

Rapport BIPM-87/2

Etude de l'influence de la valeur de la pression atmosphérique sur la
fréquence de lasers asservis

par J.-M. Chartier

Résumé.— Nous avons mis en évidence que la fréquence de lasers à He-Ne, à $\lambda = 633$ nm, asservis sur deux modes [1], peut varier de plusieurs 10^{-8} en valeur relative lorsque la pression atmosphérique varie de 20×10^3 Pa (≈ 150 Torr) ce qui correspond à une différence d'altitude entre deux points d'environ 1 500 m. L'effet est environ mille fois plus petit sur un laser asservi sur l'absorption saturée de l'iode [2], mais il est mesurable.

Abstract.— We observe frequency shifts amounting to a few parts in 10^8 of two modes stabilized He-Ne Lasers at $\lambda = 633$ nm when the atmospheric pressure varies by about 20×10^3 Pa (≈ 150 Torr). This atmospheric pressure variation corresponds to a 1 500 m difference in altitude. The effect is thousand times smaller on lasers stabilized by the saturated absorption of iodine, but we could measure it.

I.- Introduction

En juin et juillet 1985, s'est tenue au BIPM, une comparaison internationale de gravimètres [3]. Des différences relatives de 4×10^{-8} ont été observées sur la mesure absolue de l'accélération due à la pesanteur, g.

Parmi les causes possibles de la dispersion des résultats, il convenait d'examiner de plus près la stabilité de la fréquence des lasers à He-Ne à $\lambda = 633$ nm, utilisés comme référence de longueur d'onde. On a pensé notamment que la valeur attribuée à la fréquence des lasers pouvait être liée à l'altitude des laboratoires dans lesquels ils avaient été étalonnés. La différence d'altitude entre certains de ces laboratoires atteint 1 500 m.

C'était le rôle du BIPM de vérifier cette hypothèse. C'est ainsi que nous avons soumis des lasers asservis par des procédés différents à des pressions correspondant à des différences d'altitude de 3 000 m.

Nous avons observé que tous les lasers étaient sensibles à ces variations de pression, mais que l'amplitude de la variation de fréquence dépendait essentiellement du procédé utilisé pour asservir les lasers.

II.- Dispositif expérimental

Pour déterminer la stabilité et la reproductibilité de la fréquence d'un laser, la méthode la plus sensible et la plus simple à mettre en oeuvre est la méthode de battement.

Cette méthode permet d'apprécier les variations de la fréquence d'un laser à étudier par rapport à celles d'un laser de référence. La différence de fréquence maximale que l'on peut mesurer aisément est de l'ordre de 1 GHz. Le signal de battement est mesuré à l'aide d'un fréquencesmètre relié à un ordinateur.

C'est le laser BIPM2, asservi sur l'absorption saturée de l'iode 127, qui a servi de laser de référence pour toutes les mesures.

Ce laser est la référence de fréquence à $f = 473,6$ THz la plus ancienne du BIPM, ses fluctuations maximales relatives de fréquence depuis une douzaine d'années sont de l'ordre de $\pm 3 \times 10^{-11}$ [4], ses caractéristiques ont été décrites dans [5].

L'étude de l'influence de la valeur de la pression atmosphérique sur la valeur de la fréquence de lasers asservis a porté sur trois lasers :

- un laser asservi sur l'iode, BIPM6, autre laser de référence du BIPM ;
- deux lasers commerciaux Spectra-Physics asservis "sur deux modes", SP117 et SP117A.

Le laser BIPM6 avait été conçu dès son origine pour être utilisé dans un caisson étanche (Fig. 1) ce qui a facilité la réalisation de cette expérience. Le laser SP117 a pu être aussi étudié dans ce caisson après que l'on ait réalisé les traversées étanches pour les fils de connexion le reliant à son électronique d'asservissement.

Nous avons ensuite utilisé un autre caisson étanche de plus grandes dimensions (Fig. 2) où il a été possible d'enfermer successivement les lasers SP117 et SP117A avec leur boucle d'asservissement complète. Cela a permis de vérifier que la variation de fréquence du laser était la même lorsque l'ensemble subissait les mêmes conditions de pression extérieure que le laser lui-même.

Une pompe à écrasement nous a permis de réaliser des pressions variables comprises entre 0,4 et 1,3 fois la pression atmosphérique. Chaque valeur de la pression était mesurée à l'aide d'un manomètre à mercure.

III.- Performances des lasers étudiés

Il est important avant de parler des décalages de fréquence produits par les variations de la pression atmosphérique, de préciser les performances de chacun des lasers étudiés en l'absence de ces variations. Nous nous sommes limités à la stabilité de fréquence et au coefficient de variation de fréquence en fonction de la température.

1) Stabilité relative de fréquence

TABLEAU I

Variations relatives de fréquence dans les conditions habituelles

Lasers	Durée					
	1 s	1 min	1 heure	1 jour	1 semaine	1 mois
BIPM6*	1×10^{-11}	$1,5 \times 10^{-12}$	3×10^{-13}	5×10^{-12}	2×10^{-11}	2×10^{-11}
SP117 données du constructeur [6]		8×10^{-9}	8×10^{-9}			
mesurées au BIPM	9×10^{-11}	6×10^{-10}	3×10^{-9}	8×10^{-9}	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-8}$
SP117A données du constructeur		1×10^{-9}	4×10^{-9}	6×10^{-9}		
mesurées au BIPM	4×10^{-11}	1×10^{-10}	1×10^{-9}	2×10^{-9}	6×10^{-9}	$1,2 \times 10^{-8}$

* Les fluctuations maximales relatives de fréquence de ce laser durant une période de huit années sont de $\pm 3 \times 10^{-11}$ ($\approx \pm 14$ kHz).

En ce qui concerne les mesures du BIPM, pour les durées inférieures ou égales à 1 heure, nous avons donné l'écart-type d'Allan relatif ; pour les durées supérieures, nous avons indiqué la moitié de l'écart de fréquence maximal mesuré sur chacune de ces durées.

La température du laboratoire du BIPM où les mesures ont été faites a été conservée à 20 °C à $\pm 0,1$ K.

Rappel : la fréquence de ces lasers étant de $4,73 \times 10^{14}$ Hz, 1×10^{-9} en valeur relative correspond à 473 kHz.

2) Variation de la fréquence en fonction de la température

Pour le laser BIPM6, le coefficient de température est inférieur à 100 Hz/K (soit 2×10^{-13} K⁻¹ en valeur relative).

Pour le laser SP117, on a observé un coefficient de température de - 3,7 MHz/K (soit $- 8 \times 10^{-9}$ K⁻¹ en variation relative) alors que le constructeur indique un coefficient de - 60 MHz/K.

Pour le laser SP117A, le coefficient observé est de - 1,4 MHz/K (soit $- 3 \times 10^{-9}$ K⁻¹ en variation relative) alors que le constructeur indique un coefficient inférieur à - 0,5 MHz/K.

IV.- Mesures et résultats

Pour chacun des trois lasers, nous avons effectué plusieurs groupes de mesures séparés dans le temps, pendant une période de deux mois environ. Chaque groupe comprenait un ou plusieurs cycles de variations de pressions généralement fermés et compris entre 40×10^3 Pa et 130×10^3 Pa (soit de 0,4 à 1,3 fois la pression atmosphérique) par pas de $6,65 \times 10^3$ Pa ou $13,3 \times 10^3$ Pa (environ un ou deux quinzièmes de la pression atmosphérique).

1) Effet transitoire sur la fréquence des lasers lors d'un changement de pression

Lors des changements de pression, nous avons observé un comportement particulier pour chaque laser :

a) Pour le laser BIPM6, lorsque le changement de pression introduit un léger décalage de fréquence (Fig. 7), celui-ci est presque instantané, sans phénomène transitoire.

b) Pour les lasers SP117 et SP117A, on observe des oscillations de la fréquence des lasers pendant plusieurs dizaines de minutes ; la durée des oscillations est croissante, comprise entre 2 et 10 minutes pour le laser SP117 (Fig. 3) et, entre 20 secondes et 2 minutes pour la laser SP117A (Fig. 4). L'amplitude crête à creux de ces oscillations est de l'ordre de 20 MHz pour le laser SP117 et de l'ordre de 1 MHz pour le laser SP117A pour des variations de pression respectives de $6,6 \times 10^3$ Pa et de $13,2 \times 10^3$ Pa.

Une fois les oscillations amorties, il subsiste pour ces deux lasers un décalage de fréquence sensiblement égal à l'amplitude crête à creux des oscillations.

A l'aide de thermistances, nous avons vérifié que ces variations de fréquence n'étaient pas provoquées par des variations de température (Fig. 5).

Bien entendu, les mesures ne sont entreprises qu'après amortissement complet de ces oscillations, ce qui demande environ 40 minutes pour le laser SP117 et sensiblement moins pour le laser SP117A.

2) Coefficient de variations de fréquence

A titre de vérification le laser de référence BIPM2 a été asservi tantôt sur l'une tantôt sur l'autre des composantes d, f ou g de la raie R(127)11-5 de l'iode 127.

a) Laser SP117

Comme nous l'avons dit précédemment, sur ce laser, nous avons pu effectuer des mesures, d'une part lorsque le laser est seul à être soumis aux variations de pression et d'autre part en installant dans un caisson de dimensions plus importantes le laser et son dispositif d'asservissement. On n'a pas trouvé de différence significative entre ces deux types de mesures. Dans le premier type, la température à l'intérieur du caisson était de 24,5 °C, dans le deuxième type, elle était de l'ordre de 34 °C.

On a obtenu pour les coefficients de variation de fréquence en fonction de la pression les valeurs suivantes :

laser seul dans le caisson :

18 et 19 mars 1987 ; référence = composante f :

$$[725 \pm 60] \text{ Hz/Pa ou } [96,4 \pm 8,0] \text{ kHz/Torr ;}$$

référence = composante g :

$$[708 \pm 47] \text{ Hz/Pa ou } [94,2 \pm 6,3] \text{ kHz/Torr ;}$$

23 et 24 mars 1987 ; référence = composante f (Fig. 5) :

$$[790 \pm 81] \text{ Hz/Pa ou } [105,5 \pm 10,8] \text{ kHz/Torr ;}$$

référence : composante g :

$$[785 \pm 78] \text{ Hz/Pa ou } [104,4 \pm 10,4] \text{ kHz/Torr.}$$

Sur la figure 5, nous avons aussi représenté l'évolution de la température dans le caisson pendant toute la durée de la mesure.

laser et asservissement dans le caisson

9 et 10 avril 1987 ; référence = composante g :

$$[704 \pm 54] \text{ Hz/Pa ou } [93,7 \pm 7,2] \text{ kHz/Torr.}$$

Les différences observées dans les différents cas n'étant pas significatives par rapport au défaut de stabilité propre au laser 117, on peut caractériser l'effet de pression ambiante par le coefficient moyen 742 Hz/Pa avec une incertitude (écart-type) de l'ordre de 42 Hz/Pa.

b) Laser SP117A

laser et asservissement dans le caisson

La température dans le caisson était de l'ordre de 34 °C,

7 et 8 avril 1987 ; référence = composante d [Fig. 6] :

$$[41,3 \pm 6,8] \text{ Hz/Pa ou } [5,49 \pm 0,91] \text{ kHz/Torr ;}$$

23 et 24 avril 1987 ; référence = composante d :

$$[54,6 \pm 8,1] \text{ Hz/Pa ou } [7,26 \pm 1,08] \text{ kHz/Torr.}$$

c) Laser BIPM6

La différence de comportement de ce laser lorsque l'on est en dépression ou en surpression est très curieuse mais très reproductible.

La température dans le caisson était de l'ordre de 35 °C,

3 avril 1987, composante d, référence = composante g [Fig. 7] :

en dépression : $[0,045 \pm 0,022] \text{ Hz/Pa ou } [6 \pm 3] \text{ Hz/Torr,}$
en surpression : $[0,50 \pm 0,12] \text{ Hz/Pa ou } [67 \pm 16] \text{ Hz/Torr ;}$

3 avril 1987, composante g, référence = composante d :

en dépression : $[0,030 \pm 0,038]$ Hz/Pa ou $[4 \pm 5]$ Hz/Torr,

en surpression : $[0,67 \pm 0,04]$ Hz/Pa ou $[89 \pm 6]$ Hz/Torr.

3) Permanence de l'effet

Il convenait de contrôler si cet effet, observé sur des cycles dont la durée totale était de l'ordre de la journée de travail, persistait sur des cycles de durée beaucoup plus longue, de l'ordre de la semaine. Nous avons donc effectué des séries de mesures ne comportant que trois ou quatre paliers de pression, mais en restant sur ces paliers plusieurs heures, voire une journée entière au lieu de quarante minutes comme précédemment. Nous avons échelonné ces mesures sur une dizaine de jours (Fig. 8).

Nous avons choisi le laser SP117 pour cette expérience étant donné qu'il présentait le coefficient de variation de fréquence le plus important, bien que la stabilité de sa fréquence à moyen et long terme ne soit pas très satisfaisante.

De ces mesures, on peut déduire qu'il y a permanence de l'effet, mais que son amplitude semble diminuer avec le nombre d'épreuves subi par le laser. En effet, on a obtenu :

du 15 au 17 avril 1987 ; composante g, Fig. 8 :

$[459 \pm 51]$ Hz/Pa ou $[61,0 \pm 6,8]$ kHz/Torr ;

du 17 au 26 avril 1987 ; composante g :

$[307 \pm 56]$ Hz/Pa ou $[40,9 \pm 7,5]$ kHz/Torr.

Ces valeurs sont à comparer avec celles obtenues en mars :

≈ 780 Hz/Pa (Fig. 5).

Les décalages de fréquence observés entre les différents cycles sont dus à la mauvaise stabilité de fréquence à moyen terme du laser. Des décalages de même amplitude ont été aussi observés lorsque le laser est en fonctionnement à la pression normale.

V.- Conclusions

Nous avons montré que la pression extérieure fait partie des paramètres qui peuvent affecter la fréquence de certains lasers asservis.

L'amplitude des perturbations de fréquence dépend du procédé utilisé pour asservir les lasers et peut être différente pour des lasers apparemment du même type.

Il est toutefois très rassurant de constater que ces perturbations n'affectent que très peu la fréquence des lasers à hélium néon asservis sur l'iode, quelques 10^{-11} en valeur relative dans les cas extrêmes.

Il faut remarquer aussi que le BIPM avait fait un choix judicieux en adoptant un laser asservi sur l'iode plutôt qu'un autre type pour son gravimètre transportable.

Enfin, il faut attirer l'attention sur le fait que si l'on veut être assuré de connaître la fréquence des lasers asservis sur deux modes à mieux que 1×10^{-8} en valeur relative, il est indispensable de contrôler leur fréquence sur les lieux mêmes de leur utilisation ou à un endroit d'altitude égale.

Nous avons apprécié l'intérêt que Mr A. Sakuma a porté à cette expérience et l'aide précieuse et efficace fournie par MM. D. Rotrou, F. Perez, J. Dias, J. Labot et Mme A. Chartier. Nous les en remercions.

J.-M. Chartier

Août 1987.

Références

- [1] BALHORN, R., KUNZMANN, H., and LEBOWSKY, F. Frequency stabilisation of internal-mirror helium-neon Lasers, *Appl. Opt.*, 11, 1972, p. 742.
- [2] HANES, G.R., DAHLSTRON, C.E. Iodine hyperfine structure observed in saturated absorption at 633 nm, *Appl. Phys. Lett.*, 14, 1969, pp. 362- 364.
- [3] SAKUMA, A. Récents développements des mesures absolues de la pesanteur. Conférence au colloque national français de gravimétrie, Orléans, mai 1987.
- [4] CHARTIER, J.-M. Results of International Comparisons using methane-stabilized He-Ne lasers at 3,39 μm and iodine-stabilized He-Ne at 633 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-32, 1985, pp. 81-83.
- [5] CHARTIER, J.-M., HELMCKE, J. and WALLARD, A.J. International intercomparison of the wavelength of iodine stabilized lasers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-25, 1976, pp. 450-453.
- [6] Documents fournis par la firme Spectra-Physics France.

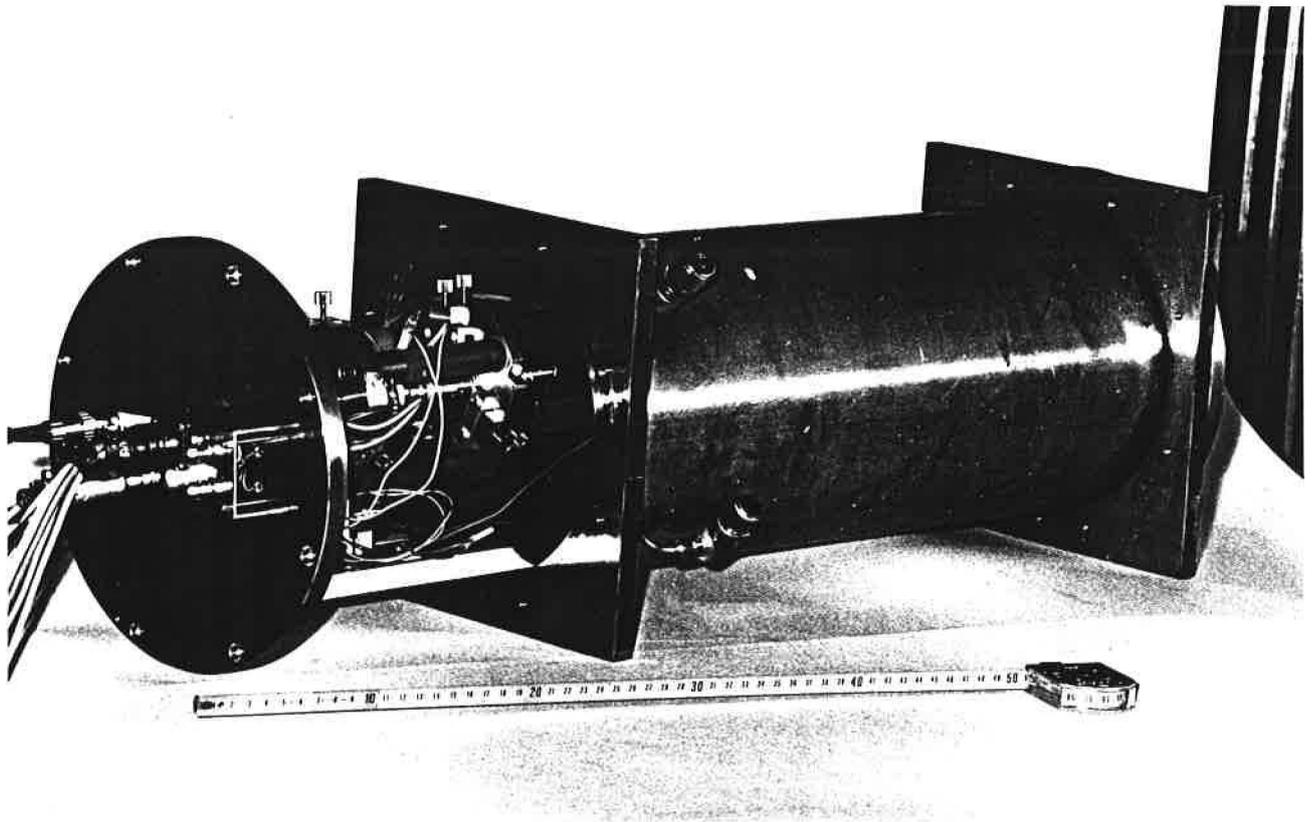


Fig. 1.- Laser BIPM6 ; laser à He-Ne asservi sur l'absorption saturée de l'iode et son caisson étanche.

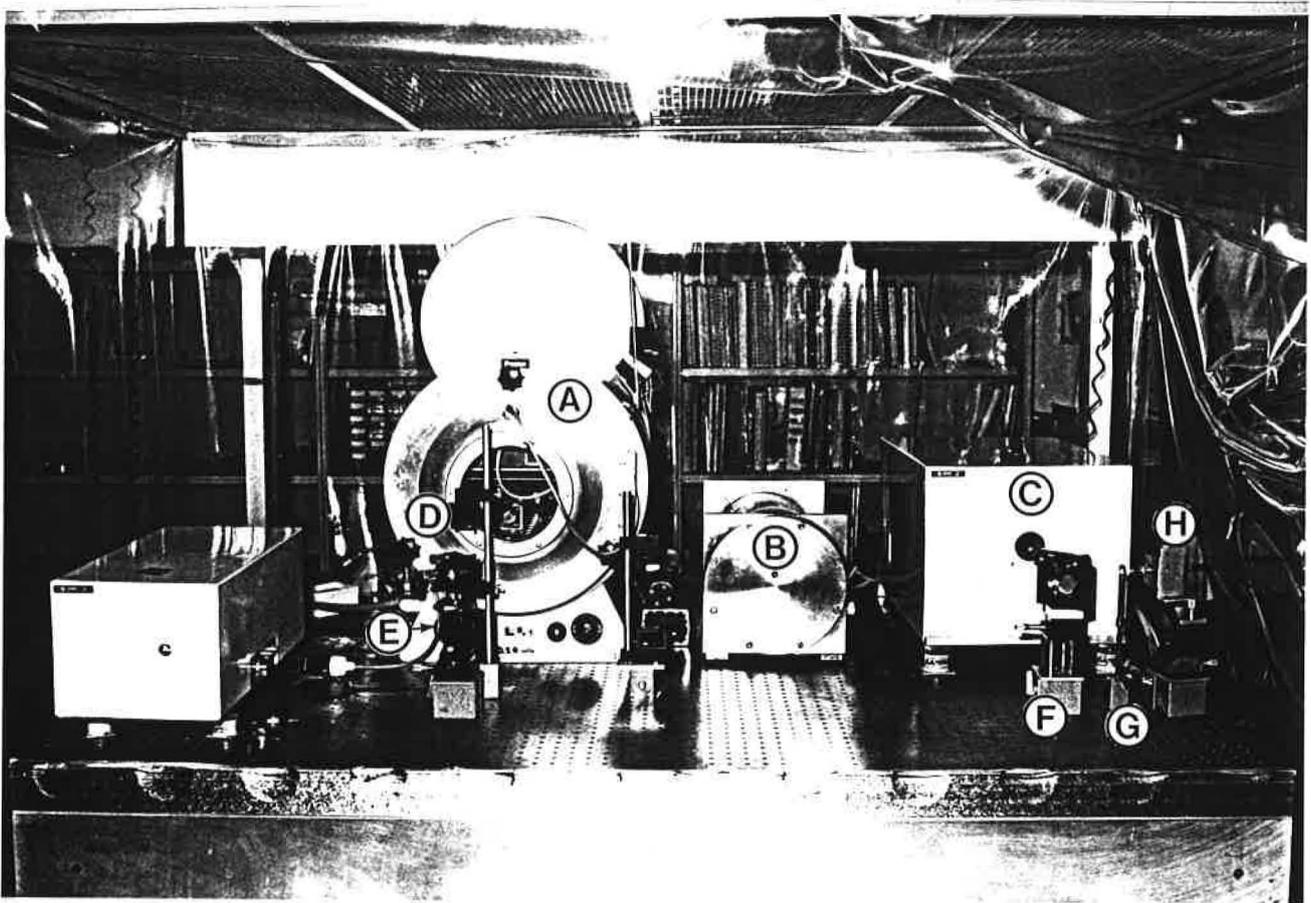


Fig. 2.- Dispositif expérimental utilisé pour les mesures, où :

A est le caisson dans lequel les lasers SP117 et SP117A ont pu être enfermés avec leur asservissement ;

B 'est le caisson du laser BIPM6 ;

C est l'enveloppe contenant le laser de référence BIPM2 ;

D, E, F, G, H sont les pièces optiques et électroniques utilisées pour le battement de fréquence entre les lasers contenus dans A et C.

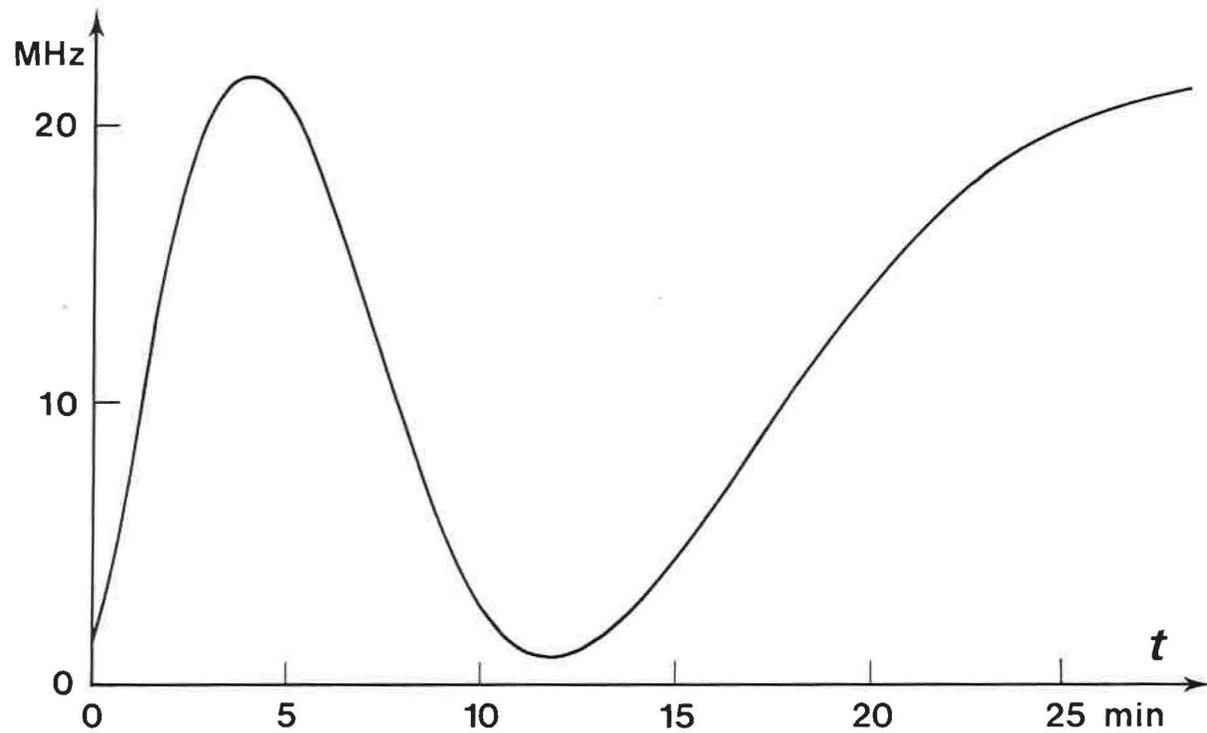


Fig. 3.- Réponse transitoire en fréquence du laser SP117 asservi sur deux modes, à un échelon de pression de $+ 6,6 \times 10^3$ Pa (≈ 50 Torr).

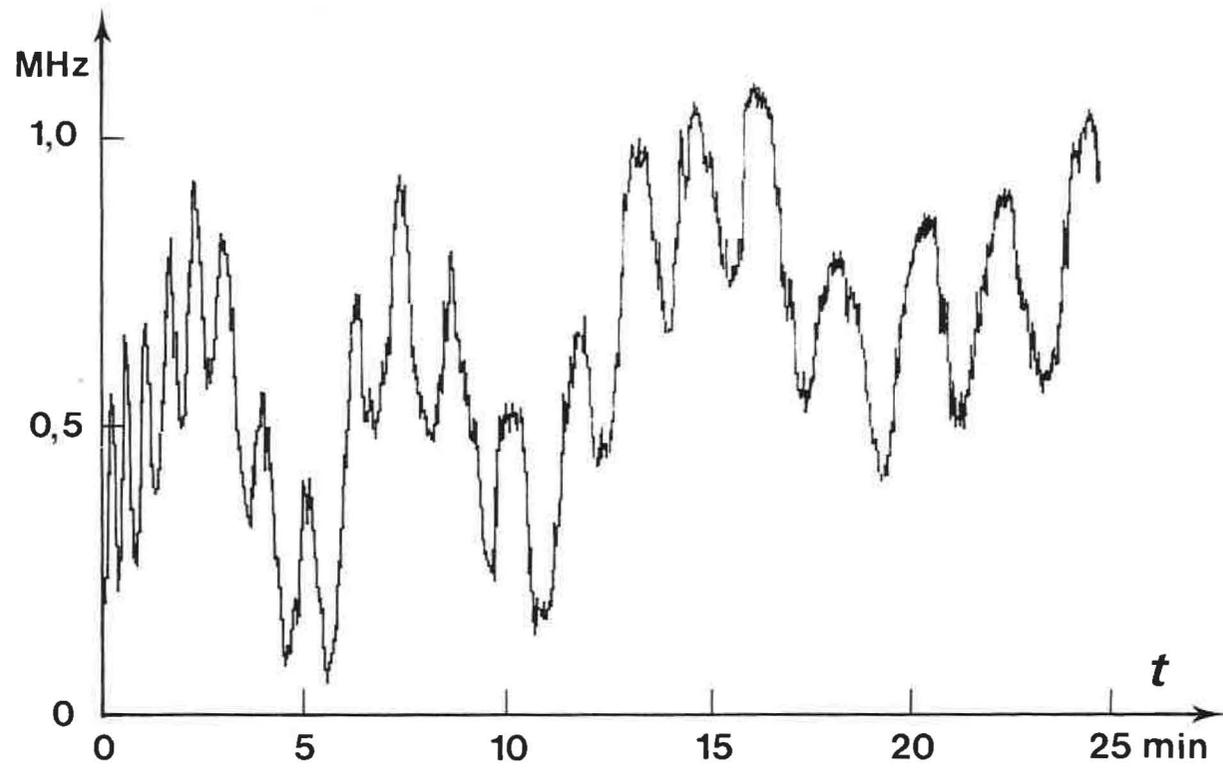


Fig. 4.- Réponse transitoire en fréquence du laser SP117A, asservi sur deux modes, à un échelon de pression de $+ 13,2 \times 10^3$ Pa (≈ 100 Torr).

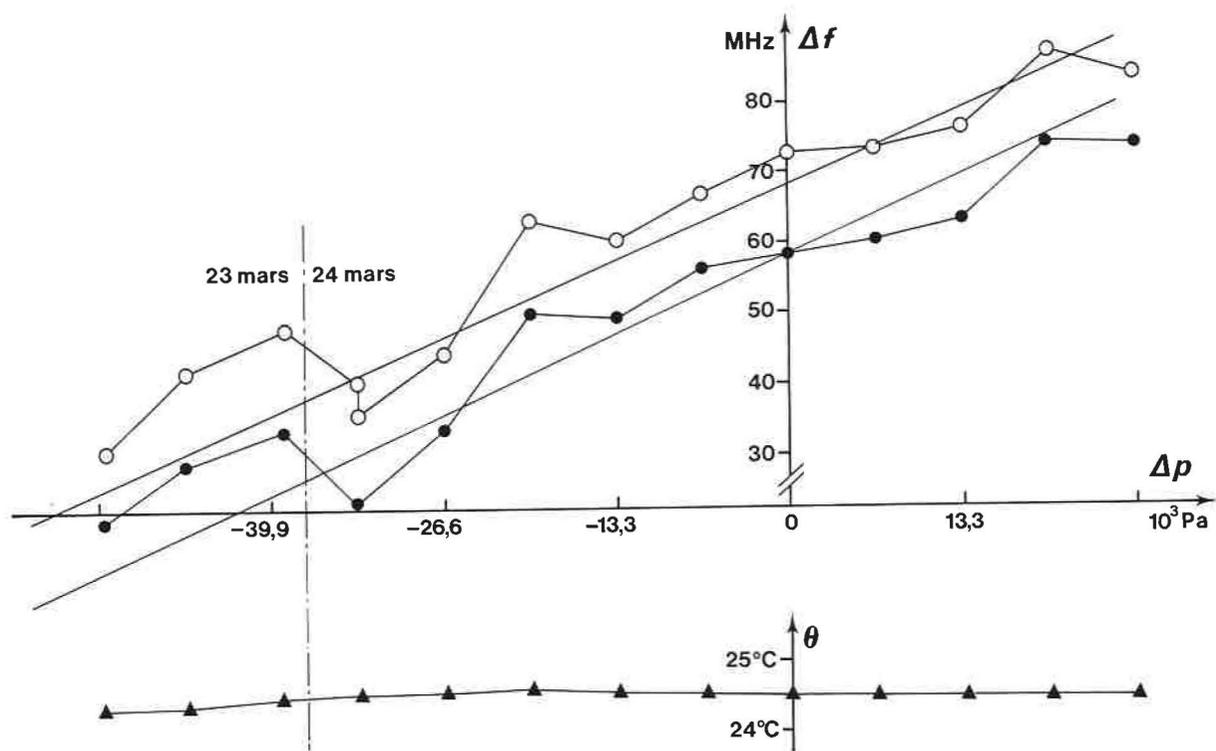


Fig. 5.- Variation de la fréquence du laser SP117, laser asservi sur deux modes, en fonction de la pression.

En ordonnée, fréquence du battement entre le laser SP117 et le laser de référence.

Les mesures repérées par des cercles blancs et par des cercles noirs ont été faites en utilisant respectivement les composantes g et f du laser de référence BIPM2. Les droites tracées ont été déterminées par la méthode des moindres carrés, elles ont comme pente $[785 \pm 78] \text{ Hz/Pa}$ et $[790 \pm 8] \text{ Hz/Pa}$.

La courbe inférieure représente l'évolution de la température dans le caisson contenant le laser pendant toute la durée des mesures.

Chaque point correspond à la moyenne de 100 mesures de durée 1 seconde chacune ; l'écart-type sur une mesure est de 160 kHz.

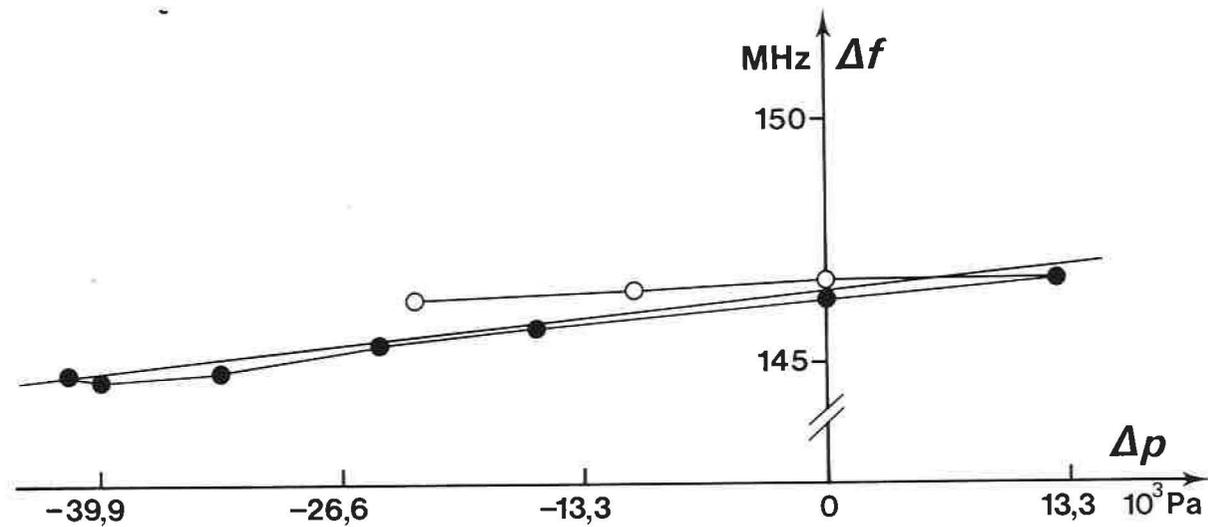


Fig. 6.- Variation de la fréquence du laser SP117A, laser asservi sur deux modes, en fonction de la pression.

En ordonnée, fréquence du battement entre le laser SP117A et le laser de référence BIPM2 asservi sur la compoante d.

Les mesures repérées par des cercles noirs ont été faites à pression croissante, celles repérées par des cercles blancs à pression décroissante.

La pente de la droite déterminée par la méthode des moindres carrés est de $[41,3 \pm 6,8]$ Hz/Pa.

Chaque point correspond à la moyenne de 100 mesures de 1 seconde chacune ; l'écart-type sur une mesure est de 125 kHz.

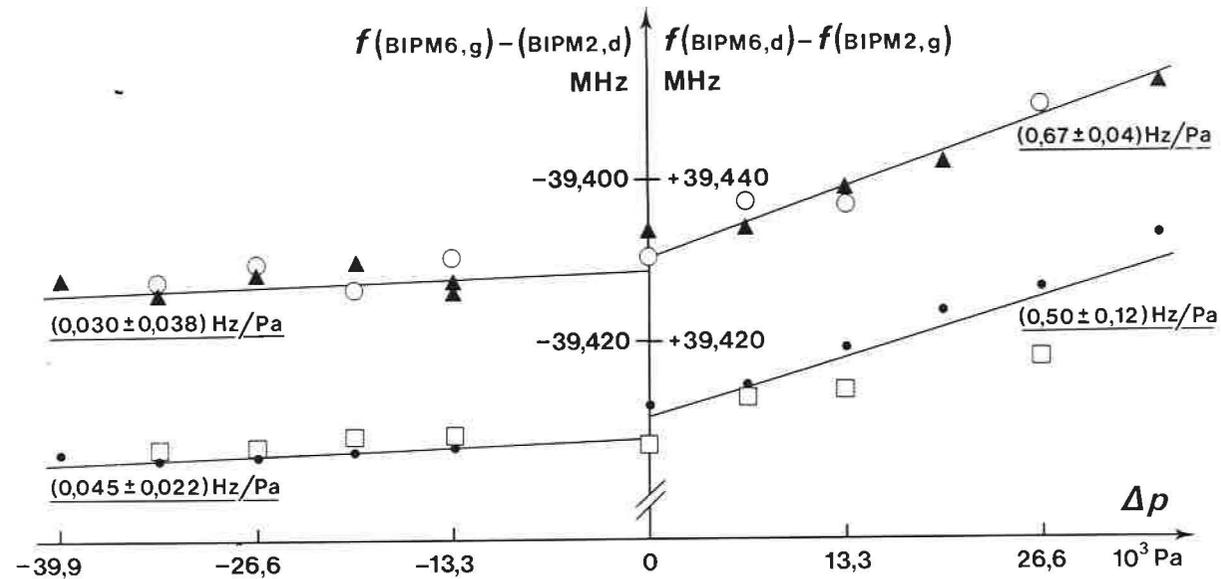


Fig. 7.- Variation de la fréquence du laser BIPM6, asservi sur l'iode, en fonction de la pression.

En ordonnée, fréquence du battement entre les lasers BIPM6 et BIPM2.

La graduation à gauche de l'axe correspond aux mesures repérées par des points (mesures faites à pression croissante) et par des carrés (mesures faites à pression décroissante) de l'intervalle de fréquence $f(\text{BIPM6,g}) - f(\text{BIPM2,d})$. La graduation à droite de l'axe correspond aux mesures repérées par des triangles (mesures à pression croissante) et par des cercles (mesures à pression décroissante) de l'intervalle de fréquence $f(\text{BIPM6,d}) - f(\text{BIPM2,g})$.

Chaque point correspond à la moyenne de 100 mesures de 1 seconde chacune ; l'écart-type sur une mesure est de 2,0 kHz.

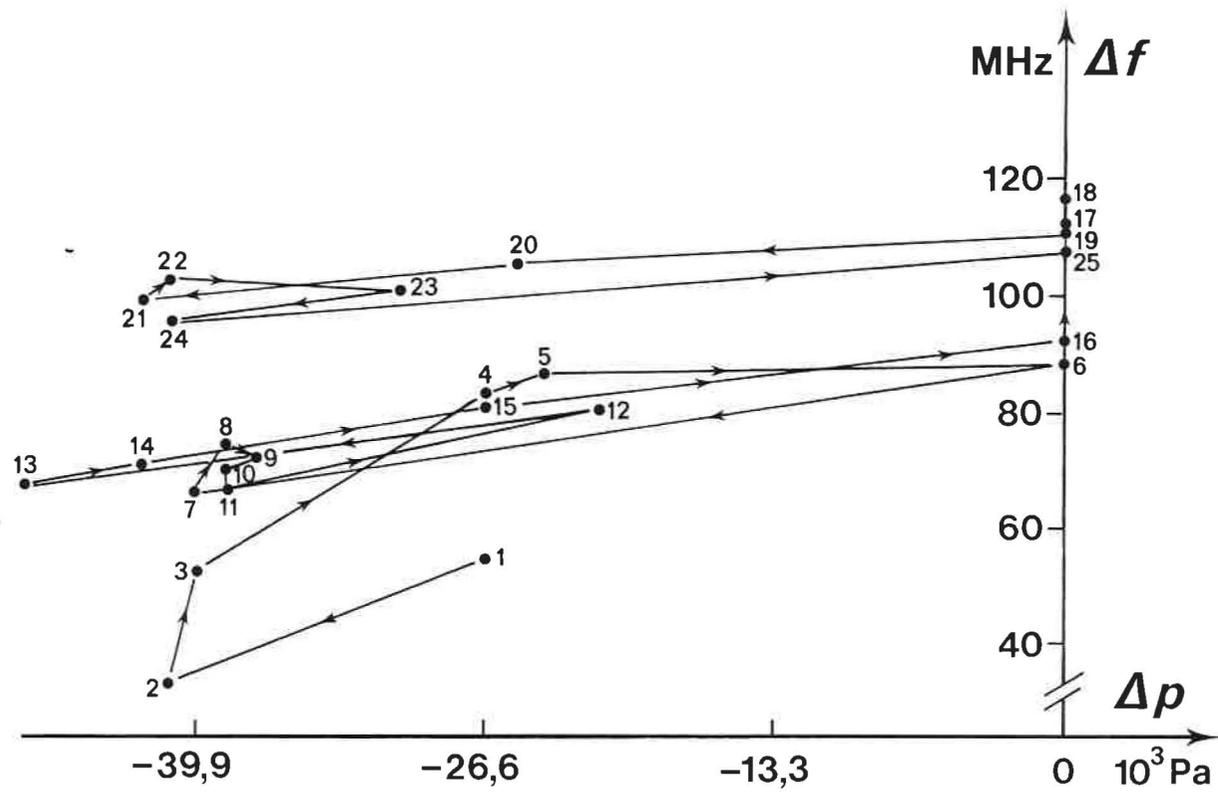


Fig. 8.- Variation de la fréquence du laser SP117, à moyen terme en fonction de la pression.

En ordonnée, fréquence du battement entre le laser SP117 et le laser BIPM2 asservi sur la composante g. Nous avons numéroté les mesures par ordre chronologique de 1 à 25.

Les mesures numérotées 4 à 16, du 15 au 17 avril conduisent à un coefficient de variation de fréquence de $[459 \pm 51]$ Hz/Pa ; celles numérotées 17 à 25, des 21 et 22 avril conduisent à un coefficient de variation de fréquence de $[307 \pm 56]$ Hz/Pa.