

Comparaison internationale NPL-BIPM
de lasers He-Ne asservis sur le méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$)

R. FELDER, B. JOLLIFFE, J.-M. CHARTIER

I. Introduction

Plusieurs comparaisons internationales de lasers He-Ne asservis sur l'iode ($\lambda = 0,633 \mu\text{m}$) ont eu lieu durant les cinq dernières années ; ces comparaisons ont permis à chacun des participants d'améliorer la qualité de ses étalons et la découverte d'effets systématiques ; elles ont également eu pour effet l'établissement d'échanges fructueux entre chaque laboratoire et mis en évidence le rôle important du BIPM.

Bien que les lasers He-Ne asservis sur le méthane ($\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) présentent des qualités intrinsèques supérieures aux lasers à $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$, il n'y a eu à notre connaissance qu'une seule comparaison internationale [1] pour ce type d'étalon.

Le BIPM quant à lui ne disposait jusqu'à présent que du laser construit par le JILA. Pour pouvoir répondre aux demandes éventuelles de comparaison, il a donc construit deux lasers asservis sur l'absorption du méthane (BICH4.3 et BICH4.6) dont les performances sont testées lors de cette comparaison NPL-BIPM, et un laser sans cuve d'absorption utilisé comme laser "esclave" dans les techniques de mesure par décalage de fréquence.

II. Programme expérimental

Le NPL avait amené également deux lasers asservis (NPL1 et NPL2) et un laser "esclave".

Les caractéristiques géométriques et optiques des différents lasers sont résumées dans le tableau 1 :

laser	longueur de la cavité	miroirs		cellule CH ₄		détecteur
		rayon de courbure	facteur de réflexion	longueur	pression	
NPL1	0,60 m	2,00 m	0,96	≈ 0,2 m	1,50 Pa	In Sb S = 16 mm ²
		5,00 m	0,95			
NPL2	0,60 m	2,00 m	0,91	≈ 0,2 m	1,50 Pa	In Sb S = 16 mm ²
		5,00 m	0,95			
BICH4.3	0,57 m	2,17 m plan	0,97 0,97	0,2 m	1,20 Pa	In As S = 0,02 mm ²
BICH4.6	0,57 m	1,20 m	0,74	0,2 m	1,33 Pa	In As S = 0,02 mm ²
		3,00 m	0,74			

Tableau 1 : caractéristiques des lasers He-Ne asservis sur le méthane.

Les asservissements des lasers du BIPM utilisaient la technique de la modulation sinusoïdale de la longueur de la cavité, avec détection de la dérivée troisième (type 1) ; la fréquence de modulation était de 1 092 Hz.

Les asservissements des lasers du NPL pouvaient fonctionner soit sur le même principe, soit sur celui de la "modulation sinusoïdale de fréquence" (type 2) ; la fréquence de modulation était de 680 Hz.

Les cavités NPL1 et NPL2 comportaient un diaphragme d'ouverture réglable, placé entre la cuve d'absorption et le tube amplificateur.

L'essentiel de la comparaison a porté sur l'étude des lasers de référence (NPL1 et BICH4.6). Toutefois des mesures de fréquence entre ceux-ci et les lasers témoins de chaque laboratoire ont eu lieu. Le programme fixé était le suivant :

- a) étude de la répétabilité ;
- b) étude de l'effet de l'amplitude de la modulation ;
- c) étude des effets de géométrie ;
- d) étude des effets électroniques ;
- e) estimation de la reproductibilité.

III. Résultats

III a) Etude de la répétabilité

Les lasers étant asservis en type 1 et les diaphragmes de NPL1 et NPL2 ouverts au maximum nous avons effectué chaque jour deux séries de dix mesures (une le matin, une le soir) pour des temps de comptage de dix secondes. L'écart-type à l'intérieur d'une série a toujours été inférieur à 100 Hz ($1,2 \times 10^{-12}$) et caractérise la stabilité sur dix secondes de deux lasers.

La figure 1 donne les différences observées journalièrement entre lasers. Il semblerait que la répétabilité soit moins bonne sur les lasers du BIPM ; en fait d'une part nous n'avons retouché à aucun réglage optique ou électronique des lasers du BIPM durant toute la durée de la comparaison, ce qui montre la stabilité sur trois semaines de nos ensembles ; d'autre part il faut remarquer que la plupart des mesures ont été faites à une largeur de modulation de 940 kHz, ce qui correspond à une largeur optimale pour les lasers du NPL mais non pour les lasers du BIPM.

III b) Etude de l'effet de l'amplitude de la modulation

La fréquence de battement de deux lasers est modulée en fréquence par l'amplitude résultante des amplitudes de modulation de chacun d'eux. La fréquence de battement étant généralement très grande devant les fréquences des modulations, on récupère à la sortie d'un convertisseur fréquence-tension l'amplitude résultante des amplitudes de modulation des deux lasers. Si on supprime la modulation de l'un des lasers on a donc un signal dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude de modulation de l'autre laser.

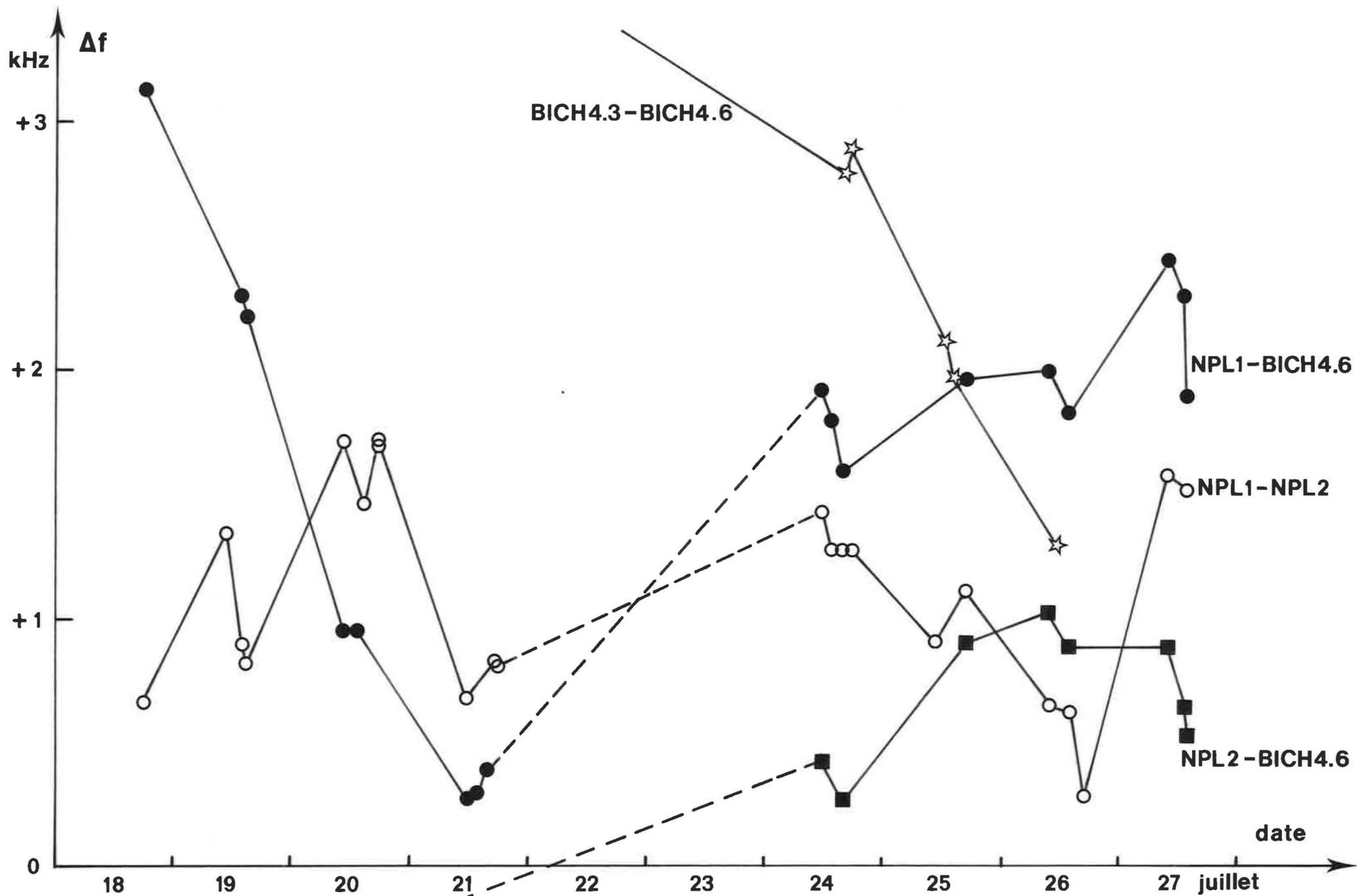


Fig. 1.- Différences de fréquence observées pendant la durée de la comparaison.

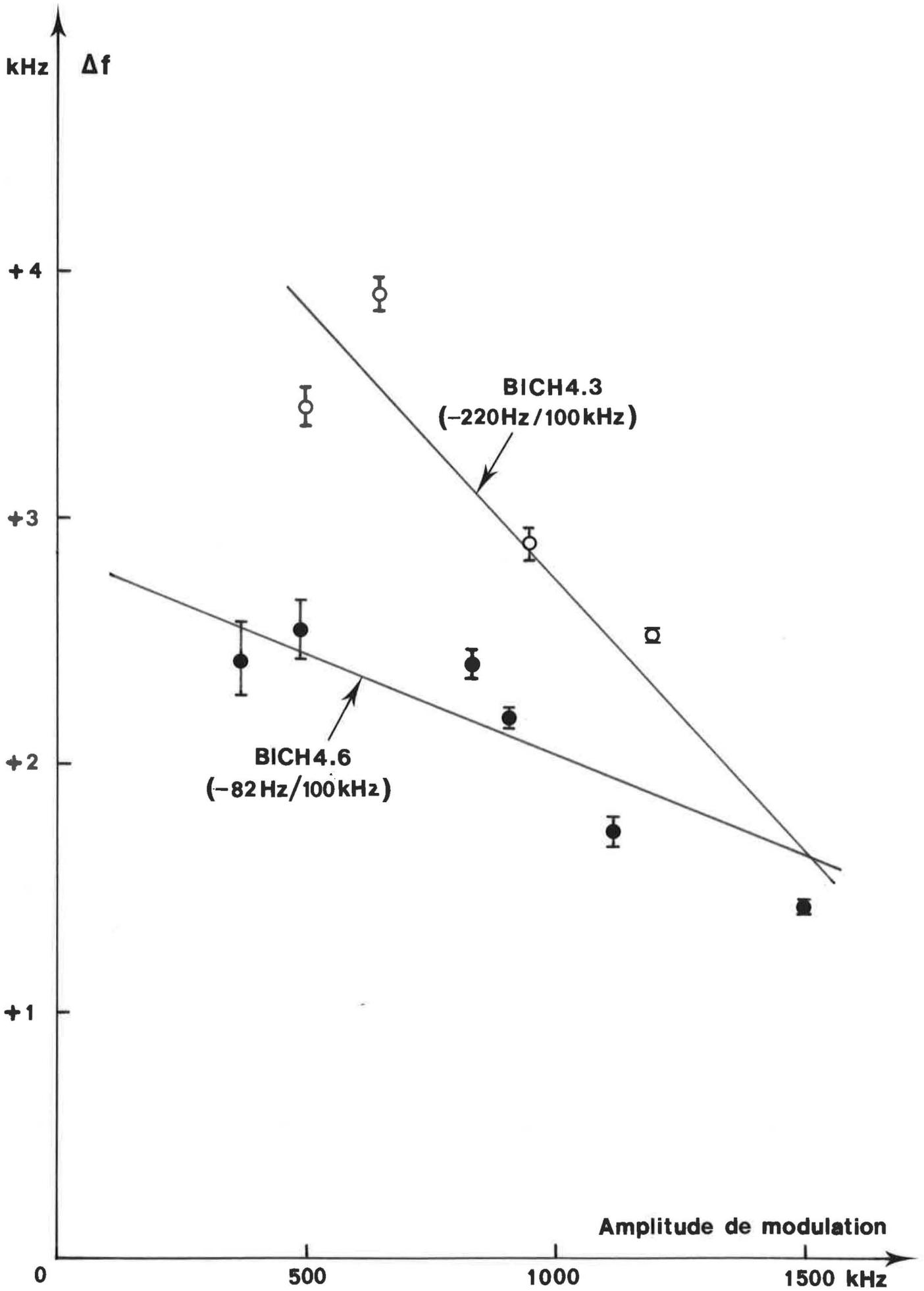


Fig. 2.- Effet de l'amplitude de la modulation BICH4.3 - BICH4.6.

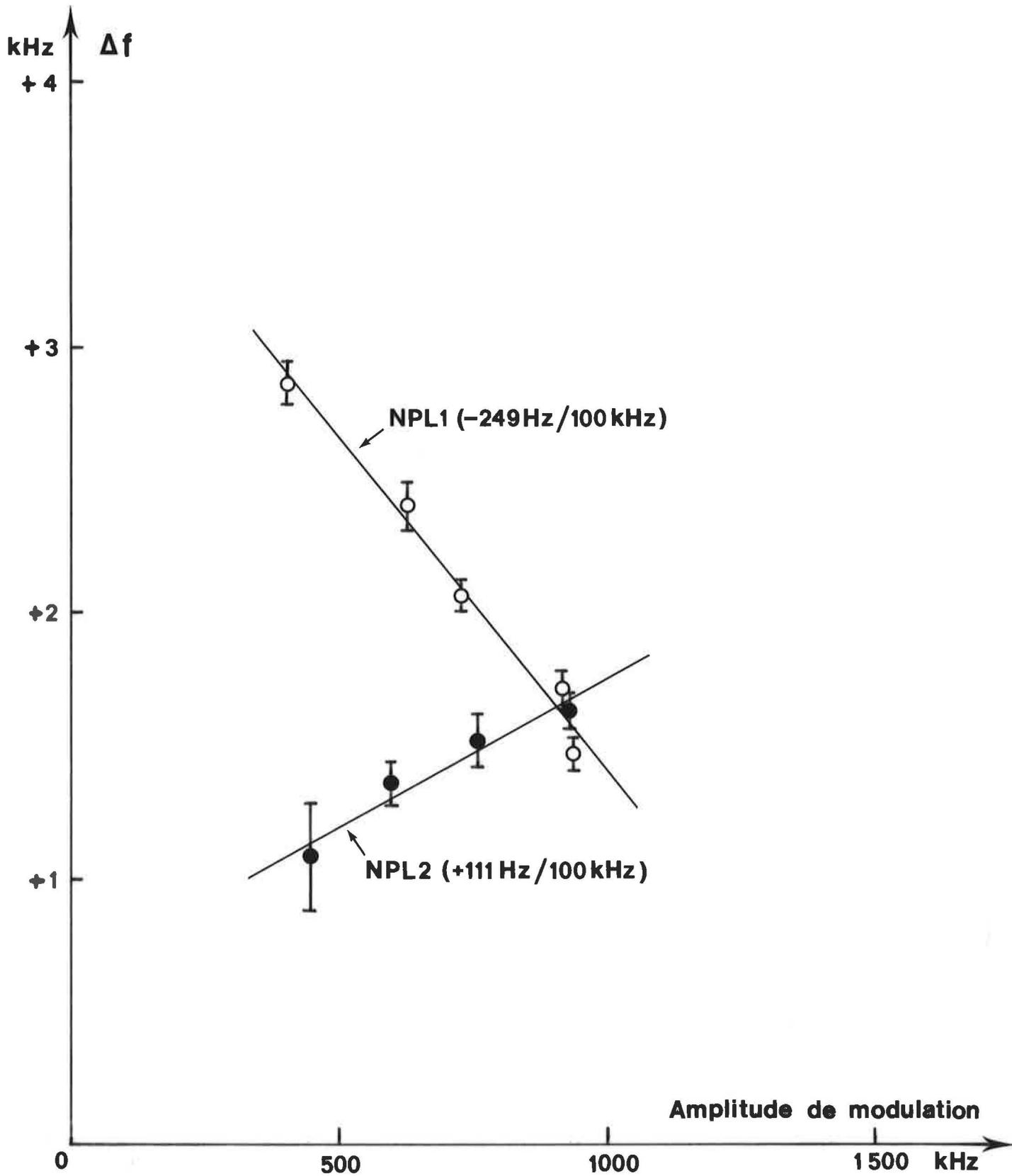


Fig. 3.- Effet de l'amplitude de modulation NPL1 - NPL2.

C'est ce principe qui a été utilisé pour la mesure des amplitudes de modulation, les lasers n'étant pas stabilisés.

Les figures 2 et 3 font apparaître les résultats obtenus pour chacun des lasers.

En ce qui concerne les lasers BICH4.3 et BICH4.6 les valeurs obtenues pour une faible amplitude de modulation sont entachées d'une incertitude importante. L'élimination de ces points par exemple permettrait d'obtenir des pentes presque similaires.

Les pentes calculées par la méthode des moindres carrés (programme CADP) sont les suivantes :

NPL1 :	- 249 Hz/100 kHz	crête à creux de modulation		
NPL2 :	+ 111 Hz/100 kHz	"	"	"
BICH4.3 :	- 220 Hz/100 kHz	"	"	"
BICH4.6 :	- 82 Hz/100 kHz	"	"	"

Les effets observés ne semblent donc essentiellement liés ni aux rayons de courbure des miroirs, ni à leurs facteurs de réflexion, ni à la longueur de la cavité.

III c) Etude des effets de géométrie

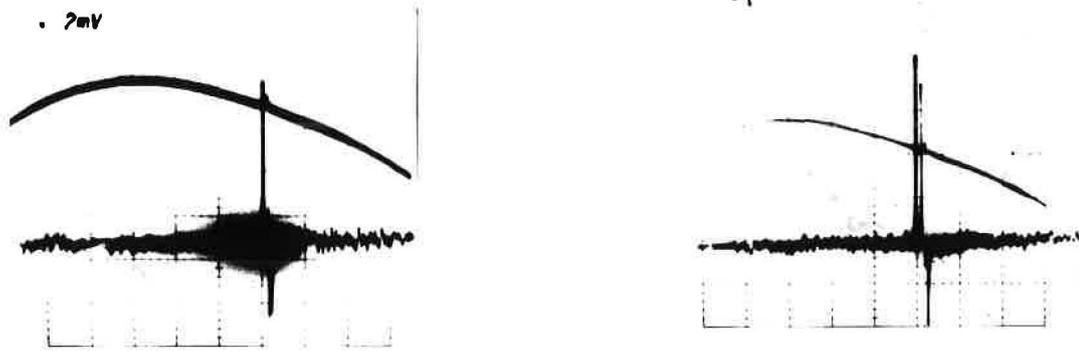
Cette étude a été faite sur les lasers NPL1 et NPL2 pour des ouvertures de diaphragme de 2,7 mm et maximum (≈ 10 mm) dans les deux types possibles de stabilisation.

Les figures 4 et 5 montrent les modifications correspondantes de la courbe de gain et du pic du méthane avec l'ouverture du diaphragme.



4 a) diaphragme ouvert à 2,7 mm 4 b) diaphragme ouvert à 10 mm

Fig. 4. - modifications de la courbe de gain et du pic du méthane avec l'ouverture du diaphragme du laser NPL1.



5 a) diaphragme ouvert à 2,7 mm 5 b) diaphragme ouvert à 10 mm

Fig. 5. - modifications de la courbe de gain et du pic du méthane avec l'ouverture du diaphragme du laser NPL2.

Les résultats des mesures de battements sont consignés dans les tableaux 2 et 3 où la fréquence lue est la différence (NPL1) - (NPL2).

NPL1 \ NPL2	sans diaphragme	avec diaphragme
sans diaphragme	+ 1,123 kHz $\sigma = 0,417$ kHz n = 22	+ 1,375 kHz $\sigma = 0,361$ kHz n = 2
avec diaphragme	+ 1,227 kHz $\sigma = 0,339$ kHz n = 2	+ 0,961 kHz $\sigma = 1,170$ kHz n = 6

Tableau 2 : asservissement des lasers NPL en modulation de longueur.

NPL1 \ NPL2	sans diaphragme	avec diaphragme
sans diaphragme	+ 2,852 kHz $\sigma = 0,402$ kHz n = 4	+ 1,516 kHz n = 1
avec diaphragme		+ 2,975 kHz $\sigma = 1,097$ kHz n = 4

Tableau 3 : asservissement des lasers NPL en modulation de fréquence.

Il n'apparaît donc pas de différence significative sur les mesures des fréquences.

III d) Etude des effets électroniques

La boucle d'asservissement de BICH4.6 a été légèrement modifiée de manière à pouvoir juger de la reproductibilité de l'électronique.

Nous n'avons constaté aucun décalage de fréquence significatif sur la mesure de la fréquence du battement (NPL1 - BICH4.6) et ceci dans les cas suivants :

- a) changement de 180° de la phase du signal 3 fo par rapport à celle du signal fo et adjonction d'un amplificateur inverseur entre la détection synchrone et l'amplificateur haute-tension, de manière à mettre en évidence un éventuel bruit parasite de la chaîne d'amplification alternative.
- b) adjonction de deux amplificateurs inverseurs, l'un avant, l'autre après la détection synchrone de manière à évaluer les tensions continues parasites créées par la dissymétrie de celle-ci.
- c) utilisation de l'asservissement de NPL2 à la place de celui de BICH4.6.

Par contre en asservissant BICH4.6 en type 2 avec l'électronique de NPL2 nous avons constaté un décalage de + 1,5 kHz soit $1,7 \times 10^{-11}$. Ce résultat est d'ailleurs confirmé par les mesures faites sur les lasers NPL reportées dans les tableaux 2 et 3. En effet si on effectue les moyennes à l'intérieur de chaque tableau on obtient :

(NPL1) - (NPL2) = + 1,172 kHz ; $\sigma = 0,174$ kHz ; n = 4
(les deux lasers étant stabilisés avec le type 1).

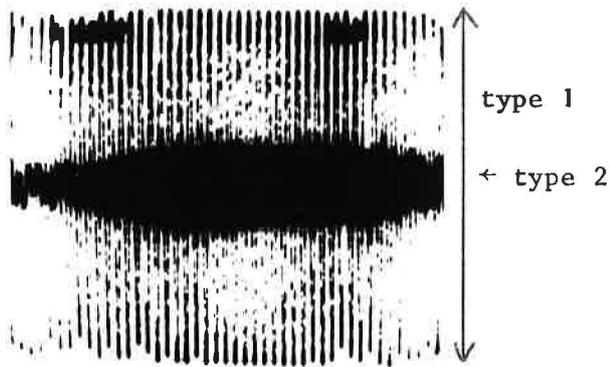
(NPL1) - (NPL2) = + 2,448 kHz ; $\sigma = 0,809$ kHz ; n = 3
(les deux lasers étant stabilisés avec le type 2).

Ce décalage peut alors s'expliquer par l'amplitude du signal 3 fo contenu dans le battement entre deux lasers, qui diffère selon le mode d'asservissement utilisé (fig. 6), et les lasers en présence.

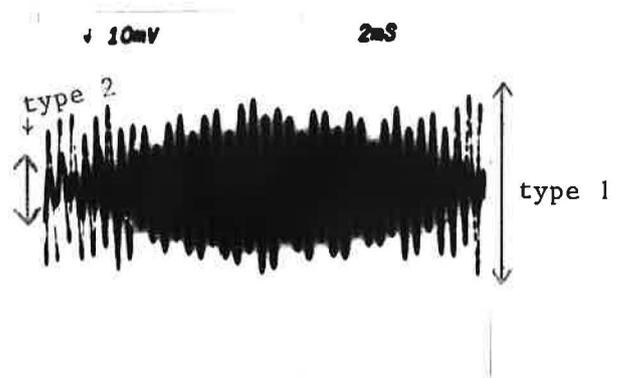
D'autres études, par manque de temps n'ont pu être effectuées. En particulier l'influence de la position du détecteur vis à vis du rayonnement laser, vu les faibles dimensions du récepteur utilisé dans les asservissements du BIPM.

III e) Estimation de la reproductibilité

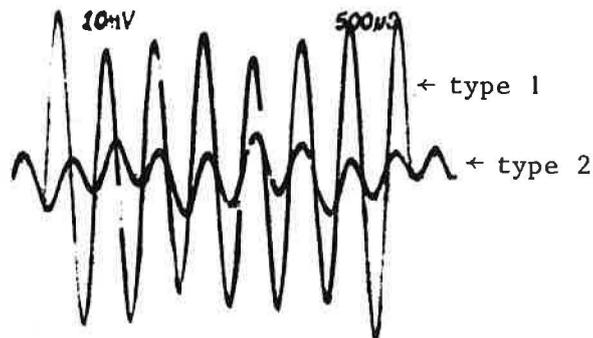
Les lasers étant tous asservis en type 1 et les diaphragmes de NPL1 et NPL2 ouverts au maximum, nous pouvons effectuer la moyenne des mesures faites pendant la durée des comparaisons. Nous obtenons :



NPL1



NPL2



BICH4.6

Fig. 6.- Composante à 3 fo contenue dans le battement entre deux lasers, selon le mode d'asservissement utilisé.

(NPL1) - (NPL2) = + 1,123 kHz ; σ = 0,417 kHz ; n = 22
(NPL1) - (BICH4.6) = + 1,589 kHz ; σ = 0,847 kHz ; n = 16
(NPL2) - (BICH4.6) = + 0,575 kHz ; σ = 0,441 kHz ; n = 8
(BICH4.3)-(BICH4.6) = + 2,286 kHz ; σ = 0,860 kHz ; n = 7.

Nous pouvons admettre, pour les lasers NPL, que les deux types d'asservissement possibles ainsi que la modification de l'ouverture du diaphragme constituent des changements de paramètres suffisamment importants pour caractériser dans une certaine mesure la reproductibilité. Nous pouvons alors recalculer la moyenne de toutes les mesures effectuées entre NPL1 et NPL2, nous obtenons :

(NPL1) - (NPL2) = + 1,552 kHz ; σ = 0,927 kHz ; n = 47.

La valeur ainsi calculée ne diffère pas d'une manière significative, de celle trouvée précédemment.

Nous constatons que les différences entre lasers sont au plus égales à 2,3 kHz soit $2,6 \times 10^{-11}$ en valeur relative.

IV. Conclusion

Cette comparaison internationale a montré que le BIPM possède dès à présent des lasers He-Ne asservis sur le méthane dont les performances sont compétitives avec celles des lasers d'autres laboratoires [1].

Elle a en outre confirmé que les lasers à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ étaient des références de fréquence stables, reproductibles et d'emploi relativement aisé. En effet si on effectue la moyenne de toutes les mesures faites durant cette comparaison nous obtenons :

(NPL1) - (NPL2) = + 1,552 kHz ; σ = 0,927 kHz ; n = 47
(NPL1) - (BICH4.6) = + 1,652 kHz ; σ = 0,803 kHz ; n = 21
(NPL2) - (BICH4.6) = + 0,585 kHz ; σ = 0,390 kHz ; n = 10
(BICH4.3)-(BICH4.6) = + 2,286 kHz ; σ = 0,860 kHz ; n = 7.

Les différences observées sont inférieures à $2,6 \times 10^{-11}$.

Cependant le BIPM doit se doter d'un système de comptage plus souple qui lui permettrait de continuer les études systématiques concernant la stabilité et la reproductibilité de ses lasers. Il pourrait alors également mieux analyser les effets étudiés lors de cette comparaison.

V. Références

- [1] Methane Stabilized He-Ne Intercomparisons 1976, Jolliffe, Kramer, Chartier, IEEE.

29 mars 1979