



LEP/LIBRARY

ALGORITHMES DE LINEARISATION DES PICK-UPS

J. Borer, C. Bovet et D. Cocq

1. Mesures au laboratoire

Les 504 BPM du LEP se répartissent en quatre géométries différentes selon l'endroit où ils sont installés le long de la chambre à vide de la machine.

Il y a :

- 8 BPPS circulaires (de diamètre 120 mm),
- 16 BPPM marguerites (de diamètre 160 mm),
- 24 BPPC circulaires (de diamètre 100 mm),
- 456 BPPE elliptiques (de 131 mm 70 mm).

Des boîtiers permettant le montage de quatre boutons sont disponibles, soit produits en série pour les BPPE, soit sous forme de prototypes pour les autres géométries et ont été adaptés au banc de test de laboratoire où l'influence du faisceau peut être simulée par une antenne alimentée à 70 MHz. Au moyen de deux moteurs pas à pas cette antenne peut être positionnée en x et y avec une précision de 0.01 mm.

Une campagne de mesures comprenant environ 300 points répartis sur un quadrillage de 5 mm de côté, programmée sur HP 9817, a été effectuée pour chaque géométrie, en suivant les parcours qui sont présentés sur les figures 1 à 4.

A chaque point les tensions U_1, U_2, U_3 et U_4 mesurées sur les boutons sont combinées pour donner les différences en diagonale :

$$\Delta_1 = (U_1 - U_3) / (U_1 + U_3)$$

$$\Delta_2 = (U_2 - U_4) / (U_2 + U_4).$$

2. Algorithmes de linéarisation

La première approximation pour les positions x et y est obtenue en combinant linéairement les valeurs Δ_1 et Δ_2 comme suit :

$$x_1 = K_H(\Delta_1 + \Delta_2)$$

$$y_1 = K_V(\Delta_1 - \Delta_2),$$

où les coefficients K sont ajustés pour qu'on ait $x_1(5,0) = 5.00$ mm et $y_1(0,5) = 5.00$ mm.

Toutes les mesures effectuées sont rassemblées dans le premier quadrant en faisant usage des symétries par rapport aux plans H et V pour les BPPE, et également par rapport aux diagonales $|x| = |y|$ pour les BPPS, les BPPC et les BPPM. Les valeurs ainsi obtenues sont données sur les fig. 5a, 6a, 7a et 8a.

Il est évident que ces positions présentent de fortes non-linéarités et ne pourront être utiles que dans des circonstances particulières.

Un algorithme supplémentaire est nécessaire pour améliorer la situation et, comme il sera utilisé très fréquemment dans les recours au système BOM, il est important qu'il, soit particulièrement rapide en exécution locale dans les microprocesseurs 68'000.

Le plus efficace serait d'utiliser une table de valeurs de correction $C(x,y)$ pour exprimer les positions précises x_2 par :

$$x_2 = x_1 + C(x_1, y_1).$$

Mais les valeurs $C(x,y)$ ne sont connues que sur le quadrillage grossier des 300 mesures faites au banc de test. Pour connaître $C(x,y)$ à un point quelconque il faut faire une interpolation à deux dimensions. Dans le cas le plus simple d'une interpolation linéaire, qui relierait les valeurs connues aux quatre points voisins (quadrilatère quelconque) par une surface réglée, l'évaluation de $C(x_1, y_1)$ nécessiterait 3 multiplications, 3 divisions et 10 additions; ce qui n'est pas négligeable.

Une autre méthode proposée ci-dessous consiste à représenter $C(x,y)$ par un polynôme à 6 termes dont l'évaluation nécessite 8 multiplications et 4 additions, soit un temps de calcul proche du minimum mentionné ci-dessus.

Le polynôme choisi a une symétrie impaire dans la variable principale, de sorte qu'il fournit le signe de la position, et paire dans la variable secondaire :

$$x_2 = a x_1 + b x_1^3 + c x_1^5 + d x_1 y_1^2 + e x_1 y_1^4 + f x_1^3 y_1^2,$$

$$y_2 = A y_1 + B y_1^3 + C y_1^5 + D y_1 x_1^2 + E y_1 x_1^4 + F y_1^3 x_1^2.$$

Les coefficients a, \dots, f et A, \dots, F sont obtenus par lissage du polynôme sur tous les points de mesure au moyen d'une procédure de minimisation des moindres carrés. Des poids variables peuvent être utilisés pour favoriser l'adaptation du polynôme dans une région par exemple celle des petites amplitudes, afin de garantir la meilleure précision pour les mesures relatives à une orbite déjà bien corrigée.

Mais les polynômes ainsi obtenus montrent alors des erreurs, à la périphérie, de 1 à 2 mm et présentent des risques pour l'extrapolation nécessaires vers les plus grandes amplitudes, au delà de la zone couverte par les mesures.

Dans cette région annulaire extérieure il vaut mieux adapter un autre polynôme moins contraint au centre. Et si l'on impose que les deux polynômes se raccordent sur un cercle d'amplitude moyenne variant entre 18 mm et 25 mm alors on obtiendra le meilleur algorithme en utilisant l'un ou l'autre selon la valeur mesurée de $r_1 = \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)}$.

Pour les trois géométries qui ont quatre plans de symétrie les coefficients A, \dots, F sont égaux aux a, \dots, f . Voici la liste complète des coefficients obtenus.

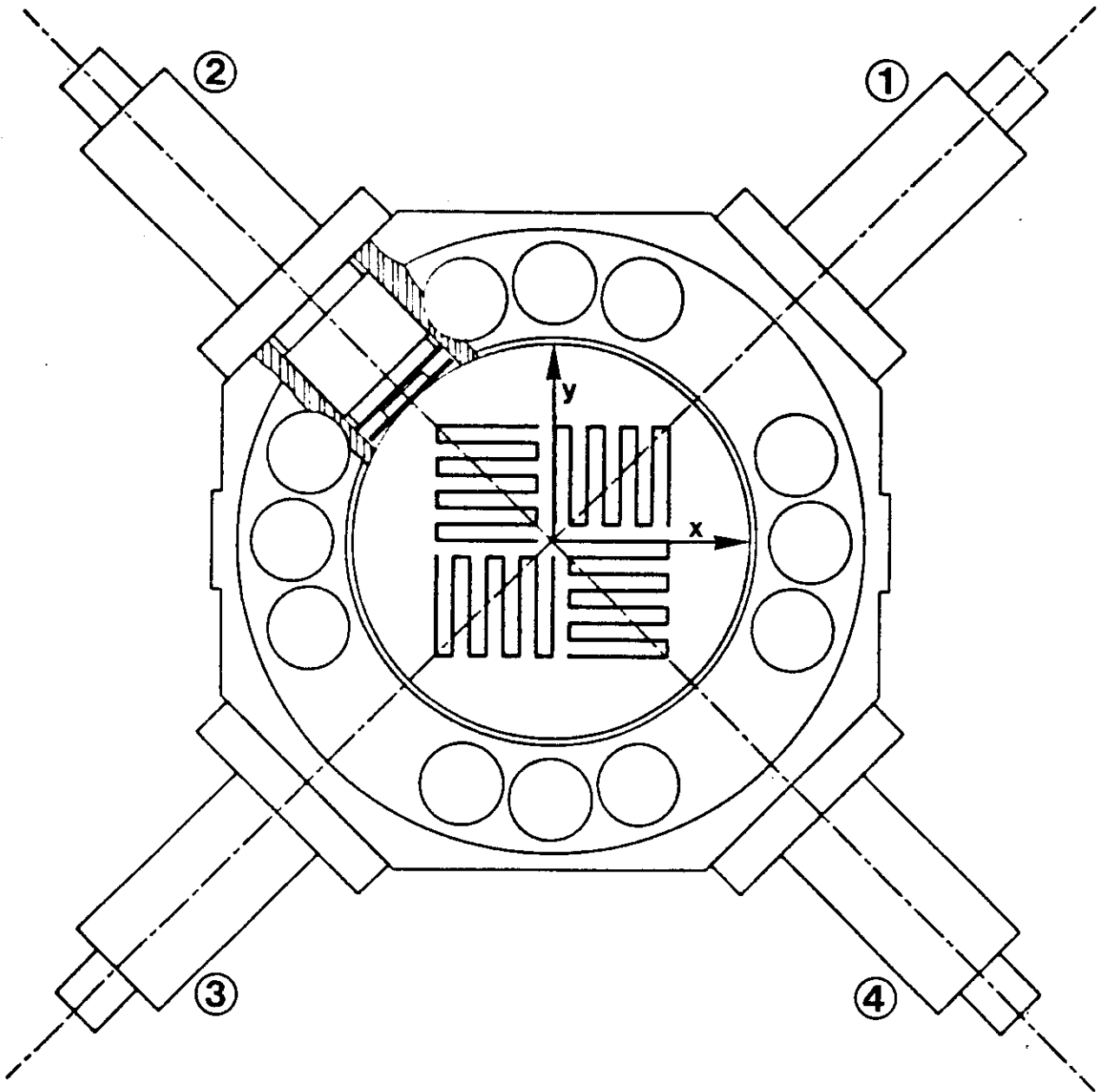
- BPPS , polynôme pour $r_1 < 25$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPS , polynôme pour $r_1 > 25$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPM , polynôme pour $r_1 < 25$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPM , polynôme pour $r_1 > 25$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPC , polynôme pour $r_1 < 23$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPC , polynôme pour $r_1 > 23$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPE , polynôme pour $r_1 < 18.5$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPE , polynôme pour $r_1 > 18.5$ mm, a, b, c, d, e, f, r_1 :
 BPPE , polynôme pour $r_1 < 18.5$ mm, A, B, C, D, E, F, r_1 :
 BPPE , polynôme pour $r_1 > 18.5$ mm, A, B, C, D, E, F, r_1 :

99.276	196.586	186.745	2444.8	7818.4	3645.8	23.0
100.495	95.660	93.760	4010.4	11541.0	4705.7	23.0
99.531	175.921	199.391	1918.8	6541.9	4629.1	25.0
100.481	112.078	88.030	2861.7	8748.5	6435.0	25.0
99.125	283.162	292.345	4779.1	15152.5	6837.2	20.0
100.562	147.540	53.366	7451.8	26348.7	11082.1	20.0
98.880	447.363	59.255	15529.2	14592.2	900.7	18.5
148.367-2887.006-2296.478			71227.3	95695.0	26780.4	18.5
98.484	355.154	832.437	2521.2	26436.2	36181.5	18.5
97.080	426.431-1194.576		2634.8	78862.6	105442.1	18.5

Les positions résultantes sont indiquées sur les fig. 5b,6b,7b et 8b, et une représentation graphique en est donnée sur la fig. 9. On constate l'excellente qualité des algorithmes de restitution des positions car les erreurs résiduelles sont du même ordre de grandeur que les erreurs de mesure qui sont d'environ 0.01 mm. Comme les polynômes introduisent un lissage il est probable que les erreurs réelles seront encore plus petites que celles qu'on voit ici.

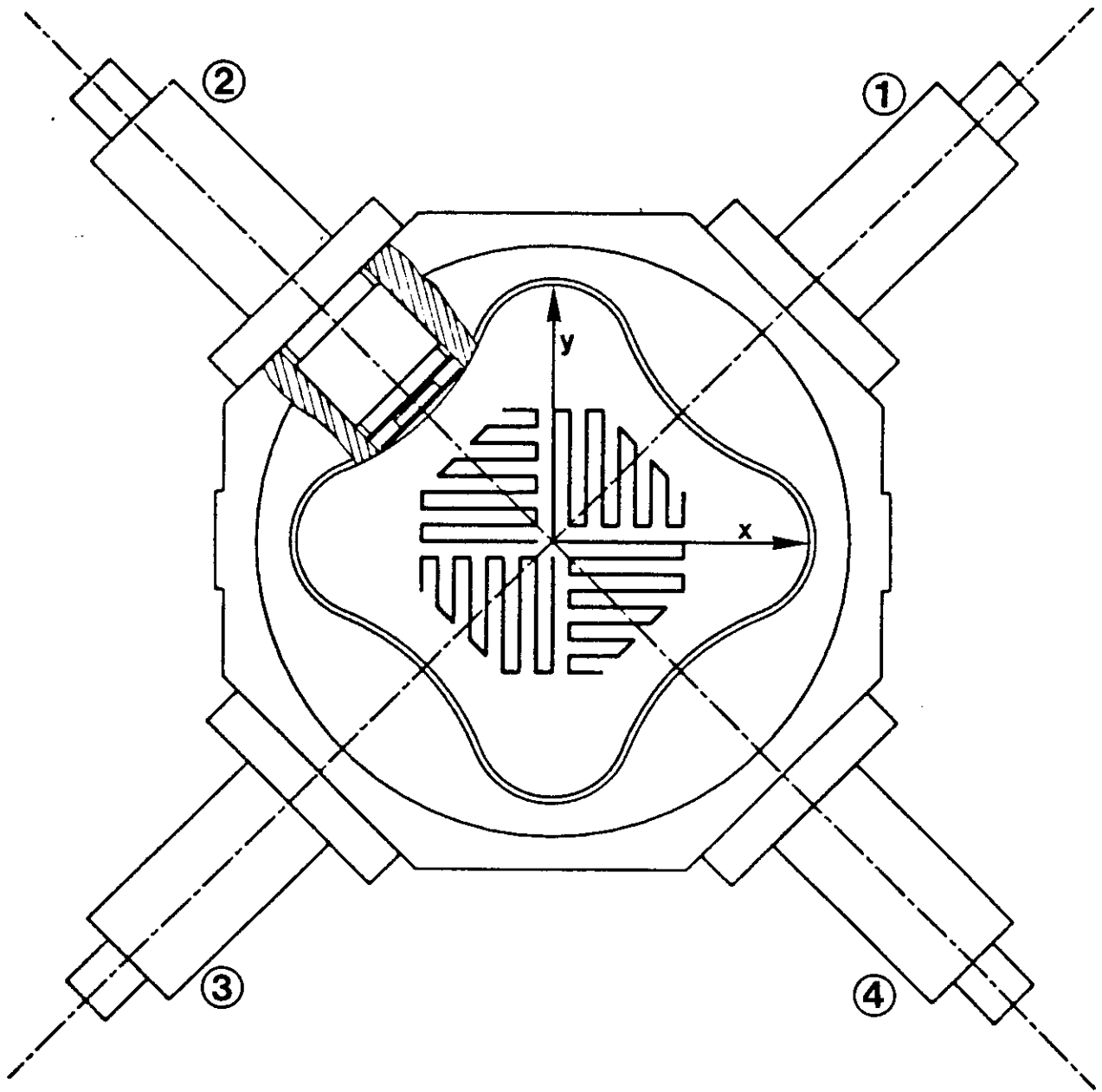
Le soin apporté à ces corrections peut paraître excessif en regard de la précision absolue du BOM qui atteindra au mieux 0.3 mm. Mais c'est pour les mesures relatives statiques ou dynamiques qui serviront à établir les paramètres optiques de la machine qu'on désire atteindre la meilleure précision. C'est là aussi qu'une procédure analytique (garantissant une parfaite continuité) prend tout son sens.

Du côté des grandes amplitudes qu'on risque de rencontrer avant que l'orbite ne soit corrigée, on peut voir sur les fig. 5b, 6b, 7b et 8b d'une part une ligne en trait plein qui représente l'ouverture physique de la chambre à vide, d'autre part les lignes en tirets qui montrent les enveloppes maximum des trajectoires possibles, aux différents BPM. Ces enveloppes résultent de l'optique "désaccordée" qui sera utilisée au début des études de la machine. On constate que les plus grandes amplitudes horizontales ne pourront pas être mesurées près des QF.

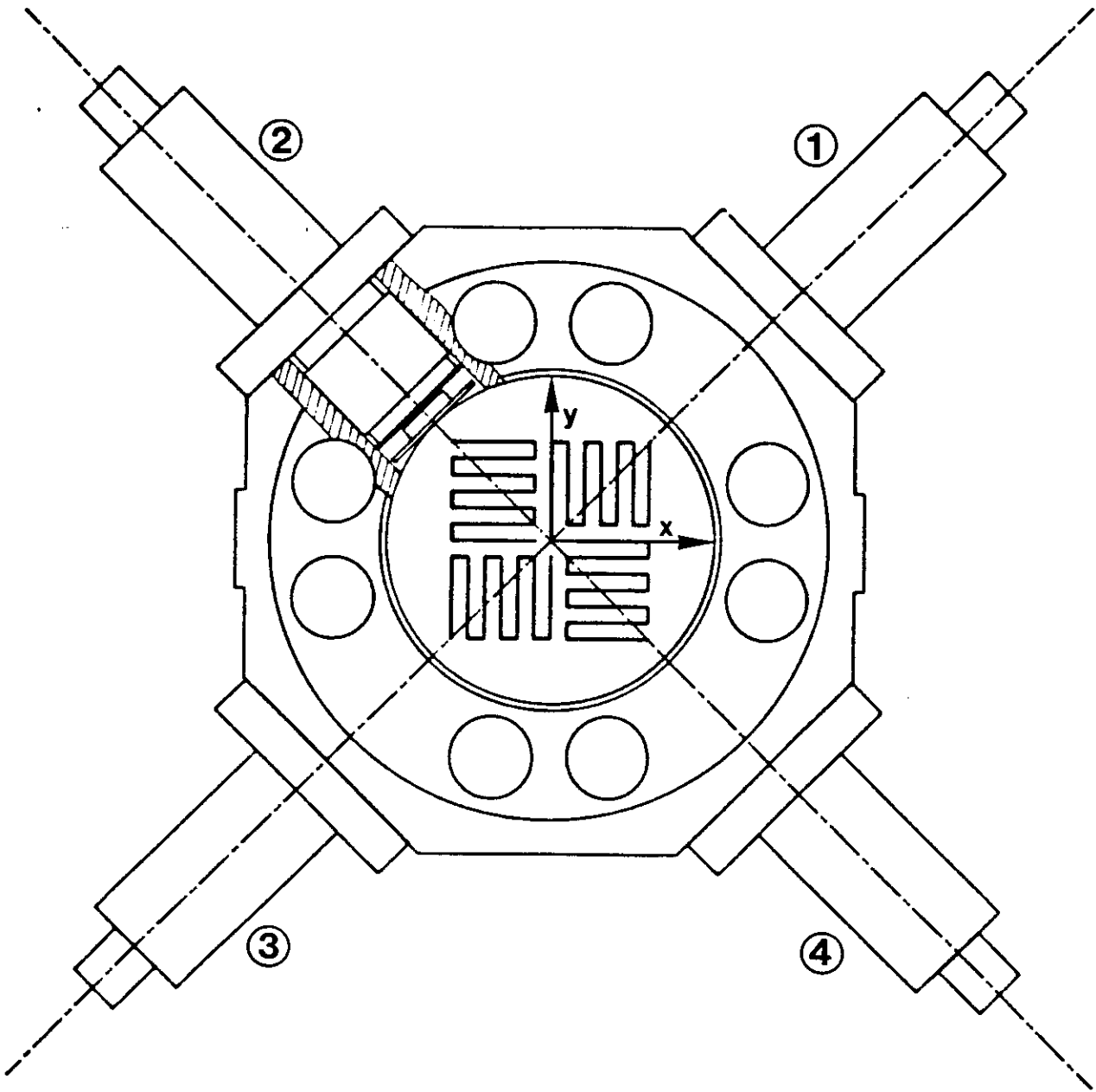


TYPE BPPS

fig.1

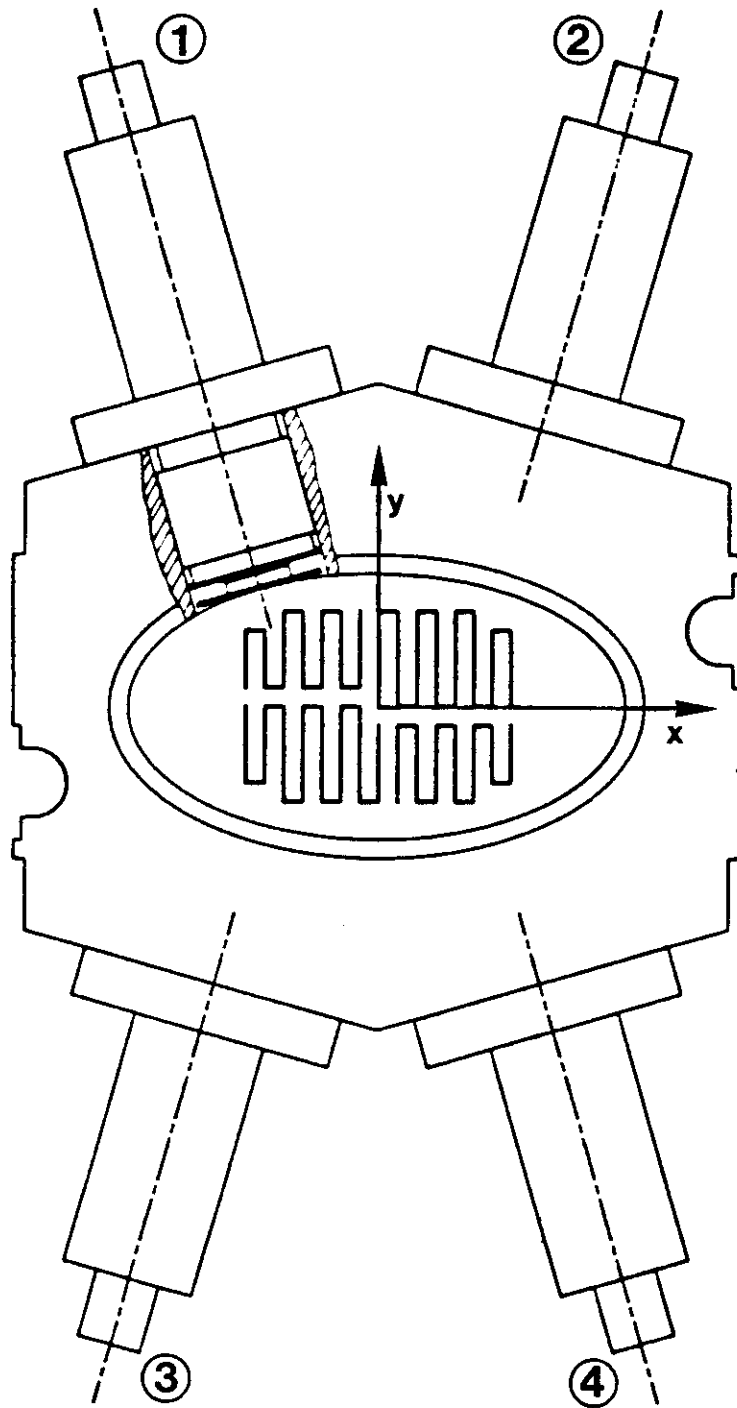


TYPE BPPM



TYPE BPPC





TYPE BPPE

fig. 4

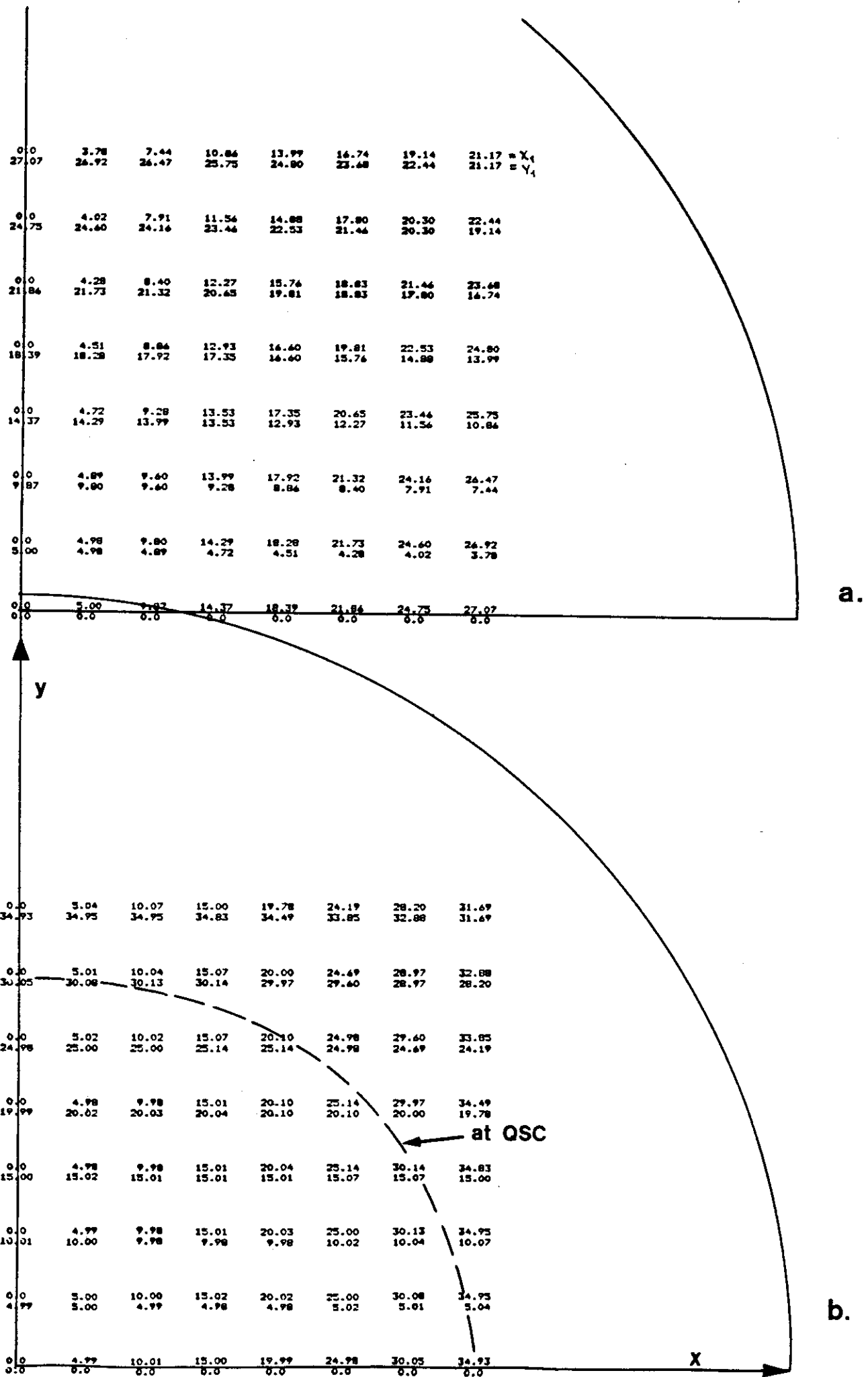


fig. 5

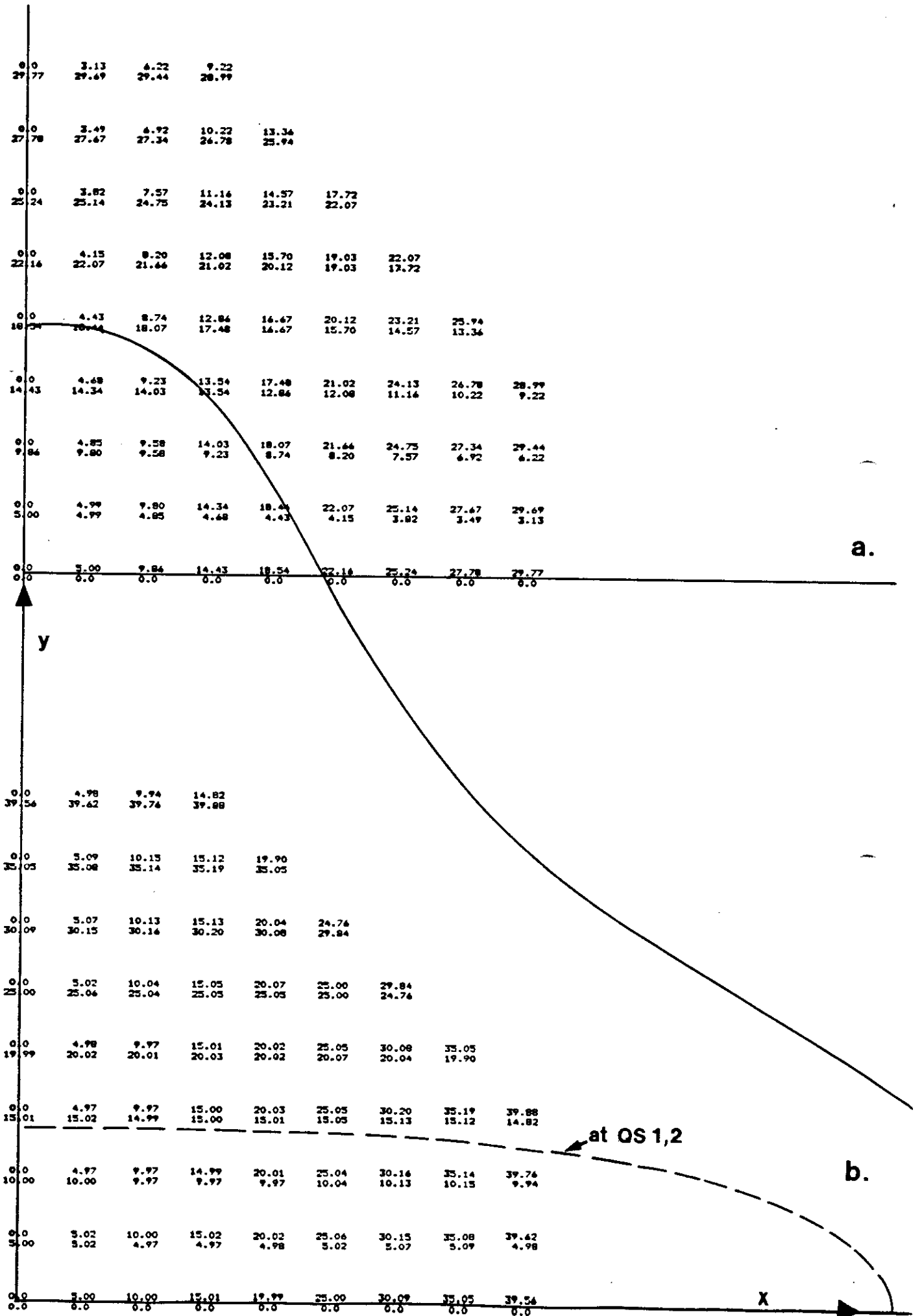
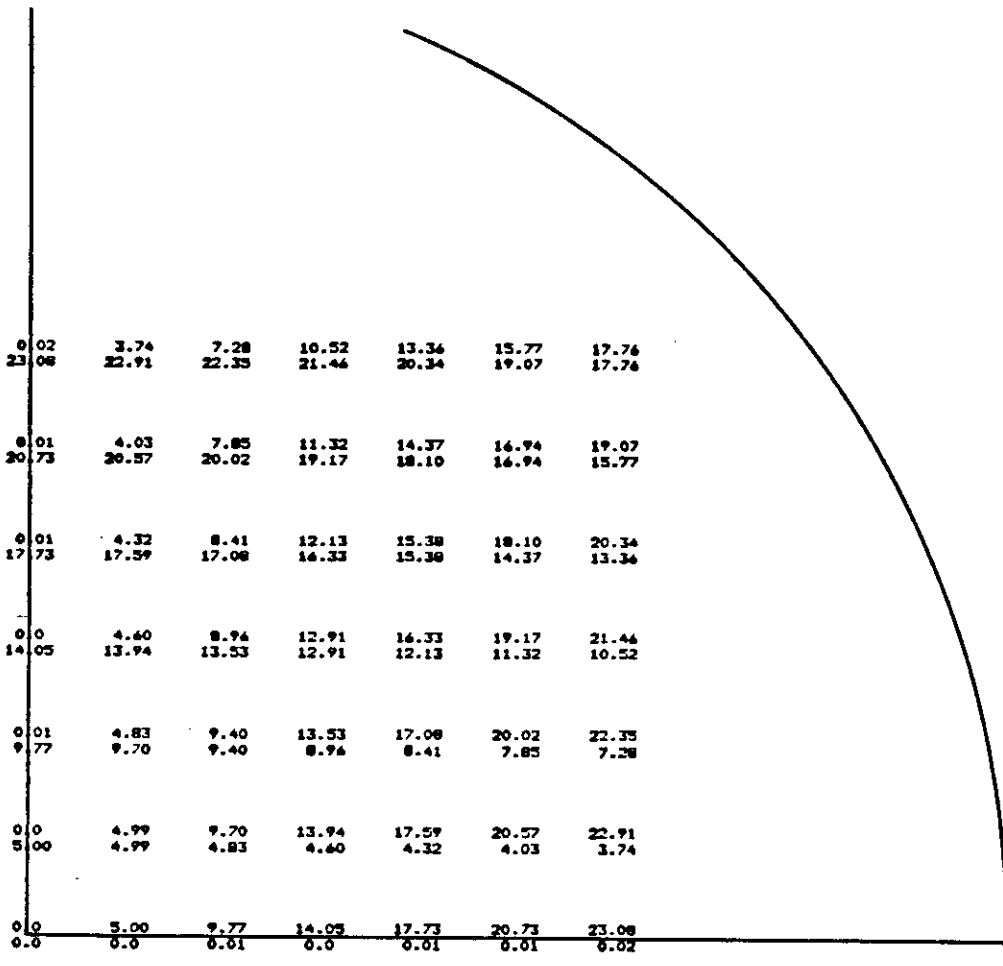
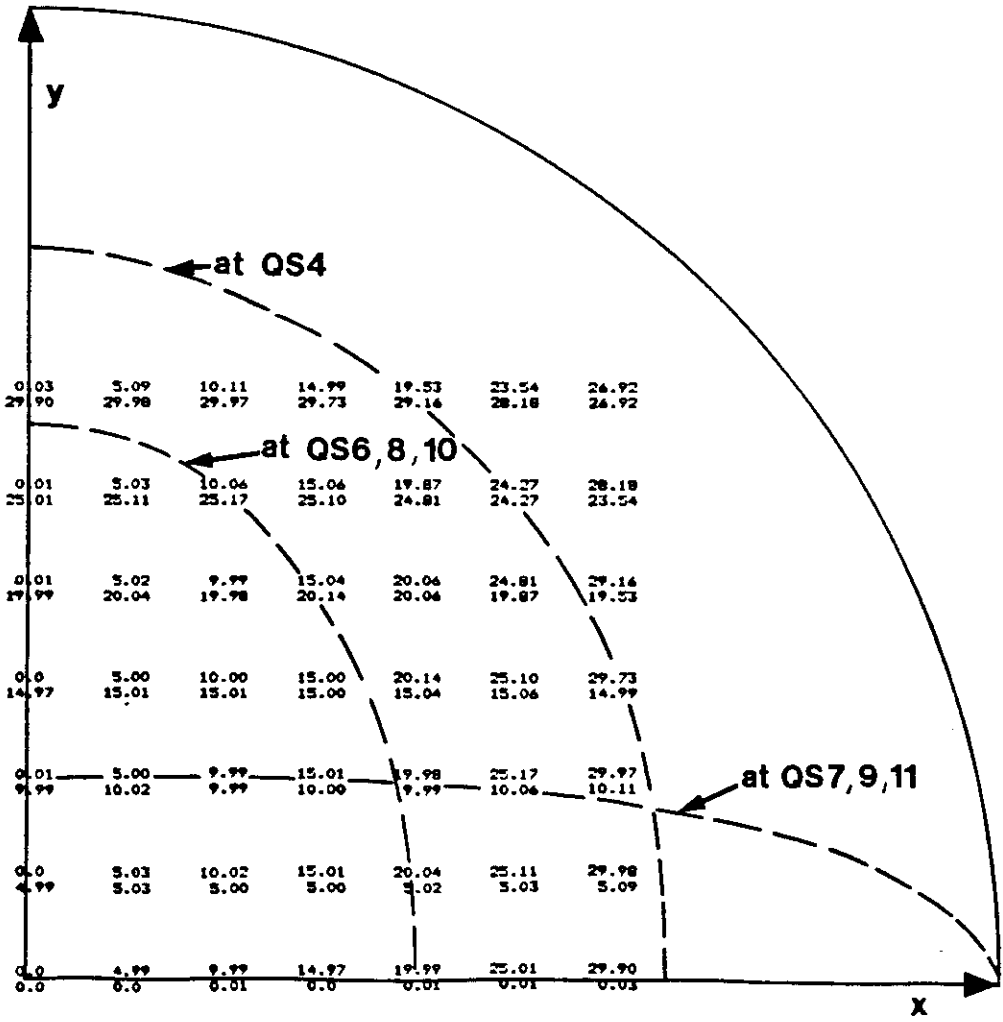


fig.6



a.



b.

fig.7

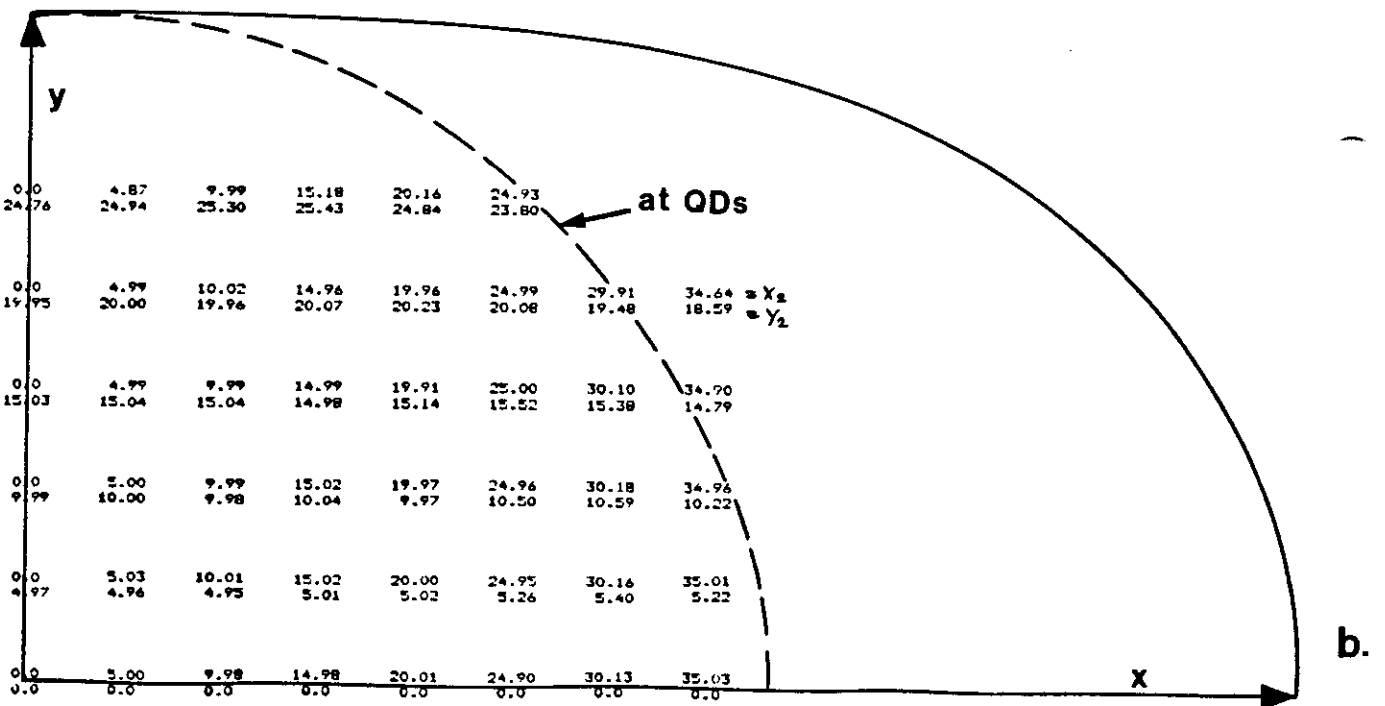
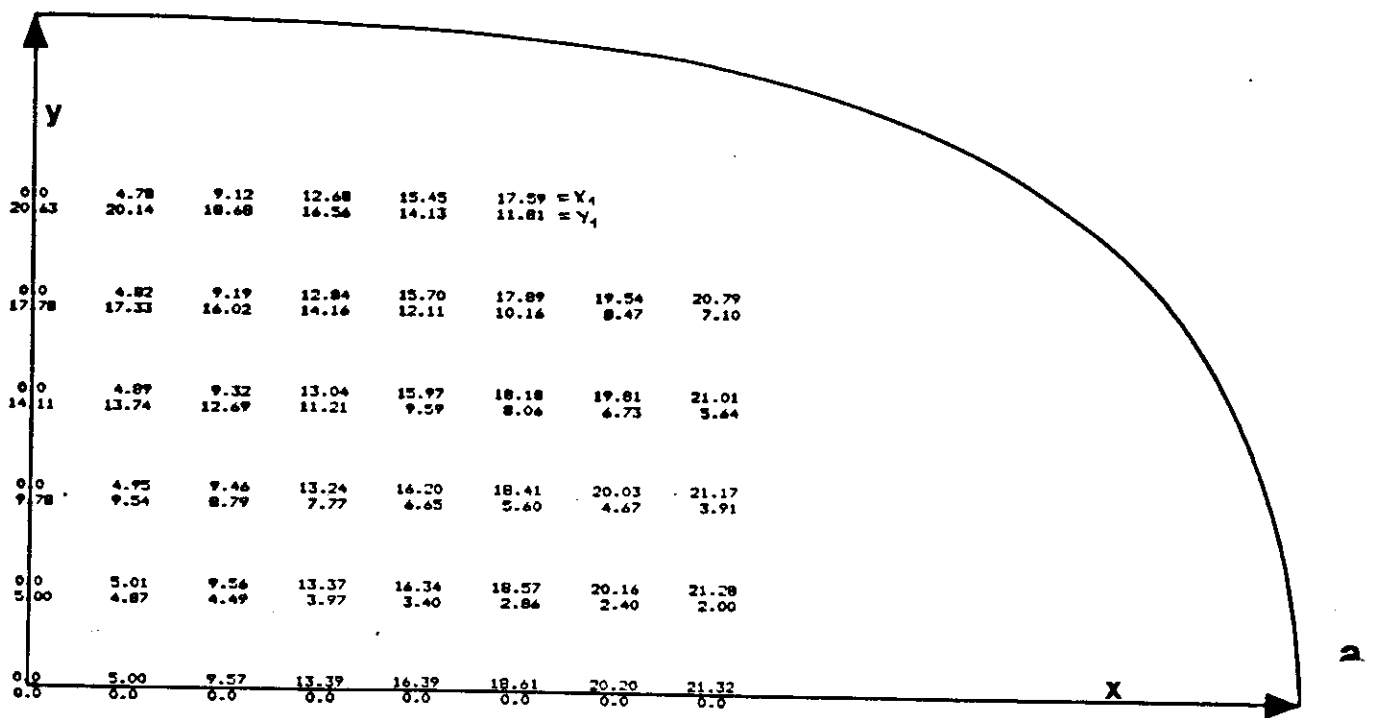
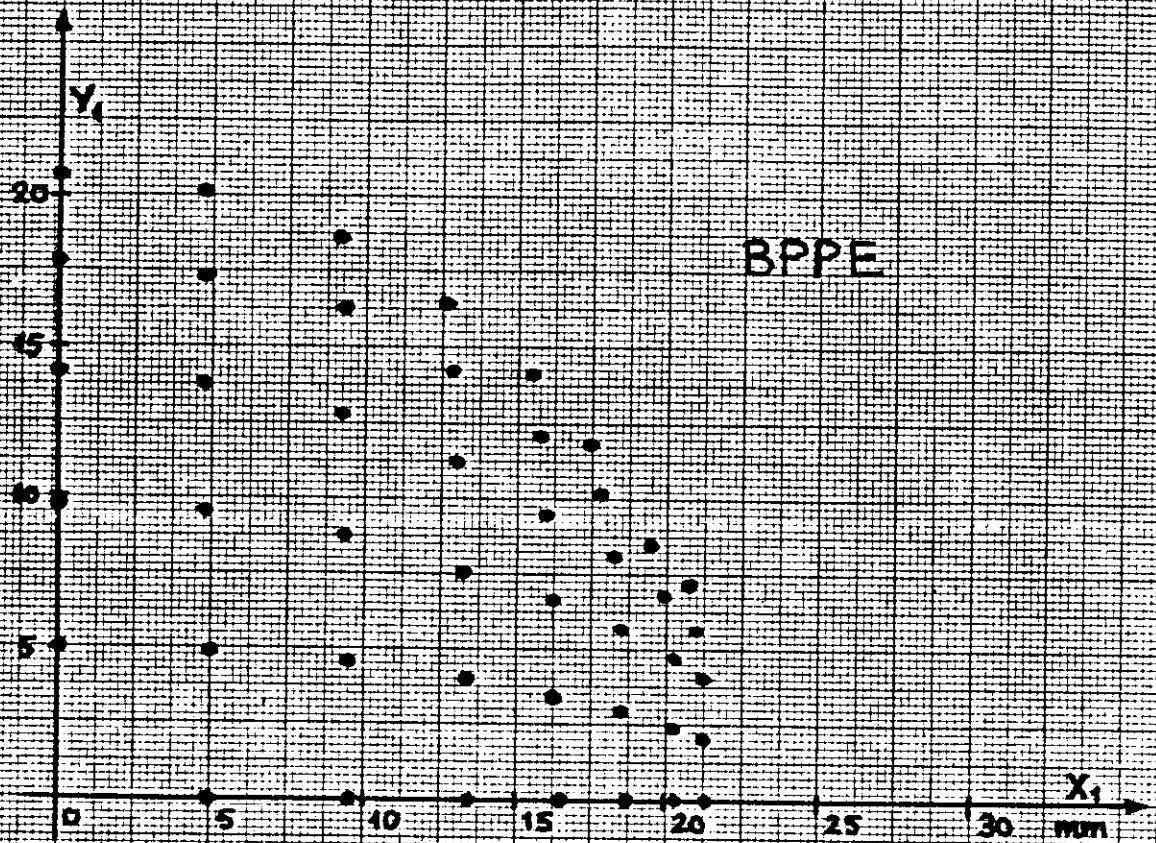
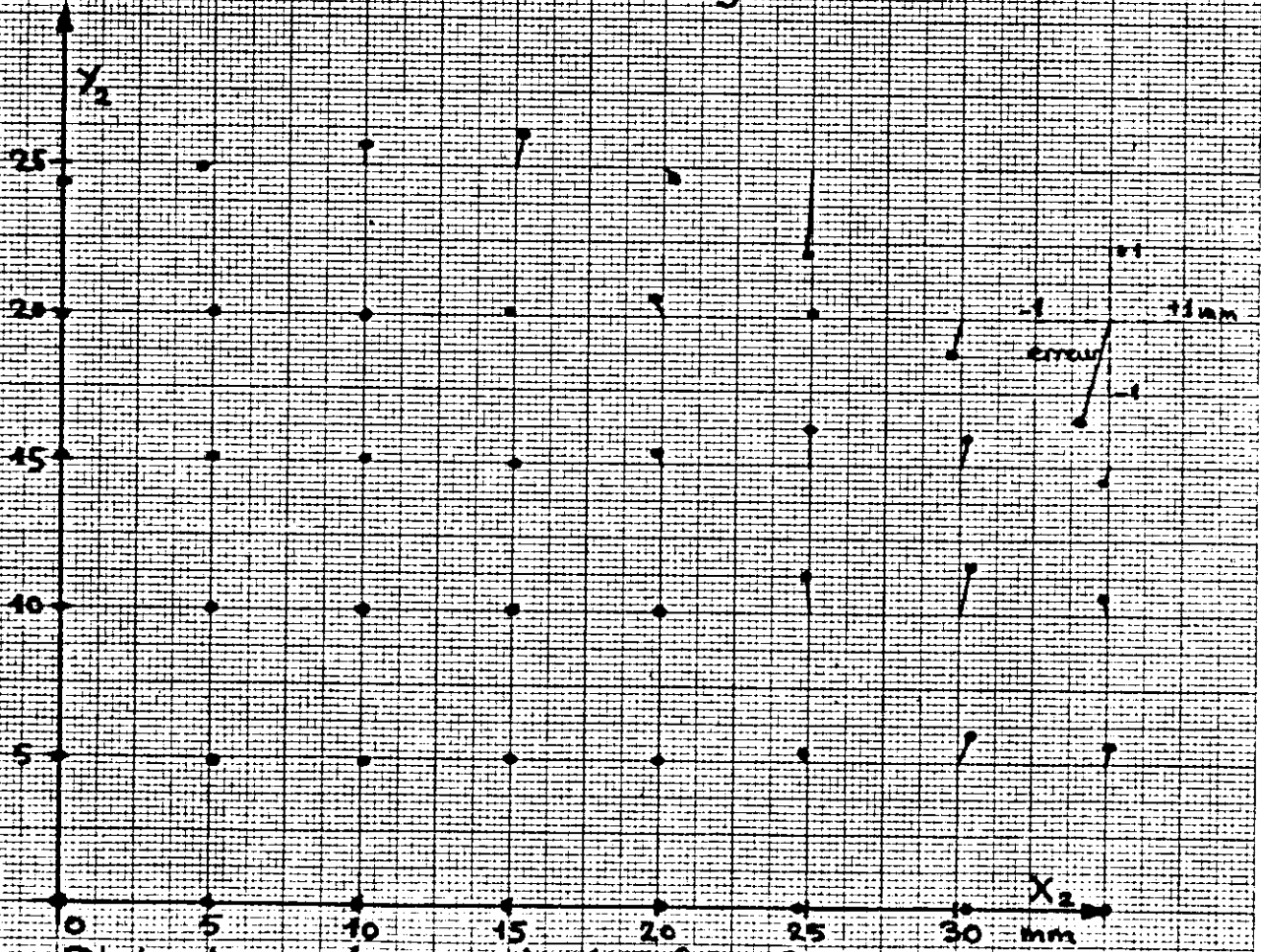


fig.8



Plot des valeurs de la fig. 8a



Plot des valeurs de la fig. 8b, avec agrandissement 5x des erreurs $X_2 - X$ et $Y_2 - Y$.