

À LA RECHERCHE D'UNE PRÉCISION EXTRÊME : LES PEIGNES DE FRÉQUENCES

ALEXANDRE PARRIAUX

Dans toute expérience de physique, une mesure ne s'éloigne jamais de sa compagne l'incertitude. Certaines études ont besoin d'une précision telle que l'amélioration de ce couple est une quête sans fin pour le scientifique. Il existe donc une nécessité de créer des instruments qui permettent d'avoir accès à l'exactitude et à la précision requise. Dans le cas de la métrologie des fréquences, un objet très particulier nommé *peigne de fréquences* en est un excellent candidat. Cet article a pour but d'introduire les peignes et de présenter quelques applications actuelles et possibles associées à leurs utilisations.

1. INTRODUCTION

Que se soit en spectroscopie, en interférométrie ou bien tout simplement en optique, il est souvent nécessaire de mesurer une longueur d'onde. Cependant, si on commence à s'intéresser à certains phénomènes qui requièrent une précision élevée dans la mesure, des erreurs purement physiques se manifestent : on note par exemple des erreurs géométriques du front d'onde, ce qui ne permet pas d'atteindre une précision très élevée. Un moyen simple permettant de contourner ce problème est de mesurer des fréquences ν à la place des longueurs d'onde λ . On peut passer de l'une à l'autre avec la formule connue de tous :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Ce contournement permet de réduire le bruit interne aux mesures et d'obtenir une précision accrue (car on mesure alors un phénomène qui se répète).

Cette méthode est possible jusqu'à une certaine limite. En effet, si l'on souhaite mesurer des fréquences optiques (dont l'ordre de grandeur est d'environ 10^{14} Hz), l'électronique dont est constituée les instruments n'est plus assez rapide. Le nombre d'oscillations qu'une onde optique effectue en un temps donné est bien supérieur au nombre d'oscillations que peuvent effectuer les électrons dans ce même temps. Dans ce cas, l'électronique est ainsi dépassée, ce qui ne permet pas de mesurer la fréquence optique. Dans les années 1980, pour résoudre ce problème, il fut créé des *chaînes de multiplications de fréquences harmoniques*. Ces instruments remplissaient plutôt bien leur rôle mais ils étaient très complexes, coûteux et énormes de part leur taille (environ un étage de bâtiment pour les plus petits). Pour couronner le tout, un tel instrument ne pouvait

mesurer qu'une seule et unique fréquence. Cette solution n'était donc pas viable.

Une nouvelle idée survint à la fin des années 1980. Au lieu de mesurer des fréquences en elles-mêmes, pourquoi ne pas plutôt mesurer des différences de fréquences qui sont bien plus accessibles ? C'est grâce à cette idée que naquit les *diviseurs de fréquences*. Cependant, quelques années plus tard, une nouvelle technologie vient chambouler le domaine de la métrologie des fréquences : les *lasers femtoseconde*. Avec ce nouveau type de laser et une technique bien particulière, on arrive à surpasser les précédentes mesures de fréquences de 3 ordres de grandeur ! Cette technique est dénommée *peigne de fréquences* et valut un prix Nobel à T. W. HÄNSCH et J. L. HALL en 2005 « pour leurs contributions au développement de la spectroscopie de précision basée sur les lasers, incluant la technique des peignes de fréquences optiques ».

Dans cet article, nous présenterons tout d'abord les concepts associés aux peignes de fréquences. Nous verrons par la suite une technique de spectroscopie bien particulière, basée sur les peignes, et quelques résultats expérimentaux que l'on peut en tirer afin de constater sa précision. Enfin, nous montrerons quelques applications, aussi bien dans la recherche en physique que dans des domaines plus quotidiens.

2. VOUS AVEZ DIT « DES PEIGNES » ?

2.1. Concepts physiques

Bien que les peignes de fréquences soient relativement récents, ils sont basés sur des principes physiques issus du XIX^{ème} siècle. Jusqu'à ce jour, uniquement la technologie faisait défaut et ce gap a été comblé avec l'arrivée

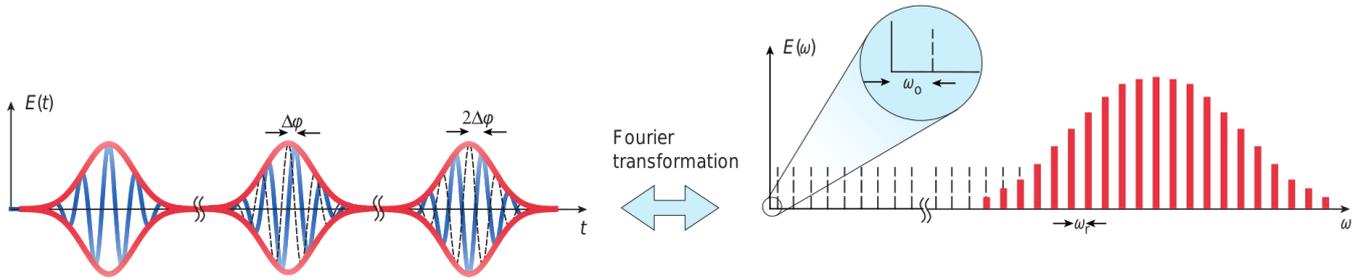


Fig. 1 À gauche, représentation d'une série de pulses émise par un laser femtoseconde dans le domaine temporel. On observe le décalage de phase du signal entre chaque pulse : le premier pulse est décalé de $\Delta\varphi$, le deuxième pulse de $2\Delta\varphi$, etc. À droite, représentation de la TF du signal dans le domaine fréquentiel. On observe à l'origine un décalage de fréquence ω_0 provenant du décalage de phase du signal temporel. Ce schéma est issu de l'article [1].

des lasers femtoseconde. Ces derniers peuvent émettre des impulsions très courtes, aussi appelées des pulses par emprunt à l'anglais. Bien que diverses formes existent, nous supposons par la suite que ces pulses sont de formes gaussiennes (pour simplifier le raisonnement). On peut caractériser ces pulses par leur largeur temporelle qui, dans notre cas, est de l'ordre de la dizaine de femtoseconde. Par transformée de Fourier (TF), on en déduit que le spectre en fréquence du signal est très riche. En effet, on a la relation d'incertitude temps-fréquence suivante :

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2} \quad (2)$$

Cette relation nous dit clairement que plus la largeur à mi-hauteur Δt d'un pulse est courte, plus la largeur à mi-hauteur $\Delta \omega$ de son spectre est élevée. Notre signal est donc très étalé sur le domaine fréquentiel.

En réalité, les pulses envoyés par le laser sont sous la forme d'une porteuse modulée par une enveloppe (dans notre cas, la gaussienne supposée). De plus, les lasers femtoseconde possèdent la caractéristique d'émettre des pulses à une cadence fixe τ . En prenant la TF du signal complet, qui revient ici à un développement en série de Fourier, on en déduit que le spectre en fréquence sera composé d'harmoniques de la fréquence de répétition $\omega_r = \tau^{-1}$. Les pulses ayant une enveloppe gaussienne, alors par TF, l'enveloppe fréquentielle sera aussi une gaussienne. Au final, le spectre peut se visualiser sous la forme d'un ensemble de diracs espacés d'une fréquence ω_r , le tout enveloppé par une gaussienne. Ceci est illustré avec la Figure 1. Comme on peut le voir, le spectre forme des « dents » régulièrement espacées tel un peigne, d'où le nom de *peigne de fréquences*.

Toutefois, il ne suffit pas d'avoir un signal périodique pour obtenir un peigne. Il se peut que les pulses soient tous différents au niveau de leur phase si l'enveloppe n'enveloppe pas toujours la même partie de la porteuse. On distingue alors deux cas possibles :

- L'enveloppe se décale d'une phase constante impulsion après impulsion (comme sur la Figure 1 de gauche). Dans ce cas, il y aura une différence entre la vitesse de groupe et la vitesse de phase de l'onde. Le peigne de fréquences sera alors décalé à l'origine d'une fréquence ω_0 . Ce décalage peut être modifié en jouant sur les caractéristiques du laser telles que

la pompe ou la longueur de la cavité. ω_0 peut même être annulée dans le cas où l'enveloppe ne se décale pas.

- L'enveloppe se décale d'une phase aléatoire impulsion après impulsion. Dans ce cas, il n'y a plus de structure dans le peigne. Cette possibilité est donc à éviter et pour cela, on emploie en général une technique de blocage de mode du laser qui consiste à verrouiller la phase. On se retrouve alors dans le cas précédent.

Ces seules caractéristiques des lasers femtoseconde font que les fréquences du peigne sont facilement identifiables. Comme nous l'avons dit, les fréquences sont des harmoniques de ω_r , donc une fréquence ω du peigne peut être déterminée avec un nombre entier n de fois ω_r , à la fréquence de décalage à l'origine près. On peut résumer ceci avec l'équation suivante :

$$\omega = \omega_n = n\omega_r + \omega_0. \quad (3)$$

Toutes les fréquences du peigne sont donc connues si l'on dispose de ω_r et de ω_0 . Ceci va nous permettre d'utiliser notre peigne comme une véritable règle pour mesurer des fréquences.

2.2. Mesure d'une fréquence

Maintenant que nous avons créé notre peigne, voyons comment l'utiliser pour mesurer une fréquence ω_m appartenant au domaine optique. On peut avoir une détermination grossière de ω_m en mesurant sa longueur d'onde. Ceci nous permet de prévoir un peigne dont le spectre sera aux alentours de cette fréquence. Avec cette même mesure de ω_m , on peut facilement déterminer quel est le numéro p de la dent du peigne la plus proche de ω_m . Cette configuration est illustrée à la Figure 2.

Les fréquences ω_m et ω_p étant très proches, des phénomènes d'interférences interviennent naturellement ce qui va créer un battement entre ces deux fréquences. La fréquence de battement ω_b vaut :

$$\omega_b = \omega_m - \omega_p. \quad (4)$$

Il ne reste plus qu'à mesurer cette fréquence de battement ω_b , puis ω_r et ω_0 . Une fois fait, le travail est fini. En effet, en utilisant (3) et (4), on a :

$$\omega_m = \omega_b + \omega_p = \omega_b + p\omega_r + \omega_0. \quad (5)$$

On croirait s'être compliqué la tâche puisque pour obtenir ω_m , il faut mesurer les trois fréquences ω_b , ω_r et ω_0 . Ce n'est qu'une impression car ces fréquences sont incluses dans un domaine d'ordre de grandeur très inférieur à la fréquence optique ω_m . En général, elles appartiennent au domaine des radio-fréquences qui est un domaine très accessible avec de l'électronique. On arrive donc à mesurer une fréquence optique avec uniquement des mesures de radio-fréquences. Ces mesures peuvent d'autant plus être précises si l'on se réfère à la définition de notre unité de temps, c'est à dire de par l'emploi d'une horloge au césium. De cette manière, on aura des mesures absolues.

On peut se poser la question de savoir comment mesurer ω_r et ω_0 . La première est relativement accessible : avec une photodiode rapide sur laquelle on envoie le signal laser, on peut aisément trouver le taux de répétition et donc en déduire ω_r . La fréquence ω_0 est un peu plus compliquée à obtenir. Pour cela, on a recours à la génération de seconde harmonique dans un cristal. Une telle technique consiste à émettre un peigne de fréquences ω_p dans un cristal non-linéaire. En sortie, on aura un signal de fréquences ω_p et $2\omega_p$ par génération de seconde harmonique. Or :

$$2\omega_p = 2p\omega_r + 2\omega_0 = \omega_{2p} + \omega_0, \quad (6)$$

si certaines fréquences du peigne que l'on envoie sont aussi émises avec leurs doubles (on dit alors que le peigne s'étend sur plus d'une octave), on aura ainsi des interférences entre les fréquences $2\omega_p$ et ω_{2p} des peignes issus du laser et de la réponse non-linéaire du cristal. La fréquence de battement est de $2\omega_p - \omega_{2p}$ ce qui vaut ω_0 d'après (6). En mesurant le battement, on mesure donc ω_0 .

Après avoir mesuré ω_r et ω_0 , il ne reste « plus qu'à » travailler sur la fréquence de battement ω_b pour obtenir une mesure précise de ω_m qui, on le rappelle, n'est pas mesurable avec des instruments électroniques. Cette méthode est une méthode générale utilisant les peignes de fréquences, mais ils peuvent être utilisés d'une manière tout à fait différente. Mesurer une fréquence telle que ω_m peut se voir comme une mesure sur une raie donnée d'un spectre d'émission. On pourrait se poser la question de savoir s'il est possible d'adapter cette technique aux spectres d'absorption. C'est ce que nous allons voir par la suite.

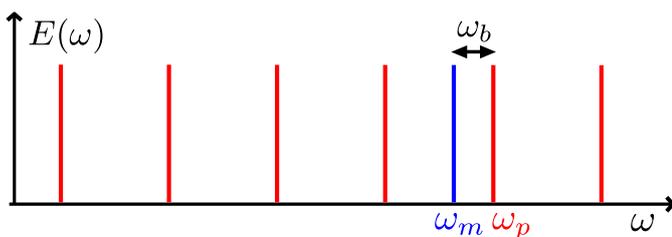


Fig. 2 Représentation de la superposition d'un peigne de fréquences (en rouge) aux alentours de la fréquence ω_m à mesurer (en bleu). La dent la plus proche de ω_m est de fréquence ω_p et la différence de ces deux fréquences nous donne la fréquence de battement ω_b .

3. SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION À DEUX PEIGNES DE FRÉQUENCES

Comme nous l'avons vu, les peignes de fréquences permettent de mesurer des fréquences dans le domaine optique. Ces mesures sont légion en spectroscopie, que ce soit pour connaître la composition d'un gaz, son absorption, etc. Il est donc intéressant de disposer d'un montage permettant de caractériser les raies d'absorption d'un spectre et ce, de manière très précise. En général, ce genre de montage possède des désavantages comme être constitué d'une partie mécanique mobile ou bien de par l'utilisation d'une source de lumière incohérente. Ces inconvénients, qui limitent la précision des mesures, peuvent être supprimés avec l'emploi des peignes de fréquences. Détaillons un exemple particulier de ce genre de montage nommé *spectromètre de Fourier à deux peignes de fréquences*. Afin de constater sa précision, nous présenterons une expérience simple de mesures de fréquences que nous avons effectué avec ce spectromètre.

3.1. Concepts du montage

Comme son nom l'indique, la particularité de notre montage est d'utiliser deux peignes de fréquences. Ici, les peignes ne sont pas créés avec un laser femtoseconde mais « construits » grâce à des modulateurs d'intensité qui vont découper un signal laser continu en impulsions. Les modulateurs sont paramétrés d'une façon telle que le deuxième peigne aura une fréquence de répétition légèrement supérieure à celle du premier. Comme les deux peignes sont issus de la même source, la cohérence entre les deux peignes est donc très élevée. Ce fait va nous être très utile puisque ce sont les peignes qui vont constituer la source de notre spectromètre. Le montage est illustré à la Figure 3.

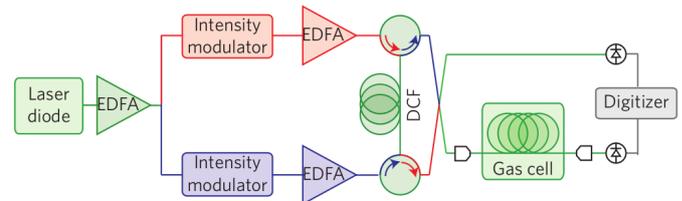


Fig. 3 Représentation du montage à deux peignes de fréquences. Les éléments EDFA représentent des amplificateurs de puissance et l'élément DCF est une fibre optique à dispersion. Ce schéma est une version légèrement modifiée de celui issu de l'article [2].

Ces deux peignes sont dirigés par des fibres optiques vers une cuve contenant un gaz que l'on souhaite analyser. Au bout d'un certain temps τ , du fait du décalage des fréquences de répétition, il y aura forcément un recouvrement complet de deux pulses provenant de chacun des peignes. Comme il y a recouvrement, il y a donc des interférences ce qui va créer un battement entre les deux peignes. Ce battement est de fréquence fixe ω_b et vaut :

$$\omega_b = \omega_2 - \omega_1 = \tau^{-1}, \quad (7)$$

où ω_i est la fréquence de répétition du peigne i . Cette valeur étant fixée, elle va nous permettre de caractériser

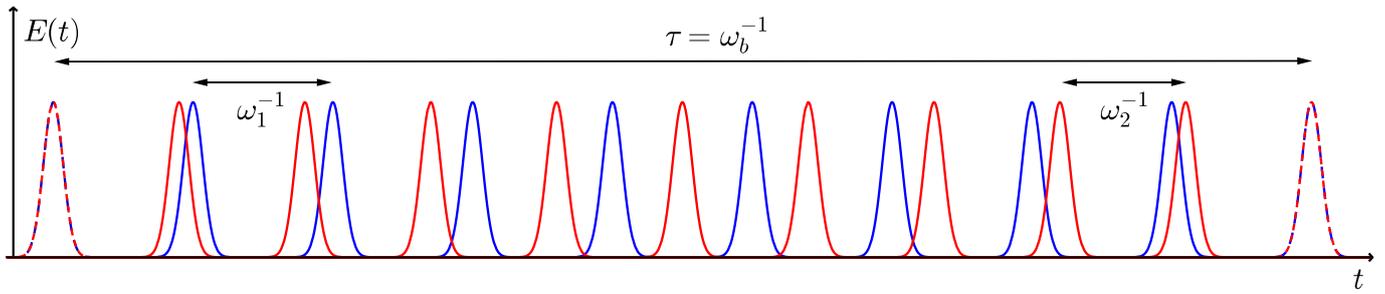


Fig. 4 Représentation de deux séries de pulses ayant une fréquence de répétition ω_1 et ω_2 . Au bout d'un certain temps τ , on observe un recouvrement de deux pulses provenant de chaque peigne. Ceci crée, en interférant, des battements ayant une fréquence de répétition ω_b . Sur ce schéma, la porteuse n'est pas représentée.

très précisément les raies d'absorption du gaz. En effet, sachant que ce sont les battements que l'on observera et donc que l'on mesurera, il y a une démultiplication par rapport aux fréquences ω_i ce qui va permettre de faire « passer » le spectre dans un domaine plus facilement exploitable et donc d'obtenir le spectre du gaz analysé plus simplement. Ce facteur de démultiplication est défini comme :

$$F_{\text{Démul}} = \frac{\omega_b}{\omega_1}. \quad (8)$$

Un choix particulier des fréquences ω_1 et ω_r permet donc une démultiplication telle que le spectre passe du domaine térahertz (domaine optique) dans le domaine mégahertz (domaine des radio-fréquences). Ceci est illustré avec la Figure 4 dans le domaine temporel et la Figure 5 dans le domaine fréquentiel. On retrouve ici, d'une façon plus développée, les concepts que nous avons vu dans la partie précédente.

Le signal en sortie de cuve récupéré, on lui applique une TF afin d'obtenir et de pouvoir analyser le spectre d'absorption du gaz. Ce spectre sera sous la forme d'un peigne de fréquences correspondant aux battements des deux peignes émis par la source initiale, comme le montre la Figure 5 du bas. Dans ce peigne, on observera les raies d'absorption caractéristiques du gaz. Un exemple que l'on peut obtenir avec cette technique est disponible en Figure 6. Le principe de la spectroscopie de Fourier à deux

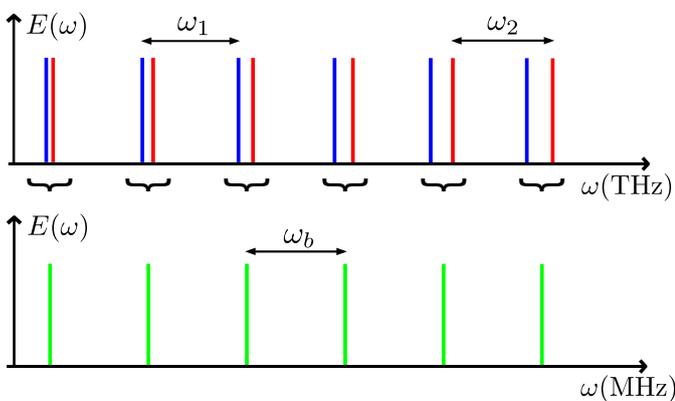


Fig. 5 Représentation des peignes de fréquences associés aux deux séries de pulses (figure du haut) et des battements de fréquence ω_b créés par interférences (figure du bas). Ce sont ces battements qui seront mesurés.

peignes de fréquences n'est donc pas très complexe et comme nous le verrons, cette technique permet d'obtenir des résultats très satisfaisants.

Toutefois, le montage en lui-même est plus compliqué qu'il n'y paraît. Celui-ci fait appel, entre autres, à des phénomènes d'optique non-linéaire, notamment lorsque les peignes se propagent dans la fibre optique à dispersion. À l'intérieur, les impulsions subissent un phénomène de *wave-breaking* qui permet d'augmenter la gamme d'analyse du spectromètre et la cohérence mutuelle entre les deux peignes. On se reportera à l'article [2] pour plus de détails sur la conception du montage.

3.2. Caractérisation de raies

Pour constater l'efficacité de notre montage, on se propose de caractériser quelques raies d'absorption et notamment leur position. Pour cela, on reprend le spectre de la Figure 6 qui a été enregistré avec $\omega_1 = 300$ MHz, $\omega_b = 100$ kHz et $\lambda_0 = 1569,00 \pm 0,01$ nm. On pourrait penser qu'une position se détermine facilement par la lecture pure et dure de l'axe des abscisses du spectre. Cependant, cela introduirait une incertitude supplémentaire dans nos mesures. Comme expliqué en introduction, on connaît de fa-

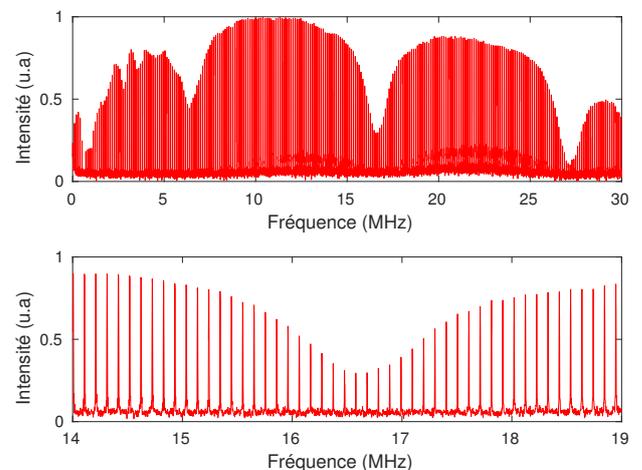


Fig. 6 Exemple d'un spectre d'absorption d'un mélange de $^{12}\text{CO}_2$ et de $^{13}\text{CO}_2$. L'image du bas est un zoom sur une raie d'absorption du spectre permettant de distinguer les dents du peigne.

con très précise la distance entre deux dents du peigne. On va donc se servir de cette connaissance pour caractériser les fréquences à mesurer. Pour cela, il va falloir compter les dents du peigne jusqu'à la raie désirée. Ce nombre N de dents peut facilement être déterminé avec une incertitude $\Delta N = \pm 1$. Une fois les dents comptées et donc la fréquence radio mesurée, il ne reste plus qu'à ramener cette fréquence dans son domaine initial. Ceci se fait grâce à la formule suivante :

$$\nu = \frac{c}{\lambda_0} + \frac{N}{F_{\text{Démul}}} \omega_b = \frac{c}{\lambda_0} + N \times \omega_1 \quad (9)$$

où $F_{\text{Démul}}$ est défini par (8). Le premier terme de cette équation correspond à la fréquence associée au laser. En effet, l'axe des abscisses de notre spectre correspond à un écart de fréquence avec la fréquence de la source $\frac{c}{\lambda_0}$. Le second terme correspond à la fréquence de la raie (donnée par le nombre de dents multiplié par la distance entre les dents, soit ω_b) que l'on ramène dans le domaine optique avec le facteur de démultiplication $F_{\text{Démul}}$. Ce terme vaut au final $N \times \omega_1$. Sachant que nos fréquences ω_i sont déterminées au hertz près, on peut en déduire de la formule (9) l'incertitude associée sur la position des raies $\Delta\nu$. Celle-ci est donnée par :

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_0 + \omega_1. \quad (10)$$

Fréquence expérimentale (THz)	Longueur d'onde expérimentale (nm)
$191,091 \pm 0,002$	$1568,84 \pm 0,01$
$191,121 \pm 0,002$	$1568,60 \pm 0,01$
$191,152 \pm 0,002$	$1568,35 \pm 0,01$

Tab. 1 Résultats expérimentaux obtenus avec le spectre présenté à la Figure 6 et les formules (9) et (10).

À titre d'exemple, utilisons ce que nous avons mis en place. Le spectre de la Figure 6 fait apparaître trois raies intéressantes à 6, 16 et 27 MHz environ. Après avoir compté le nombre de dents, on peut appliquer les formules (9) et (10) qui nous donnent les résultats présentés dans le Tableau 1. Pour évaluer la précision de notre montage, on peut comparer nos résultats avec d'autres résultats établis précédemment, comme ceux issus d'une base de données. C'est ce que nous présentons dans le Tableau 2.

Longueur d'onde expérimentale (nm)	Longueur d'onde de référence (nm)	Écart relatif ($\times 10^{-6}$)
$1568,84 \pm 0,01$	1568,835	3
$1568,60 \pm 0,01$	1568,615	10
$1568,35 \pm 0,01$	1568,353	2

Tab. 2 Comparaison des résultats expérimentaux du Tableau 1 avec des valeurs issues d'une base de données.

3.3. Résultats

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. On remarque que les raies 1 et 3 des tableaux rentrent bien

dans la plage d'incertitude et on observe un écart relatif entre la valeur théorique et expérimentale vraiment faible. Tout de même, la deuxième raie ne rentre pas dans la plage d'incertitude et possède un écart relatif trois fois supérieur aux deux autres raies. Cependant, si l'on effectue les calculs en gardant un chiffre significatif supplémentaire dans la longueur d'onde λ_2 ainsi que dans l'incertitude $\Delta\lambda_2$, on trouve que la valeur de la base de donnée est à la limite intérieure de la plage, ce qui est tout de même rassurant. Bien qu'il semble litigieux de rajouter un chiffre significatif de la sorte, on pourrait expliquer cet écart de par le fait que cette raie serait associée à un isotope, le gaz étudié étant un mélange de carbone 12 et 13. En effet, la précision connue sur les fréquences associées aux isotopes est moindre.

D'autre part, on constate que l'incertitude sur la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que l'incertitude sur λ_0 , c'est à dire 0,01 nm. On peut donc en déduire que c'est cette valeur qui pilote en majorité la précision des raies que l'on obtient. Pour avoir des mesures encore plus précises sur la caractérisation des raies, c'est donc notre connaissance sur la valeur de λ_0 que l'on doit améliorer.

La méthode employée ici est donc très efficace pour la caractérisation précise de raies d'absorption. On voit ici un aperçu du potentiel que peut délivrer un tel montage. Les résultats obtenus sont facilement améliorables car un certain nombre de techniques à disposition n'ont pas été utilisées par manque de temps. Ceci aurait par exemple pu infirmer la mesure limite de la seconde raie et peut être apporté une précision supplémentaire sur nos mesures (car assez faible tout de même). D'autres résultats bien plus avancés utilisant ce montage sont présentés dans l'article [2].

Ce spectromètre à deux peignes de fréquences était un exemple d'instrument basé sur les peignes. Une caractéristique que nous n'avons pas développé ici est le fait que ce soit un spectromètre ultra-rapide, c'est-à-dire que le temps d'acquisition des spectres est très court. En plus de ce type d'instrument, il en existe d'autres qui peuvent être utilisés de bien des manières et dans différents domaines. Pour finir, regardons quelques exemples de telles applications.

4. APPLICATIONS

4.1. Dans la vie de tous les jours

Le côté ultra-rapide et précis que peuvent fournir les peignes de fréquences dans la spectroscopie font que les applications sont nombreuses, et pas uniquement en laboratoire. La possibilité de disposer d'un temps d'acquisition très court pourrait être très intéressant pour la médecine : en effet, les analyses de gaz, de liquides et plus généralement de fluides sont légion dans ce domaine. On peut citer par exemple l'air expiré, le sang, etc. Actuellement, l'analyse de ces divers fluides n'est pas immédiat et l'éventualité de pouvoir diminuer ce temps d'analyse pourrait être très utile, notamment là où le temps devient une dimension très précieuse.

Un autre exemple d'application est la biologie. Pour l'instant, aucune limite théorique ne nous interdit une possible utilisation des peignes de fréquences dans le do-

maine des UV extrêmes ou encore celui des rayons X. Ces plages de fréquences sont caractéristiques de phénomènes ultra-rapides comme la formation de protéines ou encore de l'ADN. On peut donc envisager une future utilisation des peignes en biologie ou certains mécanismes du vivant sont encore très peu compris.

Enfin, le domaine de l'environnement pourrait être friand de ces instruments dont la précision est élevée. La spectroscopie appliquée à notre atmosphère pour l'étude des gaz à effet de serre, des rapports isotopiques ou bien encore l'analyse des rejets industriels seraient des applications courantes et très adaptées à l'utilisation d'instruments comme celui que nous avons vu.

4.2. Étudions les constantes fondamentales

Est-ce que les constantes sont constantes ? Cette question peut sembler paradoxale mais certaines théories prévoient que les constantes fondamentales ne seraient pas aussi constantes qu'elles n'y paraissent : elles devraient changer très légèrement au cours du temps. À titre d'exemple, les théories unificatrices comme la théorie des cordes prévoient une variation de certaines constantes de l'ordre de 10^{-15} à 10^{-18} par an. Il existe aussi des études astronomiques et géologiques comme celle présentée dans l'article [3] qui envisagent de même une variation des constantes, en particulier la constante de structure fine α : les auteurs y établissent une variation de α de $(6,40 \pm 1,35) \times 10^{-16}$ par an. Cependant, un principe physique connu sous le nom de *principe d'équivalence d'Einstein* nous dit que seules les constantes gravitationnelles pourraient varier au cours du temps. Il y a donc un besoin de mesurer ces constantes, ce qui permettrait de trancher laquelle des théories est défectueuse.

Comme l'explique le prix Nobel T. W. HÄNSCH dans l'article [4], on peut évaluer cette constante α en mesurant la fréquence de transition entre les deux niveaux hyperfins $F = 1$ et $F' = 1$ des niveaux $1s$ et $2s$ de l'atome d'hydrogène. La technique utilisée lors de leur mesure de 2003 présentée dans l'article [5] fait apparaître un peigne de fréquences. En réalité, ce n'est pas directement la fréquence de transition de l'hydrogène qui est mesurée mais plutôt la fréquence d'émission du laser à colorant qui excite les atomes d'hydrogène, lorsqu'on se trouve à la résonance du nombre de transition. Pour mesurer cette fréquence très précisément, on utilise une horloge atomique au césium 133 : en effet, vu que c'est elle qui définit notre unité de temps, la précision est donc nécessairement au rendez-vous. Cependant, les fréquences d'émission du césium et du laser à colorant n'étant pas du tout dans les mêmes domaines du spectre électromagnétique (le premier appartient aux micro-ondes, le deuxième au domaine optique), il faut trouver un moyen de les comparer.

C'est ici qu'intervient le peigne de fréquences : à l'aide d'un laser femtoseconde dont la fréquence de répétition des pulses est fixée grâce à l'horloge atomique au césium, on peut créer un peigne dans une fibre à cristaux photoniques. Il « suffit » ensuite de mesurer le battement de la fréquence du laser avec les dents du peigne pour en déduire la fréquence du laser. Ce peigne de fréquences est donc très important et même capital dans le montage puisqu'il

permet de faire le lien entre les fréquences optiques et les fréquences radios, de façon extrêmement précise qui plus est.

Pour le moment, la précision qui nous permettrait de vérifier l'étude établie dans l'article [3] n'est pas encore atteignable. Il est possible que ce soit dû à la physique elle-même si par exemple, d'autres constantes varieraient au même rythme. Ceci rendrait alors impossible la mesure de la variation. De plus, des aléas expérimentaux, des limitations techniques et d'autres phénomènes pourraient rentrer en jeu. Depuis 2003, l'expérience présentée dans l'article [5] a été améliorée plusieurs fois mais la précision requise n'est toujours pas accessible.

Les peignes de fréquences nous fournissent donc un instrument qui permettraient de valider (ou d'invalider) des modèles comme la théorie des cordes par des mesures de haute précision. Ce serait une des premières expériences permettant l'étude expérimentale de telles théories, ce qui constituerait un véritable progrès dans l'avancement des théories unificatrices et donc de la recherche en physique fondamentale.

4.3. Et bien d'autres domaines

Les peignes de fréquences interviennent aussi dans d'autres domaines comme en astrophysique. Un spectromètre basé sur les peignes, couplé avec un Perot-Fabry et monté sur un télescope pourrait permettre d'enregistrer des spectres d'exoplanètes. Ce type d'étude n'a été réalisée que quelques fois et assez difficilement. Il serait aussi possible de détecter des exoplanètes avec des mesures très précises de vitesses radiales comme expliqué dans l'article [6]. Théoriquement, on pourrait atteindre une résolution de l'ordre de quelques centimètres par seconde, ce qui serait entièrement suffisant pour détecter des exoplanètes de la même masse que celle de la Terre.

Pour terminer, on peut citer encore d'autres domaines d'application : une possible amélioration de l'optique adaptative, la conception d'horloges optiques, l'étude des symétries en physique, etc. Sans les peignes de fréquences, les améliorations significatives dans ces domaines seraient beaucoup plus difficiles.

5. CONCLUSION

Ce petit aperçu des peignes de fréquences ainsi que leurs utilisations nous ont permis de voir à quel point ils sont importants dans la recherche en physique actuelle. La précision qui peut nous être accordée avec des instruments basés sur les peignes a révolutionné la métrologie des fréquences et ce n'est qu'un début. Ce champ de recherche est en développement constant et un nombre important d'articles sont encore publiés à ce jour. On peut citer l'amélioration de technique de spectroscopie, comme nous l'avons vu avec l'article [2] ou encore des développements assez inattendus, comme la création de peignes avec un synchrotron tel qu'il est expliqué dans l'article [7].

Pour finir, on peut citer le prix Nobel T. W. HÄNSCH : « *Only the future can show what we will discover with such exquisite new instruments* ».

REMERCIEMENTS

Merci à Guy Millot pour les références ainsi qu'à Jérôme Morville pour la documentation, la relecture et la visite du laboratoire à l'ILM qui fut très instructive.

RÉFÉRENCES

- [1] T. UDEM, R. HOLZWARH et T. W. HÄNSCH. "Optical frequency metrology". In : *Nature* 416 (2002), p. 233–237.
- [2] G. MILLOT et al. "Frequency-agile dual-comb spectroscopy". In : *Nature Photonics* 10 (2015), p. 27–30.
- [3] M. T. MURPHY, J. K. WEBB et V. V. FLAMBAUM. "Further evidence for a variable fine-structure constant from Keck/HIRES QSO absorption spectra". In : *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 345 (2003), p. 609–638.
- [4] Theodor W. HÄNSCH. "Nobel Lecture : Passion for precision". In : *Reviews of Modern Physics* 78.4 (2006).
- [5] M. FISCHER et al. "New Limits on the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements". In : *Physical Review Letters* 92.23 (2003).
- [6] Tobias WILKEN et al. "A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level". In : *Nature* 485 (2012), p. 611–614.
- [7] S. TAMMARO et al. "High density terahertz frequency comb produced by coherent synchrotron radiation". In : *Nature Communications* 6.7733 (2015).

□ ALEXANDRE PARRIAUX
M1 Sciences de la Matière
ENS de Lyon - Université Lyon 1
alexandre.parriaux@ens-lyon.fr