



MICROFILM N°

00080

République Tunisienne

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية
وزارة الزراعة

مركز الصومع
التوثيق الفلاحي
تونس

F

1

56074
080
15-12-74

NATIONS UNIES

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTRE DE L'AGRICULTURE

DUNES DE NEFZA
ANALYSE PAR MODELE MATHÉMATIQUE
DU FONCTIONNEMENT DU COLLECTEUR PILOTE

-15-5-74-

JUIN 1974

Ghielain DE KASILY



60

 UNES DE NEPZA

ANALYSE PAR MODELE MATHEMATIQUE

DU FONCTIONNEMENT

D U

DU COLLECTEUR PILOTE

JULI 1974

Philippe DE MARCILLY

SOMMAIRE

-:-:-

INTRODUCTION -

I - Estimation des variations naturelles de la nappe pendant la durée de l'essai.....	p 1
1 - les variations naturelles	
2 - Le modèle de convolution	
3 - Calage du modèle de convolution	
4 - Appréciation de la précision de ces calculs	
5 - Conclusion sur la déconvolution	
II - Modèle SIMON - Calage sur l'essai du collecteur	p 8
1 - Choix du matériel	
2 - Conditions aux limites	
3 - Paramètres hydrauliques	
4 - Débits	
5 - Hypothèse de simulation	
6 - Résultat du calage	
VII - Réexamen du Projet définitif de captage.....	p 17
1 - Calculs en permanent	
2 - Oscillations saisonnières	
3 - Exploitation de la réserve par pompage pendant les 15 ou 20 premières années.	
IV - Conclusions	p 20

FIGURES

-:~::~-

- 1 à 12 Pour chaque piézomètre, comparaison de l'évolution des niveaux statiques mesurés avec celle calculée par déconvolution (Mai 1971 à Avril 1974)
- 13 à 17 Fonctions de transfert.
- 18 Piézomètre 7289 - comparaison de l'évolution du niveau statique observé avec celle calculée.
- 19 Piézomètre 7327 - idem -

PLANCHES

-:~::~-

- 1 Maillage du sous modèle
- 2 à 5 Ajustement des rabattements
- 6 Carte piézométrique en régime permanent après 30 ans (pompage à 800 l/s)
- 6b Carte de rabattement entre 0 et 30 ans (pompage à 800 l/s)
- 7 Carte piézométrique en régime permanent
Captege définitif.-

DUNES DE HEFZA

—○—○—○—○—

ANALYSE PAR MODELE MATHEMATIQUE DU FONCTIONNEMENT DU COLLECTEUR PILOTE

—○—○—○—○—

INTRODUCTION

L'ensemble des études réalisées sur le versant maritime des dunes de Hefza avait conduit à estimer les ressources exploitables à :

- 650 l/sec en régime permanent. Ce débit peut être capté en 6 mois par an, au rythme de 1.300 l/sec. Il peut être porté à :
- 800 l/sec (à 1.600 l/sec 6 mois par an) pendant les 15 premières années environ.

Un projet de captage, comprenant 14,3 km de collecteur, était proposé pour capter cette ressource.

En vue de confirmer ces estimations, la portion centrale de ce collecteur a été construite, sur 800 m environ, et exploitée pendant 5 mois et demi au débit double du débit nominal prévu.

La présente note étudie le fonctionnement de ce collecteur pilote et rassemble les aménagements éventuels que cet essai conduit à recommander quant au projet définitif de captage de la dune.

—○—○—○—○—

1. ESTIMATION DES VARIATIONS NATURELLES DE LA NAPPE PENDANT LA DURÉE DE L'ESSAI.

1. Les variations naturelles

L'essai de prélèvement sur le collecteur pilote a duré exactement de 5/11/73 au 19/4/74, et la remontée a été mesurée et interprétée jusqu'au 5/6/74. La description du collecteur et de l'essai proprement dit a été faite par ailleurs (Talbot, 1973 et 1974), nous n'y reviendrons pas ici.

Une première question qui se pose est de rétablir quelles auraient été les fluctuations naturelles de la nappe des dunes pendant cet essai en l'absence de prélèvement. En effet, si l'on veut interpréter les mesures sur les piézomètres un peu éloignés du collecteur, il est indispensable de tenir compte, pour un aussi long essai, de ces fluctuations naturelles.

Il se trouve de plus que la pluviométrie de l'hiver 73-74 est assez déficitaire par rapport aux années précédentes : la majorité des piézomètres accusent un tarissement très net, parfois bien supérieur au rabattement qu'a pu introduire l'essai sur le collecteur.

Pour compliquer encore les choses, on s'aperçoit que les variations des piézomètres situés en amont de la dune sont décalées de plusieurs mois par rapport aux pluies, à cause de la grande épaisseur de sable non saturé qui surmonte la nappe (30 m environ).

Pour toutes ces raisons, il était donc exclu d'envisager une correction empirique des observations piézométriques réalisées.

2. Le modèle de convolution

On a eu recours à une méthode nouvelle d'étude des variations naturelles des nappes, la déconvolution, mise au point par D. POITRIMAL au Laboratoire d'Hydrogéologie Mathématique de l'École des Mines de Paris.

.../...

Sur les 24 piézomètres de l'aquifère où l'on disposait d'un historique des fluctuations piézométriques mensuelles de la nappe, on a fait l'hypothèse qu'il existait une relation linéaire de convolution entre la hauteur piézométrique h à un mois n donné et l'historique des moyennes mensuelles des pluies ayant précédé le mois n . Plus précisément, on écrit que :

$$h(n) = \sum_{i=0}^{\infty} f(i) p(n-i) + h_0$$

où - h est la hauteur piézométrique dans le piézomètre

- i est le mois considéré
- $f(i)$ est la "fonction de transfert", ou la "réponse impulsionnelle" du piézomètre considéré
- $p(j)$ est la pluie moyenne du mois j
- ∞ est la "mémoire" du système, c'est à dire le temps au bout duquel une pluie donnée n'a plus d'influence sensible sur le niveau de la nappe (∞ peut être très élevé, de plusieurs dizaines de mois).
- h_0 est une constante.

Cette relation est évidemment une approximation de la réalité, mais permet généralement de restituer correctement des historiques de piézométrie ou de débit dans un aquifère. On peut, si cela est nécessaire améliorer la qualité des ajustements en introduisant des non linéarités, soit au niveau de la pluie (pluie efficace par exemple) soit au niveau de la fonction de transfert elle-même. Nous n'entrerons pas dans des détails ici et renvoyons pour plus de précision aux publications citées en référence (POITHRINAL et MARSILY 1973).

Physiquement, la relation de convolution signifie simplement que la charge piézométrique au mois n est fonction de la pluie au mois n , au mois $n-1$, au mois $n-2$...etc, avec des "coefficients de pondérations" variables pour chacun de ces mois.

Le problème consiste à déterminer dans cette relation :

- la mémoire ∞
- la constante h_0
- la fonction de transfert f

.../...

On utilise pour cela l'historique ancien du piézomètre, où l'on connaît à la fois h et p , la charge piézométrique et la pluie.

On approxime m et h_0 par essais successifs. On calcule f par une méthode de déconvolution (originale) dite "par projections successives", particulièrement stable vis à vis du "bruit" des mesures.

3. Calage du modèle de convolution

Ce travail a été réalisé systématiquement par MM. BEJBEZ et POITRINAL à Fontainebleau à l'Ecole des Mines pour les 24 piézomètres de l'aquifère où l'on disposait d'au moins 18 mois de mesures.

La "mémoire" m du système s'établit à environ 16 mois, et la constante h_0 varie de 0 à 43 m suivant l'altitude du piézomètre sur le versant de la mer.

Les résultats de ces calculs sont présentés graphiquement sur les figures 1 à 12.

Sur ces figures, les numéros des mois sont portés en abscisse, de 1 à 96 (c'est à dire de mai 71 à avril 74). La partie basse du graphique représente les pluies mensuelles à la station de Tabarka-Forêt, exprimées en mm. Au-dessus, en regard des pluies, se trouve la valeur mensuelle de la différence de cote piézométrique $h - h_0$, exprimée en m. La valeur de h_0 apparaît dans le titre de la figure, avant le numéro du piézomètre.

Deux courbes sont représentées :

- avec le symbole "+", l'évolution mesurée de la charge dans le piézomètre, mois par mois, sur toute la période de mesure.
- avec le symbole ".", l'évolution calculée par l'équation de convolution. L'écart entre les deux courbes représente donc l'ajustement du "modèle" à la réalité.

La période où les deux courbes sont présentes encadrées à gauche et à droite par des verticales hachurées, représente la durée de l'historique connu sur lequel a été déterminé la fonction de transfert f par déconvolution pour chacun des piézomètres.

.../...

Figure 1

PLATE 10010 JAGGAL 1972

W ON METERS 101-3 1116-1732

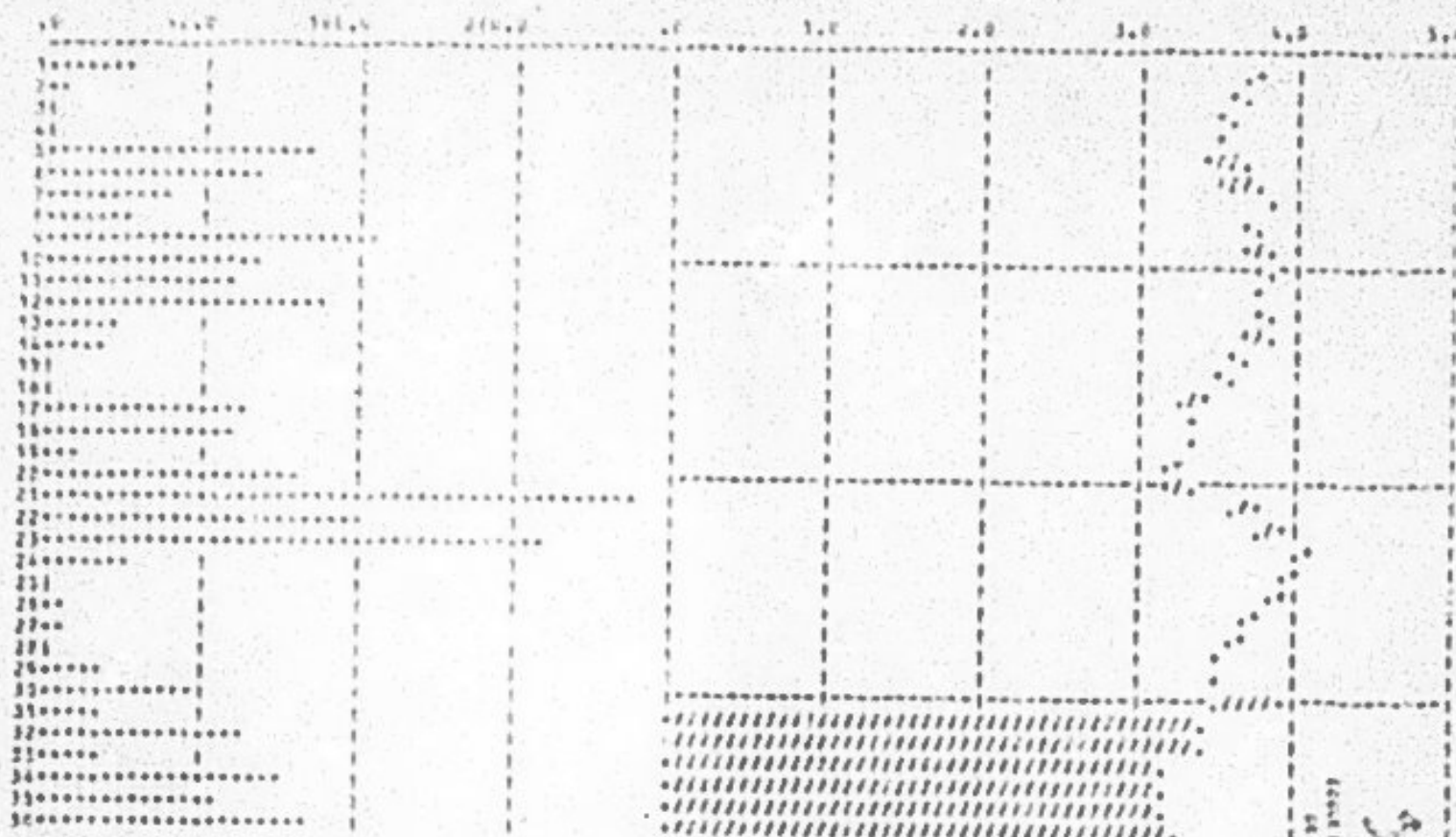


PLATE 10010 JAGGAL 1972

PLATE 10010 JAGGAL 1972

W ON METERS 101-3 1116-1732

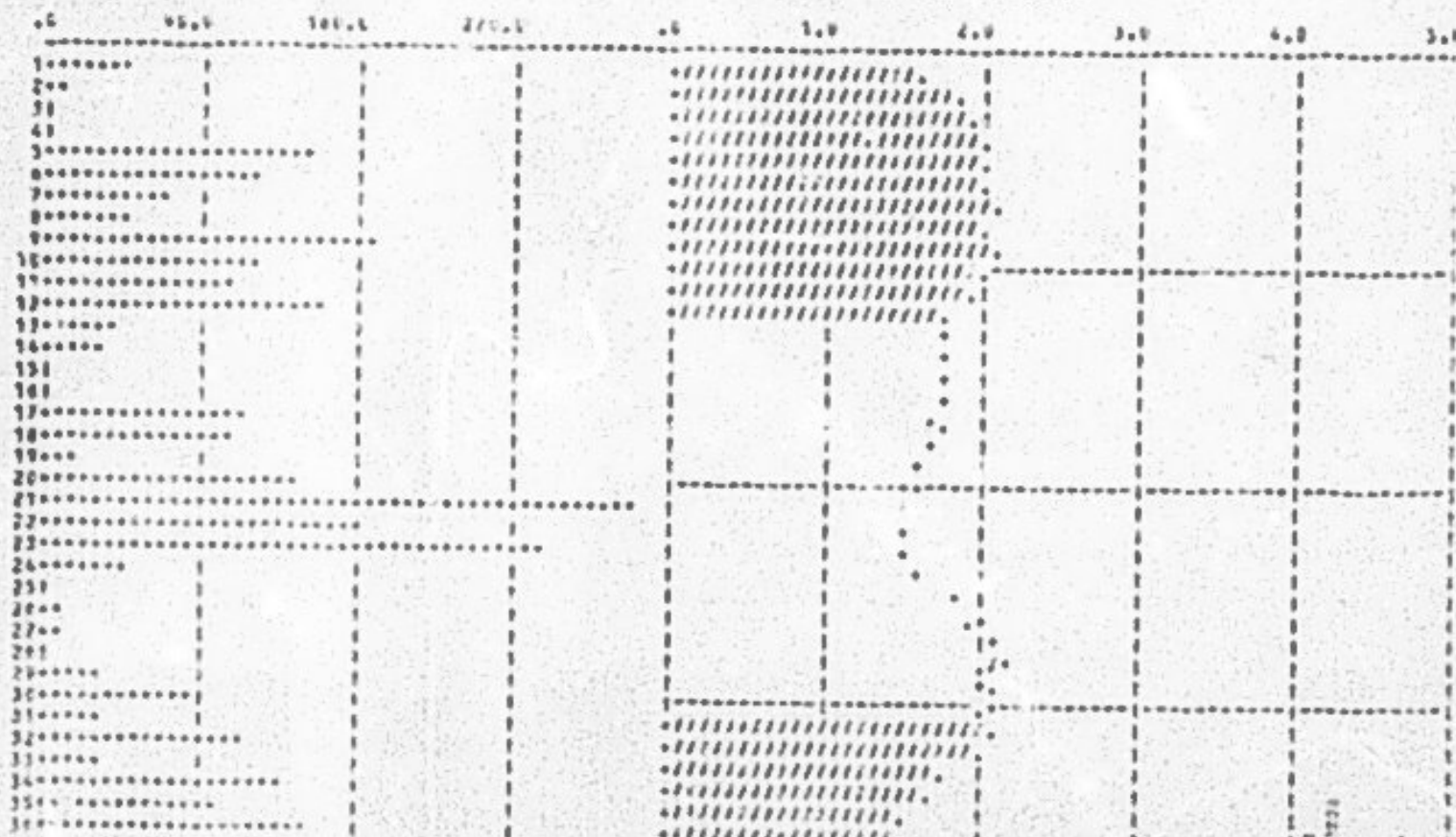


PLATE 10010 JAGGAL 1972

Figure 1

PLATE 10010 JAGGAL 1972

W ON METERS 101-3 1116-1732

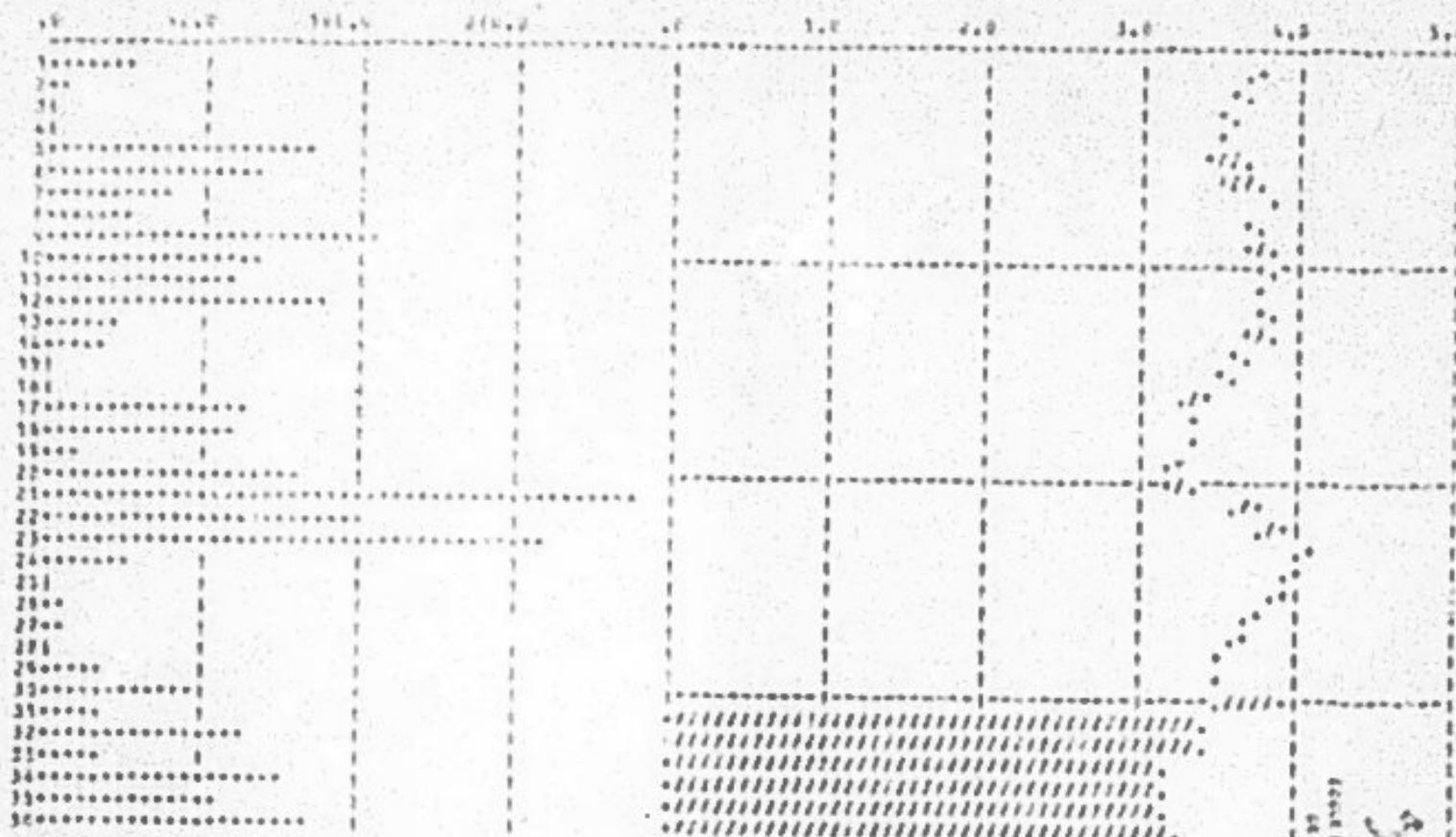


PLATE 10010 JAGGAL 1972

W ON METERS 101-3 1116-1732

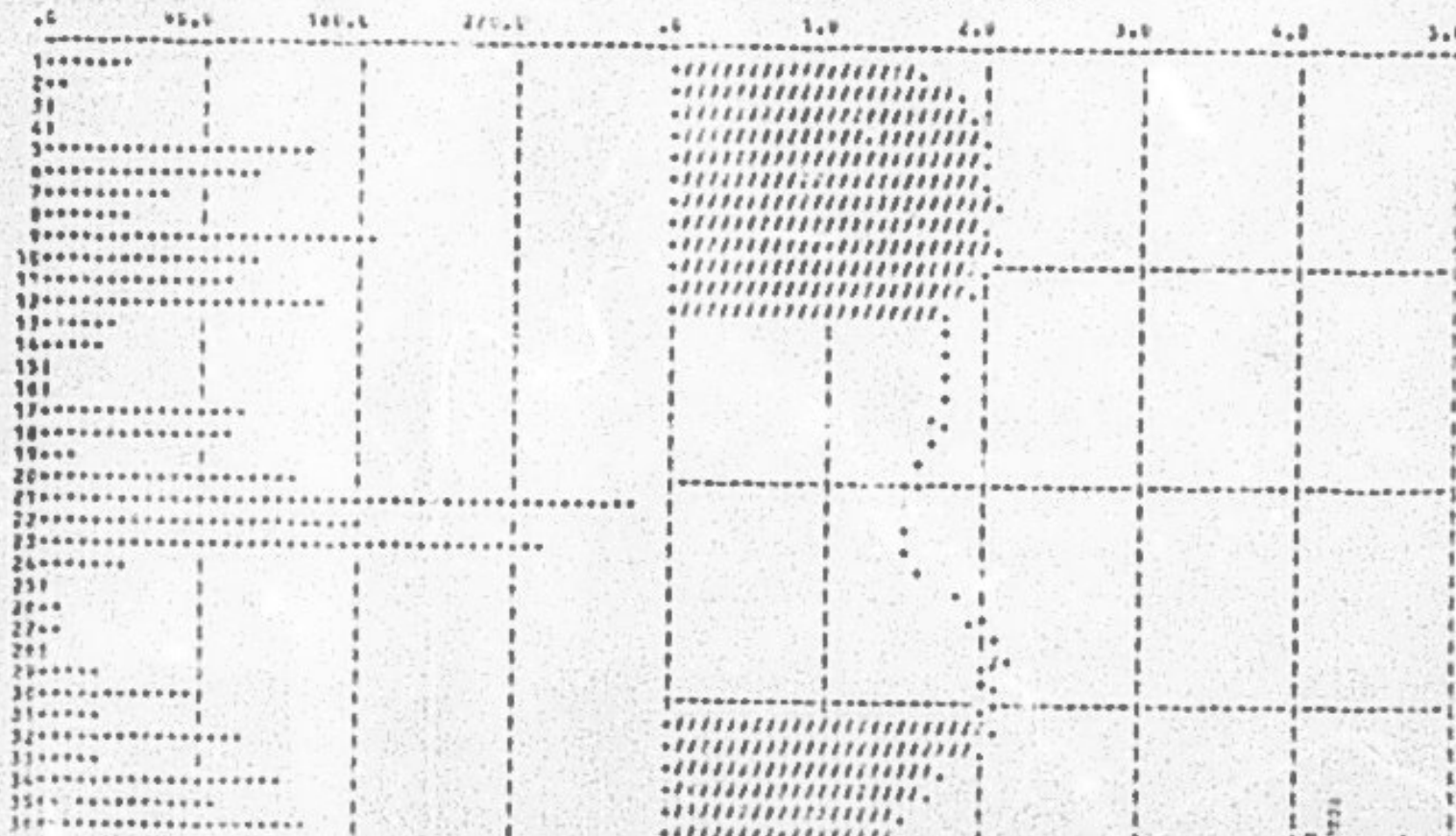
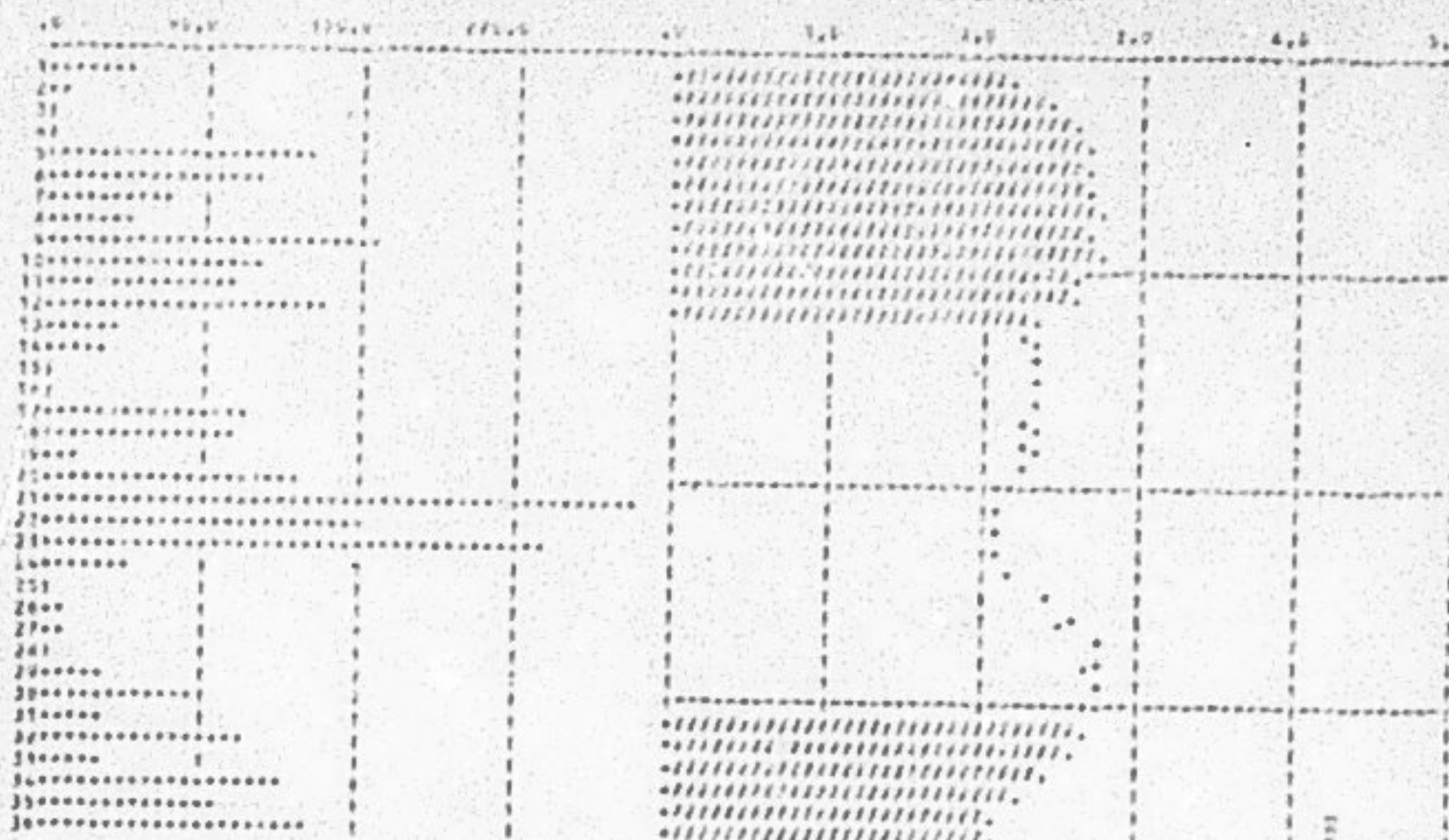


Figure 2

FLUID LOSS (gms) 1772

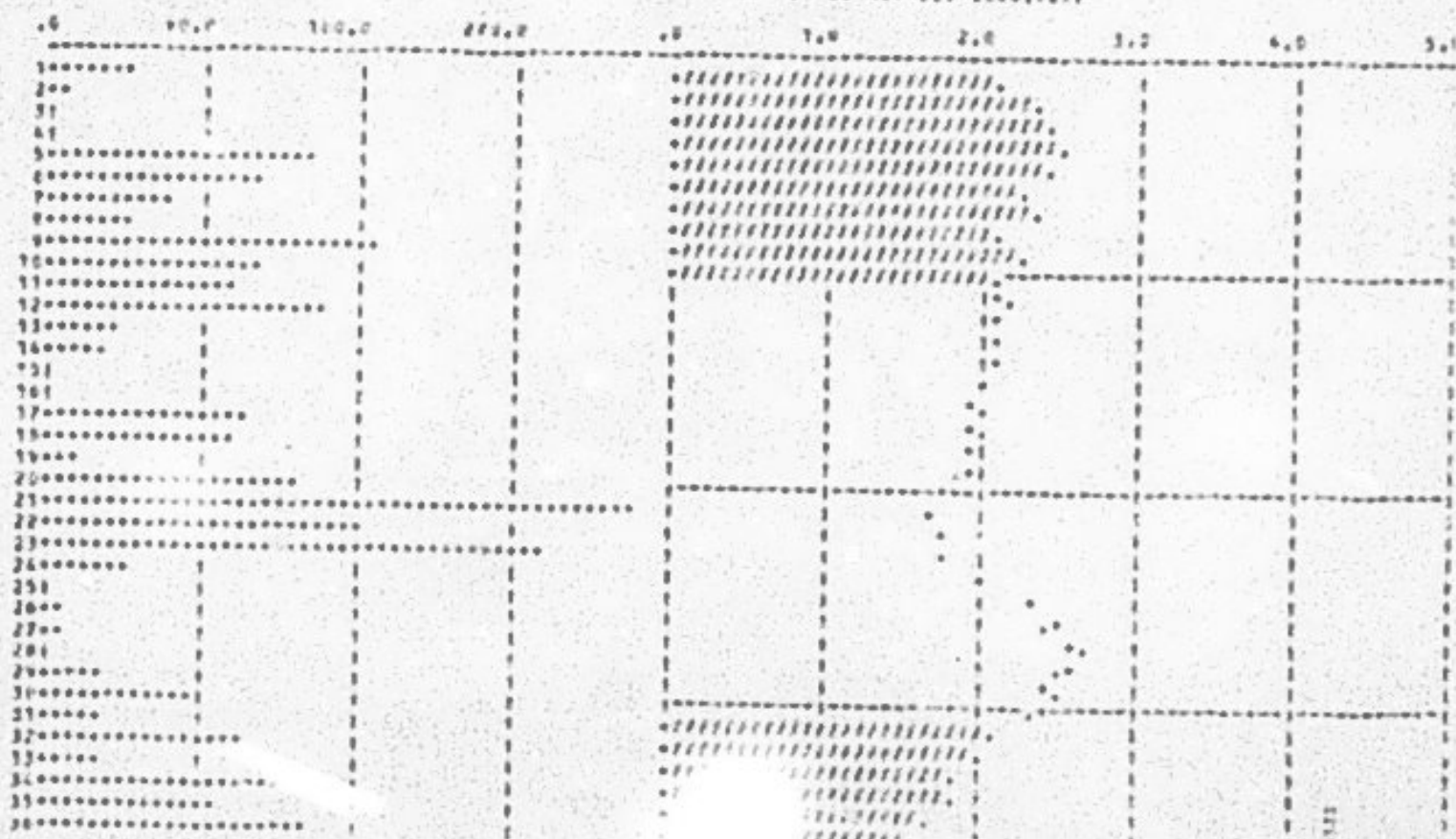
W L METERS 405-22.01401724



FLUID LOSS (gms)
W L METERS 405-22.01401724

FLUID LOSS (gms) 1772

W L METERS 405-22.01401724

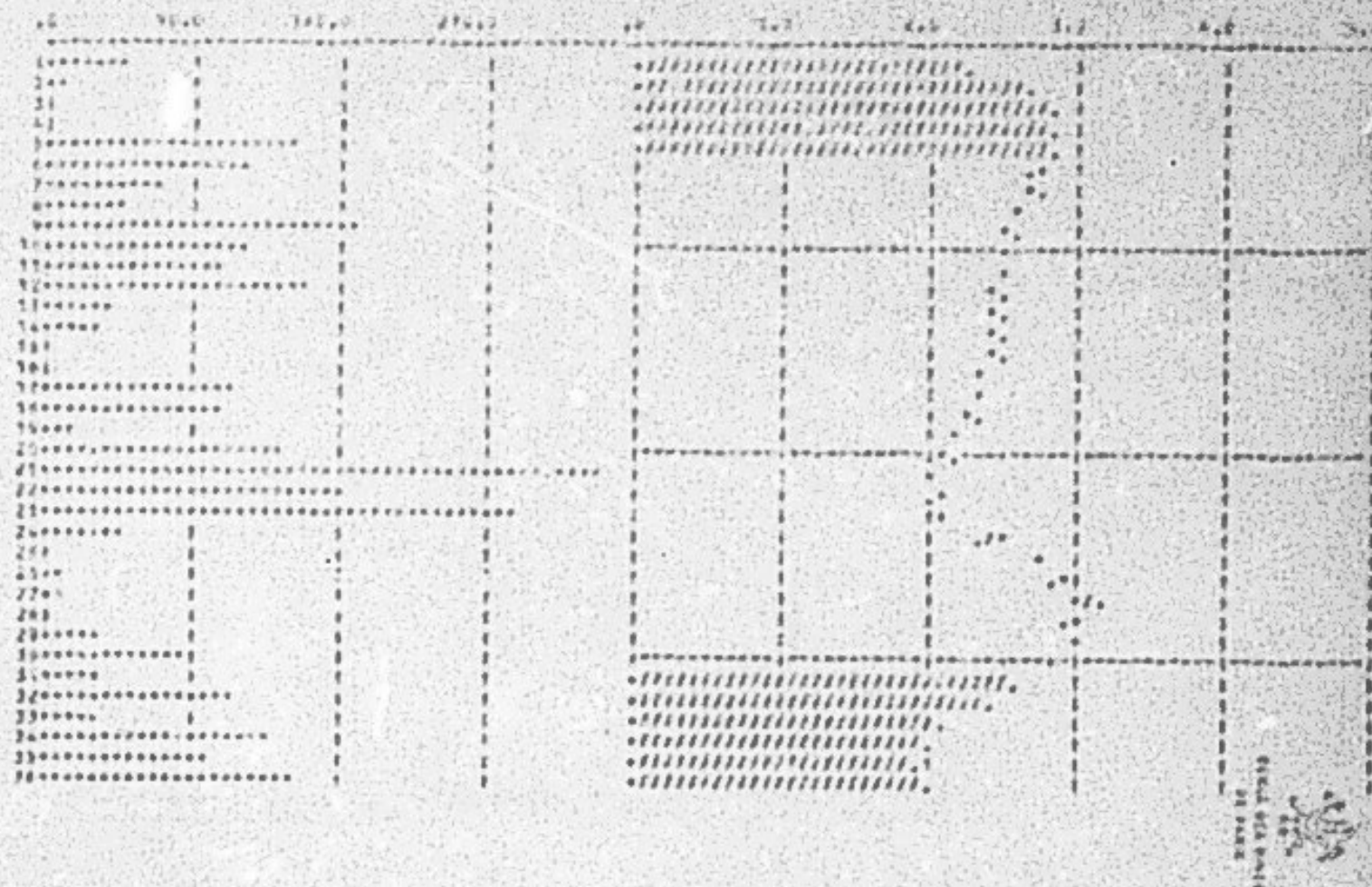


FLUID LOSS (gms)
W L METERS 405-22.01401724

Figure 3

FLIGHT DATA TRACKING SHEET

U.S. AIR FORCE AIRCRAFT TRACKING



FLIGHT DATA TRACKING SHEET

U.S. AIR FORCE AIRCRAFT TRACKING

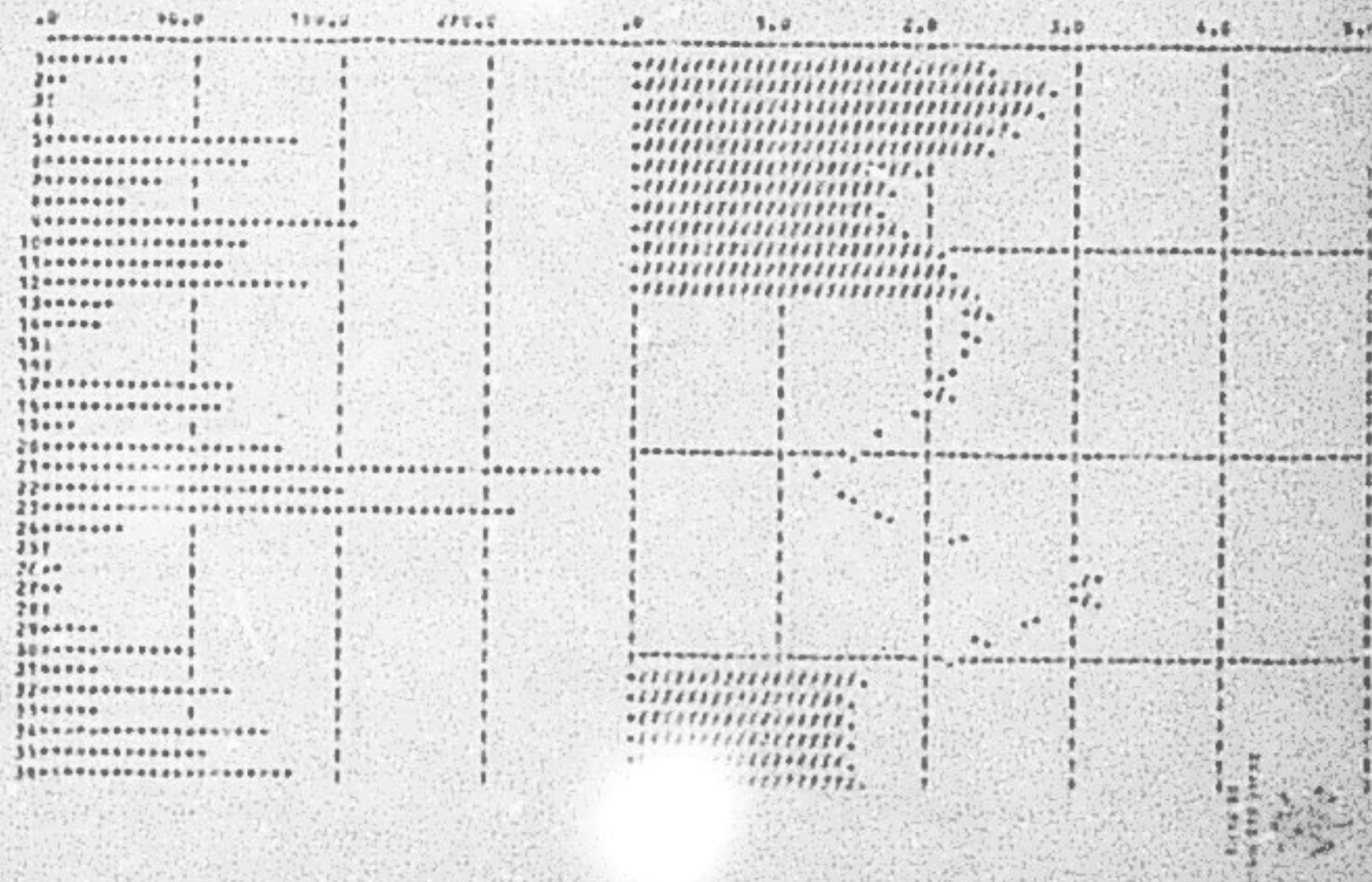
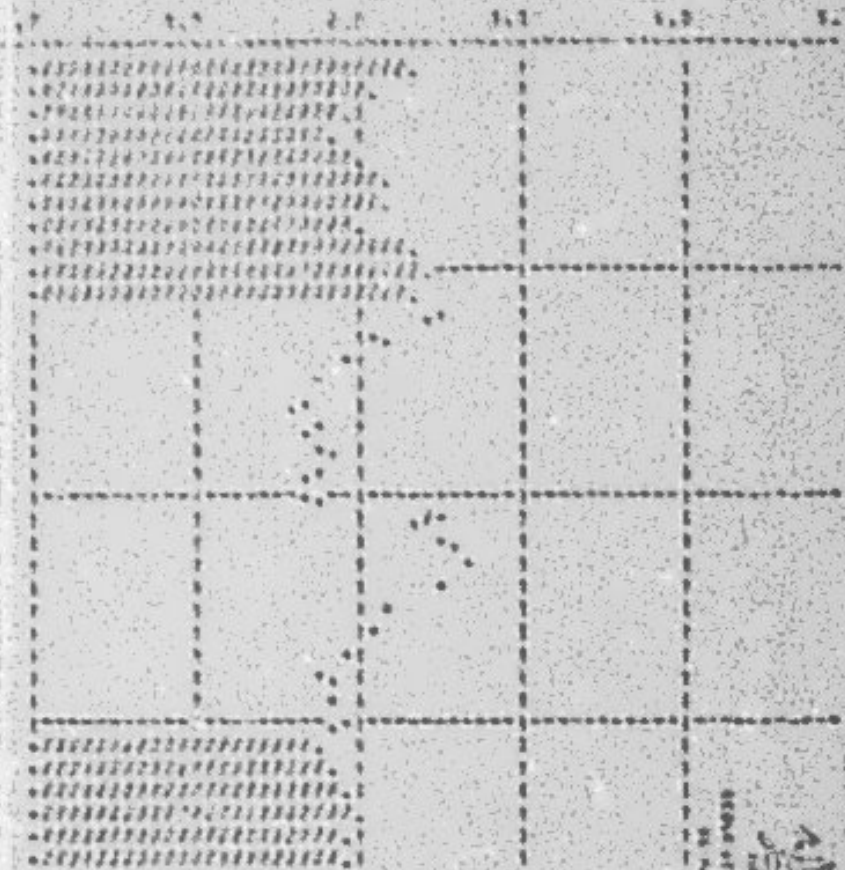


Figure 4

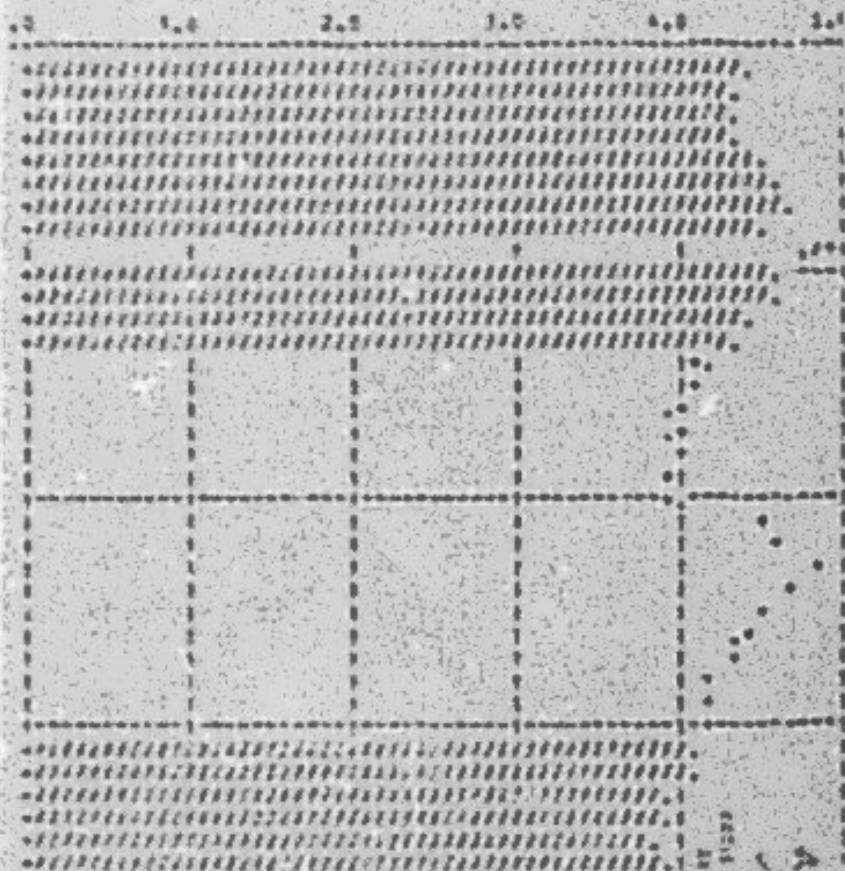
U.S. AIR FORCE, WASHINGTON, D.C.



U.S. AIR FORCE
WASHINGTON, D.C.



U.S. AIR FORCE, WASHINGTON, D.C.

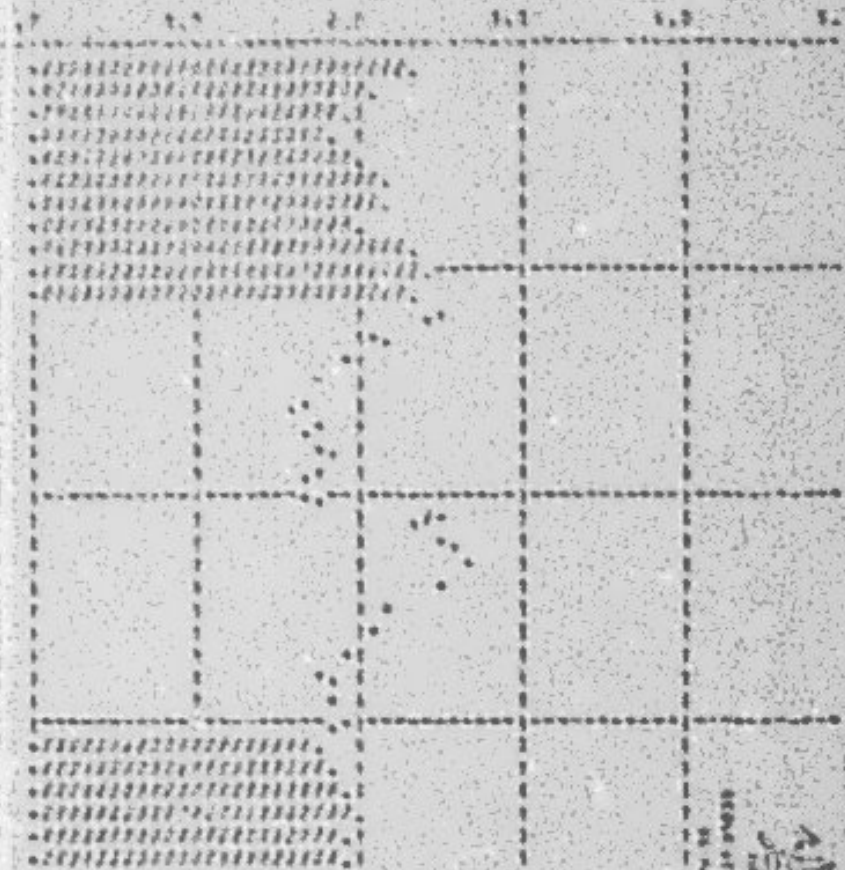


U.S. AIR FORCE
WASHINGTON, D.C.



Figure 4

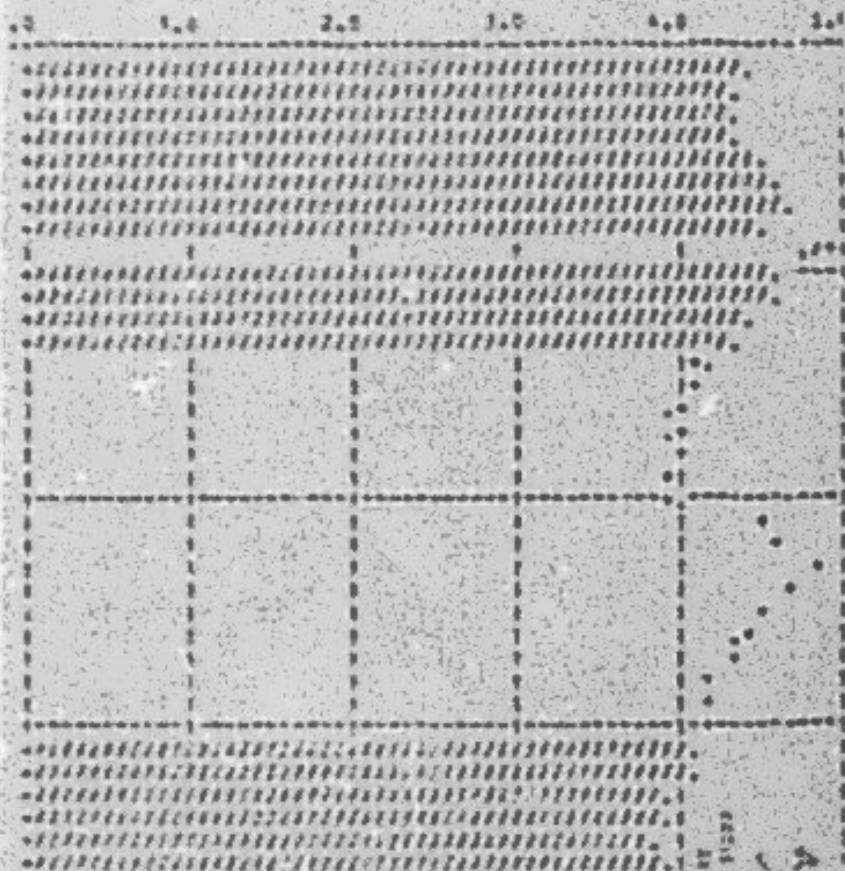
U.S. AIR FORCE, WASHINGTON, D.C.



U.S. AIR FORCE
WASHINGTON, D.C.



U.S. AIR FORCE, WASHINGTON, D.C.



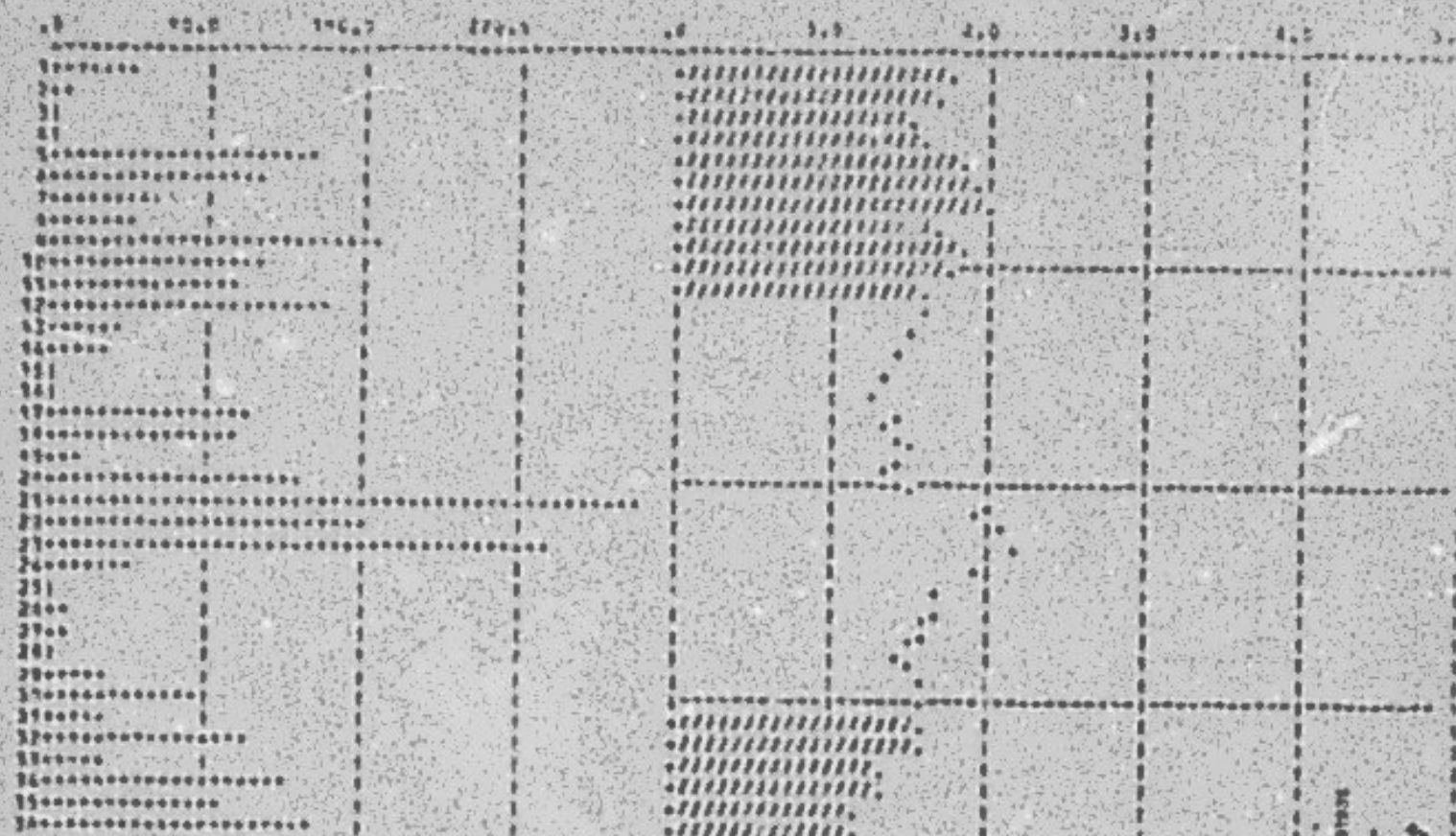
U.S. AIR FORCE
WASHINGTON, D.C.



Figure 5

FLYIN 10.10 100000 1700

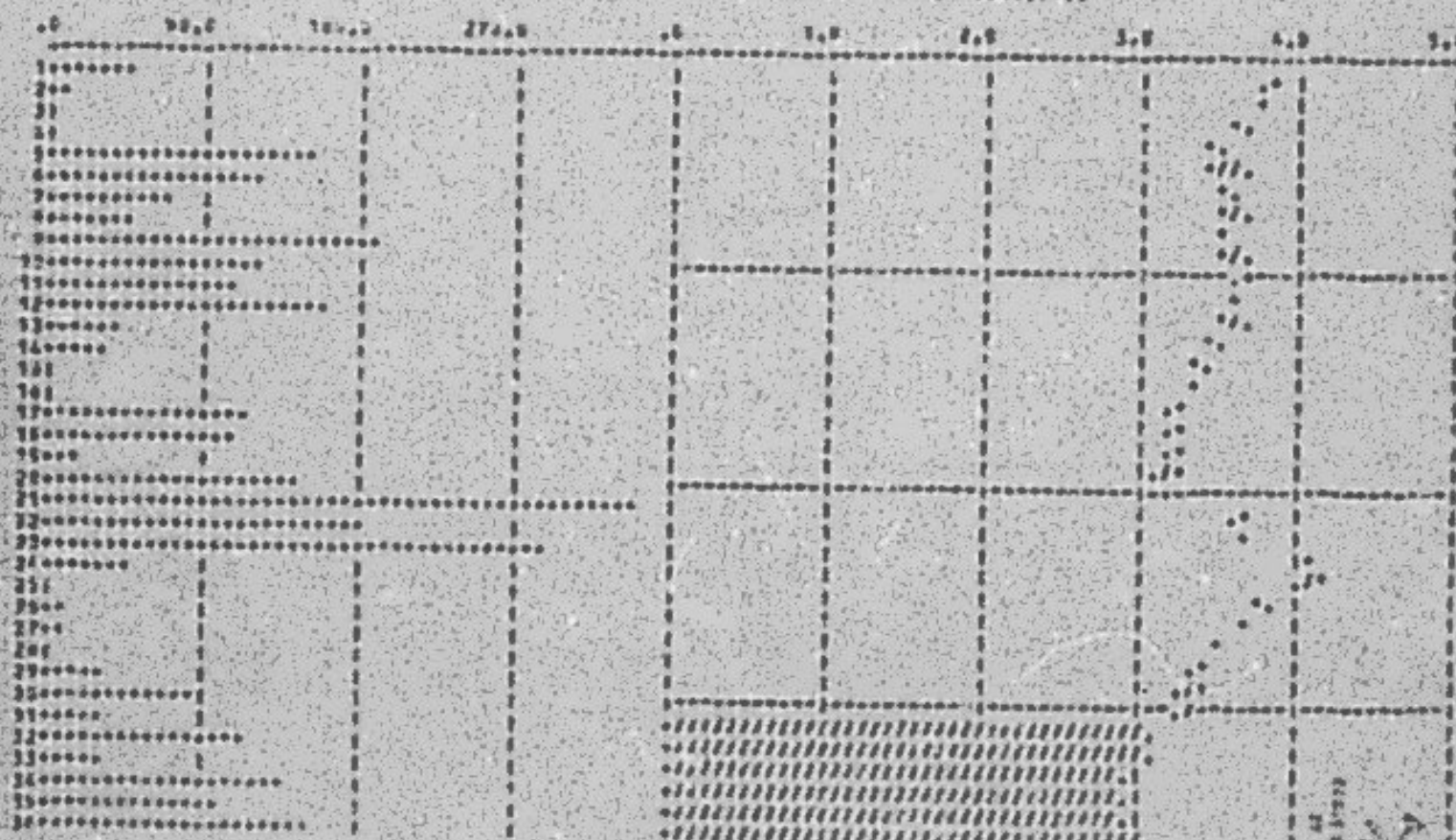
IN 10 10000 1000 1700



10000 1700

FLYIN 10.10 10000 1700

IN 10 10000 1000 1700

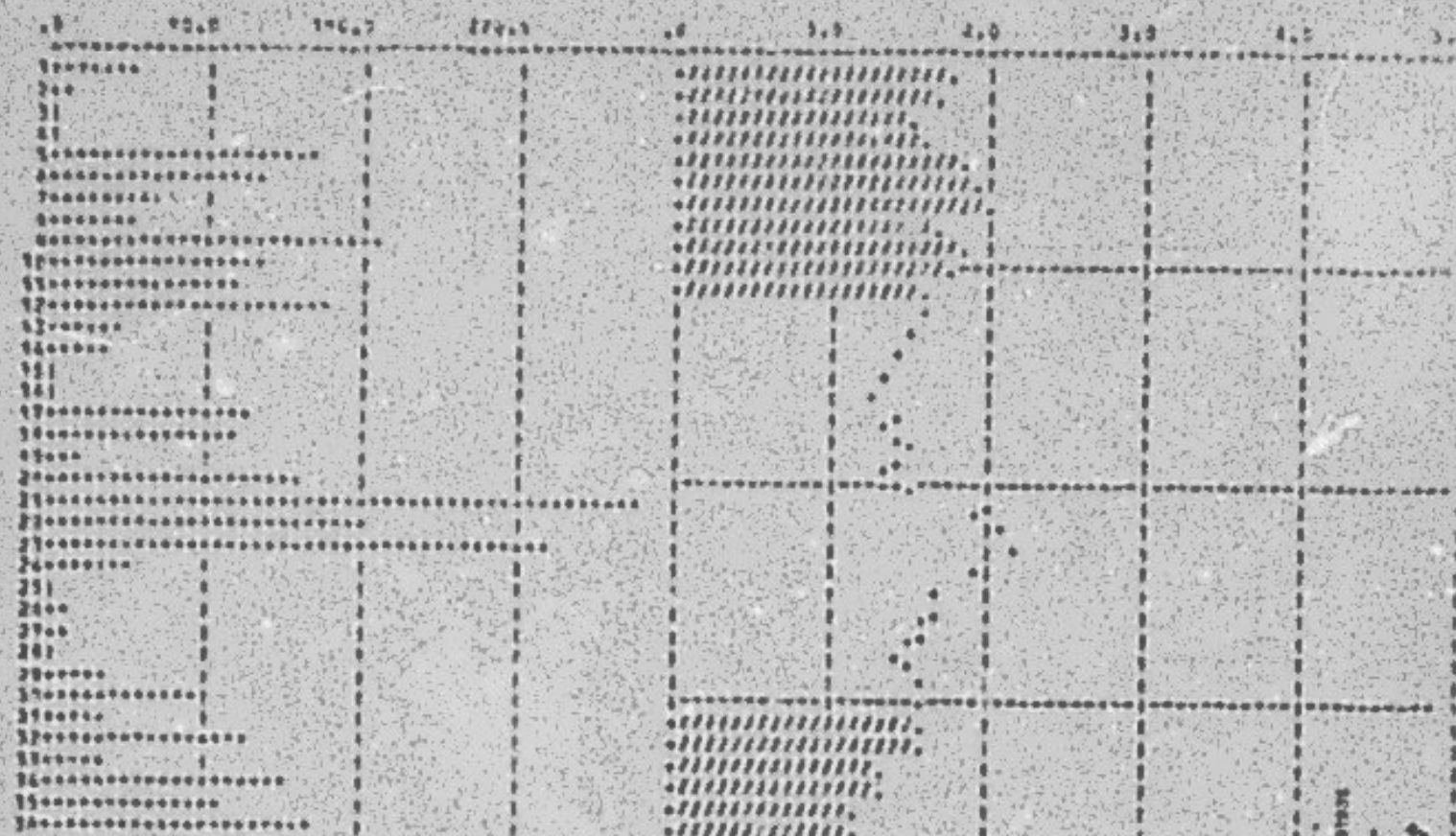


10000 1700

Figure 5

FLYIN 10.10 100000 1700

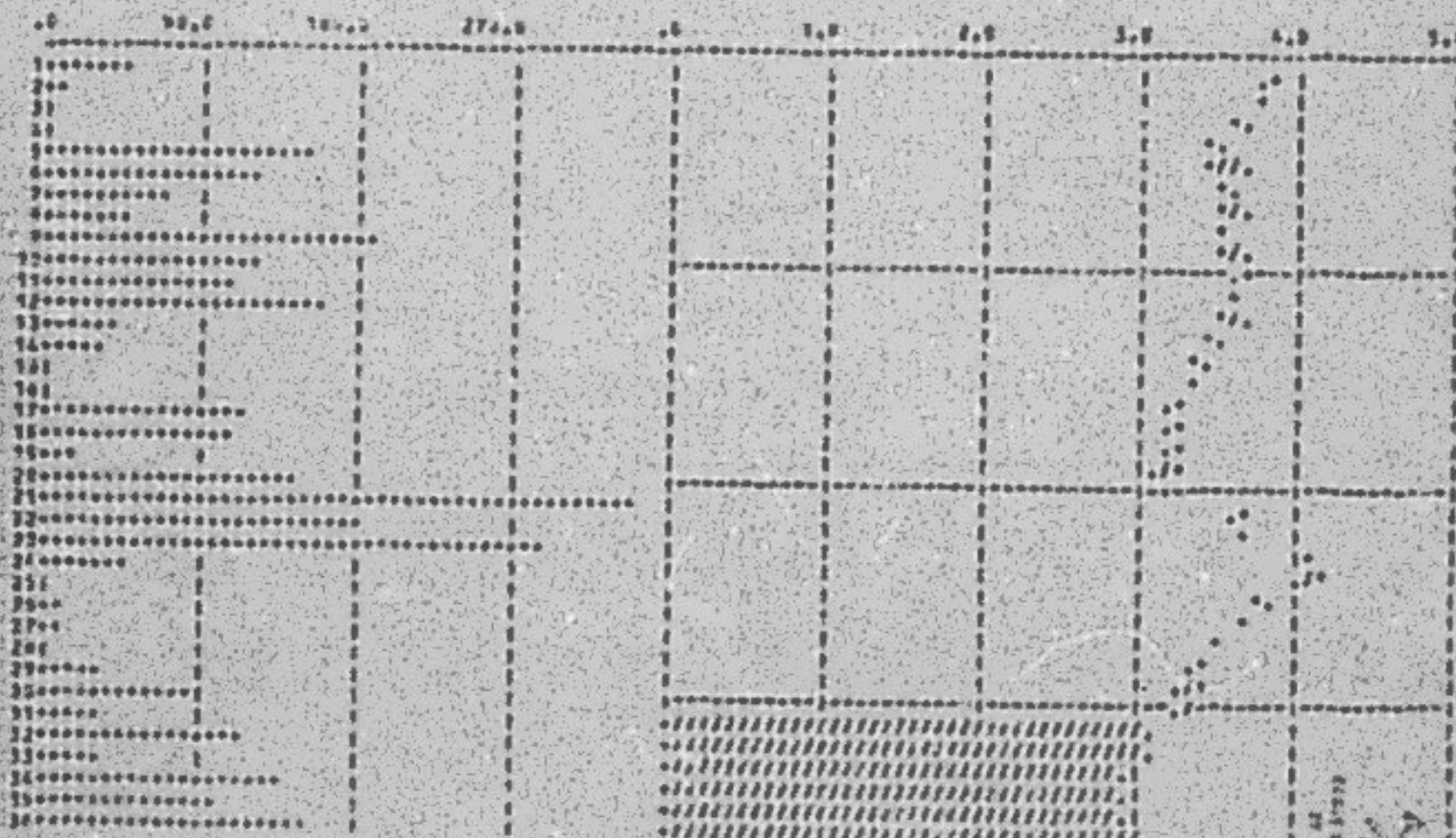
IN 10 10000 1000 1700



10000 1700

FLYIN 10.10 10000 1700

IN 10 10000 1000 1700

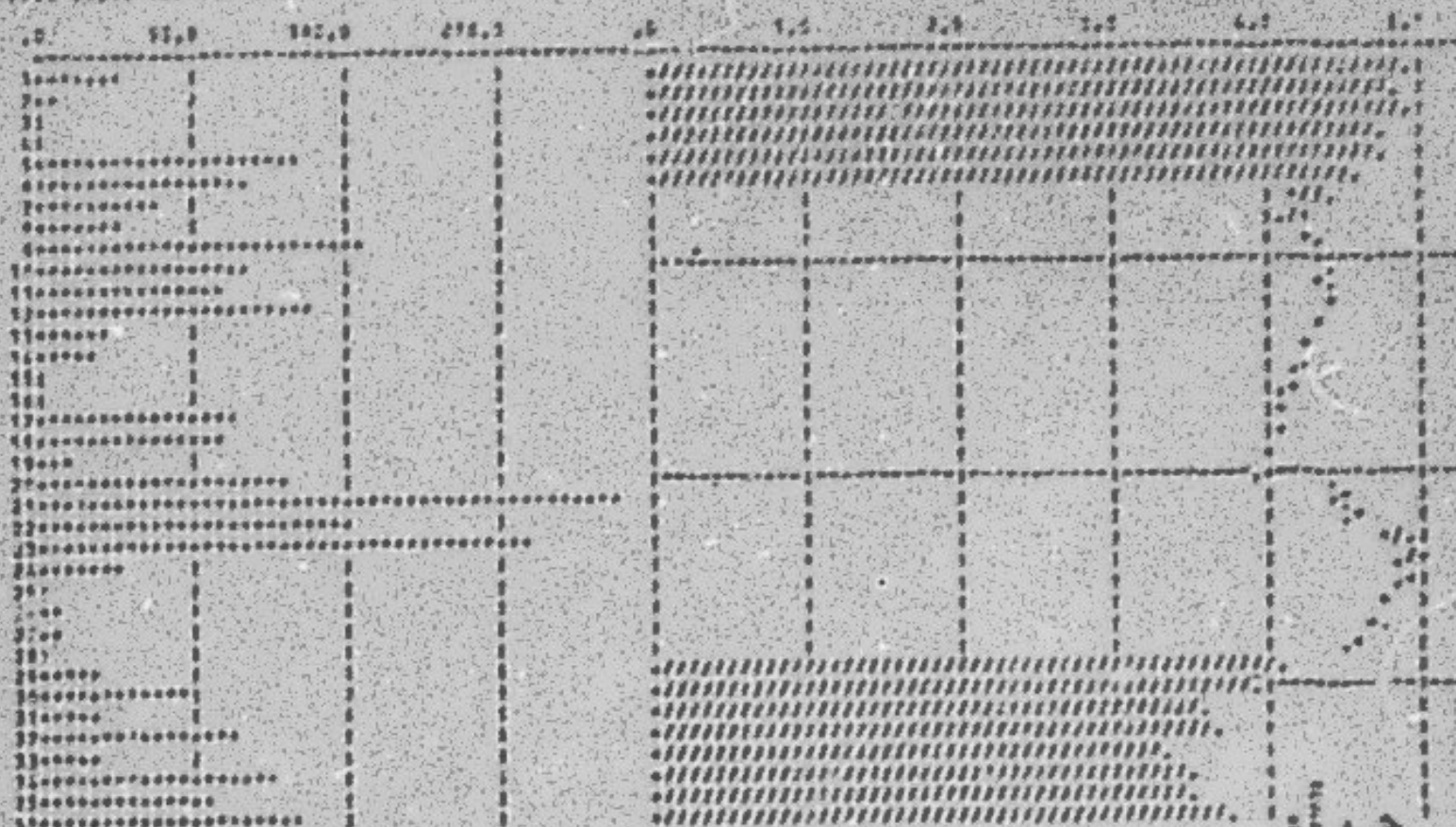


10000 1700

Figure 6

PLATE STATE TANDARD (M-1)

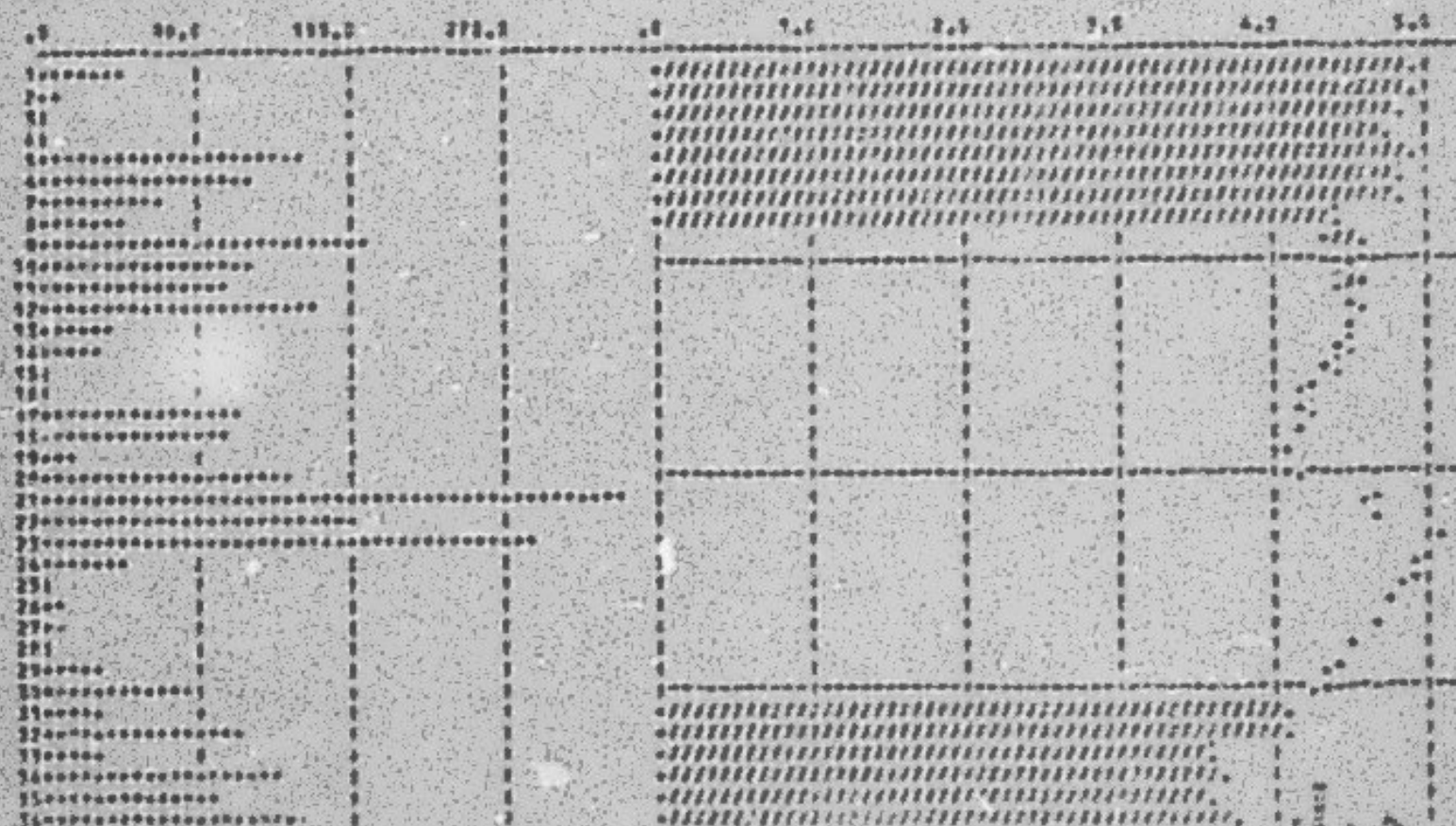
U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS



U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

PLATE STATE TANDARD (M-2)

U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS



U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

Figure 6

PLATE STATE TANDARD (M-1)

U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

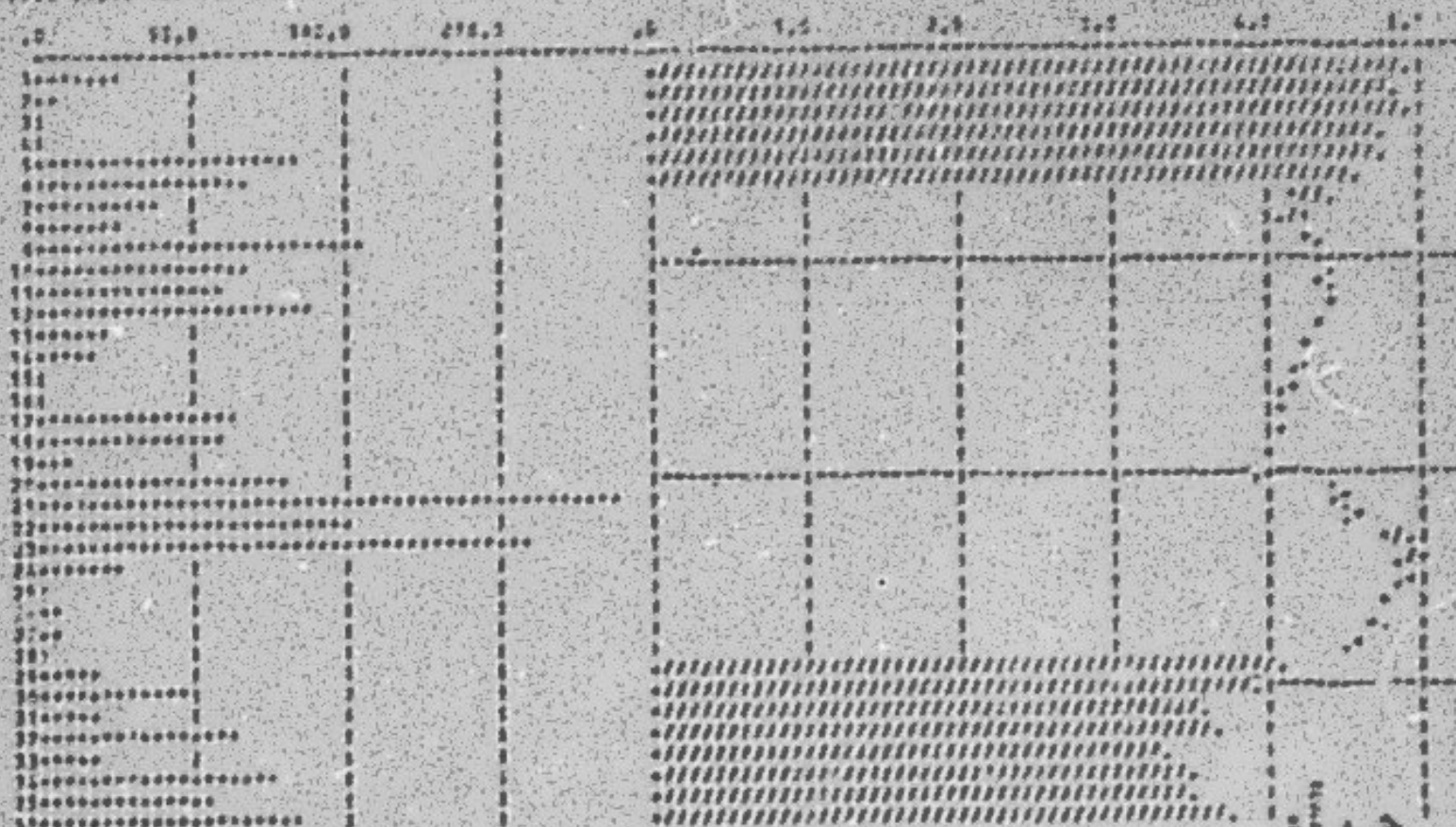


PLATE STATE TANDARD (M-2)

U.S. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

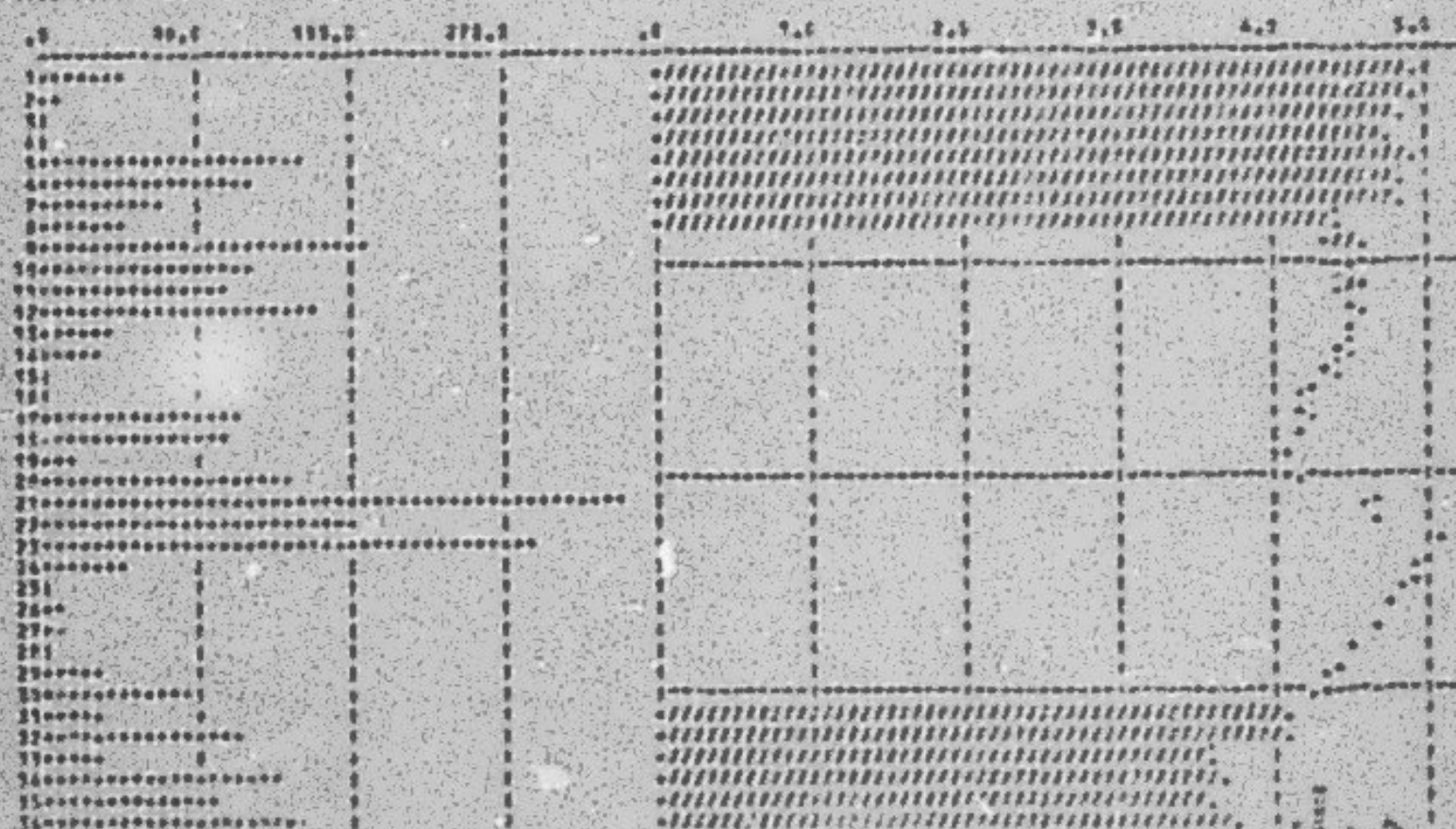


Figure 7

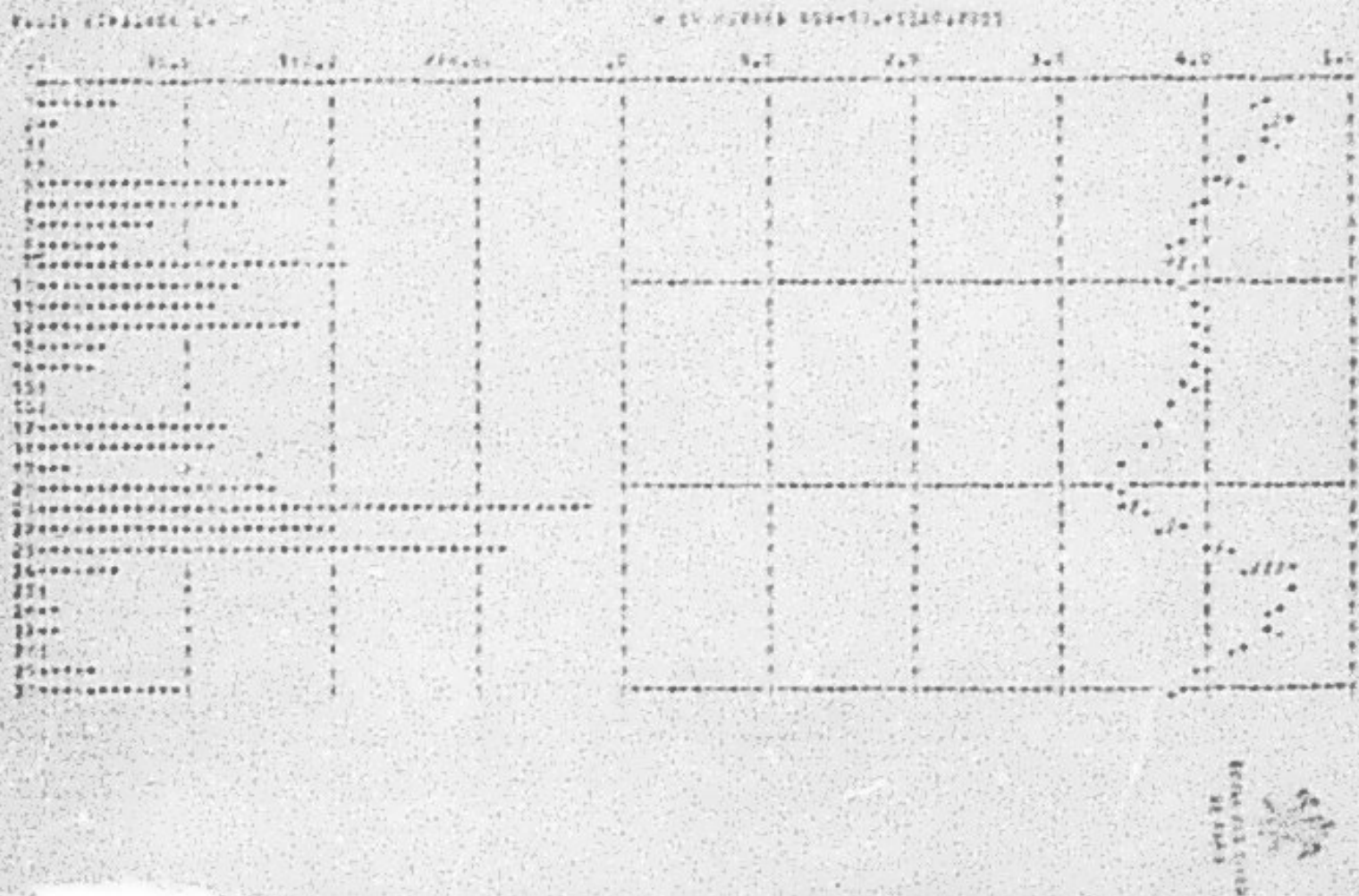
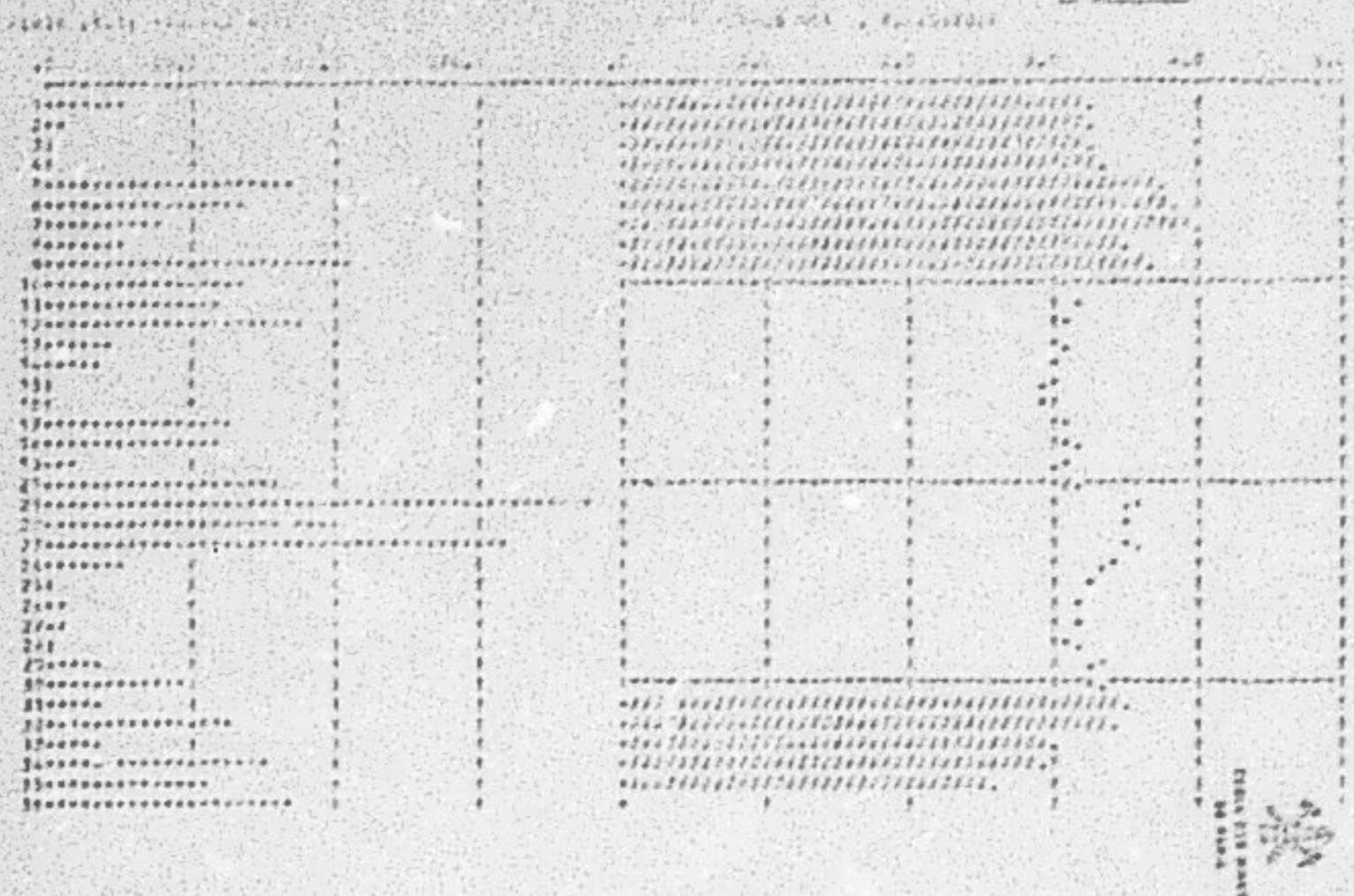


Figure 8

PLATE 1047A T-1047A (194)

U. S. AIR FORCE NO. 11,711,7275

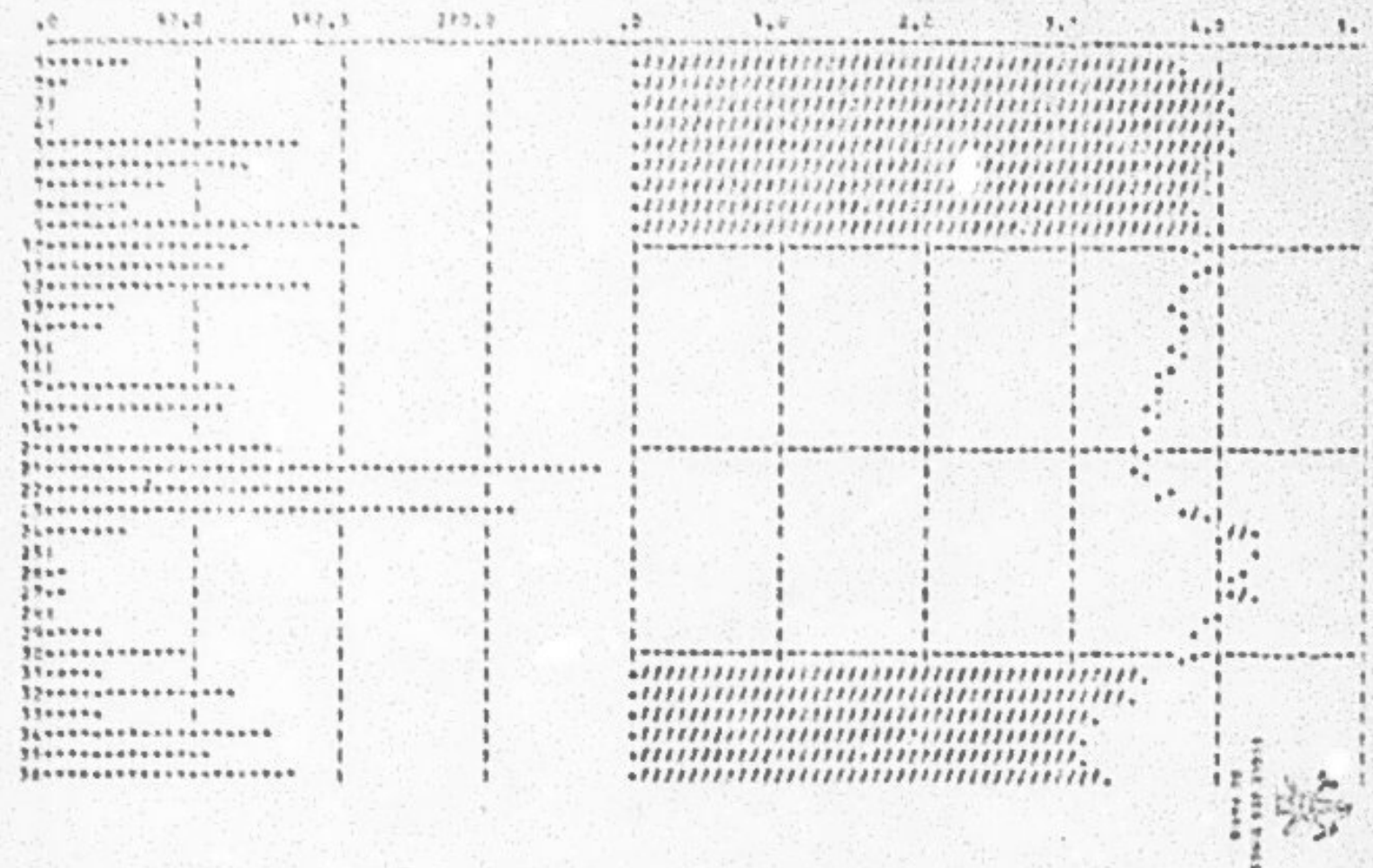


PLATE 1047B T-1047B (194)

U. S. AIR FORCE NO. 11,711,7276

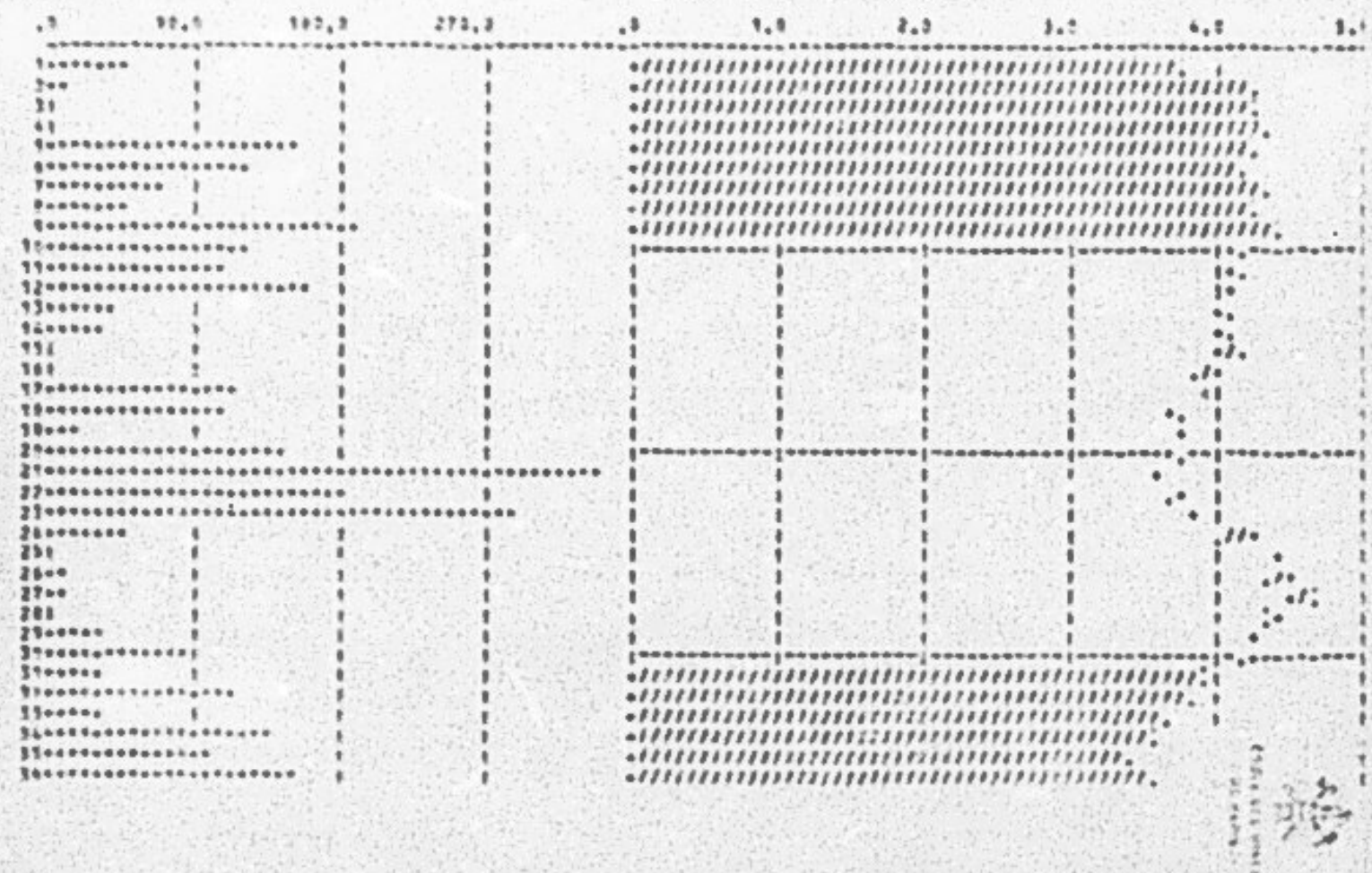
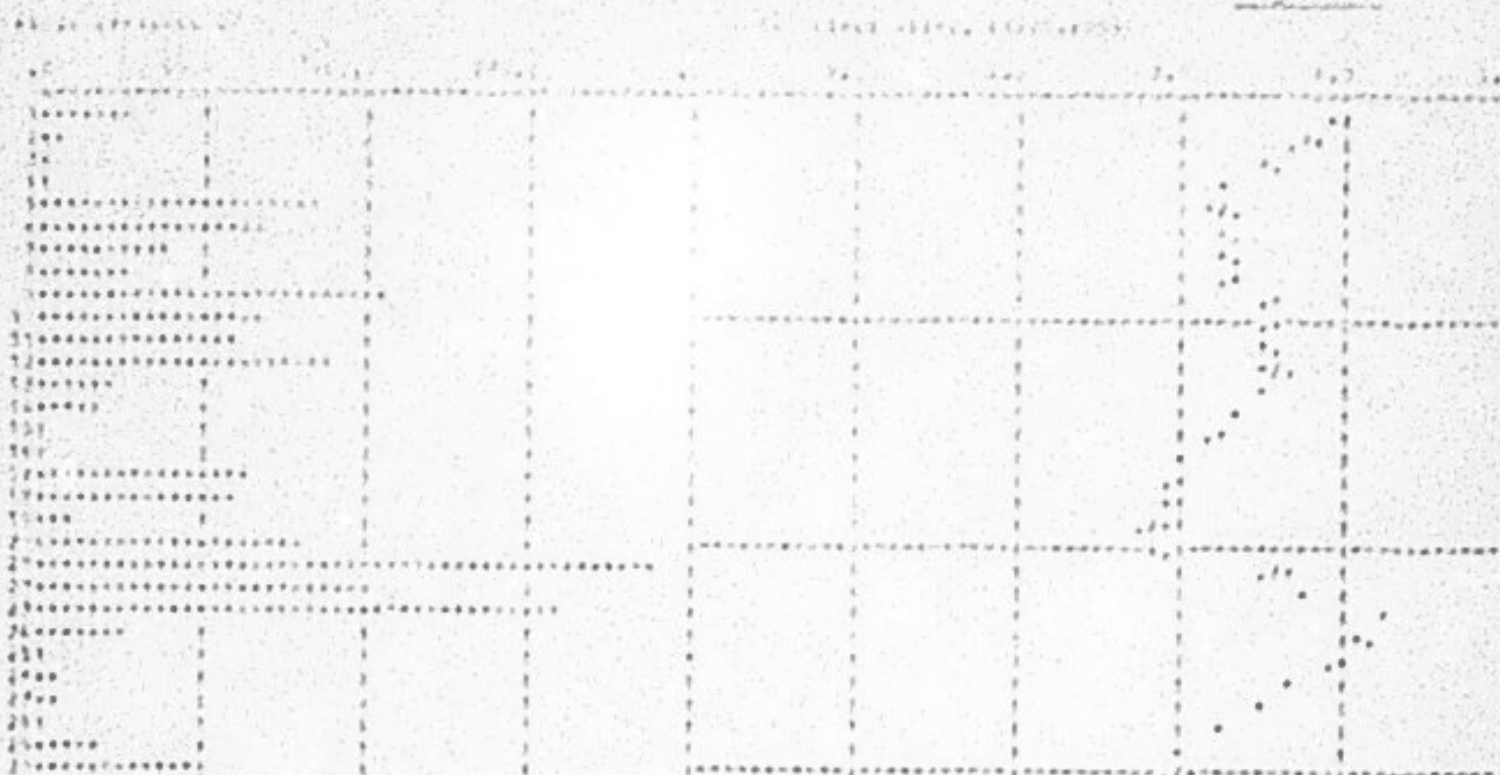
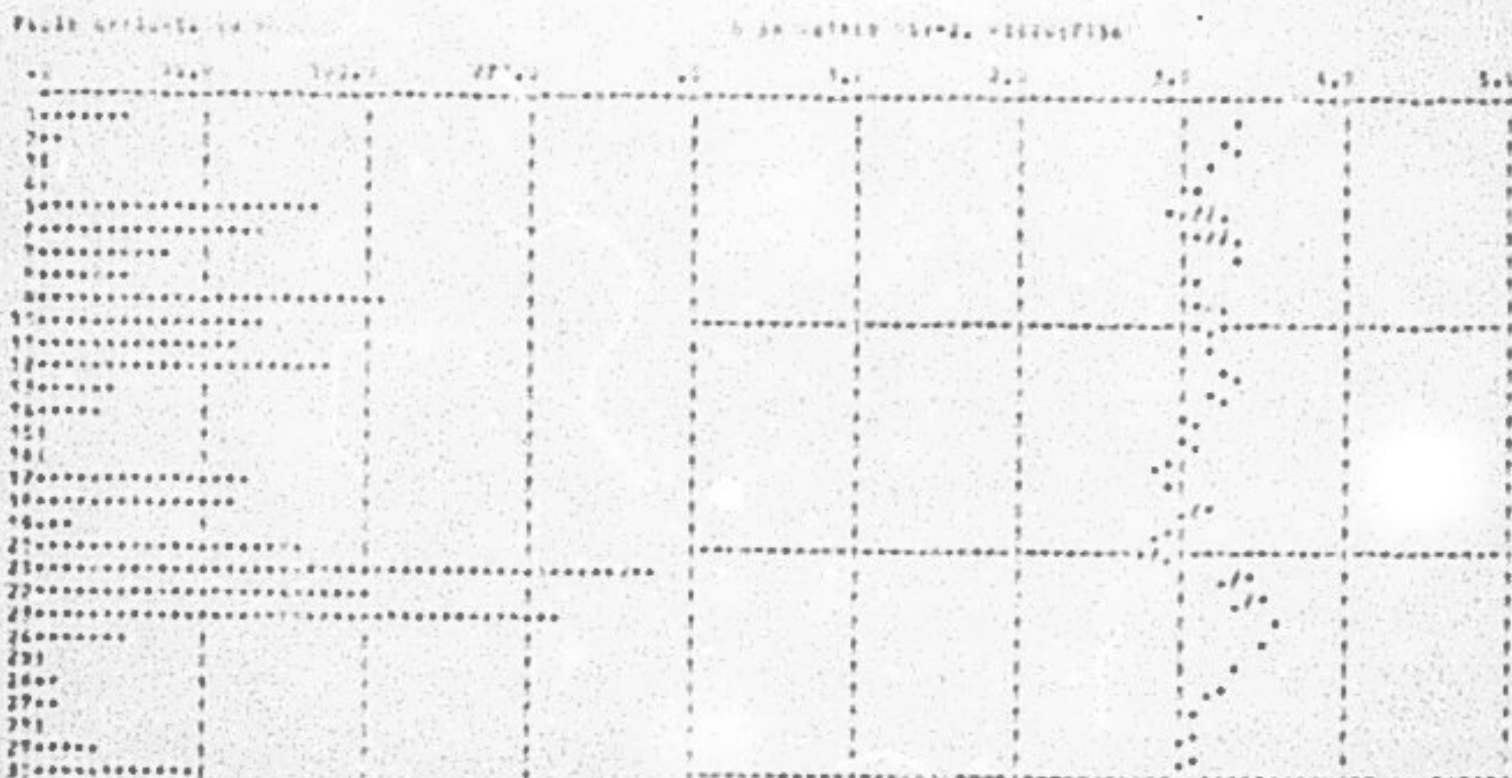


Figure 9



U.S. GOVERNMENT
PRINTING OFFICE



U.S. GOVERNMENT
PRINTING OFFICE

Figure 10

Figure 10, p. 10

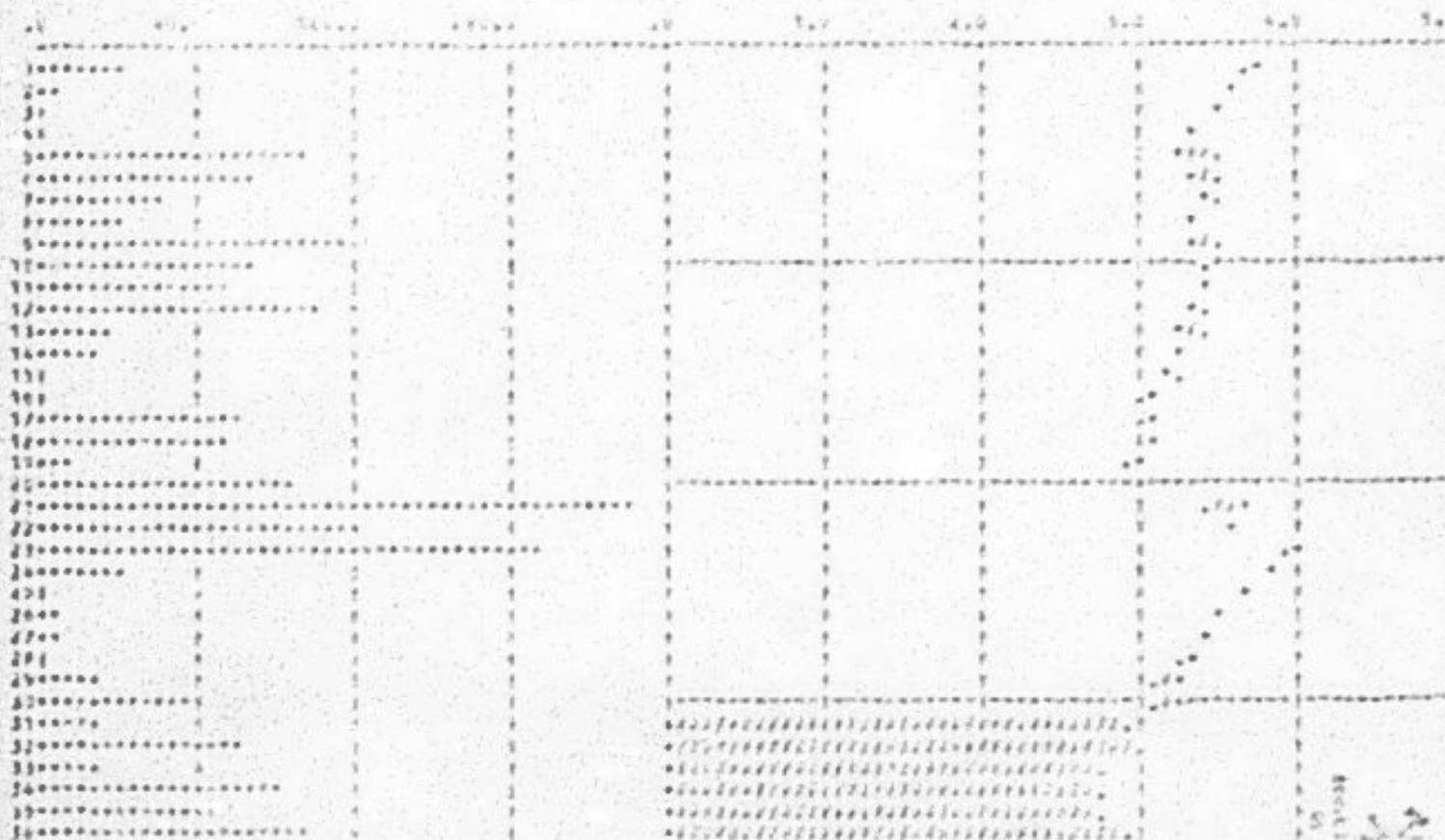
Figure 10, p. 10



RECEIVED
10 MAR 1964

Figure 10, p. 10

Figure 10, p. 10

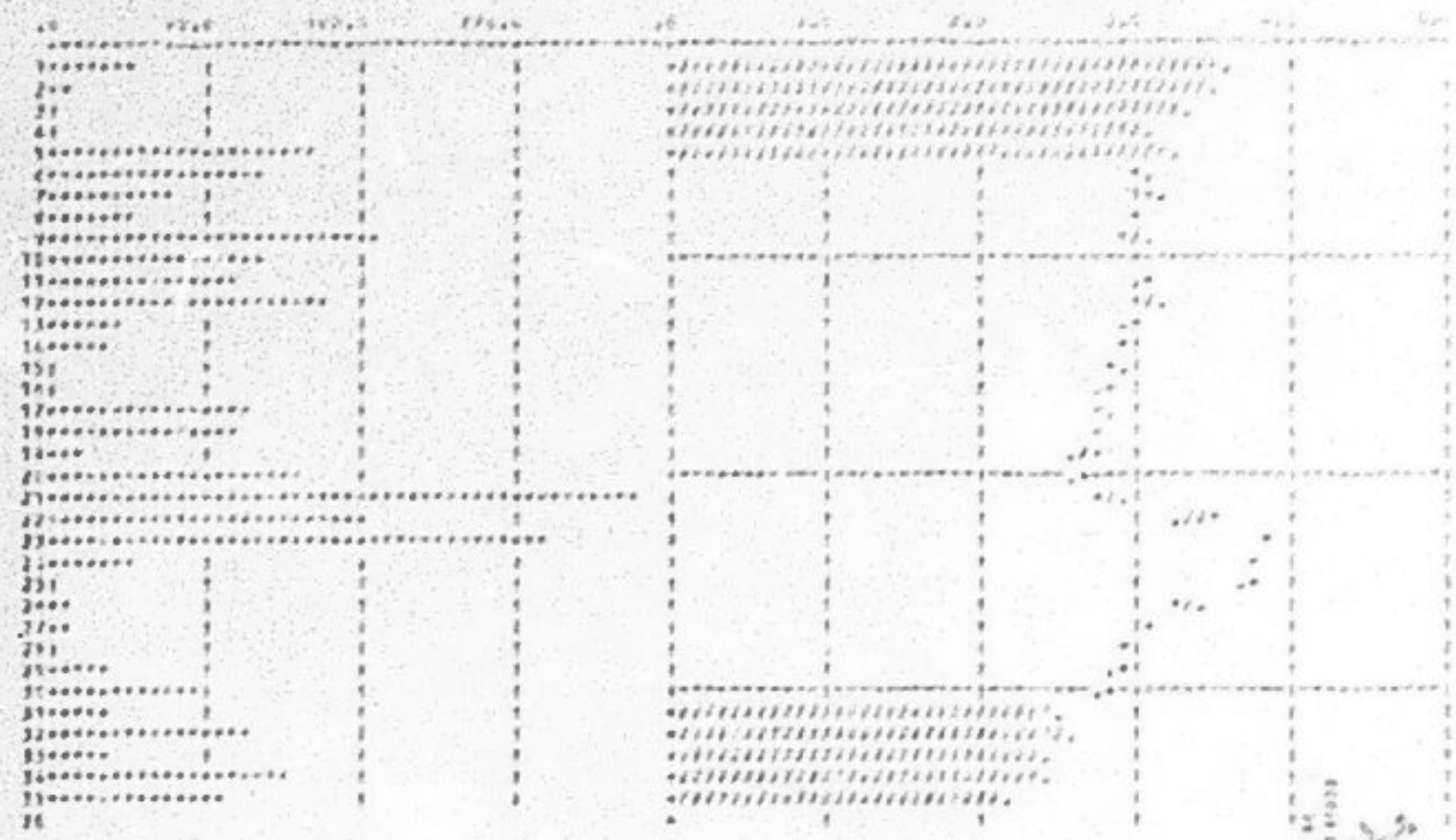


RECEIVED
10 MAR 1964

Figure 11

FLUID SOUTH TAPAH 1973

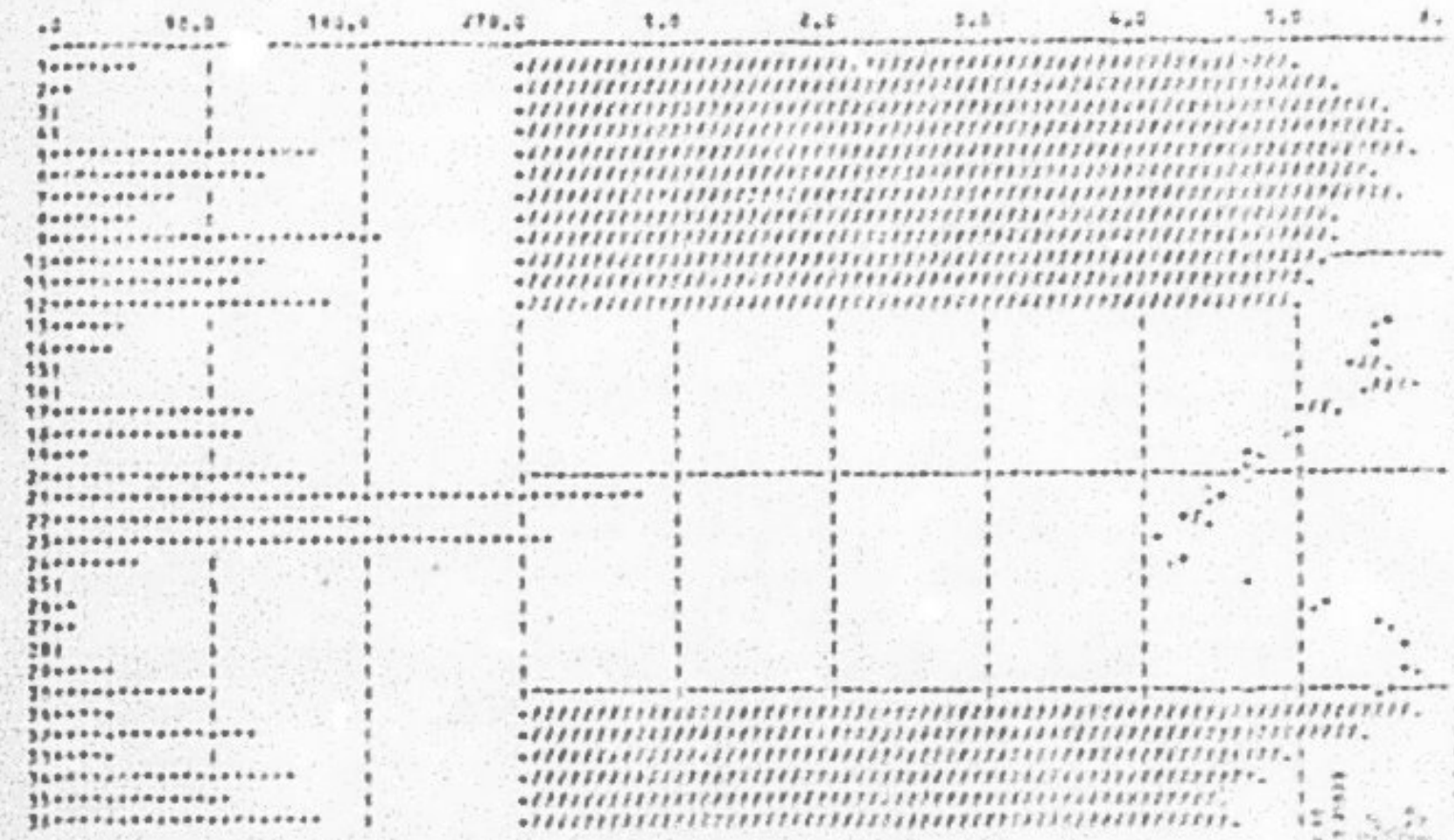
IN METERS 425-51, 51-52, 52-53, 53-54



FLUID SOUTH TAPAH 1973

FLUID SOUTH TAPAH 1973

IN METERS 425-51, 51-52, 52-53, 53-54



FLUID SOUTH TAPAH 1973

Figure 17

PLATE 10-11 THERMAL MAP

IN METRIC UNITS, 1911-1912

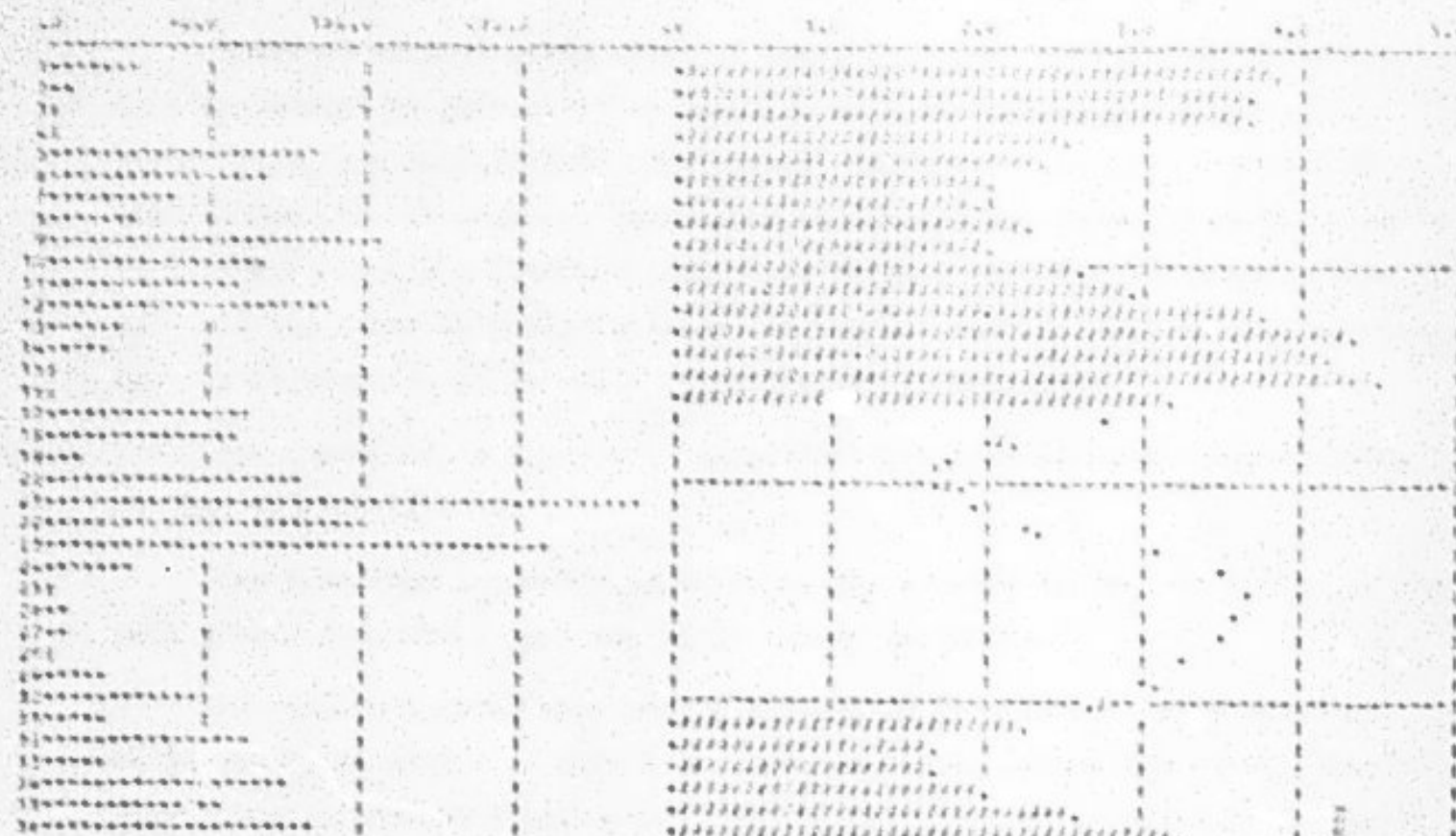


PLATE 10-11
THERMAL MAP

PLATE 10-11 THERMAL MAP

IN METRIC UNITS, 1911-1912

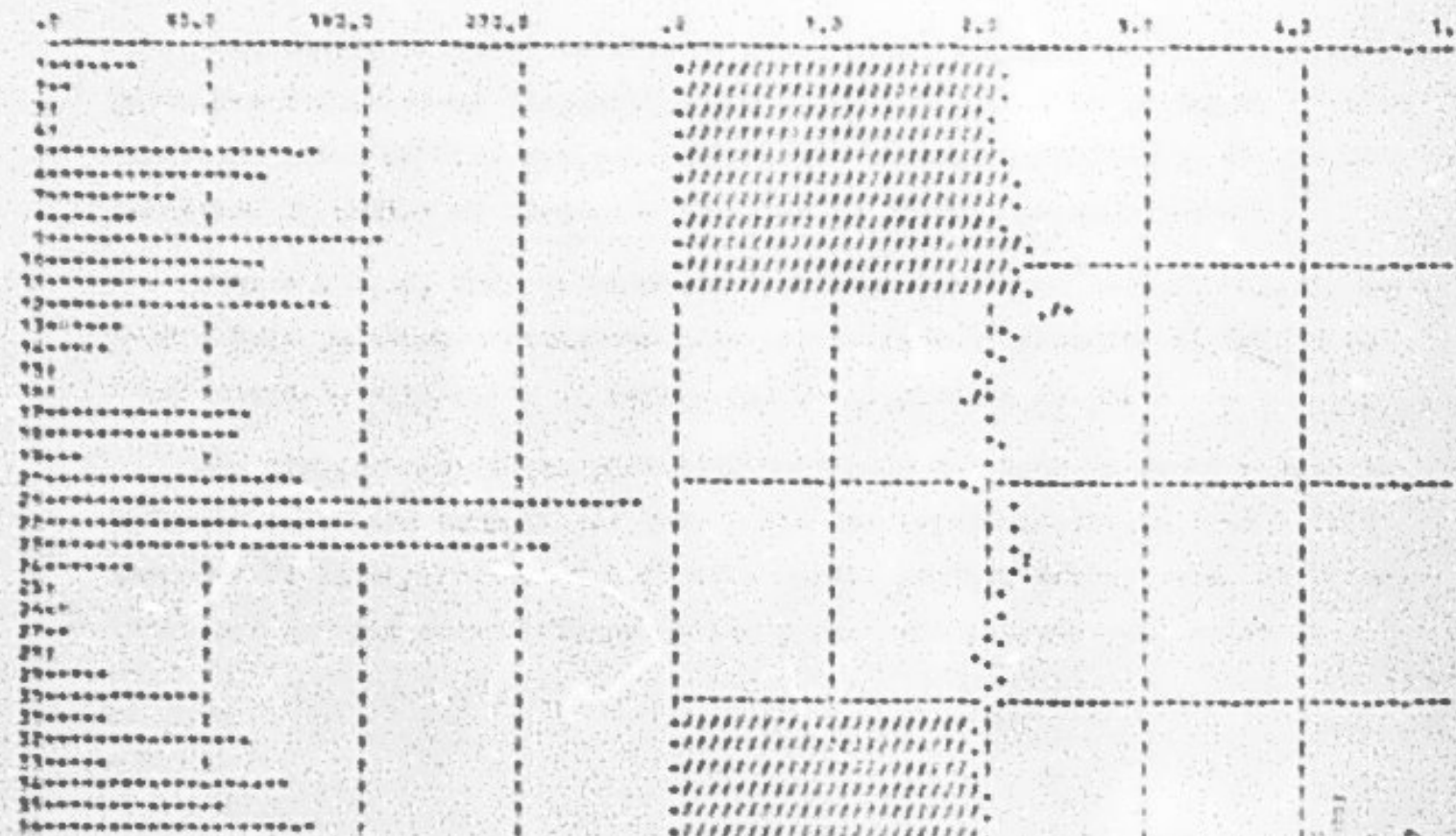


PLATE 10-11
THERMAL MAP

Avant et surtout après cette période, le calcul fournit les prévisions du comportement du piézomètre en fonction de l'historique des pluies. En particulier, les mois 31 à 36 représentent les prévisions que le modèle de convolution fournit pour les évolutions naturelles des piézomètres de novembre 73 (31) à avril (36). Ultérieurement, les calculs ont même été poussés jusqu'à mai 74, quand la pluie de mai a été connue, pour pouvoir interpréter les mesures de remontée de la nappe après l'arrêt du collecteur.

Les fonctions de transfert des piézomètres sont également représentées sur les figures 13 à 17.

Ces fonctions représentent en somme les courbes de crue et décrue qu'aurait chaque piézomètre pour une pluie isolée unitaire.

Le tableau 1 donne pour chaque piézomètre la période d'ajustement et sa longueur, en nombre de mois ; la norme du résidu (somme des carrés des écarts sur la période d'ajustement) et l'écart moyen en cm entre la charge mesurée et la charge calculée par le modèle, pendant la période d'ajustement.

On constate que cet écart moyen est partout inférieur à 10 cm.

4. Appréciation de la précision de ces calculs

Cependant, si cette méthode de déconvolution permet de tirer le meilleur parti des informations disponibles sur les fluctuations de la nappe, il n'en reste pas moins qu'elle est par essence une méthode statistique, et que sa précision ne peut - en moyenne - dépasser la dizaine de centimètres.

Grâce à elle, nous corrigerons donc les mesures réalisées, mais il ne pourra être question d'exploiter avec précision des résultats de mesure où l'influence du collecteur ne serait que de la dizaine de cm.

De plus, l'historique piézométrique connu est pour un grand nombre de piézomètres un peu trop faible pour avoir une représentativité tout à fait assurée. Un historique de 30 à 40 mois serait partout souhaitable, et permettrait par exemple de n'utiliser qu'une partie des données pour caler le

.../...

Figure 15

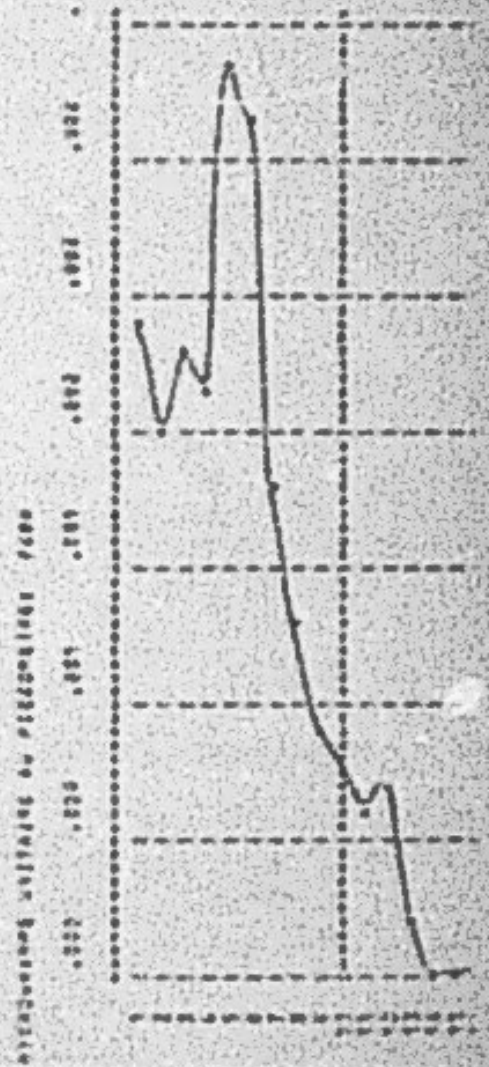
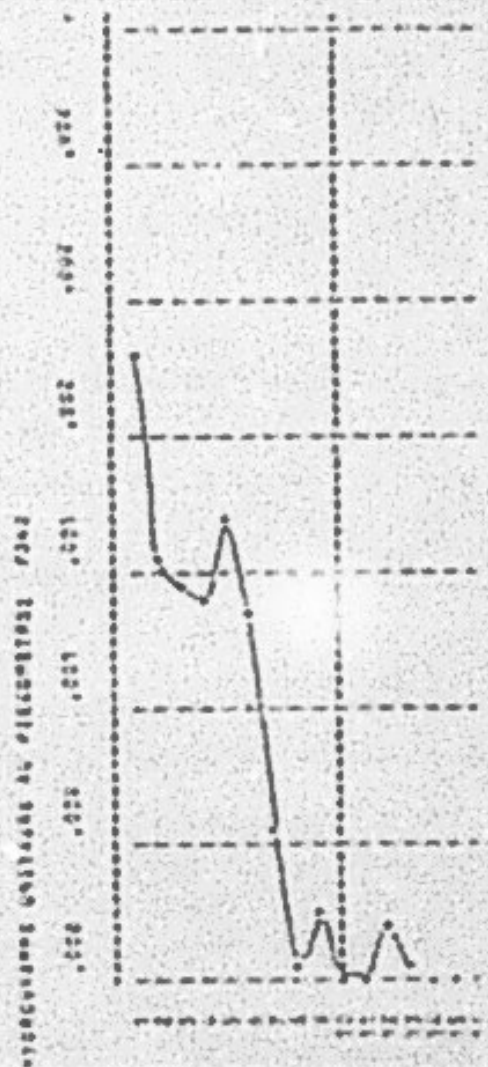
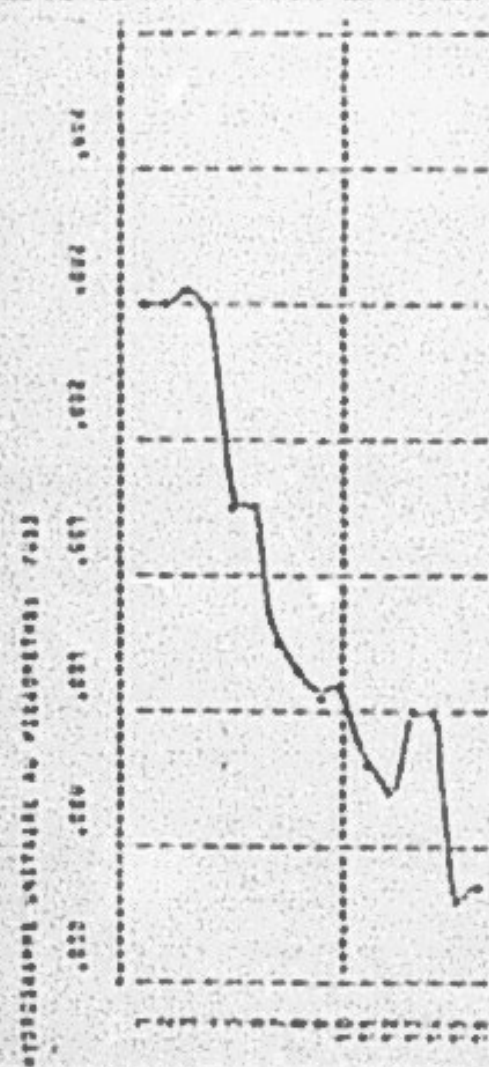
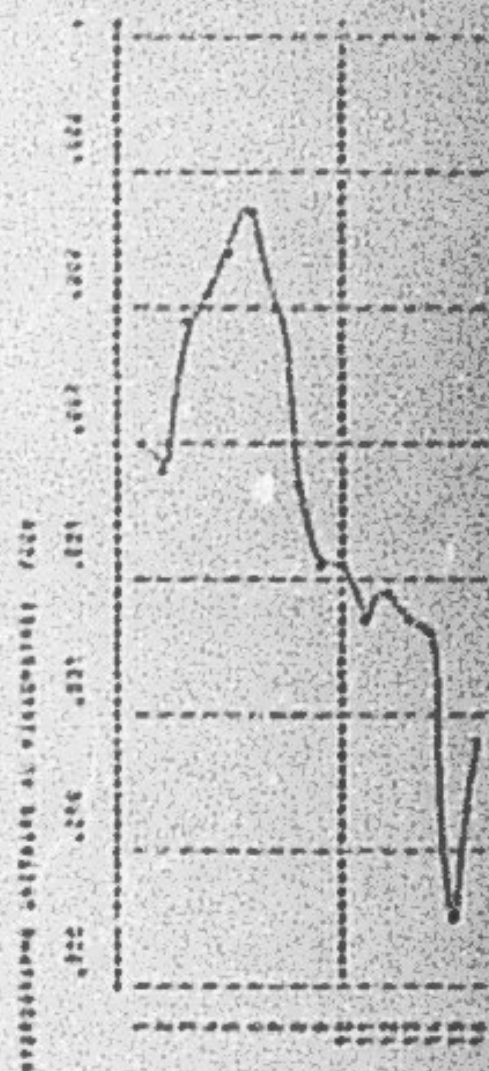
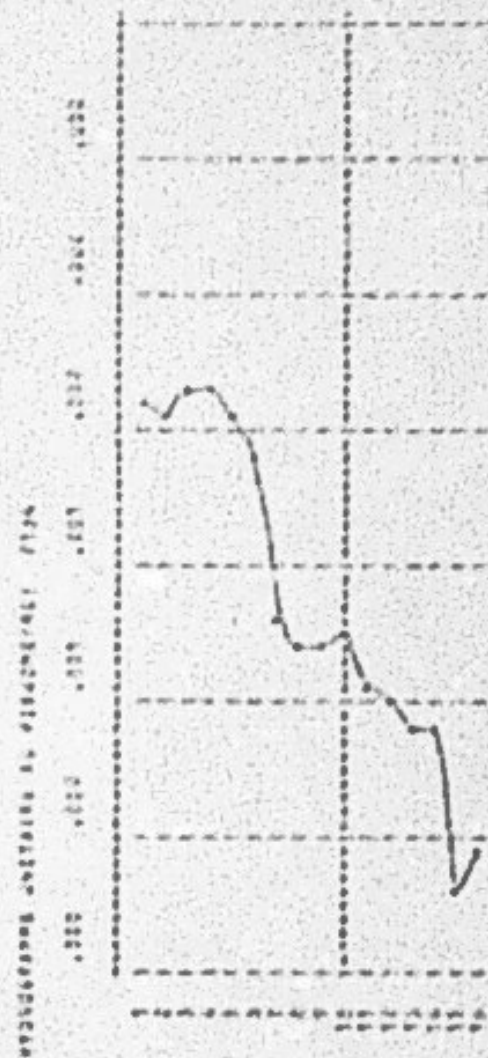
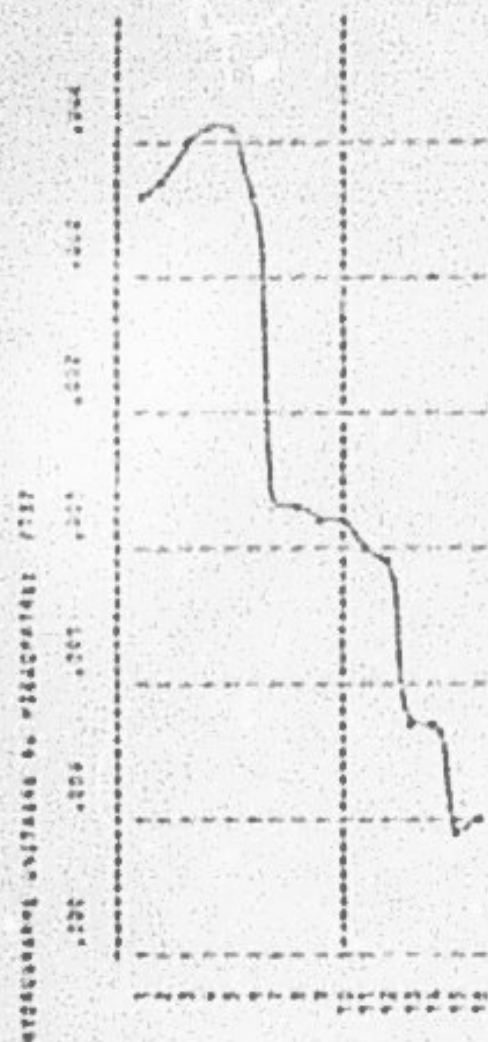
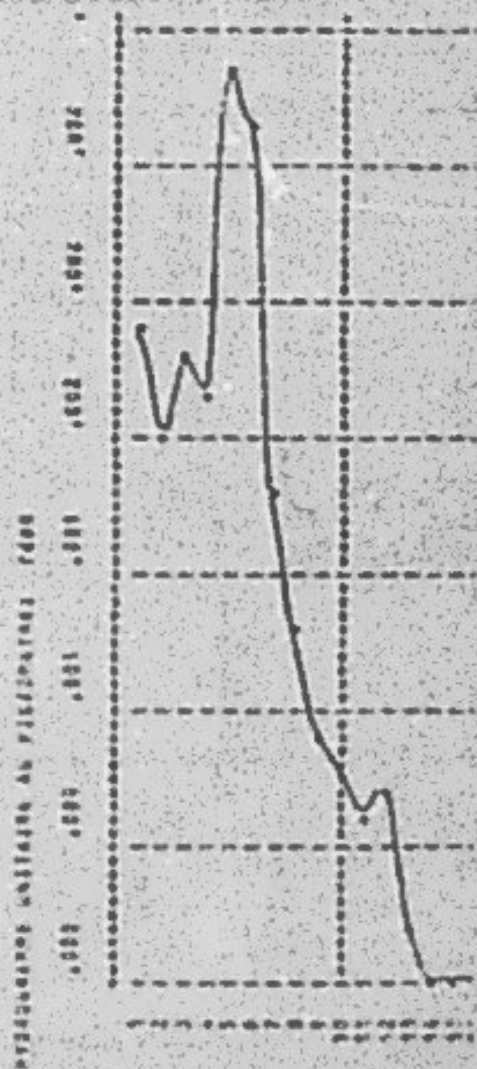
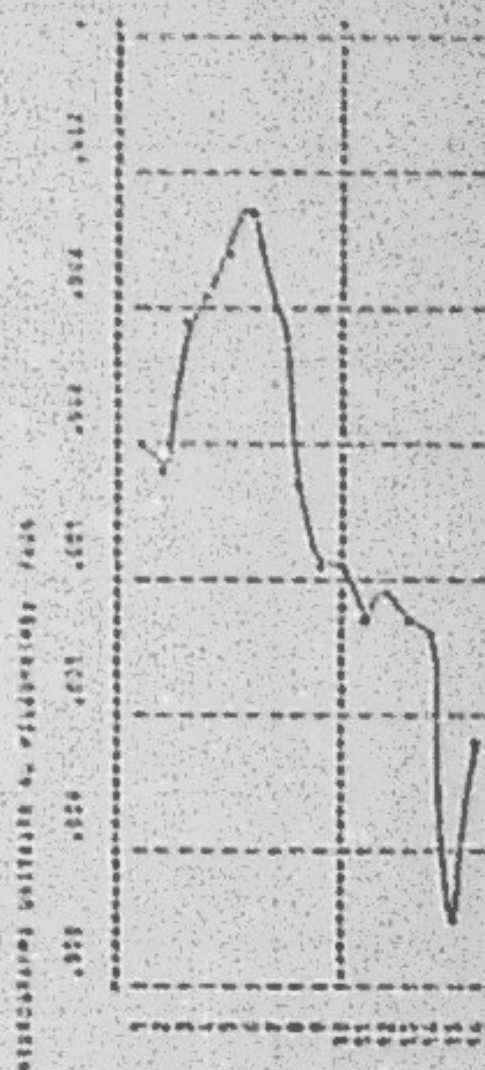
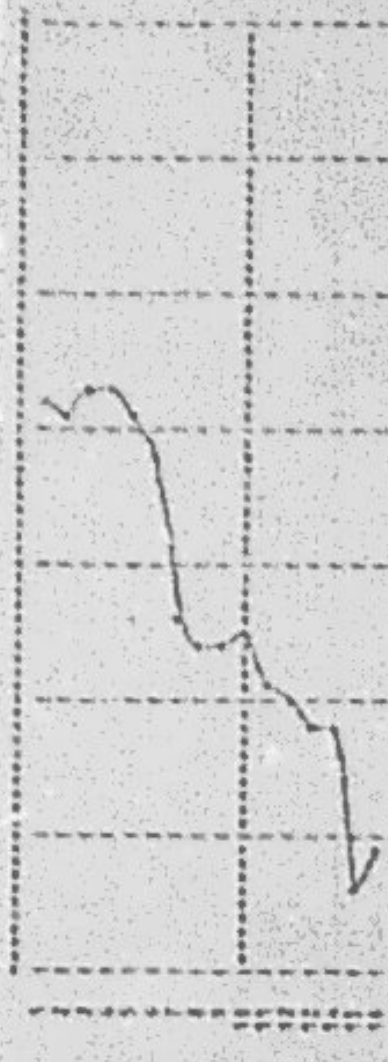
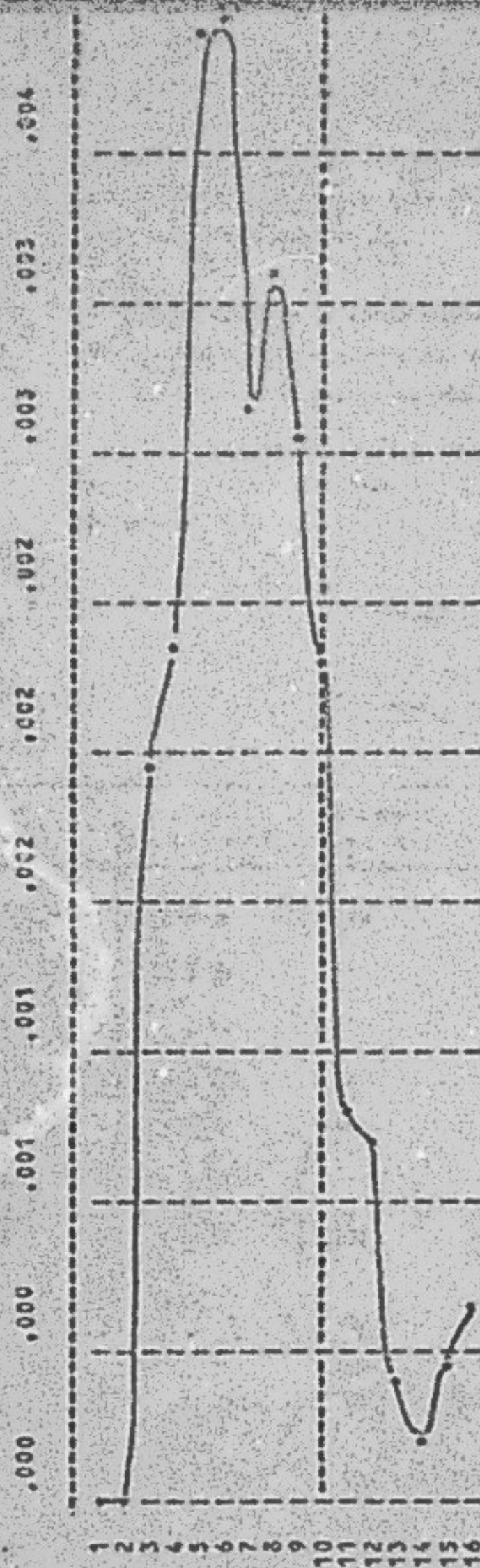


Figure 15

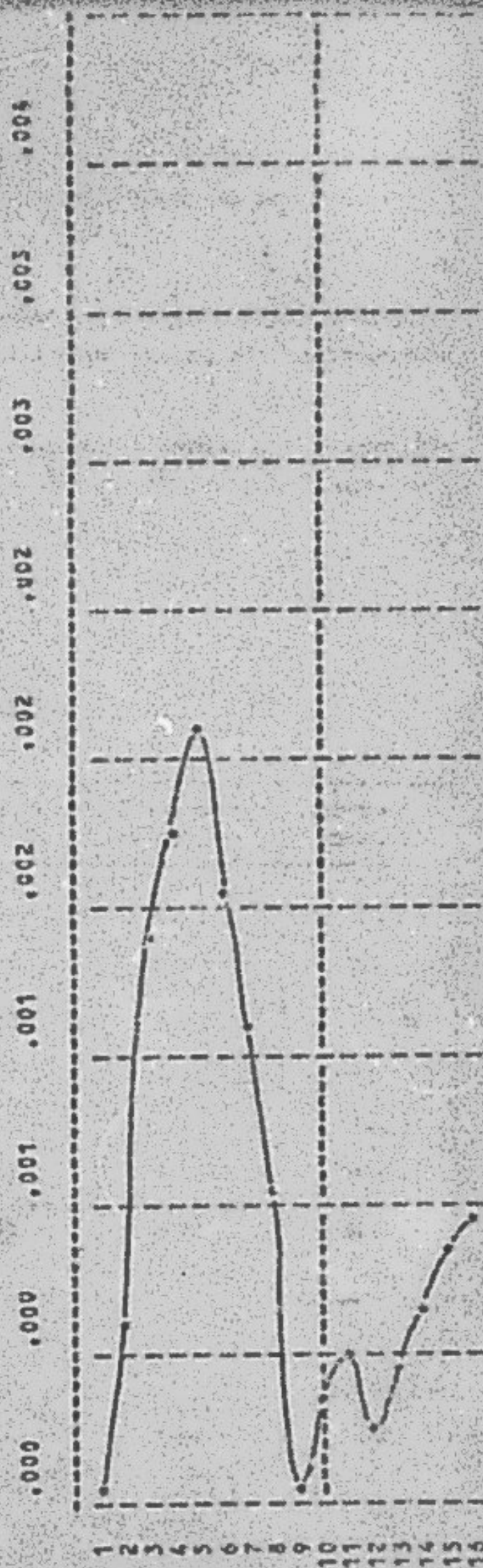


PROGRAMME UNITAIRE AU PIEZOMETRE: 7361

Figure 17



PROGRAMME UNITAIRE AU PIEZOMETRE: 7143



le modèle (par exemple les mois 1 à 30), pour comparer sur les 10 mois restant les prévisions du modèle à la réalité, et acquérir ainsi une plus gr^{de} de certitude sur l'ajustement.

Nous n'avons pu faire cette comparaison ici que sur quelques piézomètres, qui, situés à très grande distance du collecteur pilote, n'ont certainement pas été influencés par celui-ci.

Les figures 18 et 19 permettant de comparer la prévision du modèle avec les mesures réalisées dans les piézomètres 7289 et 7327, en relativement bon accord. Ce sont les meilleurs résultats.

TABIEAU 1

PARAMETRE DES AJUSTEMENTS
DU MODELE DE CONVECTION

Piez ⁶	Période d'ajustement	Longueur en mois	Nombre de résidu	Ecart moyen en cm	Sortie réduite
7340	12 à 30	19	0.79	4.1	H.
7289	12 à 30	19	1.03	5.4	H.
7274	7 à 28	22	1.53	6.9	H-4.m.
7342	12 à 30	19	0.92	4.8	H.
7134	1 à 30	30	2.26	7.5	H-4.c.
7206	14 à 30	17	0.66	3.8	H-4.m.
7135	1 à 30	30	2.53	8.4	H-4.m.
					.../...



NAPPE DES DUNES DE NEFZA
PIEZOMETRE 7289 A 19

PARATHEMIS ZERO LC 19/11/73

Profil de la nappe dans
le domaine du lac (m)



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

COMPARAISON DES EVOLUTIONS PIEZOMETRIQUES

Messures
Calculées par déconvolution





NAPPE DES DUNES DE NEFZA

PIEZOMETRE 7327 C14-15

PARATION ET ZERO LE 19/11/73

Profondeur de la nappe sous
le sommet du tubage (m)

36.00

35.50

35.00

34

33

32

31

30

29

28

COMPARAISON DES EVOLUTIONS PIEZOMETRIQUES

— Mesure

— Calculs par interpolation



7288	10 à 30	21	1.19	5.6	H.
7056	6 à 30	25	2.02	8.0	H-4.m.
7054	1 à 30	30	2.73	9.1	H-15.m.
7276	10 à 30	21	1.54	7.3	H-16.m.
7275	10 à 30	21	1.37	6.5	H-11.m.
7136	1 à 30	30	2.38	7.9	H-2.m.
7053	1 à 30	30	2.05	6.8	H-2.m.
7138	1 à 30	30	2.96	9.8	H-3.m.
7137	9 à 30	22	1.35	6.1	H-4.m.
7143	6 à 30	25	1.34	5.3	H-28.m.
7055	1 à 30	30	2.5	8.3	H-10.m.
7329	13 à 30	18	1.25	6.9	H-24.m.
7277	11 à 30	20	0.88	4.4	H-22.m.
7341	13 à 30	18	1.73	9.6	H-33.m.
7344	13 à 30	18	0.61	3.3	H-26.m.
7362	17 à 30	14	1.02	7.3	H-43.m.
7327	13 à 30	16	0.63	3.5	H-28.m.

Pour le piézomètre 7344, l'accord est moins bon (différence allant jusqu'à 40 cm). Pour le 7362, il est franchement mauvais, mais ce piézomètre n'a que 14 mois de mesure, ce qui montre bien que la longueur des observations est le facteur essentiel conditionnant la qualité du modèle. De plus, le piézomètre 7362 a un comportement très souvent anormal, étant implanté dans une nappe perchée déconnectée de la nappe des dunes.

.../...

Pour les piézomètres 7341 et 7329, les rabattements prévus sont de 30 à 40 cm trop fort pour le premier, et trop faibles pour le second.

5. Conclusion sur la déconvolution

Nous retiendrons en conclusion de cette analyse critique des résultats que l'historique des piézomètres est un peu trop court pour la majorité de ceux-ci, mais que la déconvolution permet néanmoins de tirer le meilleur parti possible de ces mesures pour corriger les observations réalisées lors de l'essai.

Tant que l'amplitude de la correction restera faible vis à vis du rabattement dû à l'essai, la variation du piézomètre sera interprétable.

Quand la correction deviendra plus importante que le rabattement dû à l'essai, et particulièrement si l'on descend dans des rabattements de l'ordre de 10 cm, il faudra regarder les choses avec plus de suspicion, et considérer que les limites de l'interprétabilité des variations sont atteintes.

II. MODELE SIMONE. CALAGE SUR L'ESSAI DU COLLECTEUR

1. Choix du matériel

L'interprétation de l'essai doit nécessairement se faire sur un modèle plan horizontal prenant en compte la variation dans l'espace de la transmissivité, et la position exacte des forages du collecteur.

Le modèle Simone calé sur l'ensemble de la dune était donc tout désigné pour y simuler les 5 $\frac{1}{2}$ mois de l'essai. D'ailleurs une simulation sur 6 mois du comportement prévu du collecteur avait déjà été réalisée en mars 1973 sur ce modèle.

Cependant, deux considérations nous ont amenés à affiner un peu le modèle.

1/ Pour mieux calculer des rabattements dans les nombreux piézomètres surveillés pendant l'essai (30), il était souhaitable d'utiliser des mailles plus petites que celles utilisées jusqu'ici (375 m sur 375 m), dimensions qui étaient valables quand il s'agissait d'étudier l'ensemble de la dune.

En se limitant à la zone centrale intéressée pour l'essai, on pouvait construire un sous-modèle à maillage plus resserré.

2/ La réalisation des forages profonds du collecteur avait montré dès juin-juillet 73 que la répartition réelle des transmissivités entre la 1ère et la 2ème couche dans la zone centrale était différente de celle adoptée, la deuxième couche étant beaucoup moins transmissive que prévu, et la première en revanche plus transmissive. Nous avons déjà montré que cette nouvelle répartition n'affectait pas les estimations des débits exploitables ni les positions des collecteurs, les débits prévus étant simplement reportés

.../...

de la couche 2 sur la couche 1 (cf. "Note sur les calculs réalisés du 15/7 au 15/8/73").

Bien au contraire, du point de vue des interfaces eau-douce - eau salée, cette nouvelle répartition est plus favorable aux captages.

Nous voudrions pourtant tirer une recommandation en passant, sur l'estimation des répartitions de transmissivité entre plusieurs couches dans des forages complets. Les calculs réalisés n'ont jamais permis de lever l'ambiguïté entre les débits à affecter à chaque couche, et les estimations données n'ont en définitive pas été vérifiées. Chaque fois qu'un tel problème se posera, il sera souhaitable de réaliser des puits séparés pour chacune des couches, pour pouvoir les tester séparément, ou du moins de faire des mesures au micromoulinet en pompage, dans les forages doubles, pour savoir comment répartir les débits extraits entre chaque couche.

Revenons au choix du maillage. La deuxième couche n'étant plus aussi importante que précédemment, il était moins utile d'y avoir des mailles aussi petites que souhaitées pour la couche 1.

On a donc en définitive construit un sous-modèle Simone pour la partie centrale, dont le maillage est représenté planche 1.

Son extension dépasse assez largement la zone où les simulations déjà réalisées sur le grand modèle ont montré qu'en 6 mois les rabattements sont sensibles.

La 1ère couche a des mailles de 167,5 m de côté, la seconde de 375 m. 4 petites mailles de 1ère couche surmontent donc une grande maille de 2de couche, le bilan des flux étant préservé lors des calculs en prenant pour la grande maille de 2de couche, une maille fictive unique de grande taille en 1ère couche ayant pour charge la moyenne des charges des 4 petites mailles réelles. Le programme Simone a été adapté à cette géométrie particulière.

.../...

2/ Conditions aux limites.

Le mer est bien sûr une limite à potentiel imposé nul.

Toutes les autres limites sont également à potentiel imposé, le potentiel étant celui relevé sur le modèle Simone complet de la dune pour les mailles correspondant à la limite du nouveau maillage, pour l'état piézométrique "régime permanent naturel".

Cependant, les mailles 36, 37 et 56 à 59 sont à flux nul correspondant au contact de l'aquifère avec la remontée Nord-Est du substratum.

3/ Paramètres hydrauliques.

Pour conserver la compatibilité entre les deux modèles SIMONE de la dune, on a affecté une valeur homogène de tous les paramètres de la nappe à chaque groupe de 4 mailles du sous-modèle correspondant à une grande maille du modèle initial.

- les transmissivités adoptées sont celles du grand modèle SIMONE, mis à part la zone où coexistent les deux nappes : Sur la 2^{de} couche on a mis uniformément une transmissivité de $7 \cdot 10^{-4}$ m²/s telle qu'elle ressort des essais de débits réalisés sur les forages profonds.

Sur la 1^{ère} couche, les transmissivités finales adoptées après calage de l'essai sont en définitive la somme des transmissivités affectées aux deux couches dans le grand modèle, moins $7 \cdot 10^{-4}$ m²/sec. On a conservé ainsi la même transmissivité totale (donc le même bilan global de la dune), mais répartie différemment entre couche.

Les transmissivités de la 1^{ère} couche dans la zone de l'essai, s'échelonnent entre 0,6 et $1,1 \cdot 10^{-2}$ m²/sec. On rappelle qu'elles sont, en moyenne, inférieures aux valeurs déterminées par interprétation des essais de débits, qui donnent des chiffres entre 1 et $1,5 \cdot 10^{-2}$ m²/sec ou même plus, mais que le choix de ces transmissivités résultait d'un compromis entre la transmissivité et le taux d'infiltration de la pluie sur la dune, que l'on

.../...

avait voulu garder inférieur à 50 %.

On constate donc que les chiffres retenus dès novembre 1973 sont ceux qui permettent d'interpréter au mieux l'essai du collecteur.

- les transmissivités de passage verticales entre couches sont les mêmes que celles du grand modèle, et avaient d'ailleurs été confirmées en juin 73 par les essais de débits dans la deuxième couche, donnant une valeur de la perméabilité réduite K'_v de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/sec. Pour des mailles de 187,5 m de côté, on obtient donc une transmissivité de passage de $4,7 \cdot 10^{-4}$ m/sec. Cette transmissivité de passage est doublée, comme sur le grand modèle, pour les mailles de la 2^{de} couche sous la mer.

- les coefficients d'emmagasinement, mal connus jusqu'ici, avaient été pris égaux à 15 % pour la nappe libre et à $5 \cdot 10^{-4}$ pour la nappe captive. Ces essais de débits avaient donné eux des valeurs de 12 % à 25 %. On s'était donc placé du côté de la sécurité avec un coefficient d'emmagasinement relativement faible.

Le calage du sous-modèle sur l'essai du collecteur pilote a montré qu'il était nécessaire de doubler ces valeurs. Un coefficient d'emmagasinement de 30 % en nappe libre a seul permis de restituer à la fois l'ordre de grandeur des rabattements finaux et la forme des courbes temps-rabattement (voir paragraphe résultat du calage). Le coefficient 3^{er} en nappe captive ne change pas.

Notons qu'un essai sommaire réalisé en juin 74 à la faculté de TUNIS sur un échantillon de sable de Mefza a donné une porosité efficace supérieure à 20 % pour un essai de désaturation d'un échantillon d'un volume de 1 l environ ayant duré 2 h.

Pour une durée d'essai de 6 mois, un chiffre de 30 % n'est donc pas invraisemblable.

4/ Débits

Le débit total pompé est de 155,48 l/sec en débit fictif

.../...

continu, qui est celui qui nous intéresse ici, car nous ne tiendrons bien sûr pas compte des quelques arrêts de courte durée des pompes.

Il restait malheureusement une grande inconnue : la répartition du débit entre chaque couche pour les trois forages captant les deux nappes à la fois.

A défaut de mieux, on a supposé que le rabattement spécifique des forages dans la nappe du bas était de 0,3 l/m, valeur qui a été déterminée en juin 73 sur le forage profond F8.

Connaissant les rabattements obtenus en fin de l'essai pour les forages A1-2 bis, A2 et A3 tor (22 m, 34, 68 m et 14,41 m respectivement), on a calculé le débit que l'on pouvait supposer être extrait de la nappe du bas pour ces forages. Cette répartition de débit a été supposée rester constante tout au long de l'essai.

On arrive aux chiffres suivants (l/sec)

FORAGE	DEBIT 1 ^{re} nappe	MAILLE	TOTAL de la maille	DEBIT 2 ^{de} nappe	MAILLE
A1-2 bis	26,62	212	26,62	6,6	446
F3	17,56	193	34,51	0	
F5	16,95				
A2	15,39	174	27,45	10,5	439
F7	12,06				
F9	14,01	155	14,01	0	-
A3tor	31,49	137	31,49	4,3	436
TOTAUX PAR COUCHE			134,08	21,4	
TOTAL			155,48 l/sec		

.../...

2.1.2. bases de simulation

On simule le fonctionnement de la nappe en régime transitoire, avec un débit constant (165 jours exactement) suivi de coupe.

Le calcul est réalisé par la méthode implicite, avec des pas de temps de 5 jours. On fait varier la transmissivité de la zone mouillée de l'aquifère.

Le régime initial est le régime permanent naturel. On ne tient pas compte des fluctuations naturelles de la nappe dues à l'alimentation fluctuante (uniformément répartie tout au long de l'année permanente initial). On calcule donc seulement les rabattements du collecteur pilote.

Pour cela qu'il faut corriger les mesures de rabattements naturels de la nappe, obtenus par déconvolution comparés aux résultats du modèle SIMINE.

2.1.3. fait du calage.

Les modifications des paramètres du modèle qu'il a été nécessaire d'introduire au paragraphe 3 (paramètres hydrauliques).

En fait de vue des ajustements des rabattements, les résultats sous forme graphique sur les planches 2 à 5 suivantes les plus représentative. On a reporté :

- les rabattements calculés par le modèle (symbole M)
- les rabattements bruts observés (symbole B)
- les rabattements observés corrigés des fluctuations dues à variations de la pléiométrie par déconvolution (symbole C).

Le schéma fixé au calage a été de placer la courbe M entre les courbes B et C, en se rapprochant le plus possible de la courbe C, mais

.../...

en restant toujours plutôt pessimiste pour les possibilités de la nappe (si on se rapproche de β , on calcule des rabattements trop importants, on est donc pessimiste mais du côté de la sécurité).

Grossièrement, les comportements se classent en 4 familles principales :

a) Piézomètres de la 1ère nappe proches du collecteur (S2, S3, A 1-2, A2 ter, A3).

Les rabattements calculés sont en très bon accord avec les valeurs observées et corrigées. Les quelques écarts qui peuvent apparaître sont dus à la position du piézomètre par rapport au forage vis à vis de la taille de la maille. Des corrections approchées analytiques (en logarithme) permettent de s'en assurer.

b) Piezomètres de la 1ère nappe éloignés du collecteur de 500 à 1 500 m (B4, B2, C1, D1).

Ce sont les piézomètres les plus intéressants, car ils intègrent un plus grand volume, et applanissent les hétérogénéités locales. C'est sur eux qu'a porté l'effort principal, et que le choix des paramètres du modèle a pu être fait : en effet, l'allure des courbes de rabattement du modèle y variait beaucoup en fonction de la diffusivité choisie : rabattements trop rapides, concavité des courbes trop marquée etc ...

L'ajustement obtenu est toujours bon, et l'importance des corrections par déconvolution est ici décisive (en particulier pour C1 et D1).

c) Piezomètres de la 1ère nappe proches de la mer (S1, A0, A 4-5, A6, A6bis) ou trop éloignés (2 km et plus : E16, E 16 bis, J1, G6).

Ces fluctuations naturelles masquent les phénomènes, et en tout état de cause les rabattements calculés par le modèle sont faibles

.../...

(inférieures à 10 cm). On ne peut vraiment conclure.

Les piézomètres proches de la mer réagissent essentiellement aux marées et aux tempêtes.

Les piézomètres lointains ont un tarissement naturel important.

d) Piezomètres de la nappe profonde.

(P1, P2, P3, M3, P2, P4, P6, P8, P10, A2bis, A3bis)

Ils sont tous assez proches du collecteur (moins de 250 m).

L'allure des rabattements y est assez différente des piézomètres précédents (réaction de nappe captive) et est très bien rendue par le modèle.

Les importances des rabattements sont parfois en apparence moins en accord, mais il faut tenir compte que dans la 2de nappe les mailles du modèle sont 4 fois plus grandes, et que l'ensemble des 11 piézomètres cités se situent dans 3 ou 4 mailles du modèle. Les rabattements moyens dans une maille de 375 m de côté sont donc assez différents des rabattements ponctuels mesurés aux piézomètres, qui sont eux fonction de leur position exacte vis à vis des forages du collecteur. Un calcul approximatif de correction logarithmique des rabattements en tenant compte de ces distances montrent que les rabattements sont dans l'ensemble bien rendus. Cependant, en manque de précision dans ce calcul correctif du fait des interférences des forages entre eux et de la présence de la limite mer.

Nous n'insisterons donc pas d'avantage, en nous souvenant que, sommes toutes la répartition des débits adoptés pour la 2de nappe est très arbitraire, et que si cela ne joue pas beaucoup pour la 1ère nappe, le débit total prélevé dans la 2de couche n'étant que de 14 %, en revanche, cela a une importance beaucoup plus grande pour la 2de couche.

6/ Conclusion sur le calage du sous-modèle

On a pu obtenir sur le sous-modèle une restitution satisfaisante des observations réalisées en 5,5 mois de pompage et 1,5 mois de remontée.

Les modifications apportées aux paramètres de l'aquifère se résument à doubler le coefficient d'emmagasinement de la nappe, porté à

...

30 %, par rapport aux estimations réalisées en novembre 1972.

La répartition des transmissivités dans l'aquifère n'est pas modifiée, hormis un report sur la 1ère couche centrale des transmissivités initialement affectées à la 2de couche.

Pourtant, l'estimation de l'alimentation moyenne de l'aquifère n'est pas modifiée, non plus que l'estimation de la ressource exploitable.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les conséquences de tout ceci sur les projets définitifs de captage.

III. REEXAMEN DU PROJET DEFINITIF DE CAPTAGE.

À la lumière de ce qui vient d'être vu, faut-il apporter des modifications au projet définitif de captage proposé en mars 73 ?

1/ Calculs en Permanent

Un premier calcul, réalisé dès juillet 73 sur SIMONE (cf. "Note sur les calculs réalisés du 15/7/ au 15/8/73") a montré que la nouvelle répartition des transmissivités entre couche 1 et 2 ne modifie en rien ni le débit permanent exploitable ni les positions choisies pour les différentes branches du collecteur. Il suffit de reporter sur la couche 1 les débits initialement prévus sur la couche 2, et d'annuler tout prélèvement dans la 2^{de} nappe.

Un deuxième calcul, réalisé également en juillet 73 a montré que du point de vue du biseau salé, il subsiste une petite ambiguïté sur sa position actuelle, ambiguïté que l'on ne peut toujours pas lever car nous n'avons aucune information nouvelle à son sujet. En revanche, la suppression des prélèvements dans la 2^{de} nappe est très favorable et les risques d'envasement des captages de la 1^{ère} nappe sont encore plus limités que précédemment.

Il n'est donc pas nécessaire de reprendre les calculs réalisés sur l'exploitation à long terme en permanent de la ressource.

2/ Oscillations saisonnières

Le projet de collecteur proposé a été étudié sur modèle pour permettre le prélèvement du débit disponible en le pompant en 6 mois par an. Ces calculs ont été réalisés avec un coefficient d'emmagasinement de nappe libre pessimiste, de 15 %. Si maintenant nous refaisions les mêmes calculs

.../...

avec 30 % le résultat ne peut être que plus favorable : on peut donc conclure que le projet proposé est, avec une bonne marge de sécurité, capable de fournir en 6 mois le débit annuel disponible.

3/ Exploitation de la réserve unique par surpompage pendant les 15 ou 20 premières années.

En doublant le coefficient d'engainement, nous avons doublé du même coup le volume des réserves de la nappe, que l'on peut exploiter au début de la mine en place du collecteur.

En mars 73, avec un S de 15 %, nous avons proposé de capter 800 l/sec (au lieu des 650 l/s en permanent) pendant les 15 à 20 premières années de fonctionnement.

Nous avons voulu tester ici les possibilités existantes de ce chiffre. Les calculs ont été faits sur le grand modèle Simone, une fois modifié paramètres et débits suivant les nouvelles valeurs adoptées.

a) Pompage 950 l/s sur 20 ans

On a voulu tester cette hypothèse, qui correspond au doublement du débit supplémentaire prélevé.

Les résultats sont décevants : entre la 11^e et la 14^e année on obtient sur tous les collecteurs des rabattements supérieurs à ceux calculés sur 20 ans dans l'hypothèse à 800 l/sec avec un S de 15 %.

Les rabattements sont déjà dangereux au bord de la mer, la charge étant faiblement négative. On ne peut donc espérer avoir une durée de vie de 15 ans.

Ceci s'explique en fait, car si la réserve est bien double, il faut lui laisser le temps de s'écouler jusqu'aux captages, sans quoi l'augmentation des débits engendre des rabattements trop importants.

Nous allons donc tester des prélèvements plus modérés, mais étalés sur 30 ans au lieu de 15.

.../...

b) Pompage à 810 l/s sur 30 ans

Les résultats du calcul sont présentés pl. 6 et 6 bis. Cette fois-ci, les résultats sont conformes : au bout de 30 ans, les rabattements calculés sont inférieurs à ceux obtenus en 20 ans pour $S = 15 \%$.

On peut donc conclure que la surexploitation à 800 l/sec pourra être maintenue environ 25 ans au lieu des 15 ans annoncés initialement. Sur une aussi longue période, il sera de plus facile d'ajuster la durée exacte des surpompages en fonction des résultats obtenus sur les 10 premières années par exemple.

A part ce résultat favorable, nous ne modifierons donc en rien les conclusions présentées en mars 73, que nous rappelons donc ici.

b) Pompage à 810 l/s sur 30 ans

Les résultats du calcul sont présentés pl. 6 et 6 bis. Cette fois-ci, les résultats sont conformes : au bout de 30 ans, les rabattements calculés sont inférieurs à ceux obtenus en 20 ans pour $S = 15 \%$.

On peut donc conclure que la surexploitation à 800 l/sec pourra être maintenue environ 25 ans au lieu des 15 ans annoncés initialement. Sur une aussi longue période, il sera de plus facile d'ajuster la durée exacte des surpompages en fonction des résultats obtenus sur les 10 premières années par exemple.

A part ce résultat favorable, nous ne modifierons donc en rien les conclusions présentées en mars 73, que nous rappelons donc ici.

IV. CONCLUSIONS

A u terme de l'étude par modèle mathématique du captage des ressources en eau du flanc marin de la dune de NEPZA, on peut tenter de synthétiser les 3 phases de calculs qui ont permis de proposer l'actuel plan de captage, et de cerner la précision des estimations fournies pour chaque branche de collecteur.

a) Un premier modèle plan horizontal, SIMONE mis à la disposition du projet par le laboratoire d'hydrogéologie mathématique de l'Ecole des Mines de Paris, a permis d'évaluer la ressource globale de l'aquifère en interprétant les variations naturelles de la nappe et en s'aidant des essais de débit réalisés sur les forages.

b) Un "sous-modèle" de SIMONE, focalisé sur la partie centrale de la dune, a permis de préciser ou de confirmer les valeurs des paramètres hydrauliques de l'aquifère, en interprétant les mesures de rabattement autour du collecteur pilote pendant les 5 1/2 mois de l'essai. Cette interprétation a nécessité par ailleurs le calage d'un modèle hydrologique particulier à chaque piézomètre observé, utilisant l'équation de convolution des données pluviométriques, pour soustraire de l'essai les rabattements dus aux seules variations naturelles de la nappe.

c) Un plan de captage conforme aux possibilités de l'aquifère a enfin été défini sur le premier modèle SIMONE global, et ensuite vérifié quant aux risques d'intrusion d'eau salée dans l'aquifère sur un ensemble de modèles plan verticaux, représentant différentes sections de l'aquifère, et où la position et le déplacement de l'interface eau douce-eau salée a été étudié en permanent et en transitoire, en supposant cet interface abrupt. Ces modèles ont été construits dans le cadre du projet, et ont également servi initialement à implanter le collecteur pilote.

Les phénomènes de dispersion du contact eau douce-eau salée (création d'une zone de transition) n'ont cependant pas été pris en compte

.../...

dans ces études ; on ignore en effet tout de la largeur actuelle de cette zone comme de la valeur du coefficient de dispersion, car aucune mesure réalisée n'a pu permettre d'atteindre le contact eau douce-eau salée actuel, qui se situe soit en mer, soit au niveau même de la plage actuelle du fait du flux important d'eau douce qui s'écoule vers la mer.

Pour tenir compte de cette simplification, on a systématiquement pris de grands coefficients de sécurité quand on a évalué les déplacements, saisonniers ou sur une plus longue période, des interfaces.

Ceci étant, le projet définitif de captage proposé comporte 5 branches de collecteurs :

- un collecteur parallèle à l'oued Zouara, longueur 1,8 km, captant 100 l/s
- un collecteur côtier Est, à 750 m et 400 m de la mer, longueur 3,8 km captant 125 l/s sur la première nappe uniquement, aucun prélèvement ne devant avoir lieu sur la deuxième.
- un collecteur côtier Ouest à 400 m de la mer, longueur 2,6 km captant 40 l/sec.
- un collecteur central anont à 1 500 et 1 800 m de la mer, longueur 3,4 km captant 315 l/sec
- un collecteur proche de la plaine des Mekras, pour la drainer, de 2,7 km captant 70 l/sec.

TOTAL : 14,3 km et 650 l/sec

La position de ces collecteurs est présentée sur la planche 7 du rapport de mars 73, reproduite ici.

.../...

Ce débit peut être capté en pompant 6 mois par an, au rythme de 1 300 l/sec. Il peut de plus être porté à 600 l/sec (ou 1 600 l/s 6 mois par an) pendant les 25 premières années environ.

Il sera nécessaire de suivre, au cours de l'exploitation, la position de l'interface eau douce-eau salée vis à vis des collecteurs côtiers Est et Ouest.

De toutes des branches de collecteur, seule est bien reconnue la branche côtière Est de 3,8 km captant 125 l/sec, car c'est là qu'a été implanté le collecteur pilote. On peut dès maintenant y lancer une exploitation suivant le principe retenu.

Quant aux autres branches du collecteur, il faudra réaliser des reconnaissances, plus précises par forages avec pompages de longue durée avant de pouvoir lancer en toute certitude les investissements.

Car, si dans l'ensemble le bilan général et la répartition des paramètres hydrauliques de la nappe sont maintenant bien connus l'implantation dans le détail des forages définitifs demande encore plus de soin, comme les mauvaises caractéristiques obtenues pour les forages de la deuxième nappe sont là pour nous le rappeler.

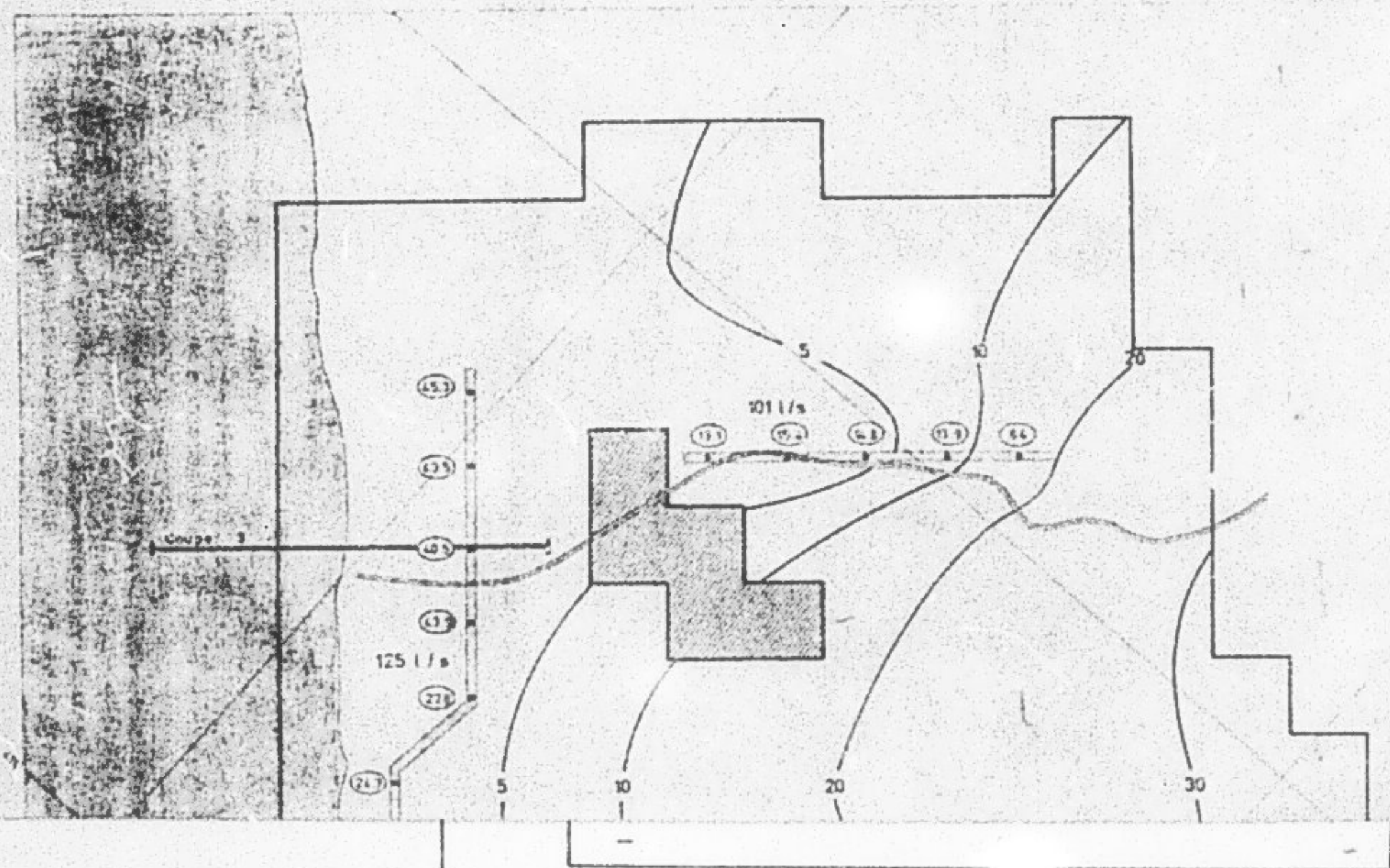
NAPPE DES DUNES DE NEFZA
CARTE PIEZOMETRIQUE EN
REGIME PERMANENT

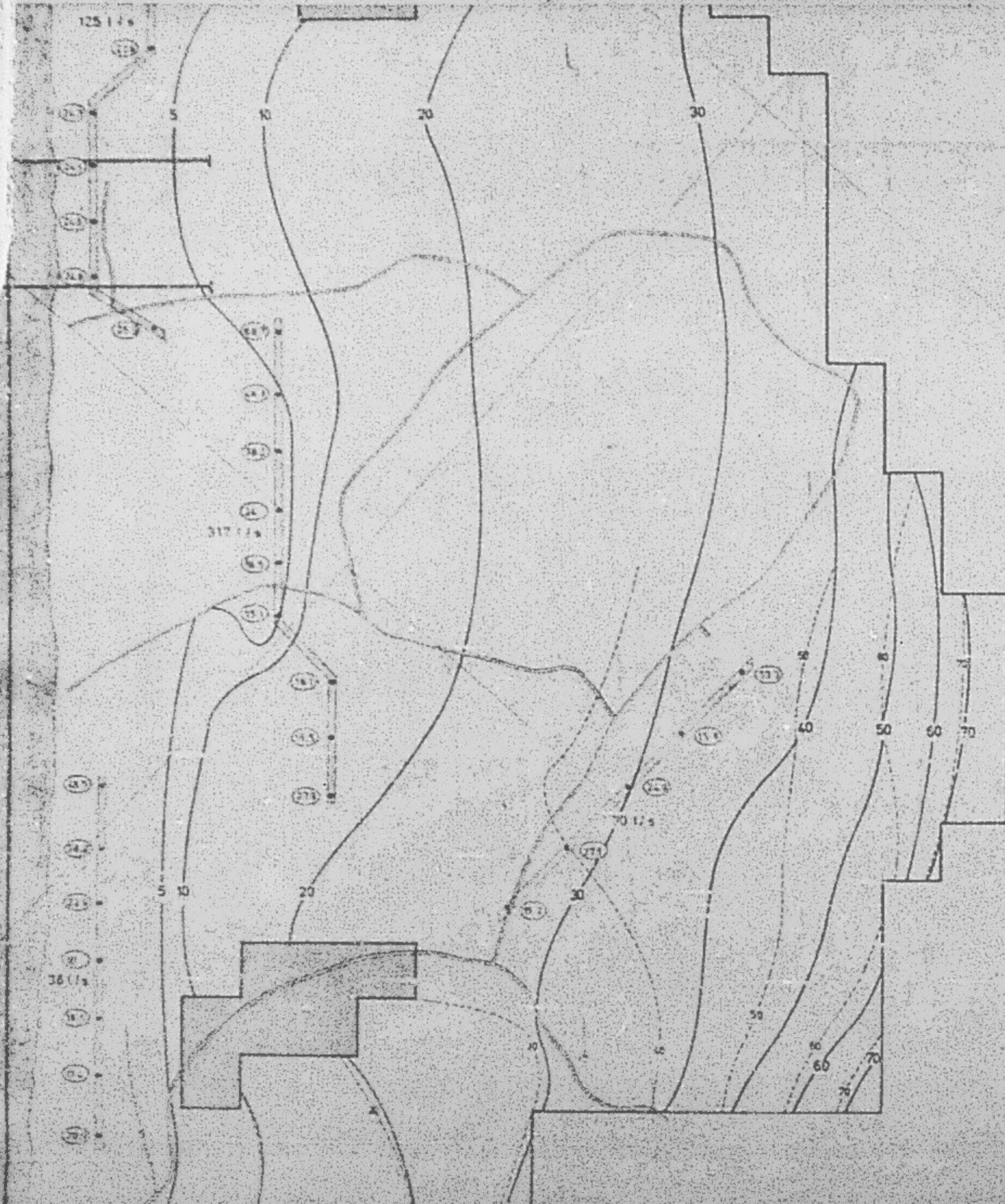
CAPTAGE DEFINITIF

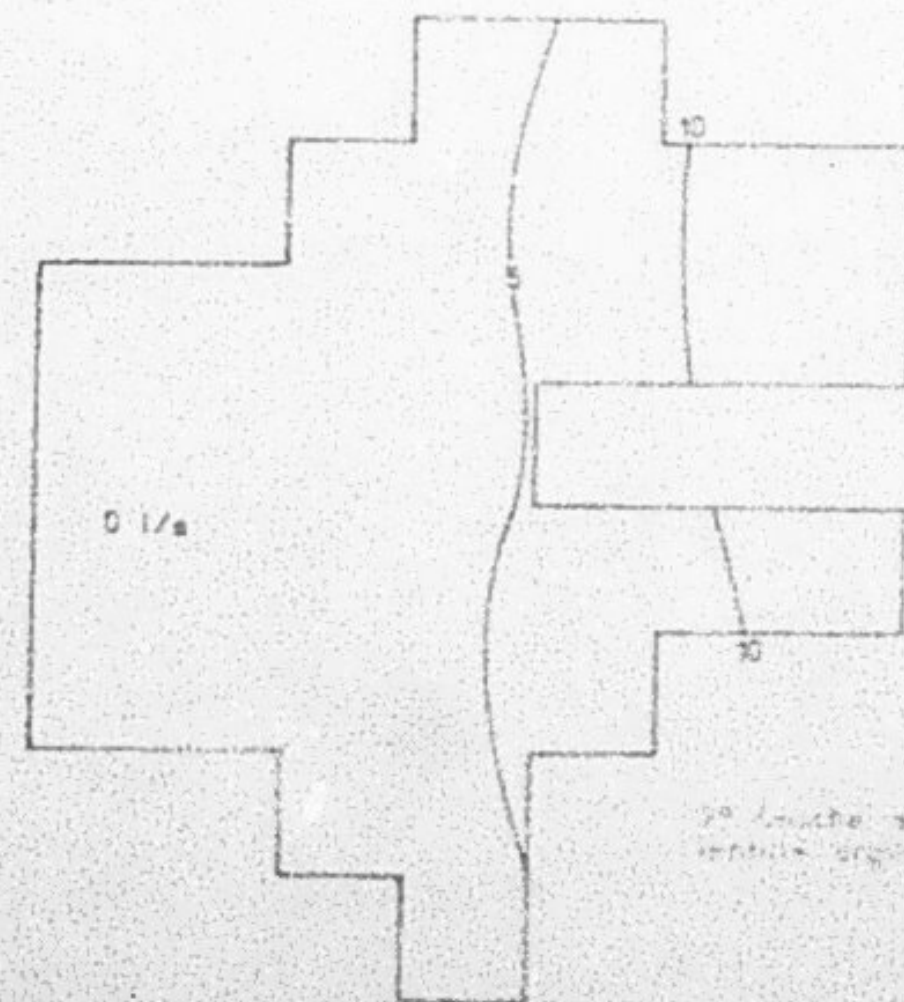
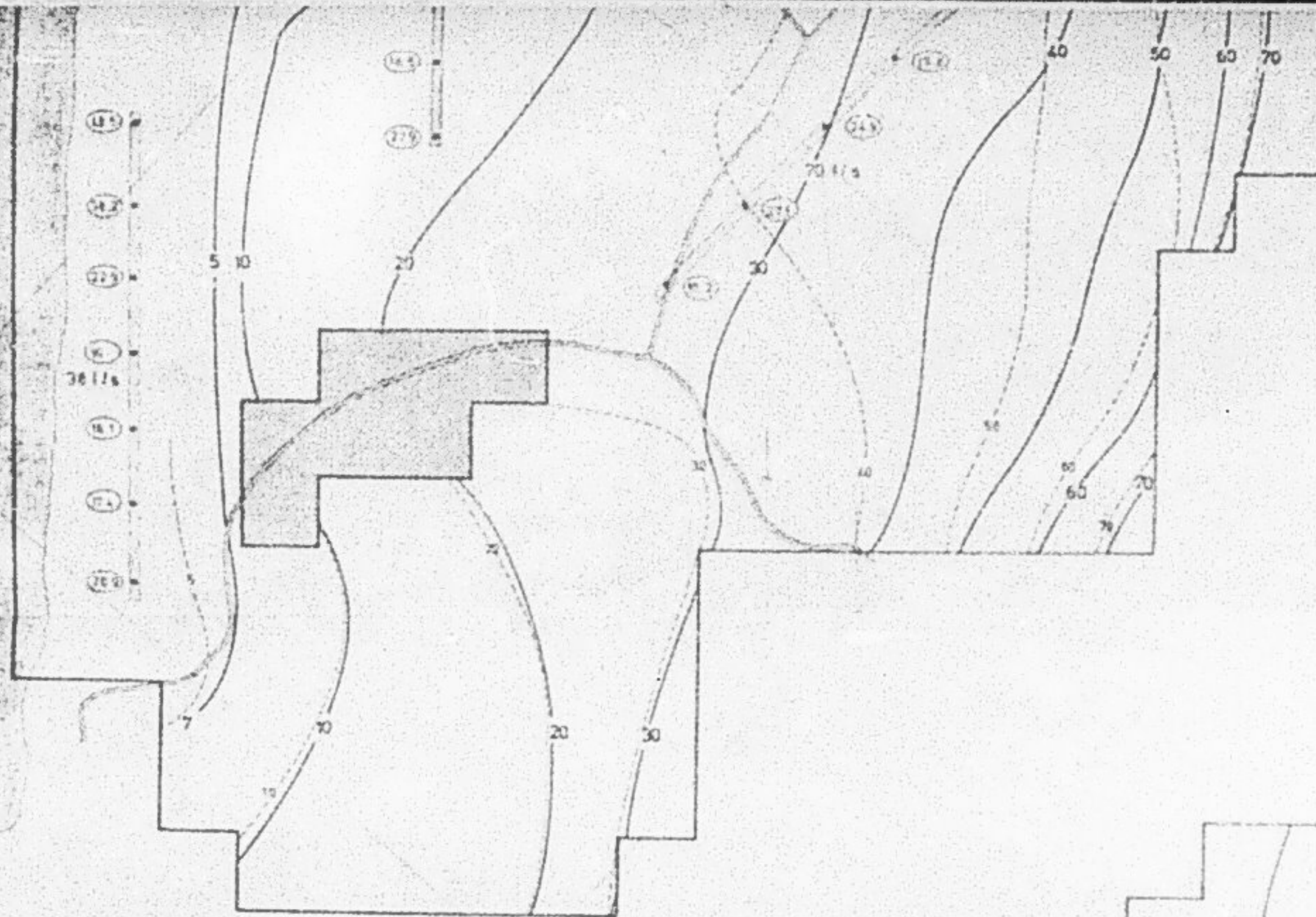
ECHELLE 1:25 000

Légende

-  Masse du ventose in substrate
-  Courbe isopieze calculée
-  Branche de collecteur et débit permanent par point
-  Hauteur résiduelle par suite de collecteur
-  Courbe piézométrique calculée en régime naturel, sans pompage, pour apprécier le débatement dans le plan des Marnas



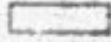


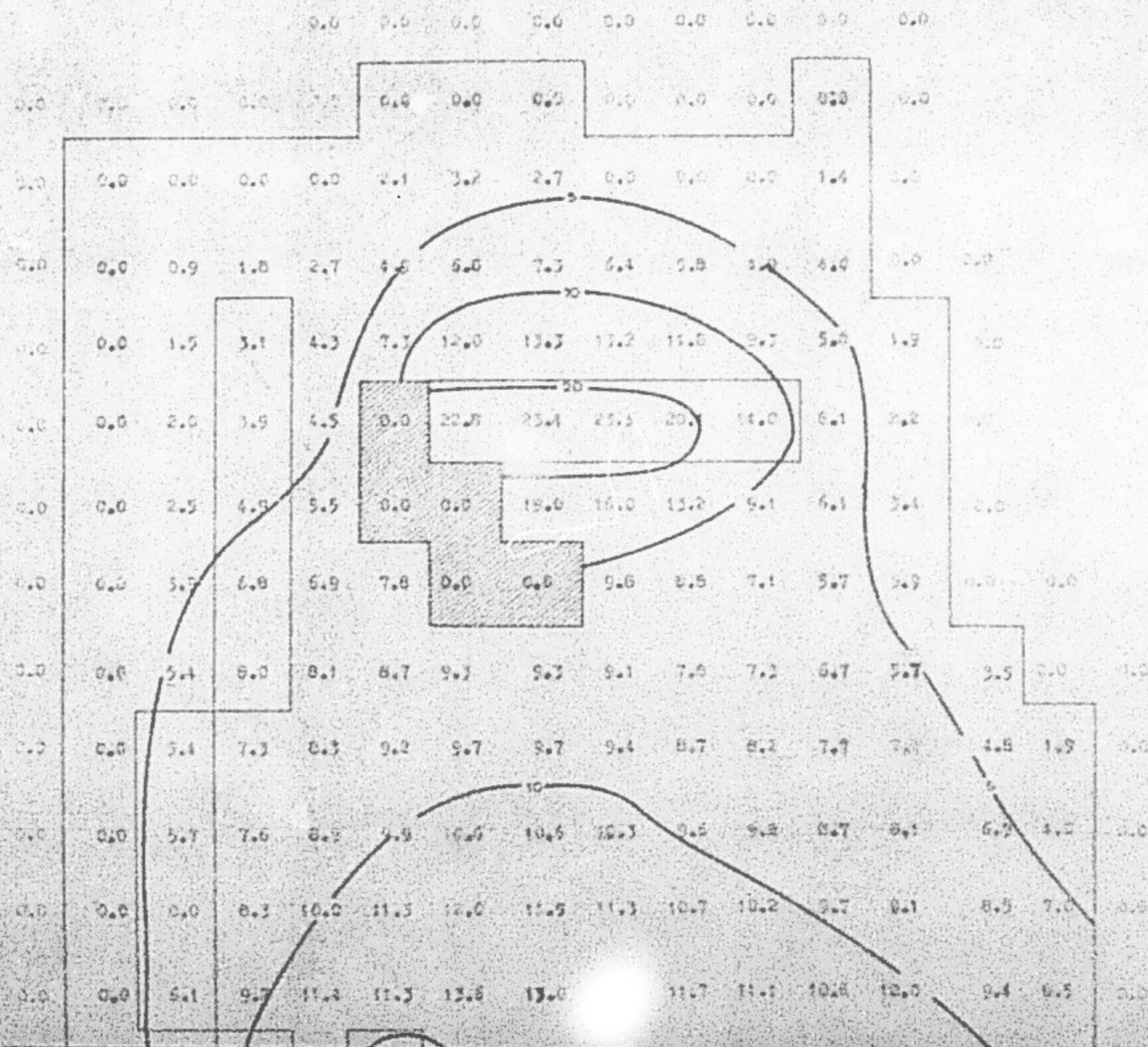


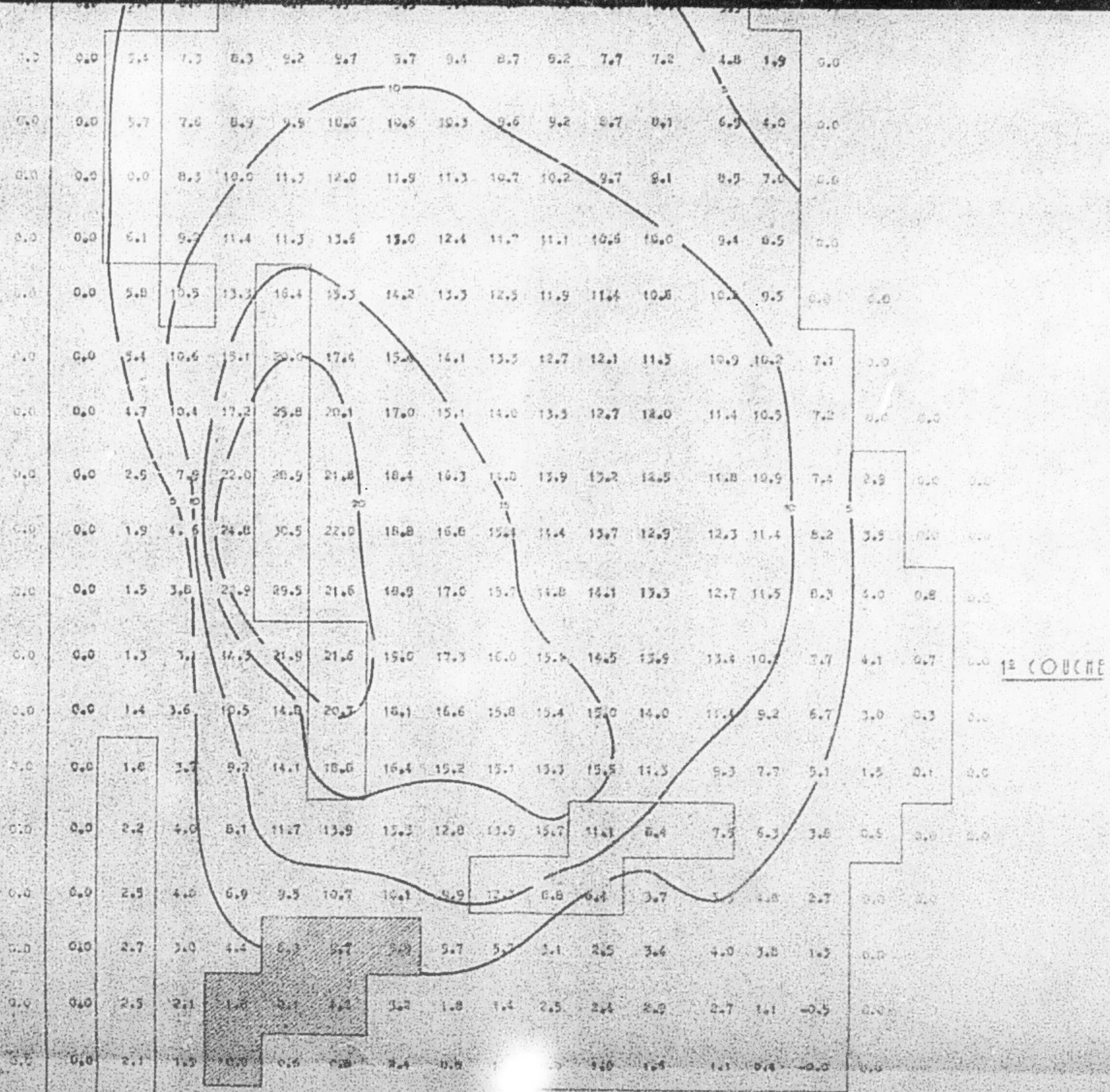
go further south to
vertical ground line

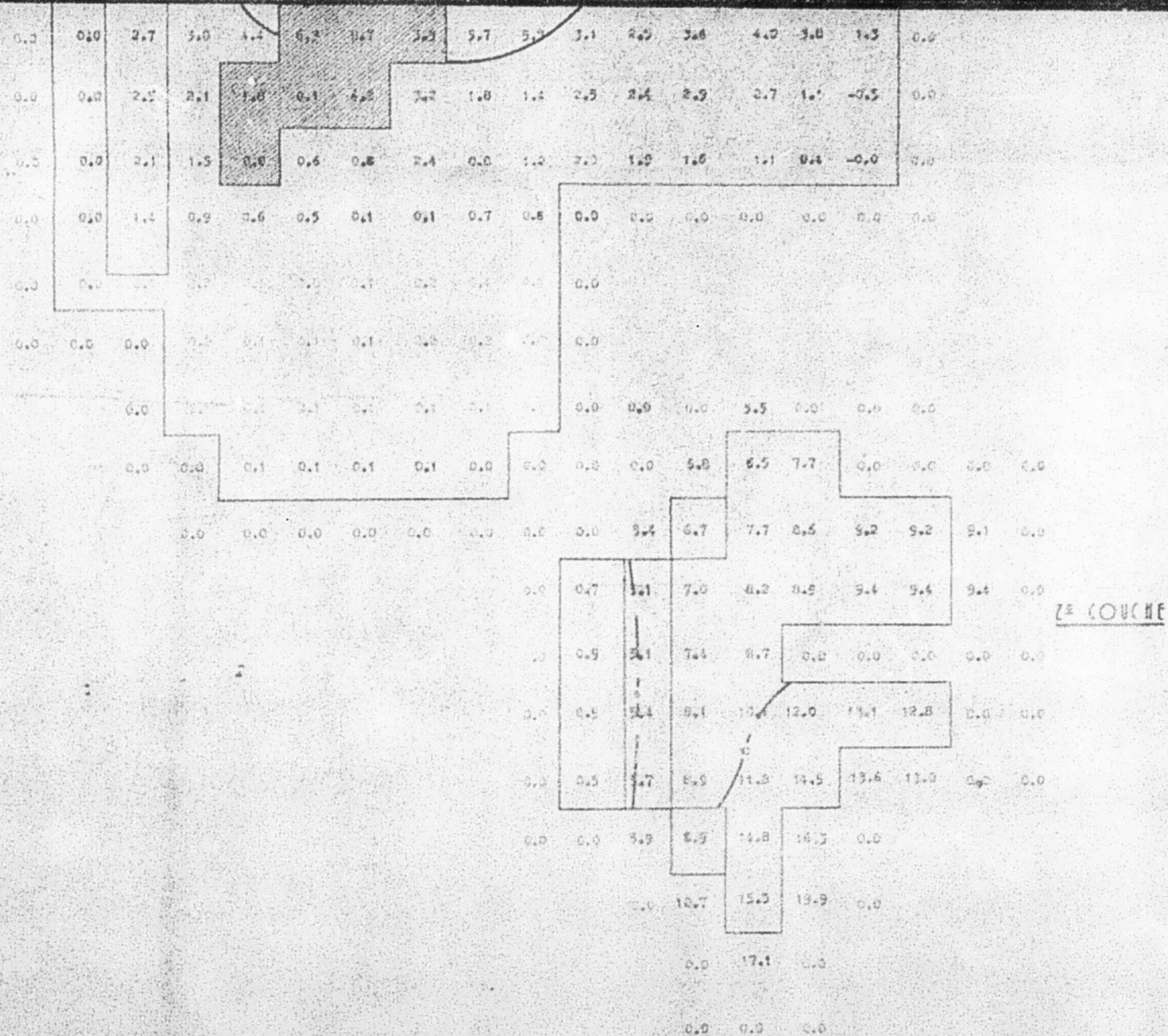
NAPPE DES DUNES DE NEFZA
**CARTE DE RABATTEMENT
ENTRE 0 ET 30 ANS**
(POMPAGE A 800 L/s)

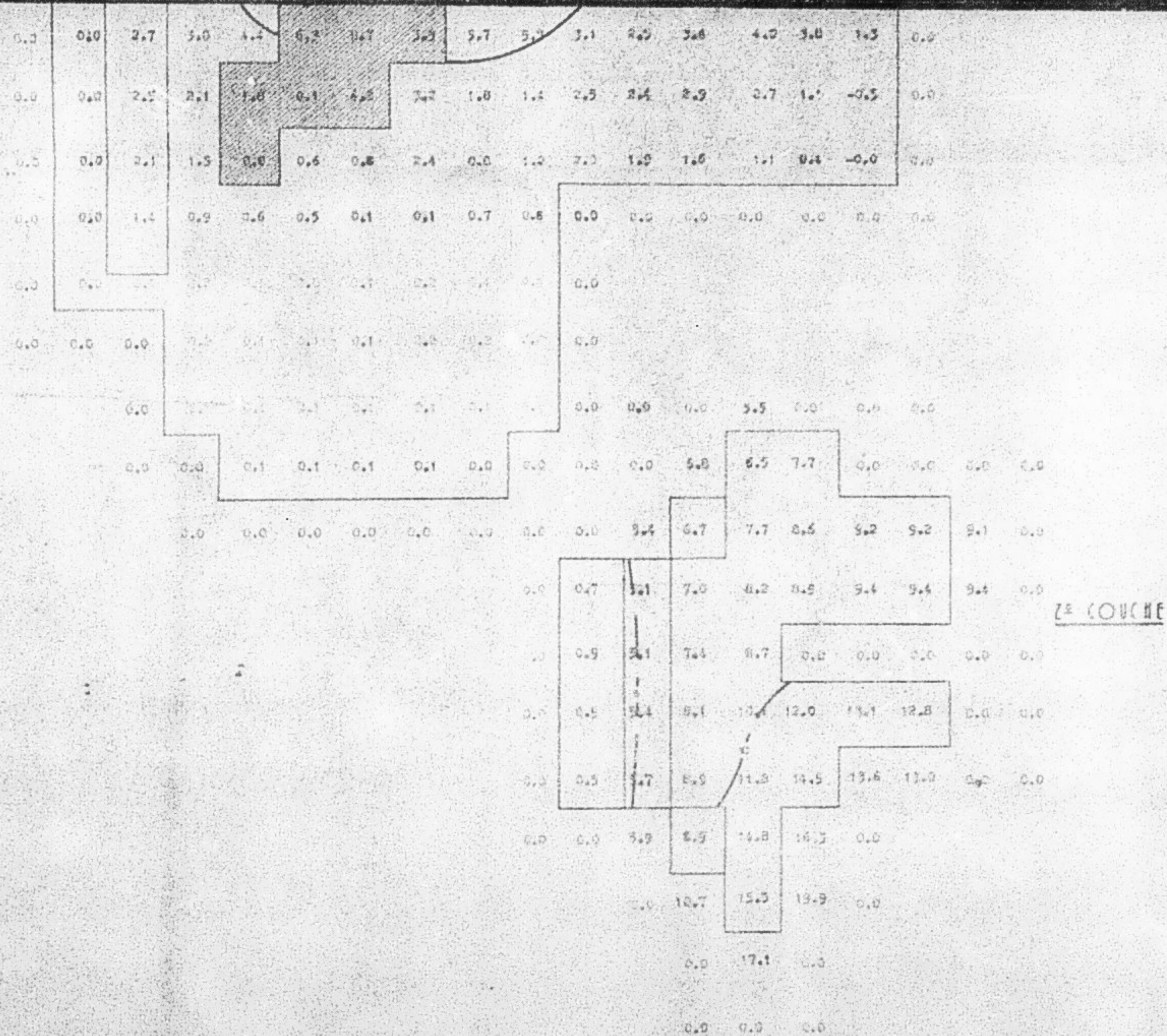
Légende

-  Marnes du remblai de substratum
 Position du collecteur





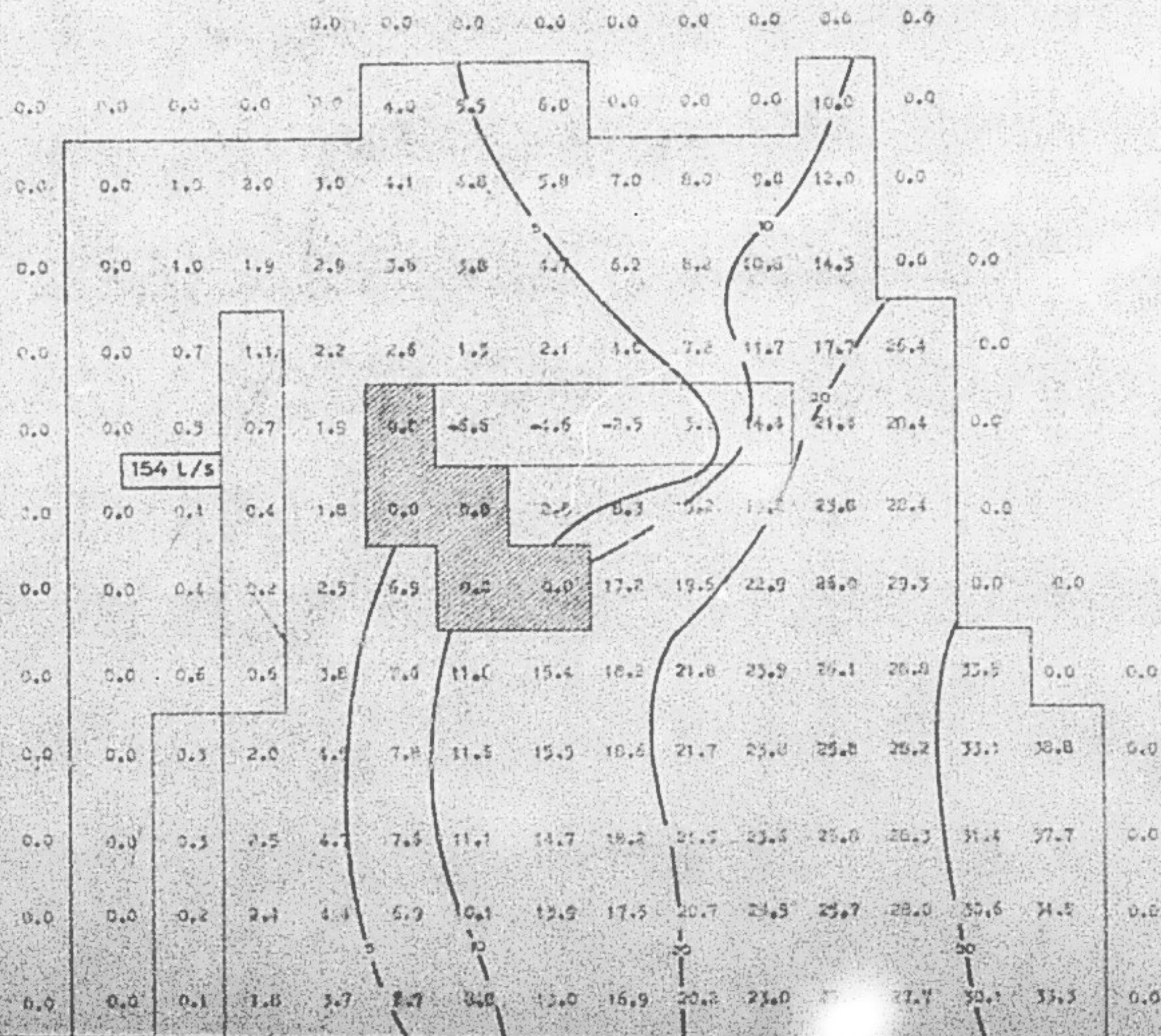




APRES 30 ANS (POMPAGE A 800 L/s)

Légende

- | | |
|---|------------------------------------|
| ☐ | Malles du remorque le substructure |
| ☐ | Position du collecteur |
| ☒ 513/4 | Débit de collecteur par branche |





SUITE EN

F

2



000080

Ministère de l'Agriculture

Ministère de l'Agriculture

Centre National de

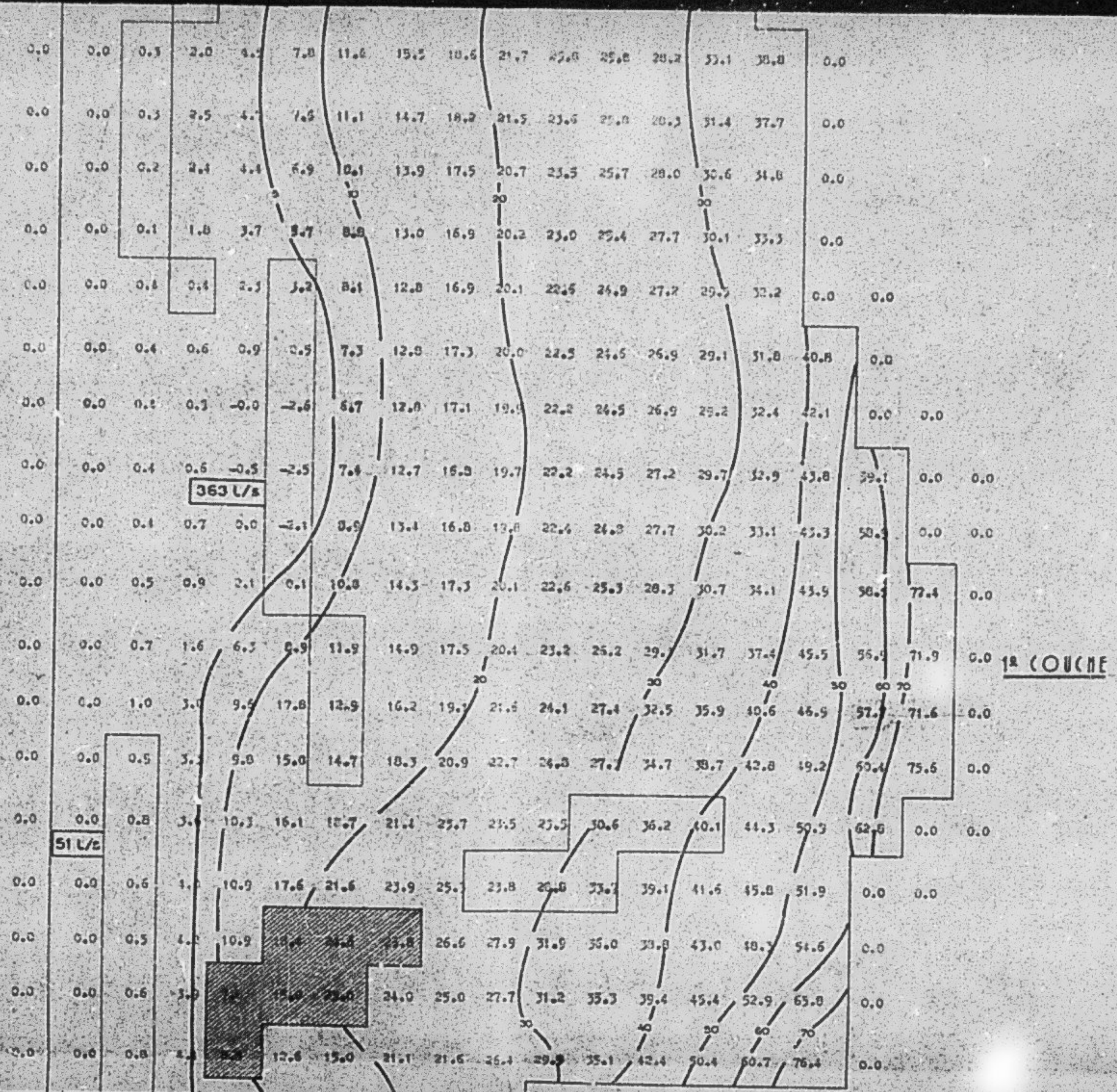
Documentation Agricole

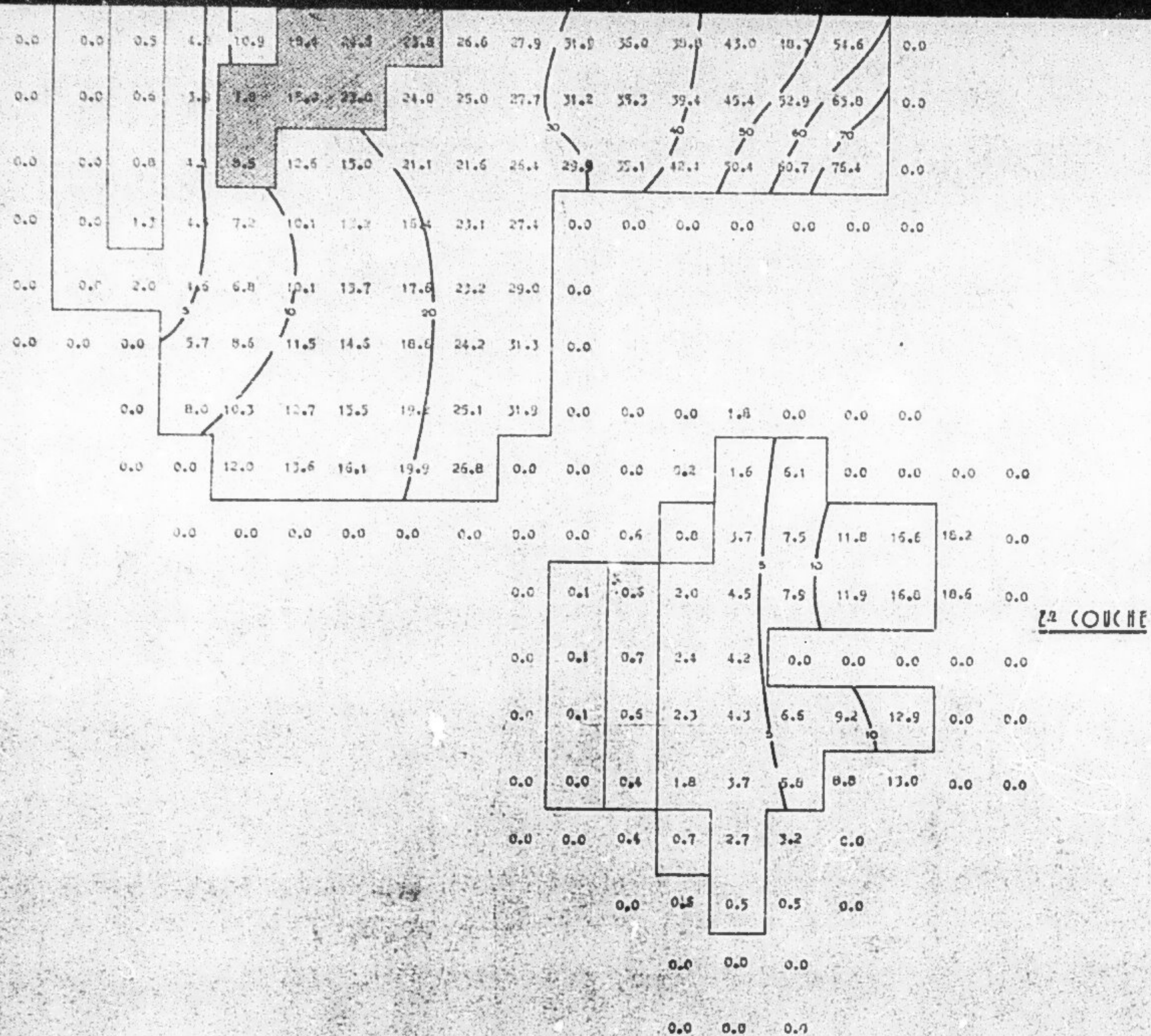
Tunis

الجمهورية التونسية
وزارة الزراعة

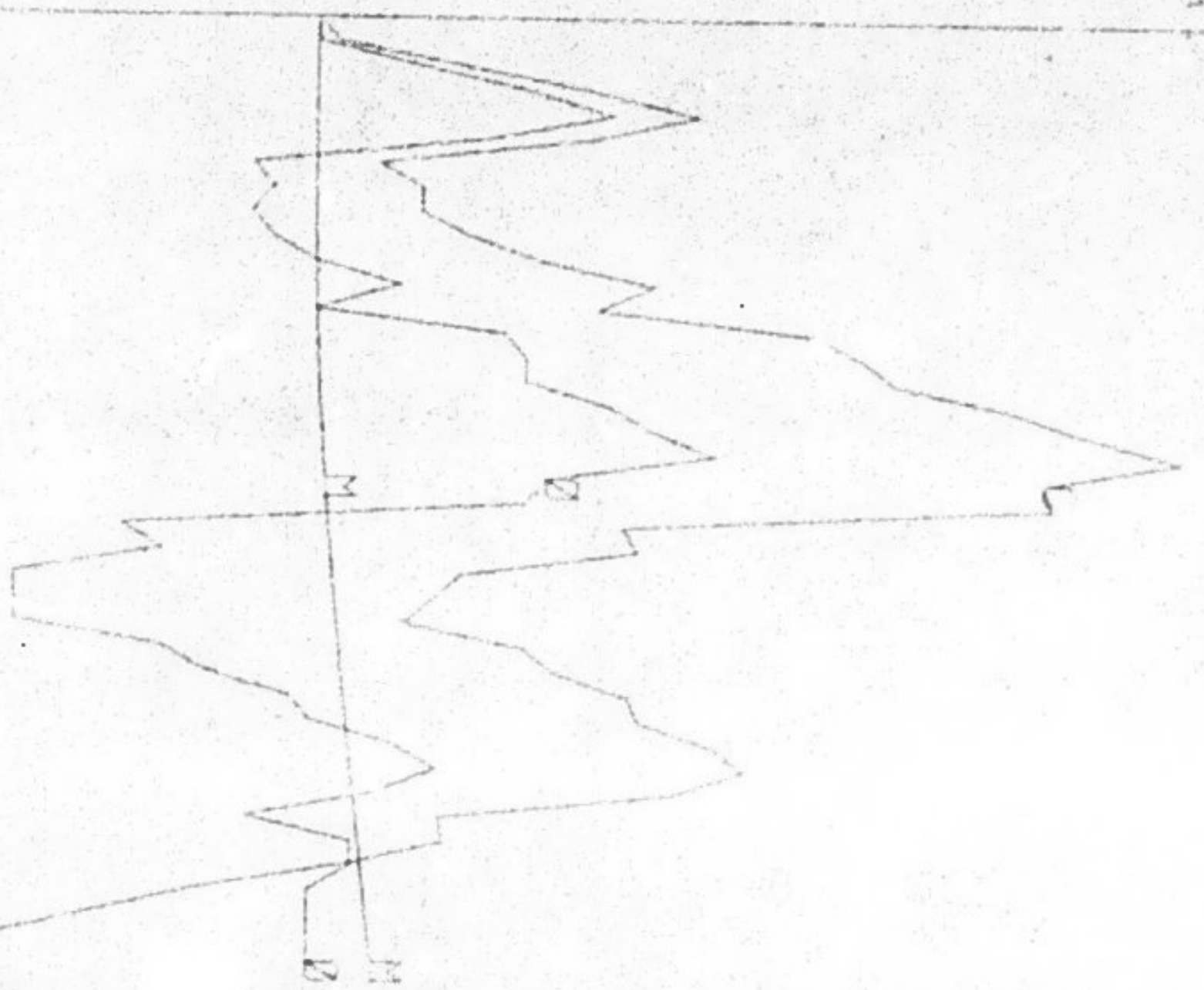
المركز القومي
توثيق الفلاحي
تونس

F 2

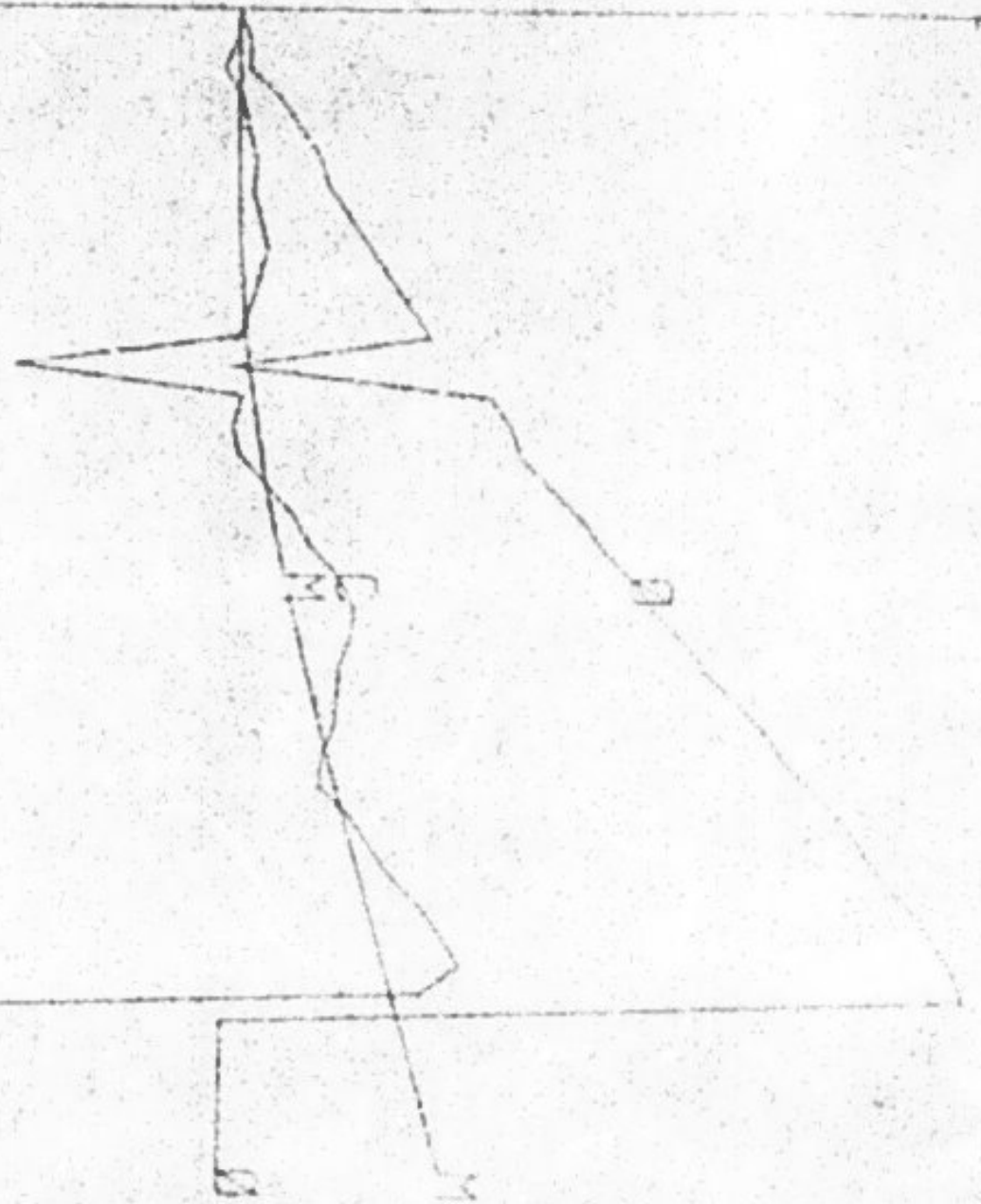




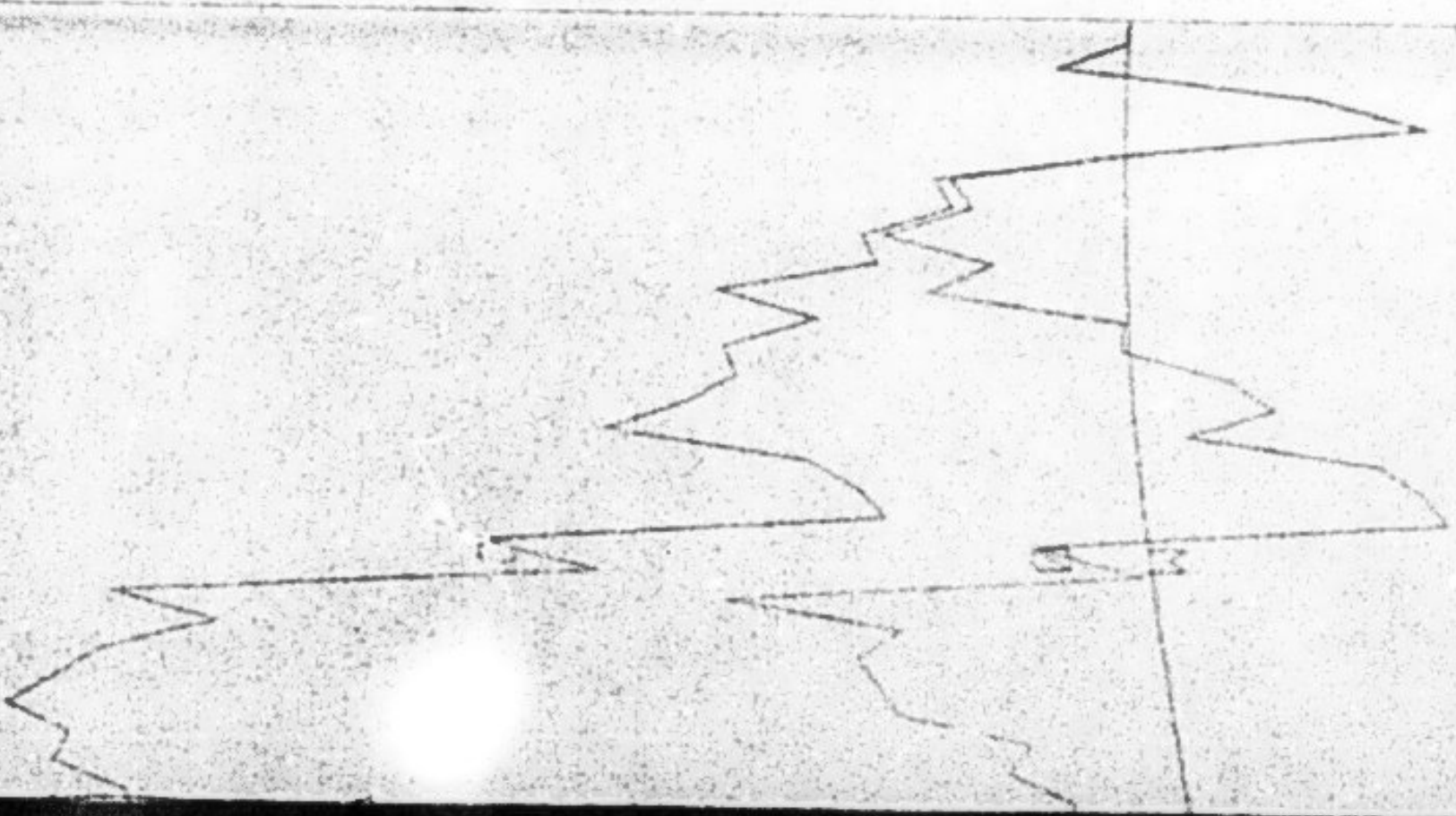
PIEZO 7342 46 MAILLE 23



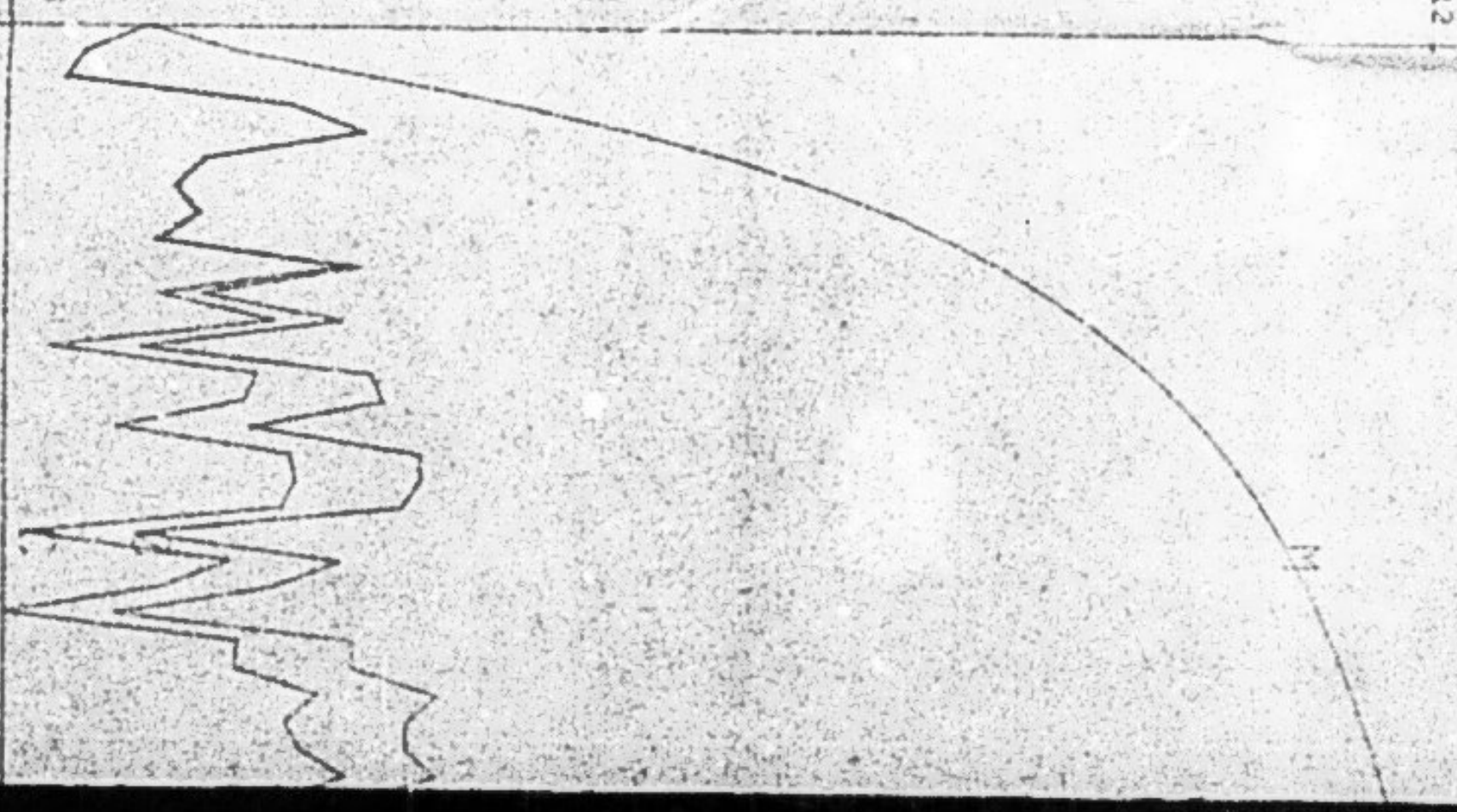
PIEZO 7277 D1 MAILLE 220



PIEZO 7340 46BT MAIL



PIEZO 7380 S1 MAIL



195 --23

2.12

--5+

195

--02

--02

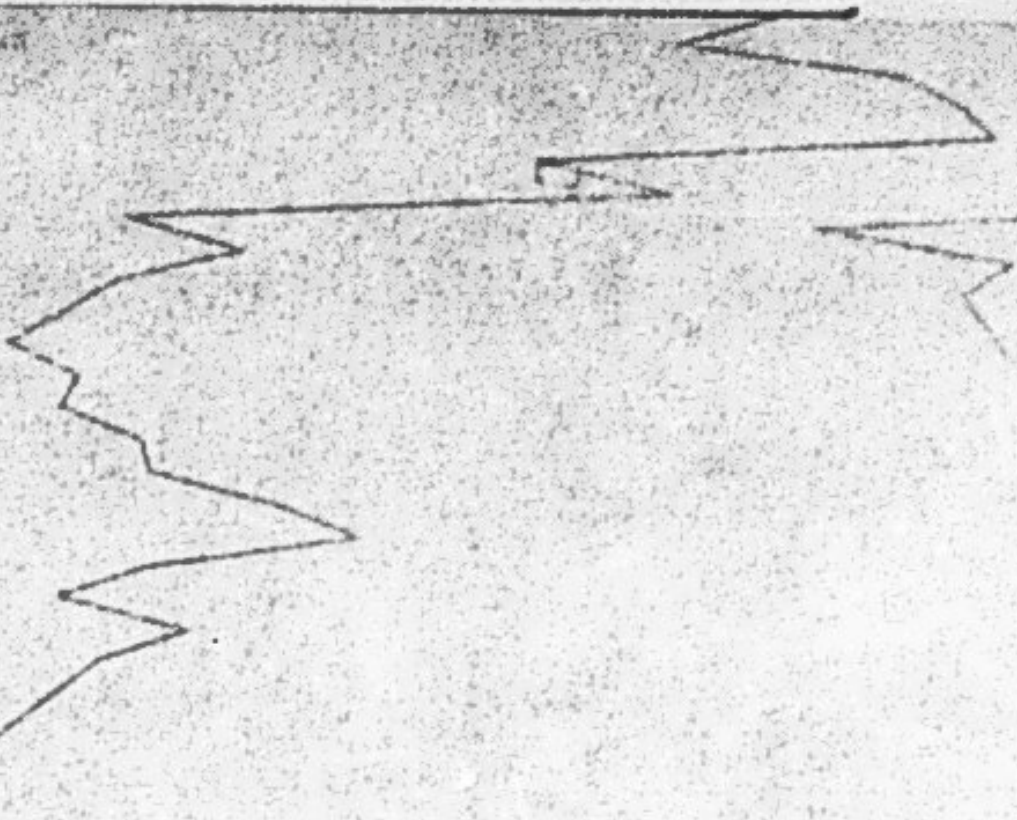
--02

--02

0 9881 MAILLE 30

PIEZO 7143 E16 MAILLE 280

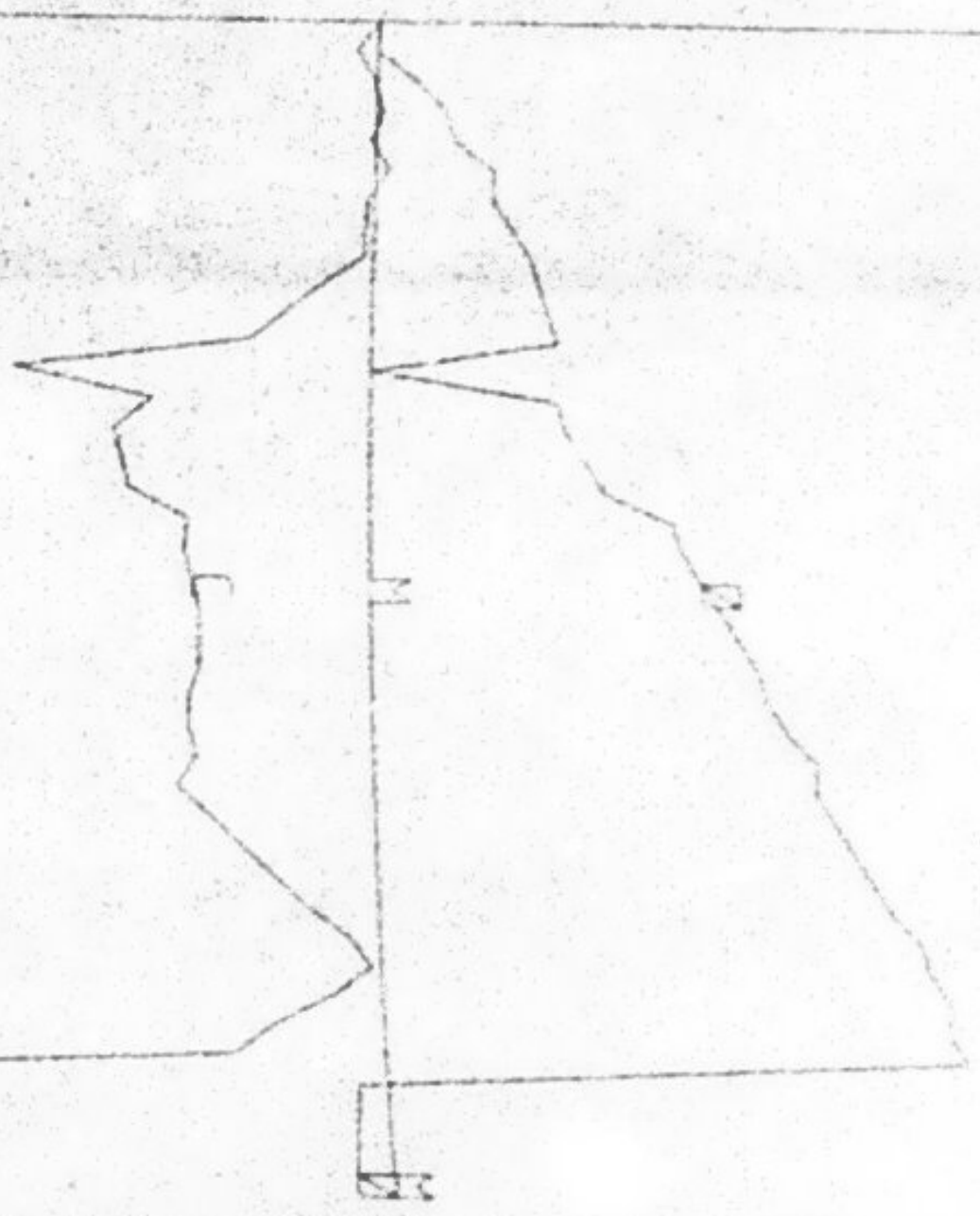
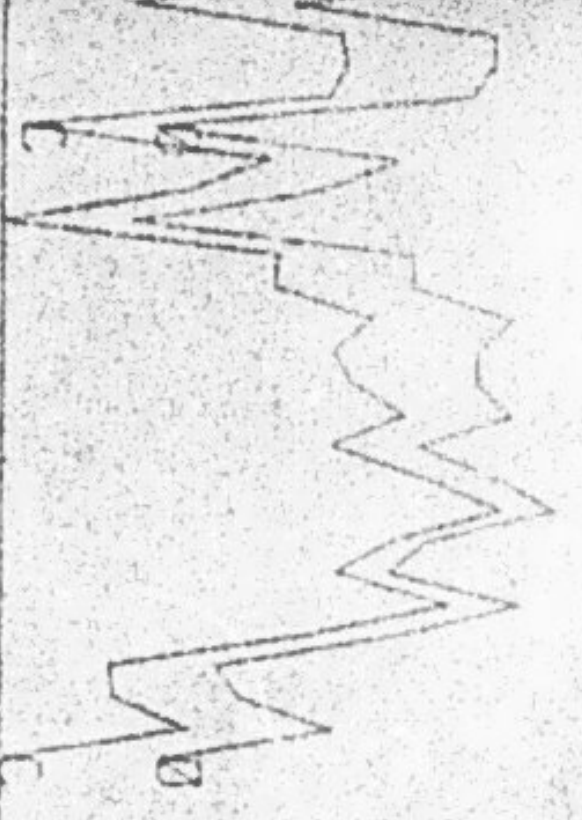
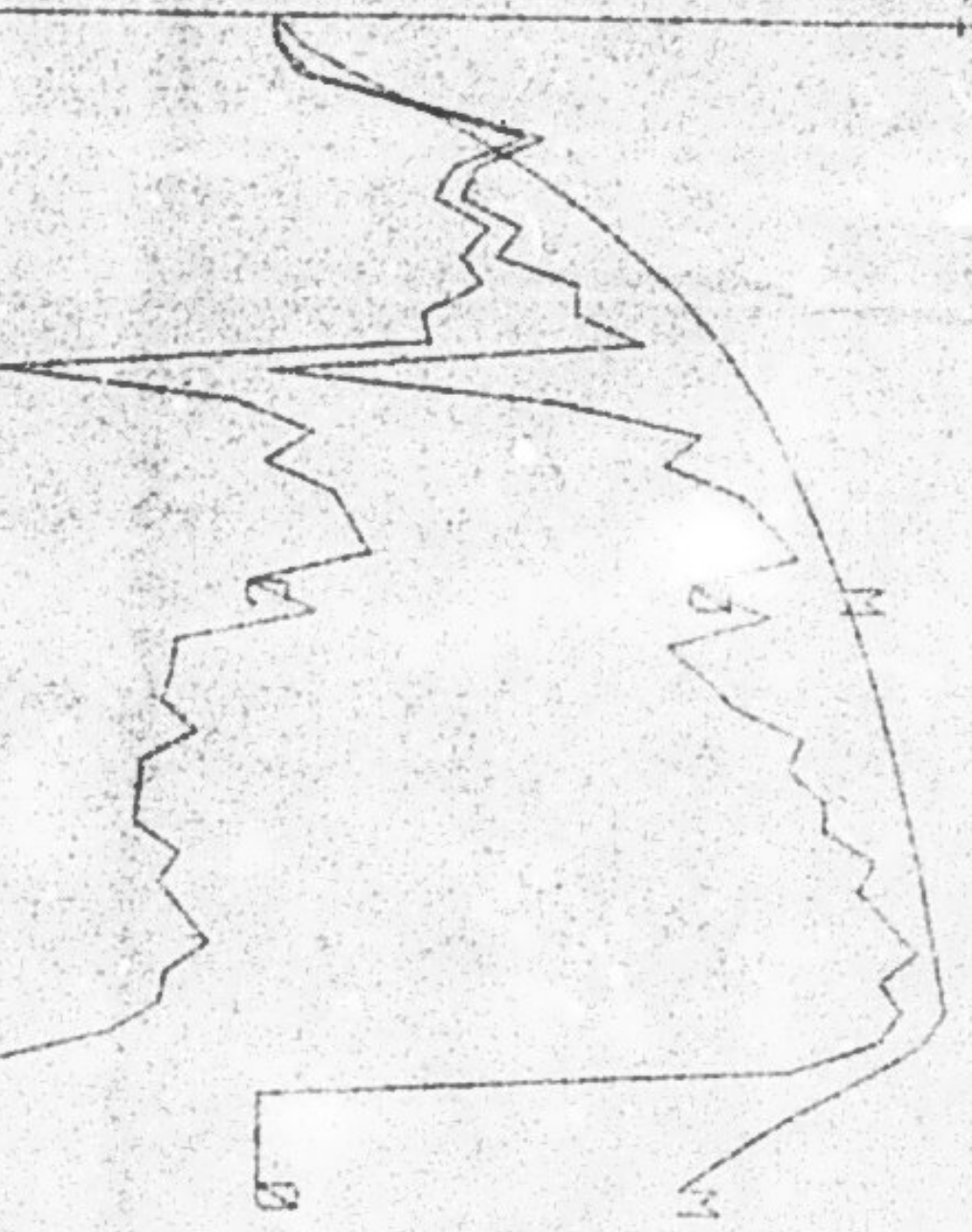
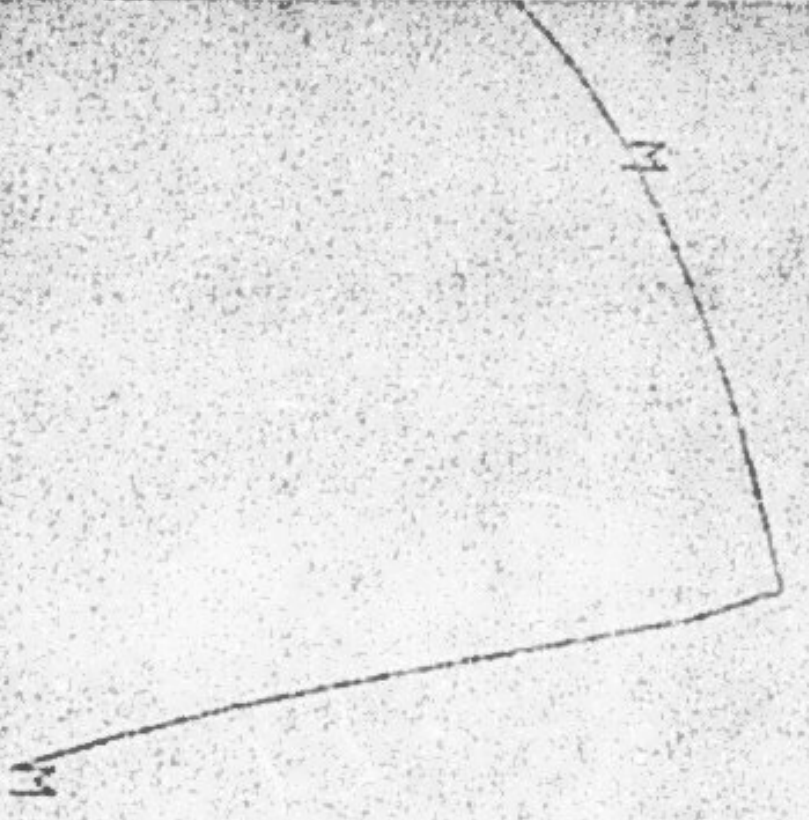
PI



0 S1 MAILLE 192

PIEZO 7238 40 MAILLE 230

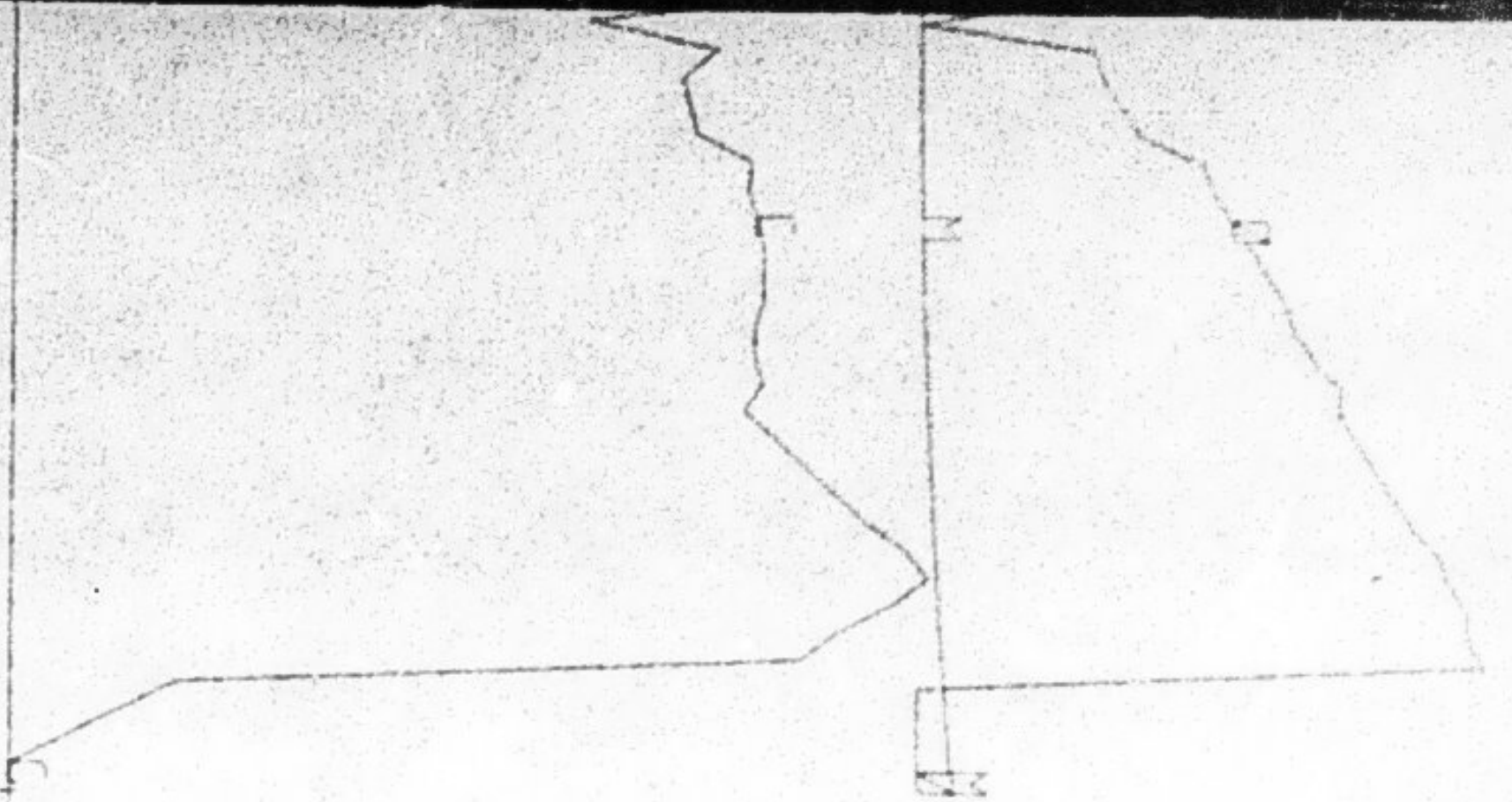
PIE



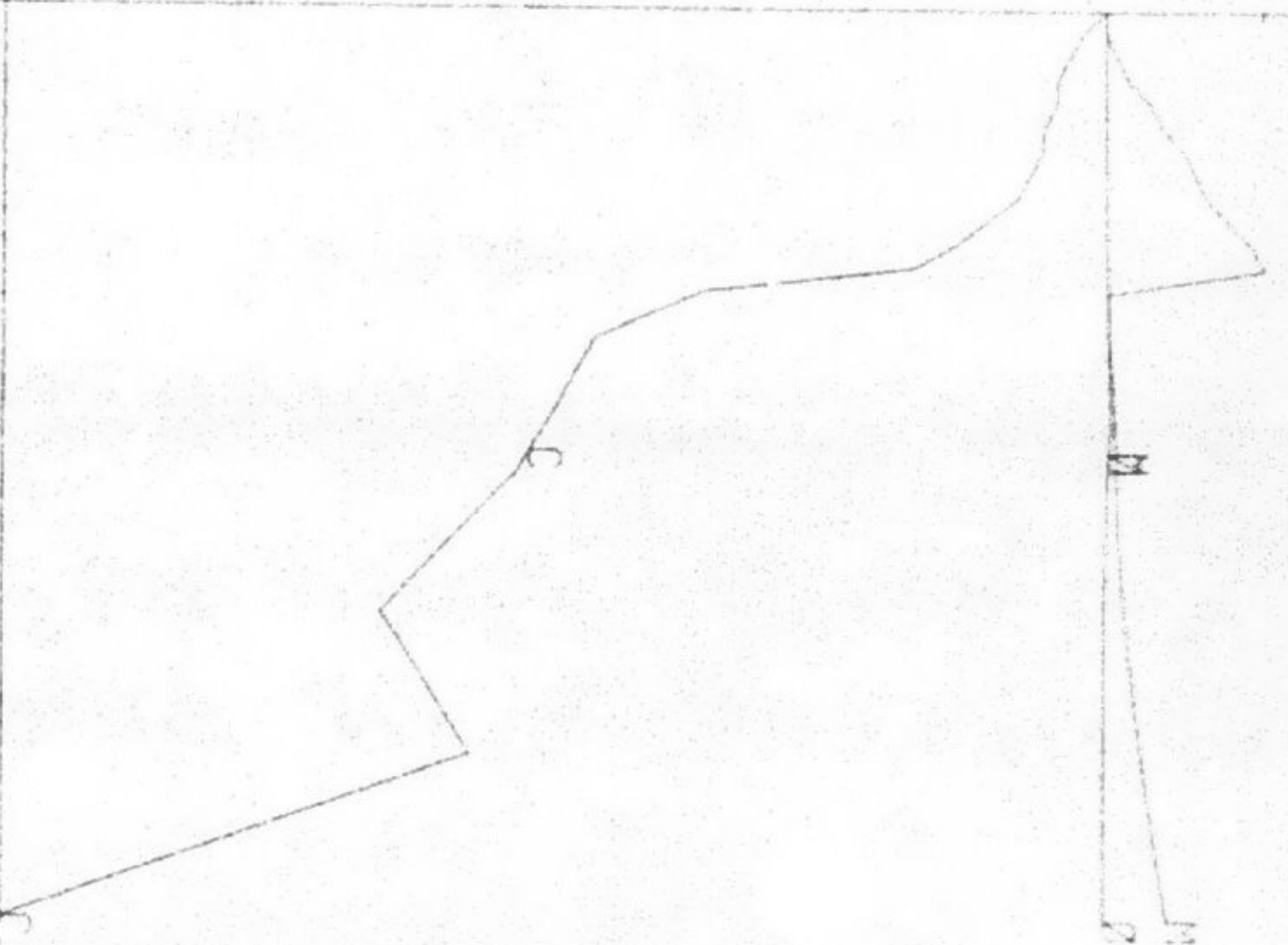
195
-1.25

195
-0.01

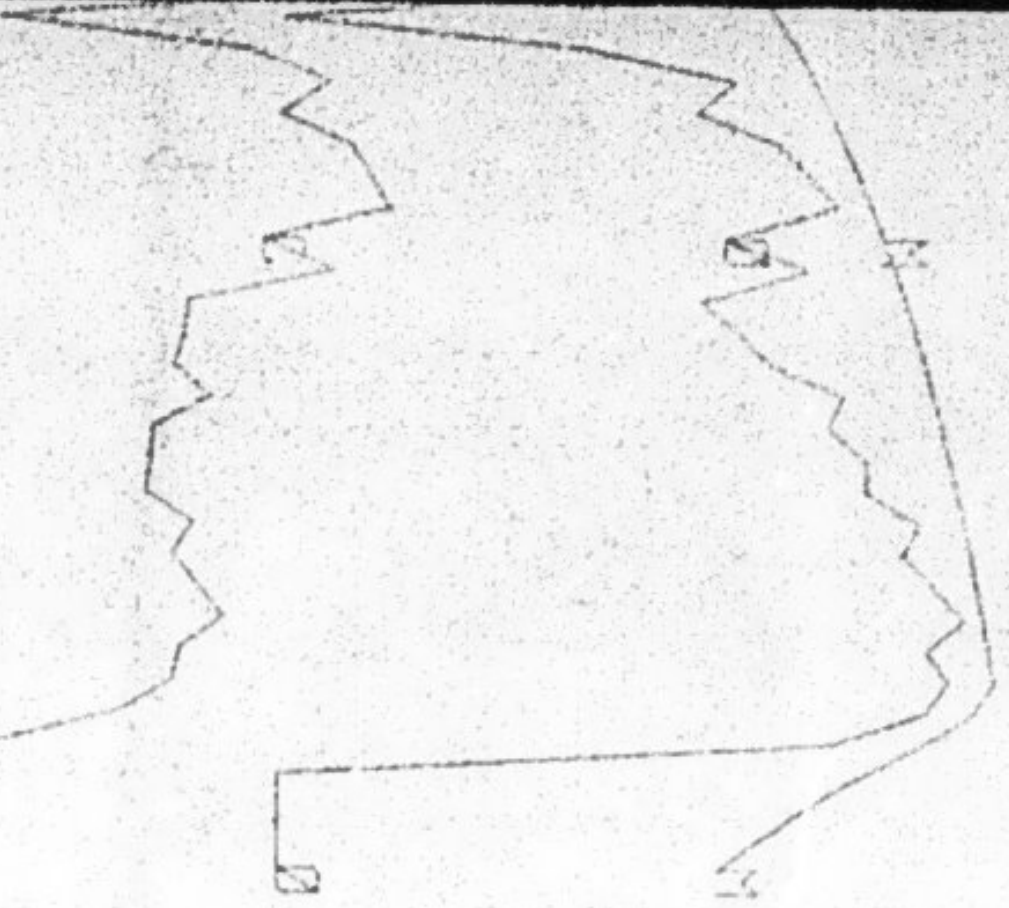
143 E16 M11LE 280



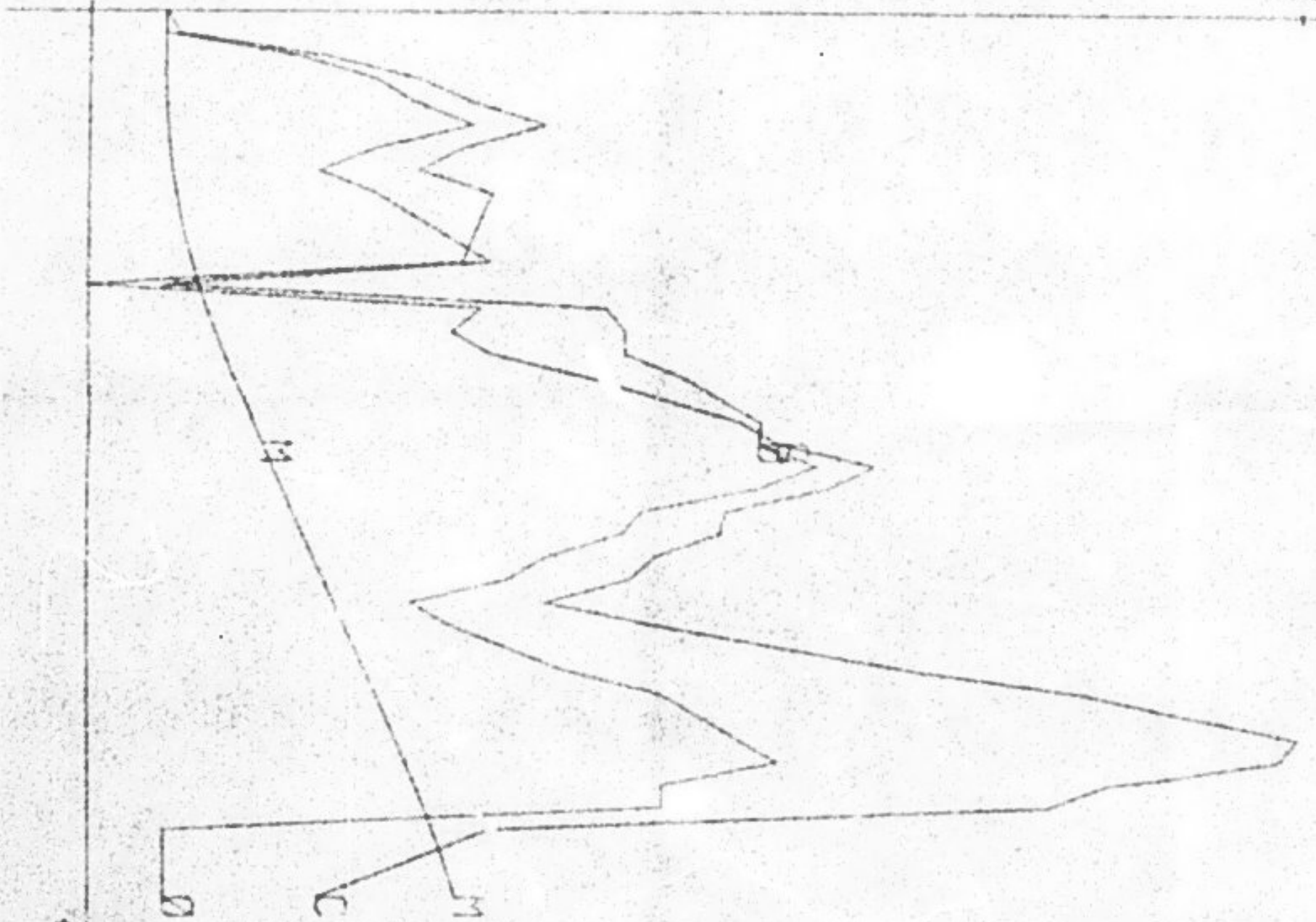
PIEZO 7143 E168 M11LE 279

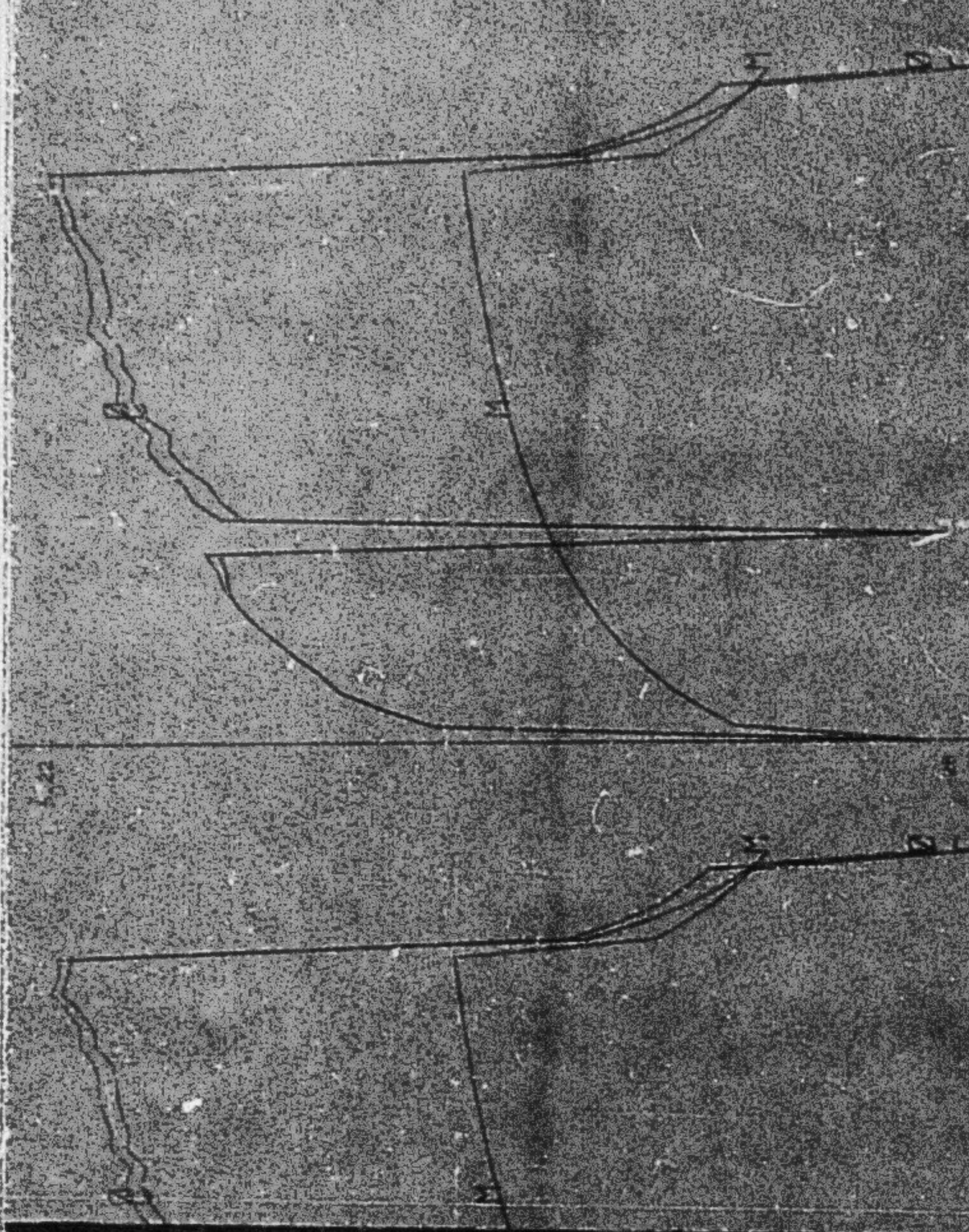


288 90 M11LE 230

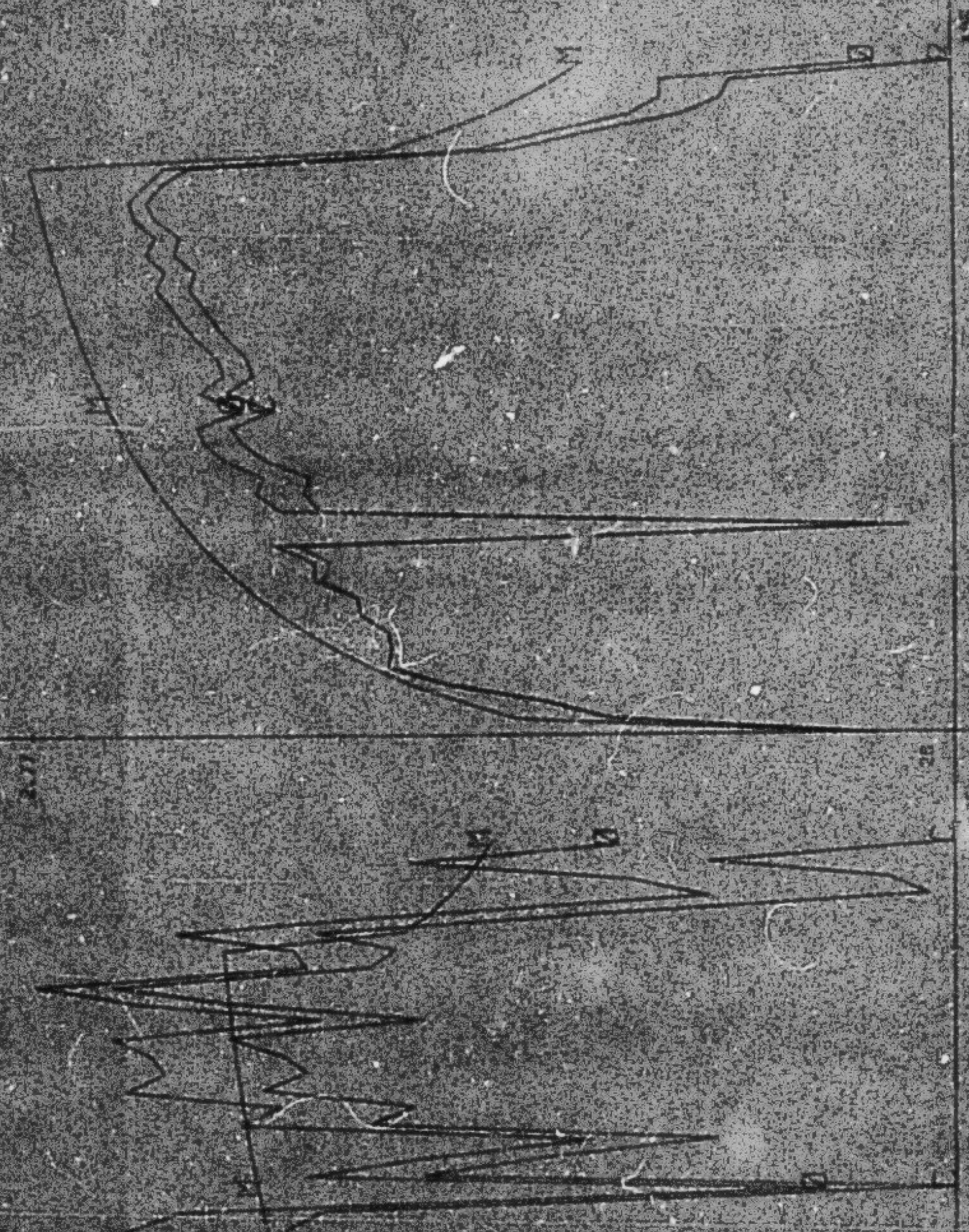


PIEZO 7052 A4.5 M11LE 43





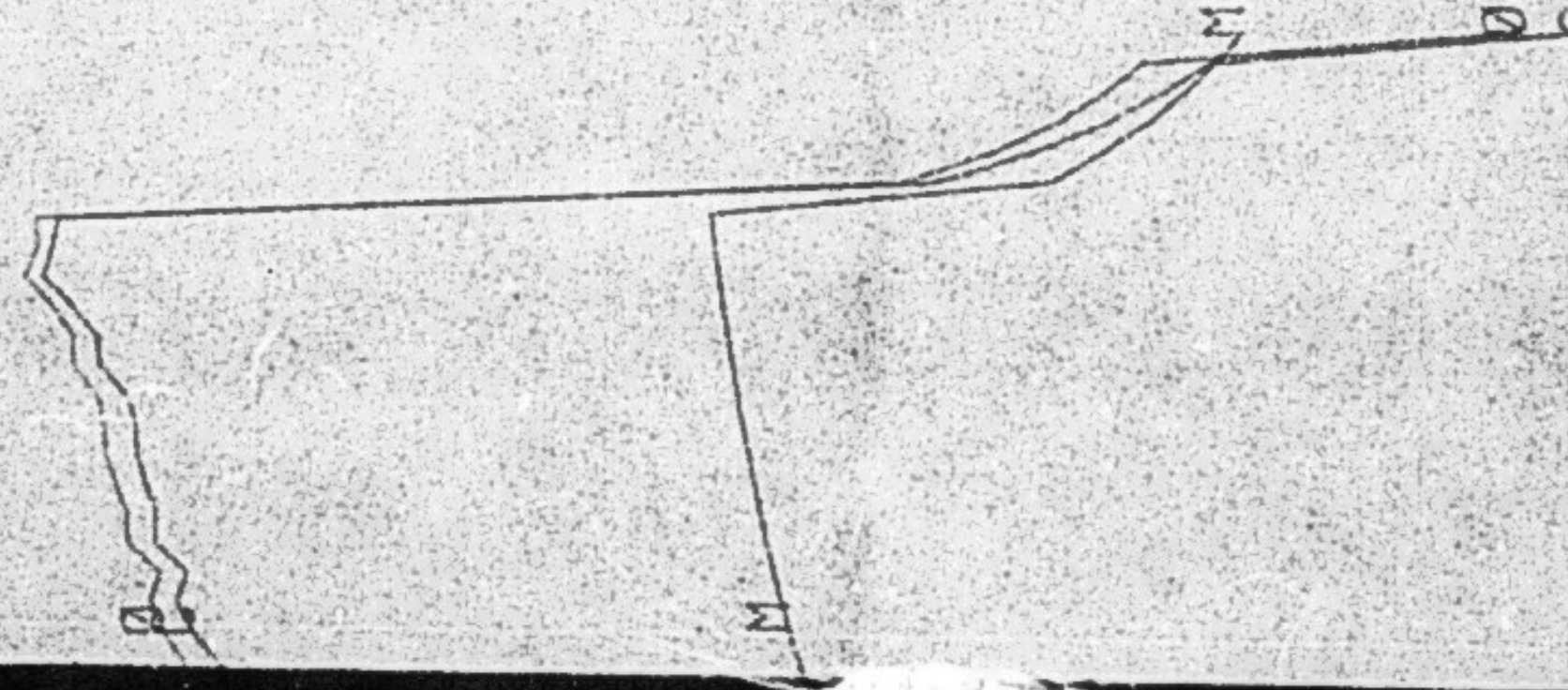
P1 MAILLE 645 P2 MAILLE 446 PIEZO 7832



F2 MAILLE 446

PIEZ0 7385 F4 MAILLE 446

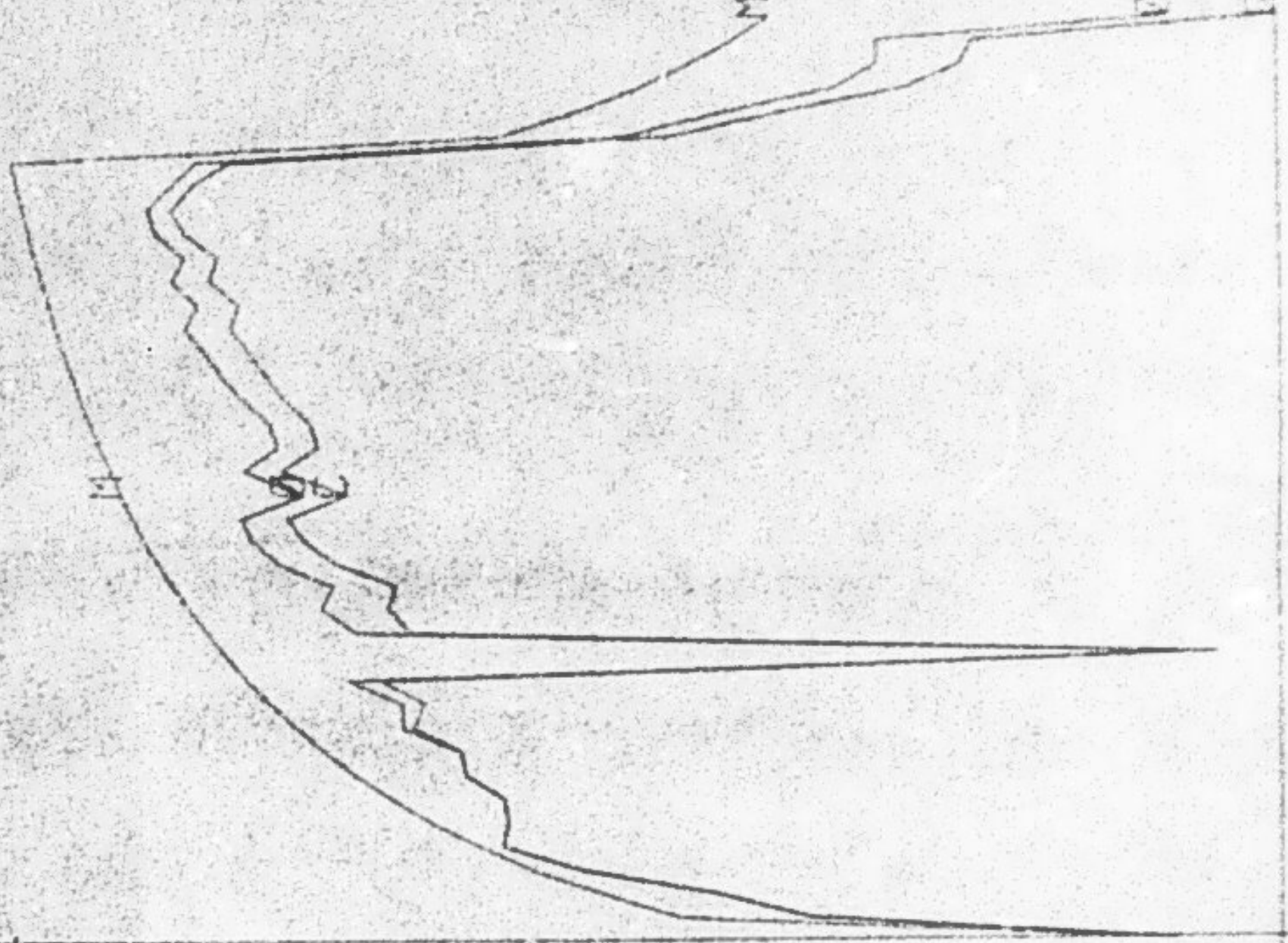
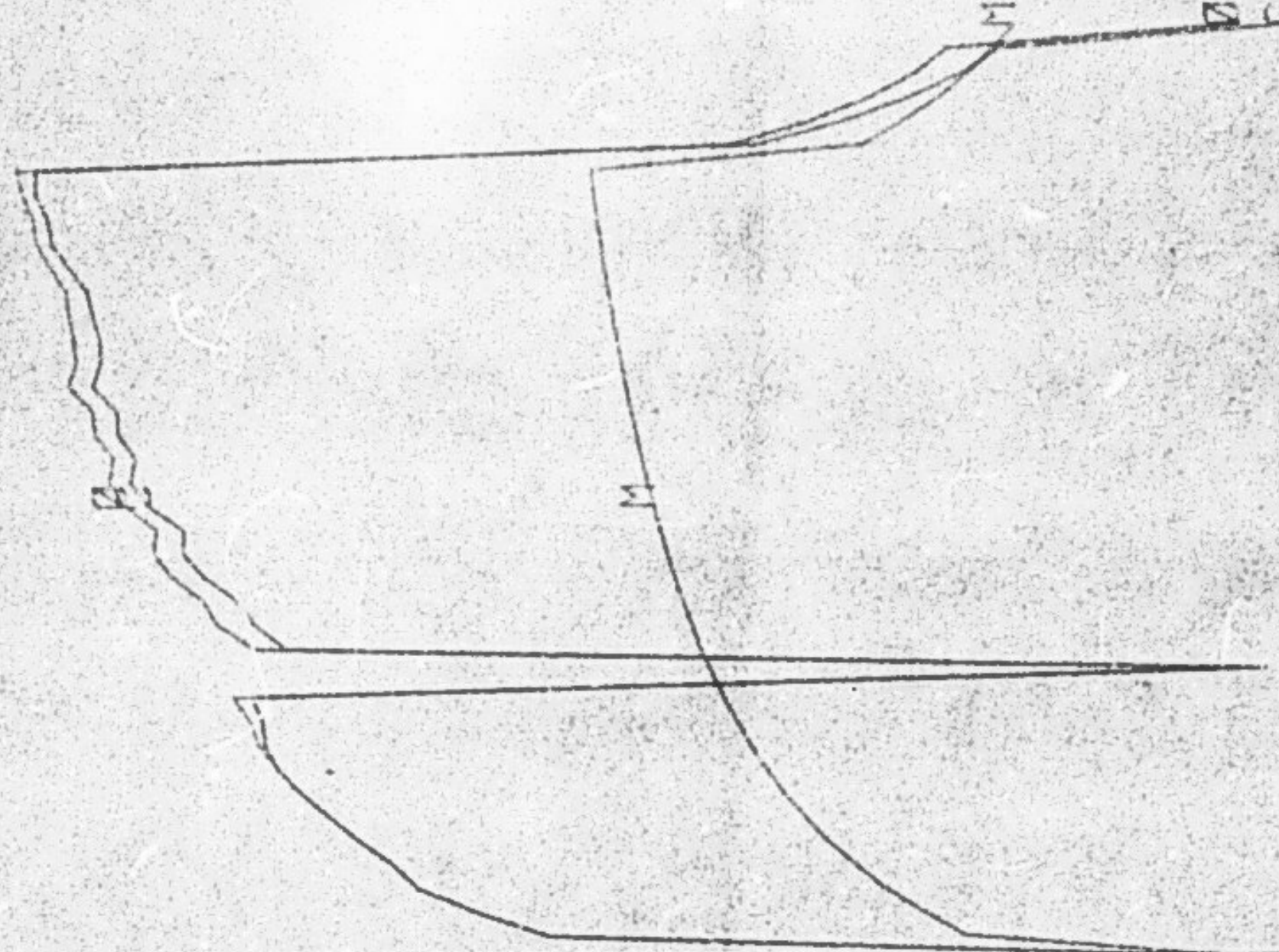
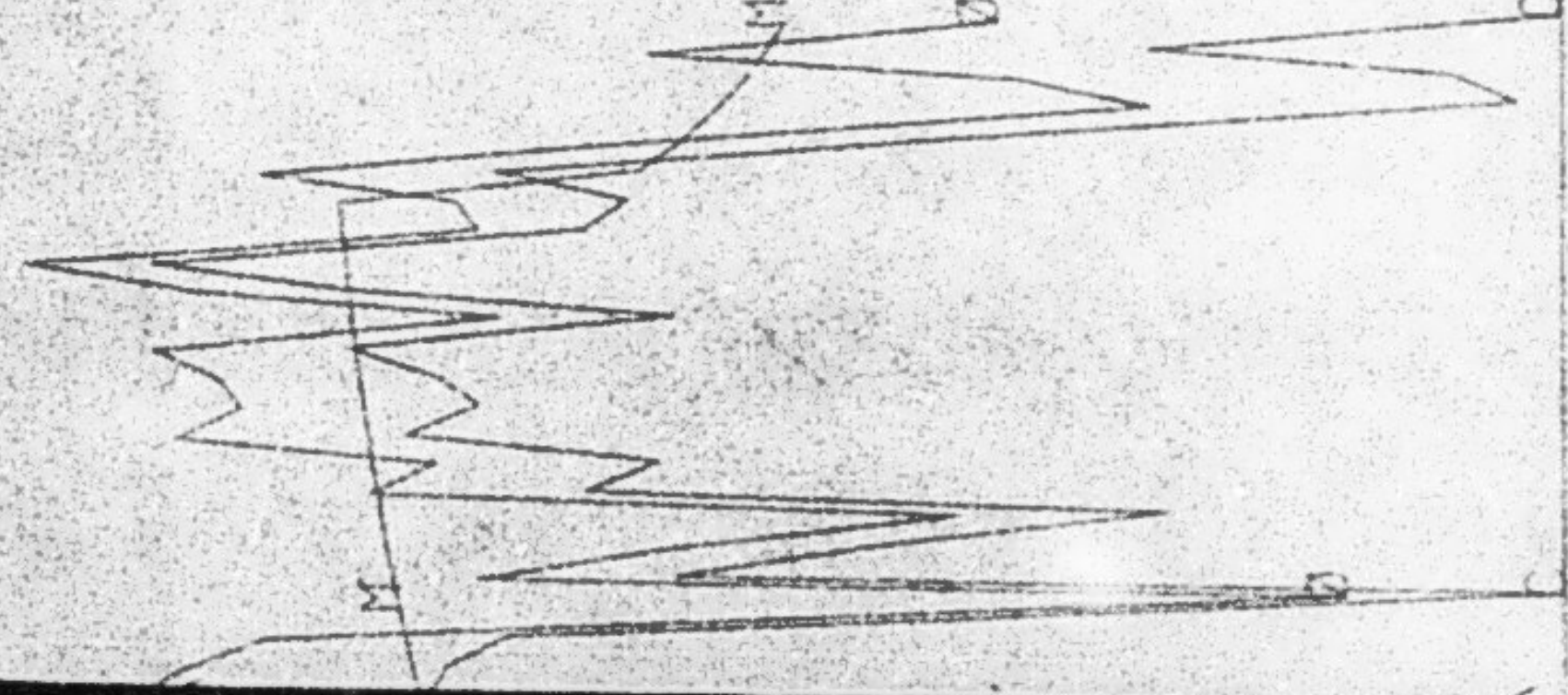
5.22



P1 MAILLE 445

PIEZ0 7632 P2 MAILLE 446

2.77



6

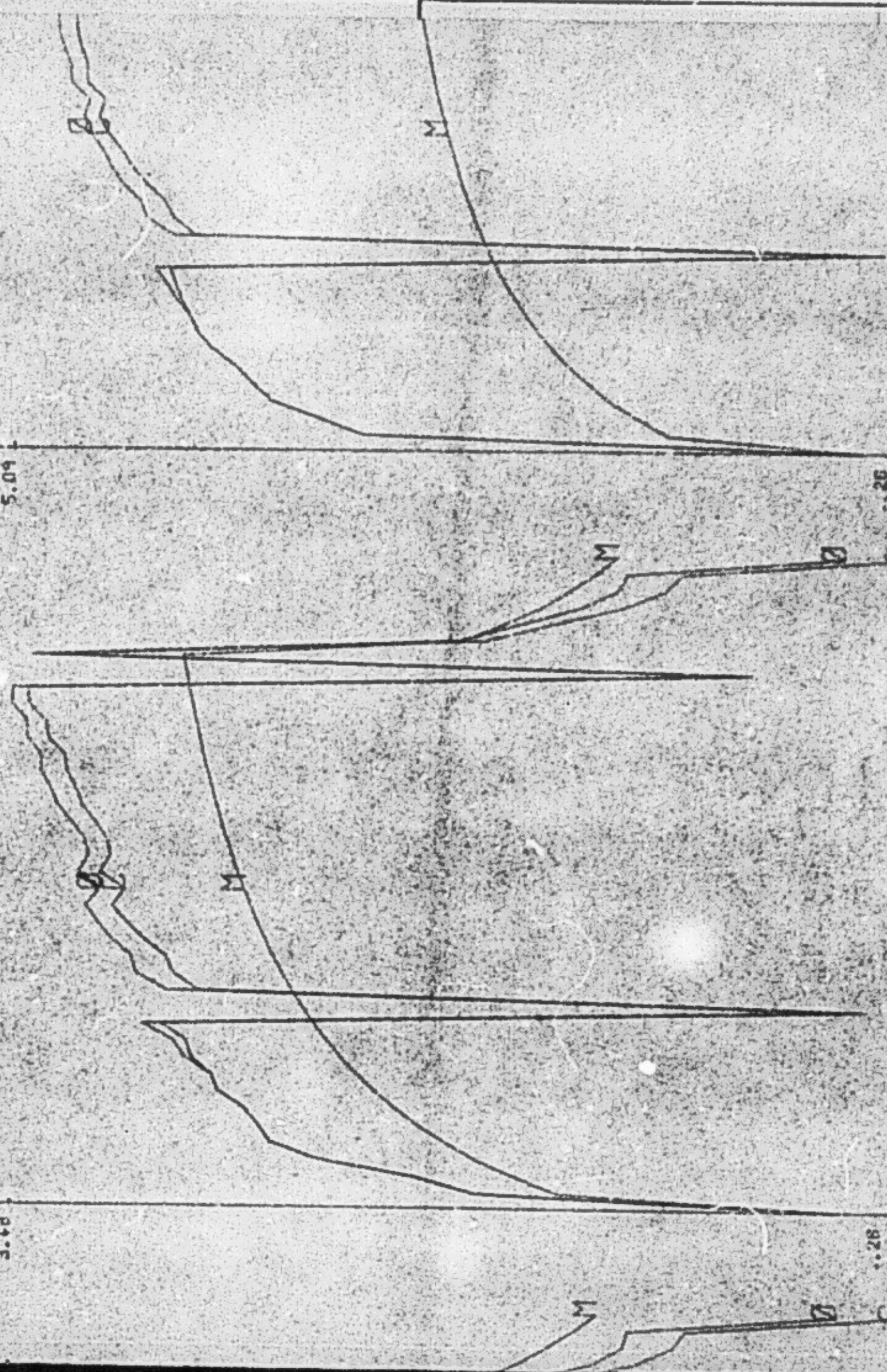
6

PIEZØ 7633 M3 MAILLE 446

PIEZØ 7383 F2 MA

3.68

5.09



1.12

1.26

1.95

PIEZØ 7329 G6 MAILLE 1

1.12

1.26

1.95

PIEZØ 7375 P1 MF

1.12

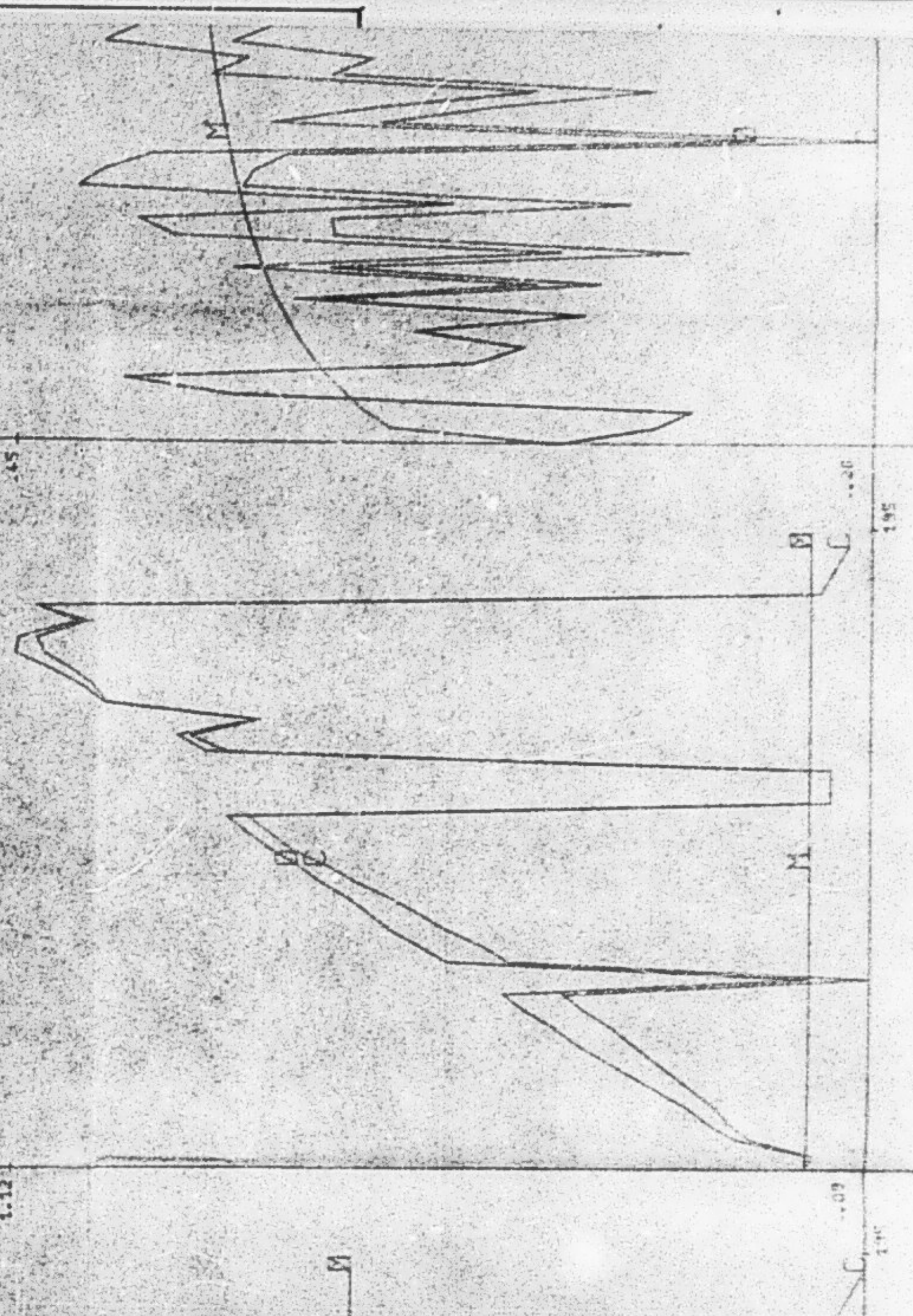
1.26

1.95

1.12

1.26

1.95



1.12

1.26

1.95

1.12

1.26

1.95

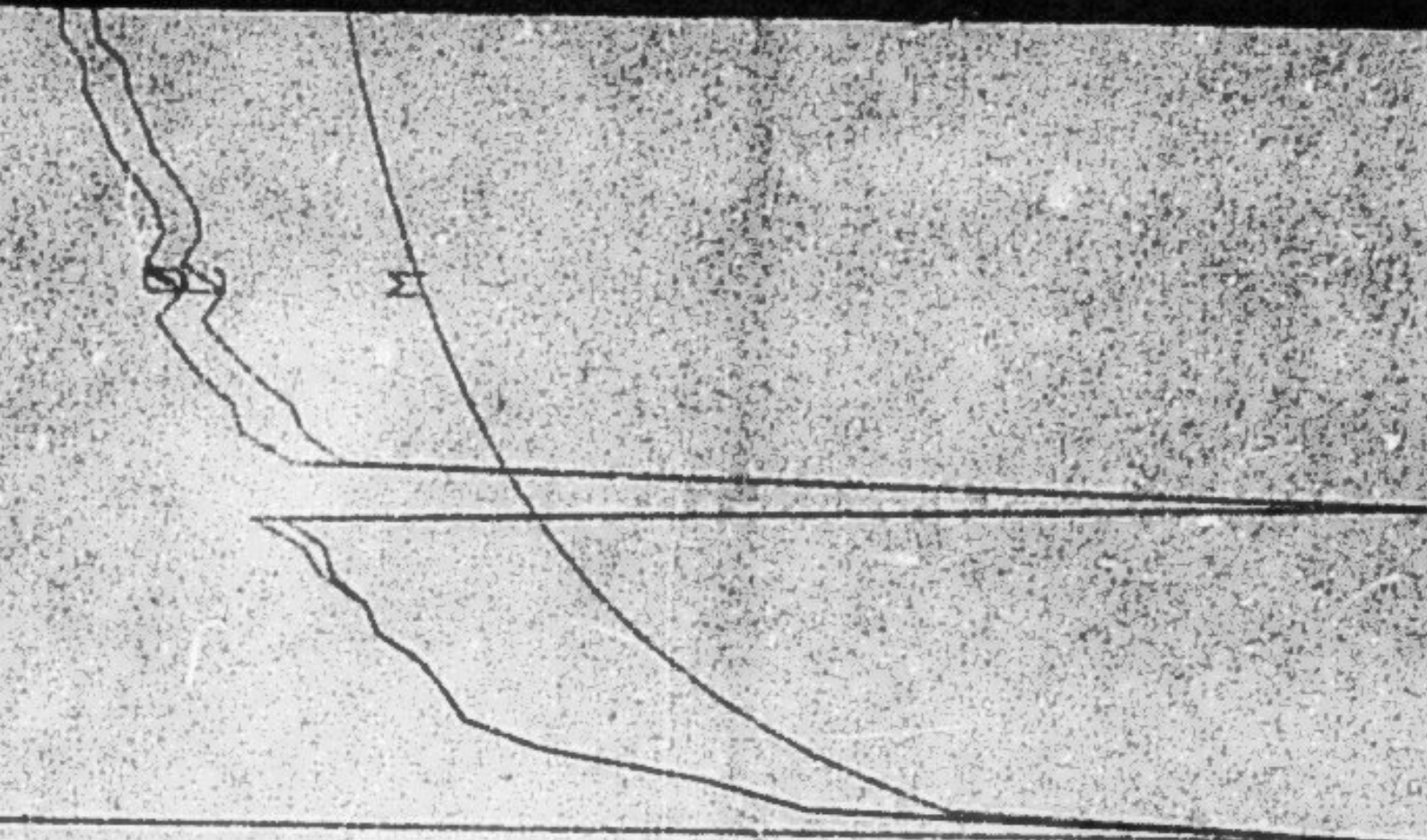
PIEZØ 7633 P3 MAILLE 446

3.30

3.48



PIEZØ 7633 M3 MAIL

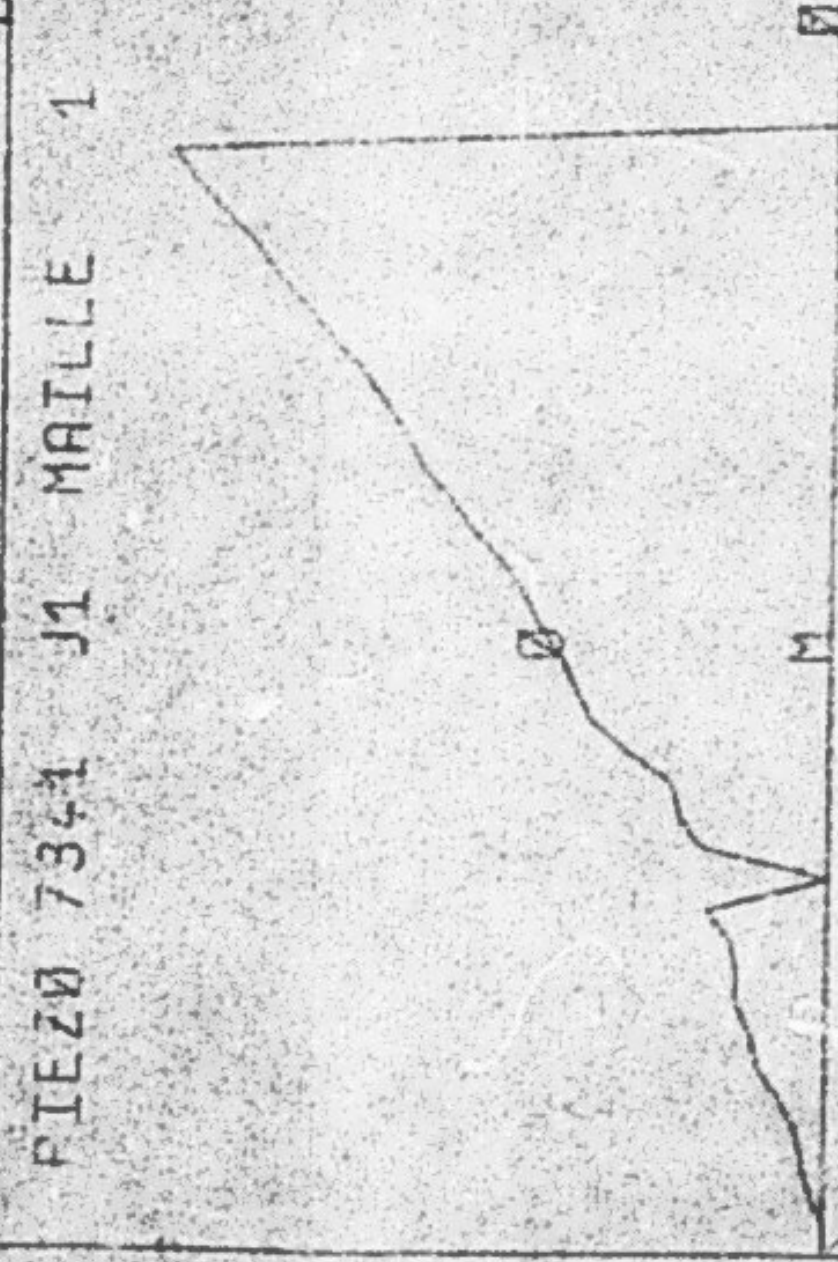


PIEZØ 7341 J1 MAILLE 1

26

195

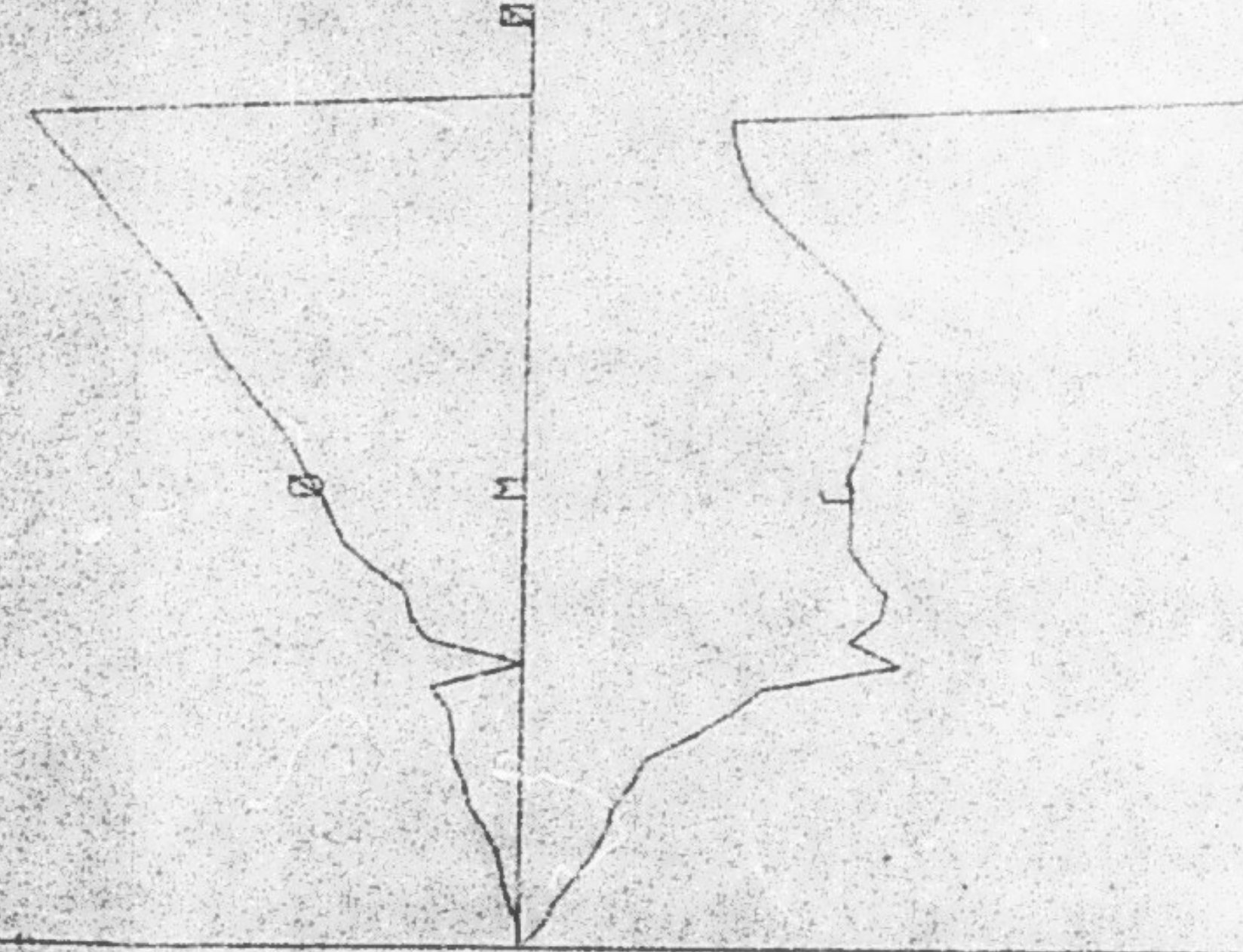
2.25



PIEZØ 7329 G6 MAIL

82

1.12



1.15

0.04

1.15

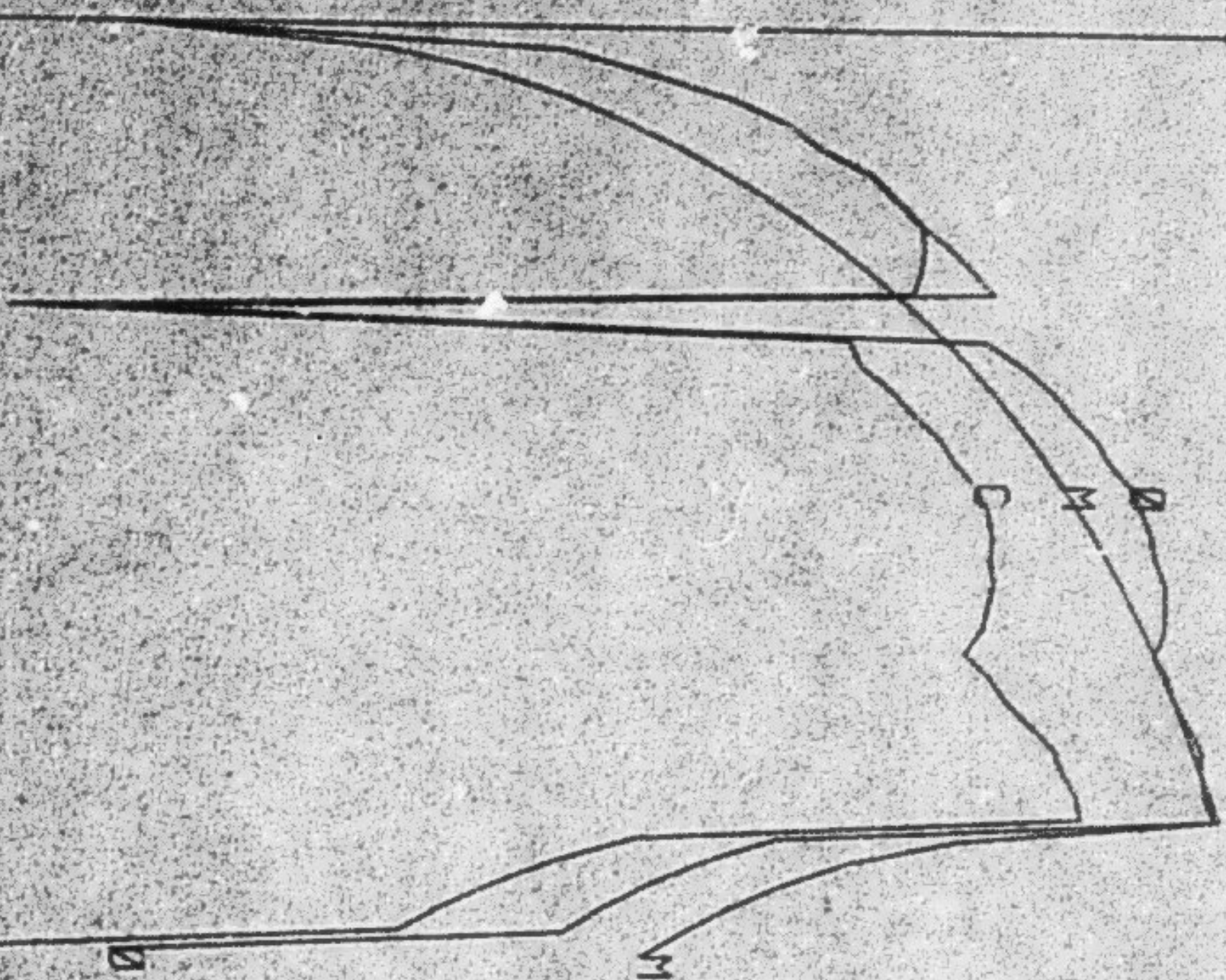
1.15

(1.3)

PIEZ0 7137 A3 MAILLE 137

3.18

1.80

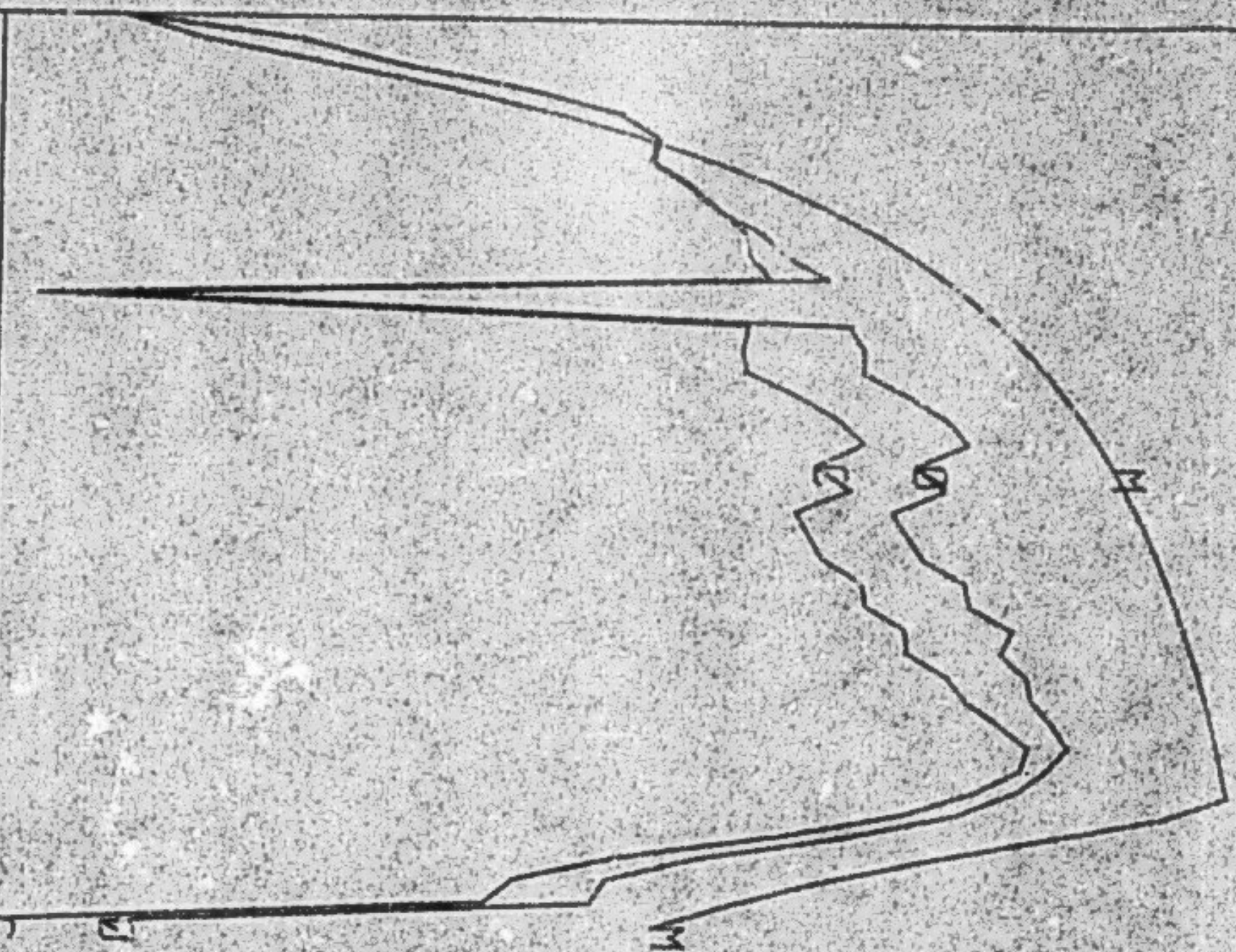


PIEZ0 7632 S2 MAILLE 192

2.15

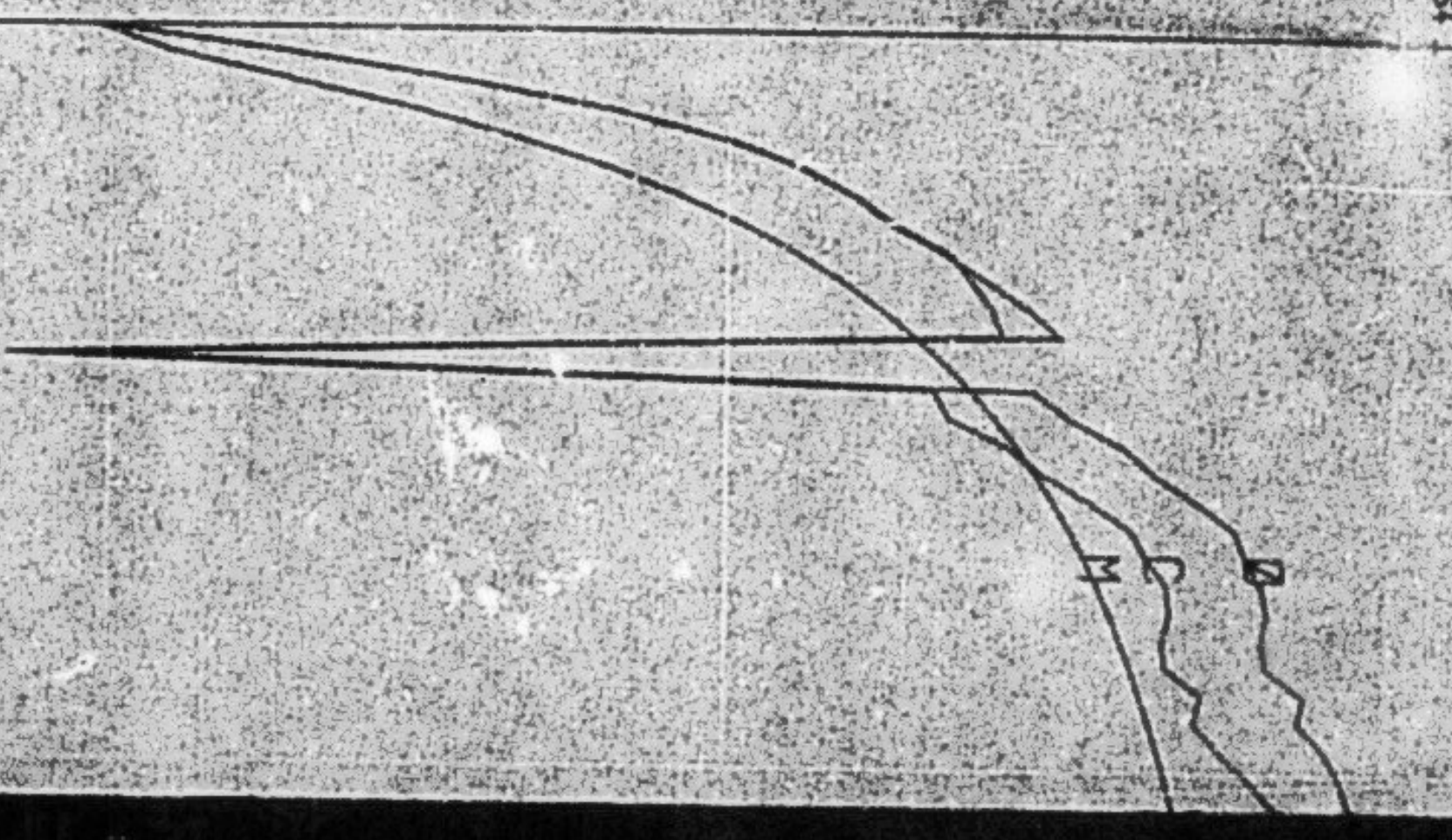
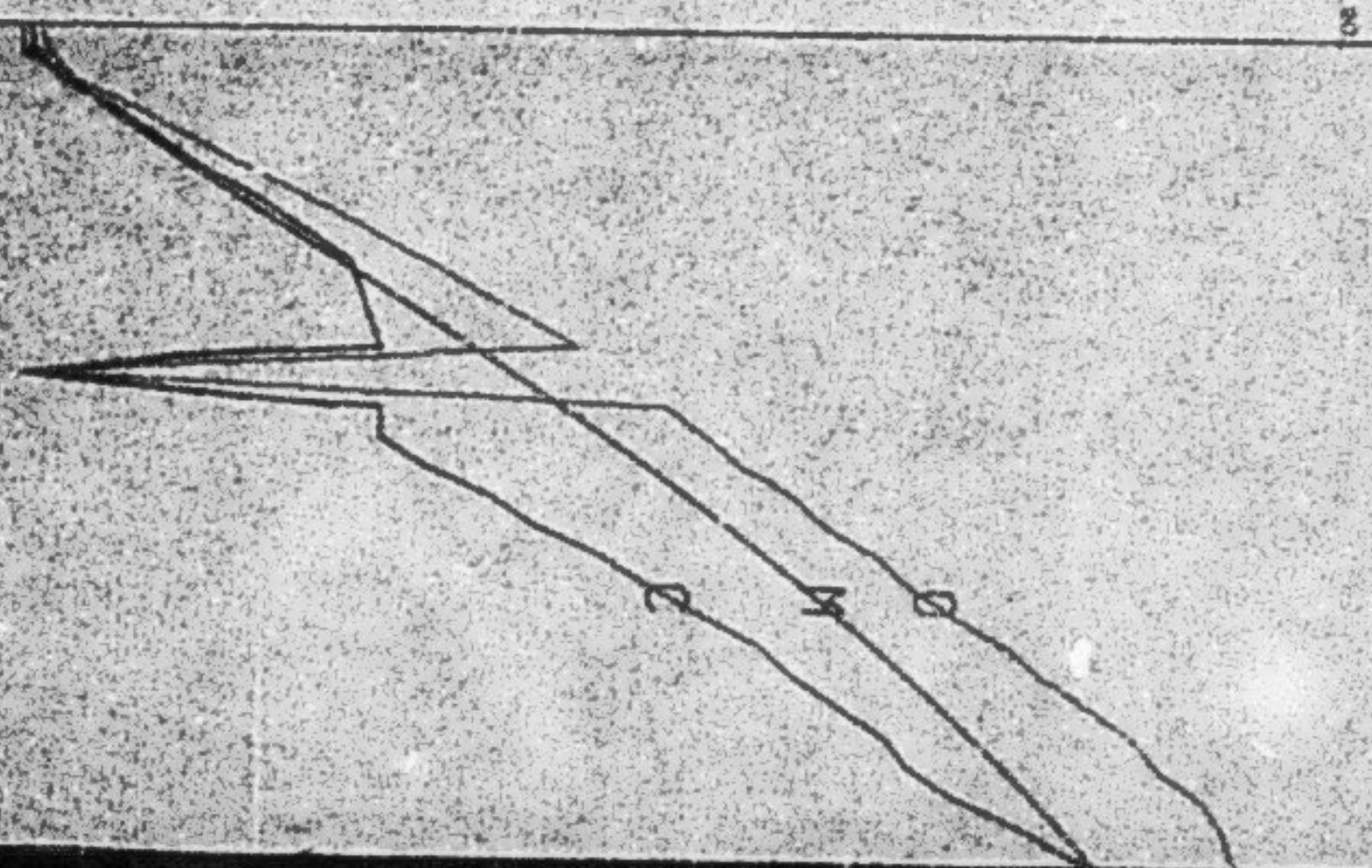
1.95

2.54



PIEZ0 7633 S3 MAILLE 192

PIEZ0 7055 B4 MAILLE 137



2.22

1.95

2.22

5 B4 MAILLE 120

1.10

PIEZ0 7275 B2 MAILLE 234

.82

PIE

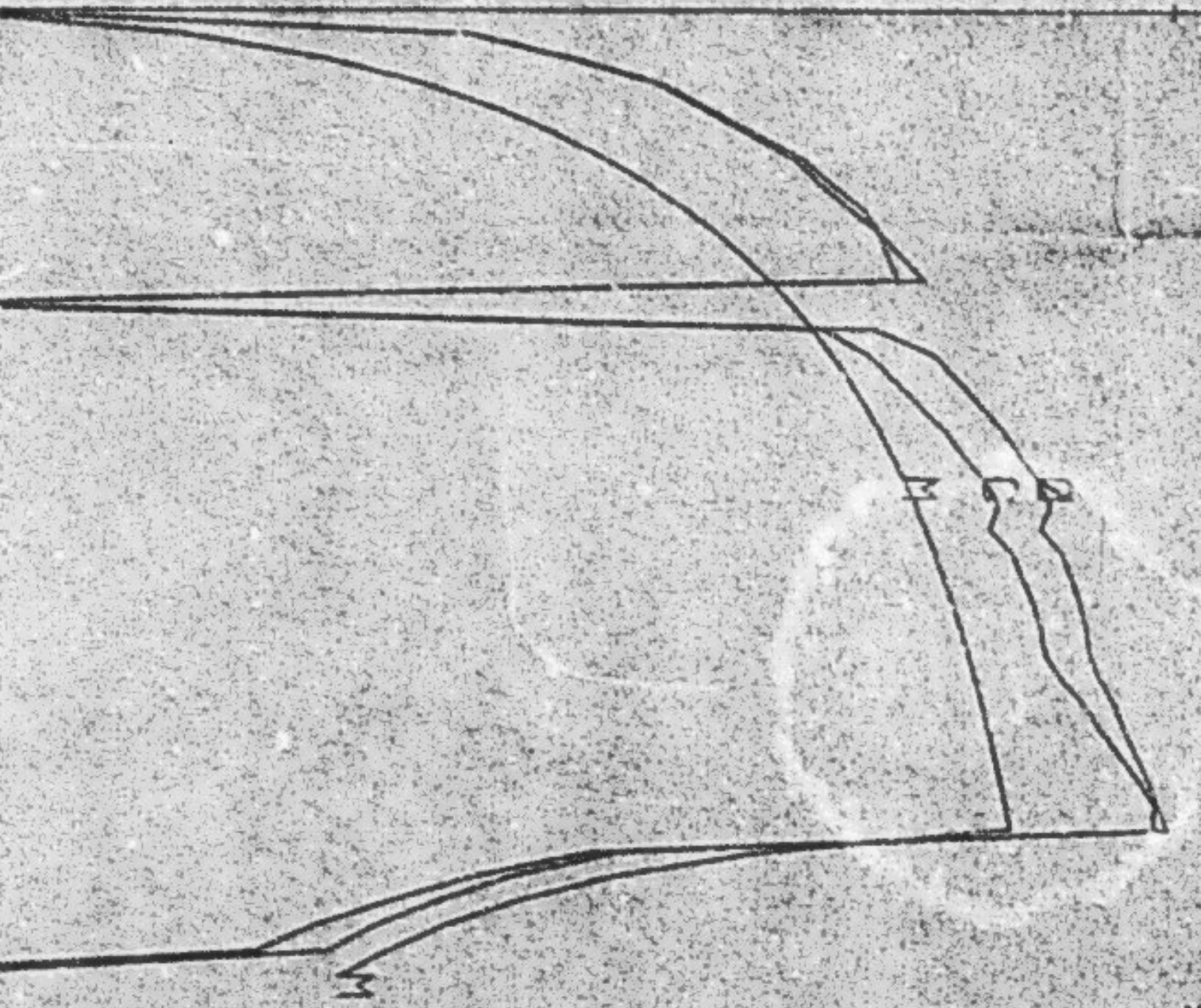
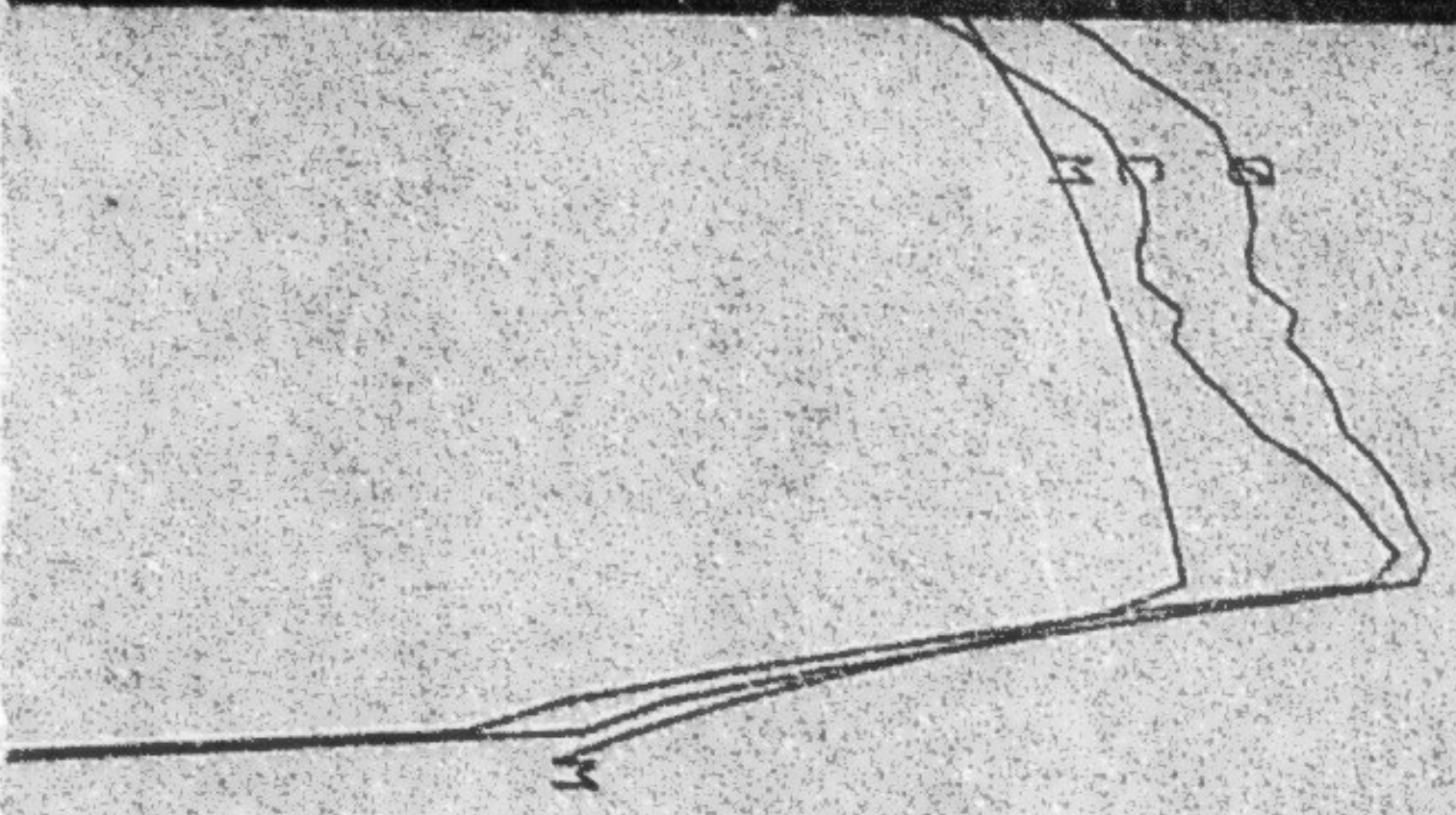
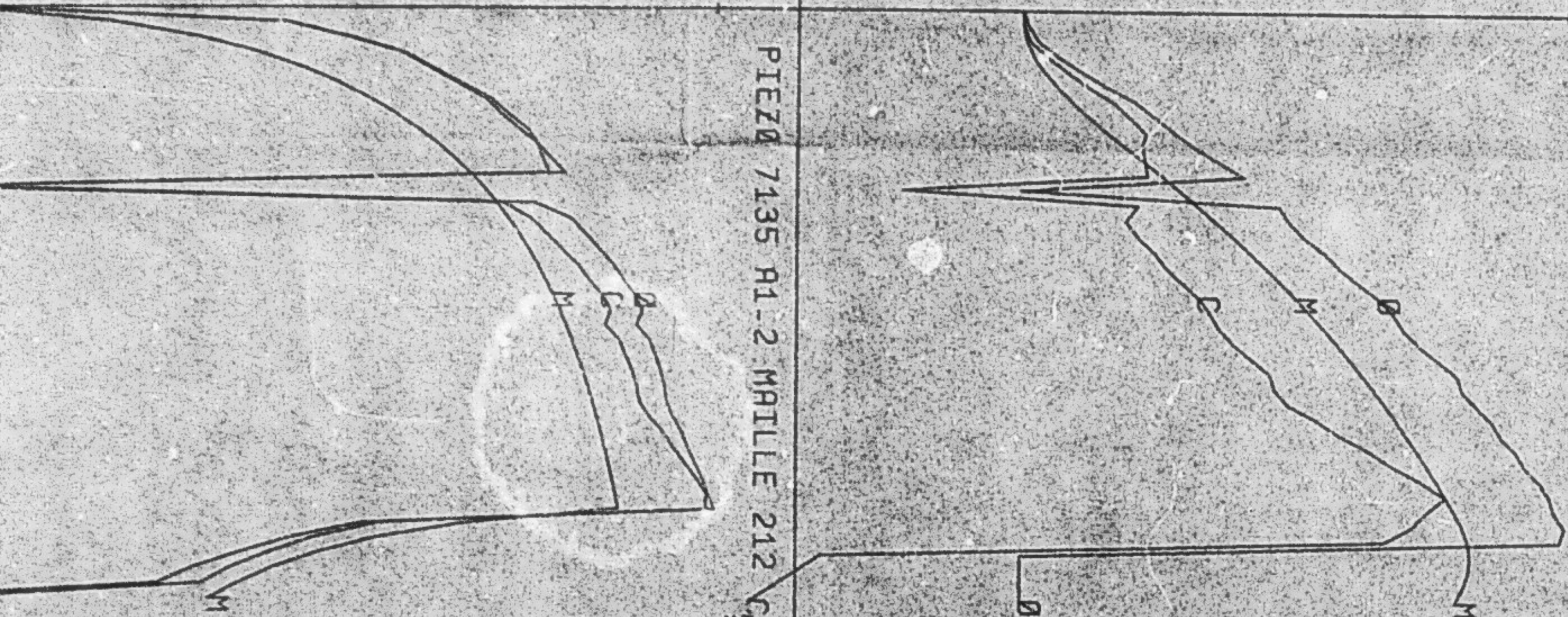
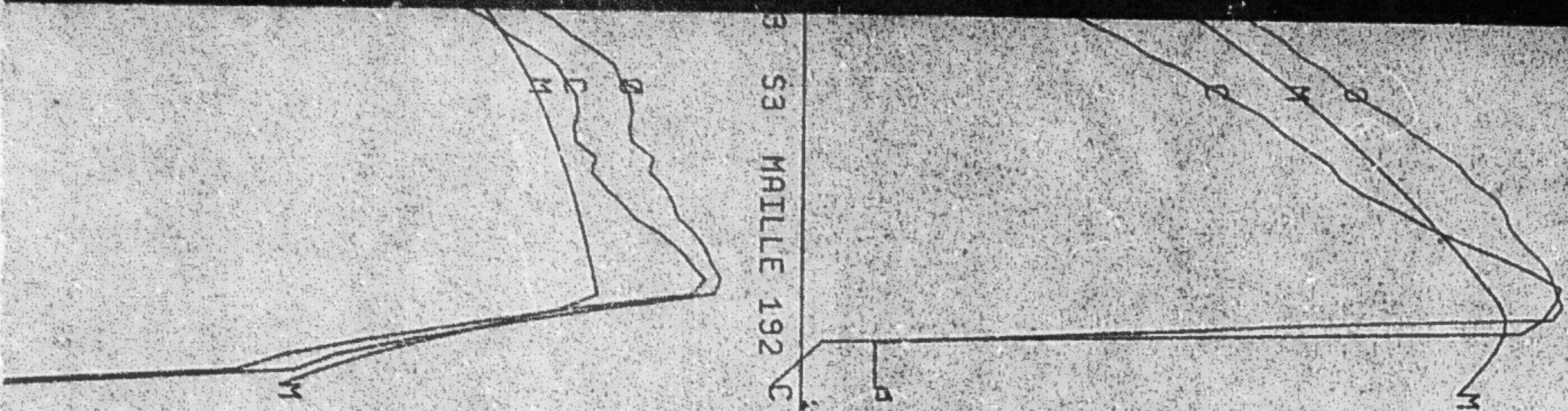
3 S3 MAILLE 192 C -.55

9.03

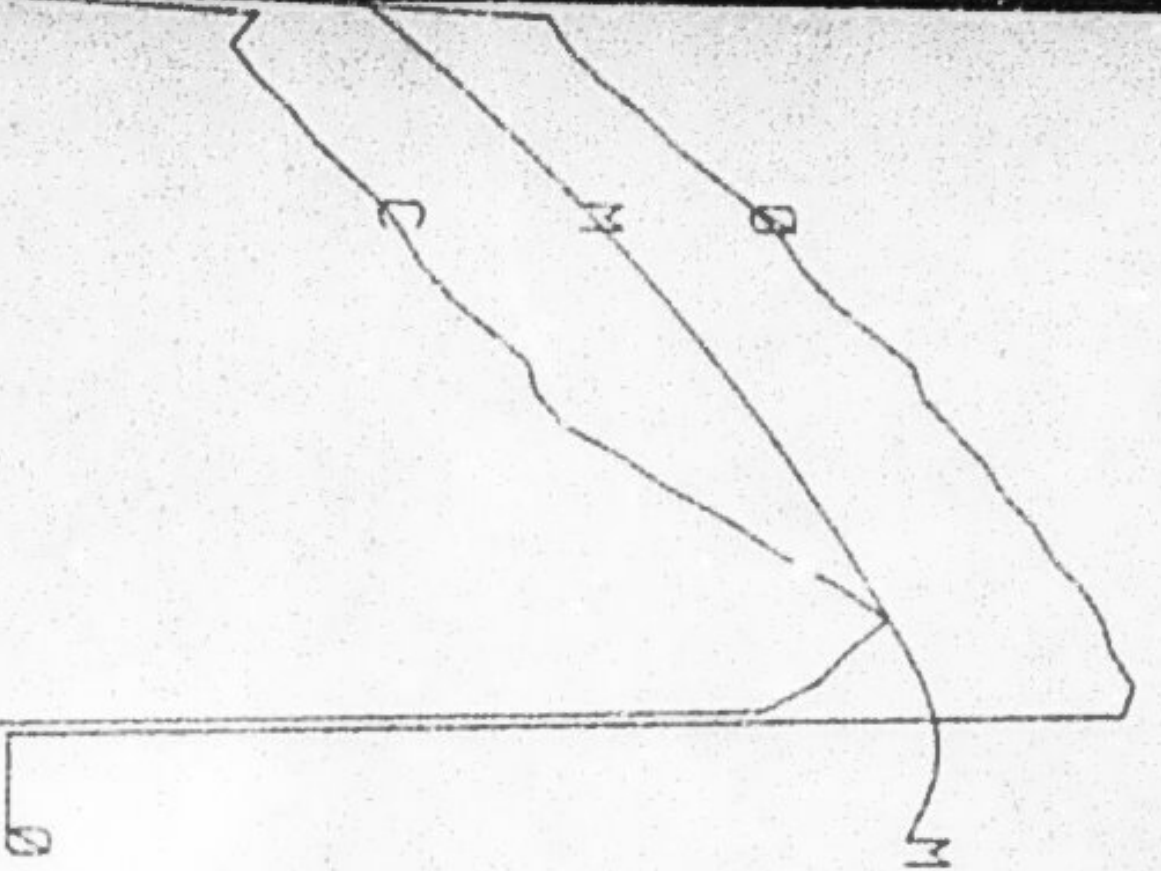
PIEZ0 7135 A1-2 MAILLE 212 C -.88

1.05 4.57

PIE

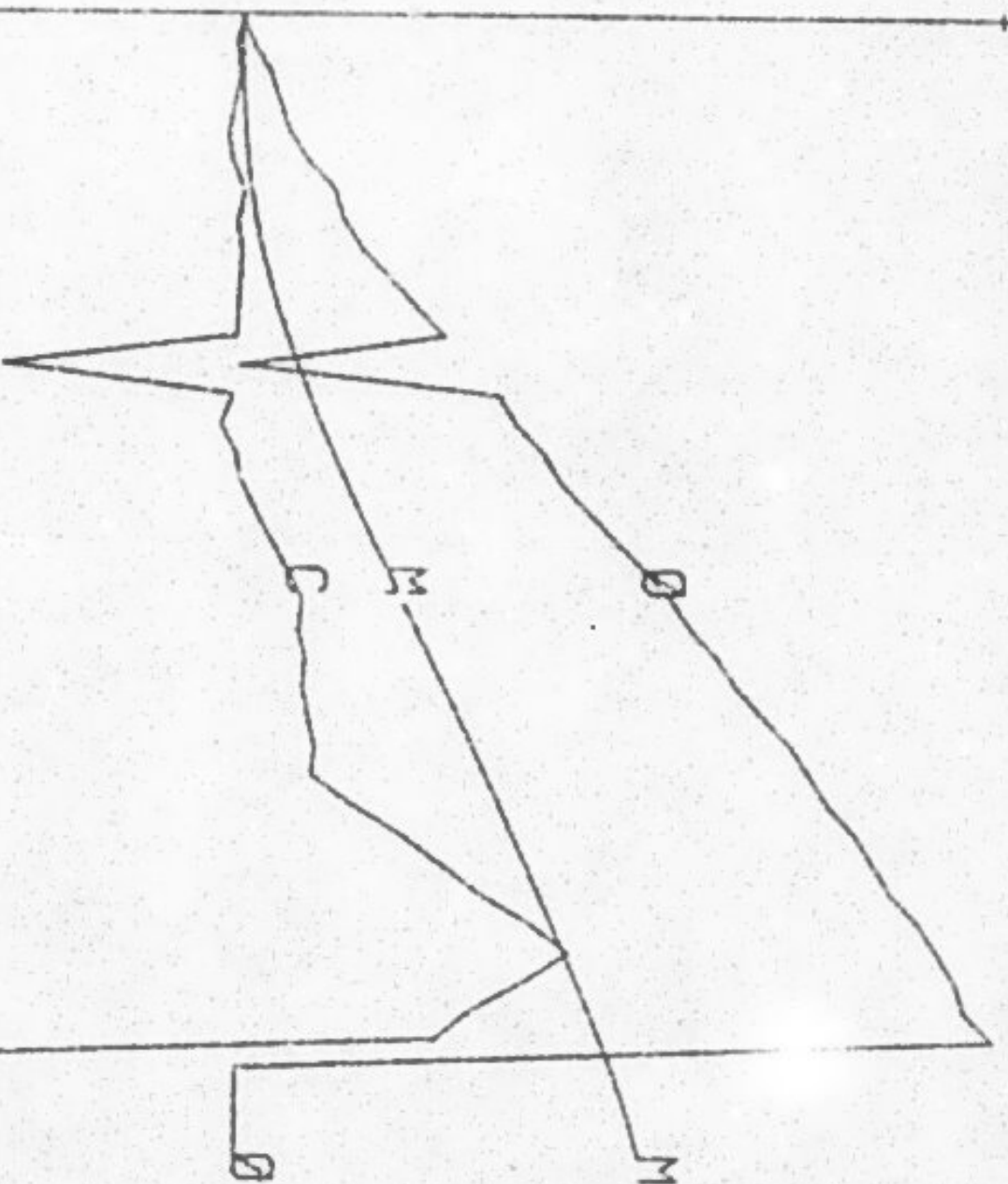


275 B2 MAILLE 234



.82

PIEZ0 7276 C1 MAILLE 218



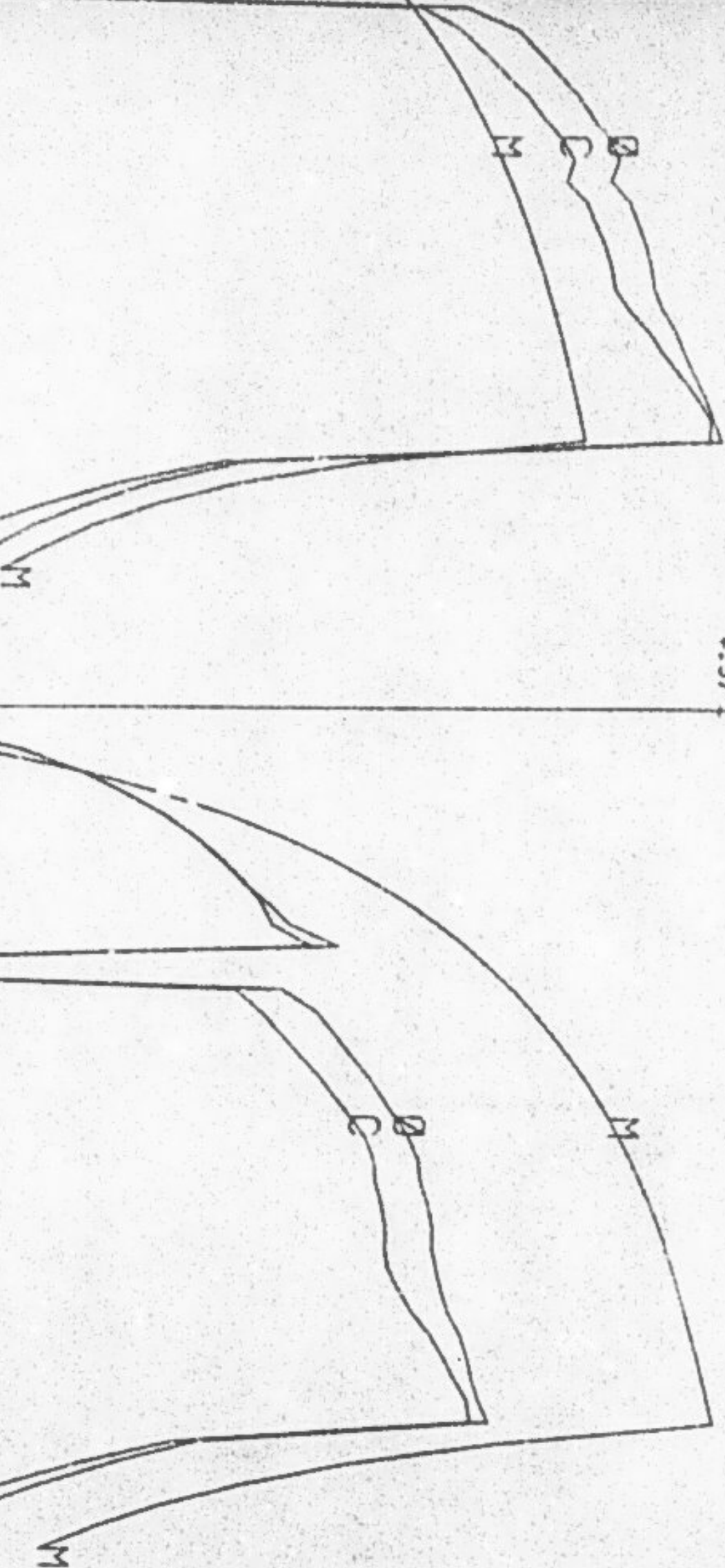
35 A1-2 MAILLE 212

C₁ --.88
195 4.57



PIEZ0 7134 A2TE MAILLE 174

C₁ 195



195 --.22

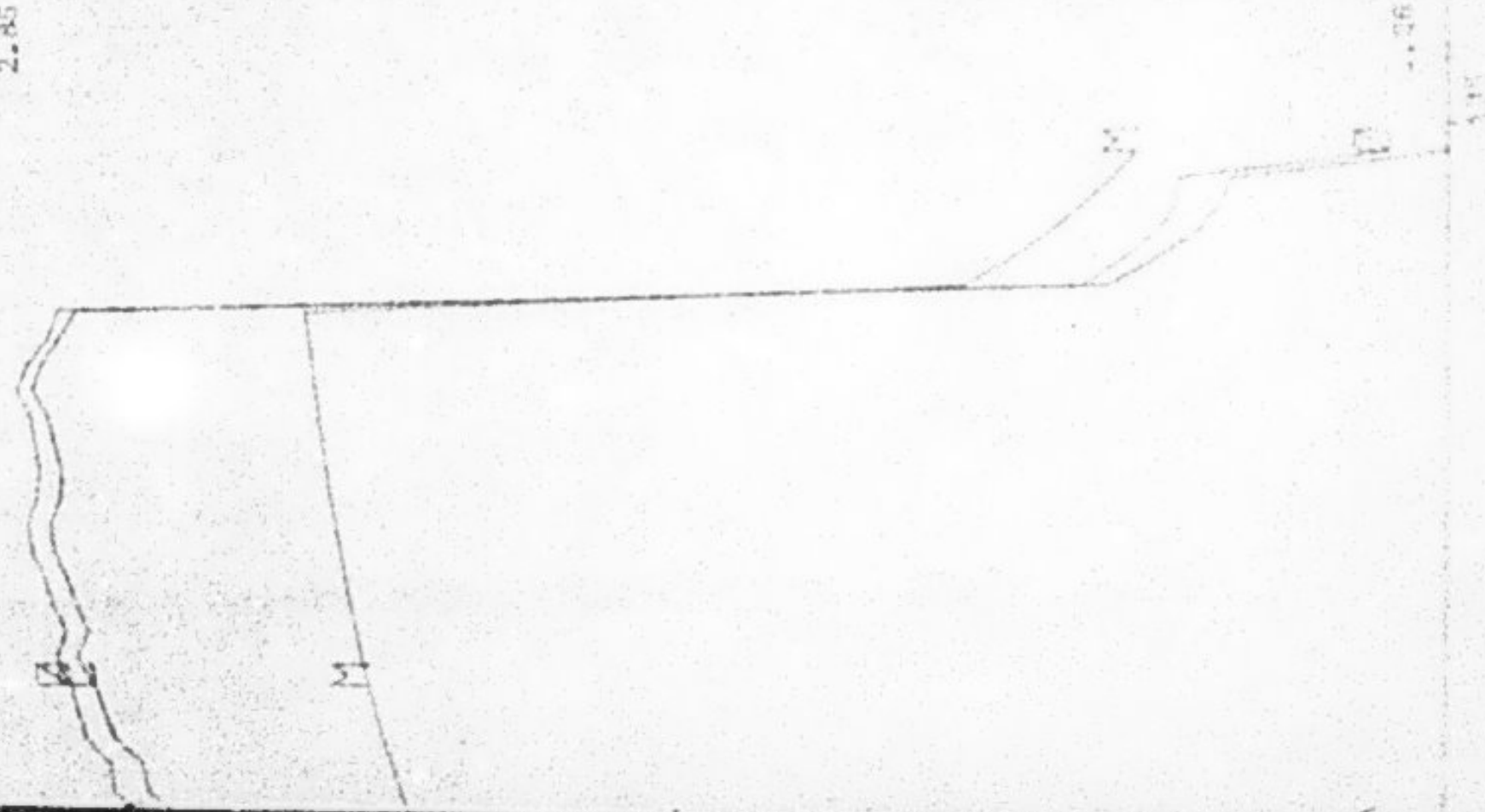
195

AJUSTEMENT DES RABATTEMENTS

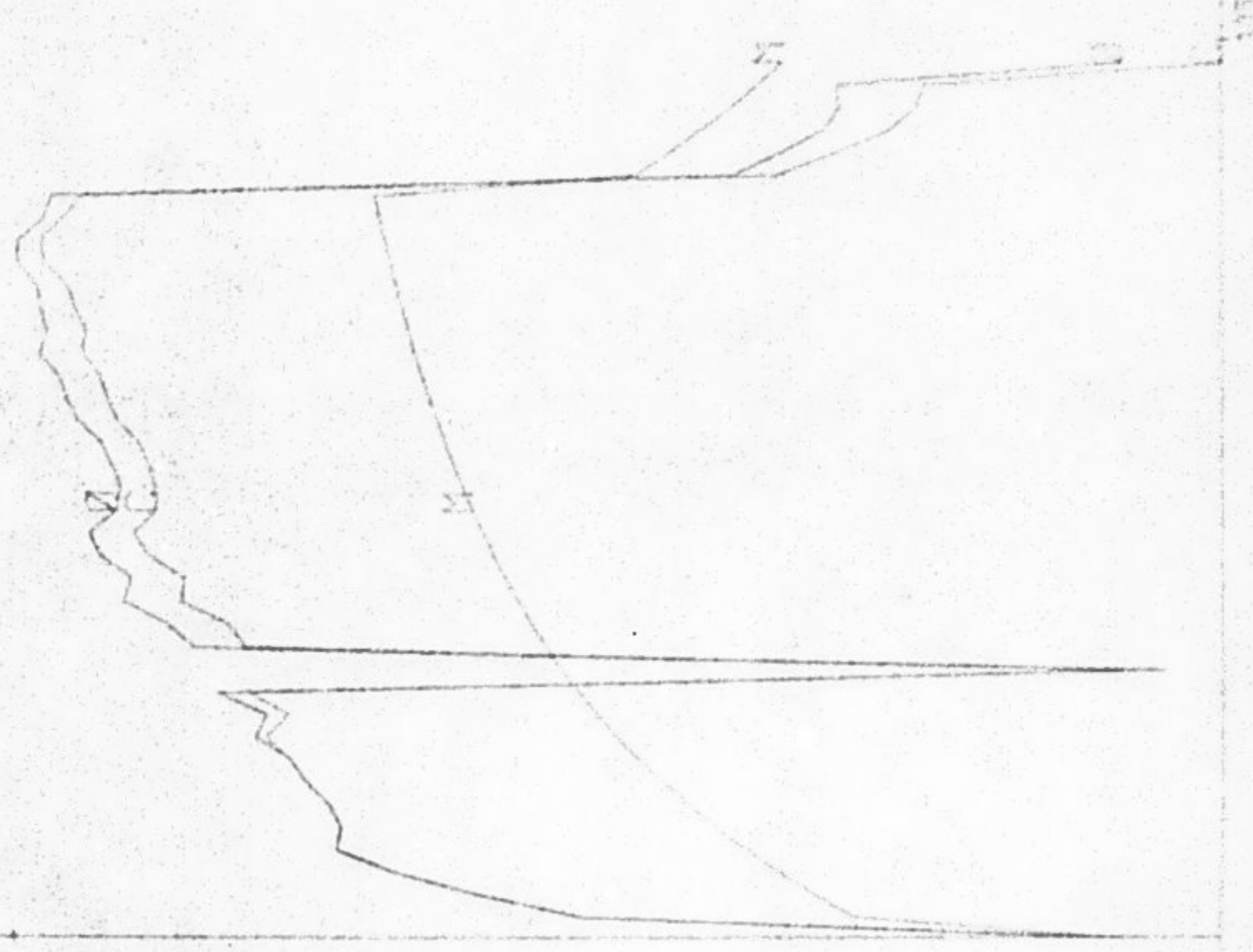
O = Courbe observée
M = Courbe calculée par le modèle SNOHE
C = Courbe corrigée par déconvolution

7 F10 MAILLE 439

2.85



PIEZO 7136 A2BI MAILLE 435

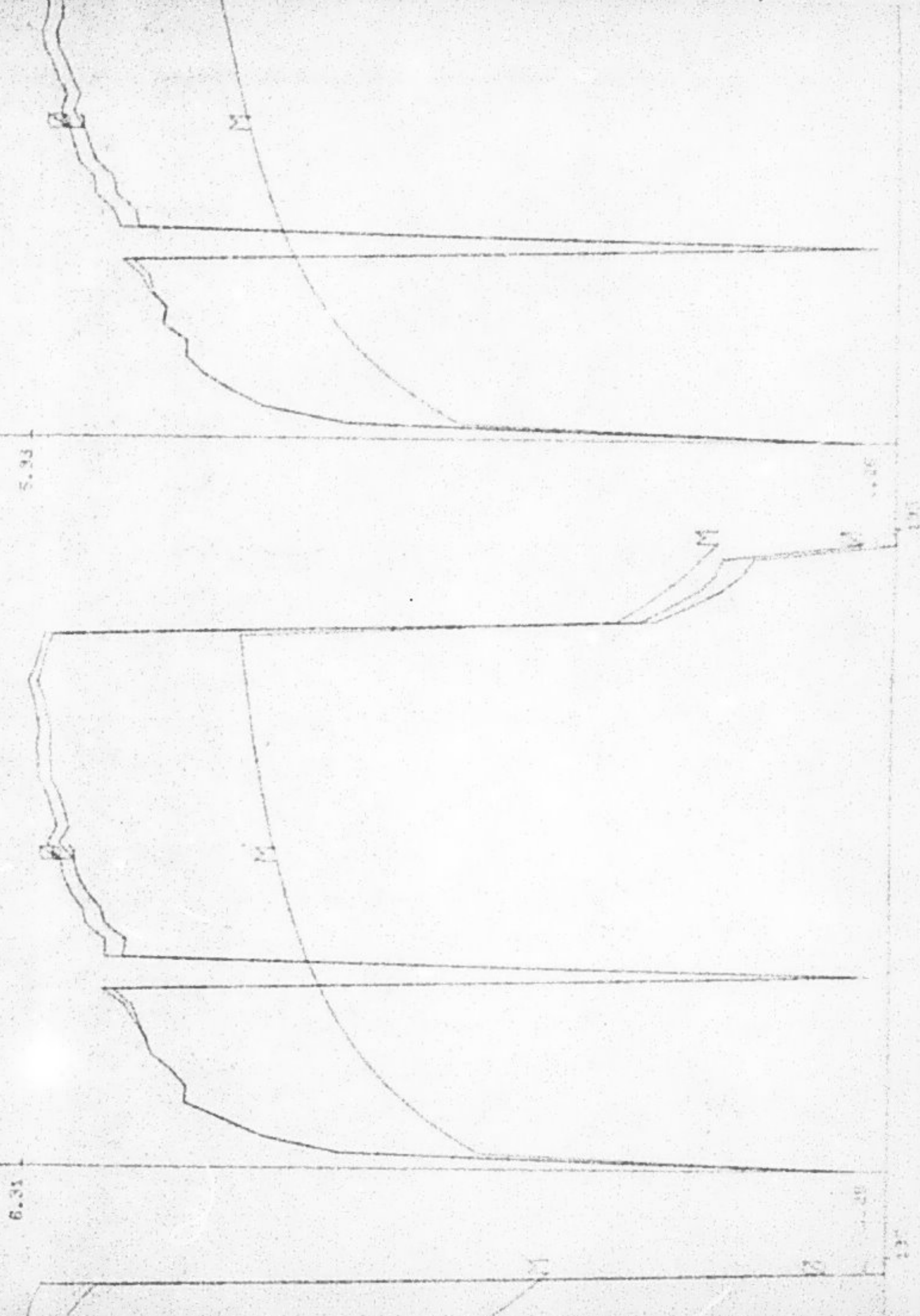


PIEZO 7389 F8 MATILE 439

PIEZO 7397 F10 MGI

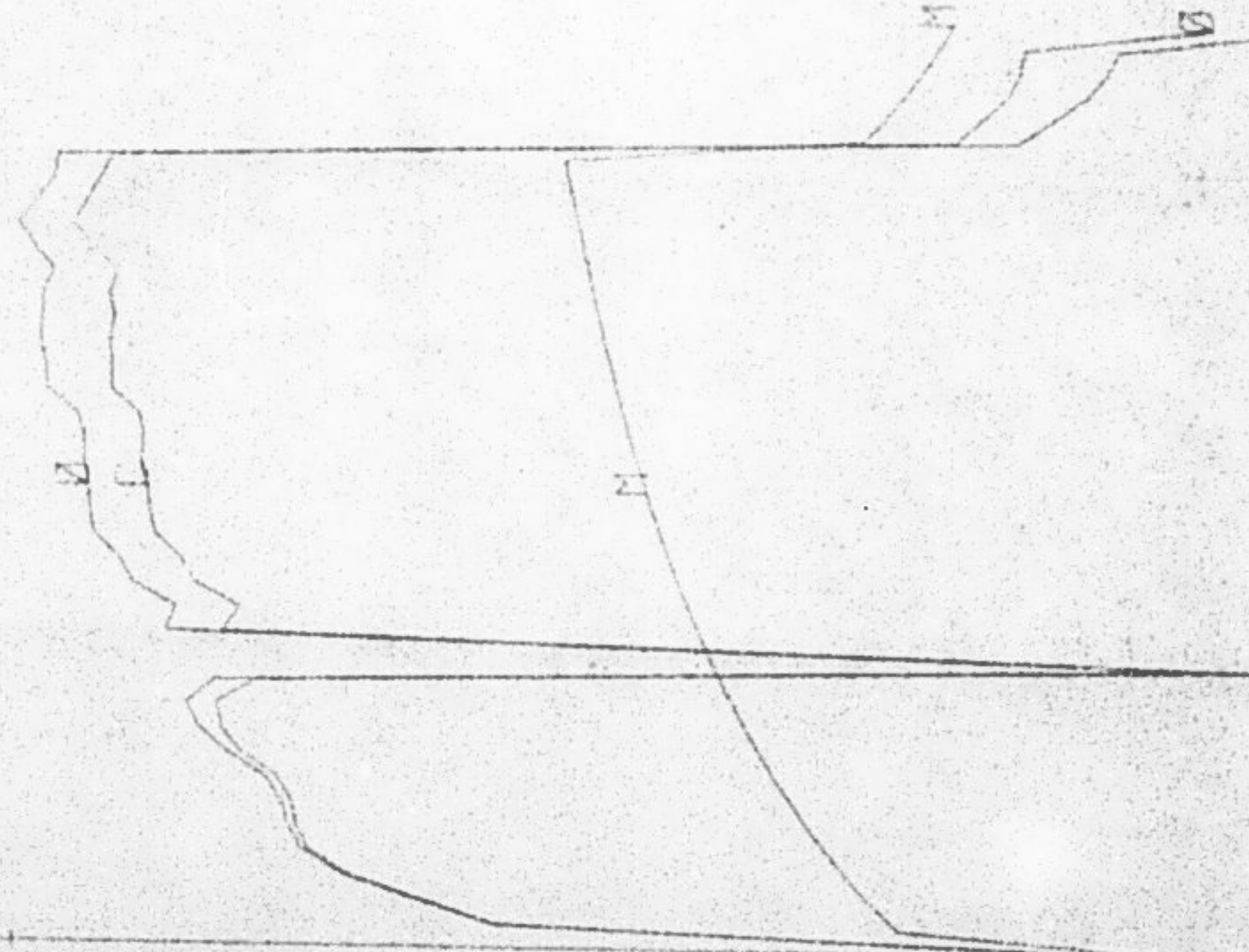
5.93

6.31



PIEZØ 7138 93BI MAILLE 436

5.15

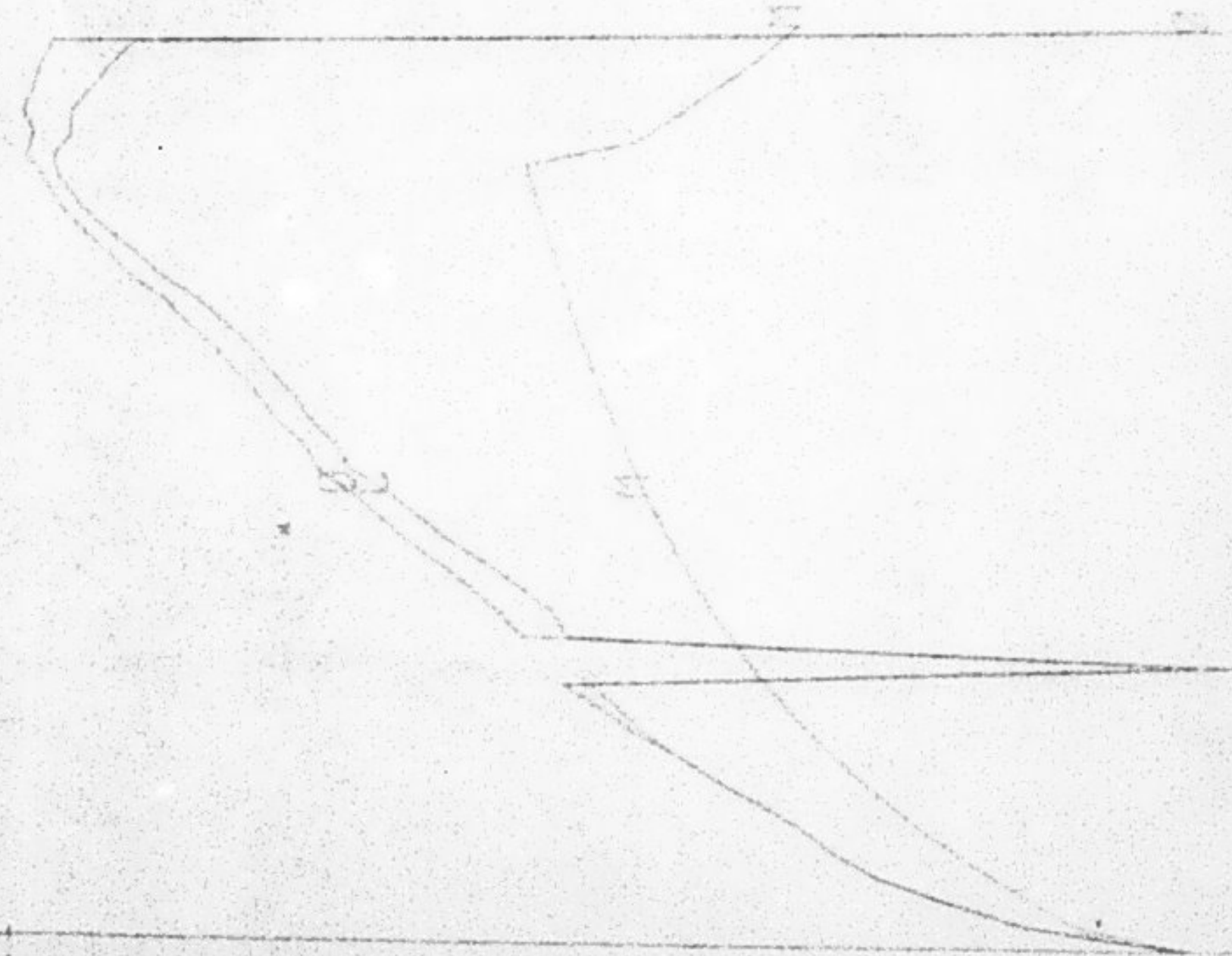


PIEZØ 7387 F6 MAILLE 447

1.35

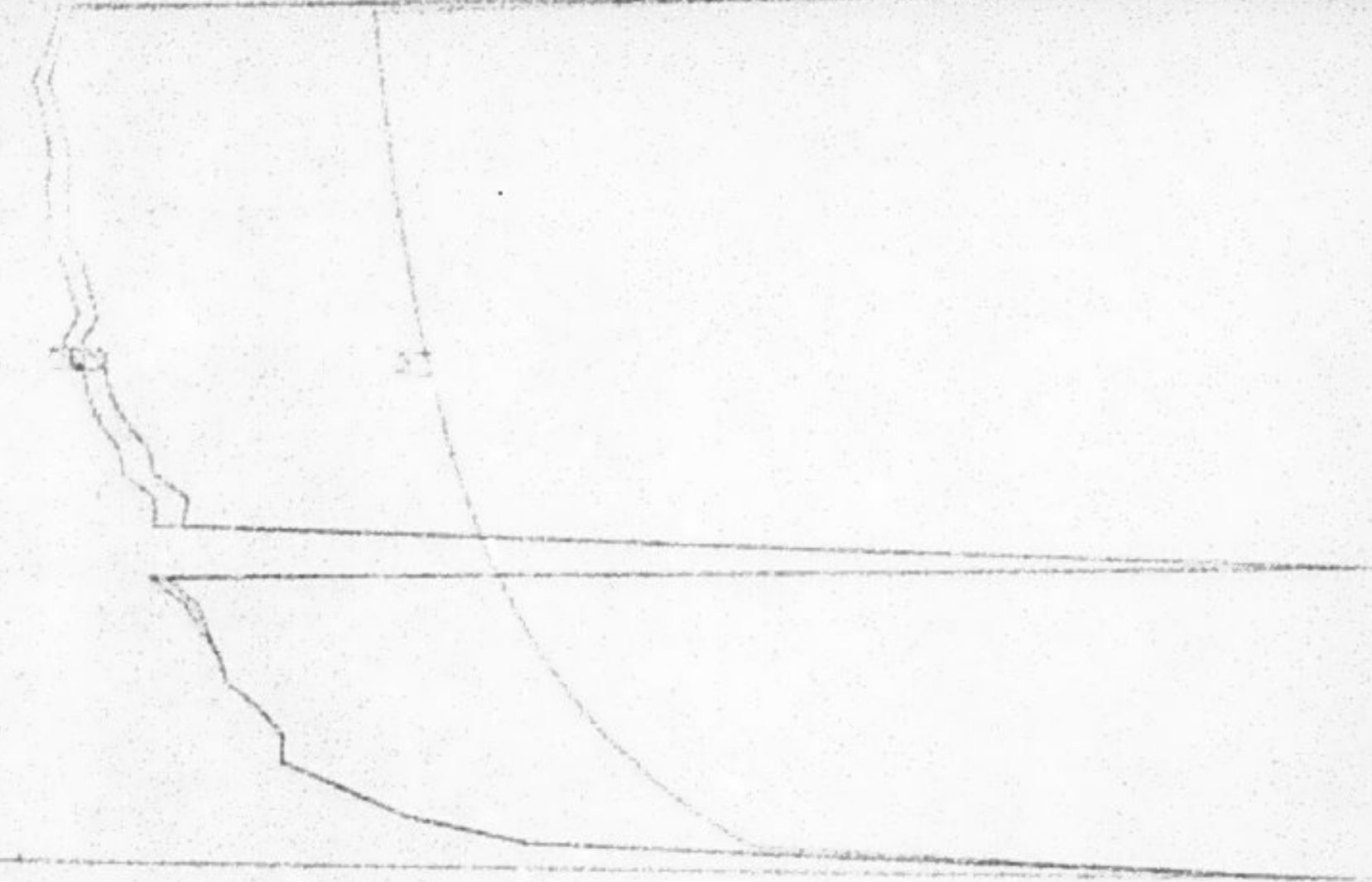
5.15

6.31



PIEZØ 7389 F8 MAILLE 4

6.31



COLLECTEUR COTIER DE NIFZA

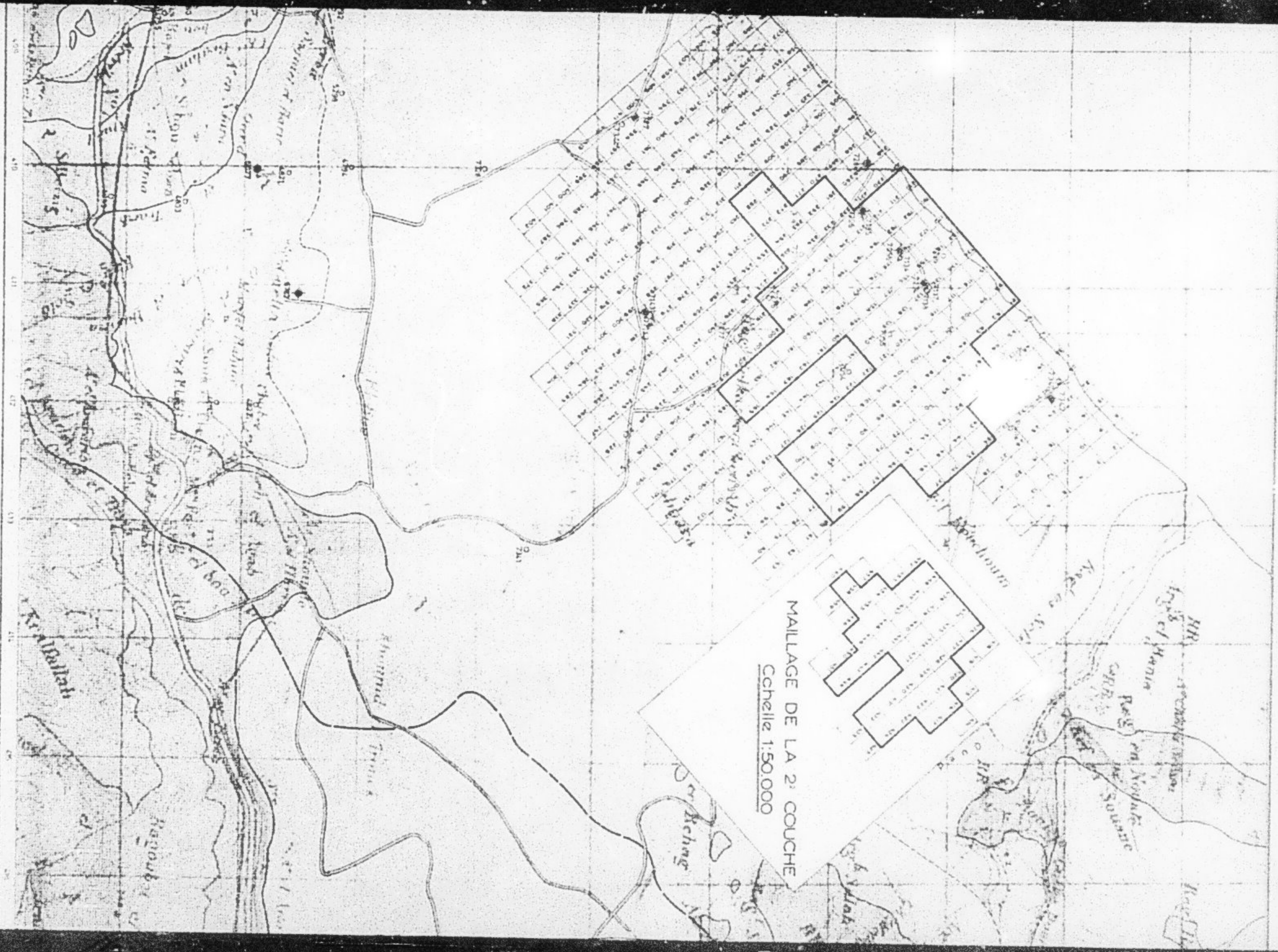
MAILLAGE DU SOUS MODELE POUR CALER LE COMPORTEMENT DU COLLECTEUR PILOTE

0 250 500

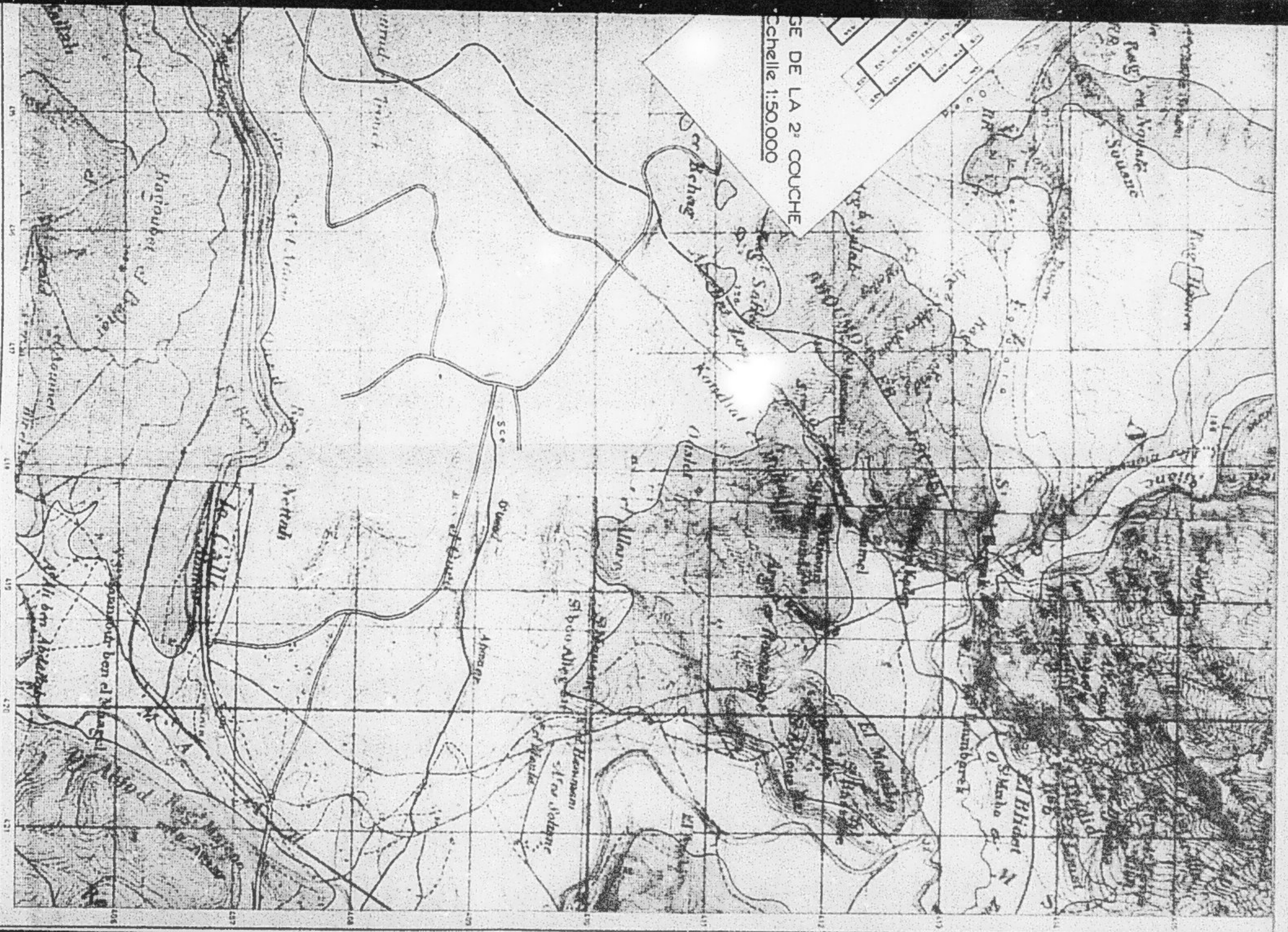
LEGEHDE

-  Substratum indifférencié
 -  Alluvions
 -  Sables dunaires
 -  Forage et son numéro B.H.H.
 -  Piézomètre et son numéro B.H.H.
 -  Ligne du partage des eaux superficielles
- Mailage : 1075 x 1075 m pour la 1^{re} couche
: 375 x 375 m pour la deuxième





GE DE LA 2^e COUCHE
Echelle 1:50.000



FIN

70

VUES