

Modifié pour recueil de travaux (Déc. 1975)
Vol. 5

J. HAMON
Janvier 1975

Résultats
de mesures d'étalons à traits
au moyen du comparateur interférentiel

Il nous a paru intéressant d'examiner les résultats obtenus depuis 1969, date de la mise en oeuvre de la méthode du comptage de franges.

~~Rappelons que~~ Chaque mesure fournit trois résultats : l'un donné par le comptage de franges pendant le déplacement de la règle sous le microscope d'un trait à l'autre, les deux autres fournis par les pointés statiques, dans le Michelson, soit avec la radiation étalon (K01) soit avec la lumière diffusée du laser. Seul les résultats obtenus avec K01 sont portés sur les Certificats.

~~Rappelons aussi que~~ La détermination de la longueur d'un étalon comprend au minimum quatre séries de mesures : une pour chacune des deux positions de la règle par rapport au comparateur et pour chacun des deux microscopes.

1 - Nous avons d'abord examiné les résultats (obtenus avec K01) de la détermination de l'équation, c'est-à-dire de l'intervalle principal, dans les mesures de 23 règles de 1 mètre. Les constatations suivantes peuvent être faites en ce qui concerne la cohérence des résultats :

- la différence entre les résultats obtenus avec l'un ou l'autre des microscopes est, en moyenne, $|\Delta l| = 26 \text{ nm}$;
- la différence entre les résultats obtenus avec une règle en position AB puis en position BA est, en moyenne, $|\Delta l| = 66 \text{ nm}$;
- l'écart-type d'une mesure est, en moyenne, $\bar{\sigma} = 56 \text{ nm}$;
- l'écart-type du résultat est, en moyenne, $\bar{\sigma}_m = 18 \text{ nm}$.

La figure 1 montre la répartition de ces quatre valeurs.

Sur la figure 2, on a tracé la répartition chronologique des écarts-types d'une mesure : aucune évolution (qui serait le signe d'un "vieillissement" de l'appareil) n'y peut être décelée.

La figure 3 montre la répartition chronologique de la différence algébrique entre les résultats des deux microscopes (D - G) : peut-être peut-on noter une faible évolution de cette différence.

2 - Si l'on considère maintenant les résultats obtenus au

$(D) - (G)$

H. P. ...

φ
les écarts-types obtenus
sur ces 23 temps :

(droit) et G (gauche)

H
interférences

cours de ces mêmes mesures avec le laser Spectra-Physics (pointés statiques ~~au~~ Michelson comme pour la radiation étalon), on obtient un écart-type d'une mesure égal, en moyenne, à $\sigma = 52$ nm, inférieur de 4 nm à l'écart-type obtenu avec la radiation étalon. Ceci paraît normal sachant que la visibilité des franges (avec le laser) est voisine de l'unité, tandis qu'avec KO1 elle ~~est~~ *est* que (de l'ordre de *seulement*) 0,02 ; mais ceci prouve aussi que, malgré cette faible visibilité, l'incertitude sur les pointés de KO1 reste de l'ordre du centième de frange.

3 - La dispersion des résultats peut provenir de différentes causes :

- a - centrage du spot entre les lignes de foi,
- b - mise au point du trait,
- c - non uniformité de l'indice de l'air,
- d - incertitude sur le coefficient de dilatation,

et, en ce qui concerne plus particulièrement le changement de microscope et le retournement de la règle :

- e - la qualité du poli et de la planéité,
- f - la qualité des traits.

Les causes c et d seules conduisent à une incertitude proportionnelle à la longueur de l'étalon mesuré, mais il est difficile de séparer les différents effets. Cependant, nous disposons de quelques résultats de mesures d'étalons plus petits. Par exemple, un intervalle de 50 mm a été mesuré sur une réglette SIP à traits "vibrés" et, dans ce cas, les erreurs proportionnelles à la longueur sont quasiment négligeables ; on a ~~observé~~ *obtenus* les résultats suivants :

$$\begin{aligned} \text{(Microscope D)} - \text{(Microscope G)} &= - 9 \text{ nm} \\ \text{(Position AB)} - \text{(Position BA)} &= - 33 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ mesure}) &= 26 \text{ nm} \end{aligned}$$

On peut penser que ces valeurs donnent une assez bonne idée de la reproductibilité de la "vision" des traits ~~par~~ *par* les microscopes photoélectriques. *façon dont les*

D'autre part, on dispose aussi des résultats de mesures de quatre réglettes SIP de 200 mm, de bonne qualité, qui donnent les valeurs moyennes suivantes, assez comparables aux précédentes :

$$\begin{aligned} \text{(Microscope D)} - \text{(Microscope G)} &: \frac{|\Delta l|}{l} = 6 \text{ nm} \\ \text{(Position AB)} - \text{(Position BA)} &: \frac{|\Delta l|}{l} = 30 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ mesure}) &= 20 \text{ nm} \end{aligned}$$

~~Par contre, et pour illustrer l'influence de la qualité de l'étalon sur la dispersion des mesures, on peut citer les résultats obtenus récemment sur une réglette de 100 mm datant du début du siècle dont les traits sont très fins et~~

Voilà, comme d'habitude

Pour l'obtention d'un résultat plus précis, et l'étalon sur la surface de mesure, nous donnons le résultat obtenu :

donnent un signal photoélectrique faible et dont l'état de surface est particulièrement mauvais tant au point de vue de la planéité que du poli.

$$\begin{aligned} (\text{Microscope D}) - (\text{Microscope G}) &= + 70 \text{ nm} \\ (\text{Position AB}) - (\text{Position BA}) &= - 101 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ mesure}) &= 71 \text{ nm} \end{aligned}$$

4 - De cet examen de la dispersion des mesures, une constatation est nette : l'effet de retournement de la règle est prépondérant, mais l'effet de changement de microscope est moins négligeable que l'on aurait pu espérer.

On peut peut-être peut-on avancer aussi que, pour la détermination de la longueur d'une règle de 1 mètre, l'écart-type moyen sur une mesure ($\sigma = 56 \text{ nm}$) peut se décomposer en deux parties approximativement égales : l'une provenant du pointé des traits, ou, plus exactement, de la "vision" des traits par les microscopes et l'autre, proportionnelle (ou tout au moins liée) à la longueur de l'étalon et dépendant des conditions de mesure.

Mais il n'est pas possible, actuellement, de mettre en évidence l'effet éventuel de la révision qu'a subie le comparateur en 1974.

5 - Puisqu'on dispose de trois méthodes utilisées simultanément, on peut comparer leurs résultats moyens. Toujours pour l'étude des 23 règles de 1 mètre, on obtient en moyenne :

$$\begin{aligned} 1 \text{ nm} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = 5 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ règle}) = 30 \text{ nm} \end{array} \right. \\ -4 \text{ nm} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = 1 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ règle}) = 7 \text{ nm} \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{a) (comptage) - (laser/Michelson)} &= 1 \text{ nm} \left(\begin{array}{l} \sigma_m = 6 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ règle}) = 30 \text{ nm} \end{array} \right) \\ \text{b) (laser/Michelson) - (KOl/Michelson)} &= -4 \text{ nm} \left(\begin{array}{l} \sigma_m = 1 \text{ nm} \\ \sigma(1 \text{ règle}) = 7 \text{ nm} \end{array} \right) \end{aligned}$$

Ces résultats sont intéressants à deux titres : d'abord à cause de leur valeur et aussi à cause de leur écart-type. En ce qui concerne leur valeur, il n'y a en effet aucune raison théorique pour que les résultats ne soient pas identiques avec le comptage et avec les pointés statiques, laser puisqu'il s'agit de la même radiation, tandis qu'il est normal d'observer une différence entre les mesures faites avec le laser et avec KOl pour la raison suivante : on étalonne la longueur d'onde du laser chaque année et, on utilise cette valeur de la longueur d'onde jusqu'à l'étalonnage suivant, or, il s'est avéré que cette longueur d'onde augmente d'environ 1×10^{-8} par an, de sorte qu'en moyenne on utilise une longueur d'onde trop petite : la moyenne (-4 nm, soit -4×10^{-9}) reflète remarquablement cette évolution.

En ce qui concerne les écarts-types, on remarque que celui de la différence entre les résultats obtenus par les pointés statiques dans le Michelson avec KOl et le laser est très faible, ce qui s'explique par le fait que ces deux mesures sont faites exactement dans les mêmes conditions et sont même imbriquées de sorte que le seul facteur qui peut les différencier est la variation de la longueur d'onde du laser. Par contre,

H.C. (interféromètre)

rendre les résultats différents

En revanche,

l'un des deux

les valeurs de la différence (comptage) - (laser ^{et} Michelson) sont plus dispersées ; le système de comptage lui-même n'est pas en cause, mais le trait de la règle est pointé d'une façon différente dans les deux méthodes, en général une fois sur deux, lorsque la règle est dans la position la plus rapprochée de l'observateur ; on rétablit le parallélisme des miroirs en faisant pivoter le banc ce qui produit un léger (mais visible) déplacement de la règle, de sorte que la portion du trait visée n'est pas rigoureusement la même.

Ferrite

6 - Tout ce qui précède expose les observations faites sur la dispersion des résultats. De cette dispersion due aux incertitudes aléatoires, on a toujours fait état dans les Certificats par la mention de l'écart-type du résultat. Mais, outre ces incertitudes aléatoires, nos mesures sont certainement entachées d'une incertitude systématique ; on a essayé d'évaluer l'ordre de grandeur des diverses causes de cette dernière que nous citons ci-dessous :

- l'incertitude*
- fre de la mesure de la longueur d'onde étalon (écart-type) pour chaque longueur d'onde*
- réalisation de la longueur d'onde étalon : 4×10^{-9}
 - correction d'étendue géométrique ($\pm 10 \%$) : 6×10^{-9}
 - détermination de l'indice de réfraction de l'air : 10×10^{-9}
 - mesure de la température ($\pm 0,001 \text{ deg.}$) : 10×10^{-9}

La somme quadratique s'arrondit à 2×10^{-8} (valeur relative) ; ainsi, dorénavant on indiquera dans les Certificats, en plus de l'écart-type du résultat calculé d'après la dispersion, cette partie systématique de l'incertitude, qu'on caractérisera par un écart-type calculé d'après la longueur de l'étalon.

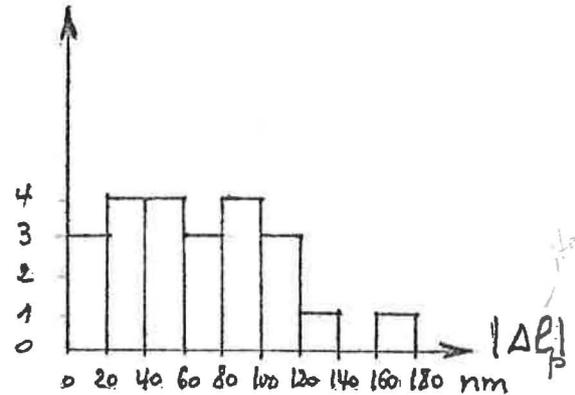
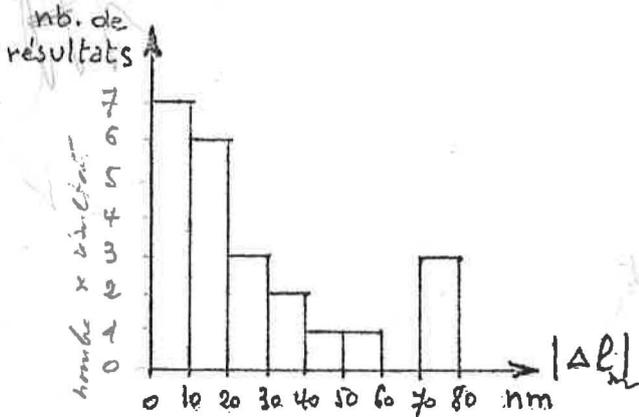
(Janvier 1975)

capri. Histogrammes

1. de l'effet produit par: 14

le changement de microscope ¹³

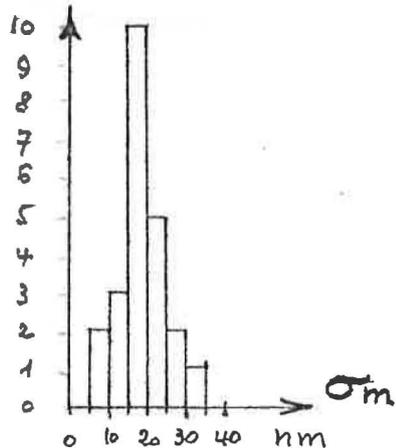
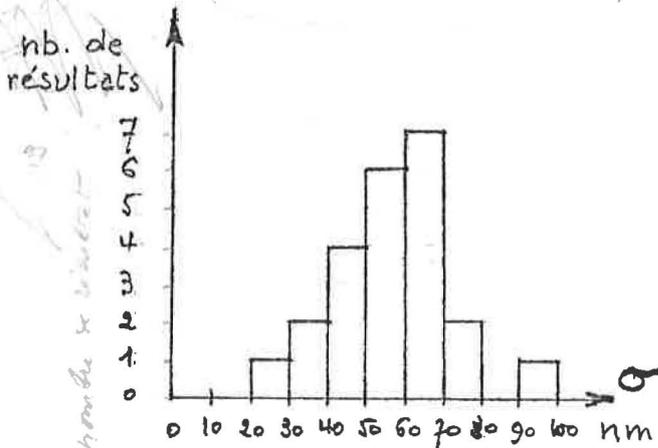
le retournement de la règle ¹⁵



2. de l'écart-type:

d'une mesure

du résultat



20 mm range

fig. 1

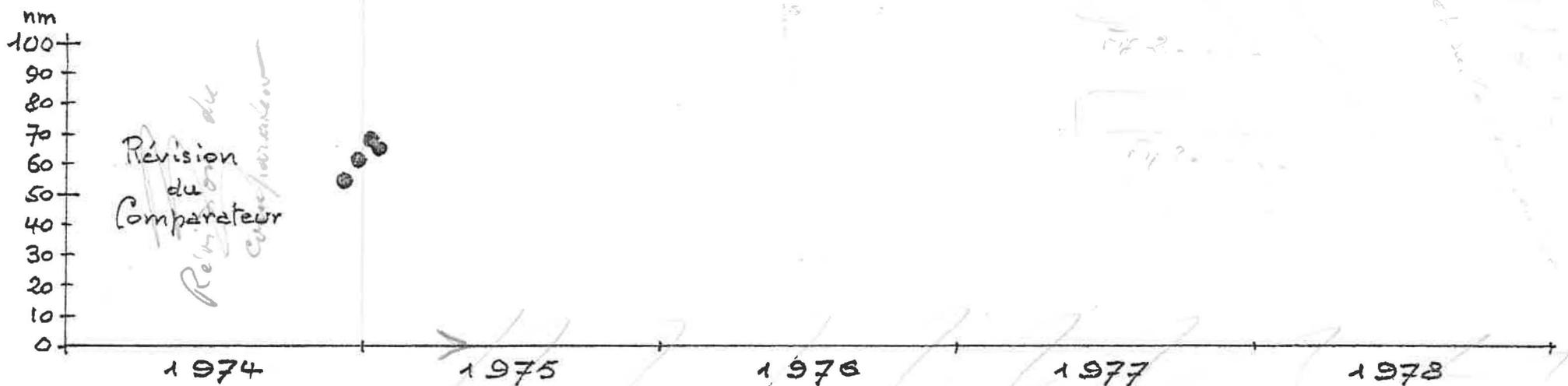
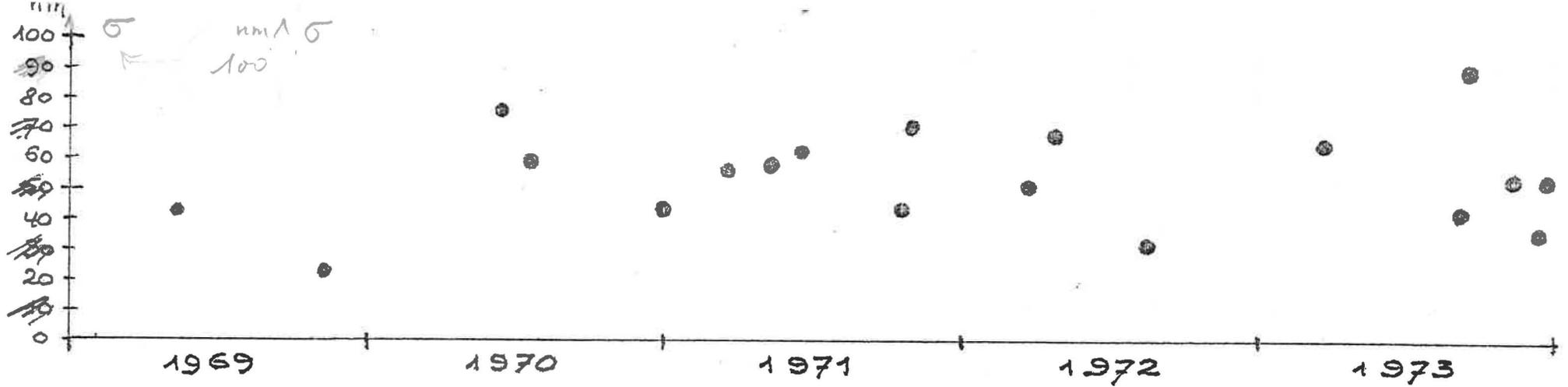


Fig. 2. - Comparateur salle 2 : écarts-types d'une mesure au cours du temps.

(fig. 2)

[Signature]

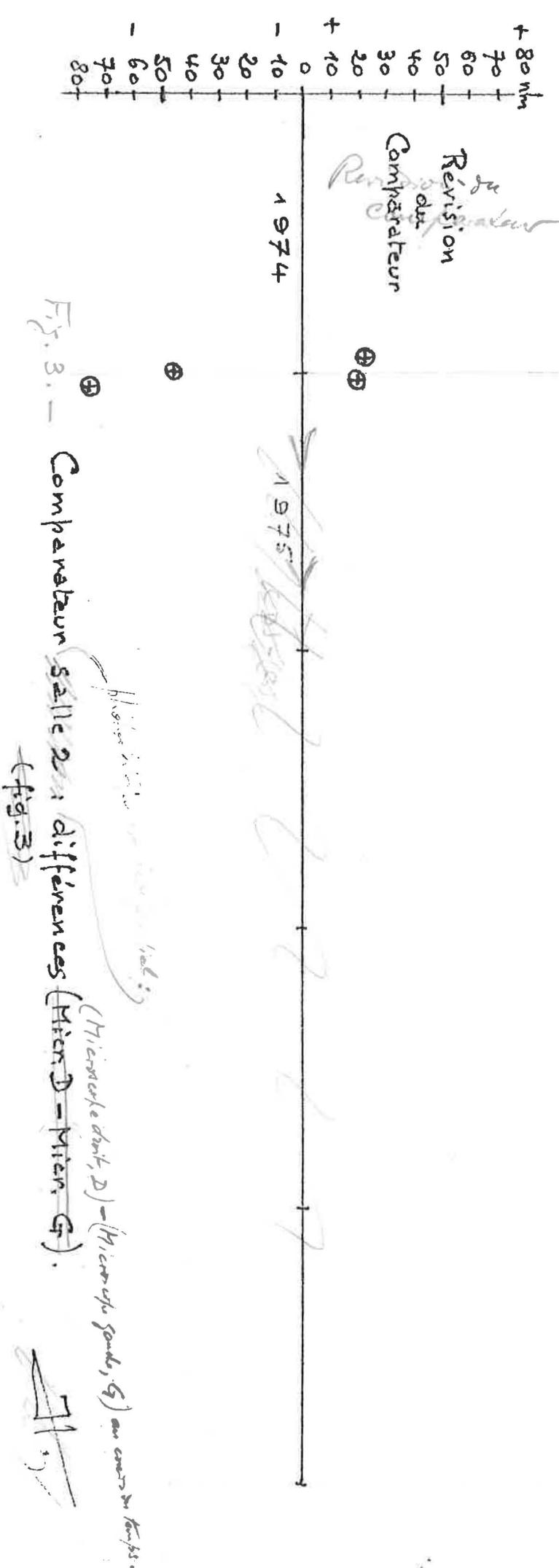
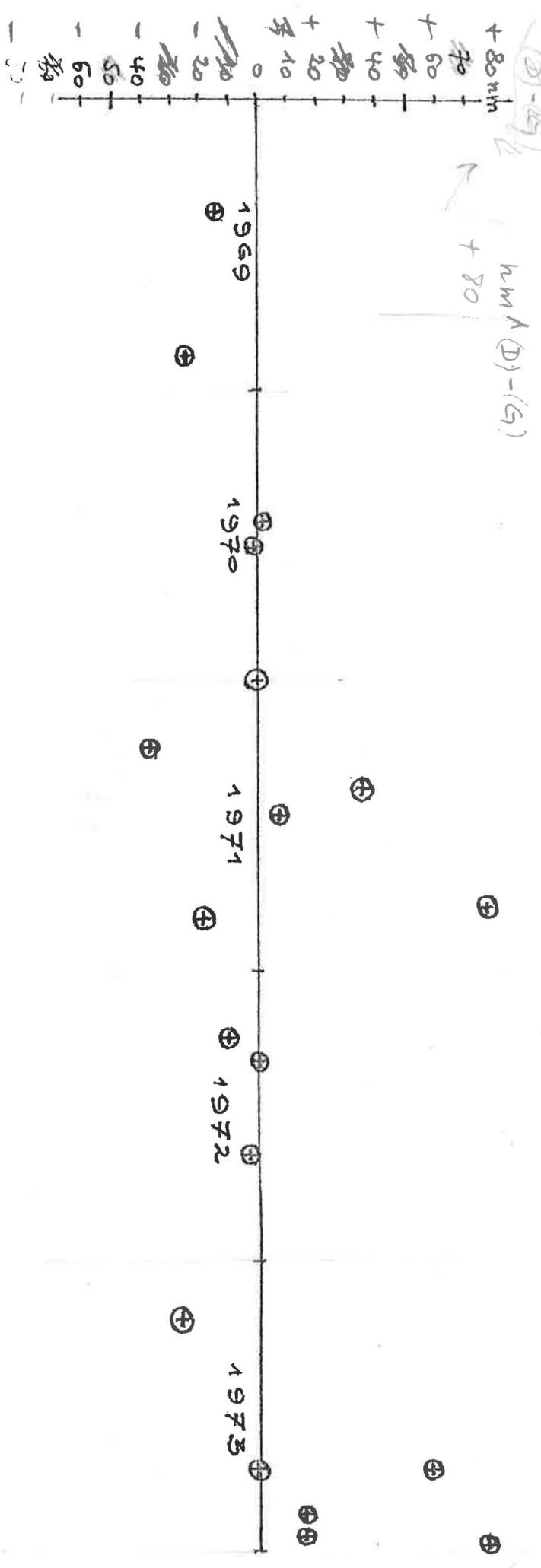


Fig. 3. - Comparateur Salle 2: différences (Mien D) - (Mien G).
 (Mien D) = Mien G.