

Comparaison Internationale
de lasers à He-Ne asservis sur l'iode, en cuve interne,
à $\lambda = 612$ nm

par R. FELDER et F. BERTINETTO

1 - Introduction

Les résultats prometteurs obtenus au LHA (Orsay) [1, 2] ont incité de nombreux laboratoires à étudier les lasers à He-Ne à $\lambda = 612$ nm asservis sur l'iode. En effet, le meilleur contraste des pics de l'iode et le fait de travailler à basse pression permettaient de penser que leurs qualités métrologiques devaient être supérieures à celles des lasers à $\lambda = 633$ nm, et que l'on pourrait ainsi disposer, dans le visible, d'une source alliant d'excellentes performances à une plus grande simplicité de mise en oeuvre et d'emploi.

Des études récentes [3, 4] ont cependant montré que le spectre très riche de l'iode à $\lambda = 612$ nm pouvait être une limitation aux performances espérées. Pour pouvoir juger des qualités réelles de ces étalons la première comparaison internationale de lasers de ce type a été organisée à Sèvres, du 10 au 20 novembre 1981, entre l'IMGC (Turin) et le BIPM.

2 - Description des lasers

Chaque laboratoire disposait de deux lasers qui sont appelés dans ce rapport IMGC1 et IMGC2 pour l'IMGC, BIOR1 et BIOR2 pour le BIPM. Leurs asservissements utilisaient la technique de la modulation sinusoïdale de la longueur de la cavité avec détection de la dérivée troisième. Les fréquences de modulation des lasers IMGC et BIPM étaient respectivement de 573 Hz et de 2 184 Hz.

Les régulations de température des points froids des cuves à iode nécessitaient, pour le refroidissement de la face chaude de l'élément Peltier, une circulation d'eau qui, par mesure de sécurité, était coupée la nuit ; en conséquence, la remontée de la pression de l'iode empêchant l'émission lumineuse pendant ces périodes, les lasers ont fonctionné de manière discontinue.

Les cuves à iode des lasers IMGC provenaient d'un même remplissage tandis que celles du BIPM ayant été choisies dans des lots distincts présentaient, à pression égale, des absorptions différentes conduisant à une puissance de sortie de BIOR2 double de celle de BIOR1. Nous avons fixé la pression de la vapeur d'iode à 1,2 Pa ($\Theta \approx -12$ °C) et l'amplitude de la modulation crête à creux à 7 MHz pour tous les lasers.

Nous avons résumé dans les tableaux I a et I b les caractéristiques optiques et géométriques de chaque laser utilisé. Dans le tableau II nous indiquons la puissance mesurée à l'aide d'un détecteur au silicium dont le coefficient de conversion ($3,05 \text{ W.A}^{-1}$) a été déterminé à la section Radiométrie ; les puissances surfaciques par passage au col du faisceau et au point situé au milieu de la cuve à iode ont été calculées à partir des caractéristiques de la cavité. On peut constater l'éventail important des valeurs calculées.

L'allure particulière de la courbe d'intensité en fonction de la fréquence a été décrite dans divers articles [1, 2]. Rappelons simplement que les 21 pics de structure hyperfine de la raie principale R47 9-2 sont, dans les conditions de pression définies précédemment, réparties comme l'indique la figure 1.

3 - Programme expérimental et résultats

Le montage optique de battements permettait de pouvoir comparer chaque laser aux trois autres. En raison du peu de temps dont nous disposions, nous nous sommes limités à l'étude de :

a) L'effet de modulation sur les pics h, o, t, qui sont supposés être les seuls non perturbés [3].

b) L'effet de pression sur le pic o pour les mêmes raisons que précédemment.

c) La répétabilité par la mesure journalière des intervalles de fréquence entre les composantes o, p, q, r du quadruplet situé approximativement au centre de la courbe de gain.

Nous avons essayé également d'estimer la reproductibilité de ces lasers par les mesures des intervalles de fréquence entre composantes des groupes h, i, j ; o, p, q, r ; s, t, u.

3-1 - Etude de l'effet de l'amplitude de modulation

BIOR2 a été utilisé comme laser de référence. Les courbes de la figure 2 résument les résultats obtenus. Dans le tableau III nous donnons les coefficients de variation de fréquence, en fonction de l'amplitude de modulation, autour de la valeur nominale de la largeur de modulation soit 7 MHz. Ces coefficients sont appelés C_v . Nous avons également calculé les variations de ces coefficients quand on passe d'un pic à l'autre ; ces variations sont appelées ΔC_v .

Si nous faisons un rapprochement entre la position des pics sur la courbe d'intensité de la figure 1 et les résultats du tableau précédent nous pouvons faire les observations suivantes :

a) Il existe un effet de fond car lorsqu'on passe d'un pic situé sur une partie de la courbe de fond dont la pente est positive à un pic situé dans une région où la courbe de fond a une pente négative, le coefficient C_v diminue, quel que soit le laser considéré ; ceci peut s'expliquer par l'allure même de la courbe de fond dont la dérivée troisième varie de façon monotone dans la région considérée : la détection de l'harmonique 3 peut donc conduire à un décalage dû à la courbe de fond variant de façon monotone avec la fréquence.

b) Il semble exister une relation entre l'effet de modulation et la puissance car systématiquement on a :

$$C_v (\text{BIOR1}) > C_v (\text{IMGC1}) > C_v (\text{IMGC2}).$$

c) La puissance semble également jouer un rôle sur le signe de C_v , car négatif dans le cas des lasers IMGC, il devient positif pour BIOR1.

Ces résultats, sur l'effet de modulation, apparemment contradictoires avec ce que l'on obtient pour les lasers à $\lambda = 633 \text{ nm}$ peuvent s'expliquer par les puissances surfaciques par passage, dans les cuves à iode, très différentes selon les lasers. Par exemple, pour les lasers IMGC elles sont du même ordre de grandeur que dans le rouge et

l'effet de modulation est du même signe. Pour les lasers BIPM elles sont dix fois plus grandes et le signe de C_V est opposé à ce que l'on trouve habituellement.

Cette tendance est d'ailleurs confirmée par des mesures, antérieures à cette comparaison, faites sur BIOR2, BIOR1 étant utilisé comme référence ; le coefficient C_V , positif, pour le pic 0 est de : $(0,78 \pm 0,09)$ kHz/MHz autour de 7 MHz de largeur crête à creux de modulation.

On peut également constater, pour le laser BIOR1, que C_V négatif pour les faibles amplitudes de modulation, s'annule, puis devient positif pour des valeurs supérieures à la largeur à mi-hauteur des pics. Cette particularité a déjà été observée dans d'autres laboratoires [2]. Cet effet est-il lié au contraste du pic ? Des expériences complémentaires devront être réalisées.

Enfin l'allure de la courbe de l'effet de modulation, pour un même laser, est la même quel que soit le pic considéré : on pourrait penser à un effet lié au déplacement des cales piézoélectriques ou à un problème de pureté spectrale des générateurs f_0-3f_0 , malgré les précautions prises pour leur réalisation.

3-2 - Etude de l'effet de pression de l'iode

BIOR1 a été choisi comme référence. Les courbes de la figure 3 montrent, les résultats obtenus pour le pic 0, des trois autres lasers. Il est difficile de tirer une conclusion dans le cas de IMGCl. Par contre pour IMG2 il semble exister une dépendance linéaire de la fréquence en fonction de la pression de l'ordre de $(+ 10,1 \pm 1)$ kHz/Pa ; pour BIOR2 l'effet de pression semble nul entre 0,7 et 2,5 Pa et de l'ordre de 50 kHz/Pa pour les pressions plus grandes.

On peut en conclure que le sens de l'effet de pression pour IMG2 et BIOR2 est opposé à celui que l'on a l'habitude de trouver dans le cas des lasers à $\lambda = 633$ nm : l'explication ne semble pas immédiate.

3-3 - Etude de la répétabilité

Nous avons mesuré chaque jour les fréquences de battement entre IMGCl et IMG2, BIOR1 et BIOR2, IMGCl et BIOR2, dans les conditions de fonctionnement définies au paragraphe 2. Nous avons calculé et reporté sur les courbes de la figure 4 les fréquences des intervalles entre pics pour chaque laser ; il est en effet évident qu'une différence globale entre deux lasers n'a pas de sens au regard des anomalies constatées.

On peut toutefois dire que les fluctuations de fréquence n'ont pas excédé une quinzaine de kilohertz soit 3×10^{-11} en valeur relative, résultat tout à fait comparable à ce que l'on obtient dans le rouge.

Il faut également remarquer que le laser le plus puissant, BIOR1, semble être le plus stable ; IMG2 le moins puissant, le moins stable. Ceci est probablement lié au contraste des pics nettement plus grand pour BIOR1.

3-4 - Estimation de la reproductibilité

On peut, en se référant aux performances des lasers BIPM à $\lambda = 633$ nm, faire les remarques suivantes quant aux caractéristiques des lasers à $\lambda = 612$ nm :

a) L'électronique étant semblable, ne devrait pas, une fois réglée, et d'après l'expérience acquise, produire de décalage systématique de fréquence supérieur à 10 kHz.

b) La largeur des pics est sensiblement la même.

c) Le contraste des pics est dix à vingt fois plus grand.

d) La fréquence de modulation plus élevée conduit à une augmentation du gain de boucle de l'asservissement d'environ 30 dB.

Ces constatations donnent à penser que la précision d'asservissement sur un pic devrait être améliorée dans un rapport d'environ 50. Il en découle que les écarts de fréquence constatés, variables selon l'intervalle entre pics et le laser considérés, sont probablement liés à la qualité de la cuve à iode utilisée ; il est à noter également que la puissance surfacique par passage du faisceau au centre de la cuve semble influencer sur la reproductibilité des pics "parasités".

La figure 5 résume les écarts calculés entre les lasers pour différents pics alors que le tableau IV indique les intervalles moyens entre les pics.

On peut déduire de ces mesures que :

a) L'écart maximal entre BIOR2 et IMG1 est de 20 kHz (4×10^{-11} en valeur relative) sur les pics "propres" et passe à 50 kHz (10^{-10} en valeur relative) sur les pics perturbés.

b) IMG2 qui est le laser ayant la plus faible puissance, est constamment décalé vers les basses fréquences de quelques 10^{-10} .

c) BIOR1 qui est le laser ayant la plus forte puissance est le plus souvent décalé vers les hautes fréquences. La valeur de ce décalage semble dépendre du degré de perturbation du pic considéré ; pour les pics h, o, t, il est de l'ordre de 8×10^{-11} en valeur relative et peut aller jusqu'à 8×10^{-10} dans le cas du pic s qui est très perturbé.

Le défaut de reproductibilité constaté pourrait également dépendre du fonctionnement discontinu des lasers pendant la comparaison. En effet il n'est pas impossible que l'équilibre en pression de l'iode et des gaz

étrangers éventuels contenus dans les cellules ne soit atteint qu'au bout d'un temps supérieur à quelques heures [5].

Nous avons, pour finir, calculé l'écart moyen entre les pics i et o qui ont été recommandés comme références par le CCDM dans sa sixième session de juin 1979. Nous trouvons :

$$f_i(\text{orangé}) - f_o(\text{orangé}) = [249,60 \pm 0,06] \text{MHz}$$

Cette valeur est compatible avec celle trouvée par d'autres laboratoires [2, 4].

4 - Conclusion

Cette première comparaison internationale a montré les qualités et les défauts des lasers à $\lambda = 612 \text{ nm}$, en cuve interne.

La répétabilité des lasers est du même ordre que dans le rouge ($\approx 3 \times 10^{-11}$ en valeur relative) pour les pics non perturbés.

Il semble exister un effet de la puissance surfacique à l'intérieur des cuves à iode qui affecte la grandeur et le signe du coefficient moyen de variation de fréquence en fonction de l'amplitude de modulation, et la reproductibilité des pics non perturbés.

Des mesures complémentaires devront être faites pour confirmer le signe et l'allure de la courbe de l'effet de pression.

Un enregistrement de tous les pics devra être entrepris, à l'aide d'une technique par décalage de fréquence, pour mesurer la position et l'amplitude des pics parasites perturbant ceux de la raie principale.

Nous n'avons pas fait de mesures de variance d'Allan du fait du fonctionnement discontinu des lasers et du manque de temps. Cependant l'excellent comportement des lasers BIPM constaté lors des mesures d'intervalles entre pics nous permet d'estimer la stabilité à quelques 10^{-13} en valeur relative, pour des temps d'échantillonnage de dix secondes.

Les cuves à iode seront essayées dans le rouge pour confirmer les décalages observés. Quoi qu'il en soit, leur utilisation dans l'orangé est un bon test car la forte absorption et la saturation à cette longueur d'onde semblent amplifier les défauts liés à la qualité du remplissage.

Enfin nous pensons avoir montré que les qualités métrologiques de ces lasers sont équivalentes à celles des lasers à $\lambda = 633 \text{ nm}$ quand on utilise les pics h, o, t.

5 - Bibliographie

1. BENNETT S.J. and CEREZ P., Hyperfine Structure in Iodine at the 612 nm and 640 nm Helium-Neon Lasers Wavelengths, Optics Communication, Vol. 25 n° 3, juin 1978, 5 pages.
2. CEREZ P. and BENNETT S.J., Helium-Neon Laser Stabilized by Saturated Absorption in Iodine at 612 nm, Applied Optics, Vol. 18, p. 1079, avril 1979.
3. CEREZ P., BRILLET A., MAN-PICHOT C., FELDER R., He-Ne Lasers Stabilized by Saturated Absorption in Iodine at 612 nm, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. IM-29, décembre 1980, pp. 352-354.
4. KEGUNG DSCHAO, GLÄSER M. and HELMCKE J., I₂ Stabilized He-Ne Lasers at 612 nm, IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. IM-29, pp. 354-357.
5. Discussion privée avec T.J. QUINN.

Tableau I a

Caractéristiques des composants optiques des cavités

Cavité							
longueur de la cavité (m)	miroirs			prisme	longueur de la cuve I ₂ (m)	tube amplificateur	
	rayon de courbure (m)	transmission	fabricant				
IMGC1	0,6	1,2	2×10^{-3}	Balzers	Cohérent	0,08	Spectra-Physics modèle 120
		1,2	"	"			
IMGC2	0,6	0,6	2×10^{-3}	"	"	0,08	"
		0,6	"	"			
BIOR1	0,71	0,6	4×10^{-4}	Spectra-Physics	Oriel modèle n°4609	0,08	C.W.R. type LT7
		0,6	"	"			
BIOR2	0,71	0,6	4×10^{-4}	"	"	0,08	"
		0,6	"	"			

Tableau I b

Caractéristiques des composants électroniques des cavités

Cales piézoélectriques

	détecteur d'asservissement	modulation	asservissement polarisation
IMGC1	EG & G type HAD 1000A	Vernitron 8-8031 PZT4	Vernitron 8-8031 PZT4
IMGC2	"	"	"
BIOR1	U.D.T type 455	Vernitron 8-8031 PZT4	Quartz et Silice P4-68
BIOR2	ENL type SDA004	"	"

Tableau II

	Transmission des miroirs donnée par le fabricant	Puissance* de sortie (μW)	"w" du faisceau (mm)		Puissances surfaciques par passage ($W \cdot m^{-2}$)	
			au col	dans la cuve	au col du faisceau	dans la cuve
IMGC1	2×10^{-3}	77 ± 10	0,32	0,33**	$1,20 \times 10^5$	$1,12 \times 10^5$ **
IMGC2	2×10^{-3}	34 ± 1	0,24	0,26**	$9,39 \times 10^4$	8×10^4 **
BIOR1	4×10^{-4}	53 ± 6	0,24	0,30***	$7,32 \times 10^5$	$4,69 \times 10^5$ ***
BIOR2	4×10^{-4}	136 ± 4	0,24	0,30***	$1,88 \times 10^6$	$1,20 \times 10^6$ ***

* Valeurs obtenues sur les séries de l'étude de répétabilité.

** en comptant la position milieu dans la cuve située à 0,55 m de l'un des miroirs.

*** en comptant la position milieu dans la cuve située à 0,42 m de l'un des miroirs.

Tableau III

C_v : Coefficients de variation, en kHz/MHz, autour de 7 MHz

	pic h	variation de C_v (ΔC_v) quand on passe de h à o	pic o	variation de C_v (ΔC_v) quand on passe de o à r	pic r	variation de C_v (ΔC_v) quand on passe de r à t	pic t						
IMGC2	-	$4,3 \pm 0,2$	-	$7,4$	-	$11,7 \pm 0,2$	+ $2,6$	-	$8,9 \pm 0,5$	-	$19,8$	-	$28,7 \pm 0,6$
IMGC1	+	$2,2 \pm 0,6$	-	$8,9$	-	$6,6 \pm 0,4$	+ $3,5$	-	$3,1 \pm 0,4$	-	15	-	$18,1 \pm 0,6$
BIOR1	+	$34,2 \pm 1,1$	-	$2,3$	+	$31,9 \pm 1,1$	+ $7,2$	+	$39,1 \pm 0,8$	-	$21,2$	+	$17,9 \pm 0,5$

Tableau IV

Intervalles moyens entre pics

Composante	$f - f_0$ (MHz)	$s(f - f_0)$ (kHz)
u	- 357,16	40
t	- 334,04	20
s	- 312,56	140
r	- 86,17	20
q	- 47,32	20
p	- 36,86	30
o	0	
j	219,62	40
i	249,60	40
h	284,37	30

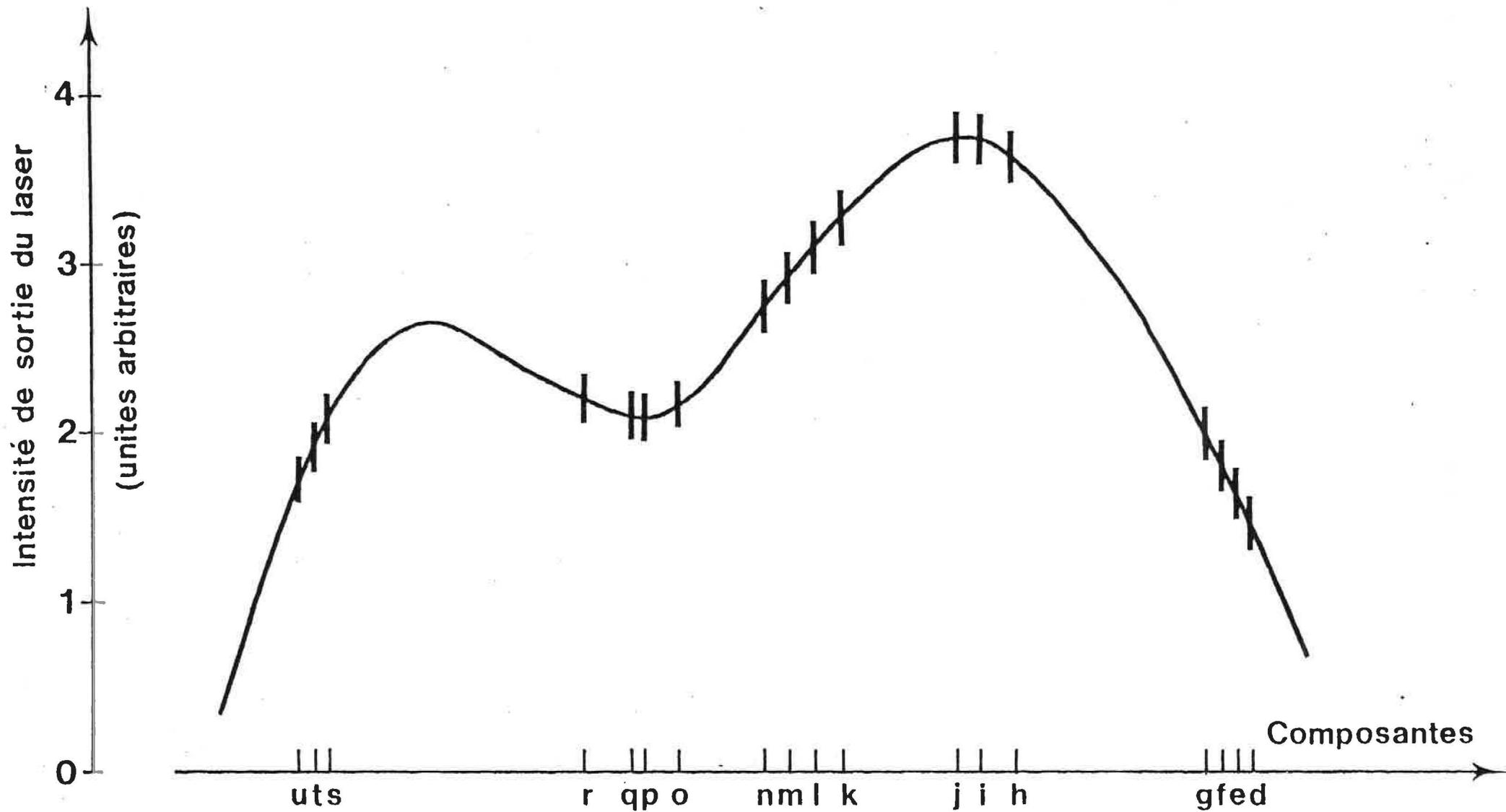


Fig. 1 : Courbe d'intensité en fonction de la fréquence d'un laser à He-Ne, à $\lambda = 612$ nm, asservi sur l'iode en cuve interne.

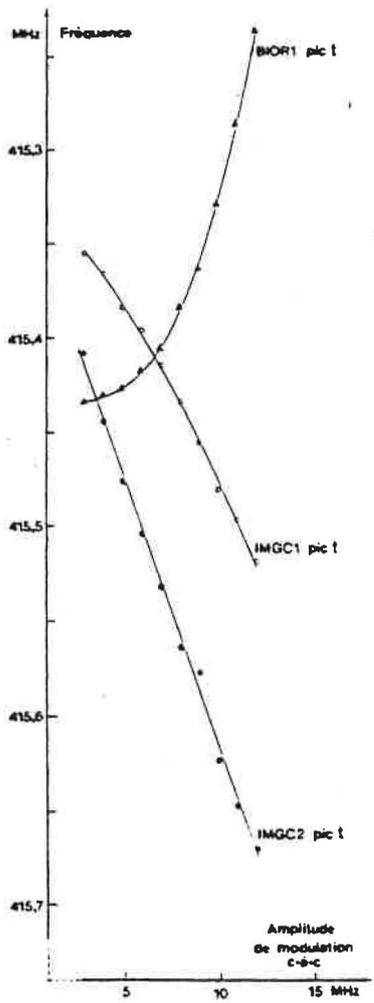
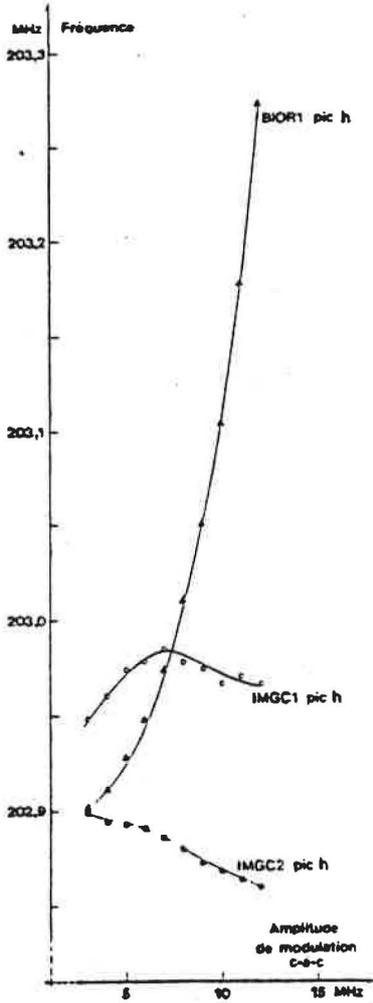
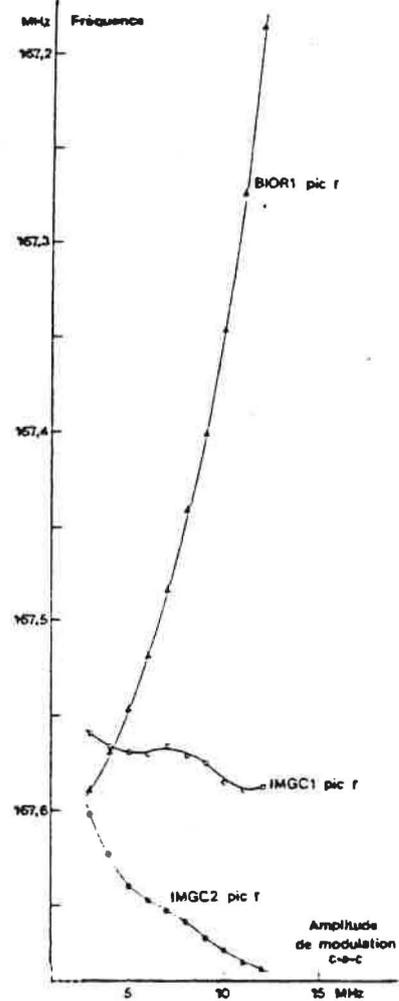
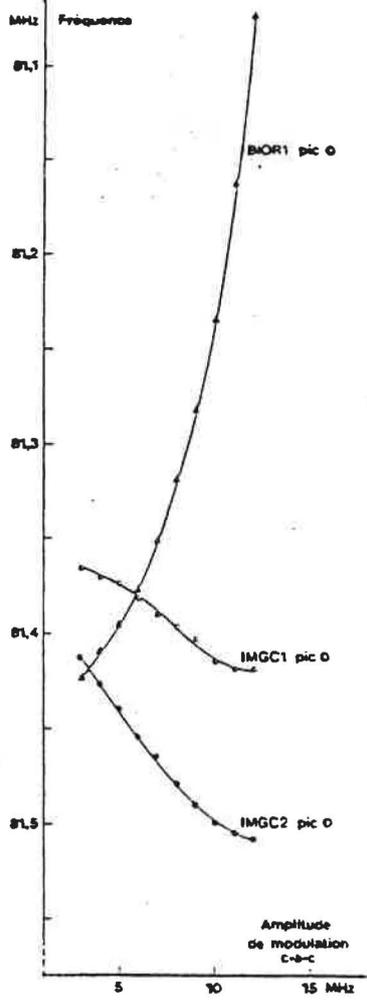


Fig. 2.- Variation de la fréquence avec l'amplitude de modulation.

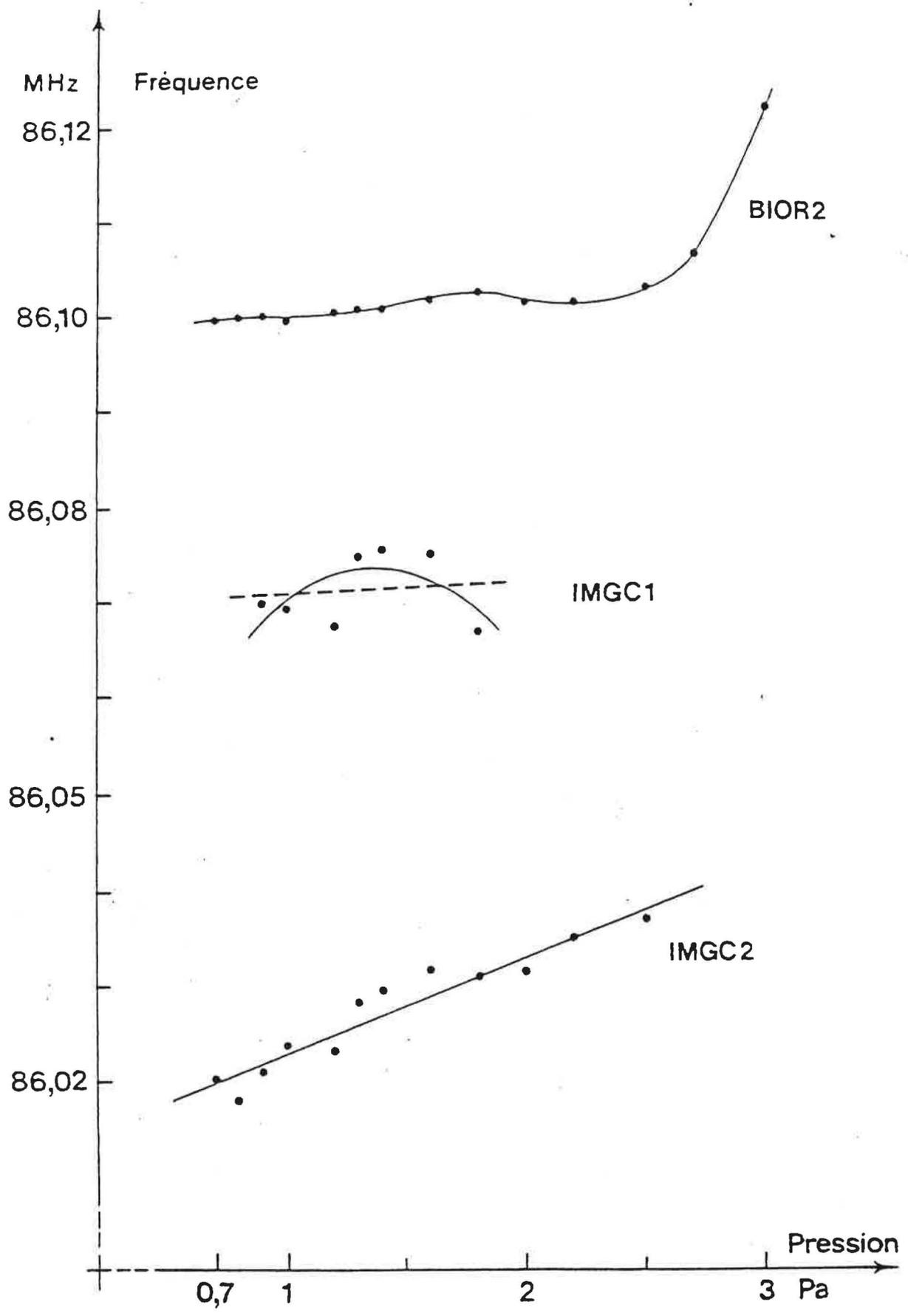


Fig. 3.- Variation de la fréquence avec la pression de l'iode.

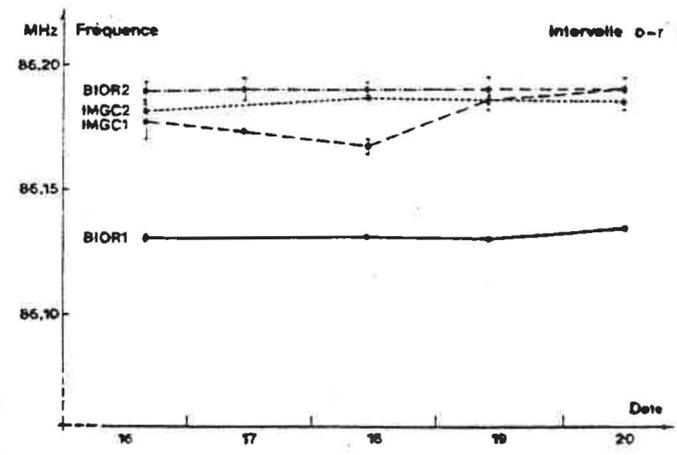
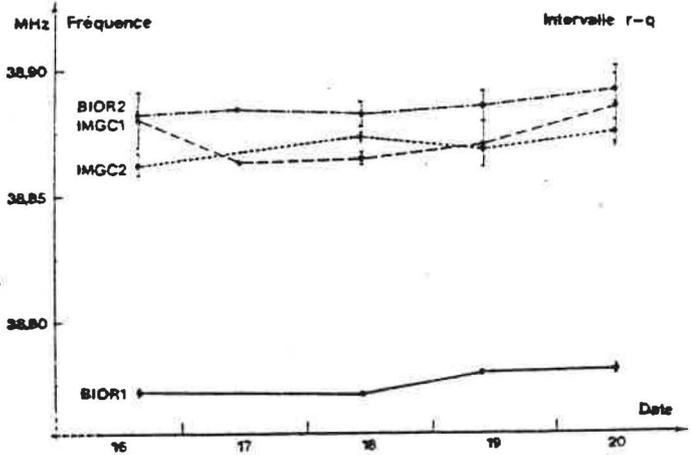
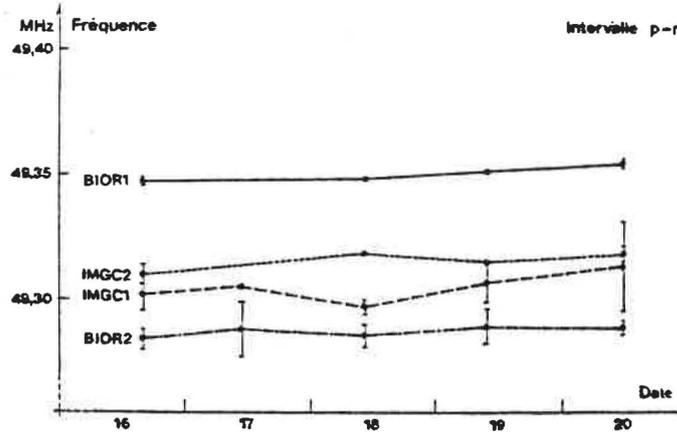
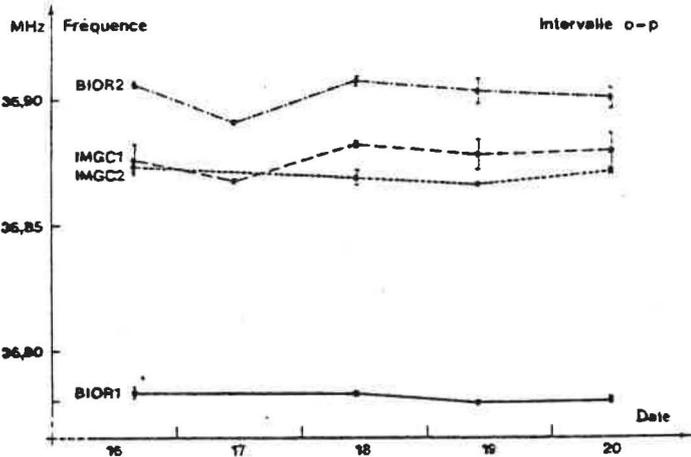
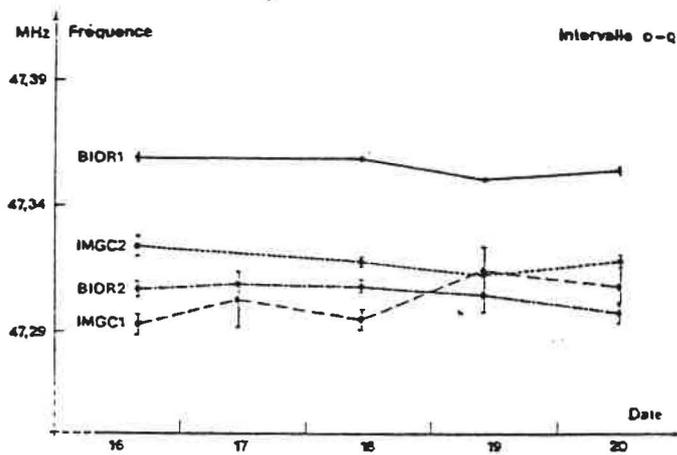
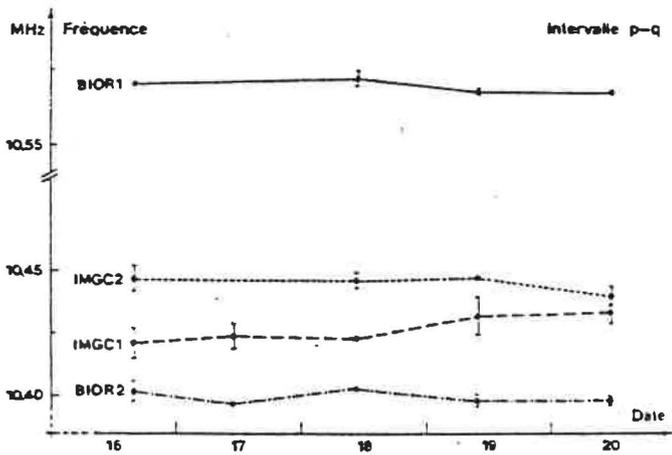


Fig. 4.- Répétabilité de fréquence des lasers.

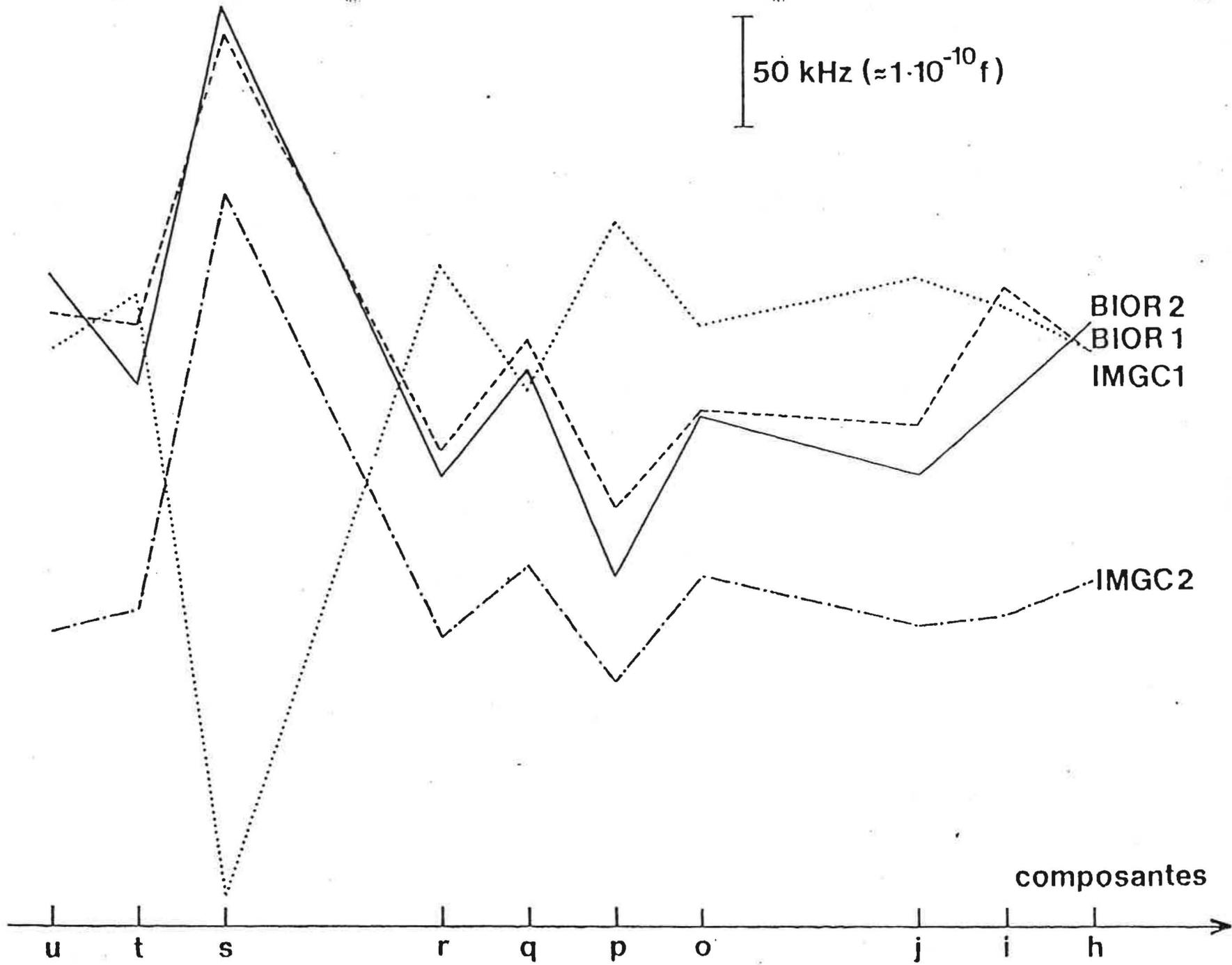


Fig. 5.- Reproductibilité de fréquence des lasers.