

### Recherche

Thèmes d'étude et de recherche :

La définition du Mètre et sa "mise en pratique" nécessitent des recherches dans les domaines scientifiques complémentaires suivants :

Conception, développement et caractérisation de nouvelles méthodes interférométriques, d'instruments originaux, assurant la comparaison des longueurs d'onde, la mesure simultanée de vitesses et de déplacements à l'échelle des  $10^{-8}$  en valeur relative (projet balance du watt) ; conception et développement d'outils nouveaux améliorant la qualité du transfert des références. De nouveaux besoins commencent à apparaître, aussi bien dans les centres d'étalonnage que dans l'industrie : il s'agit, par exemple, de pouvoir déterminer l'indice de réfraction de l'air à mieux que  $10^{-7}$  en valeur relative ou de pouvoir effectuer des mesures de distances ou de déplacements dans l'air à mieux que  $10^{-8}$  près aussi bien pour des distances à l'échelle du mètre que sur plusieurs centaines de mètres (projet de métrologie longue distance).



Le développement d'étalons de fréquence optique, associé d'une part aux techniques spectroscopiques à haute résolution (jet atomique, piège magnéto-optique etc) et d'autre part aux techniques interférométriques, trouvent également d'intéressantes applications dans la détermination des constantes physiques fondamentales (mesure du rapport  $h/m$ , mesure de la constante de structure fine  $\alpha$ , de la constante de Planck dans le cadre du projet "Balance du watt" etc) ainsi que dans le développement de nouveaux capteurs optiques.

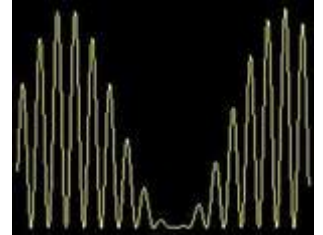
Les études et recherches en cours dans les laboratoires de l'équipe "Longueurs" de l'INM portent actuellement sur :

La **mesure de grande distance** par interférométrie à longueur d'onde synthétique

La **réfractométrie absolue** basée sur l'hélium

Le contrôle de déplacement dans le cadre du projet français de "Balance du watt". Pour en savoir plus : - [sur le site de la métrologie française](#) - [article du 11ème congrès de métrologie](#)

# Mesure de grande distance par interférométrie superhétérodyne



## 1. Motivations

L'une des priorités exprimées par les Roadmaps d'IMERA concerne la mesure absolue de distance à grande portée dans l'air, et avec une incertitude relative de  $10^{-7}$ . En effet, l'industrie, notamment automobile ou aéronautique, requiert des systèmes de mesure de distance absolue (ADM) de plus en plus précis. Il s'agit, pendant une phase de contrôle de forme ou d'assemblage de pièces, de mesurer des distances avec une incertitude de quelques dizaines de micromètres, à une portée de quelques dizaines de mètres. Cette problématique figure également dans le programme à moyen terme du LNE (§ 3.2 du PMT.) Il existe également un besoin pour la mesure absolue de plus grandes distances (jusqu'à 1000 mètres.) Il peut s'agir d'étudier la stabilité géologique d'un site ou de maintenir des satellites en formation.

En réponse à ces besoins, nous proposons de réaliser un système d'ADM par interférométrie superhétérodyne. Ce projet fait partie d'un workpackage du JRP « Long range distance measurement » proposé dans le cadre de l'EMRP. Ce JRP est coordonné par J-P. Wallerand. Ce projet sera mené en collaboration avec l'INRIM, la PTB et le BEV.

Les meilleurs instruments commerciaux permettent une mesure de distance absolue avec une incertitude relative légèrement inférieure à  $10^{-6}$ . Le Kern Mekometer ME5000 permet des mesures de 20 à 8000 m. Le Laser Tracker Leica LTD 840 permet de mesurer jusqu'à 40 m avec une incertitude de quelques dizaines de micromètres.

Globalement, il existe deux manières de mesurer de grandes distances :

Par temps de vol : le temps de vol d'impulsions laser ou d'une onde continue modulée est converti en information de distance. Cette technique permet des mesures à courte comme à très longue portée, mais la résolution de la mesure est limitée par la bande passante des instruments de détection. En pratique, cette résolution est une fraction de millimètre.

Par interférométrie : la distance à mesurer est décomposée en  $X$  fois (où  $X$  est un nombre a priori non entier) une longueur d'onde optique. Cette technique est excellente pour mesurer des déplacements incrémentaux avec une résolution nanométrique. En revanche, elle n'est pas adaptée à la mesure de distance absolue, si la distance à mesurer est supérieure à la longueur d'onde optique. Dans ce cas, la partie fractionnaire de  $X$  peut être mesurée mais la partie entière de  $X$  est inconnue. En outre, l'extrême résolution de la méthode possède un inconvénient : dans le cas de mesure dans un environnement non contrôlé, les vibrations ou fluctuations de pression de l'air peuvent facilement rendre la technique inutilisable. L'interférométrie à longueur d'onde synthétique permet de résoudre ces deux problèmes. Une longueur d'onde synthétique est un battement de fréquence spatiale, obtenu en injectant un interféromètre avec deux longueurs d'onde différentes. Cette longueur d'onde synthétique est inversement proportionnelle à la différence entre les deux longueurs d'onde injectées. Elle peut donc varier de l'infini à des valeurs micrométriques. On peut donc adapter la longueur d'onde synthétique à la distance à mesurer et ainsi lever l'indétermination sur la partie entière de  $X$ . La partie fractionnaire de  $X$  est obtenue en mesurant la

phase synthétique. En outre, plus la longueur d'onde est grande, plus la sensibilité de la mesure aux fluctuations de pression de l'air et aux vibrations est faible. Des techniques, actuellement à l'étude, de mesure de distance absolue utilisant un laser femtoseconde injectant un interféromètre, peuvent être interprétées comme de l'interférométrie à longueur d'onde synthétique.

Dans tous les cas, temps de vol ou interférométrie, l'indice de l'air modifie le résultat de la mesure de distance, et une correction doit être apportée. Il est donc nécessaire de mesurer ou d'évaluer l'indice de l'air pendant la mesure.

## 2. Caractéristiques principales

Notre projet est de réaliser un système de mesure de distance absolue par interférométrie à longueur d'onde synthétique.

Sources laser :

Il y a deux manières d'obtenir la longueur d'onde synthétique : - Avec une source unique dont une partie du faisceau est décalée en fréquence par un modulateur acousto-optique, puis recombinaison. Cette technique, plus compacte, est limitée par la bande passante du modulateur et ne permet pas de varier beaucoup la valeur de la longueur d'onde synthétique. - Avec deux sources : mise en oeuvre avec deux lasers He:Ne, la technique a donné de bons résultats sur une mesure de distance de 240 m en environnement contrôlé [1].

Nous proposons d'utiliser non pas des lasers He:Ne, mais des lasers Nd:YAG doublés en fréquence, émettant à 532 nm. Ces lasers sont très stables en fréquence et balayables sur plusieurs dizaines de gigahertz, autorisant ainsi une très grande plage de variation de la longueur d'onde synthétique. En faisant varier la longueur d'onde synthétique, nous pourrions lever l'indétermination sur le nombre entier de franges synthétiques. En revanche, comme la phase de la longueur d'onde synthétique dépend de manière critique de la relation de phase entre les sources, il sera nécessaire d'imposer cette relation au moyen d'une boucle à verrouillage de phase.

Superhétérodynage

La mesure de la phase synthétique présente une ambiguïté de  $\pi$ . En interférométrie homodyne, il est aisé de lever cette ambiguïté en jouant sur la polarisation des ondes. En interférométrie à longueur d'onde synthétique, une technique plus complexe - dite superhétérodyne - doit être utilisée. Elle suppose notamment, pour chacune des deux ondes, le décalage en fréquence de l'une des composantes de polarisation, et une détection différentielle. En pratique, la mise en oeuvre de la méthode implique, outre de nombreux éléments optiques polarisants (polariseurs, cubes séparateurs de polarisation, lames de phase), deux modulateurs acousto-optiques et un phasemètre de haute résolution.

### Détection de phase superhétérodyne

Indice de l'air

Notre projet n'inclut pas de mesure d'indice de l'air. Lors du développement et des tests à l'INRIM, les paramètres de pression, de température et de composition de l'air ambiant seront mesurés afin de calculer l'indice de l'air et ainsi de corriger la mesure de distance. En revanche, d'autres techniques encore à l'étude, comme la mesure d'indice par spectroscopie sur le trajet de l'interféromètre, pourront être intégrées ensuite.

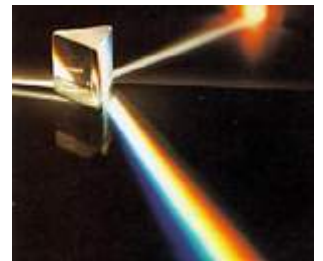
## 3. Objectifs

Notre projet est de réaliser un système de mesure de distance absolue permettant une mesure, en environnement contrôlé, d'une centaine de mètres avec une incertitude relative de  $10^{-7}$ . Ce système sera comparé avec un système de la PTB, d'abord en intérieur à l'INRIM, puis en extérieur au BEV (Autriche).

## 4. Références

[1] : Yokoyama, Meas. Sci. Technol. 10 (1999)

# Réfractométrie absolue basée sur l'hélium



## 1. Motivations

Selon les Roadmaps pour la métrologie dimensionnelle d'iMERA, l'un des grands défis à relever pendant la prochaine décennie est la mesure de grande distance dans l'air. Une incertitude relative de  $10^{-7}$  est requise d'ici 2010-2015, et de  $10^{-8}$  (10 micromètres sur 1 kilomètre) à l'horizon 2020. Or, l'exactitude des mesures de distance dans l'air est actuellement limitée à  $10^{-6}$  principalement du fait de la réfraction de l'air. Sur de petites distances et dans un environnement contrôlé, il est possible de mesurer ou de calculer un indice de réfraction local. En revanche, sur de grandes distances et en extérieur, l'indice peut varier énormément (gradients de température, courants d'air ...) et quelques mesures discrètes ne suffisent plus. Plusieurs techniques sont à l'étude pour évaluer, sur toute la distance mesurée, un indice de réfraction « effectif. » Ces techniques (par spectroscopie, par interférométrie à plusieurs longueurs d'onde ...) devront atteindre une exactitude de  $10^{-7}$  puis  $10^{-8}$ . Afin de les valider, il sera nécessaire de pouvoir comparer leurs performances avec un réfractomètre absolu d'exactitude au moins équivalente. C'est ce réfractomètre absolu qui fait l'objet de ce projet. Nous proposons ici un nouveau type de réfractomètre absolu, permettant de mesurer localement l'indice de réfraction de l'air avec une incertitude inférieure à  $10^{-8}$ .

## 2. Etat de l'art

Les formules semi-empiriques d'Edlén [1], sont communément utilisées pour calculer un indice de réfraction local en fonction de la température, pression, de la composition de l'air (humidité, dioxyde de carbone...) et pour une longueur d'onde donnée. La communauté internationale attribue généralement une exactitude de  $3 \times 10^{-8}$  à l'indice calculé au moyen de ces formules. L'indice de l'air est mesuré au moyen d'un réfractomètre [2]. L'incertitude sur la mesure d'indice est de l'ordre de quelques  $10^{-8}$ . Ces réfractomètres sont basés sur des mesures de la fréquence d'un laser stabilisé au sommet d'un pic d'Airy d'un résonateur optique. Quand le résonateur, d'abord vidé de toute matière (indice de référence égal à 1), est rempli d'air, l'indice vu par l'onde laser dans le résonateur change et la fréquence du laser varie. De cette

dernière variation, on déduit l'indice de réfraction de l'air emplissant le résonateur. Néanmoins, le passage du vide à une pression donnée entraîne une déformation mécanique du résonateur, ce qui fausse la mesure d'indice. Traditionnellement, on modélise le résonateur afin de prévoir sa déformation et corriger ainsi la mesure d'indice. Mais l'incertitude sur la correction à apporter est grande compte-tenu, d'une part de l'incertitude sur les propriétés mécaniques du matériau du résonateur (module d'Young, coefficient de Poisson), et d'autre part de l'imperfection de la modélisation géométrique. Récemment, des travaux effectués au NIST [3] ont montré que certaines déformations du résonateur n'étaient pas prévues par la modélisation. A moins de mesurer précisément, et non plus de calculer imparfaitement la déformation, il paraît difficile d'abaisser l'incertitude sur la mesure d'indice par ces réfractomètres en dessous de  $10^{-8}$ .

### 3. Caractéristiques principales

Le principe de mesure de la distorsion du résonateur a été démontré et mis en pratique par l'équipe de Jack Stone du NIST [4]. Il s'agit de mesurer avec le réfractomètre l'indice d'un gaz, dont on peut par ailleurs calculer l'indice. La différence entre les indices mesurés et calculés permet alors de remonter à la déformation du résonateur. Or, différents travaux récents sur l'hélium [5] permettent maintenant de calculer ab initio son indice de réfraction pour une longueur d'onde, une température et une pression donnée avec une exactitude de  $9 \times 10^{-11}$ . Le tableau 1 donne un budget d'incertitude pour ce calcul.

AR	BR	NA	kB	B	p	T
$6.2 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-11}$	$5.5 \times 10^{-12}$	$5.8 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-11}$	$3.2 \times 10^{-10} p$	$1.1 \times 10^{-7} T$

Tableau 1 : Bilan d'incertitudes pour le calcul de l'indice de l'hélium

Où AR et BR sont la polarisabilité molaire et le second coefficient du viriel en réfractivité. NA et kB les constantes d'Avogadro et de Boltzmann. B le premier coefficient du viriel en compressibilité. p et T la pression et la température.

Il apparaît que la sensibilité en pression de l'indice de l'hélium est environ 8 fois plus faible que celle de l'indice de l'air. Pour une incertitude de mesure de pression assez confortable de 10 Pa, l'indice de l'hélium peut être calculé avec une incertitude de  $3.2 \times 10^{-9}$ , soit une incertitude comparable à celle sur l'indice de l'hélium mesuré par le réfractomètre en dehors de la déformation mécanique. On pourra donc, pour différentes pressions, comparer les indices d'hélium calculé et mesuré afin de caractériser la déformation du résonateur.

Une fois cette déformation connue, on peut mesurer l'indice de l'air comme suit :

Le résonateur étant sous vide, on asservit la fréquence du laser sonde sur le pic  $k_{vide}$  du résonateur. On mesure la fréquence vide du laser sonde par battement de fréquence avec le laser de référence stabilisé sur une raie hyperfine de l'iode.

On désasservit le laser sonde et l'on remplit d'air le résonateur.

On asservit la fréquence du laser sonde sur le pic  $k_{air}$  le plus proche du résonateur et l'on mesure sa fréquence air.

Au moyen de capteurs de pression, de température et d'humidité, on calcule grossièrement l'indice de l'air contenu dans le résonateur. Cette estimation de l'indice permet de déduire sans ambiguïté l'écart entre les deux pics :

$$k_{air} - k_{vide} = k.$$

Compte-tenu de ces données, et connaissant L (intervalle spectral libre du résonateur sous vide) et (terme de déformation que l'on a mesuré au moyen de l'hélium), on peut calculer l'indice de l'air n.

La principale source d'incertitude sur la mesure de l'indice de l'air provient de p qui est l'incertitude sur la mesure de pression d'hélium lors de la phase de mesure de déformation. Il existe d'autres sources d'incertitude, récapitulées ci-dessous :

Mesure de la pression de l'hélium	Contrôle de température	Mesure de l'intervalle spectral libre	Pureté de l'hélium	Constantes physiques et calculées
-----------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	--------------------	-----------------------------------

3.2x10 <sup>-10</sup> p	1.1x10 <sup>-7</sup> T	< 10 <sup>-12</sup> (L)	< 10 <sup>-10</sup>	8x10 <sup>-11</sup>
-------------------------	------------------------	-------------------------	---------------------	---------------------

Tableau 2 : Bilan d'incertitudes pour le calcul de l'indice de l'air

On voit que pour une incertitude p de l'ordre de 10 Pa, et à une température contrôlée à  $\pm 10$  mK, on pourra donc mesurer l'indice de l'air avec une incertitude inférieure à 10<sup>-8</sup>. Il apparaît également que la connaissance de l'intervalle spectral libre du résonateur peut être un facteur limitant : une incertitude de 10 kHz sur un intervalle de 1 GHz conduit à une incertitude de 10<sup>-8</sup> sur l'indice de l'air. Jusqu'ici, des mesures précises étaient effectuées et répétées tout au long de la vie de l'interféromètre, pour tenir compte du vieillissement de la cale. Néanmoins, on peut imaginer s'affranchir de la connaissance de l'intervalle spectral libre en mesurant les fréquences à l'aide d'un peigne femtoseconde.

#### 4. Description du projet

Nos objectifs sont de construire un réfractomètre absolu permettant la mesure de l'indice de l'air avec une incertitude inférieure à 10<sup>-8</sup>. La réalisation du projet se déroulera comme suit :

Installation des sources lasers et des systèmes d'asservissement. Un laser Nd:YAG doublé en fréquence, émettant à 532 nm et asservi sur l'iode nous servira de référence. Nous possédons déjà ce laser. Nous possédons déjà le laser sonde, mais il n'est pas doublé en fréquence. Il faudra le doubler au moyen d'un cristal non-linéaire en simple passage, en guide d'onde et fibré. Un système de stabilisation de sa fréquence (par modulation / démodulation) sur un résonateur sera mis en place.

Modification des miroirs du résonateur. Nous possédons un résonateur en Zérodur, mais ses miroirs ne sont pas adaptés à 532 nm. Il faudra les remplacer par des miroirs adéquats.

Enceinte stabilisée en température. Nous prévoyons de recycler une enceinte à vide utilisée sur un ancien projet. L'enceinte devra permettre d'injecter de l'air ou de l'hélium dans le résonateur, et être stabilisée en température à  $\pm 10$  mK. La pression et l'humidité du gaz dans l'enceinte pourront être mesurés (station météo pour l'air, capteur de pression dédié pour l'hélium).

Mesure de l'intervalle spectral libre à vide du résonateur Une fois le résonateur placé dans l'enceinte et stabilisé en température, il faudra mesurer précisément son intervalle spectral libre à vide, en utilisant les deux sources lasers. Cette mesure sera répétée tout au long du projet afin d'étudier le vieillissement de la cale du résonateur. Essai de mesures de fréquence du laser par battement avec le peigne femtoseconde de l'équipe plutôt qu'avec le laser de référence. Bien que plus lourde, cette méthode permettra de s'affranchir de la connaissance de l'intervalle spectral libre du résonateur et de valider les mesures d'indice par une méthode différente.

Mesure de l'indice de l'hélium et étalonnage de la déformation du résonateur Pour différentes pressions d'hélium, une mesure différentielle permettra de caractériser la variation relative de longueur de la cavité.

Validation des résultats Mesure de l'indice de l'air avec correction de la déformation mécanique. Comparaison avec les formules d'Eidlén. Comparaison avec les réfractomètres développés au MIKES.

#### 5. Collaborations

Une collaboration avec le MIKES (Finlande) et le PTB est déjà défini afin de comparer notre réfractomètre avec leur système de mesure d'indice par les formules d'Eidlén sur de grande distance. La comparaison s'effectuera dans le laboratoire du MIKES qui dispose d'une salle particulièrement bien adaptée. Notre réfractomètre permettra de valider leurs techniques de mesure spectroscopique de l'indice de l'air, sur une distance 30 m. Une comparaison avec les réfractomètres du NIST est envisagée.

#### 6. Références

[1] : P. Ciddor, « Refractive index of air; new equations for the visible and near infrared », App Opt 35, 9 (1996) [2] : N. Khélifa, H. Fang, H. Xu, P. Juncar, M. Himbert, « Refractometer for tracking changes in the refractive index of air near

780 nm », App Opt 37, 1 (1998) [3] : J. Stone, « Wavelength tracking capabilities of a Fabry-Perot cavity », Recent development in traceable measurements II, Proc SPIE pp 327-338 (2003) [4] : J. Stone, « Using helium as a standard of refractive index: correcting errors in a gas refractometer », Metrologia 41 (2004) [5] : G. Lach, « Radiative corrections to the polarizability of helium », Phys Rev Lett 92, 23 (2004)

## Autres recherches

- Rayonnements optiques - Masses et grandeurs associées - Thermométrie

<http://inm.cnam.fr/recherche-84174.kjsp?RH=inm.long>