



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.**M. QUIVY et B. TOCQUET.****Attachés aux Services Techniques de l'Armement
Laboratoire de Détection Sous-Marine LE BRUSC**

RESUME

L'étude théorique des transducteurs piézoélectriques utilisés en acoustique sous-marine, basée sur les analogies électro-mécaniques, conduit à optimaliser certains éléments constituant le transducteur. L'obtention de larges bandes passantes, en particulier pour l'émission, est améliorée théoriquement en tenant compte des vibrations de flexion du pavillon. Un certain nombre d'applications ont montré l'intérêt de ce processus, qui permet de conserver un bon niveau d'émission.

SUMMARY

The theoretical treatment of piezoelectric transducers used in underwater acoustics by calculation based on electromechanical analogies have led to an optimization of several transducer components. The design of large bandwidths especially for transmission, is achieved in theory by taking into account the head flexure. Quite a number of applications have shown the interest of this treatment which is apt to maintain an adequate transmission level.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

1) - POSITION DU PROBLEME :

1.1 - Le transducteur :

Les transducteurs de puissance (fig. 1) comprennent en général un élément moteur composé d'un empilement de céramiques piézoélectriques dont l'élasticité totale e et la masse sont bien définies par les propriétés physiques de la matière. Le moteur communique une force vibratoire F aux parties actives du transducteur qui sont essentiellement à l'avant le "pavillon" de masse m_1 et à l'arrière la "contremasse" (masse m_2). Notons que le terme "pavillon" provient de l'analogie avec l'acoustique aérienne mais il s'agit en l'occurrence d'une pièce métallique massive. Un certain nombre d'autres pièces complètent ce dispositif, mais notre exposé ne nous permet pas d'entrer dans ces détails d'ordre technologique.

1.2 - La notion de largeur de bande :

Les performances d'un transducteur sont liées à la fréquence propre f_0 de résonance mécanique, puisque ce phénomène permet d'amplifier notamment les amplitudes émises. A la fréquence f_0 , le rendement électroacoustique peut ainsi atteindre plus de 85 %.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

Mais comme pour tout système résonnant, de part et d'autre de f_0 , on obtient une diminution très rapide des qualités. Il y a donc lieu de définir la bande de fréquences où les performances demeurent suffisamment valables pour l'utilisateur. D'une manière générale, on se réfère à la valeur maximale de la réponse à l'émission S_v à la fréquence f_0 et on tolère une diminution relative de 3 décibels par rapport à la valeur considérée. En pratique, les différentes caractéristiques telles que niveau d'émission, sensibilité à la réception, rendement, coïncident quant à leur largeur de bande à 3 décibels. Comme pour les circuits électriques, cette bande passante est inversement proportionnelle au coefficient de qualité (ou coefficient de surtension) Q_m , puisque comme nous le préciserons, nous assimilons la structure mécanique interne du transducteur à un circuit électrique en procédant par analogie. [1] .

1.3 - Facteur de qualité et élargissement de la bande passante :

Nous donnerons plus loin l'expression du facteur de qualité Q_m en fonction des paramètres du transducteur, mais d'orès et déjà on peut rappeler le résultat bien connu qui consiste à choisir la valeur de la masse m_1 très petite vis-à-vis de m_2 .

En pratique, on utilise donc un alliage léger d'un côté et un alliage lourd de l'autre.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

1.4 - Limitation :

Il semble qu'on ait pratiquement optimisé les matériaux avec d'une part un alliage de masse volumique égale à 1,7 et d'autre part un alliage de masse volumique voisine de 17,6. Quant au rapport des masses obtenues, on ne peut, généralement pour des questions pratiques, dépasser le rapport de 5. Le facteur de qualité ainsi obtenu ne peut être abaissé au delà de 2.

Il faut donc avoir recours à un autre principe pour pouvoir abaisser la valeur de Q_m ; un moyen consiste à utiliser les vibrations de flexion du pavillon.

2) - VIBRATIONS EN FLEXION DU PAVILLON ET CONSEQUENCES:

2.1 - Résistance de rayonnement :

Dans la plupart des transducteurs, on calcule le pavillon de façon que sa fréquence propre de flexion se situe largement au-dessus de la fréquence f_0 . En effet, si tous les points de la face radiante vibrent avec la même amplitude et la même phase (vibration "en piston"), la résistance de rayonnement r_2 (constante pour une fréquence donnée) est définie par la relation :

$$r_2 = \rho c S (1 + \tau) \quad (1)$$



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

où :

- ρc est l'impédance acoustique spécifique du milieu ambiant.
- S est la surface du pavillon.
- τ une expression dépendant de la longueur d'onde.

Toutefois si la surface du pavillon se déforme et vibre en flexion, tous les points ne vibrent plus ni en phase, ni avec une égale amplitude et on ne peut plus considérer que la valeur de S soit constante.

A la fréquence propre de flexion f_1 la déformation de la surface est maximale et cela se traduit dans la courbe des caractéristiques du transducteur en fonction de la fréquence par un second maximum.

On voit donc la possibilité d'élargir la bande en plaçant de façon convenable le second maximum vis-à-vis du premier, et ce processus est conditionné par la connaissance théorique des grandeurs étudiées, c'est-à-dire pour ce qui nous concerne dans cet exposé, essentiellement la réponse à l'émission S_v , la sensibilité à la réception S_h , les fréquences f_0 et f_1 .



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

2.2 - Calculs des réponses d'un transducteur :

Nous procédons au moyen de l'analogie électro-mécanique classique, mais il existe d'autres façons de procéder, notamment par la théorie des lignes. [2] .

A l'émission, le transducteur peut être représenté par le schéma équivalent indiqué sur la figure 2, où r_1 représente la résistance de rayonnement et la résistance de pertes mécaniques.

m_1 et m_2 sont les masses du pavillon et de la contremasse, les masses des autres parties du transducteur telles que celles des céramiques intervenant dans m_1 et m_2 suivant les calculs classiques utilisés dans les vibrations de systèmes mécaniques élastiques. L'élasticité totale e tient compte également des différents éléments. i représente la vitesse oscillatoire du pavillon et s'exprime par l'expression suivante, si le pavillon vibre en piston :

$$i = \frac{F}{r_1 + j\omega \left(m_1 - \frac{1}{\omega e} \right) - \frac{r_1 + j\omega m_1}{\omega^2 e m_2}} \quad (2)$$

où ω est la pulsation.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

En posant :

$$x = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = 2\pi f_0$$

$$\frac{m_1 + m_2}{m_2} = A \quad (3)$$

$$\frac{m_1 \omega_0}{r_1} \frac{m_1 + m_2}{m_2} = Q_m \quad (4)$$

Avec l'hypothèse de vibrations en piston, et considérant que le pavillon a une face radiante circulaire de rayon a , on peut calculer la réponse à l'émission S_v par la relation classique [3] :

$$S_v = D + 10 \log Pa + 71 \quad (5)$$

S_v étant exprimé en décibels (Réf. 1 barye/volt),

D est l'index de directivité :

$$D = 20 \log \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (6)$$

a étant le rayon du pavillon circulaire, et sa valeur étant supposée grande devant la longueur d'onde.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

P_a est la puissance acoustique émise, directement liée au carré de l'amplitude des vibrations et à la résistance de rayonnement. Tenant compte de la relation (2) on peut en déduire l'amplitude et par suite, l'expression de S_v est donnée par :

$$S_v = 20 \log \frac{S x}{\sqrt{(1 - x^2)^2 + \frac{1}{Q_m^2 x^2} [1 - A(1 - x^2)]^2}} + \text{cte} \quad (7)$$

où :

S est la surface de la face radiante ($S = \Pi a^2$)

Cette expression permet de déterminer théoriquement les valeurs de S_v en fonction de la fréquence pour différentes valeurs des paramètres A et Q_m . Ainsi, pour une valeur de A généralement adoptée en pratique, soit 1,5, on obtient l'allure représentée sur la figure 3.

D'une façon analogue, on peut obtenir la valeur de sensibilité à la réception en partant du circuit équivalent du transducteur fonctionnant en réception (fig. 2) et le calcul aboutit à l'expression suivante à une constante près:



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

$$S_h = 20 \log \frac{S}{A \sqrt{(1 - x^2)^2 + \frac{1}{Q_m^2 x^2} |1 - A(1 - x^2)|^2}} \quad (8)$$

Un exemple des variations de S_h en fonction de la fréquence est donné par la figure 4.

Lorsque le pavillon ne vibre plus en piston on voit que dans les expressions (7) et (8) les grandeurs S et Q_m vont se trouver modifiées suivant le mode de vibrations.

2.3 - Modes de vibrations et calculs des fréquences de résonance :

Afin de préciser la déformation de la surface radiante du pavillon au voisinage de la fréquence f_1 un certain nombre de mesures ont été effectuées au moyen de capteurs placés en différents points de la surface. Ces mesures ont permis de mesurer les phases et les amplitudes et d'en déduire non seulement la position des lignes d'égalité amplitude comme par exemple les lignes nodales mais aussi les valeurs numériques des zones de maxima de déplacements. En effet on connaît (voir par exemple [4] - [5]) les modes de vibrations et les déphasages dans le cas des plaques minces, mais les lois de la mécanique ne permettent pas d'obtenir la valeur des déplacements du point de la surface dans le cas de plaques épaisses de la forme adoptée sur nos pavillons.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

On peut en fait faire dériver des théories concernant les plaques épaisses [6] le calcul de la fréquence propre de flexion des pavillons utilisés sur les transducteurs [7] compte tenu des données acquises sur les plaques minces.

En outre, il nous a fallu tenir compte dans ce calcul du fait qu'il s'agit de vibrations forcées puisque la colonne de céramiques excite le pavillon à sa base.

Le volume déplacé par un point du pavillon a pour expression en coordonnées polaires r, θ :

$$V(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^a w_0 \cos(\omega t + \varphi) r dr d\theta \quad (9)$$

Adoptant les mêmes conditions aux limites que certains auteurs [8], nécessaires pour utiliser la méthode de Ritz, nous obtenons pour le volume maximum déplacé à la fréquence f_1 l'expression :

$$V_1 = 2\pi \int_{r_0}^a (Ar + Br^3 + Cr^4) dr \quad (10)$$

où : A, B, C sont des constantes et r_0 est le rayon des céramiques excitatrices.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

Comme ce volume n'est pas engendré par une surface vibrant en piston, et que les expressions (5) et (6) supposent que la surface S correspond à une vibration en piston on peut remplacer la valeur de S par une valeur S* obtenue en faisant le quotient du volume trouvé en (10) par le déplacement.

On obtient ainsi l'expression de S* qui est de la forme :

$$S^* = \Pi \frac{-2 \cdot r_0^2 \left(\frac{B}{4C} + \frac{r_0}{5}\right) (a^2 - r_0^2) + \frac{B}{2C} (a^4 - r_0^4) + \frac{2}{5} (a^5 - r_0^5)}{-2 r_0^2 \left(\frac{B}{4C} + \frac{r_0}{5}\right) + \frac{B}{C} r_0^2 + r_0^3} \quad (11)$$

La valeur de B/C dépend de la rigidité à la flexion du pavillon et de ses dimensions, de sorte que l'expression de S* donnée en (11) permet d'obtenir sa valeur à la fréquence f_1 .

Si l'on introduit donc dans les relations (7) et (8), au lieu de S une grandeur telle que $S^* = S \alpha$ qui tient compte de la déformation de la surface à la fréquence f_1 , on obtient une expression valable à cette fréquence.

Il faut noter également que S* intervient dans l'expression de Q_m , puisque Q_m est inversement proportionnel à S.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

Les expressions (7) et (8) deviennent donc :

$$S'_{-v} = 20 \log \frac{S \alpha x}{\sqrt{(1-x^2)^2 + \frac{\alpha^2 S^2}{Q_m^2 x^2} [1 - A(1-x^2)]^2}} + \text{cte} \quad (12)$$

$$S'_{-h} = 20 \log \frac{S \alpha}{A \sqrt{(1-x^2)^2 + \frac{\alpha^2 S^2}{Q_m^2 x^2} [1 - A(1-x^2)]^2}} + \text{cte} \quad (13)$$

On sait que loin de la fréquence f_1 , $\alpha = 1$ et que pour celle-ci on peut la calculer par l'expression (11). Entre ces limites, on peut déterminer expérimentalement les variations de α en fonction de la fréquence, pour chaque type de pavillon. La courbe figure 5 en donne un exemple.

2.4 - Etude des positions relatives des fréquences :

Nous avons étudié l'influence de f_1 par rapport à f_0 en faisant croître le rapport $\frac{f_1}{f_0}$ entre 1 et 2,2 pour déterminer comment variaient les valeurs de S'_{-v} et S'_{-h} en fonction de la fréquence.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

Il faut toutefois remarquer que cette étude doit tenir compte des différentes grandeurs S , α , Q_m , A intervenant dans les expressions (12) et (13) de S'_v et S'_h .

Réglons tout d'abord la question de la grandeur S , qui est la surface du pavillon lorsque celui-ci vibre "en piston". On sait en effet, que, pour des questions de directivité et d'interaction entre transducteurs élémentaires, le diamètre doit être de l'ordre de la demie longueur d'onde.

Facteur α :

On a vu que ce paramètre est maximum à la fréquence f_1 et qu'il est lié aux vibrations de flexion du pavillon. Compte tenu de la remarque précédente sur S et de sa conséquence pour la valeur de r_0 , on peut agir sur α en contrôlant la géométrie du pavillon. Pour des dimensions identiques de a et r_0 , on peut voir par exemple la variation de la fréquence f_1 en fonction des dimensions, pour une série de pavillons (fig. 6). Les valeurs prévues par la théorie que nous avons élaborée [7] sont indiquées en même temps que les valeurs mesurées expérimentalement.

Nous avons donc fait varier f_1 par rapport à f_0 entre $f_1 = f_0$ et $f_1 = 2,2 f_0$.

TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

Paramètre Q_m :

Nous avons envisagé des valeurs théoriques de Q_m comprises entre 1 et 10 puisque les transducteurs classiques récents permettent d'obtenir des valeurs situées entre 3 et 5. Le cas $Q_m = 1$ est idéal, et correspond à une masse arrière infiniment grande par rapport à celle du pavillon.

Paramètre A :

Nous remarquons que le cas idéal correspond à $A = 1$ ($m_2 \gg m_1$) et qu'un cas extrême (pavillon et contremasse égales) correspond à $A = 2$. Par suite, nous avons envisagé les cas suivants :
 $A = 1,10$ $A = 1,25$ $A = 1,5$ qui correspondent à des rapports m_2/m_1 égaux à 10, 4 et 2, le type de construction classique étant situé au voisinage de 1,1 à 1,3.

2.5 - Etude des résultats en fonction du paramètre Q_m :

Les courbes calculées théoriquement sont données figures 7 à 12 pour différentes valeurs de f_1/f_0 , suivant les familles $Q_m = \text{constante}$. Suivant que f_1/f_0 augmente, on voit s'amorcer le second maximum des courbes S'_h et S'_v en fonction de x . On peut noter également que pour des valeurs de Q_m faibles, la valeur de S'_v reste constante à 3 dB près dans une large gamme de fréquences.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

2.5.1 - Etude en fonction du paramètre A :

De même, si l'on se fixe une valeur de Q_m faible et que l'on essaie d'agir sur le paramètre A, on trouve les allures représentées sur la figure 13.

2.5.2 - Conséquences :

En pratique, on voit donc qu'il est possible de prévoir quelle sera l'allure des réponses d'un transducteur, et d'agir suivant les besoins, sur des paramètres parfaitement définis. De tels résultats ont pu être obtenus expérimentalement [9] , nous avons montré ici qu'il est possible de les obtenir par la théorie.

3) - RESULTATS OBTENUS :

Plusieurs transducteurs ont déjà été réalisés en appliquant la théorie précédemment décrite. L'objectif visé était notamment l'obtention d'une bande passante très large (de l'ordre d'une octave) pour des appareils de mesure ou d'étalonnage. Nous allons donner deux exemples de ces réalisations.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

3.1 - Transducteur de mesure n° 1 dans la gamme
4,5 - 11 kHz :

Les principales caractéristiques de cette antenne sont les suivantes.

- Nombre de transducteurs élémentaires : 4
- Gamme de fréquence couverte : 4,5 à 11,5 kHz
- Fréquence de résonance f_0 d'un transducteur élémentaire : 5 kHz
- Fréquence propre d'un pavillon f_1 : 11 kHz
- Rapport f_1/f_0 : 2,2
- Chute maximum du S_v par rapport à la valeur pour la fréquence f_0 : 5,6 dB
- Valeur de S_v à f_0 : 43,9 dB
- Valeur de S_h à f_0 : - 63,8 dB
- Rendement électroacoustique : 70 %



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

La figure 14 représente les valeurs de la réponse à l'émission et du rapport des amplitudes de vibration A/A_0 d'un pavillon en fonction de la fréquence.

La figure 15 montre la courbe théorique correspondante.

Cette antenne est la première du type qui a donné lieu à l'application de la théorie précédemment décrite.

3.2 - Transducteur de mesure n° 2 dans la gamme 7,5 à 15 kHz :

Les principales caractéristiques de cette antenne sont les suivantes :

- Nombre de transducteurs élémentaires : 4
- Gamme de fréquence couverte : 7,5 à 15 kHz
- Fréquence de résonance f_0 d'un transducteur : 10 kHz
- Fréquence propre d'un pavillon f_1 : 14,4 kHz
- Rapport f_1/f_0 : 1,4



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

-
- Chute maximum du S_v par rapport à la valeur pour la fréquence f_0 : 3 dB
 - Valeur de S_v à f_0 : 46 dB
Réf. 1 barye/Volt
 - Valeur de S_h à f_0 : - 72 dB
Réf. 1 Volt/barye
 - Rendement électroacoustique : 90 %

La courbe de réponse S_v de l'antenne ainsi que la courbe de déformation du pavillon d'un transducteur élémentaire sont données sur la figure 16. La courbe théorique correspondante est donnée sur la figure 17.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - BRANDT, O. Les transducteurs des sonars modernes.
Colloque National du Groupe d'Etudes du Traitement du Signal. NICE, 17 - 20 Avril 1967. C.N.E.T. Collection Technique Scientifique - Revue d'Optique 1968.
- [2] - MASON, W.P. Electromechanical Transducers and wave filters Van Nostrand Compagny NEW-YORK (1948).
- [3] - GUIEYSSE, L.
SABATHE, P. Acoustique Sous-Marine. Dunod (1964).
- [4] - RAYLEIGH, J.W. The theory of Sound. 2. Vol., Dover Publications, NEW-YORK (1945).
- [5] - TIMOSHENKO, S.
WOINOWSKY-KRIEGER Théorie des plaques et coques. Traduction française PINTO. Librairie Ch. BERANGER (1961).
- [6] - MARTINEK, G. The determination of Poisson's ratio and the dynamic modulus of elasticity from the frequencies of natural vibrations in thick circular plates, J. Sound. Vib. (1965), 2, n° 2 p. 116.

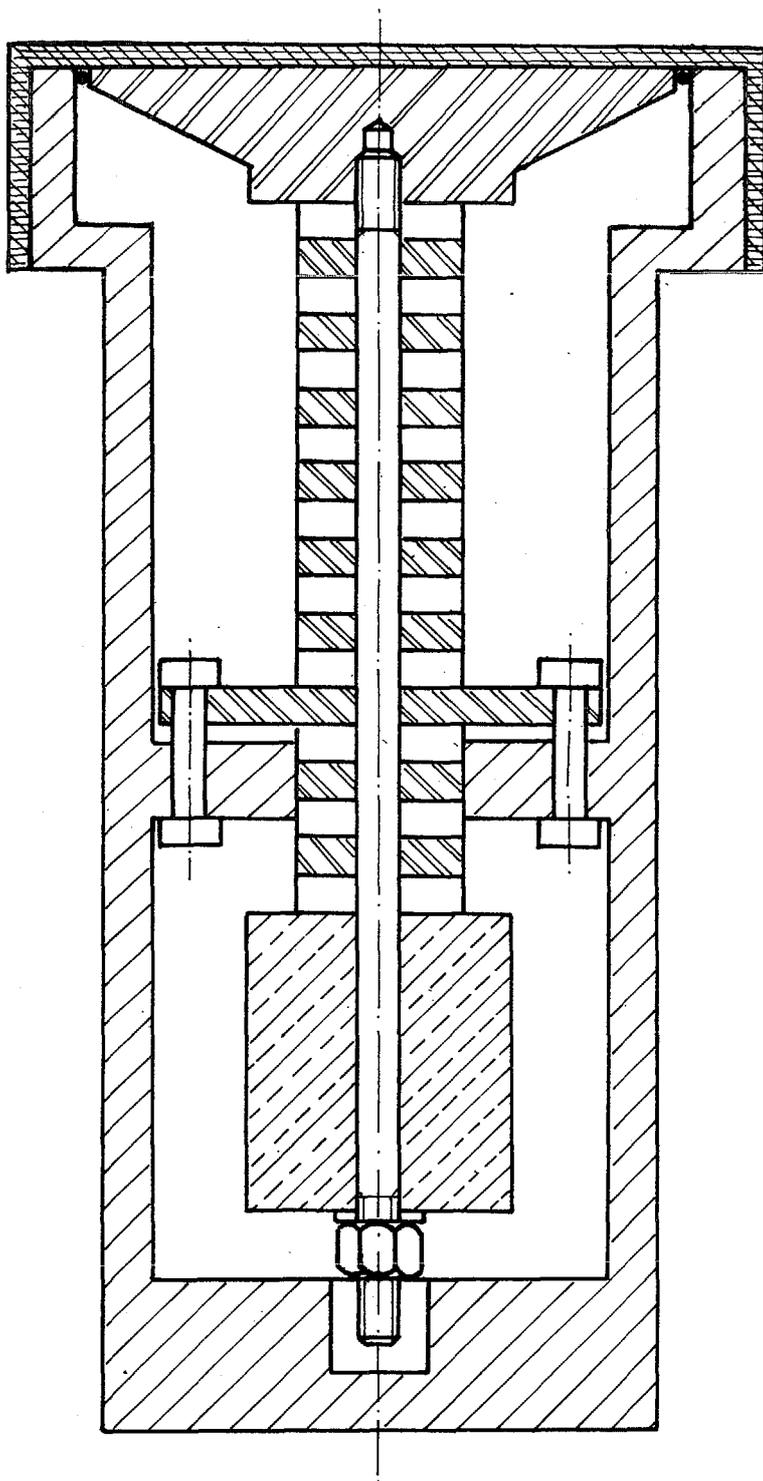


TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDL.

-
- [7] - QUIVY, M. Etudes des vibrations transversales de plaques circulaires, de forme et d'épaisseur variables.
Rapport technique n° 18 628
DSM/B du 4.12.1968.
- [8] - THURSTON, E.G. On the lowest flexural resonant frequency of a circular disk of lineary varying thickness driven at its center.
TSUI, Y.T. J. Acous. Soc. Amer. (1955)
27, n° 5 p. 926.
- [9] - BOCQUILLON, F. Transducteur piézoélectrique à large bande à usage océanographique.
Proceeding of Oceanology International 69.
OCEANOGRAPHIC Instrumentation and data Handling.



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE.

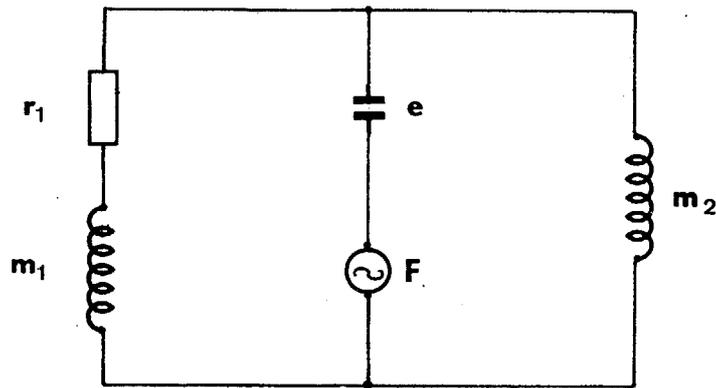


SCHEMA DE PRINCIPE D'UN TRANSDUCTEUR

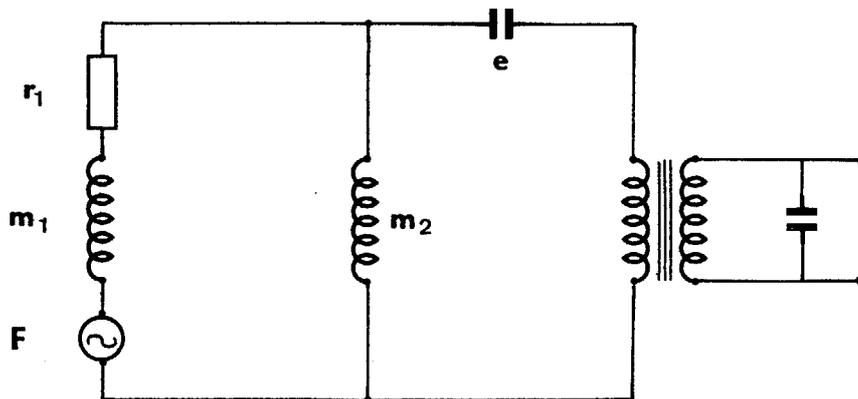
Fig. 1



TRANSDUCTEURS ELECTROACOUSTIQUES A LARGE BANDE



Circuit équivalent
émission.



Circuit équivalent
réception.

Fig. 2

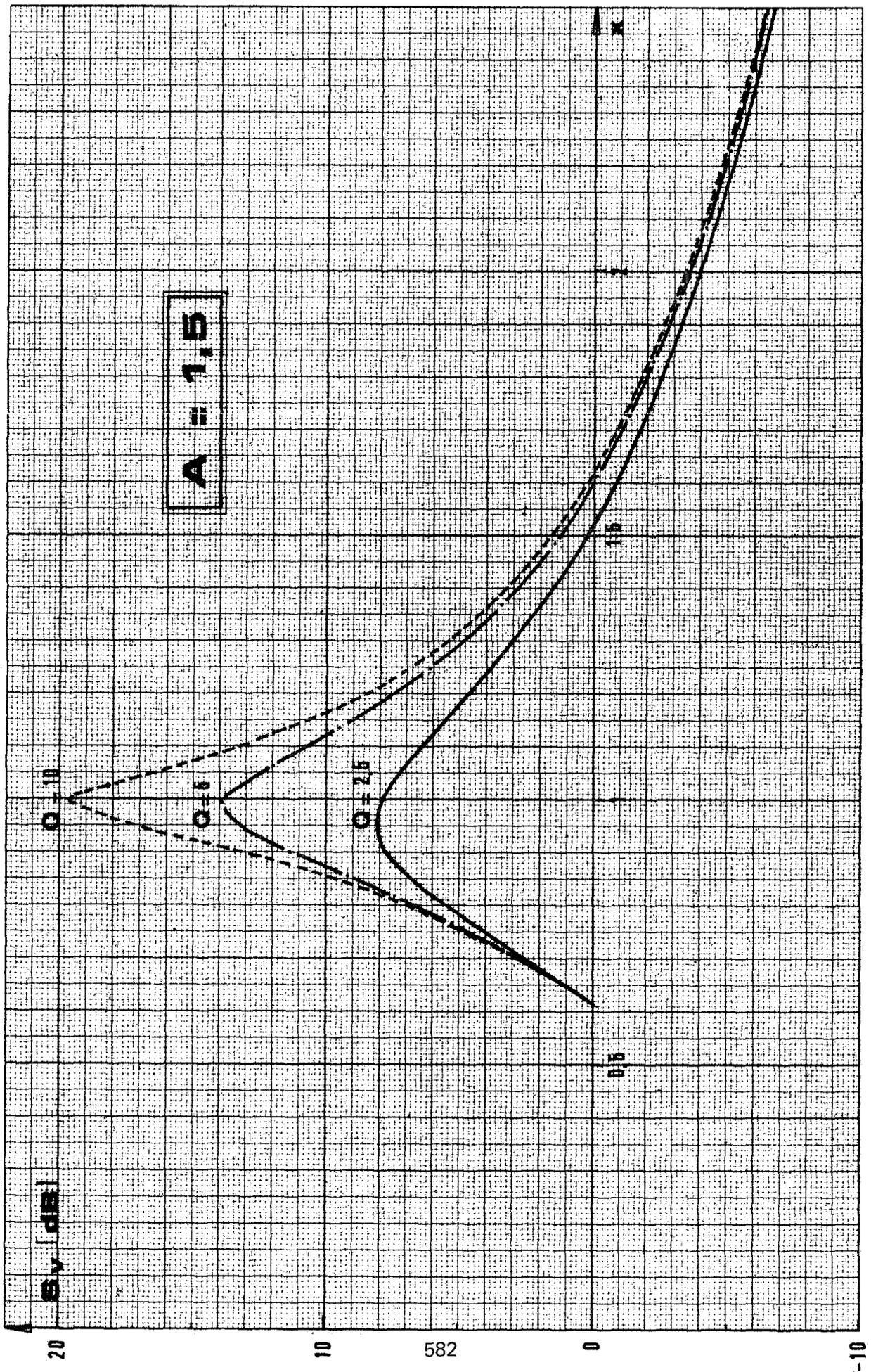


Fig. 3

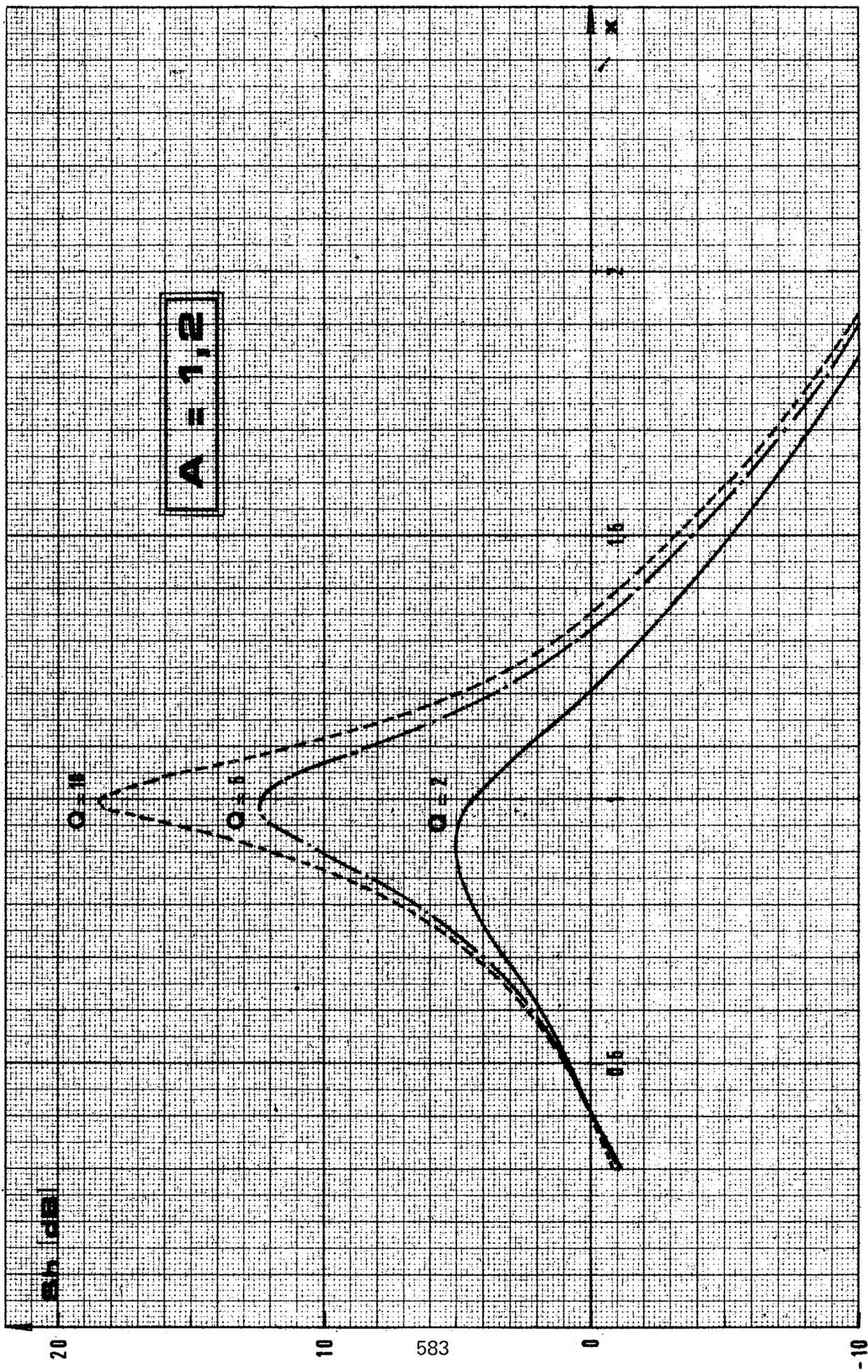


Fig. 4

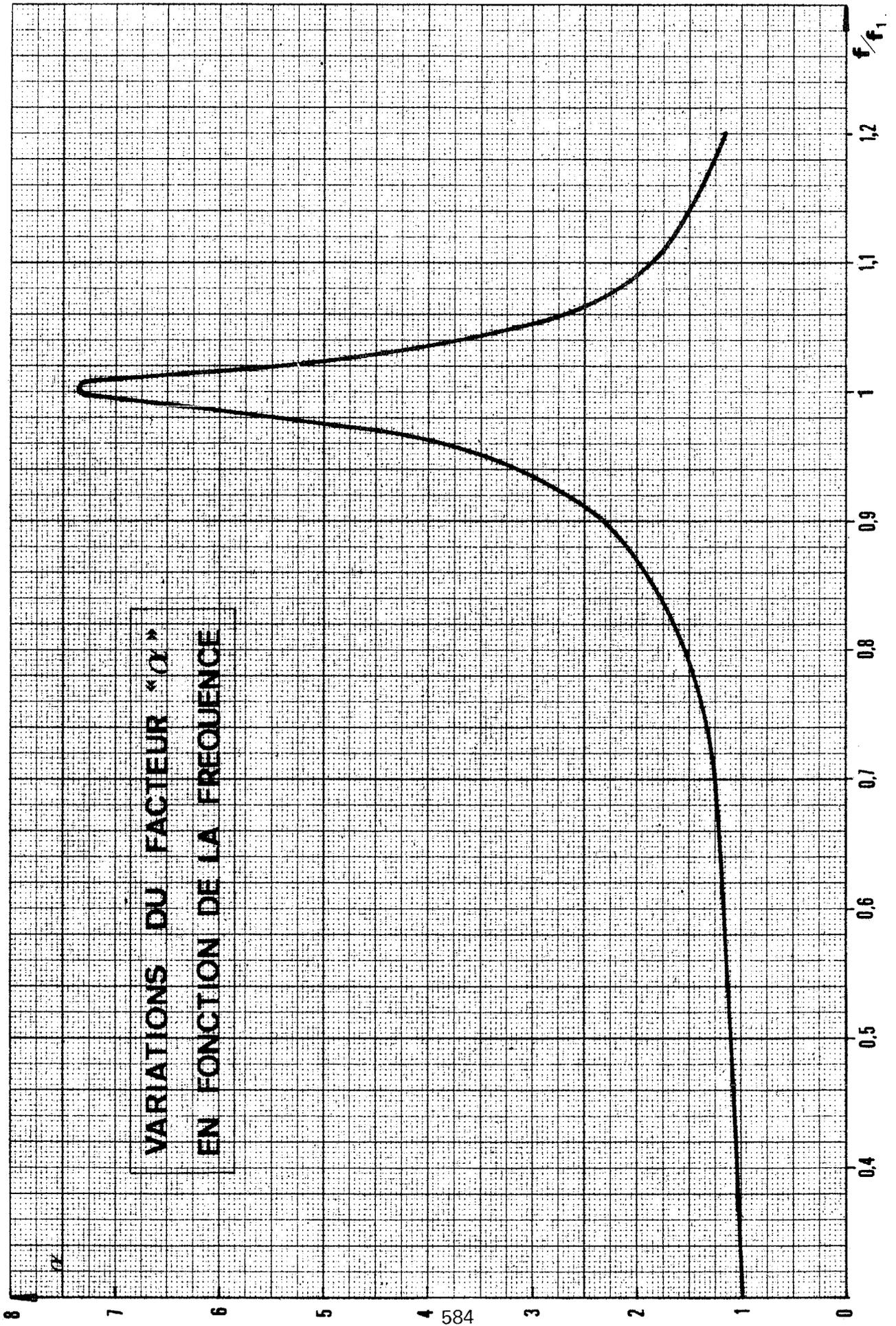


Fig. 5

Fréquences f_1

Calculées Mesurées

4 509

4 600

5 252

5 460

6 125

6 385

7 103

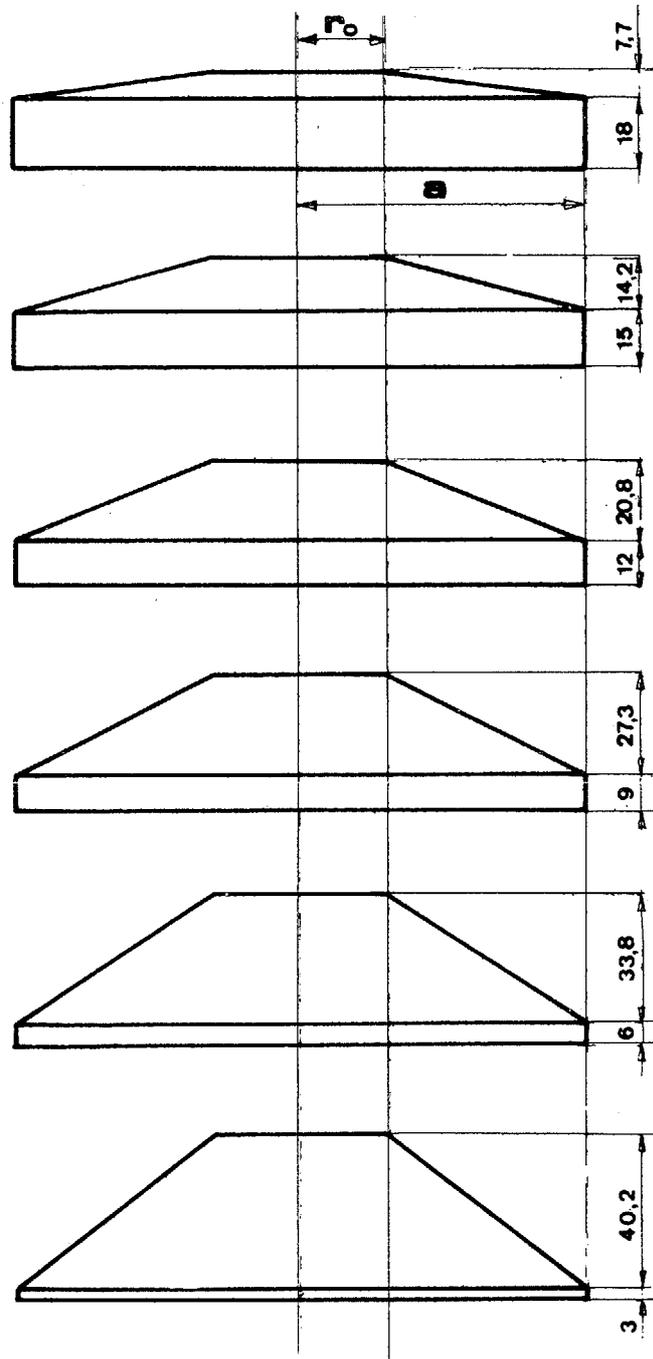
6 965

8 217

8 200

9 445

8 900



PAVILLONS TRANSDUCTEURS

$r_0 = 22,5$

$a = 75$

Fig. 6

ECH : $\frac{1}{2}$

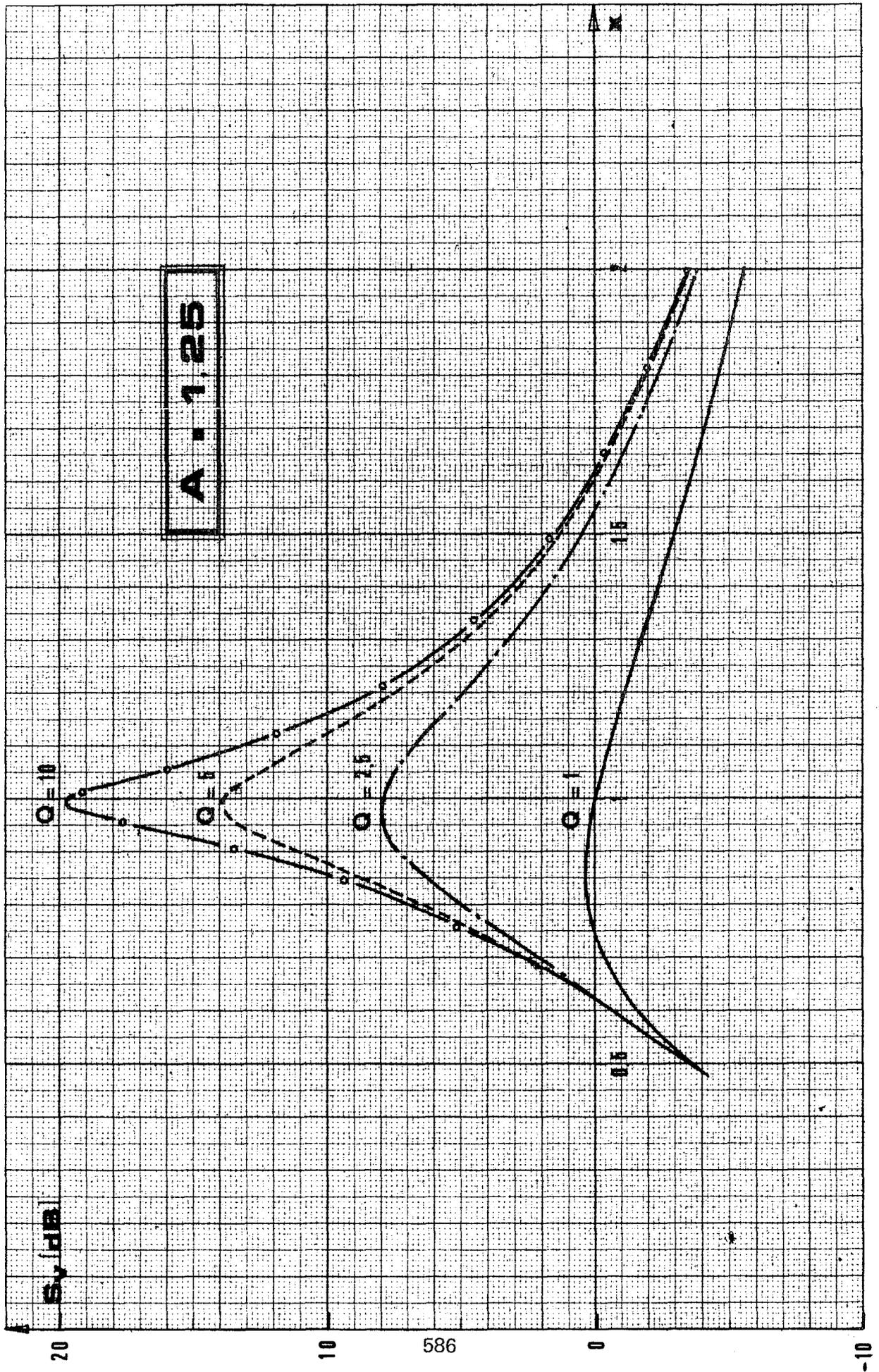


Fig. 7

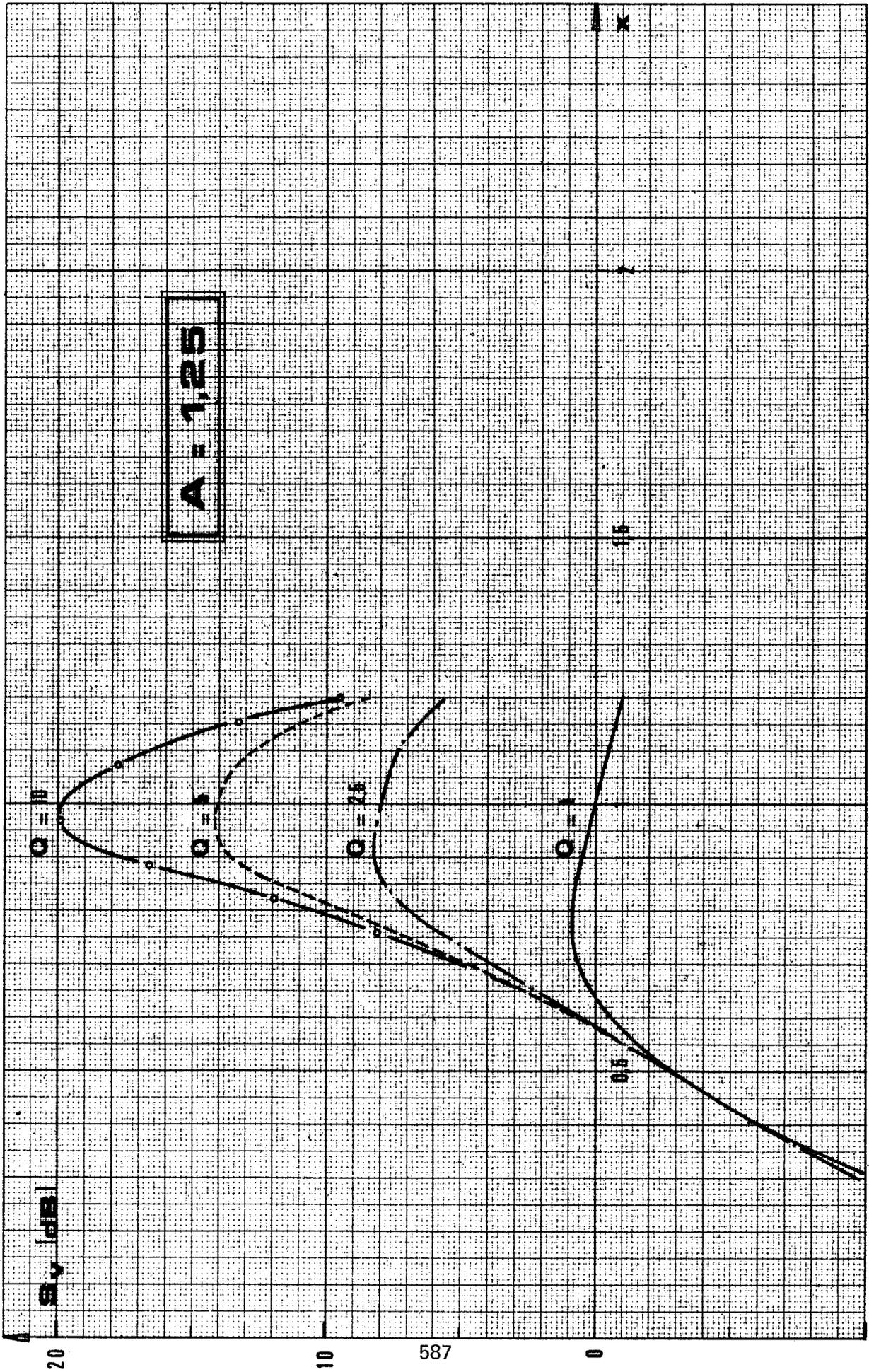


FIG. 8



-10

25/30

0

10

20

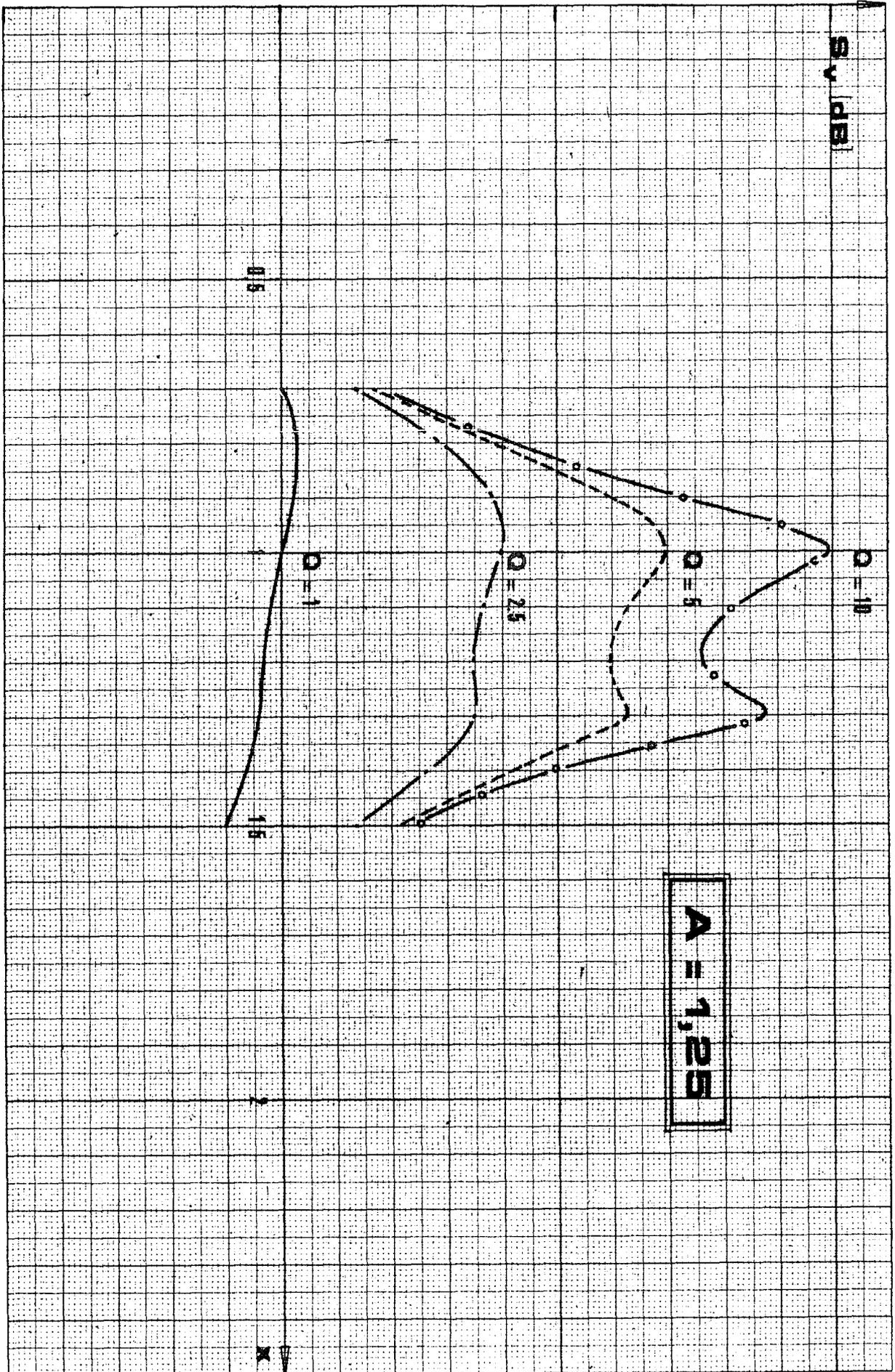


Fig. 9

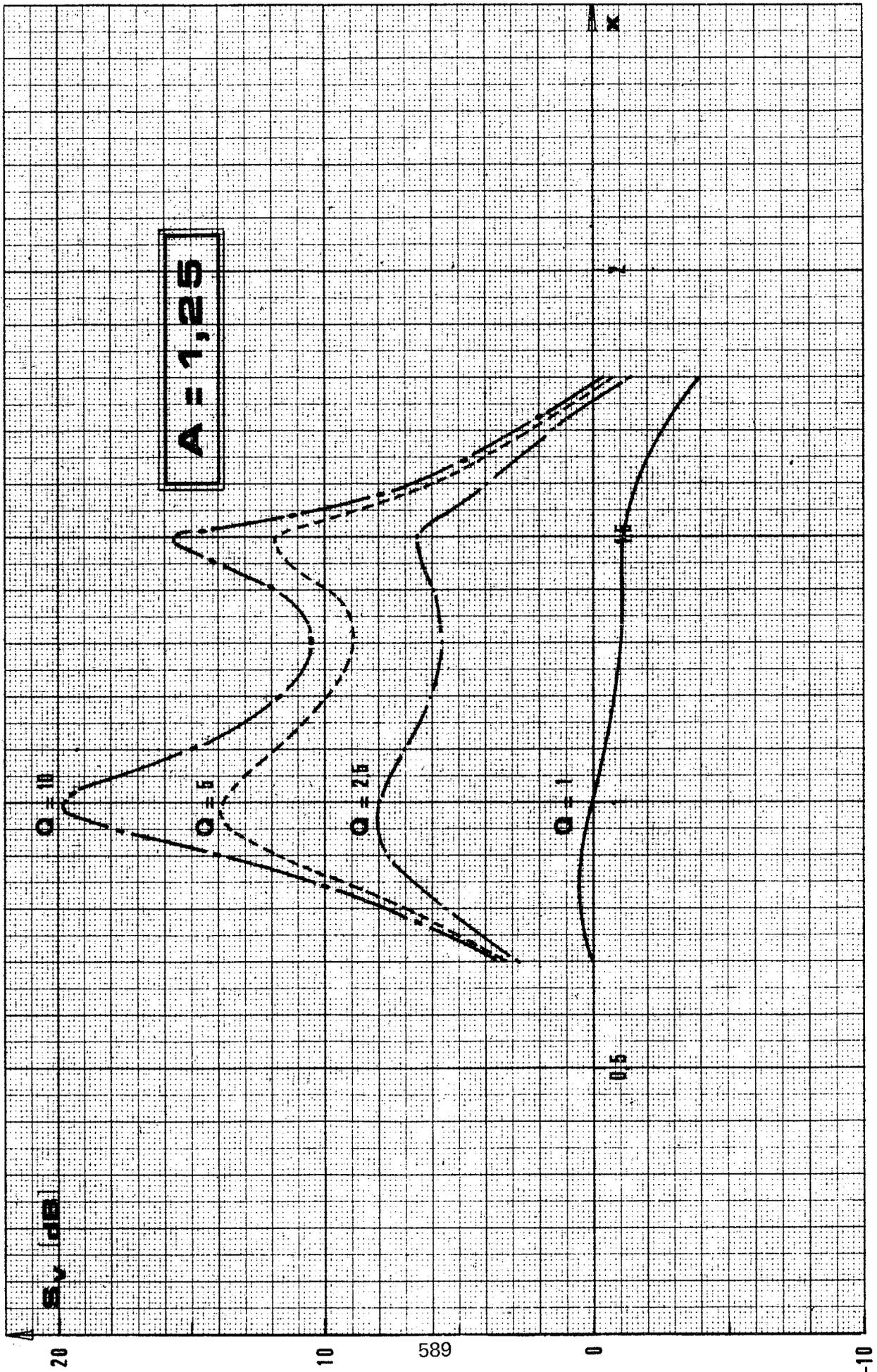


Fig. 10

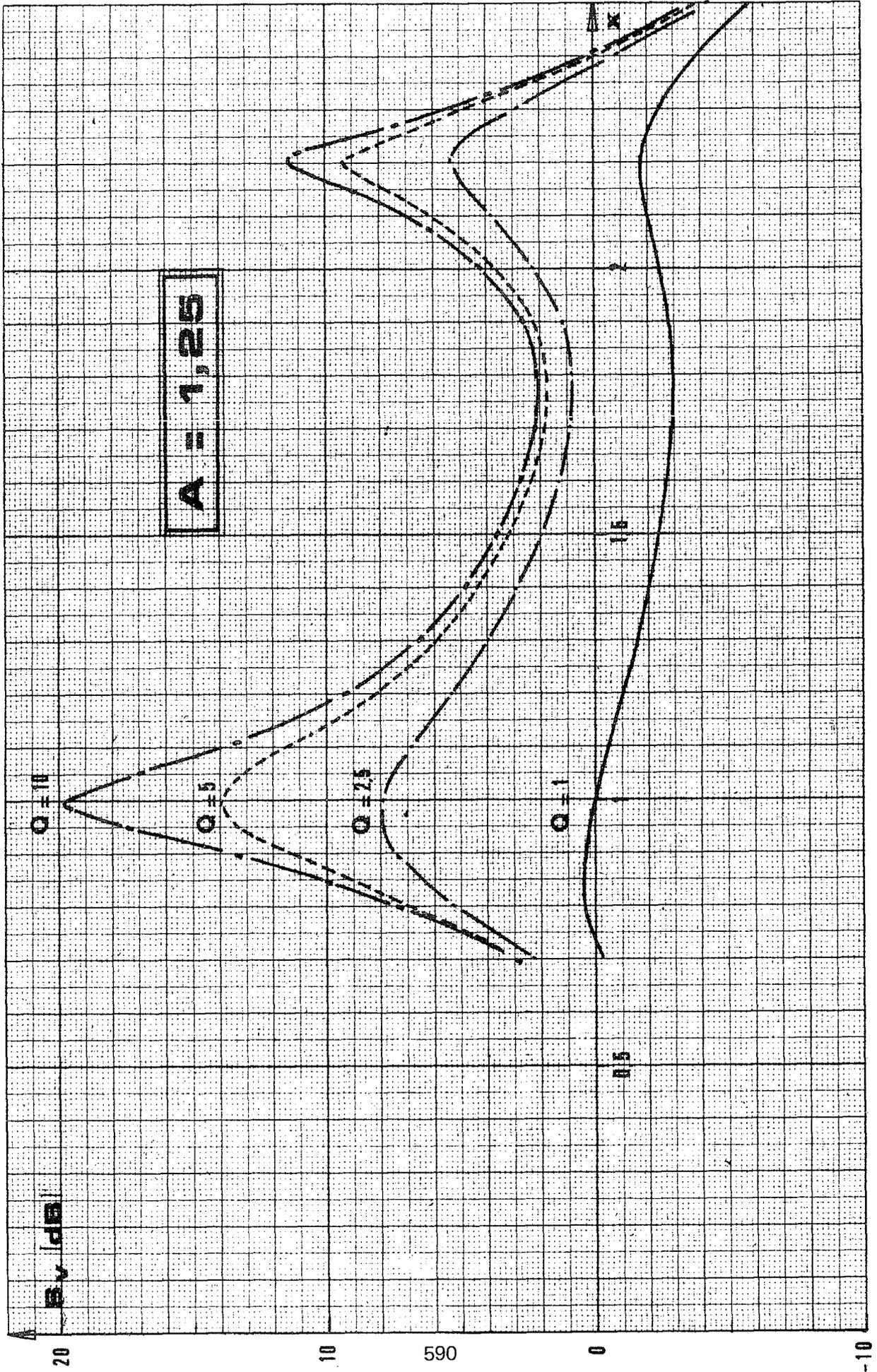


Fig. 12

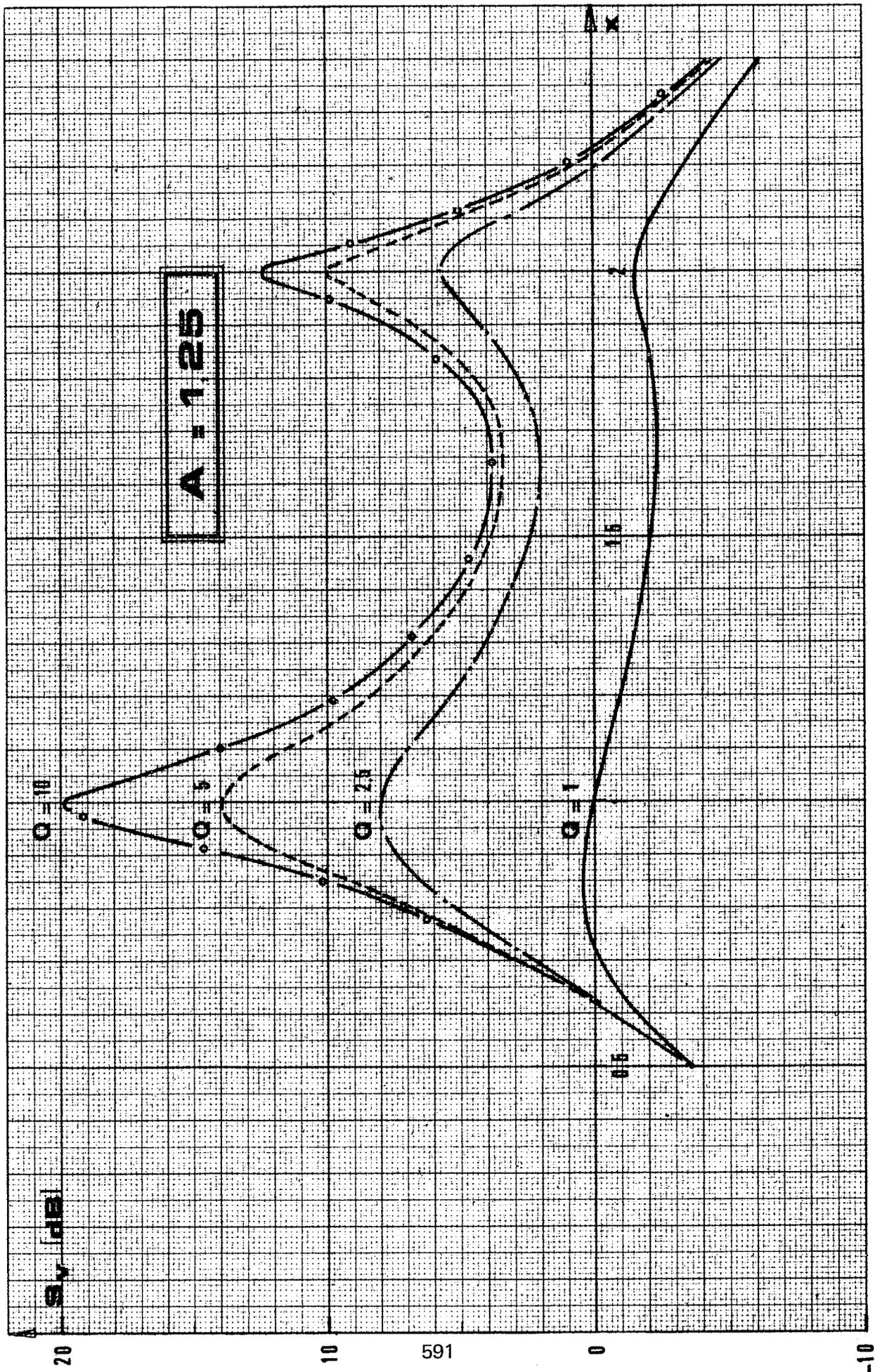


Fig. 11

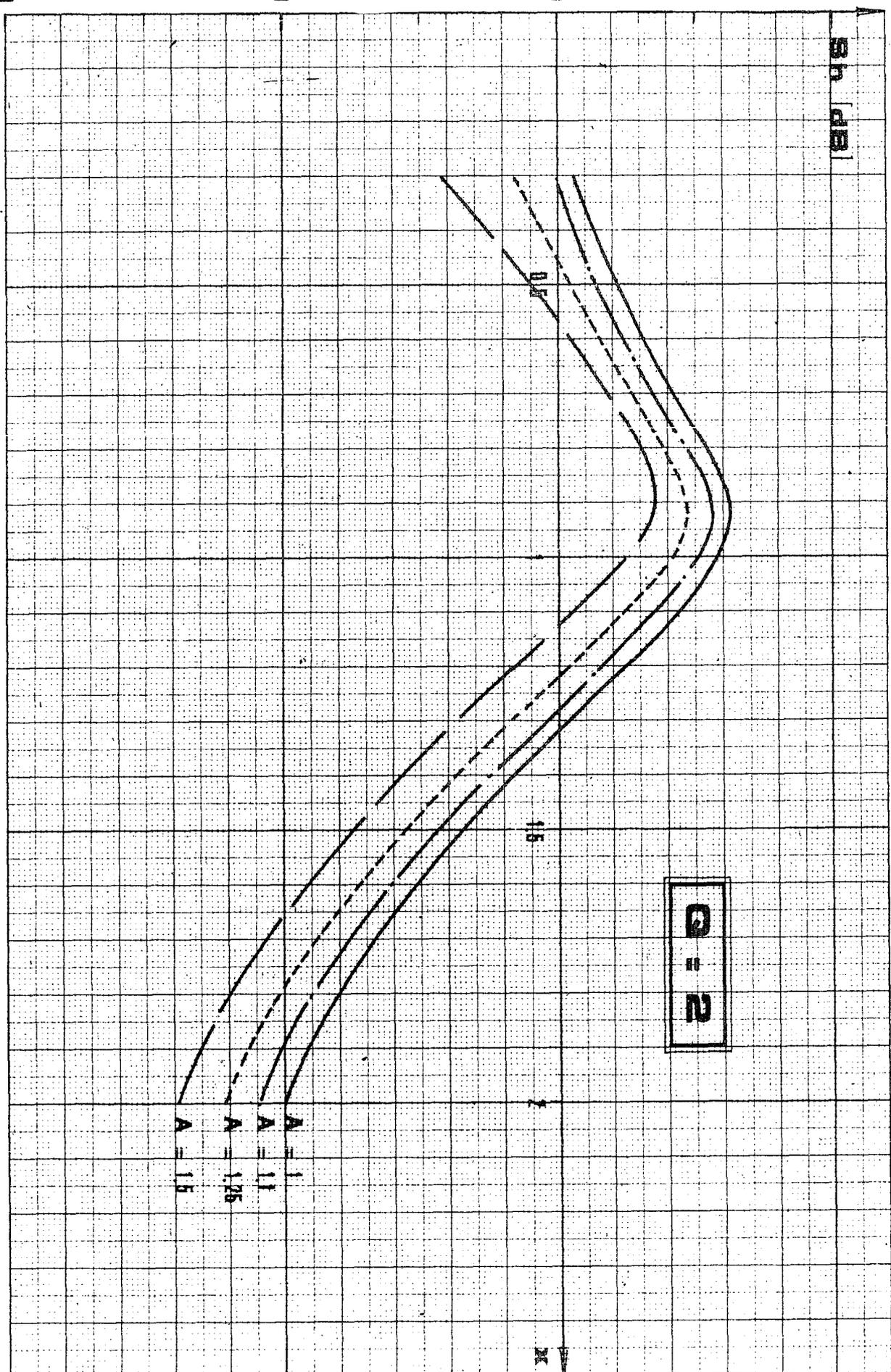


FIG. 13

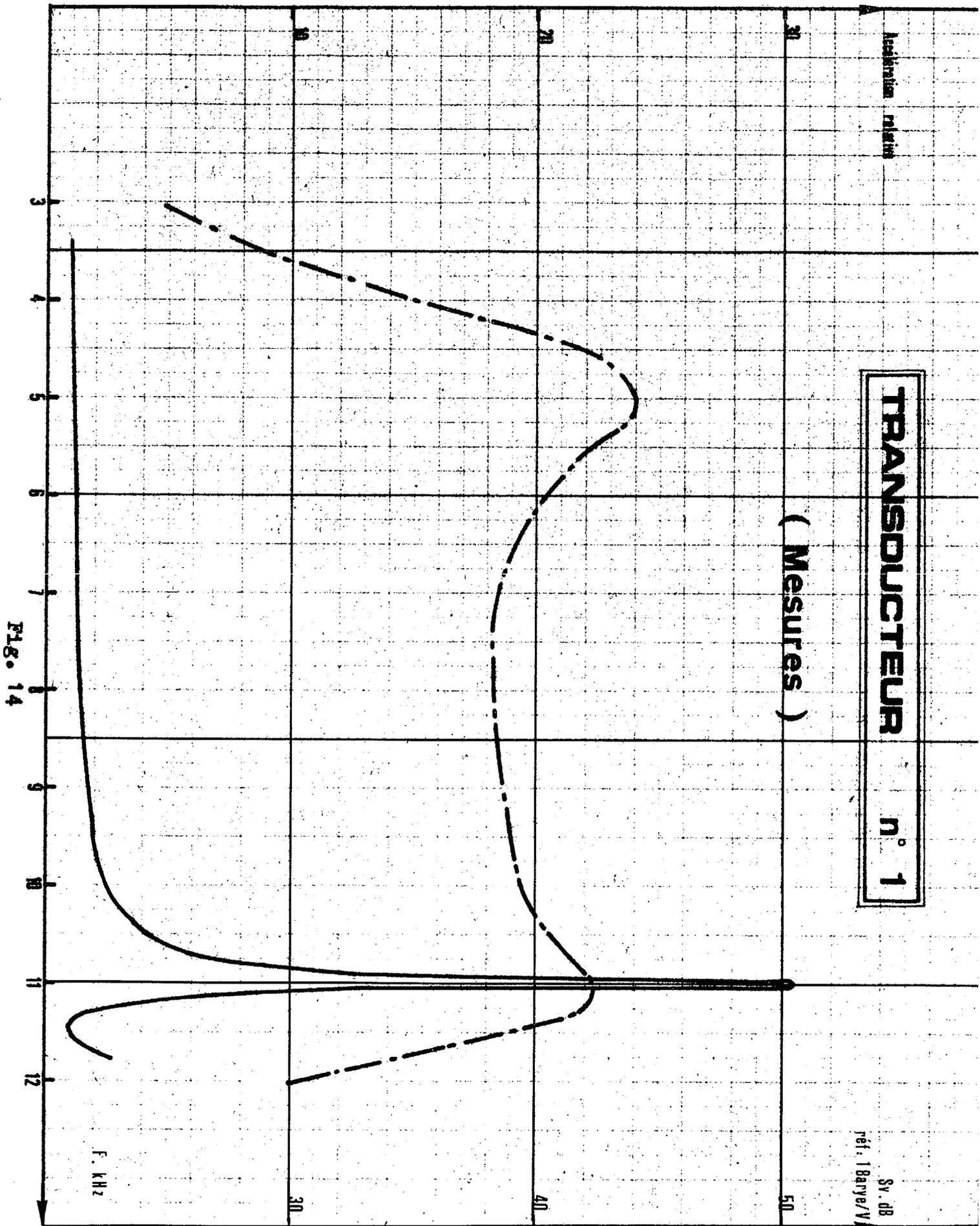
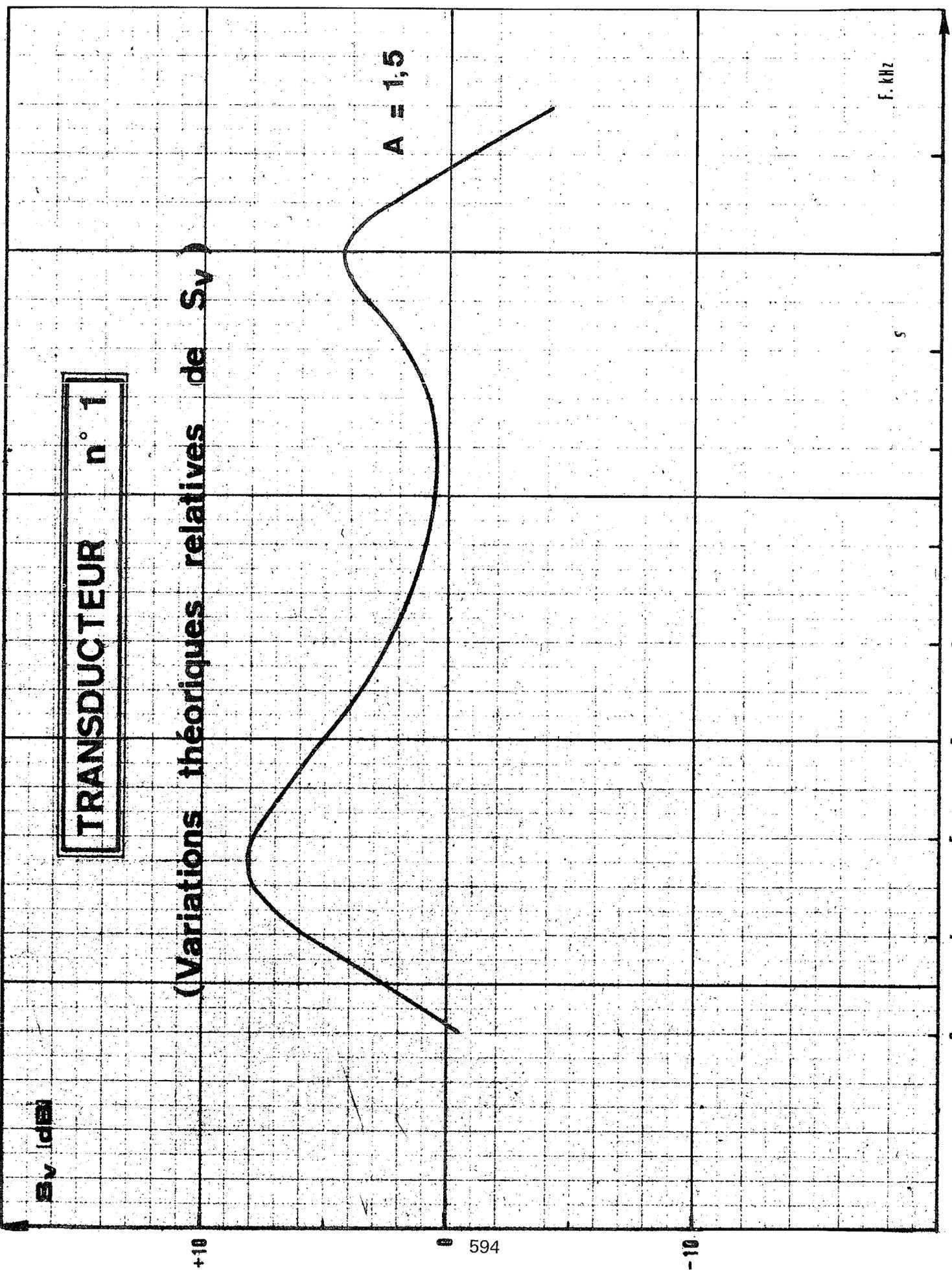


FIG. 14



+10

0 594

-10

Fig. 15



Sv. dB.
réf. 1Barge/V

TRANSDUCTEUR n° 2

(Mesures)

Accélération relative

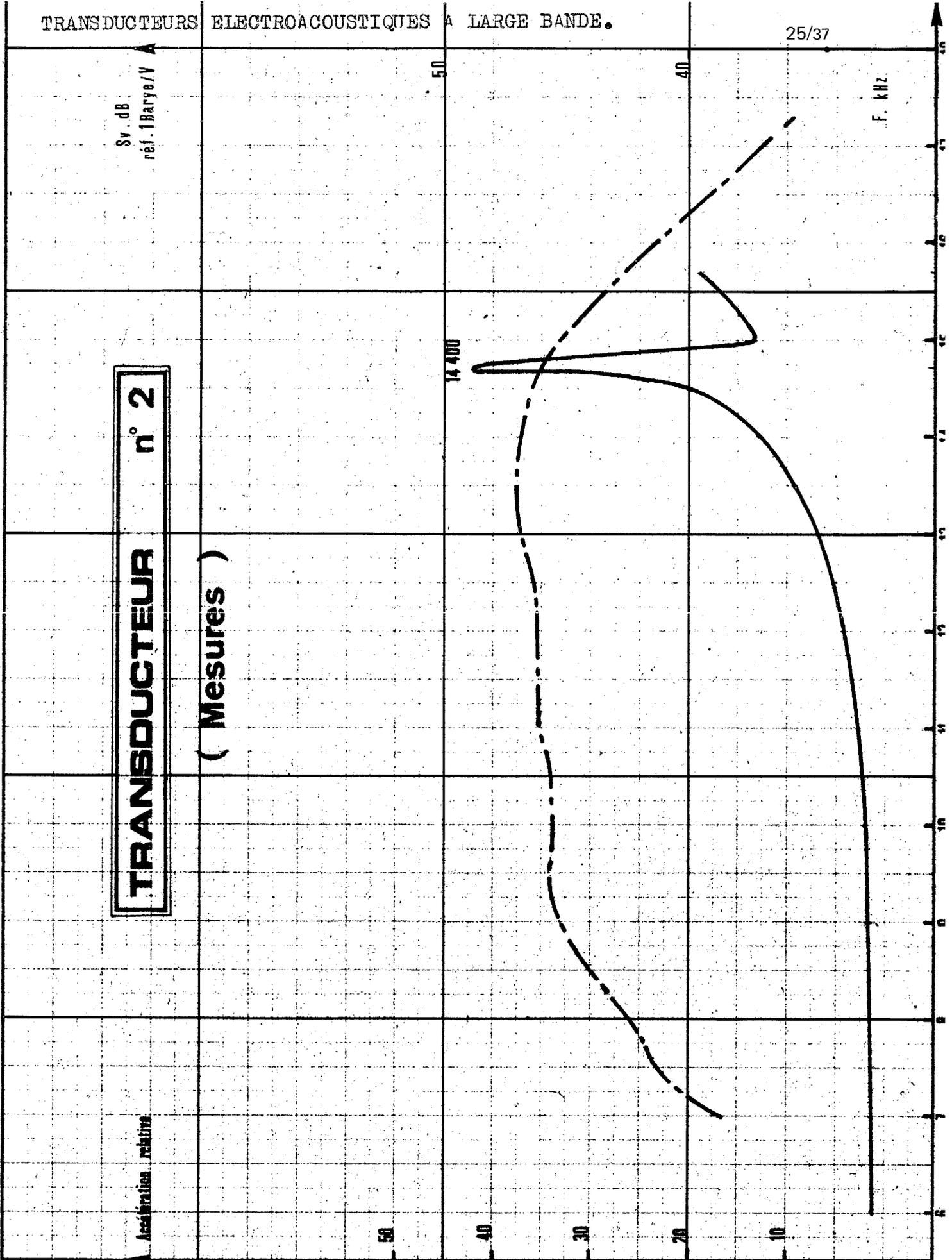
50 40 30 20 10

50

40

14 400

F. kHz





25/38

-10

0

+10

Sv [dB]

TRANSDUCTEUR n° 2

(Variations théoriques relatives de Sv)

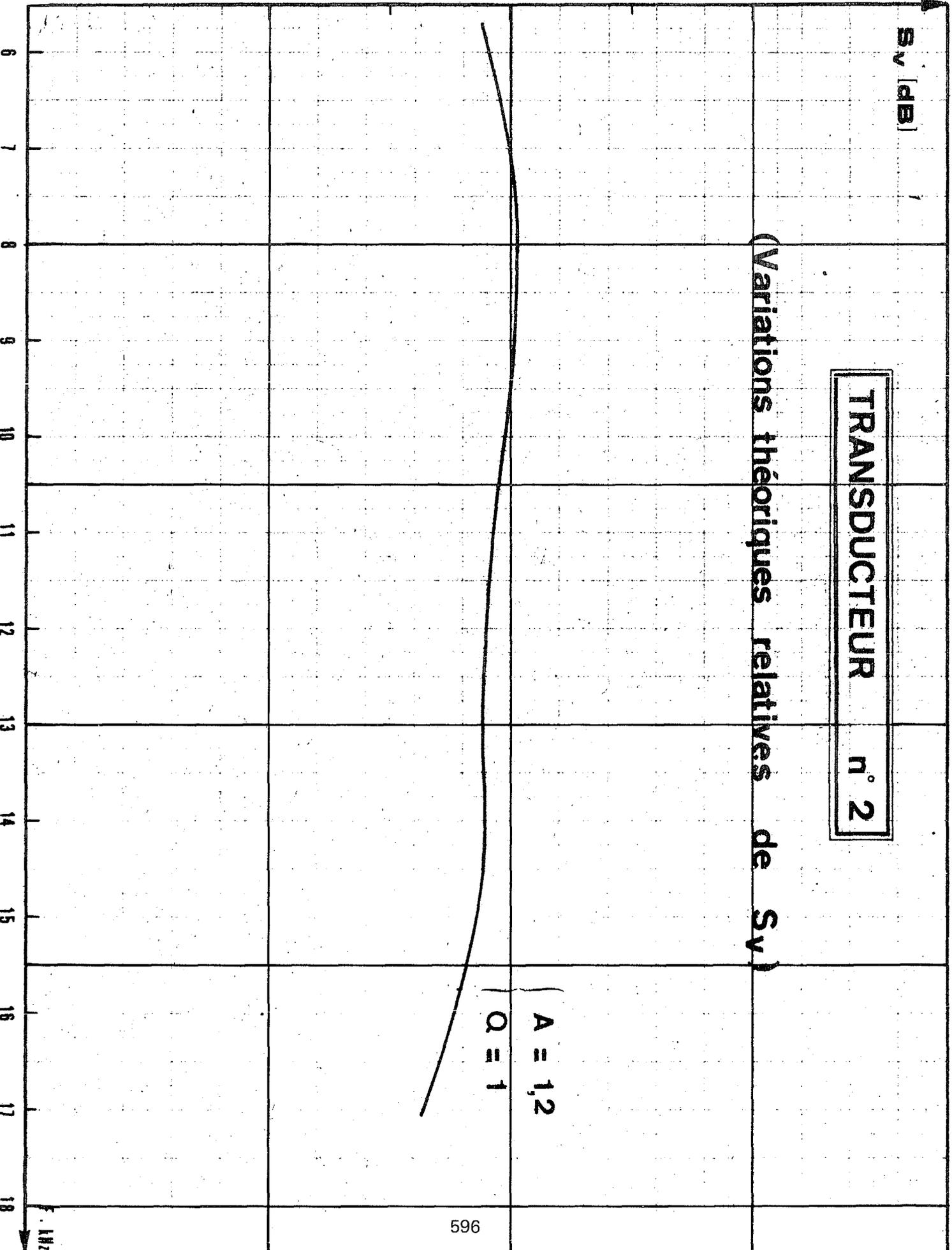


Fig. 17