

Titre de la thèse/Thesis title : Horloge optique à microcellule Cs proche-UV ultra-stable /
 Ultra-stable near-UV microcell optical clock

Laboratoire d'accueil / Host Laboratory : FEMTO-ST

Spécialité du doctorat préparé/Speciality : Optique-Photonique ; Sciences pour l'ingénieur /
 Optics-Photonics ; Engineering sciences

Mots-clefs / Keywords : micro-horloge atomique ; métrologie temps-fréquence ; cellule
 alcaline MEMS; spectroscopie laser; micro-technologies / **miniature atomic clock ; time-
 frequency metrology ; MEMS alkali vapor cell ; laser spectroscopy ; micro-technologies**

Descriptif détaillé de la thèse :

L'Institut FEMTO-ST travaille depuis presque 20 ans sur le développement de micro-horloges atomiques. Ces horloges offrent un budget stabilité-volume-consommation inégalé et sont aujourd'hui déployées dans une large gamme d'applications. Elles assurent le guidage et la navigation de véhicules ou systèmes autonomes en situation de résilience aux signaux GNSS, prolongent la durée de campagnes de mesure pour évaluer l'activité sismique dans les fonds océaniques, ou renforcent la sécurisation des communications numériques [1]. Néanmoins, le bruit de fréquence des lasers qu'elles utilisent ainsi que la présence de gaz tampon dans leur cellule limitent leur stabilité de fréquence.

L'exploitation de méthodes simples de spectroscopie sub-Doppler, reposant sur l'interaction d'une vapeur thermique d'atomes alcalins en microcellule avec deux champs laser contre-propageants, ouvre la voie à la démonstration de micro-horloges optiques de nouvelle génération, avec des performances de stabilité dépassant celles des micro-horloges actuelles par au moins 3 ordres de grandeur. Cette thèse de doctorat s'inscrit au cœur de cet axe de recherche stratégique initié à FEMTO-ST il y a quelques années.

Dans ce domaine, le NIST a développé une horloge optique à microcellule reposant sur l'excitation d'une transition à 2 photons à 778 nm de l'atome de Rb, démontrant une stabilité relative de fréquence de 1.8×10^{-13} à 1 s [2]. Un module laser à 780 nm ultra-compact asservi sur une cellule Rb par la technique d'absorption saturée a démontré une stabilité de fréquence de 1.5×10^{-12} à 1 s au FBH en Allemagne [3]. Plus récemment, un laser stabilisé à 895 nm sur une microcellule Cs a été démontré à FEMTO-ST avec une stabilité de fréquence de 3×10^{-13} à 1 s et inférieure à 5×10^{-14} à 100 s [4].

Dans cette thèse, nous proposons d'initier à FEMTO-ST le développement d'une référence de fréquence optique à microcellule obtenue par stabilisation directe d'une diode laser proche-UV affinée spectralement sur la transition $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$ à 459 nm de l'atome de césium. Cette transition [5], jamais sondée à ce jour en microcellule, présente une fréquence de transition 2 fois supérieure aux approches citées précédemment, une largeur naturelle intermédiaire attractive de quelques MHz, et est propice à une architecture simple pour une intégration future poussée. Cette source optique ultra-stable visera des performances de stabilité de fréquence sub- 10^{-13} à 1 s, à l'état de l'art, et trouvera application dans une pléthore d'applications. Aussi, cette source laser proche-UV pourrait constituer la brique fondatrice d'une micro-horloge optique innovante aux performances sans précédent exploitant le phénomène quantique de superradiance [6].

[1] J. Kitching, Appl. Phys. Rev. **5**, 031302 (2018).

[2] Z. L. Newman et al., Opt. Lett. **46**, 4702 (2021).

[3] A. Strangfeld et al., Opt. Exp. **30**, 7, 12039 (2022).

[4] A. Gusching et al., Opt. Lett. **48**, 6, 1626 (2023).

[5] P. Chang et al., Phys. Rev. Appl. **18**, 024034 (2022).

[6] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99-110 (1954).

Travaux envisagés :

Le travail de thèse se déroulera en plusieurs étapes, incluant :

- 1 : Etude bibliographique
- 2 : Montage d'un système laser proche-UV avec cellule Cs micro-fabriquée
- 3 : Spectroscopie de la transition $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$ à 459 nm de l'atome de césium
- 4 : Implémentation d'une référence optique à 459 avec laser à cavité ultra-stable
- 5 : Stabilité court-terme de l'horloge optique à microcellule
- 6 : Stabilité moyen-terme : Déplacements de fréquence et contributions.
- 7 : Rédaction du manuscrit de thèse

Le planning prévisionnel est montré ci-dessous :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
Etape 1: Bibliographie																																					
Etape 2: Implémentation setup																																					
Etape 3: Spectroscopie court-terme																																					
Etape 4: Référence à 895 nm																																					
Etape 5: Métrologie court-terme																																					
Etape 6: Budget moyen-terme																																					
Etape 7: Rédaction manuscrit																																					
Technologie microcellule																																					

Etape 1 : Etude bibliographique [M0-M2]

Le(la) candidat(e) mènera une étude bibliographique détaillée afin de bien situer le positionnement et contexte international de son travail de thèse. Il identifiera les approches spectroscopiques principales explorées dans la littérature pour le développement de références optiques à microcellule alcaline. Un travail comparatif sera mené afin de mettre en avant les points forts et inconvénients des approches respectives. Ce suivi bibliographique sera entretenu tout au long du travail de thèse.

Etape 2 : Montage d'un laser proche UV stabilisé sur microcellule [M1-M12]

Le (la) candidat(e) implémentera sur un breadboard optique compact le système laser proche-UV stabilisé sur microcellule. L'architecture simplifiée de la référence optique à microcellule est montrée figure 1. Une instrumentation sera mise en place pour le pilotage et contrôle de l'expérience.

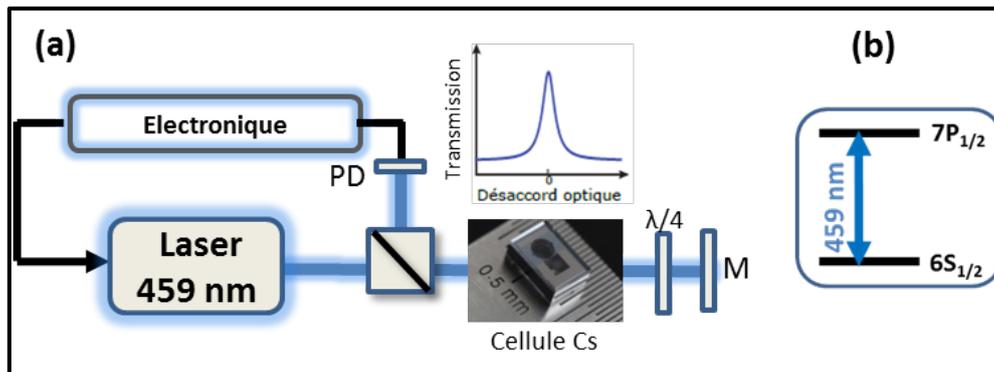


Figure 1 : Référence optique à microcellule Cs à 459 nm. (a) Schéma de principe. (b) Niveaux d'énergie impliqués, indiquant la transition $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$ à 459 nm.

Une diode laser à 459 nm de faible largeur spectrale (~ 100 kHz) sera utilisée. Un étage d'isolation optique et de stabilisation de puissance laser (non montrés sur la figure 1) seront mis en place pour évaluer leur criticité. Le faisceau laser est transmis dans une microcellule Cs. Cette dernière sera régulée en température à $> 60^\circ\text{C}$ et disposée au sein d'un blindage magnétique. En sortie de cellule, le faisceau laser sera rétro-réfléchi à l'aide d'un miroir, couplé à une lame quart d'onde, pour produire deux faisceaux contre-propageants orthogonaux en polarisation. La lecture du faisceau retour conduira par spectroscopie sub-Doppler à la photodétection d'une résonance atomique à 459 nm. Un

système de détection synchrone sera exploité pour générer un signal d'erreur utile à l'asservissement de la fréquence laser, par contre-réaction sur son courant et son actuateur piézoélectrique.

Etape 3 : Spectroscopie de la résonance et stabilité de fréquence court-terme [M4-M16]

Une fois la résonance atomique détectée en microcellule, une étude spectroscopique détaillée, couplant expérience et modélisation, sera menée afin d'en optimiser les caractéristiques. Le candidat évaluera l'impact de la température de cellule, de la puissance laser, du champ magnétique, de l'alignement et des polarisations respectives des faisceaux contre-propageants. L'objectif de cette étude sera de trouver la valeur des paramètres expérimentaux à exploiter pour optimiser le rapport signal/largeur de la résonance atomique optique détectée. Une étude sera menée pour trouver les paramètres optimaux de modulation de la détection synchrone pour favoriser la pente du discriminateur de fréquence (signal d'erreur). Un budget de bruit court terme sera effectué. Cette étude permettra d'optimiser la stabilité de fréquence court-terme.

Etape 4 : Implémentation d'un signal de référence à 459 nm [M4-M18]

Les performances de stabilité de fréquence visées de l'horloge à microcellule sont $sub-10^{-13}$ à 1 s. Mesurer de telles performances à cette longueur d'onde impose la disponibilité d'une référence optique plus stable contre laquelle faire battre la référence à microcellule.

Dans ce cadre, le candidat contribuera, avec le support de la plateforme OSC-IMP de FEMTO-ST, à la génération et l'extraction d'un signal de référence optique ultra-stable à 459 nm. Ce dernier sera obtenu à partir d'un laser à cavité ultra-stable à 1542 nm, disponible à FEMTO-ST, présentant une stabilité de fréquence de l'ordre de 2×10^{-15} à 1 s [7], associé à une synthèse de fréquence impliquant un peigne de fréquence femto-seconde fibré, composants optiques non-linéaires (doubleurs de fréquence, fibre non-linéaire, etc.), et un lien optique fibré. A la sortie du lien optique, ce signal à 459 nm sera comparé au signal de l'horloge à microcellule, avec l'obtention d'un battement de fréquence, pouvant être analysé en termes de bruit de phase ou déviation d'Allan. A noter que la caractérisation des performances de la référence à microcellule pourrait aussi être réalisée par analyse d'un signal de battement obtenu entre deux systèmes quasi-identiques.

Etape 5 : Stabilité court-terme de l'horloge optique à microcellule [M9-M22]

A cette étape démarrera l'étude métrologique en fréquence de l'horloge atomique à microcellule à 459 nm. Inspiré des résultats obtenus dans l'étape 2, la stabilité de fréquence court terme de l'horloge à microcellule sera mesurée et optimisée. Il sera vérifié que des performances comparables aux résultats prédits par l'étude de budget de bruit sont obtenues. Des performances de stabilité dans la gamme de quelques 10^{-13} à 1 s seront visées.

Etape 6 : Stabilité moyen-terme : déplacements de fréquence et contributions [M15-M34]

Sur des temps d'intégration typiquement supérieurs à 100 s, des instabilités de fréquence de l'horloge sont induites par les fluctuations des paramètres expérimentaux. Cette étape 6 visera à mener une étude métrologique en fréquence afin de quantifier la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations des paramètres expérimentaux principaux (température de cellule, puissance laser, champ magnétique, alignement et superposition des faisceaux, paramètres de modulation, etc.). La mesure des fluctuations typiques des paramètres sur des temps d'intégration conséquents sera menée. Cette étude permettra d'identifier les limitations principales à la stabilité de fréquence moyen- et long-terme de l'horloge. Des solutions seront alors proposées et testées pour réduire la contribution de ces effets.

Etape 7 : Rédaction du manuscrit de thèse [M28-M36]

Le candidat entreprendra 8 mois avant sa soutenance la rédaction de son manuscrit de thèse. Des expériences seront possiblement poursuivies jusque 3 mois avant la fin de la rédaction.

Note : Technologie de microcellule

Tout au long de cette thèse, nous viserons à ce que le (la) candidat(e) contribue à la caractérisation d'une technologie de microcellule alcaline améliorée à la pureté renforcée, avec une faible pression résiduelle de contaminants, requise pour résoudre la largeur naturelle de la transition (quelques MHz). Cette microcellule sera idéalement fonctionnalisée pour optimiser son adressage et sa transmission optique. Ces travaux seront réalisés en étroite collaboration avec l'équipe MOSAIC du département MN2S de FEMTO-ST (contact : N. Passilly).

[7] A. Didier et al., Appl. Opt. 54, 3682–3685 (2015).

Thesis description :

Over the last 20 years, FEMTO-ST has worked on the development of miniaturized atomic clocks. These clocks offer an unrivaled stability-volume-power budget and are now deployed in a plethora of applications. These clocks ensure the guiding and navigation of GNSS-denied systems, contribute to extend ocean bottom missions for gas/mineral exploration, seismic or geophysics research, and reinforce secure communications [1]. Nevertheless, the frequency noise of their laser and the presence of buffer gas in their cell limit and jeopardize their frequency stability.

The use of simple sub-Doppler spectroscopy techniques, relying on the interaction of a hot atomic vapor confined in a microfabricated cell with two counter-propagating laser fields, paves the way to the demonstration of new-generation chip-scale optical clocks, with stability performances at least 3 orders of magnitude better than current commercial devices. The PhD thesis work stands at the heart of this strategic research axis initiated at FEMTO-ST a few years ago.

In this domain, NIST has developed a microcell optical clock based on the excitation of the two-photon transition at 778 nm of Rb atom, demonstrating a fractional frequency stability of 1.8×10^{-13} at 1 s [2]. An ultra-compact laser system stabilized at 780 nm by saturated absorption spectroscopy on a Rb cell has demonstrated a frequency stability of 1.5×10^{-12} at 1 s, at FBH, Germany [3]. More recently, a 895 nm Cs microcell-stabilized laser developed at FEMTO-ST has reached the level of 3×10^{-13} at 1 s and below 5×10^{-14} at 100 s [4]. Such systems, already remarkable, still benefit of a large margin or progress.

In this PhD thesis work, we propose to initiate at FEMTO-ST the development of a microcell optical frequency reference relying on the direct stabilization of a narrow-linewidth near-UV laser onto the Cs atom $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$ at 459 nm. This transition [5], never probed in a microfabricated cell, presents a transition frequency 2 times higher than previously-reported systems, exhibits an attractive natural linewidth of a few MHz and is well-adapted for combining high-integration and metrological performance. This ultra-stable microcell optical source will target a state-of-the-art sub- 10^{-13} frequency stability at 1 s and will find for sure a wide range of applications. In addition, this near-UV source might be later the basis of an original active optical clock, with unprecedented performances, based on the quantum regime of superradiance [6].

[1] J. Kitching, *Appl. Phys. Rev.* **5**, 031302 (2018).

[2] Z. L. Newman et al., *Opt. Lett.* **46**, 4702 (2021).

[3] A. Strangfeld et al., *Opt. Exp.* **30**, 7, 12039 (2022).

[4] A. Gusching et al., *Opt. Lett.* **48**, 6, 1626 (2023).

[5] P. Chang et al., *Phys. Rev. Appl.* **18**, 024034 (2022).

[6] R. H. Dicke, *Phys. Rev.* **93**, 99-110 (1954).

Working plan :

The PhD thesis work will follow several steps, including:

- 1 : Bibliography
- 2 : Development of a near-UV laser system with Cs vapor microfabricated cell
- 3 : Spectroscopy of the Cs atom $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$ transition at 459 nm
- 4 : Implementation of a reference 459 nm signal from a cavity-stabilized laser
- 5 : Short-term frequency stability
- 6 : Mid-term frequency stability : Frequency shifts, contributions, and budget.
- 7 : PhD manuscript writing

The foreseen planning is reported below:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Etape 1: Bibliographie																																				
Etape 2 : Implémentation setup																																				
Etape 3: Spectroscopie court-terme																																				
Etape 4: Référence à 895 nm																																				
Etape 5: Métrologie court-terme																																				
Etape 6: Budget moyen-terme																																				
Etape 7: Rédaction manuscrit																																				
Technologie microcellule																																				

Step 1: Bibliography [M0-M2]

The candidate will lead a detailed bibliography study in order to position its PhD thesis subject. He/she will identify the main spectroscopic approaches explored in the literature for the development of microcell optical frequency references. This activity will be sustained all along the PhD thesis.

Step 2: Development of a near-UV laser system with microfabricated cell [M1-M12]

The candidate will implement on a compact optical breadboard the microcell-stabilized near-UV laser system. The simplified architecture of the latter is shown in Figure 1. A dedicated instrumentation will be installed for piloting and control of the experiment.

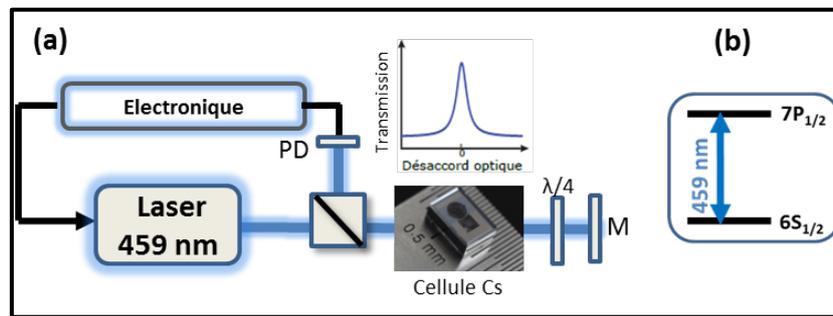


Figure 1: Cs microcell optical frequency reference (a) Principle. (b) Involved atomic energy levels.

A narrow-linewidth diode laser tuned at 459 nm will be used. Optical isolation stage(s) and laser power servo (not shown on figure 1) will be implemented to evaluate their criticality. The laser beam is transmitted in a Cs microcell and reflected back at the output by a mirror, coupled with a quarter-wave plate, such that two counter-propagating orthogonally polarized beams are created. The cell is temperature controlled at $> 60^\circ\text{C}$ and covered by a magnetic shield. The lecture of the reflected probe beam leads to the photodetection of the sub-Doppler atomic resonance signal. A lock-in amplifier system will then be used to generate a zero-crossing error signal required for disciplining the laser frequency onto the atomic resonance.

Step 3: Spectroscopy of the Cs atom $^6\text{S}_{1/2} - ^7\text{P}_{1/2}$ transition at 459 nm [M4-M16]

Once the atomic resonance detected in the microcell, a detailed spectroscopic study, including experiments and modelling, will be led in order to optimize the resonance features. The candidate will study the impact of the cell temperature, the laser power, the magnetic field, the optical alignment onto the resonance shape and characteristics. The objective of this study will be to find the experimental parameters values that optimize the signal/linewidth ratio of the atomic resonance, for optimization of the clock short-term stability. A short-term noise budget will be established.

Step 4: Implementation of a reference 459 nm signal with cavity-stabilized laser [M4-M18]

Target stability performances of the microcell clock are below 10^{-13} at 1 s. Measuring such tiny fluctuations at this wavelength requires the availability of optical reference more stable than the microcell-stabilized clock.

For this purpose, the candidate will contribute, with the support of the OSC-IMP platform, to the generation and extraction of an ultra-stable reference optical signal at 459 nm. The latter will be obtained from a Fabry-Perot cavity-stabilized laser at 1542 nm, available at FEMTO-ST, ensuring a stability of 2×10^{-15} at 1 s [7], associated to an optical frequency synthesis chain implying a fiber-based

optical frequency comb, non-linear optical components (frequency doublers, non-linear fiber, etc.) and an optical fiber link. At the output of the optical link, the extracted 459 nm tooth-line will be compared to the microcell clock signal. The output beat-note frequency will be analyzed with a frequency counter or phase noise analyzer. Note that the characterization of the microcell clock might be also obtained by mounting two quasi-identical systems.

Step 5: Short-term stability of the microcell optical clock [M9-M22]

To this step will start the frequency metrology study of the microcell optical clock at 459 nm. Inspired from results obtained in step 2, the clock short-term stability will be measured and optimized. It will be checked that the latter is in good agreement with the short-term noise budget. Performances below 10^{-13} at 1 s are targeted.

Step 6: Mid-term stability: frequency shifts, contributions and budget [M15-M34]

For integration times higher than 100 s, frequency instabilities are induced through the sensitivity of the clock frequency to environmental parameters. This step 6 will aim to quantify major sensitivities of the clock frequency to key experimental parameters (cell temperature, laser power, magnetic field, optical alignments, etc.). The typical fluctuations of these parameters will be also measured such that a mid-term stability budget can be established. Solutions will then be proposed to reduce major contributions.

Step 7: PhD thesis writing [M28-M36]

The candidate will start the writing of the PhD manuscript 8 months before the defense.

Note: Microcell technology

All along the PhD thesis, the candidate will contribute to the characterization of an improved microcell technology, with improved purity for resolving the natural linewidth of the probed transition. This microcell will be ideally functionalized to optimize its optical addressing and transmission. These studies will be performed in close collaboration with the MOSAIC team from MN2S department at FEMTO-ST (contact: N. Passilly).

[7] A. Didier et al., Appl. Opt. 54, 3682–3685 (2015).

Références bibliographiques / Bibliography

1. C. Carlé, M. Abdel Hafiz, S. Keshavarzi, R. Vicarini, N. Passilly, and R. Boudot, A pulsed-CPT Cs-Ne microcell atomic clock with frequency stability below 2×10^{-12} at 10^5 s, Optics Express 31, 5, 8160-8169 (2023). <https://doi.org/10.1364/OE.483039>
2. A. Gusching, J. Millo, I. Ryger, R. Vicarini, M. Abdel Hafiz, N. Passilly, and R. Boudot, Cs microcell optical reference with frequency stability in the low 10^{-13} range at 1 s, Optics Letters 48, 6, 1526-1529 (2023). <https://doi.org/10.1364/OL.485548>
3. V. Maurice, C. Carlé, S. Keshavarzi, R. Chutani, S. Queste, L. Gauthier-Manuel, JM. Cote, R. Vicarini, M. Abdel Hafiz, R. Boudot and N. Passilly, Wafer-level vapor cells filled with laser-actuated hermetic seals for integrated atomic devices, Nature Microsystems and Nanoengineering 8, 129 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00468-x>
4. R. Boudot, J. P. McGilligan, K. R. Moore, V. Maurice, G. D. Martinez, A. Hansen, E. de Clercq and J. Kitching, Enhanced observation time of magneto-optical traps using micro-machined non-evaporable getter pumps, Scientific Reports 10, 16590 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73605-z>
5. M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq and R. Boudot, Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser, Optics Letters 41, 13, 2982-2985 (2016). <http://dx.doi.org/10.1364/OL.41.002982>

Profil demandé / Applicant profile

Nous recherchons un(e) candidat(e) avec une formation en physique appliquée, en physique atomique et/ou quantique, ou optique. Le/la candidat(e) doit apprécier la physique expérimentale vouloir travailler sur un sujet à fort caractère interdisciplinaire, et être attiré(e) par les mesures de haute précision. Le/la candidat(e) a une formation et des connaissances marquées en optique, électronique, et instrumentation pour le pilotage d'expériences (Python idéalement). Des connaissances avec la conception mécanique est une plus-value. De l'expérience, par le biais de TPs par exemple, avec les techniques de micro-fabrication en salle blanche est aussi bénéfique. Le/la candidat(e) doit apprécier le travail en équipe, doit faire preuve d'autonomie et d'initiative pour son travail propre, être organisé(e), contribuer à la rédaction de documents et maîtriser correctement l'anglais.

We're looking for candidates with some background in applied physics, atomic/quantum physics and optics. The candidate should enjoy experimental physics and be ready to work in a highly-interdisciplinary domain. The candidate should be attracted by high-precision measurements. The candidate should have a good knowledge with optics, electronics and instrumentation for experiment control (ideally Python). Some knowledge with mechanics design is a plus-value. Some experience, through lab works for example, with clean-room microfabrication technologies is also a clear plus-value. The candidate should appreciate team working, should also demonstrate autonomy and initiative for his/her work, is organized. He/she will contribute to the writing of documents. English language should be ok.

Financement : Grand Besançon Métropole

Dossier à envoyer pour le **15 mai 2023**

Début du contrat : 1er Octobre 2022

Salaire mensuel brut : 1975€

Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor

Boudot Rodolphe (rodolphe.boudot@femto-st.fr)

Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s)

Boudot Rodolphe (rodolphe.boudot@femto-st.fr)

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

Application must contain the following documents:

- CV
- Cover letter
- At least 1 reference letter