

Comparaison internationale IMM(URSS) - BIPM
de lasers He-Ne asservis sur l'iode

J.-M. Chartier, R. Felder

Introduction

La comparaison a eu lieu au BIPM du 16 novembre au 15 décembre 1978. MM. B. KAPRALOV et Y. EFFREMOV qui ont participé aux mesures, avaient amené de l'IMM deux lasers et un asservissement ; un seul de ces deux lasers a été utilisé pour la comparaison : IMM1. Le BIPM disposait de deux lasers avec leur asservissement : BIPM2, qui a déjà participé à l'ensemble des comparaisons internationales [1] a été considéré comme étalon principal et BIPM3 comme témoin (Fig. 1).

Chacun des trois lasers possède une cuve contenant de l'iode 127 et un tube laser contenant de l'hélium et du néon naturels. Le tube laser de IMM1 est un tube à cathode chaude de fabrication soviétique d'environ 20 cm de longueur. Celui des lasers du BIPM est un CW Radiation (CW 301) de 25 cm de longueur. La longueur des cuves à iode est 8 cm pour IMM1, 10 cm pour BIPM2 et BIPM3. Chaque cavité optique comporte un miroir concave ($R = 1$ m pour IMM1, $R = 0,5$ m pour BIPM2 et BIPM3) et un miroir plan. Ces miroirs ont comme facteur de réflexion : $\approx 99,7$ % pour les lasers du BIPM, 99,7 % et ρ_{\max} pour IMM1. Toutes les mesures effectuées sont des mesures de fréquence de battements. Ce sont donc des mesures relatives. Nous utilisons pour ces mesures un compteur calculateur.

La puissance moyenne des faisceaux lasers côté mesure était de l'ordre de 70 μ W pour IMM1 et 50 μ W pour BIPM2, BIPM3. Le signal de battement focalisé sur une photodiode à avalanche avait un rapport signal sur bruit de l'ordre de 40 dB. D'autre part, côté asservissement, c'est la dérivée troisième de l'intensité qui a été utilisée pour l'asservissement.

Mesures

1 - Stabilité

La stabilité à court terme est définie par l'écart-type d'Allan relatif :

$$\sigma(2, \tau, \tau) = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{\sum (f_{i+1} - f_i)^2}{2n}}$$

Nous avons d'une part déterminé la stabilité de IMM1 et BIPM2 ; puis de BIPM2 et BIPM3. Dans le premier cas (Fig. 2) ; pour $\tau = 90$ s on obtient pour les deux lasers $\sigma \approx 6 \times 10^{-12}$ en valeur relative. Dans le second cas, pour le même τ , nous avons obtenu $\sigma \approx 1 \times 10^{-12}$ toujours pour les deux lasers, mais avec un minimum de 2×10^{-13} pour $\tau = 5400$ s.

2 - Reproductibilité et répétabilité

2-1 - Variations de la fréquence des lasers en fonction de l'amplitude de modulation.

Cette variation a été déterminée antérieurement [2] sur BIPM2.

Pour les composantes d à j, pour des modulations crête à creux comprises entre 2 et 10 MHz, le coefficient de variation et son écart-type (réduction par les moindres carrés, programme CADP), nous avons obtenu :

pour la composante d :	$[- 4,3 \pm 0,6]$	kHz par MHz de modulation crête à creux
"	e :	$[- 5,4 \pm 0,2]$ "
"	f :	$[- 4,7 \pm 0,3]$ "
"	g :	$[- 6,9 \pm 0,2]$ "
"	h :	$[- 3,2 \pm 0,2]$ "
"	i :	$[- 5,0 \pm 0,3]$ "
"	j :	$[- 6,1 \pm 0,2]$ "

Nous avons mesuré cette variation sur IMM1 pour les pics d à g entre 6 et 9 MHz (Fig. 3) ; les mesures à 5 MHz, trop imprécises, n'ont pas été retenues. Pour le coefficient de variation et son écart-type, nous avons obtenu :

pour la composante d :	$[- 3,7 \pm 1,3]$	kHz par MHz de modulation crête à creux
"	e :	$[- 3,9 \pm 1,1]$ "
"	f :	$[- 2,8 \pm 1,4]$ "
"	g :	$[- 0,8 \pm 2,2]$ "

Malgré les écarts-types importants, il semble bien que l'effet est plus faible sur IMM1 que sur BIPM2. Nous pensons que cela est lié à la géométrie de la cavité. Le miroir concave de IMM1 a un rayon deux fois plus grand que celui du miroir concave de BIPM2. Nous avons antérieurement remarqué que cet effet était encore plus important sur des lasers comportant deux miroirs concaves.

2-2 - Variations de la fréquence des lasers en fonction de la pression d'iode.

Cet effet a été étudié en modifiant la température du point froid de la cuve à iode, sur IMM1, pour les composantes d, e, f, g. La température du point froid de la cuve à iode variait de 12,5 à 19,1 °C ce qui correspond à des variations de pression de 14,1 à 24,9 Pa (Fig. 4). Après réduction des mesures par la méthode des moindres carrés, on obtient les coefficients de variation :

pour la composante d :	$[- 10,6 \pm 1,3]$	kHz/Pa
"	e :	$[- 10,5 \pm 1,9]$ "
"	f :	$[- 8,8 \pm 2,2]$ "
"	g :	$[- 9,0 \pm 2,3]$ "

A titre de comparaison, les valeurs pour le laser BIPM2 sont :

pour la composante d :	$[- 6,4 \pm 0,3]$	kHz/Pa
"	e :	$[- 6,3 \pm 0,3]$ "

2-3 - Répétabilité

Pour les trois lasers et pour toutes les mesures, l'amplitude de modulation crête à creux était de 6 MHz et la pression des cuves à iode stabilisée à 17,3 Pa (température du point froid : 15 °C).

Chaque laser est asservi successivement sur chacune des composantes d à g. Une série de mesures consiste à déterminer les intervalles de fréquence entre deux lasers pour toutes les combinaisons deux à deux des composantes. Les résultats forment une matrice 4 x 4. Dans le cas général, les mesures correspondant à la même composante pour les deux lasers (diagonale de la matrice) sont pratiquement impossibles, les battements ayant une fréquence moyenne nulle avec une excursion en fréquence correspondant à la somme des amplitudes de modulation (en fréquence) des deux lasers. Dans le cas particulier des deux lasers du BIPM, on peut synchroniser les modulations en fréquence, ce qui réduit cette excursion de fréquence à quelques centaines de kilohertz ; on peut alors utiliser des amplificateurs à large bande couvrant la fréquence zéro, et un comptage réversible construit par J. Hostache ; le compteur réversible utilise les deux signaux de battements, plus ou moins en quadrature, que l'on recueille d'une part sur le faisceau transmis, d'autre part sur le faisceau réfléchi par la lame mélangeuse (celle-ci doit être partiellement absorbante).

La différence de fréquence entre deux lasers est déterminée à partir de chaque matrice par la méthode des moindres carrés ; chaque intervalle est mesuré trois fois sur une période de 10 s, l'écart-type entre ces mesures successives est de l'ordre de 5 kHz, ce qui correspond à 1×10^{-11} en valeur relative.

Entre le 27 novembre et le 11 décembre, douze séries de comparaisons ont été faites entre IMM1 et BIPM2 (fig. 5), trois comparaisons de vérification entre BIPM2 et BIPM3.

On a obtenu pour :

$$(IMM1) - (BIPM2) = - 0,15 \text{ kHz}$$

avec un écart-type sur une série de comparaison de 58,6 kHz

$$(BIPM3) - (BIPM2) = - 3,6 \text{ kHz}$$

avec un écart-type sur une série de comparaison de 8 kHz.

Les écarts-types obtenus dans les comparaisons (IMM1) (BIPM2) proviennent essentiellement de la qualité extrêmement variable du rapport signal sur bruit de la dérivée troisième de l'intensité sur IMM1.

Conclusion

En résumé, on peut dire que le laser IMM1 a :

- une stabilité à court terme qui présente un minimum égal à 6×10^{-12} pour $T = 90$ s et à long terme (sur un mois) qui est de l'ordre de $1,2 \times 10^{-10}$ (58 kHz),

- un effet d'amplitude de modulation dont le coefficient moyen de variation est de l'ordre de 5,1 kHz par MHz de modulation crête à creux,

- un effet de pression d'iode dont le coefficient moyen de variation est de l'ordre de 9,7 kHz/Pa.

Bibliographie

1. CHARTIER (J.-M.), AVRONS (D.), Comparaisons internationales de lasers He-Ne asservis sur l'iode, *PTB-Bericht, ME17*, mai 1977, pp. 133-138.
2. CHARTIER (J.-M.), HELMCKE (J.), WALLARD (A.), International comparison of the wavelength of iodine stabilized lasers, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. *IM-25*, No. 4, décembre 1976, pp. 450-453.

4 avril 1979

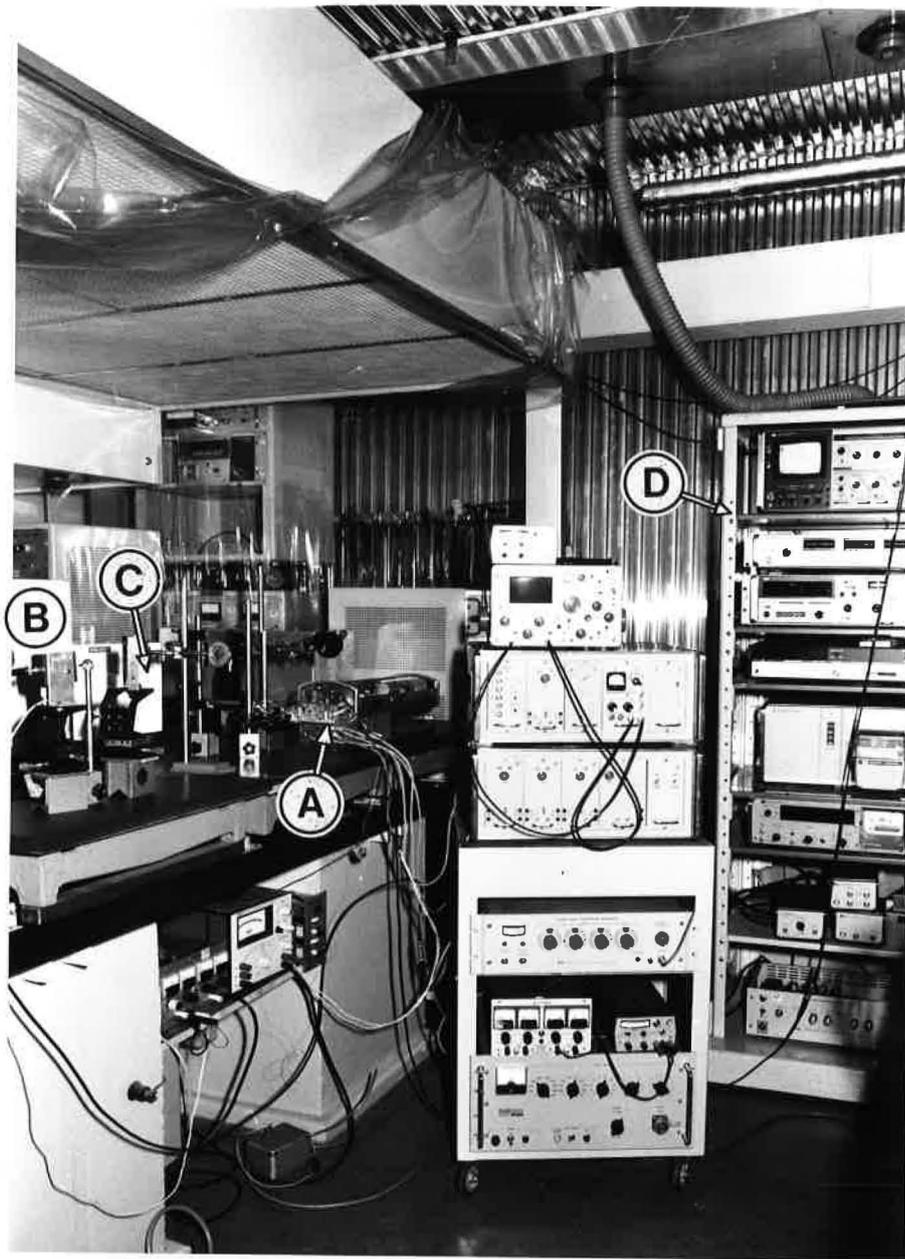


Fig. 1.- Vue d'ensemble des appareillages.

A : laser IMM1

B : " BIPM2

C : " BIPM3

D : appareillage pour la mesure des battements

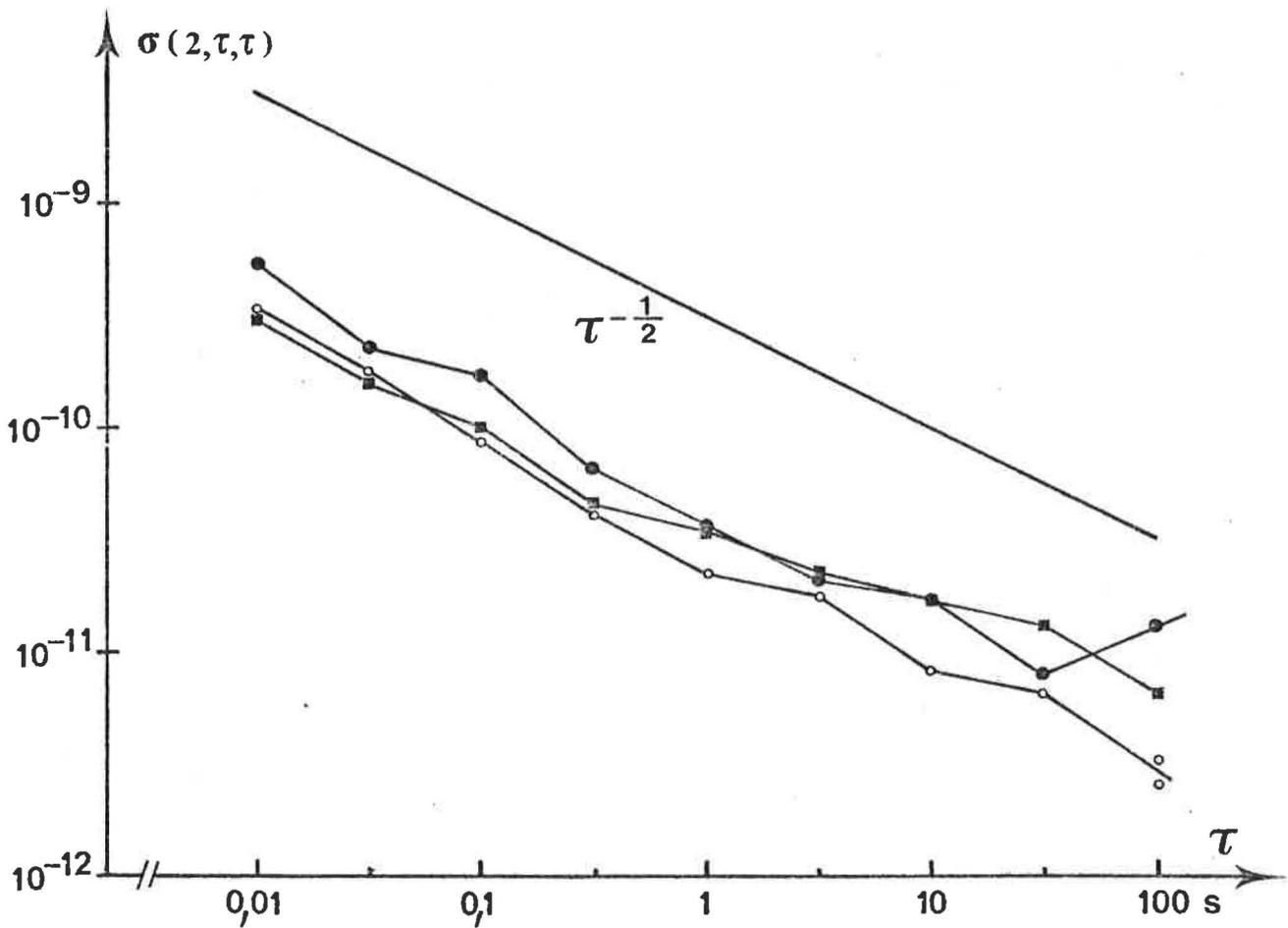


Fig. 2.- Ecart-type d'Allan relatif entre IMM1 et BIPM2

- mesures du 27 novembre
- " 28 novembre
- " 8 décembre

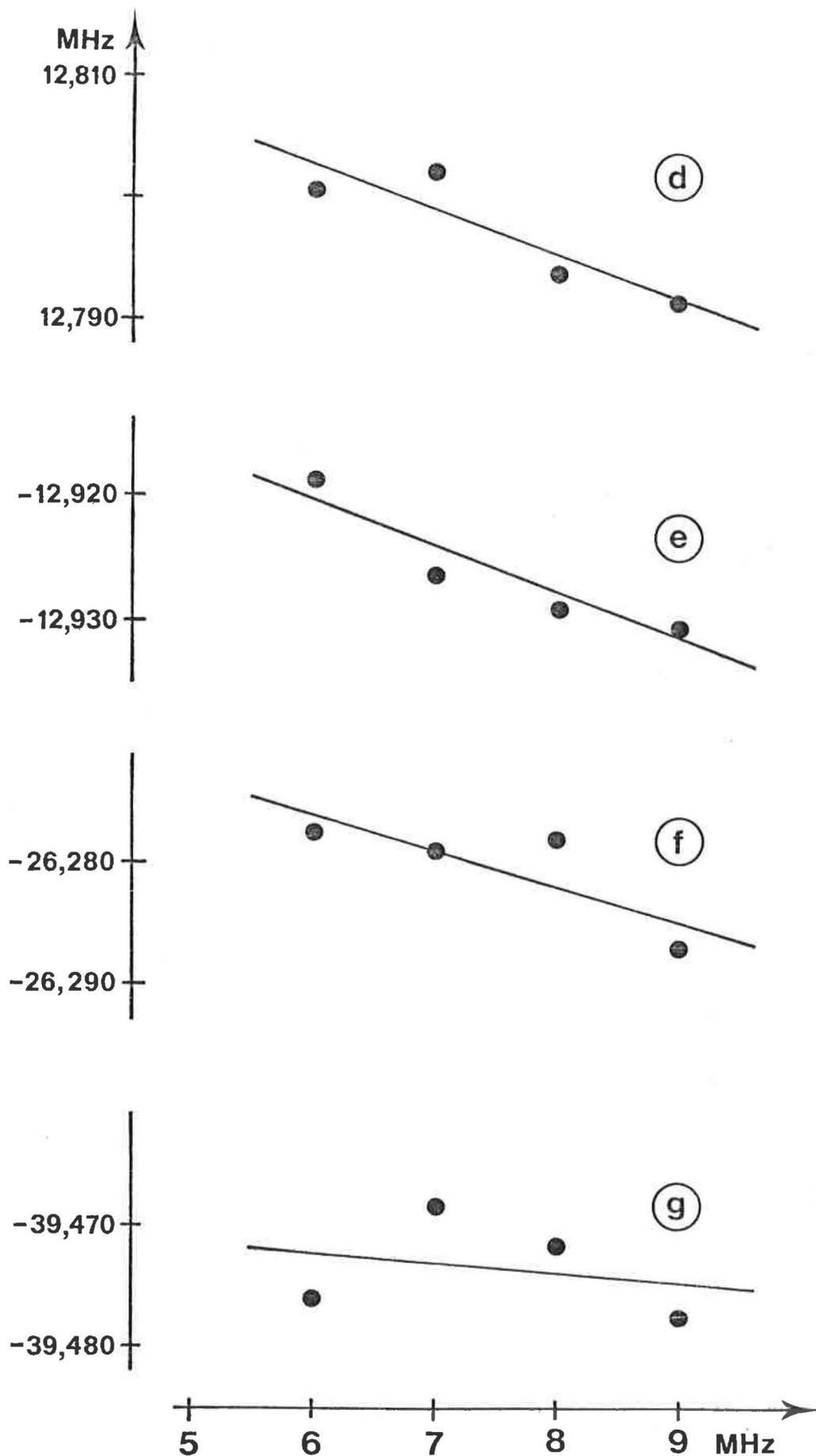


Fig. 3.- Variation de la fréquence du laser IMMI avec l'amplitude de modulation.

En abscisse, amplitude de modulation crête à creux ; en ordonnée, fréquence du battement avec le laser de référence BIPM2 asservi sur la composante e pour la 1^{re} série de mesures et sur la composante d pour les 3 autres.

Le laser IMMI est asservi sur les composantes respectives d,e,f,g. Les droites ajustées par la méthode des moindres carrés, correspondent aux valeurs numériques données dans le texte.

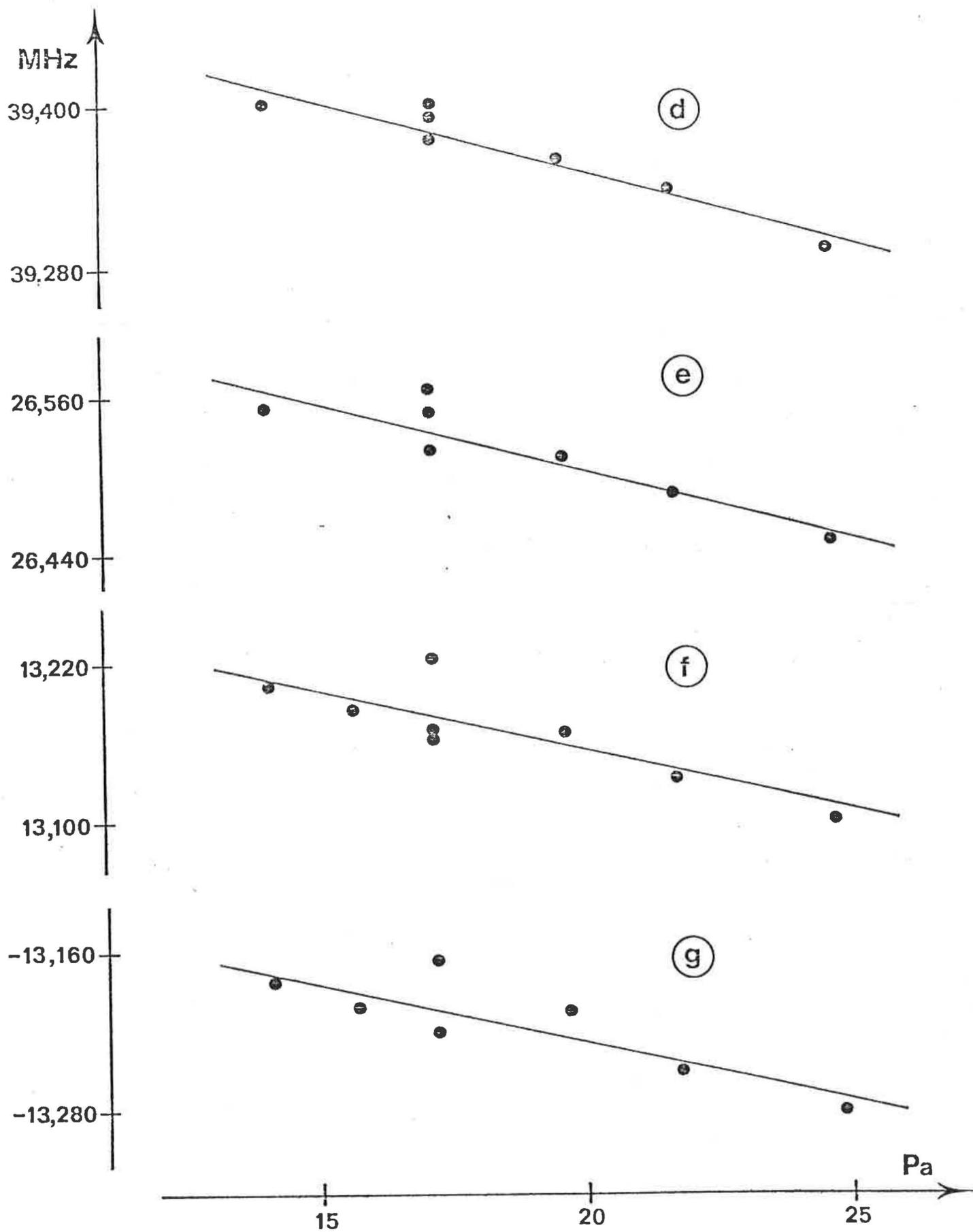


Fig. 4.- Variation de la fréquence du laser IMM1 avec la pression d'iode (composantes d, e, f, g)

En abscisse, pression de l'iode, déduite de la température du point froid ; en ordonnée, fréquence des battements avec le laser de référence BIPM2, asservi sur la composante g pour les 3 premières séries de mesures et sur la composante f pour la dernière. Le laser IMM1 est asservi sur les composantes respectives d, e, f, g. Les droites ajustées par la méthode des moindres carrés, correspondent aux valeurs numériques données dans le texte.

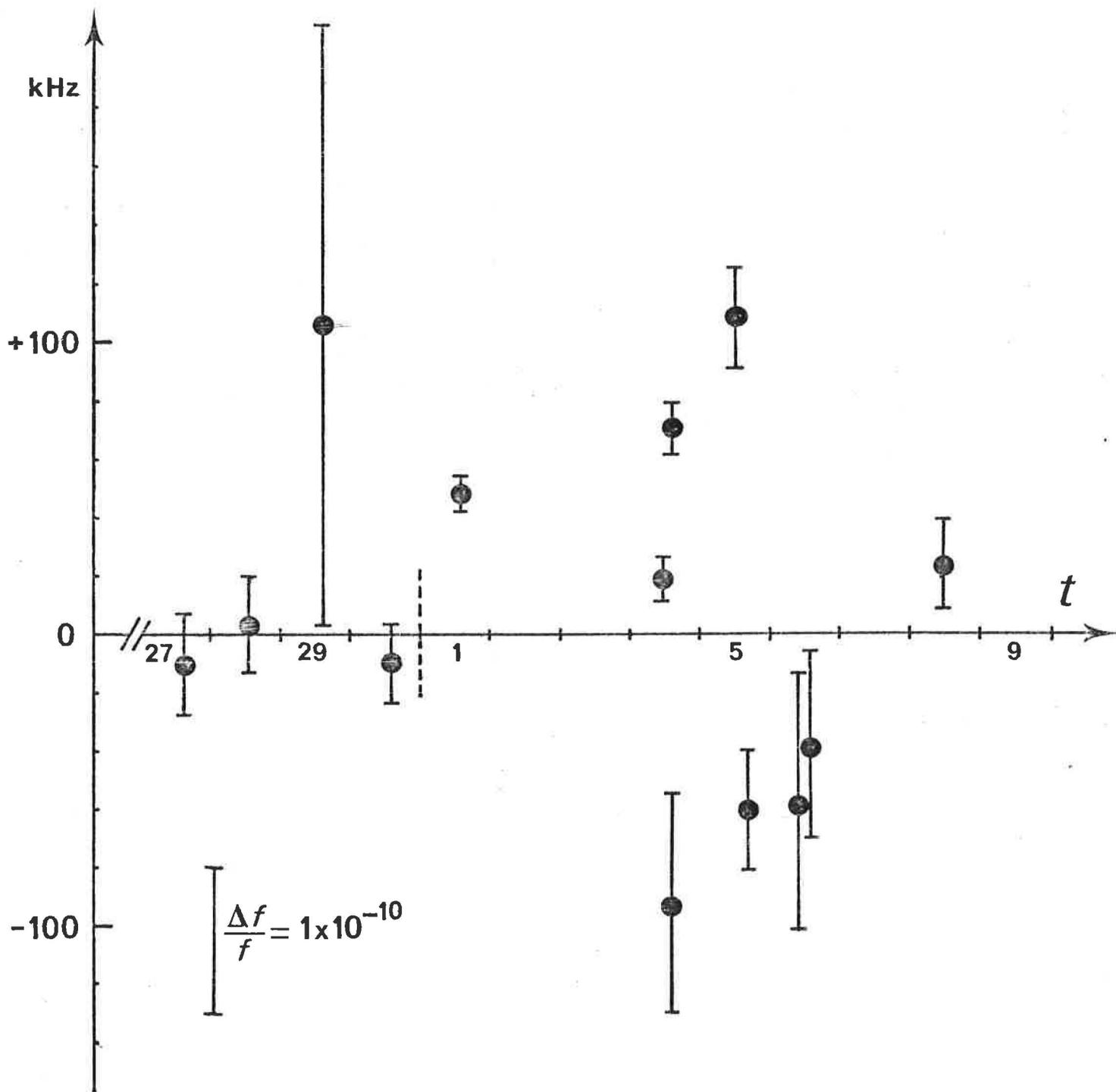


Fig. 5.- Répétabilité des mesures sur deux semaines.

En ordonnée, fréquence des battements entre IMM1 et BIPM2 ; en abscisse, date de la mesure, entre le 27 novembre et le 8 décembre 1978.