Stabilisation de la fréquence d'un laser de puissance A CO₂ ou A N₂O par une méthode d'échantillonnage rapide

J. Lemaire, J. Houriez, J.M. Lapauw

► To cite this version:

J. Lemaire, J. Houriez, J.M. Lapauw. Stabilisation de la fréquence d'un laser de puissance A CO₂ ou A N₂O par une méthode d'échantillonnage rapide. *Revue de Physique Appliquée*, 1972, 7 (4), pp.323-328. 10.1051/rphysap:0197200704032300 . jpa-00243634

HAL Id: jpa-00243634

<https://hal.science/jpa-00243634>

Submitted on 1 Jan 1972

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 07.23

STABILISATION DE LA FRÉQUENCE D'UN LASER DE PUISSANCE A CO₂ OU A N₂O PAR UNE MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE RAPIDE (*)

J. LEMAIRE, J. HOURIEZ et J. M. LAPAUW (**)

Laboratoire de Spectroscopie, Hertzienne Université des Sciences et Techniques de Lille

(Reçu le 17 avril 1972)

Résumé. — On décrit une méthode d'asservissement de la fréquence d'un laser de puissance (CO₂ ou N₂O) à partir d'un second laser stabilisé sur un « Lamb dip ». Le laser de puissance n'est pas modulé et l'asservissement est réalisable en tout point de la raie d'émission avec une stabilité moyenne à long terme de 10⁻⁹.

Abstract. — A method for stabilizing the frequency of a laser from a second laser locked-on to a lamb dip is described. The laser is unmodulated and the servo loop maintains it at any point of the line with a long term stability of about 10⁻⁹.

Introduction. — De nombreuses méthodes de stabilisation des lasers à CO₂ ou à N₂O ont déjà été proposées [1]-[8] ; elles utilisent généralement une modulation de la fréquence du laser autour du centre du profil d'émission. Dans le cadre des études envisagées au laboratoire, nous avons voulu éliminer cette wobulation résiduelle et stabiliser un laser en tout point de son profil d'émission tout en gardant la possibilité d'effectuer un balayage en fréquence autour de ce point. La méthode proposée utilise deux lasers. Le premier (laser étalon) stabilisé de façon classique sur un « Lamb dip » sert de fréquence de référence. Le second (laser source), de puissance, est accordé sur la même raie puis stabilisé à partir du battement obtenu par mélange des deux rayonnements. La méthode d'échantillonnage en fréquence qui a pour but d'asservir ce deuxième laser par rapport à la fréquence moyenne du premier élimine totalement, lors de la lecture de la fréquence du battement, la wobulation induite par la modulation du laser étalon.

Le laser étalon. — La conception classique est voisine de celle décrite par ailleurs [9]. La cavité de 1,60 m de longueur est à miroirs externes ; le tube refroidi par eau est fermé par deux fenêtres en chlorure de sodium sous incidence brewstérienne.

Le gaz en écoulement continu est excité à l'aide d'une alimentation stabilisée par l'intermédiaire de deux électrodes distantes de 1,20 m. L'un des miroirs de la cavité est constitué par un réseau comportant 152 traits/mm et dont l'angle de miroitement est de 37° 38'. L'autre miroir concave est solidaire d'un système de deux céramiques piézo-électriques tubulaires

concentriques (type PZT5H-Brush Clevite). Les supports de miroir sont reliés par 2 barres d'invar. La pression du gaz est voisine de 0,6 torr et dans ces conditions, il est possible de mettre en évidence le « Lamb dip » qui prend naissance dans le profil d'émission. La stabilisation de ce laser semblable à celle réalisée par C. Bordé [3] utilise ce « Lamb dip » comme élément discriminatoire [9]. Une tension alternative de 3 V crête à crête environ appliquée à l'une des céramiques piézo-électriques module la fréquence d'émission de ce laser. Si F est la fréquence de cette tension, la variation de la puissance d'émission qui en résulte est de période $1/2 F$, ou $1/F$, suivant que la fréquence moyenne de l'émission coïncide, ou non, avec celle du « Lamb dip ». Après amplification, le signal issu du détecteur Ge Au est alors traité par détection synchrone à la fréquence F puis intégré avant d'être appliqué, avec une polarité convenable sur la deuxième entrée (Fig. 1) de l'amplificateur différentiel HT₁. Cet amplificateur dont le gain en tension est de 1 000 peut délivrer une tension de plus ou moins 500 V. Les fluctuations observées sur la fréquence d'émission du laser ont pour principales origines les vibrations acoustiques et mécaniques de quelques dizaines de Hertz. Pour corriger celles-ci, nous avons choisi une fréquence de modulation de 5 kHz ce qui permet d'utiliser des constantes de temps de régulation de l'ordre de une à quelques ms et d'autre part, comme nous le verrons par la suite, d'exploiter au mieux les possibilités de l'échantillonneur utilisé dans l'asservissement du laser source sur cet étalon.

Afin de déterminer la bande passante des servomécanismes une tension en échelon (Fig. 2) correspondant à un déplacement en fréquence supérieur à 1 MHz est appliquée à la céramique piézo-électrique externe (trace du haut). La tension de correction (trace du bas) est observée à la sortie de l'amplificateur HT₁.

(*) La méthode et le dispositif utilisé seront développés par J. M. Lapauw en vue d'obtenir le titre de Docteur-Ingénieur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

(**) Equipe de recherche associée au CNRS.

FIG. 1. — Schéma synoptique de l'ensemble du dispositif.

FIG. 2. — Réponse du servomécanisme du laser étalon à une tension en échelon. Vitesse de balayage 2 ms/cm.

Pour évaluer la stabilité à long terme de ce laser, l'enregistrement du signal de correction (Fig. 3) boucle ouverte (courbe A) et en boucle fermée (courbe B : sensibilité 100 fois plus grande) est approximativement étalonné en fréquence à l'aide de l'élément discriminatoire que l'on a évalué à 5 MHz.

Il est à noter que le laser utilisé est assez instable de par sa conception mécanique et de par son support non isolé mécaniquement du sol. Il est probable

FIG. 3. — Rôle de l'asservissement du laser étalon : enregistrement de la tension d'erreur après détection synchrone.

qu'une amélioration notable de la stabilité en fréquence de l'émission pourrait être obtenue en prenant certaines précautions d'isolement mécanique, de régulation des gaz et de l'écoulement de l'eau de refroidissement.

L'étalon ainsi réalisé est wobulé sur une plage de 250 à 300 kHz à la fréquence de 5 kHz, mais on peut estimer que la stabilité de la valeur moyenne de la fréquence d'émission est de l'ordre d'une dizaine de kHz par demi-heure.

Le laser source. — Il est constitué par un tube à décharge de 2,80 m de longueur et sa conception est identique à celle du laser étalon [10] ; néanmoins, le couplage se fait par un miroir semi-réfléchissant en germanium. Un diaphragme, placé dans la cavité, limite l'émission aux modes axiaux. Une puissance de quelques dizaines de watts peut être obtenue pour les raies les plus intenses. La correction en fréquence du laser source est également obtenue par modification de la longueur de la cavité à l'aide d'une céramique piézo-électrique (Fig. 1).

Une très faible partie de la puissance de ce laser est mélangée [11] avec celle issue du laser étalon. Le battement obtenue à la sortie du détecteur Cd Hg Te est envoyé sur un amplificateur large bande (1 kHz-150 MHz) à grand gain (60 dB) ; un fréquencemètre (Hewlett-Packard type 5327 C) en affiche directement la fréquence. La cadence de mesure la plus rapide de cet appareil (temps de comptage augmenté de 80 μ s) permet d'obtenir un échantillon de mesure de fréquence, dans le cas d'une précision de 10 kHz, tous les 180 μ s. De plus, le temps de transfert des informations digitales, des registres à décade aux sorties codées BCD et la cadence de sortie de ces informations sont compatibles avec la vitesse maximale d'échantillonnage du compteur. La sortie digitale BCD attaque un convertisseur digital-analogique dont le temps de recouvrement est de l'ordre de 10 μ s et qui délivre une tension proportionnelle à la fréquence du battement. La somme de tous les temps de recouvrement ou de transfert des signaux est nettement inférieure à la période d'échantillonnage. La bande passante de l'asservissement n'est alors limitée à ce niveau que par la cadence de mesure du fréquencemètre. La tension issue du conver-

tisseur est comparée à une tension de consigne et le résultat est appliqué après intégration et avec une phase convenable à l'entrée de l'amplificateur différentiel HT₂.

La précision de 1 pour 1 000 de la tension de sortie du convertisseur digital analogique limite à 3 chiffres significatifs l'utilisation du résultat de comptage. Ces chiffres choisis en fonction de la précision de l'étalon et de la largeur des raies d'émission sont soit les chiffres de 10 kHz, 100 kHz et 1 MHz soit les chiffres de 100 kHz, 1 MHz et 10 MHz ; ce qui donne deux échelles permettant de couvrir par variation de la tension de consigne des tranches de soit 10 MHz avec une définition de 10 kHz soit 100 MHz avec une définition de 100 kHz.

Le passage d'une échelle à l'autre est directement réalisable sur le fréquencemètre par simple commutation du diviseur d'entrée, ce qui présente l'avantage de conserver la même durée de comptage (100 μ s).

La stabilisation du laser source peut ainsi être réalisée, en tout point du profil d'émission, par rapport à l'étalon. La synchronisation de la cadence de mesure par l'oscillateur de référence (Fig. 1) permet d'échantillonner la fréquence du battement entre les temps $t - \Delta t$ et $t + \Delta t$ correspondant aux fréquences $F_D - \Delta F$ et $F_D + \Delta F$ (F_D fréquence centrale du Lamb dip) du laser étalon (Fig. 4). L'effet de la modulation de celui-ci est ainsi éliminé au niveau de la mesure de la fréquence du battement.

FIG. 4. — Synchronisation de la cadence de mesure avec la modulation du laser étalon. A — Tension de modulation du laser étalon. B — Puissance de sortie du laser étalon. C — Cadence de mesure synchronisée par l'oscillateur de référence. D — Cadence de mesure minimale non synchronisée de l'échantillonneur.

Résultats. — La mesure de la stabilité absolue par rapport à un étalon externe de bonne qualité ne nous

est pas possible actuellement. Cependant, un certain nombre de contrôles nous permettent de mettre en évidence la stabilité relative du laser source par rapport au laser étalon et, de donner un ordre de grandeur de la stabilité à long terme du laser source.

Le convertisseur digital analogique fournit directement une tension proportionnelle à la fréquence du battement.

— A long terme (Fig. 5), cette tension de sortie du convertisseur en boucle fermée (courbe B) peut être comparée à celle obtenue en boucle ouverte (courbe A).

FIG. 5. — Enregistrement de la tension de sortie du convertisseur D/A horizontalement 50 s/cm. A — Boucle ouverte verticalement 400 kHz/cm. B — Boucle fermée verticalement 4 kHz/cm.

— A court terme, on peut observer les fluctuations de la tension de sortie autour de la valeur moyenne fixée par la tension de consigne (Fig. 6) et mettre en

FIG. 6. — Tension de sortie du convertisseur D/A avec synchronisation de la cadence de mesure. Temps d'exposition 1/2 s verticalement 10 kHz/cm.

évidence le rôle de la synchronisation de la cadence de mesure de l'échantillonneur par le balayage du laser étalon. En absence de synchronisation (Fig. 7), le signal de sortie présente une composante périodique correspondant à une excursion de 125 kHz qui disparaît après synchronisation (Fig. 6).

La constante de temps de régulation du servomécanisme peut être observée en imposant une variation rapide de la fréquence du laser étalon lorsque celui

FIG. 7. — Signal de sortie du convertisseur dans le cas de la cadence de mesure minimale non synchronisée de l'échantillonneur.

ci n'est plus stabilisé ; ce qui a pour effet d'imposer une variation brusque de la fréquence du laser source. La tension de sortie du convertisseur (Fig. 8) donne le signal de correction et le temps de réponse de l'asservissement.

FIG. 8. — Réponse du servomécanisme du laser source à un signal de commande en échelon. Horizontalement 2 ms/cm, trace du haut : signal de sortie du convertisseur D/A ; trace du bas : tension de correction appliquée à la céramique piézo-électrique.

Afin de compléter cette étude de stabilité, nous avons profité de la possibilité de balayer la fréquence du laser source pour utiliser le battement comme source de fréquence variable appliquée à l'entrée d'un récepteur radio-électrique. Dans ce cas, pour éliminer la wobulation à 250 kHz, le laser étalon est laissé libre. Le récepteur utilisé au voisinage de 15 MHz, présente deux bandes passantes de 4 kHz de large distantes de 100 kHz. La vitesse de balayage du laser source est de 2 kHz/s (Fig. 9).

La wobulation du laser source s'opère au niveau de la tension de consigne. Nous avons noté un affaiblissement

FIG. 9. — Enregistrement des bandes passantes d'un récepteur. A — A l'aide d'un générateur externe. B — A l'aide de la fréquence obtenue par battement entre les deux lasers : vitesse de balayage 2 kHz/s.

de 3 dB de l'amplitude de wobulation à la sortie du convertisseur pour une fréquence de commande de 300 Hz (Fig. 10) et photographié (Fig. 11)

FIG. 10. — Contrôle de la wobulation du laser source à la sortie du convertisseur D/A (trace du haut). Fréquence de balayage du signal de commande 300 Hz (trace du bas).

FIG. 11. — Photographie du battement lors d'une modulation en carré du laser source.

la forme du battement pour un balayage en carré à 100 Hz. La wobulation du laser source, peut aussi être effectuée à une fréquence supérieure à celle de coupure du servomécanisme soit par l'entrée E₂ de l'amplificateur HT₂ pour les fréquences moyennes soit par une céramique supplémentaire pour les fréquences plus élevées [11]. L'asservissement stabilise alors la valeur moyenne de la fréquence d'émission du laser source.

Discussions. — Les résultats présentés ci-dessus ont tous été obtenus avec une résolution d'échantillonnage de 10 kHz c'est-à-dire en utilisant les chiffres 10 kHz, 100 kHz et 1 MHz du fréquencemètre. Cependant le principe n'est pas limité à cette résolution qui peut être augmentée en fonction de la stabilité du laser étalon. Bien que celui utilisé ne réponde pas au critère demandé (c'est-à-dire à une stabilité de quelques kHz), nous avons effectué un essai avec une résolution de 1 kHz, ce qui correspond à un temps de comptage de 1 ms et à une plage d'asservissement du laser source de 1 MHz. Dans ce cas, les fluctuations de la fréquence du battement observées par l'intermédiaire du convertisseur restent à court terme inférieures à 10 kHz. Ce qui laisse supposer qu'avec un laser étalon de meilleure stabilité et un environnement plus favorable une résolution d'échantillonnage de 1 kHz puisse être envisagée.

D'autres résolutions d'échantillonnage peuvent d'ailleurs être utilisées en modifiant le temps de comptage de l'échantillonneur. Le quartz interne (10 MHz) qui détermine ce temps de comptage peut en effet être remplacé par un étalon externe dans la gamme de 100 Hz à 10 MHz.

De plus, ce type de stabilisation présente un certain nombre d'avantages :

— La puissance dérivée du laser source est très faible car le détecteur Cd Hg Te utilisé ne nécessite qu'une puissance de l'ordre de 1 mW.

— La stabilisation est réalisable sur toutes les raies de CO₂ ou de N₂O qui permettent la mise en évidence du « Lamb dip » [9], nous avons pu l'observer sur plus de 50 raies du CO₂ et sur 35 raies du N₂O. Ce « Lamb dip » peut d'ailleurs être avantageusement remplacé par une des nombreuses courbes d'absorption saturée déjà observées [5-12] et qui présentent une largeur à mi-hauteur beaucoup plus faible.

— Enfin, la méthode d'échantillonnage proposée, qui peut par ailleurs être appliquée dans un tout autre domaine que celui de la stabilisation d'un laser, fournit une tension proportionnelle à l'écart de fréquence entre les deux sources. Cette tension qui est issue du convertisseur peut être utilisée comme étalonnage précis en fréquence lors de l'enregistrement d'un phénomène physique.

Il nous faut maintenant citer deux inconvénients rencontrés dans l'application de cette méthode. Dans le cas d'une précision de 10 kHz par digit, la stabilisation ou la wobulation dans les plages situées au voisinage des multiples de 10 MHz par rapport à la fréquence du Lamb dip est interdite. Cependant, ces plages sont réduites puisque nous avons pu nous approcher à 20 kHz de part et d'autre de 10 MHz. De plus, cette restriction peut être levée soit en utilisant un autre point de stabilisation du laser étalon (sommets de chaque côté du « dip » par exemple) soit en modifiant la résolution d'échantillonnage comme nous l'avons vu précédemment.

Le deuxième inconvénient majeur est lié aux céramiques piézo-électriques ; elles ont un faible coefficient d'allongement (de 1 µm/400 V à 1 µm/200 V) mais surtout elles peuvent, après une perturbation rapide, entrer en résonance à des fréquences de quelques centaines de hertz et perturber le bon fonctionnement du servomécanisme. Ces oscillations nettement observables dans les conditions des figures 2 et 8 restent cependant négligeables dans le cas d'un environnement normal.

Conclusion. — Les limites de la méthode proposée sont actuellement liées à la qualité de l'étalon utilisé comme référence et non au principe même de l'asservissement ; les améliorations éventuelles doivent d'abord être envisagées de ce côté. Néanmoins, tel qu'il est réalisé actuellement, l'appareillage conduit à un asservissement en tout point du profil d'émission d'un laser sans modulation résiduelle, avec une stabilité moyenne à long terme meilleure que 30 kHz. La stabilité à court terme est plus difficile à évaluer mais compte tenu des différentes mesures effectuées, nous pensons qu'elle reste inférieure à quelques dizaines de kHz.

Bibliographie

- [1] LAURES (P.). — Stabilisation de la fréquence des lasers à gaz. *Onde électrique* 1966, XLVI, 455.
- [2] WAKSBERG (A. L.). — Stabilisation of a CO₂ laser using a three-mirror laser system. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1968, QE 4, 9, 532.
- [3] BORDE (C.) and HENRY (L.). — Study of the Lamb dip and of rotational competition in a carbon dioxide laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1968, QE 4, 11, 874.
- [4] SKOLNICK (M. L.). — Use of plasma tube impedance variations to frequency stabilize a CO₂ laser. *IEEE J. Quantum Electron.* 1970, QE 6, 2, 139.
- [5] FREED (C.) and JAVAN (A.). — Standing wave saturation resonances in the CO₂ 10,6 µ transitions observed in a low-pressure room-temperature absorber gas. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 17, 2, 53.

- [6] FREED (C.). — Advances in stable CO₂ laser design and performance International electron devices metering. 28-30 octobre 1970, *IEEE*, 1970, p. 92.
 - [7] BOYNE (H. S.). — Laser frequency stabilization techniques and applications, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 1971, **1 M**, 20, 19.
 - [8] GOLDBERG (M. W.) and YUSEK (R.). — Doppler fitter stabilization of a CO₂ laser: *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**, 4, 135.
 - [9] KAN (T.), POWELL (H. T.), WOLGA (G. J.). — Observation of the central tuning dip in N₂O and CO₂ molecular lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE 5**, 6, 299.
 - [10] HOURIEZ (J.). — Thèse de 3^e Cycle, Université de Lille, 1971.
 - [11] MOCKER (H. W.). — Optical Heterodyne Communication System. *Appl. Opt.*, 1969, **8**, 677.
 - [12] BORDE (C.). — Spectroscopie d'absorption saturée de diverses molécules au moyen des lasers à gaz carbonique et à protoxyde d'azote. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, 1970, **271B**, 371.
-