



**Production et livraison de systèmes lasers asservis sur cavités ultra-stables pour l'amélioration du réseau de l'infrastructure de recherche  
REFIMEVE**

---

**Cahier des clauses techniques particulières (CCTP)**

*CCTP No.*

## Contenu

I.	Introduction.....	3
	L'infrastructure de Recherche REFIMEVE .....	3
	Bibliographie.....	4
	Acronymes.....	4
II.	Description générale .....	5
I.	Contexte.....	5
II.	Description du laser ultra-stable asservi sur cavité et pilotable à distance ( <i>LUS</i> ) .....	7
III.	Spécifications.....	9
I.	Spécifications générales.....	9
II.	Performances.....	11
III.	Contrôle à distance et supervision .....	13
1.	Communication :.....	14
2.	Contrôle à distance .....	14
3.	Supervision.....	15
	Appendix A .....	17

## I. Introduction

### L'infrastructure de Recherche REFIMEVE

REFIMEVE est un équipement qui a acquis en 2021 le statut d'Infrastructure de Recherche inscrite sur la feuille de route nationale par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation ([Feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche](#)).

Cette Infrastructure de Recherche s'appuie sur un Equipex du PIA1 REFIMEVE+ (2012-2023) et un Equipement Structurant pour la Recherche/Equipex+ du PIA3, T-REFIMEVE (2021-2028). Ces deux projets sont portés par l'Université Paris XIII dénommée Université Sorbonne Paris Nord (USPN).

REFIMEVE repose sur des équipes académiques du Laboratoire de Physique des Lasers (UMR USPN/CNRS) et du SYRTE (PSL-Observatoire de Paris/Sorbonne Université/LNE/CNRS) et sur le GIP RENATER qui fournit le réseau optique fibré, support de REFIMEVE.

Dans le prolongement de REFIMEVE+, l'objectif de T-REFIMEVE est de mettre à disposition de la communauté scientifique et des industriels, au travers d'un réseau plus étendu, un ensemble complet de signaux de temps et de fréquence au meilleur niveau international que les laboratoires de métrologie puissent fournir, en profitant de la précision exceptionnelle des horloges atomiques et de la propagation guidée des fibres optiques. C'est plus de 30 laboratoires et instituts répartis sur le territoire national qui seront connectés. D'autres laboratoires à proximité pourront aisément se connecter par la suite. Cette situation est sans équivalent à l'échelle mondiale.

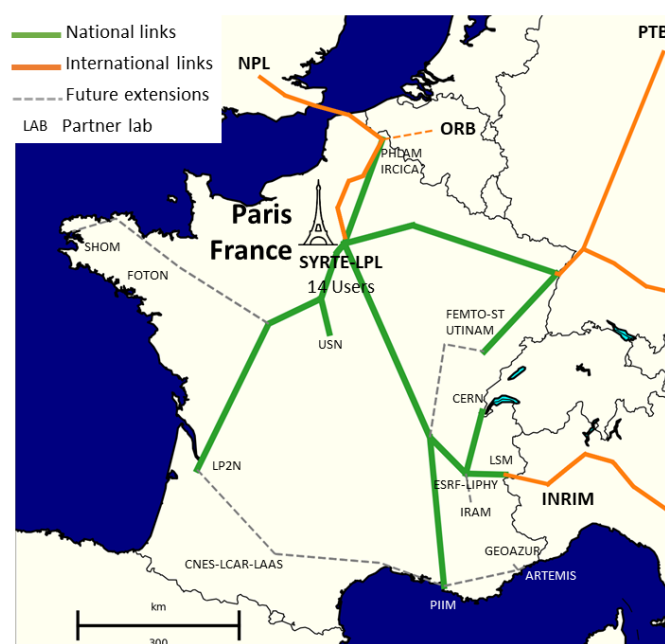


Figure 1-Carte du réseau et des utilisateurs du projet T-REFIMEVE au 1<sup>er</sup> juillet 2024.

C'est en utilisant les fibres optiques du réseau national de télécommunication RENATER que les signaux de temps et de fréquence élaborés au SYRTE sont transportés jusque chez les utilisateurs. Pour conserver toute la précision initiale, il faut corriger les perturbations subies pendant le transport. Réalisée par des méthodes optiques et électroniques cette correction est si parfaite que les utilisateurs connectés à ce réseau ont un signal de même qualité que si l'horloge avait été déplacée dans leur

laboratoire. C'est une formidable mutualisation en rupture technologique avec le service de navigation globale des constellations comme GPS et Galileo.

## Bibliographie

- [1] N. Chiodo et al., « Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison », Opt. Express, vol. 23, no 26, p. 33927-33937, déc. 2015, doi: 10.1364/OE.23.033927.
- [2] F. Guillou-Camargo, V. Ménoret, E. Cantin, O. Lopez, N. Quintin, E. Camisard, V. Salmon, J.-M. Le Merdy, G. Santarelli, A. Amy-Klein, P.-E. Pottie, B. Desruelle and C. Chardonnet, First industrial-grade coherent fiber link for optical frequency standard dissemination, Applied optics 57, 7203-7210 (2018) - <https://doi.org/10.1364/AO.57.007203>
- [3] E. Cantin, M. Tønnes, R. Le Targat, A. Amy-Klein, O. Lopez, P.-E. Pottie, An accurate and robust metrological network for coherent optical frequency dissemination, New J. Phys. 23, p 053027 (2021)<https://doi.org/10.1088/1367-2630/abe79e>
- [4] N. Chiodo et al., "Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison", Opt. Express, vol. 23, No. 26, p. 33927-33937, Dec. 2015, <https://doi: 10.1364/OE.23.033927>.
- [6] O. Lopez et al., "Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network and application to high-precision molecular spectroscopy", J. Phys. Conf. Ser., vol. 467, no. 1, p. 012002, 2013, <https://doi: 10.1088/1742-6596/467/1/012002>.
- [6] F. Stefani et al., "Tackling the limits of optical fiber links", JOSA B, vol. 32, no. 5, p. 787-797, May 2015, <https://doi: 10.1364/JOSAB.32.000787>.

## Acronymes

Acronyme	Définition
<b>REFIMEVE</b>	REseau Fibré MEtrologique à Vocation Européenne+
<b>GPS</b>	Système de positionnement mondial
<b>GNSS</b>	Géolocalisation et navigation par système satellitaire
<b>ITU</b>	Union internationale des télécommunications
<b>DWDM</b>	Multiplexage par répartition en longueur d'onde dense
<b>RF</b>	Radiofréquence
<b>MAO</b>	Modulateur Acousto-Optique
<b>MEO</b>	Modulateur Electro-Optique
<b>TCXO</b>	Oscillateur à quartz à température contrôlée
<b>OADM</b>	Multiplexeur optique Add/Drop
<b>RLS</b>	Station laser de régénération
<b>MLS</b>	Station laser multibranche
<b>TW</b>	Bidirectionnel
<b>ANC</b>	Compensation active du bruit
<b>PC</b>	Contrôleur de polarisation
<b>APC</b>	Connecteur physique coudé
<b>FC</b>	Connecteur à virole de fibre
<b>LC</b>	Connecteur Lucent
<b>CW</b>	Onde continue
<b>ULE</b>	Expansion ultra-faible
<b>RMS</b>	Racine carrée moyenne
<b>SMA</b>	SubMiniature type A
<b>CEI</b>	Commission électrotechnique internationale

VGA	Amplificateur à gain variable
FSR	Intervalle spectral libre
CUS	Cavité ultra-stable
PHD	Pound-Drever-Hall
PAR	Rapport d'extinction de polarisation
LUS	Laser ultra-stable (asservi sur cavité)
MDEV	Déviations d'Allan modifiée
PM	Maintien de la polarisation

## II. Description générale

### I. Contexte

#### Signal source

Le signal source est un signal optique généré au LNE-SYRTE, traçable par rapport à l'UTC, dont la fréquence à 194.4 THz présente des performances métrologiques à l'état de l'art. Il provient d'un laser asservi sur une cavité ultra-stable, dont la dérive est activement compensée à l'aide d'une mesure avec d'autres étalons de fréquence. Les performances en termes de stabilité sont de l'ordre de  $10^{-15}$  pour des temps d'intégration de 1 à 1000s et meilleures que  $10^{-15}$  pour des temps d'intégration de 1000s à 50000s. La fréquence du signal correspond au canal #44 de la grille ITU télécom DWDM.

#### Instrumentation du réseau de transfert de fréquence

Le réseau REFIMEVE se base sur différents types d'instruments pour transférer ce signal sans dégradation. Ces instruments sont installés dans des sites de télécommunication, parfois en cohabitation avec d'autres instruments, dans un environnement bruyant. Les instruments sont robustes et fiables, contrôlables à distance et consomment le moins d'espace et d'énergie possible. Ils doivent également être compatibles avec le réseau RENATER sur lequel ils sont implémentés et sont interopérables.

Le réseau se construit principalement autour des stations lasers de régénération ou des stations lasers multibranches qui sont les instruments de régénération du signal et de compensation du bruit des liens. Ces instruments garantissent des performances de transfert à l'état de l'art. Ils sont brièvement décrits ci-dessous :

- **Station laser de régénération (RLS)** : permet de régénérer le signal métrologique, de corriger le bruit des liens sortants et de transférer le signal vers l'utilisateur. Cet instrument est fabriqué et distribué par la société Exail.
- **Station de régénération multibranche (MLS)** : cet instrument dispose des mêmes fonctions qu'une RLS (régénération du signal métrologique, correction du bruit, distribution à un utilisateur) mais avec plusieurs sorties afin de distribuer de façon cohérente le signal vers plusieurs liens ou plusieurs utilisateurs. Il permet également de caractériser le signal distribué vers les liens et utilisateurs. Cet instrument est fabriqué et distribué par la société Exail.

Des équipements sont aussi nécessaires pour la supervision des équipements (Commutateur Ethernet ou Mediaconverter), en interface avec les équipements RENATER.

De plus, au niveau des nœuds du réseau, des équipements permettent de contrôler la qualité de la distribution du signal métrologique. Ce sont des compteurs de fréquence, des serveurs informatiques, des analyseurs de spectres et éventuellement des récepteurs GPS.

## Besoins liés au marché

Le premier et principal service du réseau national REFIMEVE est de fournir une référence de fréquence ultrastable aux nombreux laboratoires partenaires. Beaucoup de ces laboratoires utilisent le signal pour la spectroscopie de haute précision.

En spectroscopie à haute résolution, le bruit de fréquence du laser de spectroscopie peut dégrader le signal de spectroscopie. Par exemple pour un temps de mesure de 1 ms, il ne sera pas possible de mesurer un signal spectroscopique de largeur inférieure à la largeur de raie du laser mesurée pendant cette durée de 1 ms. Le bruit de fréquence du signal REFIMEVE distribué aux utilisateurs est donc crucial pour la spectroscopie de précision. Comme les temps d'interaction dans la spectroscopie moderne vont de la  $\mu$ s à plusieurs centaines de ms, il s'agit essentiellement du bruit dans une bande de fréquences de la dizaine de Hz au MHz.

Le signal source décrit plus haut à une largeur de raie inférieure à 1 Hz pour un temps de mesure de 1s. Ceci est suffisant pour la plupart des applications de spectroscopie de haute précision, comme cela a été démontré avec le réseau REFIMEVE pour les liaisons courtes (longueurs <100 km) [4][5].

Cependant, pour les liaisons longue distance (> 100-1000 km) de REFIMEVE, le signal transmis subit une dégradation de son bruit de fréquence du fait de deux effets principaux. Tout d'abord l'amplitude de correction du bruit est limitée par le temps de propagation aller-retour dans la fibre. De plus les liens sont cascades afin d'augmenter la distance de dissémination, et cette approche en cascade ajoute du bruit en dehors de la largeur de bande des asservissements. Cet effet est multiplié pour les liaisons longue distance, qui sont régénérées plusieurs fois. Ainsi le signal distribué pour des distances de l'ordre de 1000 km ou plus se caractérise par une largeur de raie mesurée dans 1 Hz de bande passante de l'ordre du kHz ou plus.

L'objet de ce marché est de disposer d'oscillateurs ultrastables pour nettoyer le bruit du signal REFIMEVE et ainsi disséminer à grande distance un signal de performance identique à celui disséminé pour des liaisons courtes. Ces oscillateurs de filtrage consistent en des lasers stabilisés sur des cavités ultra-stables et seront donc déployés sur le réseau REFIMEVE pour conserver la largeur spectrale du signal disséminé par les liaisons en cascade et donc conserver les performances du réseau à grande distance. Ces cavités ultra-stables seront installées dans certains nœuds du réseau situés à grande distance du LNE-SYRTE en fonction des besoins des laboratoires partenaires.

## II. Description du laser ultra-stable asservi sur cavité et pilotable à distance (LUS)

### Description générale :

Un schéma bloc général d'un système laser ultra-stable asservi sur cavité accessible à distance (LUS) est illustré à la Figure 2. Le système peut être divisé en trois sous-systèmes : le système optique, le système de contrôle/électronique, et le contrôle et la supervision à distance.

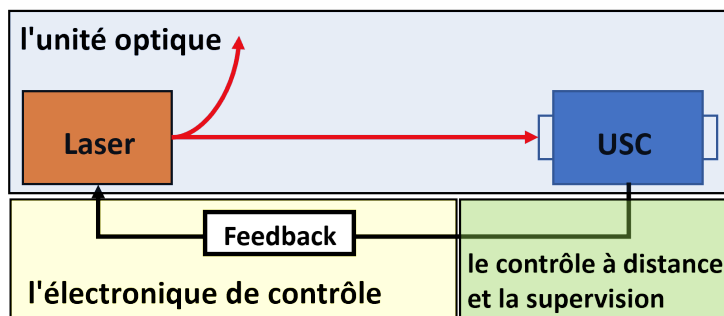


Figure 2 - Schéma bloc d'un système laser stabilisé par cavité accessible à distance (LUS) qui peut être divisé en trois parties : l'unité optique, l'électronique de contrôle, et le contrôle à distance et la supervision.

### Description des sous-ensembles d'une unité LUS :

- **L'unité optique (en bleu)**
  - Une cavité Fabry-Pérot ultra-stable à haute finesse : constitue le composant central, agissant comme un oscillateur ultra-stable à 1542,14 nm. La cavité doit être fabriquée à partir d'un matériau à très faible coefficient de dilatation et fonctionner sous vide en un point de dilatation thermique négligeable. Un montage sécurisé maintient l'alignement du chemin optique pour la portabilité, tandis qu'un découplage actif des vibrations et une isolation acoustique permettent au système d'atteindre une stabilité comparable ou supérieure à celle du signal REFIMEVE sur des échelles de temps plus courtes (1s-10s) à des températures ambiantes de 15 à 25 °C.
  - Le système laser : comprend un laser à fibre fonctionnant à 1542,14 nm, qui est stabilisé sur le mode optique de la cavité ultra-stable ci-dessus. Cette stabilisation minimise le bruit intrinsèque, visant à atteindre une largeur de raie inférieure à 1 Hz.
  - Les éléments optiques et optoélectroniques : comprennent les composants tels que le MEO, les miroirs et coupleurs et la photodiode nécessaires pour verrouiller le laser sur la cavité et caractériser l'unité LUS.
- **L'électronique de contrôle (en jaune)** : permet le verrouillage du laser sur la cavité et la caractérisation et l'optimisation de ce verrouillage. Cette partie permet également de générer les divers signaux RF nécessaires et contient des cartes électroniques permettant le contrôle du système.
- **L'contrôle à distance et supervision (en vert)** : permet le contrôle à distance (lecture/écriture) des différents sous-ensembles et la récupération des données des unités LUS via le protocole SSH.

### L'intégration potentielle de l'unité LUS au réseau REFIMEVE :

Comme indiqué précédemment, REFIMEVE offre une stabilité (et une exactitude) exceptionnelle de transfert optique, allant d'un MDEV de  $<10^{-15}$  à 1 seconde à  $<10^{-18}$  à 1000 secondes, fonctionnant à une fréquence nominale de 194,400 THz. Le réseau REFIMEVE transfère ainsi la stabilité du signal ultrastable de référence de pointe sur des milliers de kilomètres et est en plein expansion. Cependant,

comme indiqué plus haut, le bruit de phase du signal transmis est dégradé pour des fréquences supérieures typiquement à la dizaine de Hz du fait de la bande passante limitée des asservissements des liens optiques et des bosses de bruit inhérentes à ces asservissements. Ce problème est exacerbé pour les liaisons longue distance en cascade qui nécessitent de multiples régénérations. La Figure 3 présente la densité spectrale de puissance (PSD) d'une des liaisons longue distance du réseau REFIMEVE. La courbe épaisse continue représente le bruit du signal compensé de bout en bout (aller-retour), tandis que les courbes en pointillés représentent le bruit du premier tronçon de la liaison de 1300 km avec la ligne  $\beta$  (pointillés noirs).

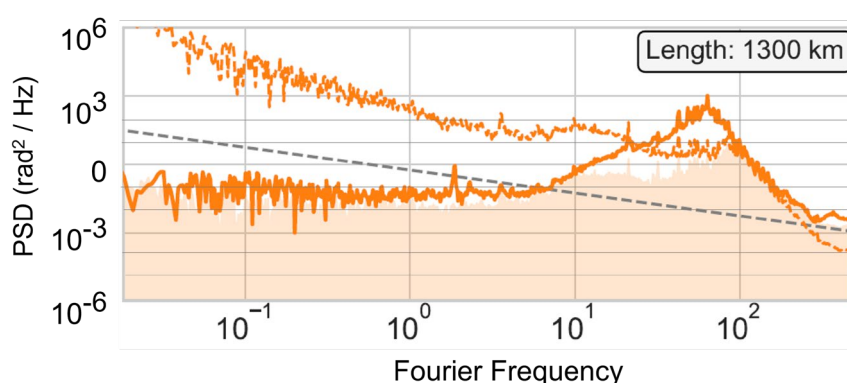


Figure 3: Densité spectrale de puissance (PSD) de la phase des signaux de bout en bout (courbes continues épaisses) et du bruit des premiers tronçons (courbes en pointillés), ligne  $\beta$  (ligne pointillée noire).

Pour résoudre cette problématique, des systèmes laser stabilisés par cavité (LUS) seront intégrés dans le réseau REFIMEVE en tant qu'oscillateurs ultra-stables de filtrage, notamment pour ces liaisons longue distance. L'unité LUS sera interfacée au signal REFIMEVE de telle façon que sa stabilité à court terme (@ <100 s) soit préservée tandis que, à long terme (@ >100 s) sa fréquence sera corrigée activement par rapport au signal REFIMEVE de référence pour garantir la stabilité à long terme et surtout l'exactitude du signal REFIMEVE.

Pour intégrer l'unité LUS au réseau REFIMEVE, du matériel supplémentaire sera installé. L'unité LUS est donc une partie d'un système plus complexe. La Figure 4 montre un agencement de la baie pour de telles installations. L'unité LUS sera entourée de deux RLS (une pour la transmission du signal et l'autre pour recevoir le signal de retour) ou d'une MLS. Du matériel supplémentaire comme des compteurs, des multiplexeurs, des serveurs et des alimentations électriques pilotables compléteront l'équipement nécessaire au contrôle, à la caractérisation et à la supervision du réseau REFIMEVE.

Les LUS, les RLS ou MLS et les équipements complémentaires seront installés dans des nœuds du réseau REFIMEVE, en dehors de laboratoires de métrologie, sur le territoire français. Ces nœuds sont



souvent situés dans des environnements plus exigeants que les configurations de laboratoire typiques, tels que des data centers ou des centres de ressources informatiques, où l'espace est limité.

Par conséquent, ce projet privilégiera la compacité, la robustesse, les performances élevées et la capacité de contrôle à distance et de supervision des unités *LUS*.

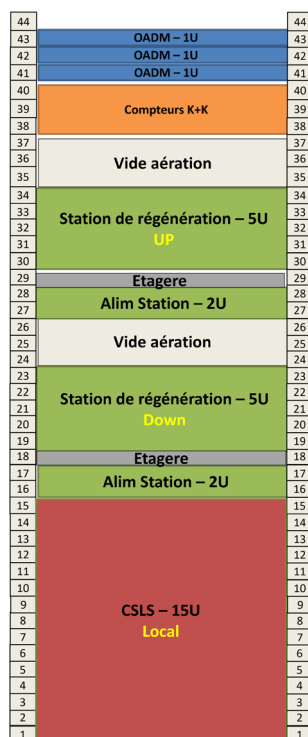


Figure 4 : Disposition générale des baies des points nodaux REFIMEVE

### III. Spécifications

#### I. Spécifications générales

Les unités *LUS* doivent répondre aux spécifications générales suivantes. Chaque spécification est accompagnée d'une description sous le tableau.

##### ❖ Tableau des spécifications

#	Spécification	Caractéristiques requises		Méthode de vérification (essai, inspection, analyse, documentation)
		Caractéristiques de base	Caractéristiques favorisées	
3.1.1	Dimensions du système	<ul style="list-style-type: none"> <li>Largeur : 19" rack</li> <li>Hauteur ≤ 18 U</li> <li>Profondeur ≤ 60 cm</li> </ul>	- Hauteur ≤ 15 U	Inspection, documentation
3.1.2	Installation dans un rack	▪ À l'avant/à l'arrière	▪ À l'avant seulement	Inspection, documentation

3.1.3	Longueur interne de fibre optique	▪ < 1 m		
3.1.4	Connecteurs de fibre optique	▪ APC et PM en sortie ▪ Aussi peu de connexions que possible	▪ LC/APC et PM en sortie	Inspection
3.1.5	Alimentation	▪ 1 entrée	▪ 2 entrées avec commutation interne ▪ Batterie de secours incluse	Test, inspection, documentation
3.1.6	Consommation	▪ ≤ 250 W		Test, Documentation
3.1.7	Type de prise d'entrée	▪ C13		Inspection
3.1.8	Connecteurs radiofréquence	▪ SMA (sortie)		Inspection
3.1.9	Température de fonctionnement	▪ 15 à 30 °C	▪ 15 à 35 °C	Inspection, essais
3.1.10	Système à vide	▪ inclus		Test, Documentation
3.1.11	Plate-forme anti-vibrations	▪ inclus		Test, Documentation

3.1.1 – L'unité(s) *LUS* doit être compatible avec un système de baie de 19 pouces de largeur, et la procédure d'installation doit être simple. Optimiser la hauteur de l'unité(s) *LUS* est crucial pour respecter les contraintes d'espace, visant une hauteur totale inférieure à 15U, incluant tous les sous-systèmes. De plus, la profondeur d'une unité doit être inférieure à 60 cm pour assurer la compatibilité avec une baie standard de 60x60 cm.

3.1.2 – L'installation dans un rack de l'unité(s) *LUS* à l'avant est favorisée.

3.1.3 – Les composants de fibre et les interconnexions entre les sous-systèmes doivent être maintenus aussi courts que possible (< 1 m) pour minimiser l'impact des fluctuations de température et garantir des performances non compromises.

3.1.4 – Tous les connecteurs de fibre doivent être de type *APC* (connecteur physique incliné) et *PM* pour minimiser les réflexions parasites, et leur nombre doit être réduit au minimum. Lorsque cela est possible, les fibres doivent être épissées ensemble. Les unités *LUS* avec des connecteurs *LC/APC* sont préférées (optionnelles), car elles s'intégreront parfaitement avec les *RLS* ou *MLS*, qui utilisent principalement des connexions *LC/APC*.

3.1.5 – L'alimentation des unités *LUS* devra préférentiellement être redondante pour minimiser les interruptions d'alimentation. La plupart des sites du réseau disposent d'une voie de secours en plus de la voie électrique régulière. Par conséquent, deux entrées (avec commutation interne et batterie fournissant au moins 3 minutes d'alimentation de secours) sont préférables.

3.1.6 – Pour répondre aux considérations financières et environnementales, la consommation électrique des unités *LUS* doit être minimisée, ne dépassant pas 250W.

3.1.7 – Les prises d'entrée d'alimentation des unités *LUS* doivent être de type femelle *C13* selon la norme *IEC 60320*. Des câbles avec connecteur femelle *C13* ou E/F doivent être fournis.

3.1.8 – Les connecteurs radiofréquence (entrée(s)/sortie(s)) des unités *LUS* doivent être de type *SMA* pour assurer la cohérence avec les autres sous-ensembles.

3.1.9 – Comme les unités *LUS* seront placées avec d'autres instruments non régulés thermiquement, les unités doivent fonctionner normalement dans une plage de température ambiante typique de 15°C à 30°C.

3.1.10 – Les unités *LUS* doivent être équipées d'une pompe secondaire préinstallée ainsi que d'un système de contrôle conformément aux exigences du produit. Les spécifications et fonctionnalités de l'unité de pompage devront être fournies dans *un document technique distinct à livrer*.

3.1.11 – Les unités *LUS* doivent être équipées d'une plateforme d'isolation active contre les vibrations préinstallée conformément aux exigences du produit. Le rapport de test des performances des unités *LUS* par rapport à ce système d'isolation des vibrations devra être fourni.

## II. Performances

Les performances (stabilité) des unités *LUS* doivent être comparables ou supérieures à celles du signal REFIMEVE sur une échelle de temps de 1 – 10 secondes et répondre aux spécifications suivantes. Chaque spécification est accompagnée d'une description sous le tableau.

### ❖ Tableau des spécifications

#	Spécifications	Caractéristiques requises	Méthode de vérification (essai, inspection, analyse, documentation)
3.2.1	Longueur d'onde de fonctionnement	▪ 1542,14 nm	Test, analyse, documentation
3.2.2	Mode d'émission du laser	▪ Onde continue (CW) ▪ Mode unique ▪ Accordabilité sur $\pm 2$ GHz au minimum	Test, analyse, documentation
3.2.3	Stabilité	Déviations d'Allan modifiée (MDEV) ▪ $\leq 3 \times 10^{-15}$ @ 1 sec ▪ $\leq 3 \times 10^{-15}$ @ 10 sec	Test, analyse, documentation
3.2.4	Largeur de raie	▪ $\leq 1$ Hz	Test, analyse, documentation
3.2.5	FSR	▪ $\leq 3$ GHz	Test, analyse, documentation
3.2.6	Bande passante du PDH	▪ $> 200$ kHz ▪ préféré : de l'ordre de 1 MHz	Test, analyse, documentation

3.2.7	Polarisation de sortie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polarisation linéaire fixe,</li> <li>▪ <math>PAR \geq 20</math> dB</li> </ul>	Test, analyse, documentation
3.2.8	Dérive de fréquence linéaire	▪ $\leq 300$ mHz/s à 15-30°C	Test, analyse, documentation
3.2.9	Puissance optique utilisable	▪ $\geq 10$ mW	Test, analyse, documentation
3.2.10	Robustesse / Temps de fonctionnement	▪ $\geq 99$ % @7 jours	Test, analyse, documentation

3.2.1 – La longueur d'onde de fonctionnement doit être centrée sur 1542,14 nm ou 194,400 THz pour garantir une intégration simple des unités *LUS* dans le réseau REFIMEVE.

3.2.2 – La sortie optique des unités *LUS* doit être en onde continue, monomode et linéairement polarisée. Le signal de sortie doit être accordable de  $\pm 2$  GHz autour de 194,400 THz et doit couvrir la plage spectrale libre de la cavité.

3.2.3 – Pour que les unités *LUS* soient utilisées comme oscillateurs de filtrage, le bruit du signal de sortie des unités *LUS* doit être meilleur ou au moins comparable au signal REFIMEVE, c'est-à-dire  $MADEV < 10^{-15}$  @ 1 – 10 s à la fréquence nominale de 194,400 THz.

3.2.4 – Pour corriger l'élargissement de la raie dans les liaisons longue distance, les unités *LUS* doivent fournir des signaux avec une largeur de raie  $\leq 1$  Hz.

3.2.5 – Les unités *LUS* seront asservies en fréquence par rapport au signal REFIMEVE sur des échelles de temps plus longues ( $> 10 - 100$  s). Ce processus accumulera les signaux de correction sur l'actuateur. Le FSR ne doit pas dépasser 3 GHz pour pouvoir mettre en place des corrections de fréquence sur le long terme. Cet asservissement sera réalisé par REFIMEVE.

3.2.6 – La bande passante *PDH* doit être supérieure à 200 kHz, et être de préférence dans la plage de quelques dizaines de MHz, pour éviter l'accumulation de bruit provenant des boucles à verrouillage de phase successives (PLL) du *MLS* et du *RLS*, qui fonctionnent généralement autour de 100-200 kHz.

3.2.7 – Le signal de sortie des unités *LUS* doit être linéairement polarisé avec un  $PER \geq 20$  dB pour obtenir l'amplitude optimale du signal de battement optique entre les unités *LUS* et le signal REFIMEVE.

3.2.8 – La dérive linéaire des unités *LUS* à une température ambiante (15°C à 30°C) doit être au maximum de l'ordre de 300 mHz/s, ce qui entraînerait une dérive linéaire totale d'environ 10 MHz par an.

3.2.9 – Les unités *LUS* doivent avoir une puissance de sortie optique utilisable de  $\geq 10$  dBm (10 mW) pour obtenir un rapport signal/bruit optimal du signal de battement optique avec REFIMEVE.

3.2.10 – Les unités *LUS* doivent avoir un temps de fonctionnement (temps de verrouillage PDH) de  $\geq 99$  % @ 7 jours, comparable à celui du signal REFIMEVE.

Les unités *LUS* seront activement corrigées en fréquence par rapport au signal REFIMEVE à long terme ( $> 10 - 100$  s). Les unités *LUS* doivent proposer en option un actuateur de correction (indépendant

du verrouillage de la cavité par PDH) pour réaliser la correction de fréquence de la cavité, ainsi que le système électronique pour réaliser cette correction.

Les actionneurs de correction de fréquence et le système électronique doivent répondre aux spécifications suivantes. Chaque spécification est accompagnée d'une description sous le tableau.

❖ **Tableau des spécifications (option)**

#	Spécifications	Caractéristiques requises	Méthode de vérification (essai, inspection, analyse, documentation)
3.2.11	Type d'actionneur	▪ MEO	Test, analyse, documentation
3.2.12	Plage de dérive/correction de fréquence et système électronique de correction de la dérive de fréquence	▪ Accordabilité de la correction : 0 à 1 MHz (0 à 12 MHz de préférence) ▪ Permettant 1 mois de fonctionnement continu (1 an de préférence)	Test, analyse, documentation

3.2.11 – Le type d'actionneur de correction de fréquence des unités LUS doit être un MEO pour offrir la plage de bande passante maximale de correction. Le fabricant doit garantir que l'actionneur fourni permet au moins un an de correction continue de la dérive linéaire.

3.2.12 – Pour corriger la dérive linéaire à  $\leq 300$  mHz/s sur un mois d'exploitation continue, la bande passante de correction doit être dans la plage de 0 à 1 MHz (0 à 12 MHz pour un an d'exploitation continue). Le fabricant doit garantir que l'actionneur fourni permet au moins un an de correction continue de la dérive linéaire.

### III. Contrôle à distance et supervision

Les unités LUS seront installées en dehors de laboratoire de métrologie, dans des endroits où l'intervention humaine sera limitée. Les unités LUS doivent être commandables et continuellement supervisées à distance (comme les RLS et MLS industriels).

Les paramètres à contrôler et superviser seront déterminés dans le livrable "document technique pour les unités LUS" par le maître d'ouvrage pour définir le contrôle et la surveillance du fonctionnement de chaque sous-ensemble et de l'assemblage.

Ils doivent également être compatibles avec le réseau RENATER sur lequel ils sont implémentés. Ils doivent être interopérables. Ils doivent pouvoir être intégrés à la supervision de REFIMEVE.

La communication des différents sous-systèmes peut être regroupée sous la même carte de communication ou plusieurs cartes de communication peuvent être utilisées. Cette solution sera proposée par le maître d'ouvrage dans le "document technique livrable des unités LUS", puis validée avec l'équipe REFIMEVE. Ce document mentionnera l'ensemble des informations-types qui peuvent être extraites (lignes de commande, fonctionnalités) pour les unités LUS et les sous-unités.

Ce document détaillera également le moyen de communication avec l'instrument.

Nous pouvons diviser cette section en trois parties : *Communication*, *Contrôle à distance* et *Supervision*, qui seront discutées dans les sections suivantes.

- Communication : fait référence aux moyens et protocoles de communication
- Contrôle à distance : fait référence aux actions de contrôle de l'instrument
- Supervision : fait référence aux actions de surveillance de l'instrument

## 1. Communication :

L'instrument LUS sera inclus dans un système métrologique plus complexe sur le réseau de l'infrastructure de recherche REFIMEVE. La partie communication des unités LUS sera interfacée avec un serveur ou un réseau informatique dédié à la communication avec les équipements du réseau REFIMEVE. La communication avec chaque unité LUS devra se faire via le protocole *SSH*.

Le mode et le type de communication doivent suivre les spécifications ci-dessous. Chaque spécification est accompagnée d'une description ci-dessous la table.

### ❖ Tableau des spécifications :

#	Specifications	Required Features	Verification method (Test, inspection, analysis, documentation)
3.3.1	LAN connection	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2</li> <li>▪ 1 pour l'opérationnel et 1 pour la maintenance</li> <li>▪ Static/DHCP</li> </ul>	Documentation, Test
3.3.2	USB	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Connection avec l'ordinateur</li> </ul>	Documentation, Test
3.3.3	Protocole SSH et interface Web	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Accès à toutes les fonctionnalités</li> </ul>	Documentation, Test

3.3.1 – Les unités LUS doivent être équipées d'au moins deux ports LAN, un port principal nommé « Operating » et un secondaire nommé « Maintenance ». Ces ports LAN doivent pouvoir être configurables pour changer l'IP par exemple.

3.3.2 – Les unités LUS doivent être équipées d'au moins un port USB comme mode alternatif de communication.

3.3.3 – Le mode d'initialisation du réglage des paramètres et de récupération des données des unités LUS devrait se faire via le protocole *SSH* (voir section 3.3.4). Une interface Web supplémentaire serait appréciée. Le fabricant doit s'assurer que l'unité LUS est équipée des capacités du protocole *SSH*.

## 2. Contrôle à distance

Les unités LUS devront à minima pouvoir être contrôlées pour les différents ensembles de commande ci-dessous. Ces spécifications doivent servir d'exemple et le fabricant peut optimiser et modifier ces ensembles de commande et les fonctionnalités requises en fonction du système proposé.

Le contrôle à distance des unités LUS doit être convivial et simple, avec complétion automatique des commandes longues, de préférence via un terminal.

Une liste d'exemples de commandes attendues peut être trouvée en *Annexe A*. L'Annexe A doit être considérée comme un exemple non exhaustif et les commandes ainsi que les fonctionnalités peuvent être optimisées/modifiées par le fabricant en fonction de leur configuration système. Le fabricant fournira l'ensemble complet des commandes exécutables et leurs fonctionnalités dans le livrable "document technique de l'unité LUS".

❖ **Tableau des spécifications :**

#	Ensemble de commandes	Caractéristiques	Méthode de vérification (essai, inspection, analyse, documentation)
3.3.4	Commandes de verrouillage	Exécuter, lire le processus des verrouillages/ déverrouillages	Documentation, Test
3.3.5	Commandes laser	Exécuter, lire l'état de fonctionnement du laser	Documentation, Test
3.3.6	Graphes de suivi des paramètres (optionnel)	Permet de tracer en temps réel l'état des différents sous-systèmes	Documentation, Test

3.3.4 – La commande ou les commandes des verrouillages/ déverrouillages doivent permettre à l'utilisateur d'initier manuellement ou automatiquement les procédures de verrouillages ou de déverrouillages, ainsi que de récupérer l'état des verrouillages.

3.3.5 – Les commandes du laser permettent à l'utilisateur d'initier et de récupérer l'état opérationnel du laser de sortie, tel que la puissance du laser, la valeur grossière du balayage de fréquence du laser, l'optimisation de la polarisation...

3.3.6 – L'option Graphe de suivi (Plot mode) permette à l'utilisateur de visualiser en continu par exemple les puissances, le signal d'erreur, la densité spectrale de puissance du signal de transmission...

### 3. Supervision

Le logiciel de supervision existant (voir détails sur la Figure 5) permet de contrôler et d'exploiter de manière automatisée l'ensemble du réseau REFIMEVE, pour tendre vers une disponibilité 24/7 du transfert des signaux métrologiques avec un minimum d'intervention humaine et nécessitant le moins de compétences techniques possibles.

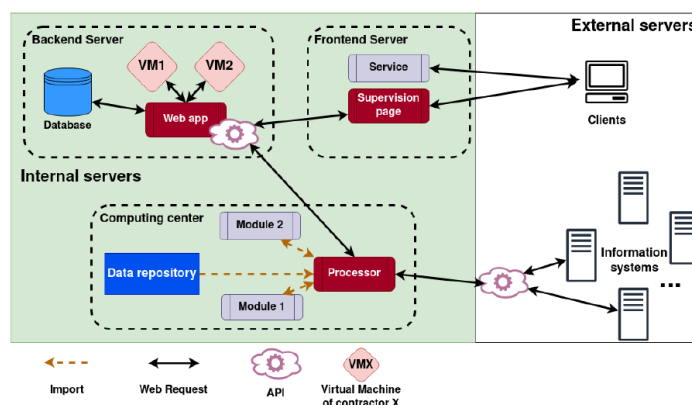


Figure 5: Logiciel de supervision existant pour contrôler et exploiter automatiquement l'ensemble du réseau REFIMEVE

Les unités LUS et le logiciel de supervision existant doivent pouvoir être interfacés, offrant une interopérabilité cruciale pour REFIMEVE. Il est demandé que les unités LUS puissent échanger avec le système de supervision global et scientifique de REFIMEVE des données relatives par exemple aux performances ou au bon état fonctionnel du matériel en vue des actions de maintenance.

Les unités LUS devront fournir des points d'entrée de supervision bien définis pour accéder aux fonctionnalités et aux données, et réciproquement, avec le système d'information de REFIMEVE. Cela permettra une intégration étroite sans compromettre la sécurité ni la stabilité des systèmes. La documentation des points d'entrée pertinents, tels que les performances, seront fournis aux titulaires. Les spécifications détaillées de chaque point d'entrée permettant aux développeurs et aux utilisateurs de comprendre précisément les données disponibles, leur format, leur signification et leur utilisation, seront documentées.

## SYSTÈME D'ALERTE

Pour les alertes, la documentation devra décrire les différents types d'alertes générées, leurs déclencheurs potentiels et les actions recommandées en réponse à chaque alerte. Cette documentation détaillée sera essentielle pour l'intégration des données de supervision dans d'autres systèmes, et pour permettre aux opérateurs et aux utilisateurs de prendre des décisions informées, fiables et pertinentes.



## Appendix A

Exemple de commandes :

#	Catégorie de commande	Commander (exemple)	Description
A.1	Verrouillage automatique	ActiverAutolock	Active ou désactive le mécanisme de verrouillage automatique
A.2		AutolockStatus	Récupère l'état du verrouillage automatique
A.3		Cavity_Lock	Verrouiller ou déverrouiller manuellement la cavité
A.4	Commandes laser	Get_LaserStatus	Récupère l'état de fonctionnement du laser
A.5		Set_LaserCoarse	Régler la valeur grossière du balayage laser
A.6		Set_TempVoltage	Tension de réglage fournie au contrôle de la température du laser
A.7		Set_LaserPower	Ajuste la puissance de sortie de la valeur de gain EDFA laser/réglée
A.8		Get_LaserPower	Récupère la puissance de sortie du laser
a.9		OPT_Pol_Ctrl	Ajuster la polarisation du système laser de sortie
A.10	État de la cavité	Cavity_FWHM	Récupère la largeur de raie laser verrouillée par cavité
A.11		Cavity_FSR	Récupère la plage spectrale sans cavité
A.12		P_Transmission	Récupère la puissance optique de transmission de la cavité
A.13		Cavity_LockCount	Récupère le nombre de tentatives de verrouillage automatique
A.14		Cavity_Locktime	Indique la durée de verrouillage de la cavité
A.15	Commandes PDH	Start_PDH_Scan	Lance une analyse pour optimiser le verrouillage PDH
A.16		Stop_PDH_Scan	Met fin à l'analyse PDH
A.17		Get_PDH_LockStatus	Récupère l'état actuel de la serrure PDH
A.18		Set_PDH_ModFreq	Configure la fréquence de modulation Pound-Drever-Hall
A.19		Set_PDH_PropGain	Ajuste le gain proportionnel de rétroaction PDH
A.20		Set_PDH_InteGain	Ajuste le gain pour le gain intégral de retour PDH
A.21		Get_PDH_Parameters	Récupère les paramètres actuels du système PDH
A.22		Plot_PDH_ErrorSignal	Trace le signal d'erreur
A.23	Verrouillage décalé	Set_OffsetLockValue	Définit le décalage souhaité pour le verrouillage de fréquence
A.24		Enable_OffsetLock	Active le mécanisme de verrouillage du décalage de fréquence

A.25		Get_OffsetLockStatus	Récupère l'état du verrouillage du décalage de fréquence
A.26		Read_OffsetLockParameters	Lit les paramètres du verrou de décalage
A.27	Servocommandes	Set_ServoGain	Configure le gain pour la boucle d'asservissement
A.28		Set_ServoInteGain	Définit la constante de temps de l'intégrateur pour la boucle d'asservissement
A.29		Set_ServoPropoGain	Définit le gain proportionnel pour la boucle d'asservissement
A.30		Set_ServoDerivGain	Définit le gain dérivé de la boucle d'asservissement
A.31		GetServoStatus	Récupère l'état actuel de la boucle d'asservissement
A.32		ReadServoErrorSignal	Lit le signal d'erreur actuel du système d'asservissement
A.33		GetServoParameters	Récupère les paramètres actuels du système d'asservissement