développons, et mettre à profit nos équipements fonctionnant dans la gamme visible ainsi que notre expertise en micro-résonateurs visibles. À terme, il est judicieux de développer des sources de photons uniques visibles à base d'ions de terres rares, puisque ceux-ci seront compatibles avec les mémoires quantiques basées sur ces mêmes ions, et utilisables dans des contextes industriels vu l'essor des progrès de la fibre à cœur creux. Ces approches impliquent l'étude de différents systèmes tels que les diodes lasers, les ions terres rares, les lasers à fibre ou encore les micro-résonateurs de haut facteur de qualité.

Dans le cadre du montage de nos expériences liées au projet LUCIOL, nous avons besoin d'acquérir trois tables optiques, qui permettent de conserver les performances de stabilité de nos instruments et expériences. L'un des objectifs de nos expériences implique la démonstration de micro-résonateurs à haut facteur de qualité et grande finesse imposant une isolation aux vibrations de nos bancs expérimentaux. Le système de support de la table devra permettre de conserver une bonne stabilité de nos dispositifs optiques et d'obtenir ainsi une mesure fiable des performances de nos micro-résonateurs, notamment pour des applications en métrologie/temps fréquence.

Le projet BAPEGE est couplé à l'équipex T-REFIMEVE, qui est aussi un très grand instrument de recherche (TGIR). Le département « Systèmes Photoniques » de l'Institut Foton a une expertise dans la réalisation de lasers ultra-cohérents dans la bande C des Telecoms. Dans le cadre de BAPEGE, un peigne de fréquence va être acheté et un nouveau banc de caractérisation unique va être développé

Consultation 2025064AOF – Acquisition d'un ensemble d'équipements pour l'institut FOTON (CPER Photbreizh phase 1 : ENSSAT de Lannion)

pour atteindre des planchers de bruit 10^{-6} Hz²/Hz. Ces équipements nécessitent des tables optiques : quatre au total dont deux déplaçables.

Ainsi si l'on considère les besoins des deux projets LUCIOL et BAPEGE, Nous avons besoin de sept tables optiques.

3.2 Objectifs scientifiques

Ces tables serviront pour LUCIOL, entre autres, à caractériser les propriétés spectrales et intrinsèques de nos micro-résonateurs en régimes linéaire et non-linéaire, ce qui engendre des besoins techniques contraignants en termes de stabilité de largeur de raie et de puissance.

Pour BAPEGE, elles serviront à l'installation d'un peigne de fréquences asservie sur la référence de fréquence de l'équipex T-REIFIMEVE ainsi qu'au banc de caractérisation fine de lasers dans la bande C des Telecoms, ayant une forte cohérence ((largeur de raie intrinsèque inférieure au milliHertz) et une stabilité très importantes (projet ANR TRANSTAB avec THALES TRT et le laboratoire LPL, démarré en décembre 2024).

3.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

Nous avons besoin de 7 tables optiques. Les premières dédiées à différents lasers devront par leur stabilité garantir les performances des lasers, une isolation active est attendue. Les secondes dédiées aux expériences de caractérisation permettront de les installer proches de la table du laser et éventuellement de les déplacer, une isolation passive est suffisante.

La disponibilité des pièces détachées doit être garantie sur une durée minimale de 5 ans après l'achat.

3.3.1 Tables optiques avec une isolation active

4 tables (3 LUCIOL, 1 BAPEGE)

Caractéristiques techniques – table optique :

Tables optiques de grandes dimensions : 3 tables optiques (LUCIOL)

- Dimensions : longueur 1,9 m x largeur 1 m x épaisseur 200 mm

Table optique de moyenne dimension : 1 table optique (BAPEGE)

- Dimensions : longueur 1,5 m x largeur 1m x épaisseur 110 mm

À noter que ces dimensions sont idéales, une proposition avec des dimensions différentes est convenable si elles respectent un écart maximal par rapport aux dimensions attendues de 10 cm en longueur et en largeur et une épaisseur supérieure à celle demandée.

- Planéité : 0,1 mm/m - Taraudage M6 tous les 25 mm, peau supérieure épaisseur 4,8 mm.

- Trous étanches coniques et facile à nettoyer d'une profondeur de 19 mm, matériau non corrosif à haute résistance aux chocs.

Caractéristiques techniques – pieds de la table optique

- Hauteur totale de la table 900 mm.

- Isolation active des vibrations jusqu'à 10 Hz : Isolation verticale et horizontale active pneumatique intégrée. Le raccordement à une sortie d'air comprimé devra être fournie (voir schéma d'implantation : la position des tables pourra être légèrement modifiée).

Prestation additionnelle incluse pour les quatre tables :

- Prestation de déchargement Bât3, installation et montage de l'ensemble pieds/tables/raccordement fluides/structures (voir schéma d'implantation : la position des tables pourra être légèrement modifiée).
- Le raccordement à une sortie d'air comprimé devra être fournie (voir schéma d'implantation : la position des tables pourra être légèrement modifiée).

Le lieu de livraison est à l'Enssat : 6 rue de Kerampont 22300 Lannion.

Le lieu de déchargement est plus facile d'accès côté rue de l'hôpital pour trois tables (schéma figure 1) : 4 rue de l'Hôpital 22300 Lannion.

Le lieu de déchargement est plus facile d'accès côté rue de Kerampont pour la table active de moyenne dimension (figure 2) : 9 rue de Kerampont 22300 Lannion.



À noter que ces dimensions sont idéales, une proposition avec des dimensions différentes est convenable si elles respectent un écart maximal par rapport aux dimensions attendues de 10 cm en longueur et en largeur et une épaisseur supérieure à celle demandée.

- Planéité : 0,1 mm/m - Taraudage M6 tous les 25 mm - peau supérieure épaisseur 4,8 mm.

- Trous étanches coniques et faciles à nettoyer d'une profondeur de 19 mm, matériau non corrosif à haute résistance aux chocs.

Caractéristiques techniques – pieds de la table optique

- Hauteur totale de la table 900 mm.

- Isolation passive des vibrations jusqu'à 10 Hz.

- Structure Renforcée intégrant des roulettes escamotables.

Table optique de moyennes dimensions : 1 table optique (BAPEGE)

Caractéristiques techniques – table optique

- Dimensions : longueur 1,5 m x largeur 1m x épaisseur 110 mm

À noter que ces dimensions sont idéales, une proposition avec des dimensions différentes est convenable si elles respectent un écart maximal par rapport aux dimensions attendues de 10 cm en longueur et en largeur et une épaisseur supérieure à celle demandée.

- Planéité : 0,1 mm/m - Taraudage M6 tous les 25mm peau supérieure épaisseur 4,8 mm.

- Trous étanches coniques et faciles à nettoyer d'une profondeur de 19 mm, matériau non corrosif à haute résistance aux chocs.

Caractéristiques techniques – pieds de la table optique

- Hauteur totale de la table 900 mm.

- Isolation passive des vibrations jusqu'à 10 Hz

Prestation additionnelle incluse :

- Prestation de déchargement, installation et montage de l'ensemble pieds/tables/structures (voir schéma d'implantation : la position des tables pourra être légèrement modifiée).

- Documentation complète de l'appareil et de son utilisation.

Le lieu de livraison est à l'Enssat, Institut Foton, 6 rue de Kerampont, 22300 Lannion.

Le lieu de déchargement est plus facile d'accès côté rue de Kerampont pour les tables passives (figure 2) : 9 rue de Kerampont 22300 Lannion.

Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 4 ans, au-delà de la garantie initiale, soit cinq années au total.

Maintenance, consommables :

Coût des consommables si nécessaire par rapport à la solution proposée pour les pieds des tables actives.

Le candidat devra décrire son SAV et fournir le coût de la maintenance.

Un délai d'intervention maximum d'un mois est attendu avec une garantie de disponibilité des pièces détachées de la partie active des tables optiques au-delà de 10 ans.

3.4.1 Lieu de livraison

Les tables sont à livrer et installer en rez-de-chaussée (voir plan figure 1 et 2) sans quai de déchargement, les arrivées d'air comprimée et les alimentations électriques sont indiquées sur les plans. À l'exception d'un transpalette aucun autre matériel de déchargement n'est disponible sur place. Le fournisseur devra prévoir le matériel adapté pour la livraison et l'installation des tables.

Le conditionnement, le chargement, l'arrimage, le déchargement et le déballage seront effectués sous sa responsabilité.

4 Lot n°2 Système imageur moyen infrarouge et son environnement pour l'imagerie Hyperspectrale pour le Projet HIR

4.1 Contexte de l'opération

Le sous-projet HIR regroupe les besoins en équipement pour les systèmes d'imagerie Hyperspectrale dans le moyen Infra Rouge développés à l'Institut FOTON.

La technologie des capteurs optiques dans le Moyen Infra-Rouge gagne en importance dans la surveillance des procédures industrielles, l'analyse environnementale et la défense. Ces activités sont innovantes et structurantes notamment pour la région Bretagne, où de nombreux acteurs et partenaires résident.

Le contexte est une utilisation pour des projets liés aux mesures sur, par exemple, de la viande ou des végétaux à des fins d'études ou de caractérisations dans différentes configurations lors de projets académiques ou en lien avec des industriels.

Un système d'acquisition d'imagerie hyperspectrale couvrant le domaine visible à proche infrarouge est souhaité : longueur d'onde entre 400 à 1700 nm.

4.2 Objectifs scientifiques

Ce système d'imagerie spectrale visible et proche infrarouge, viendra en compléments d'imageurs spectraux moyen infrarouge développés par FOTON entre 3 et 11 μm . Il pourra à terme permettre une analyse en spectro-imagerie sur une gamme étendue du visible au MIR.

4.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

Le système couvrant la bande spectrale souhaitée pourra être constitué d'une ou deux caméras spectrales de type balayage « push-broom ». Dans le cas de deux caméras, celles-ci ont vocation à être utilisées simultanément, préférentiellement reliées au même ordinateur de commande, cet ordinateur pilotant idéalement le système de translation de l'échantillon.

4.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

- Gammes spectrales minimales : 1 ou 2 équipements conjoints couvrant la gamme visible et proche Infrarouge : typiquement 400nm --> 1700 nm, idéalement jusqu'à 2500 nm.
 - Gamme « visible » :
 - $\lambda < \sim 400$ nm couvrant au minimum jusqu'à $\lambda > \sim 900$ nm,
 - détecteur de type Silicium ou équivalent, en continuité ou en léger recouvrement avec :
 - Gamme « Proche Infrarouge » (NIR – Near InfraRed) :
 - $\lambda < \sim 1000$ nm, couvrant au minimum jusqu'à $\lambda > 1700$ nm
 - détecteur de type InGaAs ou équivalent.
- Résolution spectrale minimale
 - Sur la gamme visible (Si) : meilleure que 6 nm (FWHM) [> 200 bandes spectrales]
 - Sur la gamme Proche InfraRouge (InGaAs) : meilleure que 8nm (FWHM) [200 bandes spectrales]
- Résolution spatiale minimale
 - Sur la gamme visible : supérieure ou égale à 1024 pixels
 - Sur la gamme Proche Infrarouge : supérieure ou égale à 640 pixels
- Trames (Frames) par seconde
 - Sur la gamme visible : supérieure à 300 FPS
 - Sur la gamme Proche InfraRouge : supérieure à 400 FPS
- FOV (Field Of View) : de base autour de 35°, possibilité d'objectifs interchangeables entre 12° et 70° idéalement.

Idéalement, l'imageur opérant dans la gamme Proche Infra-Rouge et utilisant des capteurs de type InGaAs sera refroidi.

Les candidats au lot 2 peuvent fournir une offre variante alternative proposant le matériel en reconditionné à condition qu'elle présente les mêmes conditions de garantie que pour le matériel neuf.

4.3.2 Fonctionnalités requises

Dans le cas d'une couverture de la gamme spectrale par deux caméras, celles-ci doivent être pilotables simultanément lors de l'acquisition, par le même ordinateur.

Pour chaque caméra :

- paramétrage de la plage spectrale de chaque caméra, du temps d'intégration,
- sauvegarde donnée sous format accessible (ENVI, . . .), collecte des données de préférence via connexion Giga ethernet ou Cameralink,
- pilotage de caméra accessible par programmation (grâce à un SDK : *software development kit*) pour intégration dans un système d'information,
- distance de travail : entre quelques dizaines de centimètres et 1m : optique de focalisation pour distance de travail ≤ 1 m
- Obturateur (*shutter*) pilotable

4.3.3 Dimensions et poids

Les deux caméras seront utilisées accolées, en observation du même champ de vue.

Consultation 2025064AOF – Acquisition d'un ensemble d'équipements pour l'institut FOTON (CPER Photbreizh phase 1 : ENSSAT de Lannion)

- Fonctionnement possible en environnement industriel et de laboratoire (T°, humidité (IP64)).
- L'encombrement de l'ensemble devra être idéalement de dimension inférieure à 30 cm x 15 cm x 15 cm (L x l x h), incluant les objectifs.
- Poids de l'ensemble inférieur à 3 kg.

4.3.4 Logiciel, stockage de données, environnement

- Fourniture du logiciel de pilotage et d'acquisition des données de la caméra, permettant l'acquisition sur les 2 caméras ;
- Platine de déplacement de l'échantillon (système scanner sur davantage que 15 centimètres) ;
- Surface étalon pour effectuer des références à la distance de travail de 1 m (e.g. Spectralon) ;
- Système de fixation des caméras : potence ou équivalent.

4.3.5 Prestations supplémentaires éventuelles

- PSE1 : 1 an de garantie supplémentaire au-delà de la garantie initiale soit 2 ans au total.
- PSE2 : 2 ans de garantie supplémentaire au-delà de la garantie initiale soit 3 ans au total.
- PSE3 : PC pour le pilotage et le stockage des données
- PSE4 : Jeu d'objectifs supplémentaires de champ inférieur à 20°, pour chaque caméra.
- PSE5 : Étalonnage supplémentaire après 3 ans ou 1000 heures d'utilisation (au premier terme échu).

4.4 Spécifications de l'offre

4.4.1 Garantie, maintenance et réparation (service après-vente, calibrage)

Un étalonnage d'une durée de validité minimale de 6 mois doit être inclus dans l'offre.

La disponibilité des pièces détachées doit être garantie sur une durée minimale de 5 ans après l'achat.

Les candidats préciseront leurs engagements concernant la disponibilité des pièces détachées du système concerné (durée, délais de livraisons ...).

4.4.2 Formation

Une formation d'une demi-journée minimum, réalisée sur site ou en distanciel, sera incluse dans l'offre. Cette formation s'adressera conjointement à des utilisateurs novices (étudiants Master), ainsi qu'à des personnels expérimentés, jusqu'à 4 personnes.

5 Lot n° 3 Module optique pour l'analyse du bruit de fréquence de laser monofréquence très bas bruit pour le projet BAPEGE

5.1 Contexte de l'opération lot 3

Le contexte des lots 3 à 7 est identique. Le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton travaille depuis 2009 sur la réduction du bruit de phase des lasers en utilisant des lasers Brillouin. Il a ainsi été le premier à montrer la possibilité d'utiliser des fibres chalcogénures en 2012. Une étude théorique et expérimentale de laser Brillouin dit à pompage résonant, de 2017 à 2020, a permis de démontrer des réductions allant jusque 40 dB. Nous avons atteint des largeurs de raie intrinsèques de 3 mHz, ce qui est à l'état de l'art.

Consultation 2025064AOF – Acquisition d'un ensemble d'équipements pour l'institut FOTON (CPER Photbreizh phase 1 : ENSSAT de Lannion)

5.2 Objectifs scientifiques de l'opération lot 3

L'objectif est d'atteindre des largeurs de raie intrinsèques sous le millihertz. Il faut alors associer à cette cohérence une stabilité pour avoir une gigue de fréquence la plus faible possible. Cette stabilité sera apportée par le signal métrologique T-REFIMEVE. Il s'agit d'un signal optique calé sur une horloge atomique permettant une grande stabilité (typiquement une seconde sur plusieurs millions d'année).

Pour atteindre ces performances, il faut des composants thermiquement isolés et des appareils électroniques avec très peu de bruit de phase lorsque des configurations lasers utilisant des modulations sont utilisées.

Il faut également avoir la capacité de mesurer des bruits de phase à des niveaux très faibles, ce qui est l'objet du lot 3.

5.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

5.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

La mesure de bruit de fréquence d'un signal optique peut être faite de différentes façons. La détection en optique étant quadratique, ce type de mesure nécessite un interféromètre pour obtenir la gigue de phase, permettant de déduire le bruit de phase et le bruit de fréquence.

L'équipement consistera à permettre l'analyse du bruit de fréquence au niveau de 10^{-6} Hz²/Hz.

Les performances devront se situer dans la gamme de 10^{-7} Hz²/Hz - 10^{-6} Hz²/Hz. La limite devra être précisée par l'opérateur.

L'équipement devra permettre de donner la densité spectrale du bruit de fréquence dans une gamme allant de 10 Hz à 1 MHz après traitement du signal laser. La limite de 10 Hz pourra être inférieure. La limite supérieure ne devra pas être inférieure à 500 kHz.

Un accès aux données numériques mesurées devra être garanti.

Le candidat devra proposer en offre de base un affichage du bruit de fréquence.

Il est possible pour le candidat de proposer en variante alternative un affichage en bruit de phase.

5.3.2 Fonctionnalités requises

L'appareil devra avoir une ou des entrées optiques permettant une connectique fibrée PM FC/APC. L'axe lent de la connectique devra être indiquée.

Pour assurer la mesure de niveaux de bruit aussi faible, l'appareil doit être isolé acoustiquement.

Les câbles de connectiques devront être fournis.

5.3.3 Dimensions et poids

Les dimensions doivent être celle d'un oscilloscope ou d'un rack.

5.3.4 Logiciel, stockage de données, environnement

Les données du bruit de fréquence doivent pouvoir être collectées sous forme numérique facilement. L'opérateur devra expliciter comment ces données sont collectées et décrire la procédure tout en justifiant la facilité d'accès à ces données numériques.

L'équipement devra avoir soit une interface conviviale soit un logiciel dont l'usage devra être explicité.

5.3.5 Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE)

PSE 1 : alimentation en tension stabilisée.

PSE 2 : alimentation en courant stabilisée.

PSE 3 : détecteur bas bruit

PSE 4 : maintenance/garantie : Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 2 ans au-delà de la garantie initiale, soit 3 ans au total.

PSE 5 : PC pour le pilotage et le stockage des données.

PSE 6 : Étalonnage supplémentaire après 2 ans d'utilisation.

Les options 1 à 3 permettent un contrôle supplémentaire de la mesure par le laboratoire.

5.4 Spécifications de l'offre

5.4.1 Garantie, maintenance et réparation (service après-vente, calibrage)

Un étalonnage d'une durée de validité minimale de 6 mois doit être inclus dans l'offre.

5.4.2 Formation

Une formation sur site d'une durée minimale d'une journée devra être prévue pour l'utilisation de l'appareil. Deux personnes seront concernées par la formation. La formation doit permettre de prendre en main l'appareil et de comparer les mesures à des mesures de références effectuées au laboratoire.

6 Lot n° 4 Lasers Brillouin stabilisés pour le projet BAPEGE

6.1 Contexte de l'opération lot 4

Le contexte des lots 3 à 7 est identique. Le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton travaille depuis 2009 sur la réduction du bruit de phase des lasers en utilisant des lasers Brillouin. Il a ainsi été le premier à montrer la possibilité d'utiliser des fibres chalcogénures en 2012. Une étude théorique et expérimentale de laser Brillouin dit à pompage résonant, de 2017 à 2020, a permis de démontrer des réductions allant jusque 40 dB. Nous avons atteint des largeurs de raie intrinsèques de 3 mHz, ce qui est à l'état de l'art.

6.2 Objectifs scientifiques de l'opération lot 4

L'objectif est d'atteindre des largeurs de raie intrinsèques sous le millihertz. Il faut alors associer à cette cohérence une stabilité pour avoir une gigue de fréquence la plus faible possible. Cette stabilité sera apportée par le signal métrologique T-REFIMEVE. Il s'agit d'un signal optique calé sur une horloge atomique permettant une grande stabilité (typiquement une seconde sur plusieurs millions d'année).

Pour atteindre ces performances, il faut des composants thermiquement isolés et des appareils électroniques avec très peu de bruit de phase lorsque des configurations lasers utilisant des modulations sont utilisées.

En particulier, nous avons besoin de deux lasers Brillouin identiques.

C'est l'objet du lot 4.

6.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

6.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

L'équipement est constitué de deux lasers à fibre Brillouin identiques.

Le laser à fibre est à pompage résonant.

Tous les composants sont à maintien de polarisation.

Le résonateur laser est en anneau. Il est constitué d'un coupleur deux fois deux voies à maintien de polarisation. Deux voies sont reliées par une fibre de 10 m pour réaliser la cavité en anneau. Les pertes liées au coupleur devront être de l'ordre d'un dB au maximum. Le rapport de couplage, entre 90/10 et 98/2, devra garantir les performances attendues du résonateur.

Le domaine d'opération est la bande C des télécoms.

Un transducteur PZT doit assurer le contrôle de la longueur de cavité en permettant un allongement d'au moins 5 μm .

L'ensemble doit être placé dans un boîtier permettant une régulation thermique. Il doit inclure une connectique d'entrée FC/APC pour le signal optique, une connectique pour le Peltier ainsi que le PZT.

Les spécifications de stabilité thermiques devront être décrites. Cela constituera un critère de choix.

6.3.2 Fonctionnalités requises

L'équipement devra être compatible avec un signal d'entrée provenant d'une fibre monomode à maintien de polarisation.

La position de l'axe lent ou rapide devra être précisée.

La fibre de déport devra être au moins 1,5 mètre.

Le PZT doit permettre de balayer au moins trois ISL (FSR) de la cavité.

Les câbles associés au PZT et au Peltier devront être fournis.

Les caractéristiques techniques du PZT et du Peltier incluant celle de la thermistance devront être données (PZT : fréquence de résonance, puissance maximale applicable ; Peltier : description des paramètres pour une bonne opération ; thermistance : valeur de la résistance en fonction de la température).

L'équipement doit pouvoir être utilisé dans une gamme de température de 0 à 40°C. Une stabilisation de température pourra être incluse.

Les caractéristiques en stabilité du boîtier doivent être décrites.

6.3.3 Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE)

PSE 1 : Circulateurs optiques d'entrée et de sortie.

PSE 2. Maintenance/garantie :

Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 2 ans au-delà de la garantie initiale soit 3 années au total.

PSE 3. Maintenance/garantie :

Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 4 ans au-delà de la garantie initiale soit 5 années au total.

7 Lot n° 5 Modulateurs optiques pour le projet BAPEGE

7.1 Contexte de l'opération lot 5

Le contexte des lots 3 à 7 est identique. Le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton travaille depuis 2009 sur la réduction du bruit de phase des lasers en utilisant des lasers Brillouin. Il a ainsi été le premier à montrer la possibilité d'utiliser des fibres chalcogénures en 2012. Une étude théorique et expérimentale de laser Brillouin dit à pompage résonant, de 2017 à 2020, a permis de démontrer des réductions allant jusque 40 dB. Nous avons atteint des largeurs de raie intrinsèques de 3 mHz, ce qui est à l'état de l'art.

7.2 Objectifs scientifiques de l'opération lot 5

L'objectif est d'atteindre des largeurs de raie intrinsèques sous le millihertz. Il faut alors associer à cette cohérence une stabilité pour avoir une gigue de fréquence la plus faible possible. Cette stabilité sera apportée par le signal métrologique T-REFIMEVE. Il s'agit d'un signal optique calé sur une horloge atomique permettant une grande stabilité (typiquement une seconde sur plusieurs millions d'année).

Pour atteindre ces performances, il faut des composants thermiquement isolés et des appareils électroniques avec très peu de bruit de phase lorsque des configurations lasers utilisant des modulations sont utilisées.

Une architecture laser étudiée nécessitera de moduler optiquement le signal laser à la fréquence de décalage Brillouin dans la fibre soit 10,9 GHz.

C'est l'objet du lot 5.

7.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

7.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

L'équipement sera constitué de trois modulateurs optiques permettant une modulation analogique d'une porteuse optique dans la gamme 10-12,5 GHz. Ils doivent être à maintien de polarisation et doivent pouvoir moduler le signal sur la bande C des télécommunications optiques, voire C+L.

Les modulateurs optiques dans la gamme 10-12,5 GHz doivent être constitués d'un modulateur de phase, et de deux modulateurs d'intensité, dont l'un permettant un taux d'extinction à mieux que 35 dB. Pour ce dernier cas, la longueur d'onde visée est 1542,15 nm ; la bande passante optique devra être indiquée par le candidat.

7.3.2 Fonctionnalités requises

L'équipement devra être compatible avec un signal d'entrée provenant d'une fibre monomode à maintien de polarisation.

La position de l'axe lent devra être précisée.

L'électronique associée devra être incluse dans l'offre (contrôleur de tension demi-onde pour un électrooptique, amplificateur RF couvrant la bande de fréquences exigée). Comme les modulateurs n'ont pas vocation à être utilisés simultanément, une électronique de commande unique, compatible avec les trois modulateurs sera proposée. Les spécifications électriques devront être indiquées.

Un radiateur-dissipateur thermique sera proposé.

Les connecteurs pour le signal de modulation électrique devront être SMA compatibles.

L'équipement doit pouvoir être utilisé dans une gamme de température de 0 à 40°C. Une stabilisation de température pourra être incluse.

L'électronique associée de l'appareil devra être incluse ainsi que les câbles électriques ou optiques.

7.3.3 Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE)

PSE 1 : amplificateur Radiofréquence supplémentaire dans la gamme de fréquence désirée 10-12 Ghz.

PSE 2 : contrôleur de tension demi-onde supplémentaire.

PSE 3 : Maintenance/garantie :

Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 2 ans au-delà de la garantie initiale soit 3 années au total.

PSE 4 : Maintenance/garantie :

Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 4 ans au-delà de la garantie initiale soit 5 années au total.

8 Lot n° 6 Générateur électrique d'oscillation microonde pour le projet BAPEGE

8.1 Contexte de l'opération lot 6

Le contexte des lots 3 à 7 est identique. Le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton travaille depuis 2009 sur la réduction du bruit de phase des lasers en utilisant des lasers Brillouin. Il a ainsi le premier à montrer la possibilité d'utiliser des fibres chalcogénures en 2012. Une étude théorique et expérimentale de laser Brillouin dit à pompage résonant, de 2017 à 2020, a permis de démontrer des réductions allant jusque 40 dB. Nous avons atteint des largeurs de raie intrinsèques de 3 mHz, ce qui est à l'état de l'art.

8.2 Objectifs scientifiques de l'opération lot 6

L'objectif est d'atteindre des largeurs de raie intrinsèques de l'ordre sous le millihertz. Il faut alors associer à cette cohérence une stabilité pour avoir une gigue de fréquence la plus faible possible. Cette stabilité sera apportée par le signal métrologique T-REFIMEVE. Il s'agit d'un signal optique calé sur une horloge atomique permettant une grande stabilité (typiquement une seconde sur plusieurs millions d'année).

Pour atteindre ces performances, il faut des composants thermiquement isolés et des appareils électroniques avec très peu de bruit de phase lorsque des configurations lasers utilisant des modulations sont utilisées.

Une architecture laser étudiée nécessitera de moduler optiquement le signal laser à la fréquence de décalage Brillouin dans la fibre soit 10,9 GHz. Au vu des performances laser de faible bruit, il est alors essentiel d'avoir un générateur analogique de signal RF dans la gamme 10-12 GHz.

C'est l'objet du lot 6.

8.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

8.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

L'équipement doit générer un signal de modulation analogique dans la gamme 10-12 GHz.

8.3.2 Fonctionnalités requises

La puissance du signal doit être au minimum de 15 dBm, idéalement 20 dBm ou delà (28 dBm).

La stabilité en puissance sera précisée dans la gamme de modulation et de puissance données dans ce lot.

La fréquence de modulation doit être résolue à mieux que 0,001 Hz.

Le bruit pour une porteuse de 11 GHz est un critère de choix. Il devra être précisé à 10 Hz, 100 Hz, 1 MHz, 10 MHz. Cela fera partie d'un critère de choix important. Des gabarits pourront être fournis.

La pureté spectrale sera donnée (harmoniques, sous harmoniques, non harmonique) et fera partie des critères.

La gigue devra être précisée pour une porteuse dans la gamme 10-12 GHz.

La solution pourra être évolutive. Si tel est le cas, cela devra être précisé.

La température de fonctionnement devra être comprise entre 10 °C et 40 °C.

Le vieillissement devra être précisé au bout d'une journée, si possible $< \pm 1$ ppb d'un an si possible $< \pm 100$ ppb.

L'impédance sera précisée.

L'appareil devra pouvoir être piloté.

Un certificat d'étalonnage de moins de 6 mois sera fourni lors de la livraison.

Les candidats au lot 6 peuvent fournir une offre variante alternative proposant le matériel en reconditionné à condition qu'elle présente les mêmes conditions de garantie que pour le matériel neuf.

8.3.3 Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE)

PSE 1 : Maintenance/garantie : Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 2 ans au-delà de la garantie initiale soit 3 années au total.

PSE 2 : Maintenance/garantie : Extension de garantie pièces et main d'œuvre de 4 ans au-delà de la garantie initiale soit 5 années au total.

PSE 3 : Possibilité de faire de la modulation de phase.

8.4 Spécifications de l'offre

8.4.1 Garantie, maintenance et réparation (service après-vente, calibrage)

Les candidats préciseront leurs engagements concernant la disponibilité des pièces détachées du système concerné (durée, délais de livraisons ...).

Il est demandé au candidat de décrire précisément les services couverts par l'extension de garantie notamment le remplacement des pièces, la main d'œuvre et les déplacements.

Le candidat décrira aussi son service après-vente (SAV) notamment les délais d'intervention et l'assistance technique, le nombre de personnes en France et en Europe (localisation et langue parlée).

9 Lot n° 7 Bobines de fibre à maintien de polarisation pour le projet BAPEGE

9.1 Contexte de l'opération lot 7

Le contexte des lots 3 à 7 est identique. Le département Systèmes Photoniques de l'Institut Foton travaille depuis 2009 sur la réduction du bruit de phase des lasers en utilisant des lasers Brillouin. Il a ainsi été le premier à montrer la possibilité d'utiliser des fibres chalcogénures en 2012. Une étude théorique et expérimentale de laser Brillouin dit à pompage résonant, de 2017 à 2020, a permis de démontrer des réductions allant jusqu'à 40 dB. Nous avons atteint des largeurs de raie intrinsèques de 3 mHz, ce qui est à l'état de l'art.

9.2 Objectifs scientifiques de l'opération lot 7

L'objectif est d'atteindre des largeurs de raie intrinsèques sous le millihertz. Il faut alors associer à cette cohérence une stabilité pour avoir une gigue de fréquence la plus faible possible. Cette stabilité sera apportée par le signal métrologique T-REFIMEVE. Il s'agit d'un signal optique calé sur une horloge atomique permettant une grande stabilité (typiquement une seconde sur plusieurs millions d'année).

Pour atteindre ces performances, il faut des composants thermiquement isolés et des appareils électroniques avec très peu de bruit de phase lorsque des configurations lasers utilisant des modulations sont utilisées.

L'analyse du signal nécessite l'usage de bobines de fibres à maintien de polarisation.

C'est l'objet du lot 7.

9.3 Description de l'équipement (ou du banc si applicable)

9.3.1 Description et spécifications techniques du matériel

Quatre bobines de fibres monomodes à maintien de polarisation de même longueur : deux de 200 m (plus ou moins 5 %) et deux de 400 m (plus ou moins 5 %). Ces fibres devront être enroulées sur un tambour.

9.3.2 Fonctionnalités requises

Les rouleaux pourront être fournis avec des connecteurs FC/APC garantissant des réflexions inférieures à -60 dB.