

Étude expérimentale de l'emploi des abaques auxiliaires pour l'interprétation des sondages électriques

par

G. PASCAL *

Cette étude a été effectuée au cours d'un stage au B.R.G.M., sous la direction de Mr GRIVAUD. Elle ne représente qu'un aspect des recherches poursuivies par ce dernier, et qui visent à simplifier et à préciser les possibilités de l'interprétation empirique, recherches qui feront l'objet de publications ultérieures.

Résumé

Dans cet article, nous étudions la question posée par la diversité des procédures proposées pour l'interprétation (approximative) des courbes de sondage électrique par la méthode des coïncidences partielles (coïncidence à droite ou à gauche avec une courbe "2 terrains").

Nous sommes arrivés à un ensemble de règles simples qui, d'une part, permettent de reconnaître si l'emploi d'abaques différents conduit ou non, dans un cas donné, à des résultats présentant des différences significatives ; d'autre part, elles permettraient de reconnaître certains doubles emplois entre les abaques existants.

Des remarques pratiques concernant l'utilisation en général de ces procédures concluent cet exposé.

Introduction

L'interprétation d'une courbe de sondage électrique se fait le plus généralement selon les deux procédures suivantes :

- soit de manière globale et exacte par comparaison de la courbe étudiée avec les courbes toutes calculées d'un catalogue, ou avec celles d'une série de modèles supplémentaires que l'on calcule pour la circonstance ;

* Géophysicien O.R.S.T.O.M. - Centre de Géophysique de Nouméa.

— soit de proche en proche et de manière approximative par utilisation des courbes "2 terrains", dont l'assemblage obéit à un ensemble de règles, et qui fournissent des coïncidences partielles successives avec la courbe étudiée.

Ces deux procédures sont en fait plus complémentaires qu'alternatives ; la deuxième est celle qui est employée sur le terrain ; le calcul d'une courbe théorique se fait au laboratoire par l'intermédiaire d'un ordinateur.

Nous ferons exclusivement emploi de courbes de sondage électrique en dispositif SCHLUMBERGER, et c'est essentiellement le problème fondamental des règles de passage des courbes "2 terrains" à celles des "3 terrains" qui sera discuté. L'extension, au cas de plus de "3 terrains", ainsi que le problème de la construction, seront évoqués.

Les diverses règles mathématiques ou empiriques proposées par différents auteurs, ainsi que les abaques par lesquels elles sont traduites, sont présentées et discutées dans cet exposé.

Bien que l'origine de ces règles soit déjà ancienne (écoles allemande : HUMMEL, EBERT - française : MAILLET, des années 1930-1940 - et russe : MARTEN, KALENOV, SOROKIN), la question apparaît toujours ouverte et toujours d'actualité, non seulement à cause des approches plus empiriques de CAGNIARD (1952) et de KOEFOED (1960), mais aussi à cause des publications récentes aux U.S.A. et ailleurs (ZODHY : 1965 ; KELLER, MOONEY et ORELLANA, BHATTACHARYA) qui témoignent plutôt d'un retour aux sources germano-russes.

I - INTERPRÉTATION DES SONDAGES ÉLECTRIQUES

1 - Définition d'un sondage électrique

Le dispositif utilisé sur le terrain comprend deux circuits : un circuit d'émission entre deux points A et B et un circuit de réception entre deux points M et N. L'ensemble constitue un quadripôle. L'opérateur exécute au même point une série de mesures en augmentant progressivement la longueur du quadripôle. Dans le dispositif SCHLUMBERGER, qui tend d'ailleurs à être abandonné au profit du dispositif en dipôle, on prend une distance MN petite par rapport à AB.

2 - Interprétation d'un sondage électrique

Le prospecteur porte (en coordonnées bilogarithmiques) en abscisses la demi-longueur de AB, exprimée en mètres, en ordonnées la résistivité apparente ρ exprimée en ohm.m. Il obtient ainsi une courbe qui présentera une certaine forme suivant la nature et le nombre de terrains atteints par l'investigation électrique.

Dans le cas de deux terrains les valeurs des paramètres ρ_1 , ρ_2 , h_1 , seront uniques (h_1 : épaisseur du premier terrain). Dans le cas général, le prospecteur obtiendra seulement des relations entre les résistivités et les épaisseurs des différents terrains traversés.

L'interprétation se fait alors selon les deux procédures suivantes :

a - Courbes "3 terrains" d'un catalogue

Rappelons que l'interprétation classique d'un sondage électrique suppose les structures étudiées horizontales (de façon exacte ou approximative).

L'interprétation peut se faire par comparaison de la courbe expérimentale avec les courbes d'un catalogue (catalogues de la C.G.G., d'ORELLANA et MOONEY, ou encore d'OGILVI et KHMELEVSKOJ). Les courbes de ces recueils sont classées en différentes familles. Ainsi la C.G.G., affectant à ρ_3 les valeurs : $0, \infty, \rho_1, \rho_2/\rho_1$, adopte une série de valeurs numériques pour les paramètres ρ_2/ρ_1 , et h_2/h_1 . Le prospecteur peut alors interpréter le sondage électrique qu'il vient de faire, par superposition de la courbe expérimentale avec une des courbes du catalogue, et en interpolant, si besoin est, la gamme des valeurs proposées étant assez serrée.

Il est possible que l'on ne trouve pas la courbe désirée dans le catalogue. Le prospecteur calcule alors un ou plusieurs modèles supplémentaires suivant le modèle de calcul de FLATHE, calcul long et laborieux même avec un ordinateur.

Cette méthode, qui paraît facile à employer, se révèle à la pratique difficile à appliquer, et une grande expérience de prospecteur est nécessaire.

b - Utilisation des courbes "2 terrains" par la méthode des coïncidences partielles

C'est cette méthode que nous allons développer plus particulièrement. A côté de la procédure des abaques CAGNIARD (1952), d'esprit résolument empirique, la méthode (d'origine d'ailleurs plus ancienne) fondée au départ sur le concept de point auxiliaire ou point d'équivalence, est devenue aujourd'hui chez les auteurs russes un ensemble classique et très élaboré qui, dernièrement, a été repris dans de nombreux et importants travaux en Amérique et ailleurs (manuels U.S.G.S., recueils d'abaques d'ORELLANA et MOONEY).

II - PRÉSENTATION DES DIVERSES VARIANTES DE LA PROCÉDURE DE COINCIDENCE PARTIELLE

Le problème qui se pose (aussi bien en interprétation qu'en construction) est de ramener l'étude des courbes de sondage électrique à "n terrains" à celles de courbes de sondage électrique "2 terrains" ; c'est une méthode empirique qui nécessite l'emploi de l'abaque universel de sondage électrique "2 terrains" (fig. 1) et d'un abaque auxiliaire.

1 - Nous pouvons distinguer deux écoles :

a -- Ecole de HUMMEL et des auteurs germano-russes. HUMMEL (1932), le premier, introduit par des considérations théoriques la méthode de réduction d'une courbe "4 terrains" à une courbe "2 terrains" ; mais son procédé ne s'applique pas également bien à tous les cas : satisfaisant pour des courbes de sondage électrique présentant un minimum (GENESLAY et ROUGET, 1937), insuffisant pour des courbes présentant un maximum (WATSON et JOHNSON, 1938). Les différents théoriciens de cette école en viennent à utiliser des méthodes empiriques ou semi-empiriques. EBERT (1943), reprenant sans doute des travaux de KALENOV et MARTEN, propose de distinguer quatre types de courbes de sondage électrique et construit quatre abaques auxiliaires correspondant à chaque type (fig. 5 - 6). Ce sont les types A (son nom vient d'anisotropie), H (HUMMEL), K et Q. Ces quatre appellations ont été adoptées par les auteurs russes et américains (fig. 3).

Ces quatre types de courbes répondent aux sens des rapports ρ_2/ρ_1 et ρ_3/ρ_2 .

- type A : $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

- type H : $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

- type K : $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

- type Q : $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

b — Une autre école propose une procédure par voie graphique, entièrement empirique ; c'est celle de CAGNIARD et aussi celle de KOEFOED. L'interprétation d'une courbe de sondage rejette, dans les travaux russes ou allemands, toute référence à des formules exactes et construit trois abaques auxiliaires. Ces trois abaques correspondent aux trois valeurs du rapport $\rho_3/\rho_1 : 0, 1, \infty$ (fig. 7, 8, 9). KOEFOED reprend le travail de CAGNIARD en 1960 et ramène les trois abaques à un seul valable pour toutes les valeurs de ρ_3 (fig. 10).

2 - Traits communs aux procédures employées (envisagées seulement pour le cas de "3 terrains").

1 — Détermination des paramètres des "2 terrains" en demi-coïncidence à gauche et à droite (fig. 2).

Le prospecteur dessine sur papier calque bilogarithmique la courbe expérimentale qu'il doit interpréter. L'axe des abscisses représente la distance $AB/2$ exprimée en mètres, celui des ordonnées la résistivité apparente correspondante, exprimée en ohm.m. Une échelle bilogarithmique permet, entre autres avantages, de représenter les variations relatives des profondeurs (ou épaisseurs) et des résistivités plutôt que leurs variations absolues. La partie gauche de la courbe étudiée est mise en coïncidence avec une courbe de l'abaque universel deux terrains. Le prospecteur trace alors la croix à gauche (h_G, ρ_G), c'est-à-dire le point qui coïncide avec le point ($\rho_a = AB/2 = 1$) de l'abaque universel. De la même manière, la partie droite de la courbe étudiée est mise en coïncidence avec une courbe de l'abaque universel "2 terrains" ; le prospecteur trace (fig. 2) la croix à droite (h_D, ρ_D). Rappelons que l'on appelle croix d'une courbe théorique le point de coordonnées : $\rho = AB/2 = 1$.

2 — Correspondance entre paramètres des "2 terrains" en demi-coïncidence et paramètres du 2^e terrain :

$$(\rho_D/\rho_G, h_D/h_G) \iff (\rho_2/\rho_1, h_2/h_1)$$

Comment se fait cette correspondance :

— elle peut se faire par l'emploi d'abaques auxiliaires type CAGNIARD ou KOEFOED (fig. 3). Remarquons tout de suite que cet emploi est valable aussi bien en interprétation qu'en construction.

Prenons comme exemple les abaques CAGNIARD. Le prospecteur choisit un des trois abaques auxiliaires suivant la forme de la courbe expérimentale. La croix à gauche, obtenue par la procédure vue plus haut, est calée sur le point origine des courbes ρ_2/ρ_1 de l'abaque auxiliaire. La croix à droite (ou point auxiliaire) se cale à l'intersection d'une courbe ρ_2/ρ_1 et d'une courbe h_2/h_1 (si ces deux courbes ne sont pas tracées, on procède bien entendu par interpolation).

— elle peut aussi se faire par l'emploi des abaques des auteurs russes ; l'abaque est choisi suivant le type de courbe à étudier : A, H, K ou Q (fig. 4). On opère de la même façon que pour les abaques CAGNIARD ou KOEFOED.

Les auteurs russes se sont placés au départ au point de vue construction. Ils ont établi des formules mathématiques donnant les coordonnées du point auxiliaire, introduisant plus tard des termes correctifs finalement très empiriques. L'introduction d'abaques auxiliaires a permis d'adapter cette méthode en interprétation.

3 - Distinctions entre les procédures employées :

a - Distinctions de pure apparence :

— Mathématique ou graphique ?

Si nous nous plaçons du point de vue interprétation, cette distinction disparaît avec l'introduction d'abaques auxiliaires. Les tenants de formules mathématiques reconnaissent la nécessité d'utiliser des termes correctifs pour les cas K et Q et ont finalement eux aussi recours à l'empirisme.

— Construction ou interprétation ?

La distinction est là aussi de pure apparence. Tous les abaques proposés sont réversibles.

b - Distinctions véritables :

— Question de la dépendance (ou indépendance) de la loi de correspondance vis-à-vis de ρ_3 . Sur ce point les différents auteurs ne sont pas d'accord et distinguent une, deux ou trois lois de correspondance.

KOEFOED propose une seule loi. Il construit un abaque auxiliaire valable pour toutes les valeurs de ρ_3 (il distinguerait, en fait, le cas $\rho_3 = 0$).

EBERT et les Russes en proposent deux, suivant le sens du rapport ρ_3 / ρ_2 . Ils distinguent deux cas :

$\rho_3 > \rho_2$: types A et H

$\rho_3 < \rho_2$: types K et Q

CAGNIARD en propose trois. Il a construit trois abaques correspondant aux cas suivants : $\rho_3 = 0$, $\rho_3 = \rho_1$, $\rho_3 \infty$. Les familles ρ_2 / ρ_1 , de ces abaques, sont les mêmes dans les trois cas.

— Variations entre tenants d'une même école dans la constitution d'un même abaque : c'est surtout chez les partisans des formules mathématiques que l'on rencontre le plus de divergence. Comme nous le verrons plus loin, si chacun distingue bien quatre familles de courbes de sondage électrique, la position du point auxiliaire diffère avec chaque auteur.

Ces divergences amènent quelques remarques préliminaires. Faut-il ou non tenir compte de la résistivité ρ_3 du 3^e terrain ? Y a-t-il lieu de distinguer quatre types de courbes ou de suivre la démarche de KOEFOED ?

Les tests que nous avons faits vont nous permettre de tirer quelques conclusions et d'apprécier ces diverses variantes proposées.

III - TESTS EN INTERPRÉTATION A PARTIR DE CAS EXACTS

1 - Définition et position des différents points auxiliaires suivant les types de courbes

Avant de faire ces tests, nous jugeons bon de préciser les différents points auxiliaires à la fois suivant les types de courbes et les différents auteurs.

Rappel des notations employées :

- $\rho_1 \rho_2 \rho_3$: résistivités des différents terrains
- $h_1 h_2 h_3$: épaisseurs des différentes formations
- S : conductance longitudinale

$$S = S_1 + S_2 = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}$$

- T : résistance transversale

$$T = T_1 + T_2 = h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2$$

- On pose : $\nu = \frac{h_2}{h_1}$ $\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ d'où : $S' = \frac{S}{S_1} = 1 + \frac{\nu}{\mu}$ $T' = \frac{T}{T_1} = 1 + \nu\mu$

- Les coordonnées d'un point auxiliaire D seront notées $\left. \begin{matrix} h^+ \\ \rho^+ \end{matrix} \right\}$ ou, en coordonnées réduites, $\left. \begin{matrix} h'^+ \\ \rho'^+ \end{matrix} \right\}$ telles que $h'^+ = \frac{h^+}{h_1}$, $\rho'^+ = \frac{\rho^+}{\rho_1}$

Type A : $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

a - auteurs russes, EBERT et ONO : D est le point d'anisotropie A (c'est aussi le point de Dar Zarrouk).

$$A \left\{ \begin{array}{l} h'^+ = \sqrt{(1 + \nu\mu) \left(1 + \frac{\nu}{\mu}\right)} \\ \rho'^+ = \sqrt{\frac{1 + \nu\mu}{1 + \nu/\mu}} \end{array} \right.$$

La règle de substitution qui définit A est la règle d'anisotropie ou de Dar Zarrouk :

$$A \left\{ \begin{array}{l} S^+ = S_1 + S_2 \\ T^+ = T_1 + T_2 \end{array} \right.$$

b - MAILLET (C.G.G.) : le point auxiliaire D est le point H ou point de Hummel :

$$H \left\{ \begin{array}{l} h'^+ = 1 + \nu \\ \rho'^+ = \frac{1 + \nu}{1 + \nu/\mu} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{c'est-à-dire le point défini} \\ \text{par la règle de substitution} \\ \text{de Hummel :} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} h^+ = h_1 + h_2 \\ S^+ = S_1 + S_2 \end{array} \right.$$

c - ORELLANA (1966) :

$$O_R \begin{cases} h'_+ = \mu + \nu \\ \rho'_+ = \mu \end{cases} \quad \text{c'est-à-dire la règle.....} \quad \begin{cases} \rho_+ = \rho_2 \\ S_+ = S_1 + S_2 \end{cases}$$

Ces différents points sont représentés sur la figure 4 - type A.

Type H : $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ (cf figure 4 - type H)

a - auteurs russes, ONO, MAILLET : D est le point H ci-dessus, défini par la règle de Hummel.

b - ORELLANA : D est le même point O_R que pour le type A.

Type K : $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ (cf figure 4 - type K)

a - auteurs russes : D est le point DA (Displaced anisotropy)

$$DA \begin{cases} h'_+ = \varepsilon_1 \sqrt{(1+\nu\mu)(1+\nu/\mu)} \text{ avec } \varepsilon_2 = 1 \\ \rho'_+ = \varepsilon_2 \sqrt{\frac{1+\nu\mu}{1+\nu/\mu}} \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_1(\lambda) \\ \lambda = \frac{\sqrt{(1+\nu\mu)(1+\nu/\mu)}}{1+\nu} \end{cases}$$

Le point DA est obtenu par glissement horizontal du point A vers la droite sur une distance correspondant à ε_1 .

$$\begin{cases} h_+ = \varepsilon_1 (h_1 + h_2) \\ S_+ = \varepsilon_1 (S_1 + S_2) \end{cases}$$

b - ONO : c'est le point O_N

$$O_N \begin{cases} h'_+ = \varepsilon_1 \sqrt{(1+\nu\mu)(1+\nu/\mu)} \\ \rho'_+ = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{1+\nu\mu}{1+\nu/\mu}} \end{cases} \quad \text{avec la règle} \quad \begin{cases} S_+ = S_1 + S_2 \\ T_+ = \varepsilon_1^2 (T_1 + T_2) \end{cases}$$

c - MAILLET : c est le point M_1 tel que :

$$\begin{cases} 1 \leq \varepsilon_1 \leq 1,5 \\ 0,8 \leq \varepsilon_2 \leq 1 \end{cases} \quad \text{avec la règle} \quad \begin{cases} S_+ = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} (S_1 + S_2) \\ T_+ = \varepsilon_1 \varepsilon_2 (T_1 + T_2) \end{cases}$$

Type Q : $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ (Fig. 4 - type Q)

a - auteurs russes et ONO : c'est le point DH (Displaced Hummel)

$$DH \begin{cases} h'_+ = \frac{1}{\chi} (1 + \nu) \\ \rho'_+ = \frac{1}{\chi} \frac{(1 + \nu)}{1 + \nu/\mu} \end{cases} \quad \text{avec la règle} \quad \begin{cases} S_+ = S_1 + S_2 \\ h_+ = \frac{1}{\chi} (h_1 + h_2) \end{cases}$$

avec $\chi = \chi(\mu, \nu)$

b - MAILLET : c'est le point M_2

$$M_2 \begin{cases} h'_+ = \varepsilon_1 (1 + \nu) \\ \rho'_+ = \varepsilon_2 \left(\frac{1 + \nu}{1 + \nu / \mu} \right) \end{cases}$$

Les différents points peuvent être groupés dans le tableau suivant :

Auteurs Types	Auteurs russes	ONO	MAILLET	ORELLANA
A	A	A	H	O_R
H	H	H	H	O_R
K	DA	ON	M_1	
Q	DH	DH	M_2	

2 - Ces tests ont été faits en interprétation sur cas exacts, en faisant abstraction de l'usage du ρ_2 apparent

Nous avons utilisé comme courbes exactes des courbes "3 terrains", tirées du recueil russe d'OGILVI et KHMELEVSKOJ et de celui d'ORELLANA et MOONEY. Nous ferons remarquer au lecteur que ce dernier catalogue est supérieur à ceux parus antérieurement, tant par la qualité des tracés que par le nombre plus grand des cas étudiés. Les deux auteurs ORELLANA et MOONEY proposent en effet 912 courbes "3 terrains" et 480 courbes "4 terrains".

Les courbes étudiées appartiennent aux quatre familles : A, H, K et Q.

Les points auxiliaires utilisés dans un cas donné sont désignés par les lettres suivantes :

$\left. \begin{array}{l} - C_0 \\ - C_1 \\ - C_\infty \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{point auxiliaire de l'abaque CAGNIARD approprié} \\ \text{(respectivement : } \rho_3 = 0 \\ \rho_3 = \rho_1 \\ \rho_3 = \infty \text{)} \end{array}$

- K : point auxiliaire de l'abaque unique de Koefoed

- R : point auxiliaire des abaques russes (c'est-à-dire le point A, H, DA ou DH, suivant le cas) et éventuellement :

- O_R : point auxiliaire d'ORELLANA (pour un type A ou H)

- O_N : point auxiliaire d'ONO (pour un type K).

Tous ces points donnent ce que l'on peut appeler "un nuage" de points auxiliaires pour une valeur déterminée de (ρ_2, h_2) . A ce nuage nous avons superposé "l'arc de Koefoed". Cet auteur, dans son article paru en 1960, précise la marche à suivre pour obtenir l'arc.

On détermine tout d'abord la croix à gauche à l'aide de l'abaque universel "2 terrains". Utilisant toujours ce même abaque, on trace le lieu des positions possibles de la croix à droite ; on cherche donc la coïncidence partielle de la partie droite de la courbe expérimentale avec des

courbes de l'abaque "2 terrains". On peut réaliser une coïncidence plus ou moins grande d'une courbe de cet abaque avec la partie droite de la courbe étudiée ; cette coïncidence se traduit, sur le graphique, par un petit segment (ou encore ce petit segment représente les positions de la croix à droite pour une courbe de l'abaque universel coïncidant avec la partie droite de la courbe expérimentale). Si l'on joint tous les petits segments, on obtient un arc qui n'est autre que "l'arc de Koefoed" (en tireté sur les exemples). Dans la recherche de ce lieu, il est une position de la croix à droite pour laquelle la partie droite de la courbe étudiée coïncide le plus longtemps possible avec une courbe de l'abaque universel "2 terrains" ; cette position est entourée par un carré.

Les paramètres ρ_2/ρ_1 et h_2/h_1 des courbes théoriques étudiées correspondent aux valeurs suivantes (Fig. 13 et 14).

— Type A et K

$$\begin{cases} \rho_2/\rho_1 = 19, 5, 5, 7/3, 3/2 \\ h_2/h_1 = 3, 3, 1, 1, 3 \end{cases}$$

— Type H et Q

$$\begin{cases} \rho_2/\rho_1 = 3/7, 3/7, 0,2, 1/9, 0,2 \\ h_2/h_1 = 1, 5, 1, 2, 3 \end{cases}$$

Les points proposés par MAILLET n'ont pas été représentés ; les termes correctifs dont il se sert ne sont pas précisés dans l'ouvrage de KUNETZ.

Premières conclusions de ces tests

1 - Allure des "arcs de Koefoed"

Nous faisons remarquer tout de suite au lecteur que les paramètres (ρ'_2, h'_2) choisis pour cette étude ont été pris dans une "zone moyenne" des abaques ($1 \leq h'_2 \leq 5$). Nous verrons plus loin qu'il y a lieu de distinguer plusieurs zones dans les abaques auxiliaires.

Les "arcs de Koefoed" ont deux directions différentes suivant les types de courbes :

- une direction voisine de 45° pour les cas A et H (c'est-à-dire pour $\rho_3 > \rho_2$) ;
- une direction moins bien définie, voisine de 60° pour les cas K et Q (c'est-à-dire pour $\rho_3 < \rho_2$). (Fig. 8).

2 - Position relative du "nuage" de points auxiliaires et de "l'arc de Koefoed"

Le "nuage" coïncide en première approximation avec "l'arc de Koefoed". Les points auxiliaires proposés par les auteurs des deux écoles sont donc sur un même lieu et devraient fournir des solutions équivalentes.

5 - Nous nous sommes placés dans une "zone moyenne", c'est-à-dire pour des valeurs de h_2 comprises entre 1 et 5. Il est évident que dans la partie droite de l'abaque (c'est-à-dire correspondant à des valeurs très grandes de l'épaisseur du 2ème terrain) les différents points auxiliaires viennent se confondre.

Prenons par exemple le type A. Le point auxiliaire proposé par les Russes est le point A, celui de MAILLET est le point H, celui d'ORELLANA O_R . Pour des valeurs très faibles du rapport h_2/h_1 les points A, H, O_R sont presque confondus ; le triangle d'anisotropie est très petit. Quand h_2 devient très grand les trois points A, H et O_R viennent presque se confondre, le triangle d'anisotropie est à nouveau très petit.

4 - Abaque d'ORELLANA

Le point auxiliaire O_R proposé par ORELLANA peut se calculer ou être tiré d'un abaque. Cet abaque est, en effet, très facilement bâti ; un point de cet abaque a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x : \mu + \nu \\ y : \mu \end{cases}$$

La courbe $\rho_2/\rho_1 = \mu = C^{te}$ est une droite horizontale. La courbe $h_2/h_1 = \nu = C^{te}$ est asymptote à la droite de pente 1 passant par l'origine (1, 1) et à la droite $x = \nu$. Son point d'intersection avec la droite $y = 1$ a pour abscisse : $\nu + 1$. Il est facile de voir que cette courbe $\nu = C^{te}$ est une courbe unique (fig. 11).

Remarque

Nous reviendrons un peu plus loin sur cette distinction de zone à l'intérieur d'un même abaque.

En faisant ces tests nous n'avons pas tenu compte de l'estimation de la résistivité ρ_2 du 2ème terrain. La procédure admise par tous les auteurs est bien connue (fig. 12) ; après avoir obtenu la coïncidence partielle à gauche et déterminé la position de la croix à gauche, nous lisons une valeur de ρ'_2 . Nous traçons alors à partir de la croix à gauche une courbe auxiliaire $\rho'_2 = C^{te}$ tirée d'un abaque auxiliaire approprié. Nous cherchons ensuite la coïncidence partielle à droite et le point d'intersection de la courbe de l'abaque auxiliaire et de la courbe "2 terrains" choisie nous donne la croix à droite.

En réalité, comme nous avons vu, c'est une erreur de parler de croix à droite. Il n'existe pas de croix à droite, mais bien un lieu de croix à droite "l'arc de Koefoed".

IV - DISCUSSION DE LA DIVERSITÉ DES PROCÉDURES PROPOSÉES PAR LA MÉTHODE DES COINCIDENCES PARTIELLES

1 - De la série des tests nous avons tiré deux conclusions principales :

- . existence d'un "arc moyen de Koefoed" ;
- . le "nuage de points auxiliaires" coïncide avec cet "arc moyen".

Considérons maintenant deux réseaux appartenant à deux abaques auxiliaires. Ces deux abaques sont choisis de façon qu'ils correspondent à un type de courbe donnée (par exemple si l'on a une courbe de type A, nous choisirons l'abaque auxiliaire russe relatif aux courbes A

et l'abaque CAGNIARD correspondant à $\rho_{3\infty}$. Les deux réseaux sont tels que les deux courbes ρ_2/ρ_1 , correspondant à la même valeur de ρ'_2 ont la même asymptote d'ordonnée ρ'_2 . Les deux courbes h_2/h_1 ont le même pied $(1 + h'_2)$ sur la droite $\rho_2/\rho_1 = 1$.

Soient D et D' les points représentatifs respectivement du 1er et du 2ème réseau, c'est-à-dire les (fig. 17) points auxiliaires (h_2, ρ_2) correspondants des deux réseaux. Le segment D D' petit dans les deux zones extérieures des abaques a toute son extension dans la zone moyenne. Nous avons vu, d'après les tests, que les différents points auxiliaires se trouvaient sur "l'arc moyen de Koefoed". De cette constatation, nous pouvons tirer une conclusion, deux abaques d'écoles différentes sont équivalents pour une interprétation donnée, s'ils ne diffèrent que par un segment D D' qui soit partout un élément de "l'arc moyen de Koefoed" pour le cas considéré.

- en pratique, cette règle est vérifiée ; les divergences sont sans portée pratique. Il suffit pour le voir de superposer deux abaques auxiliaires correspondant au même type de courbe de sondage électrique.

- en partant de la règle d'équivalence des abaques, il nous est possible d'unifier les deux abaques russes (A - H et K - Q).

Désignons par U le point auxiliaire proposé par KOEFOED et prenons deux courbes, de types A et H par exemple, ayant mêmes paramètres h_2/h_1 et ρ_2/ρ_1 , le point U se trouve à l'intersection des deux "arcs moyens de Koefoed" correspondants. Pour la courbe de type A, le point auxiliaire des auteurs russes est A, pour celle de type H c'est le point DA (fig. 18). On peut donc substituer aux points A et DA le point unique U (fig. 19 et 20). On ferait de même avec les abaques de types K et Q (Fig. 18) : le point auxiliaire unique de ces deux abaques est le point de Koefoed (qui coïncide avec le DH des auteurs russes) (fig. 19).

L'abaque de KOEFOED donc, tout empirique qu'il se présente, confirme le rôle des "points mathématiques" A et H en ce sens que le point U empirique se trouve toujours sur la droite A H (ou droite S). Cette droite S joue un rôle très important dans l'interprétation et les meilleurs auteurs ne manquent pas de le souligner (cf. KUNETZ, les auteurs russes repris par KELLER, etc.).

Cet abaque KOEFOED pourrait être repris et précisé à partir des données récentes ; il comporte quelques inexactitudes (en particulier les courbes h_2/h_1 devraient être décalées de 2 mm environ vers la gauche).

2 - Passons en revue les différents points auxiliaires et examinons leur position par rapport au point U

• point auxiliaire d'ORELLANA OR. Ce point n'est proposé que pour les courbes de type A et H (c'est-à-dire pour $\rho_3 > \rho_2$). La coïncidence partielle à gauche lui permet d'estimer une valeur de ρ_2 , qu'il prend pour la valeur du ρ_2 vrai. Après un travail graphique (dont une coïncidence partielle à droite) il calcule $h_2/h_1 = S \rho_2/h_1 - \rho_2/\rho_1^*$. Nous avons vu plus haut qu'il est possible de construire un abaque "ORELLANA" relatif aux types A et H. La méthode d'ORELLANA peut se classer parmi les diverses variantes de la méthode du point auxiliaire. Ce nouveau point, qui se trouve sur la droite S (il est facile de le voir) constitue une approximation valable.

* Pour plus de détails le lecteur peut se reporter à l'ouvrage d'ORELLANA-MOONEY : *Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding* - 1966.

. parmi les points auxiliaires proposés par MAILLET, il en est un particulièrement mal placé : c'est le point M_2 relatif au type Q. KUNETZ, d'ailleurs, reconnaît que l'approximation retenue par MAILLET est loin d'être satisfaisante. Les autres points (H et M_1) par contre peuvent être utilisés.

. le point auxiliaire O_N proposé par ONO (pour le type K) se trouve sur la droite S. Il constitue également une approximation relativement satisfaisante.

. l'abaque unifié russe tel que nous le proposons est "équivalent" à première vue avec l'abaque KOEFOED.

. enfin considérons les trois abaques CAGNIARD. L'abaque $\rho_3 \infty$ correspond aux types A et H et l'abaque $\rho_3 = 0$ aux types K et Q. Superposons, par exemple l'abaque de type A des auteurs russes et l'abaque $\rho_3 \infty$ de CAGNIARD. Les segments DD', nuls dans la région $h_2/h_1 = 24$, sont plus importants dans la zone moyenne ($1 \leq h_2 \leq 5$) et ont une direction bien définie, voisine de 45° (il en serait de même des abaques de type Q et $\rho_3 = 0$). Une première remarque s'impose, l'abaque CAGNIARD $\rho_3 = \rho_1$ est superflu. Une deuxième remarque est peut-être plus fondamentale.

. si une classification en trois valeurs de ρ_3/ρ_1 était peut-être fondée, étant donné la nature du matériel à analyser (courbes C.G.G.), il reste qu'elle ne constitue ici qu'une distinction schématique a priori.

Les tests auxquels on a procédé, à la suite de KOEFOED, montrent que ce qui compte en fait c'est le sens du rapport ρ_3/ρ_2 et qu'il faut bien fondamentalement distinguer dans les "3 terrains" les cas finalement montants des cas finalement descendants.

A cet égard, la considération de figures synthétiques, telles que Figures 15 et 16, est très instructive. Utilisant les nombreuses courbes calculées aujourd'hui disponibles, on a construit pour un même couple de valeurs ($h_2/h_1 - \rho_2/\rho_1$) et diverses valeurs de ρ_3/ρ_1 les arcs de KOEFOED, lieux de la croix à droite. On obtient bien essentiellement deux faisceaux, ou deux "arcs moyens", correspondant l'un à $\rho_3/\rho_2 > 1$, l'autre à $\rho_3/\rho_2 < 1$. Les points de convergence de ces deux faisceaux coïncident à peu près et ce point de coïncidence est le point de KOEFOED.

V - REMARQUES FINALES SUR L'EMPLOI DES PROCÉDURES DE COINCIDENCE PARTIELLE EN GÉNÉRAL

(simple rappel à titre de compléments et mise en garde).

1 - Estimation de l'équivalence dans l'interprétation

Dans tous les cas, la bonne estimation de la résistivité ρ_2 du deuxième terrain est une étape essentielle en interprétation, car on ne tire pas ρ_2 de l'abaque auxiliaire, mais seulement h_2 . Quand on recherche la coïncidence partielle de la partie gauche de la courbe de sondage électrique étudiée avec une courbe de l'abaque universel deux terrains, on lit une valeur du rapport ρ_2/ρ_1 . C'est cette valeur estimée de la résistivité ρ_2 du "2ème terrain" qui sera conservée jusqu'à la fin de l'étude de la courbe proposée.

Trois situations sont possibles :

- la valeur de ρ_2 peut être connue d'avance (résultats de géologie ou de sondages). Dans ce cas, on prend cette valeur pour ρ_2 .

- il se peut que la coïncidence partielle de la partie gauche de la courbe "3 terrains" étudiée se fasse assez loin avec une courbe de l'abaque universel "2 terrains" (c'est le cas si le deuxième terrain a une épaisseur grande par rapport à celle du premier terrain). Dans ce cas la détermination de ρ_2 se fait facilement.
- enfin, il se peut que la coïncidence partielle se fasse seulement sur une très petite portion. Il existe alors une incertitude dans l'interprétation dont il importe d'évaluer la nature.

La situation peut s'apprécier sur l'abaque auxiliaire à partir d'une distinction de celui-ci en régions (comme on se propose de le montrer dans un autre exposé). Pour cette étude, indiquons simplement qu'après avoir déterminé les paramètres (ρ_2 , h_2) du deuxième terrain on évaluera l'équivalence avec les nomogrammes de PYLAEV. Ceux-ci sont repris dans l'ouvrage de KELLER : *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. KELLER montre comment il n'est pas toujours possible d'obtenir une solution unique quand on interprète une courbe de sondage électrique "3 terrains" à partir de courbes de l'abaque universel "2 terrains". Les nomogrammes de PYLAEV (en fait ils sont construits pour les seules valeurs : $\rho_3 \infty$ type A - $\rho_3 = 0$ - type Q - $\rho_3 = \rho_1$ - types H et K) sont au nombre de quatre, un pour chaque type de courbes ; on peut y estimer la marge de variation de la conductance (pour les types A et H) et de la résistance transversale (types K et Q) pour laquelle la courbe de sondage électrique ne varie pas de 5%. Dans la partie droite les paramètres h_2/h_1 et ρ_2/ρ_1 auront deux bornes, inférieure et supérieure (domaine de l'équivalence limitée) ; dans la partie gauche des nomogrammes (h_2/h_1 faible) on n'aura plus un segment, mais une demi-droite (domaine de l'équivalence complète).

2 - Indication complémentaire sur la construction et l'interprétation des courbes "3 terrains" (ou n terrains) : usage du principe d'équivalence et des recueils de courbes :

La construction d'une courbe de sondage électrique "3 terrains" dont on a donné le principe à partir de courbes "2 terrains" est en fait améliorée si l'on dispose d'une collection de courbes "3 terrains" et si l'on se sert des règles d'équivalence.

Les paramètres des différents terrains étant fixés, on place la croix à gauche et la croix à droite (sa position est donnée soit par le calcul, soit par un abaque auxiliaire). A partir de la croix à gauche on trace la courbe de module $\mu = \rho_e / \rho_1$ (ρ_e étant le paramètre de la couche "équivalente" qui a remplacé les deux premiers terrains). Pour terminer le tracé de la courbe "3 terrains" désirée, on doit relier les deux tronçons en utilisant une courbe "3 terrains" d'un catalogue ayant des paramètres ν' et μ' aussi égaux que possible à $\nu = h_2/h_1$ et $\mu = \rho_2/\rho_1$: si ce n'est pas un cas exact, on choisira une courbe dont les paramètres μ' et ν' sont reliés à μ et ν par la relation d'équivalence appropriée au type soit :

$$\nu' = \frac{\nu \mu}{\mu} \quad \text{pour les types A et H "équivalence S"}$$

$$\nu' = \frac{\nu \mu}{\mu'} \quad \text{pour les types K et Q "équivalence T"}$$

Cette construction, valable pour "3 terrains", peut s'étendre au cas d'une courbe "4 terrains".

De même, on a envisagé jusqu'ici l'utilisation du seul abaque "2 terrains" pour l'interprétation de courbes de plus de "3 terrains". En fait, cette utilisation ne peut guère être appliquée valablement que pour des courbes de sondage électrique "3 terrains".

Il est préférable, quand on interprète des courbes de sondage électrique de plus de "3 terrains", d'utiliser des courbes théoriques "3 terrains" comme celles qui figurent dans le recueil d'ORELLANA et MOONEY.

Conclusion

Nous avons passé en revue les problèmes posés par la grande diversité des procédures proposées pour l'interprétation approximative des courbes de sondage électrique par la méthode des coïncidences partielles.

Pour cela nous avons d'abord réduit ces méthodes à une présentation commune sous forme d'abaques auxiliaires, type EBERT ou CAGNIARD. En s'inspirant d'une idée de KOEFOED, nous avons trouvé le moyen de rendre compte de la latitude exacte qui existe dans la fabrication de tels abaques.

Nous nous en sommes servis pour évaluer s'il peut ou non exister des différences significatives dans les résultats obtenus pour un cas donné, suivant que l'on a recours à telle ou telle procédure. Le résultat de ces comparaisons, c'est que les principales procédures discutées, pourvu qu'elles soient dans chaque cas correctement définies, ne doivent pas introduire dans les résultats des écarts autres que négligeables.

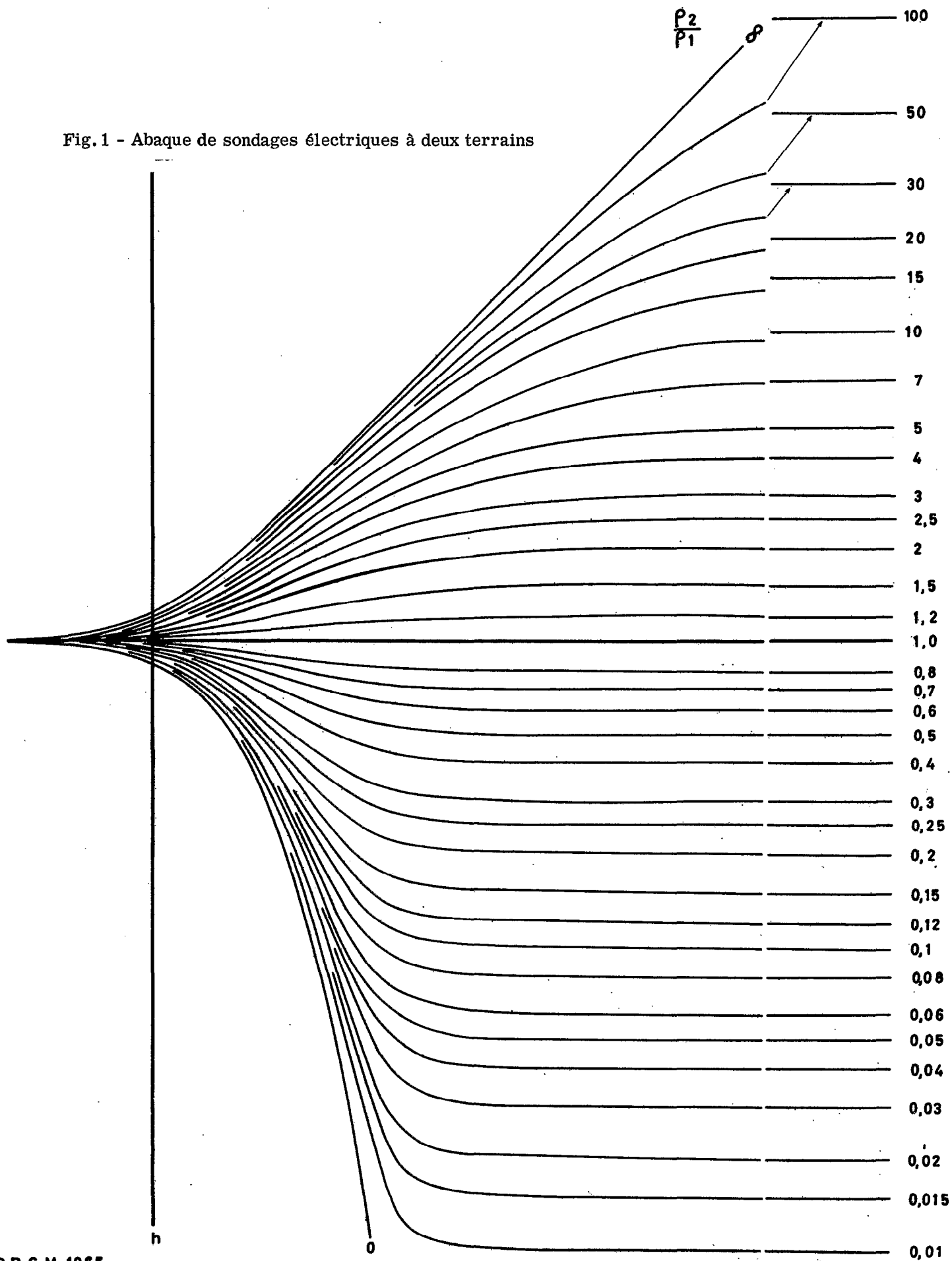
Par contre, dans les conditions classiques où ils se présentent, les problèmes d'équivalence peuvent avoir une influence capitale sur les résultats.

Bien que la méthode suivie permette également d'aborder ce problème, nous nous sommes bornés dans le présent exposé à donner, en complément, quelques indications utiles à ce sujet. de même que sur l'extension des procédures discutées au cas de l'étude de sondage électrique à plus de "3 terrains".

Bibliographie

- CAGNIARD (L.) - 1952 - Geophysical methods of locating ground water. Congrès sur l'hydrologie de la zone aride. Ankara - UNESCO.
- KELLER (G.) et FRISCHKNECHT - 1966 - *Electrical methods in Geophysical Prospecting. Galvanic Resistivity methods*. Pergamon press., pp. 144-176.
- KOEFOED (O.) - 1960 - A generalized Cagniard Graph for the interpretation of geoelectrical sounding data. *Geophysical Prospecting*, vol. 8, pp. 459-569.
- KUNETZ (G.) - 1966 - Principles of direct current resistivity prospecting. *Geoexploration monographs series*, n° 1. Gebrüder Bornträger, Berlin, pp.50-90.
- OGILVI (A.A.) et KAMELEVSKOJ (V.K.) - 1964 - *Sbornik zadach i uprjajnenij po Kursu elektrorazvedki*. Moscou.
- ORELLANA et MOONEY - 1966 - Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Madrid.
- ZODHY (A.) - 1965 - The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and its relationship to the Dar-Zarrouk parameters. *Geophysics*, vol. 30, n° 4, pp. 644-659.

Fig. 1 - Abaque de sondages électriques à deux terrains



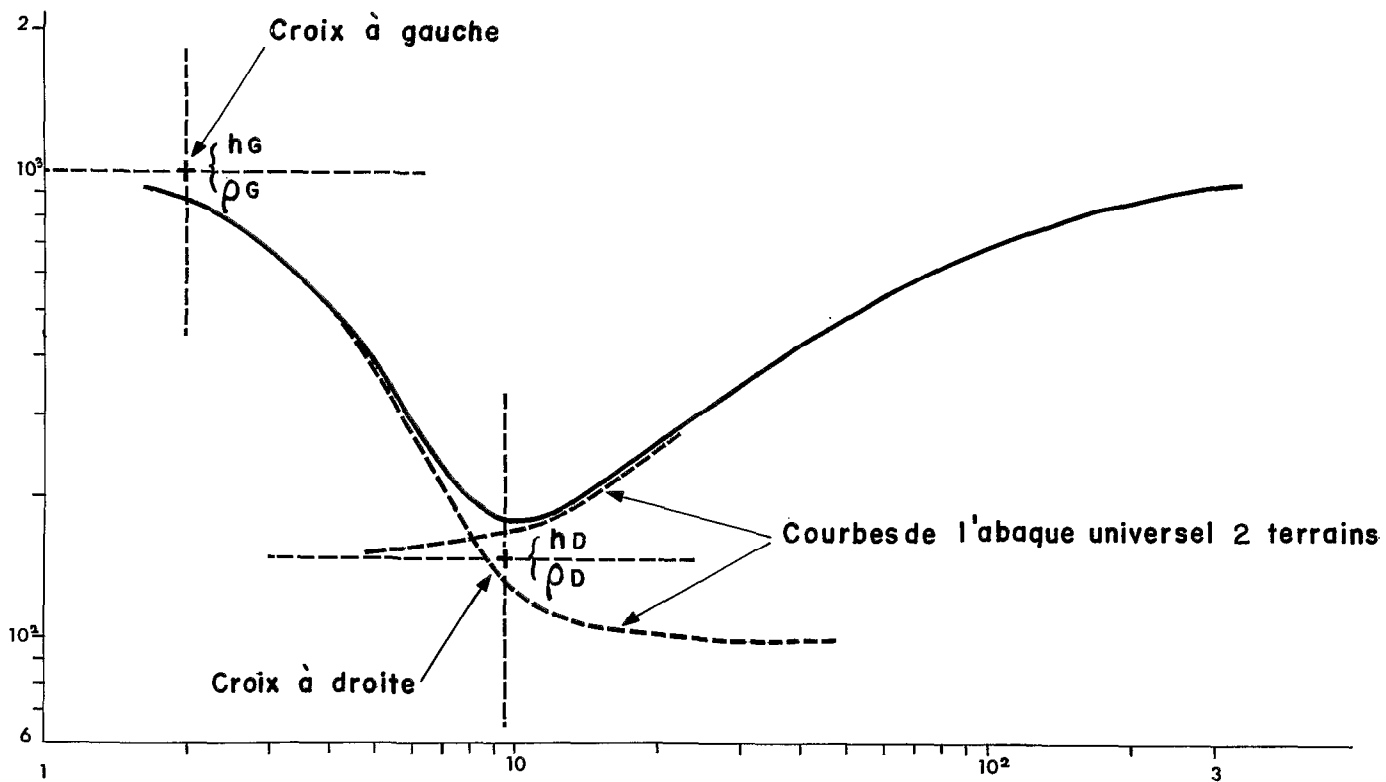
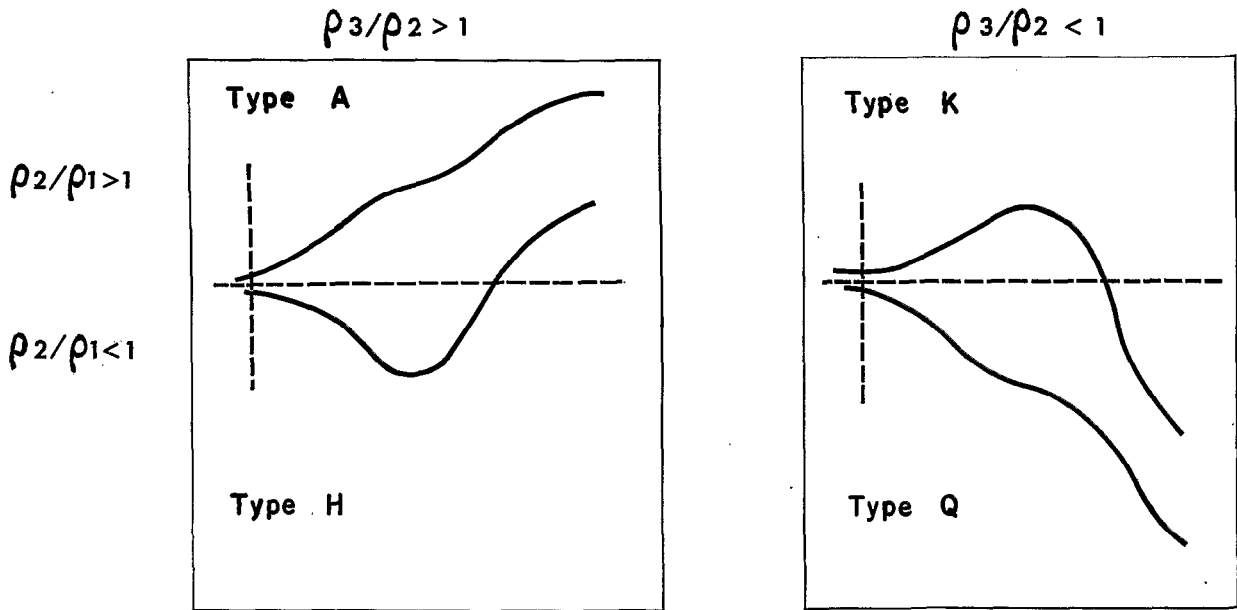
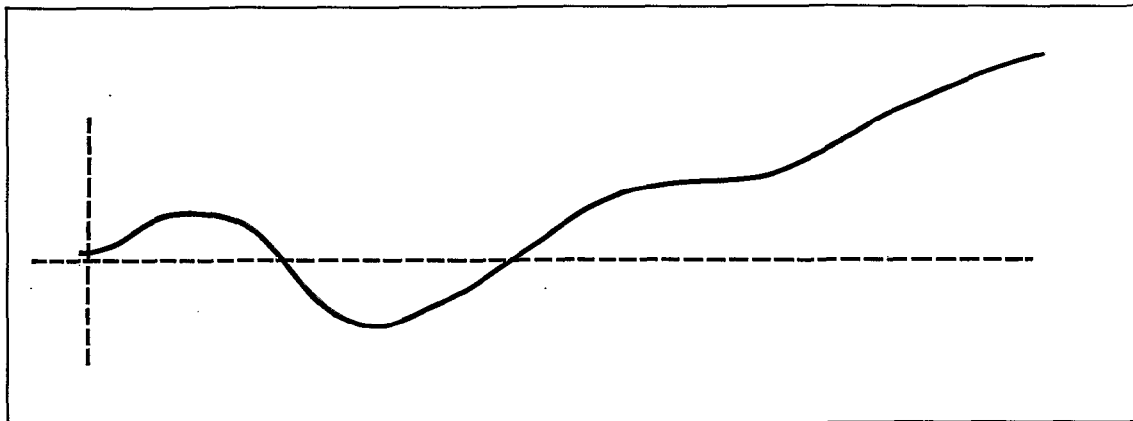


Fig.2 - Schéma des coïncidences partielles à gauche et à droite

1) Types simples 3 terrains



2) Types composites plus de 3 terrains



5. Terrains Type K . HA'

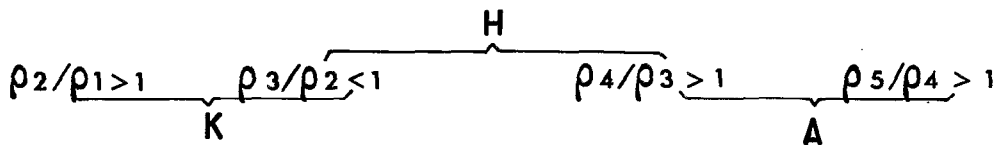


Fig.3 - Schéma des types A/H et K/Q

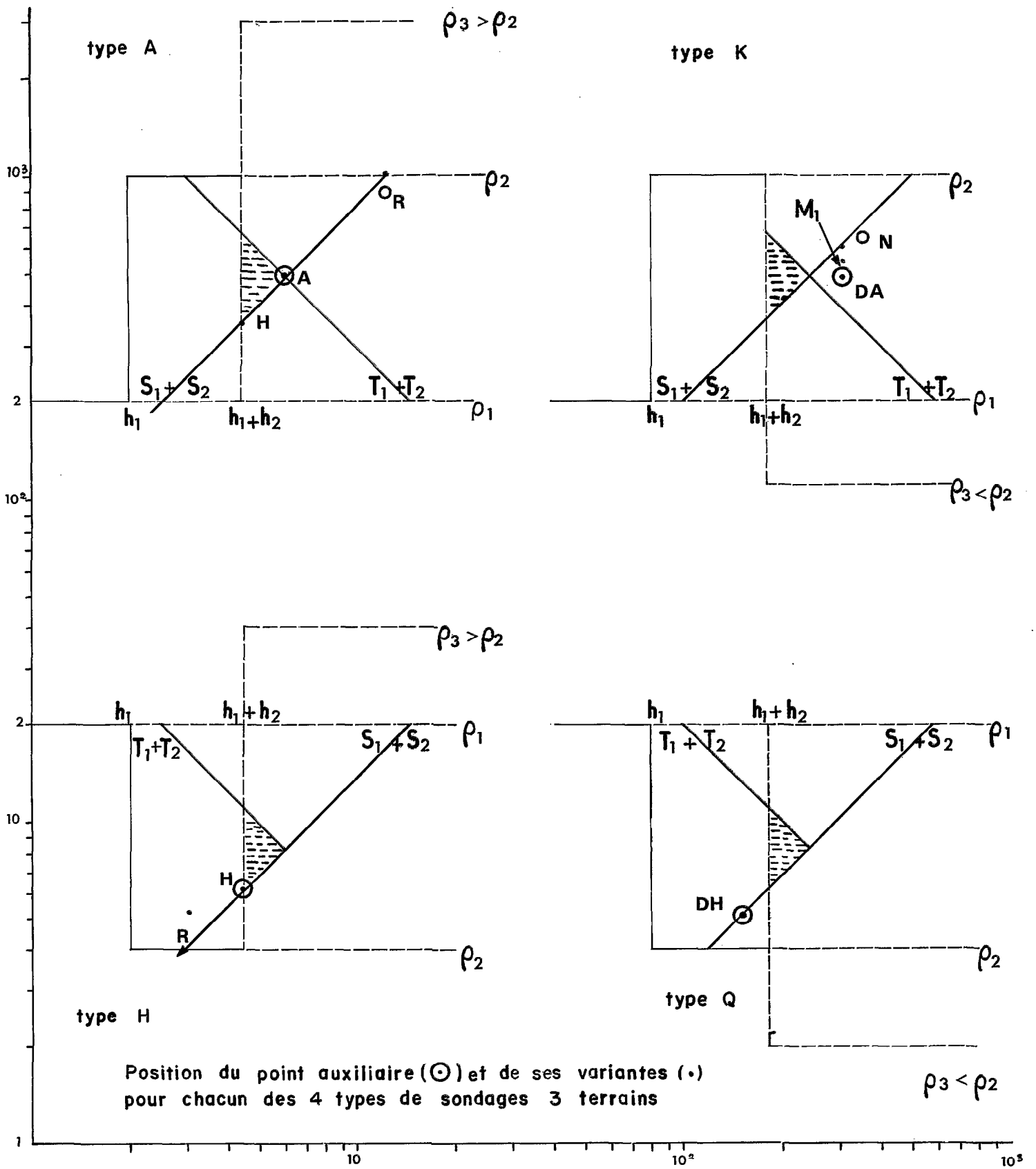


Fig. 4 - Position du point auxiliaire et de ses variantes pour chacun des 4 types de sondages 3 terrains.

Fig.5 - Abaques auxiliaires russes pour les types A et H

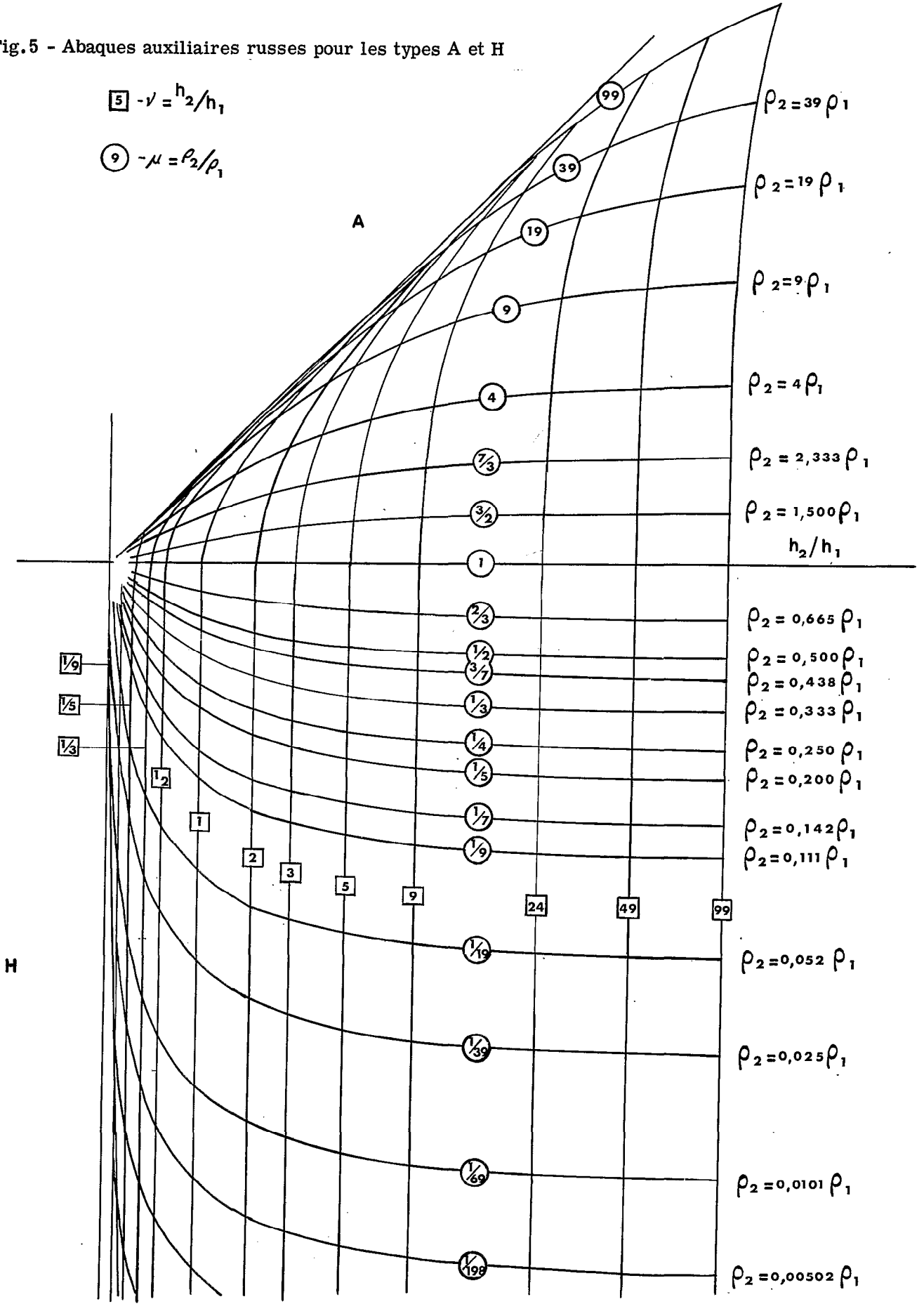
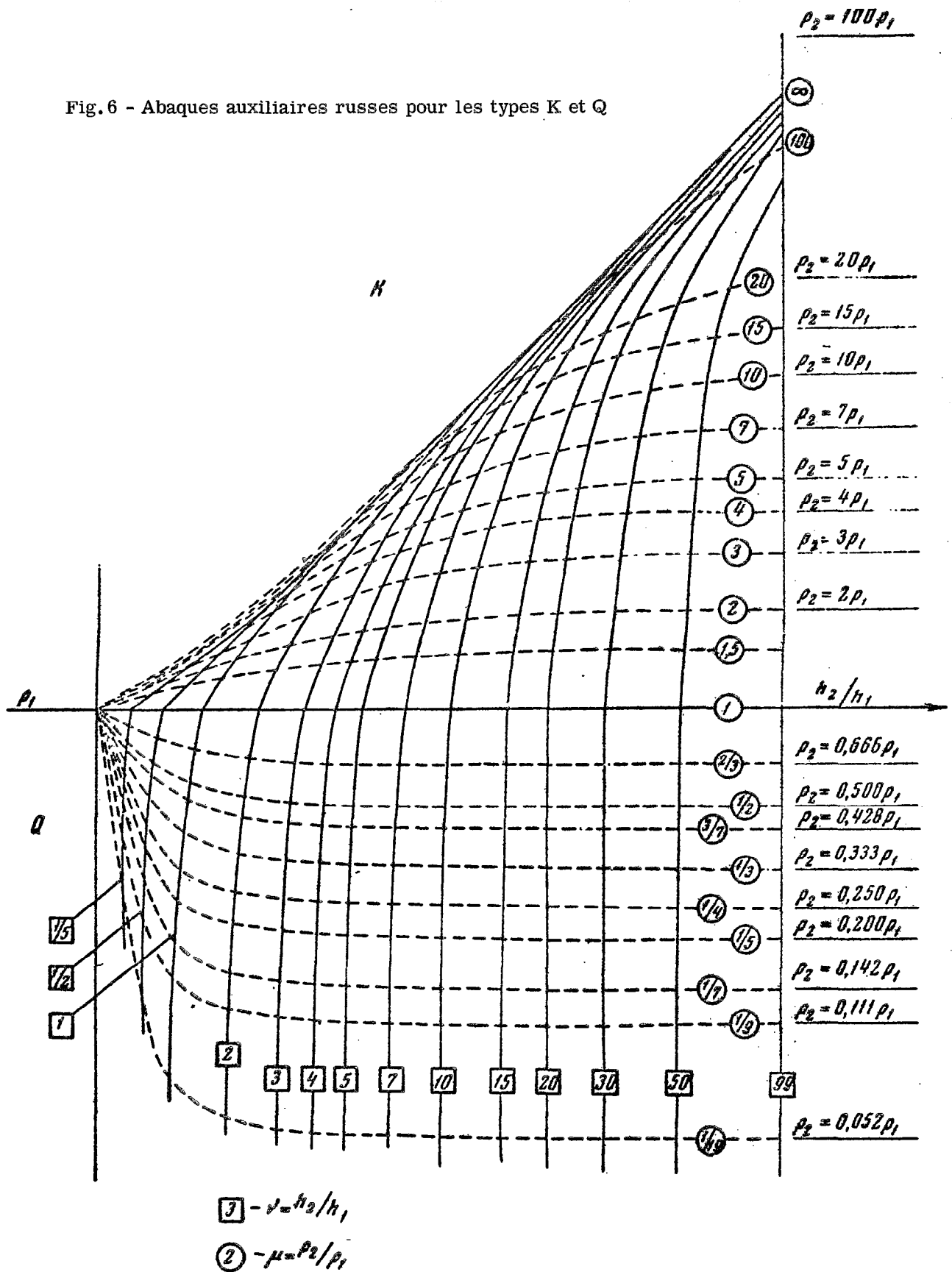


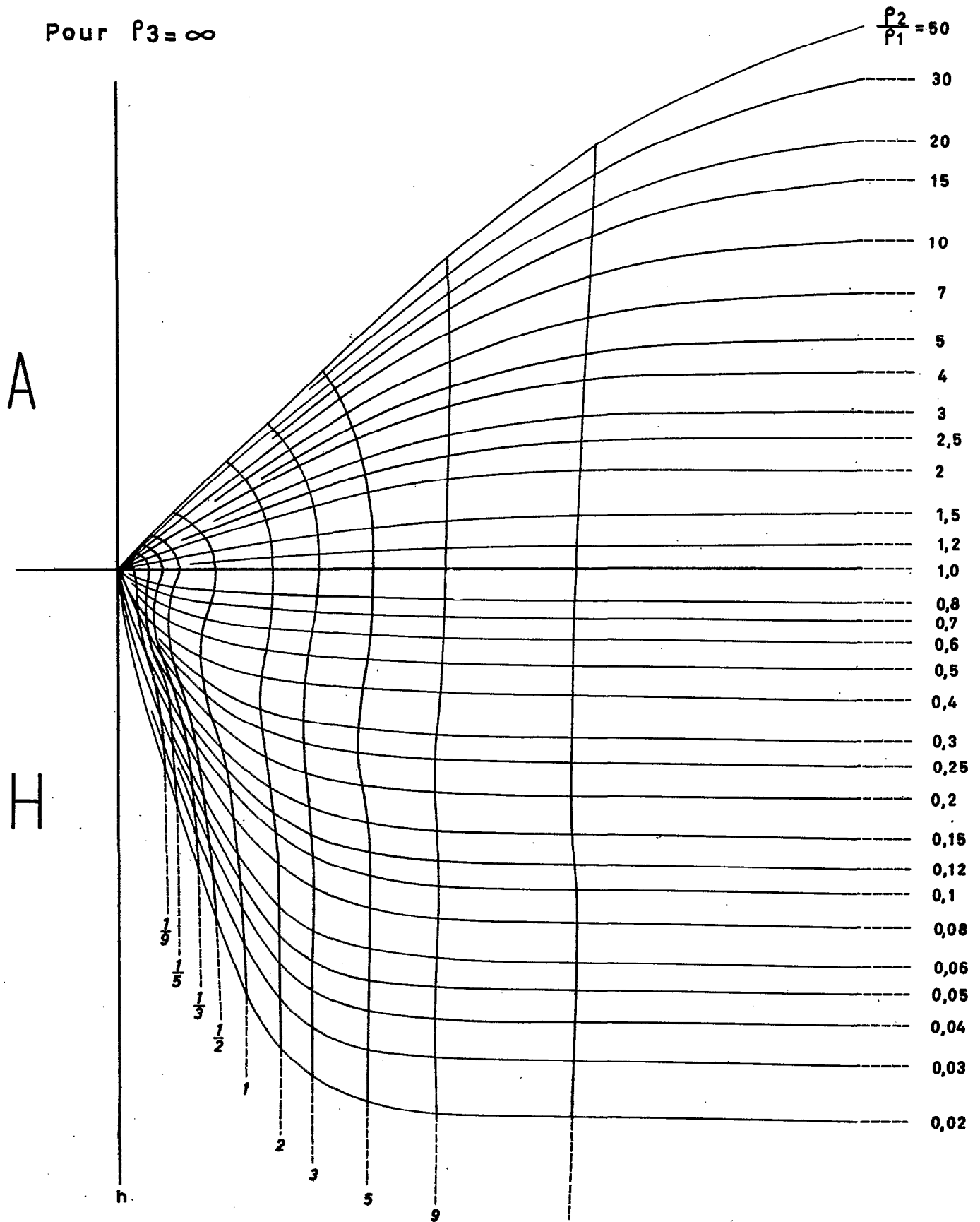
Fig. 6 - Abaques auxiliaires russes pour les types K et Q



LIEU DES CROIX A DROITE

Fig.7 - Abaque Cagniard

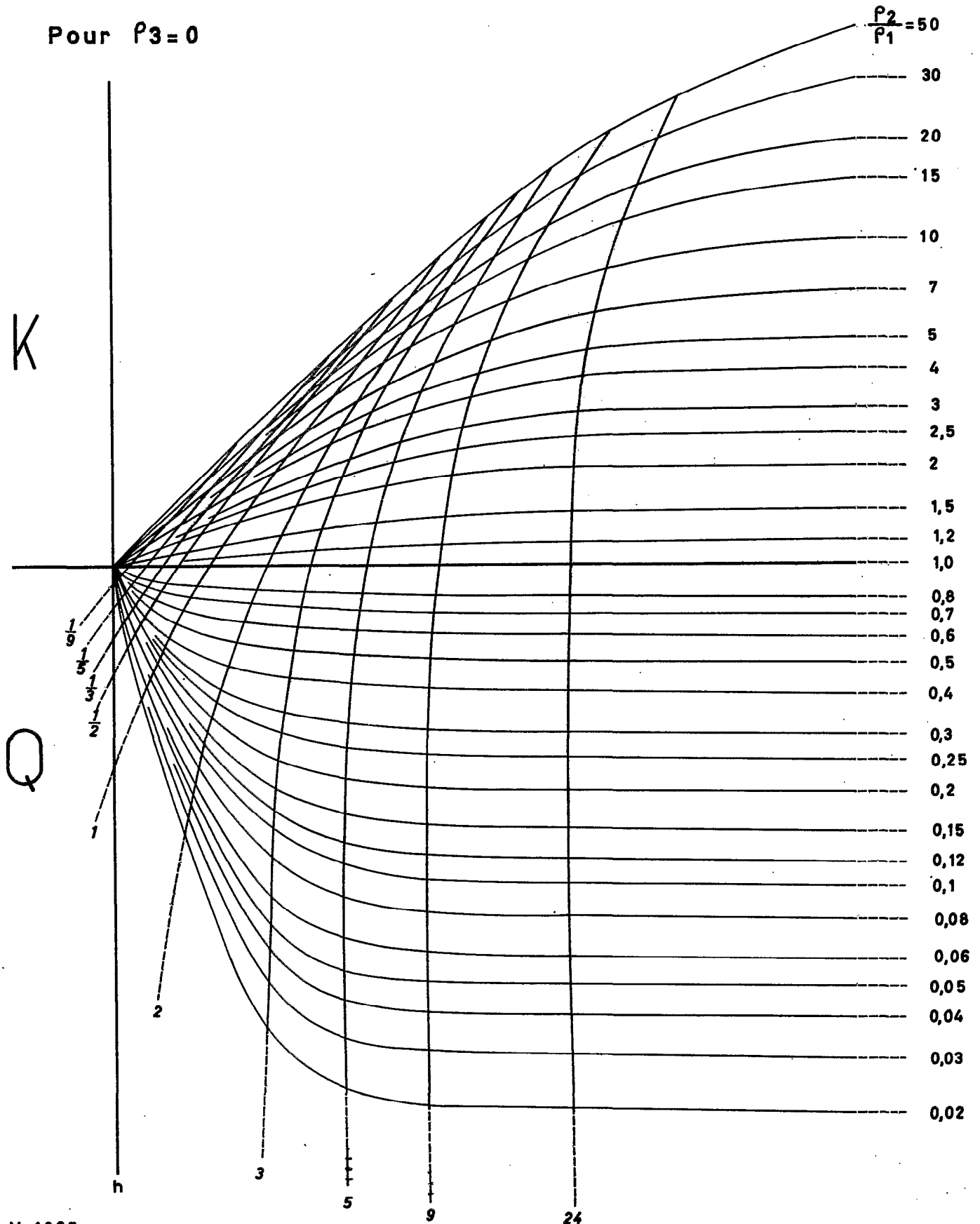
Pour $P_3 = \infty$



LIEU DES CROIX A DROITE

Fig.8 - Abaque Cagniard

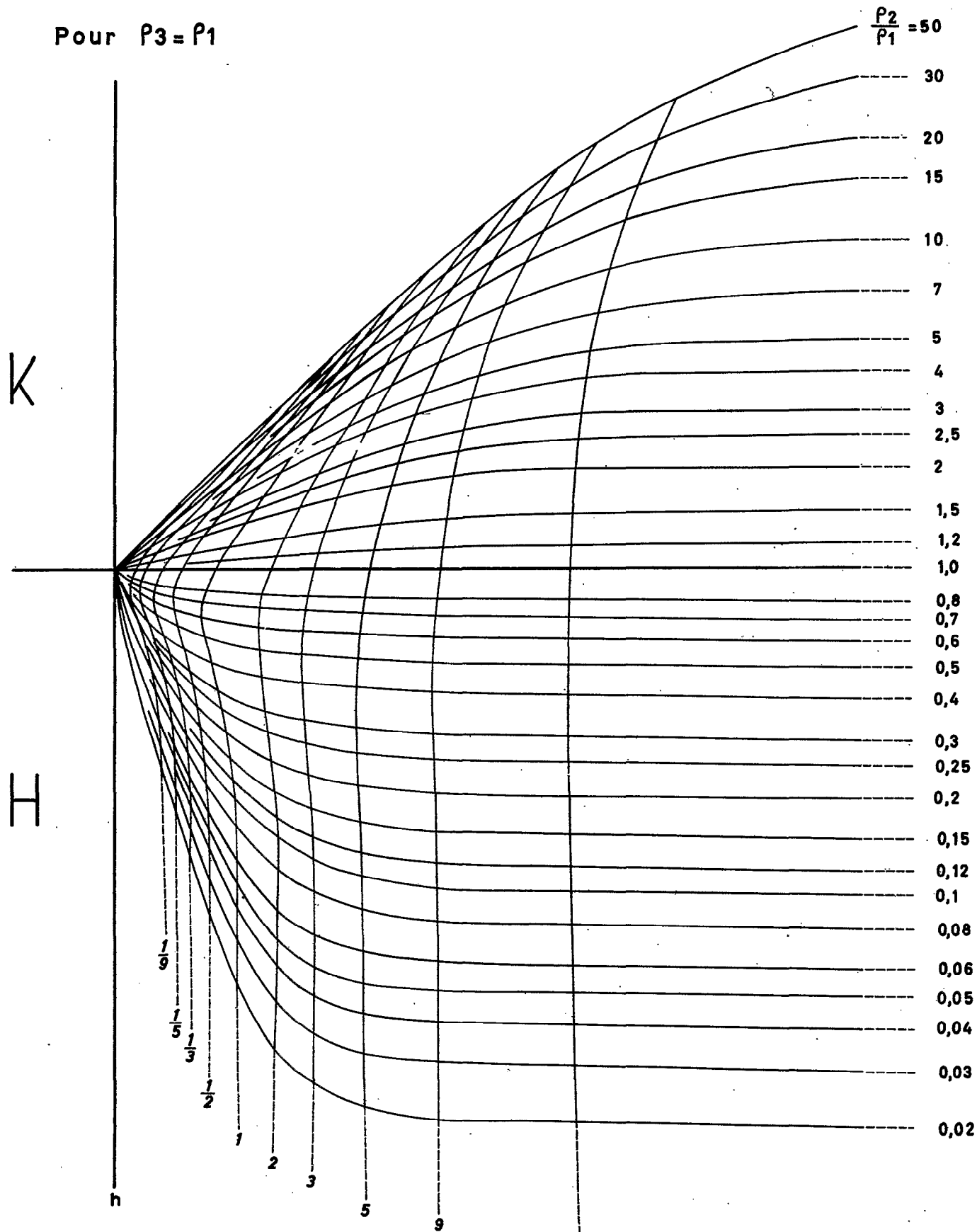
Pour $\rho_3 = 0$



LIEU DES CROIX A DROITE

Fig.9 - Abaque Cagniard

Pour $\rho_3 = \rho_1$



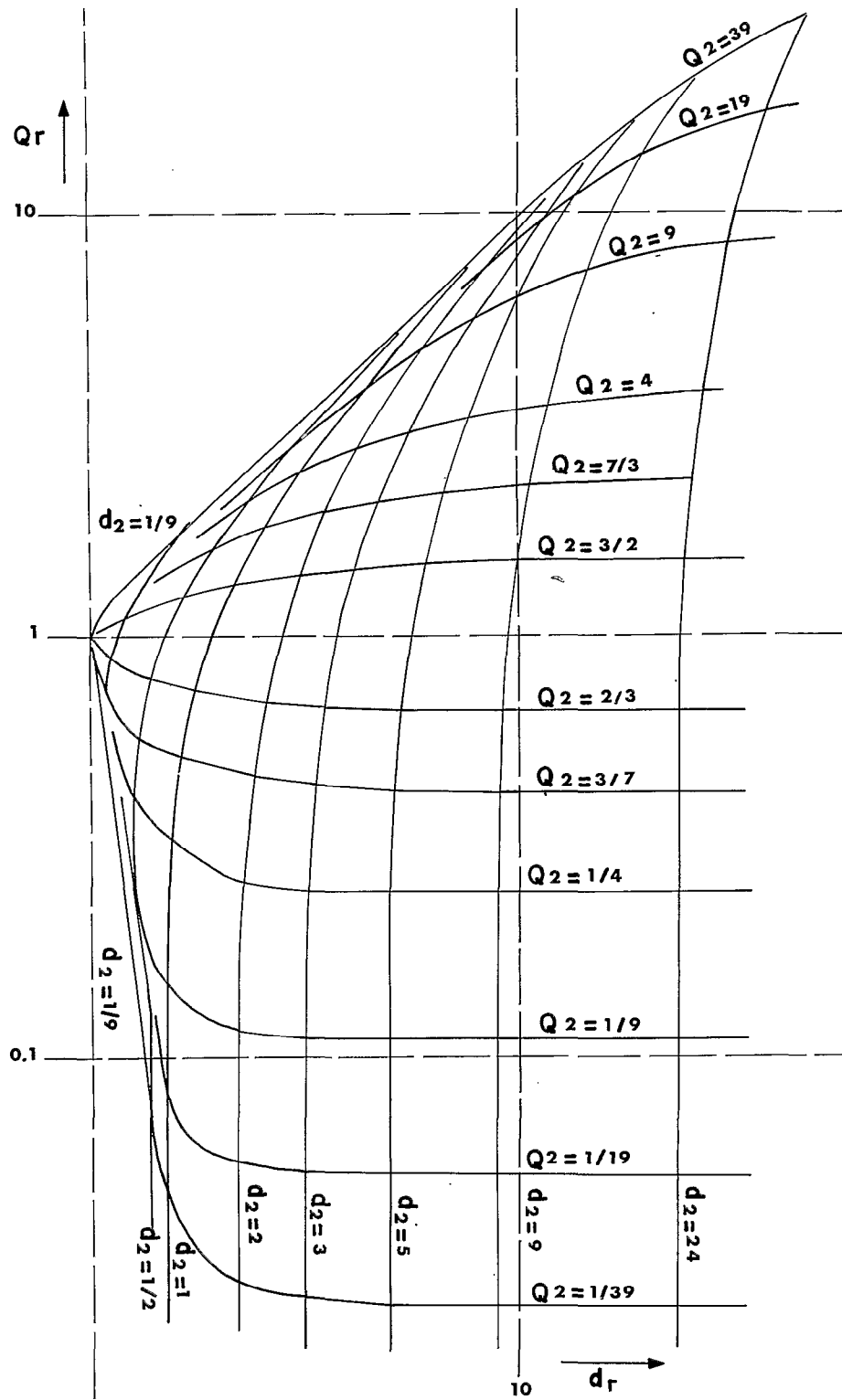
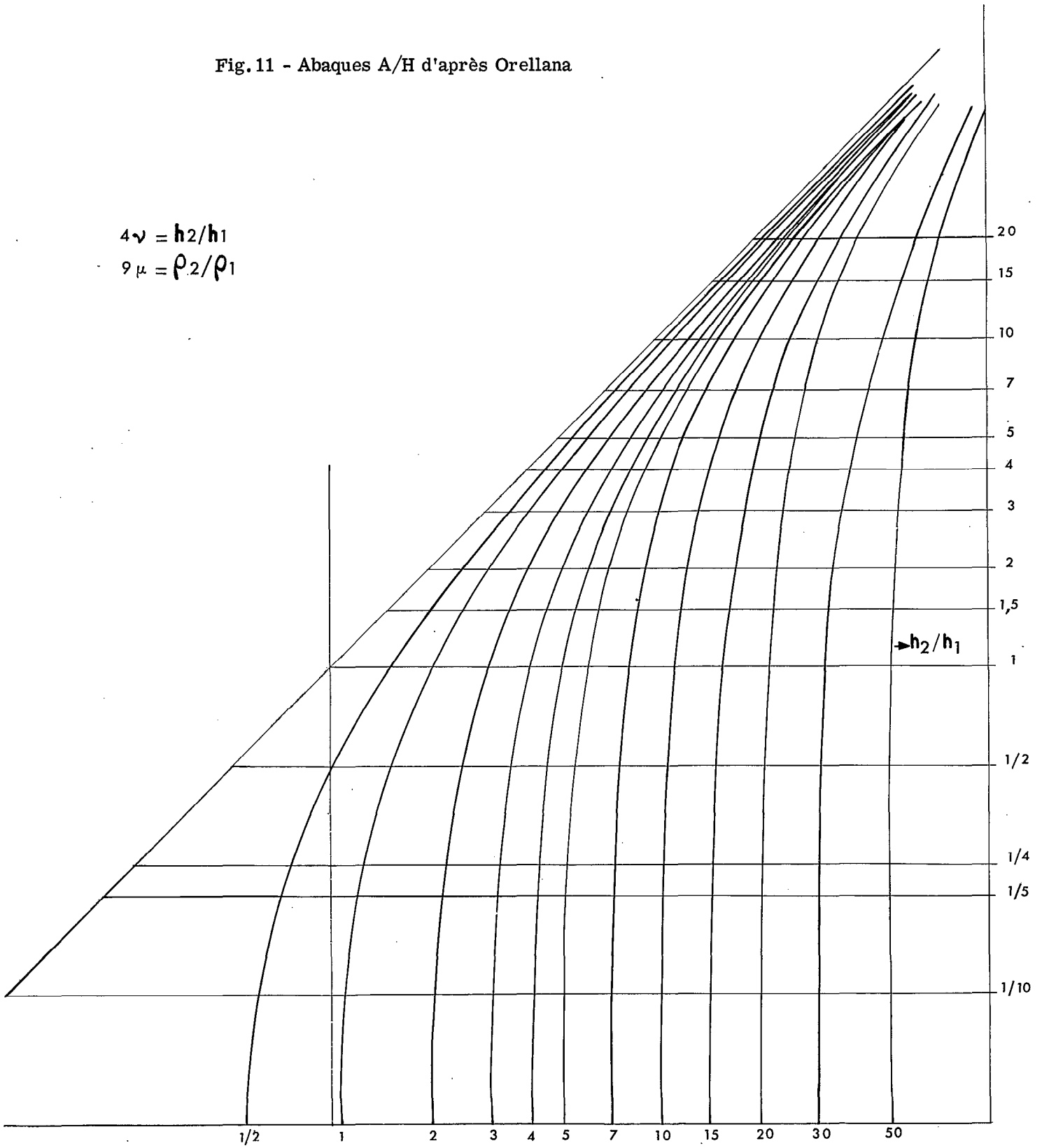


Fig. 10 - Abaque unique de Koefoed

Fig. 11 - Abaques A/H d'après Orellana

$$4\nu = h_2/h_1$$

$$9\mu = \rho_2/\rho_1$$



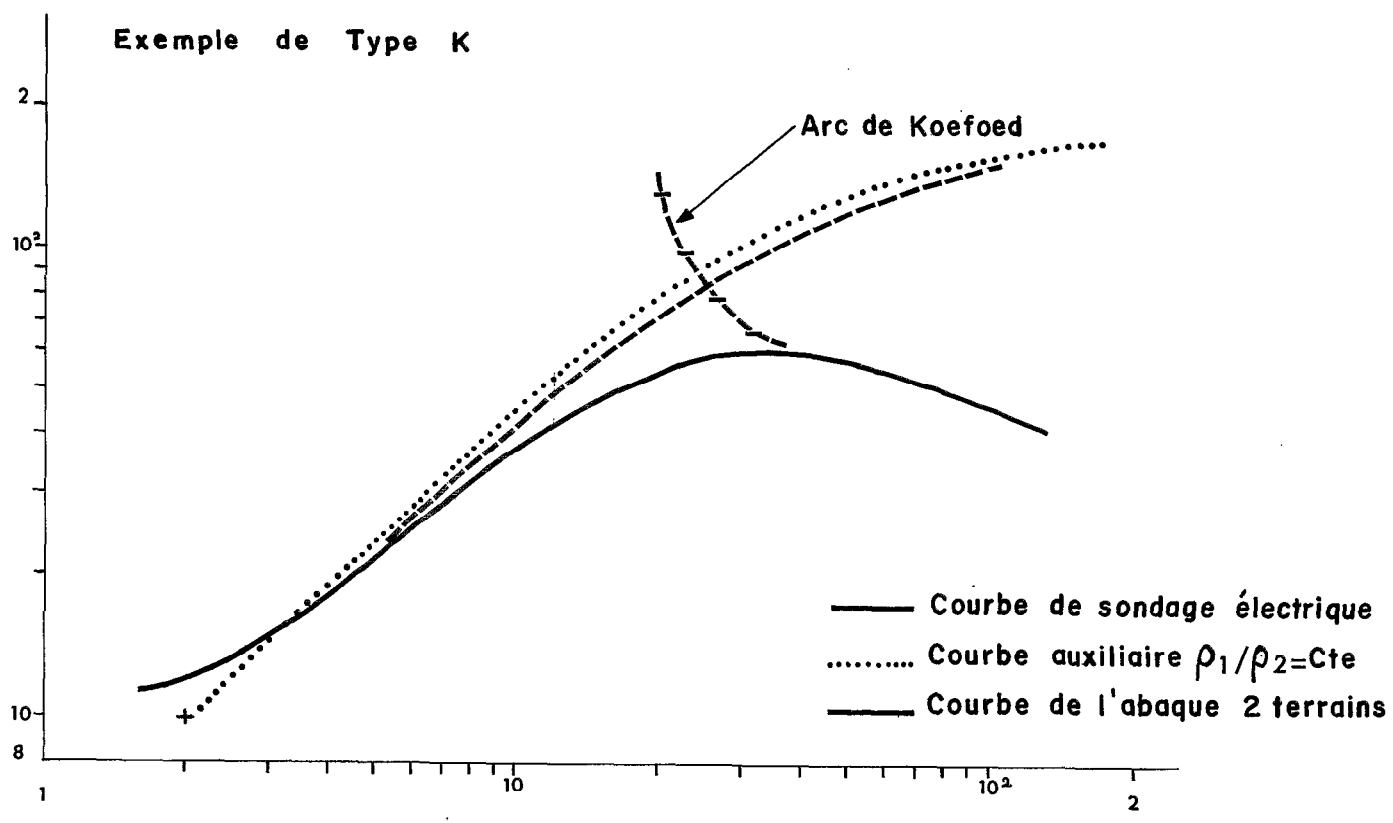


Fig. 12 - Schéma de position

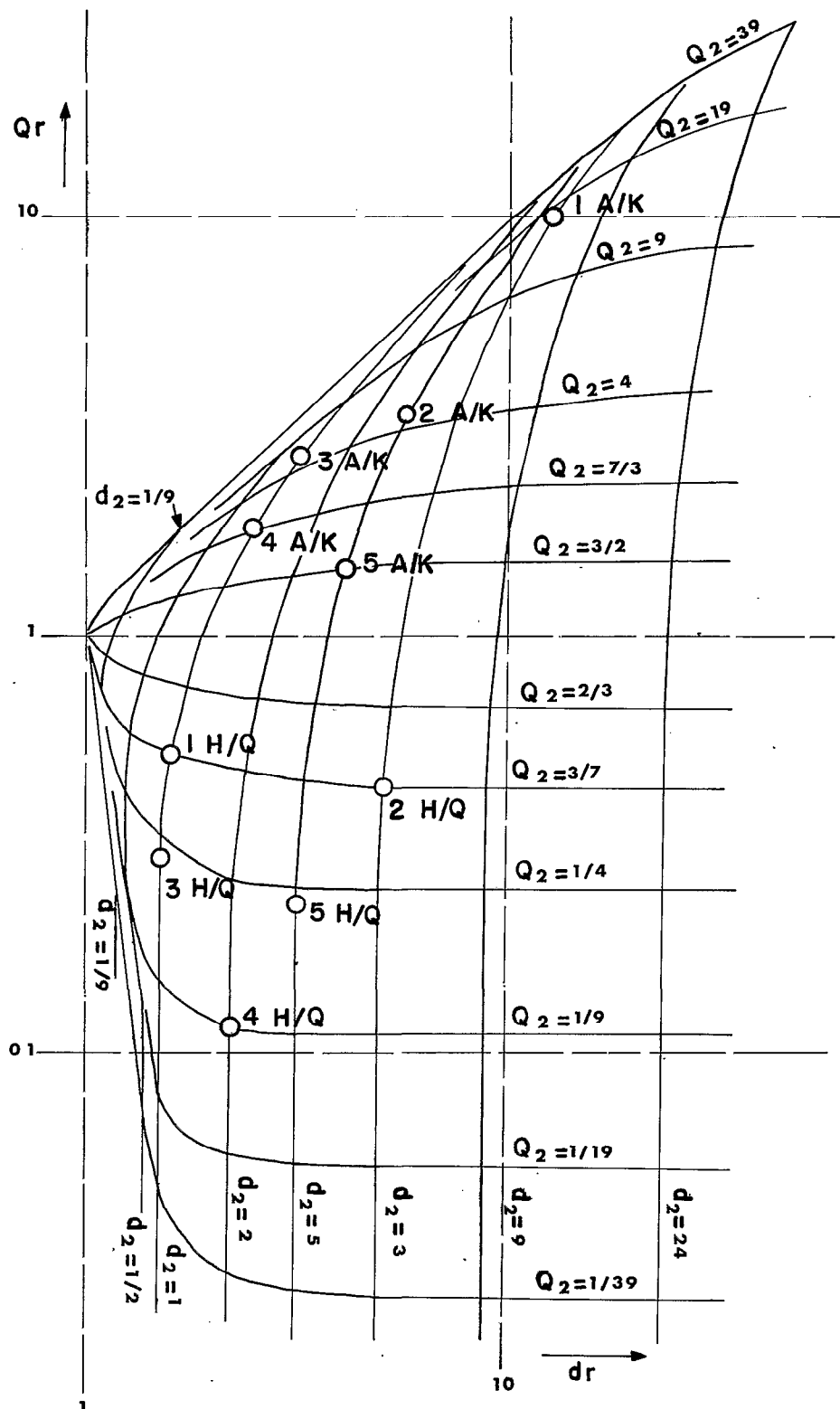
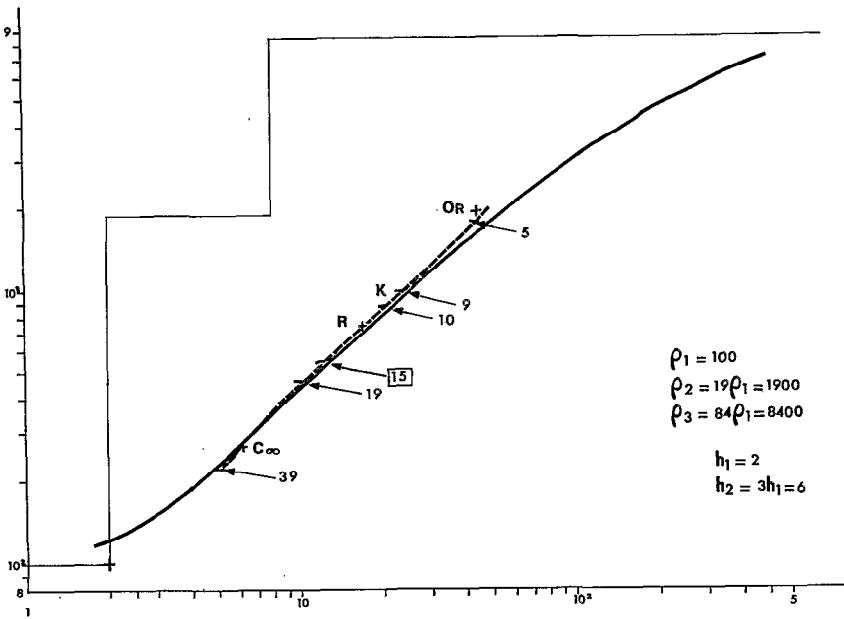
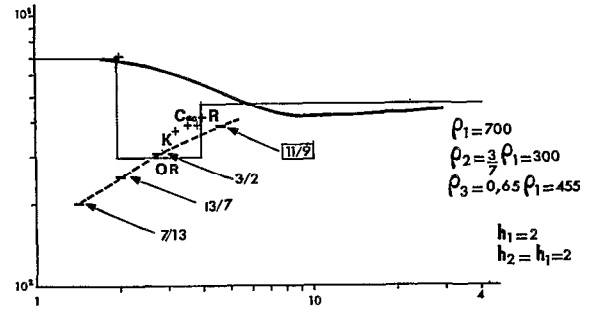


Fig.13 - Schéma de position des 10 exemples

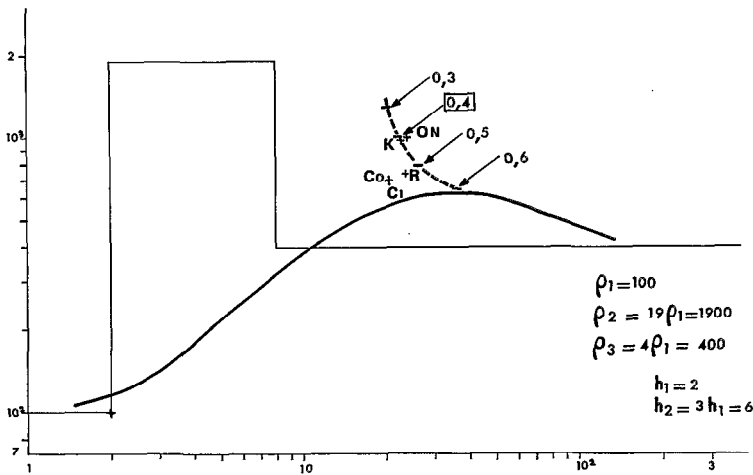
TYPE A



TYPE H



TYPE K



TYPE Q

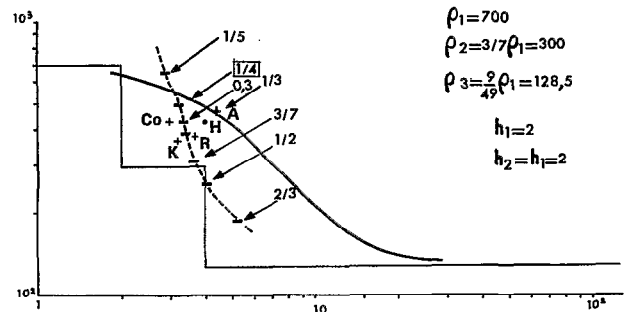
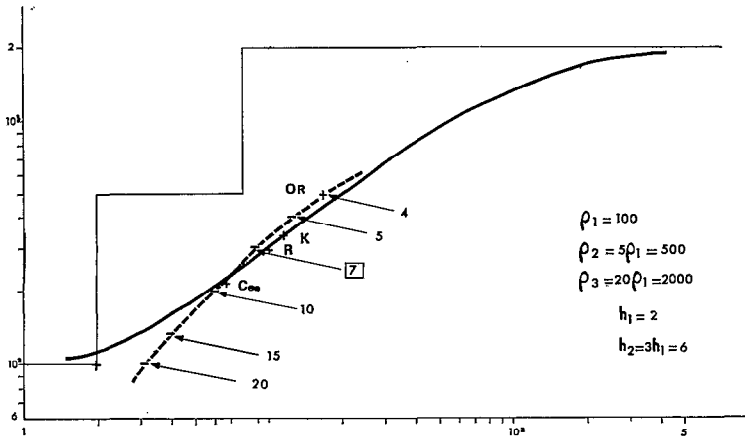
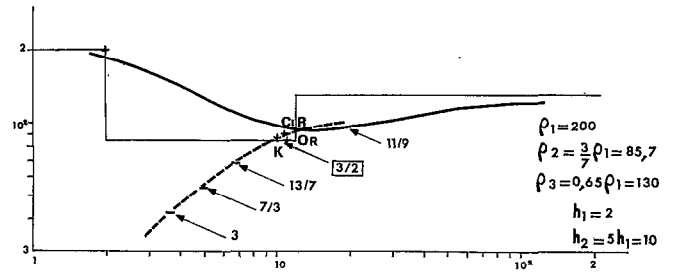


Fig. 14 - Types 1A, 1H, 1K et 1Q

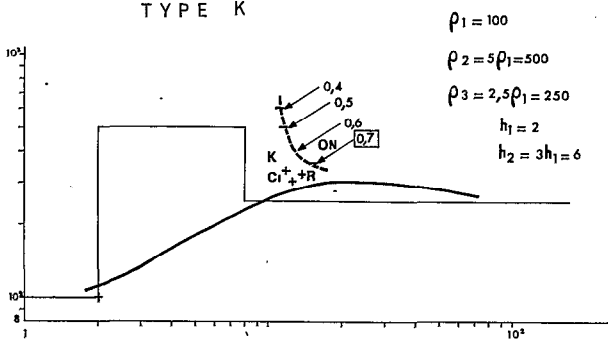
TYPE A



TYPE H



TYPE K



TYPE Q

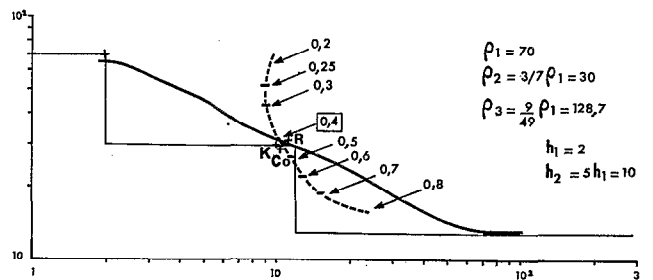
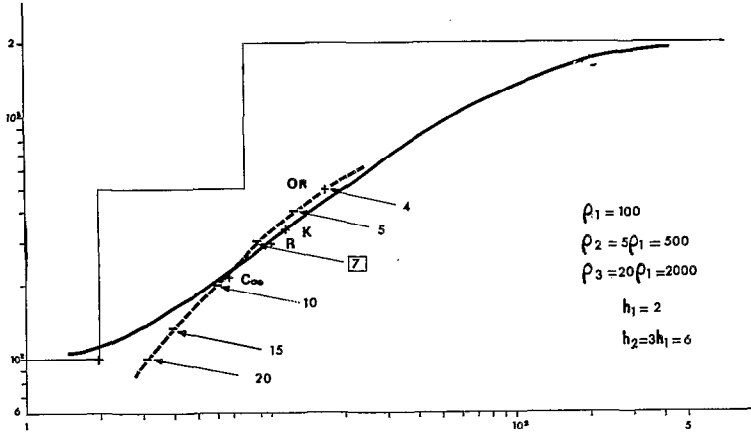
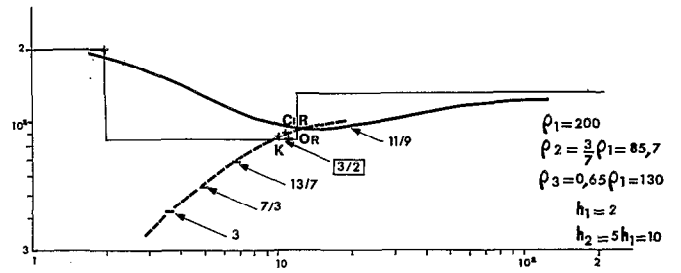


Fig.14 - Types 2A, 2H, 2K et 2Q

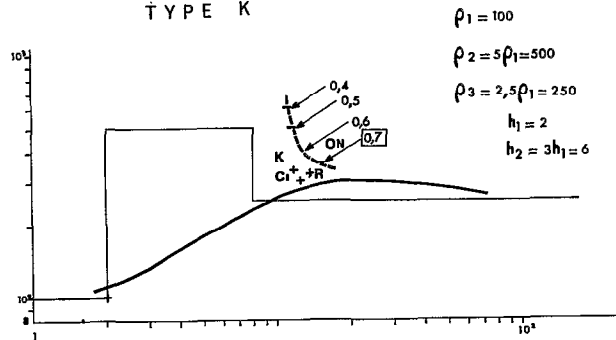
TYPE A



TYPE H



TYPE K



TYPE Q

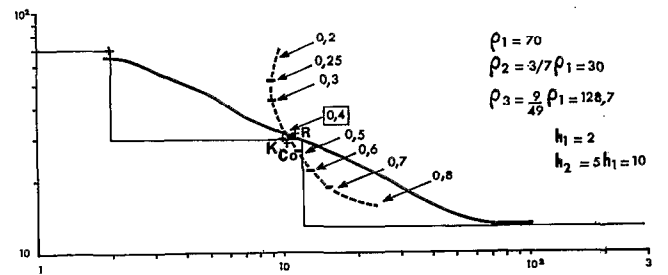


Fig.14 - Types 3A, 3H, 3K et 3Q

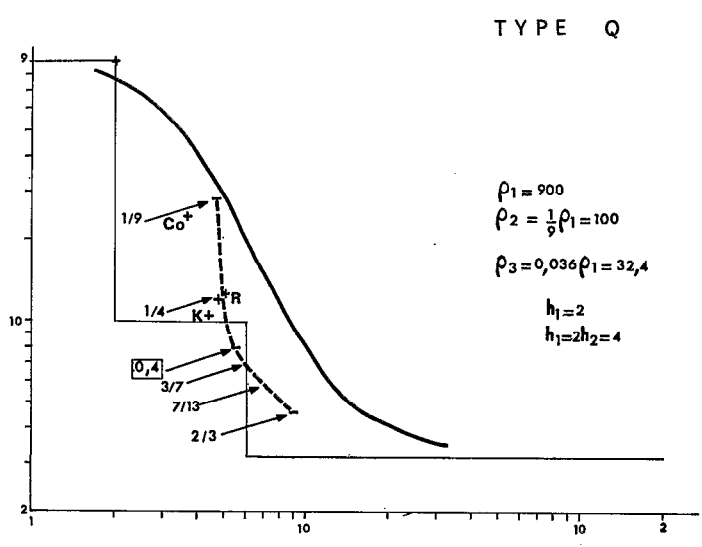
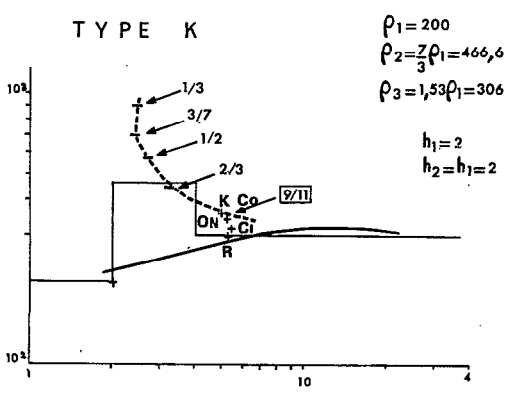
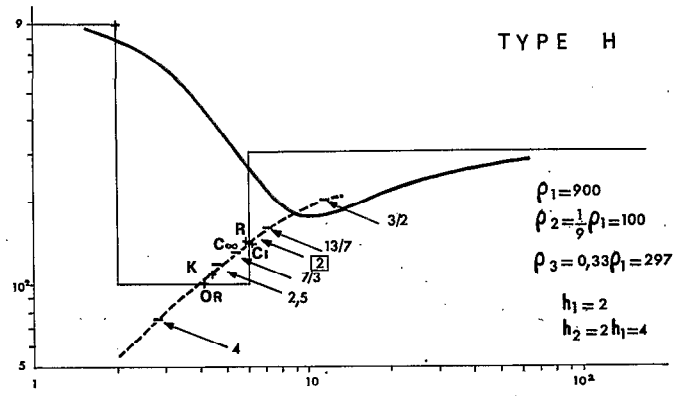
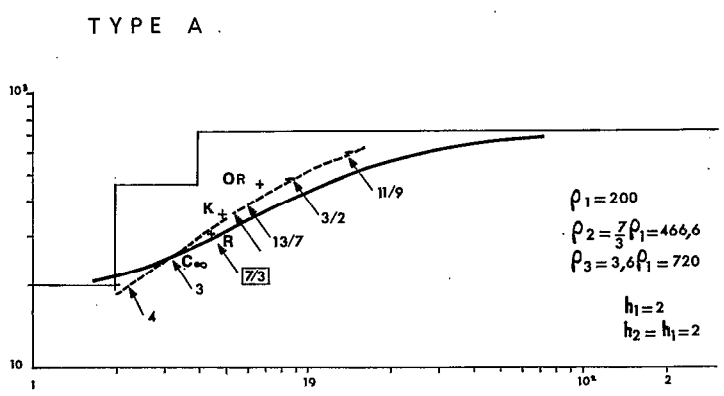
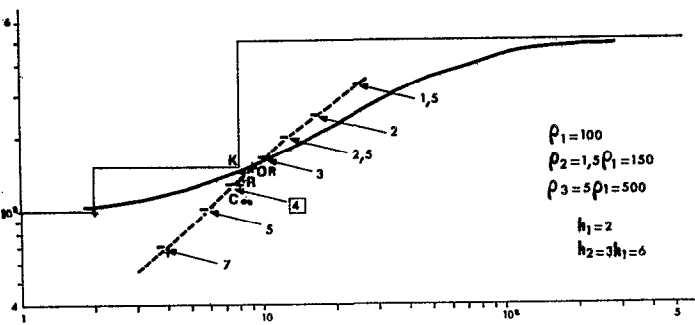
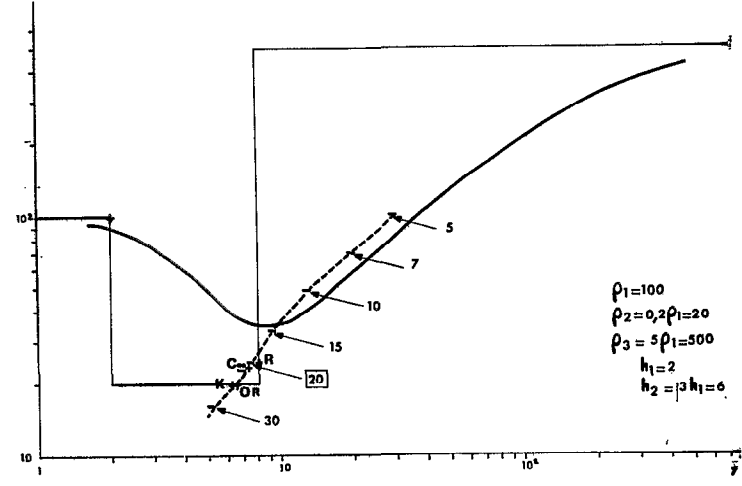


Fig. 14 - Types 4A, 4H, 4K et 4Q

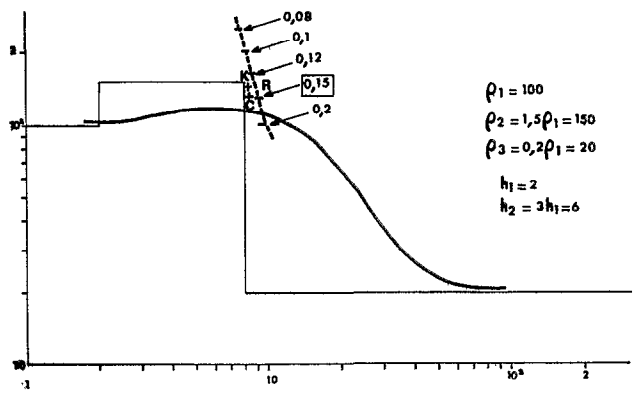
TYPE A



TYPE H



TYPE K



TYPE Q

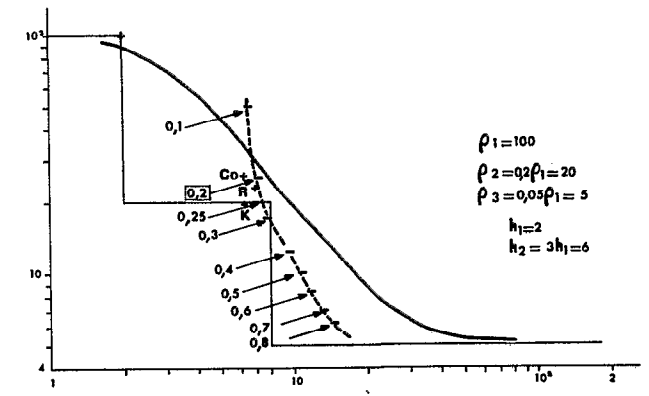


Fig. 14 - Types 5A, 5H, 5K et 5Q

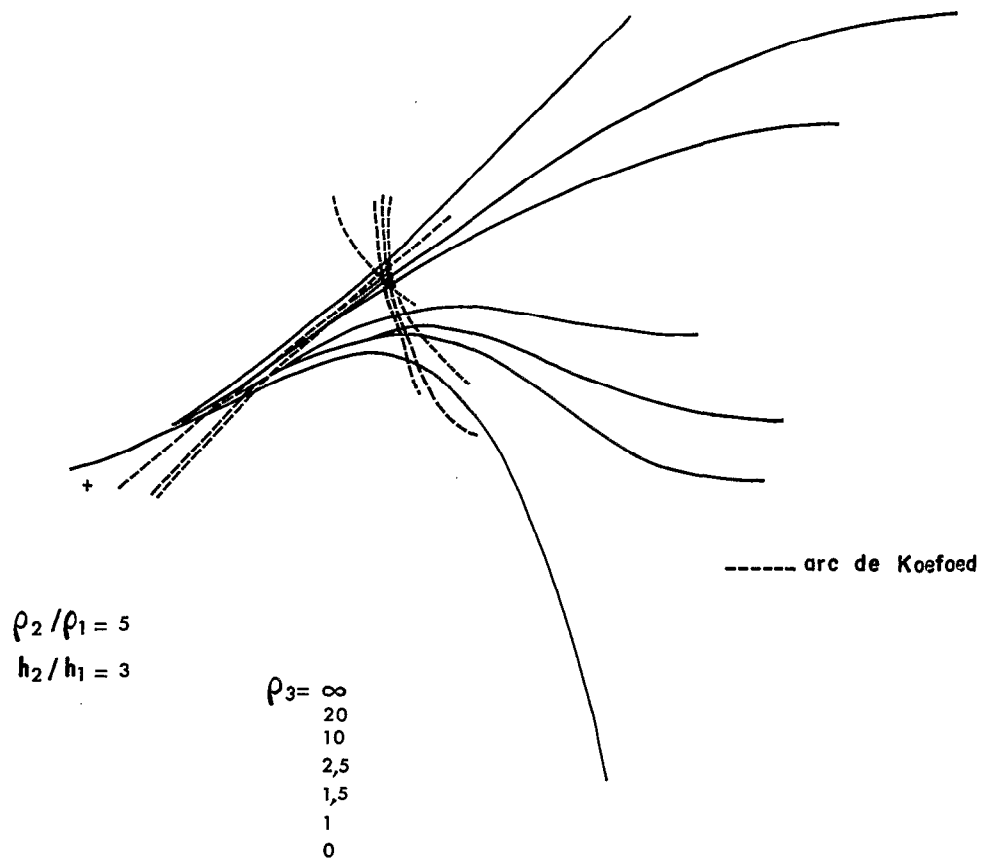


Fig. 15 - Types A et K ; croisement des 2 faisceaux d' "Arcs de Koefoed"

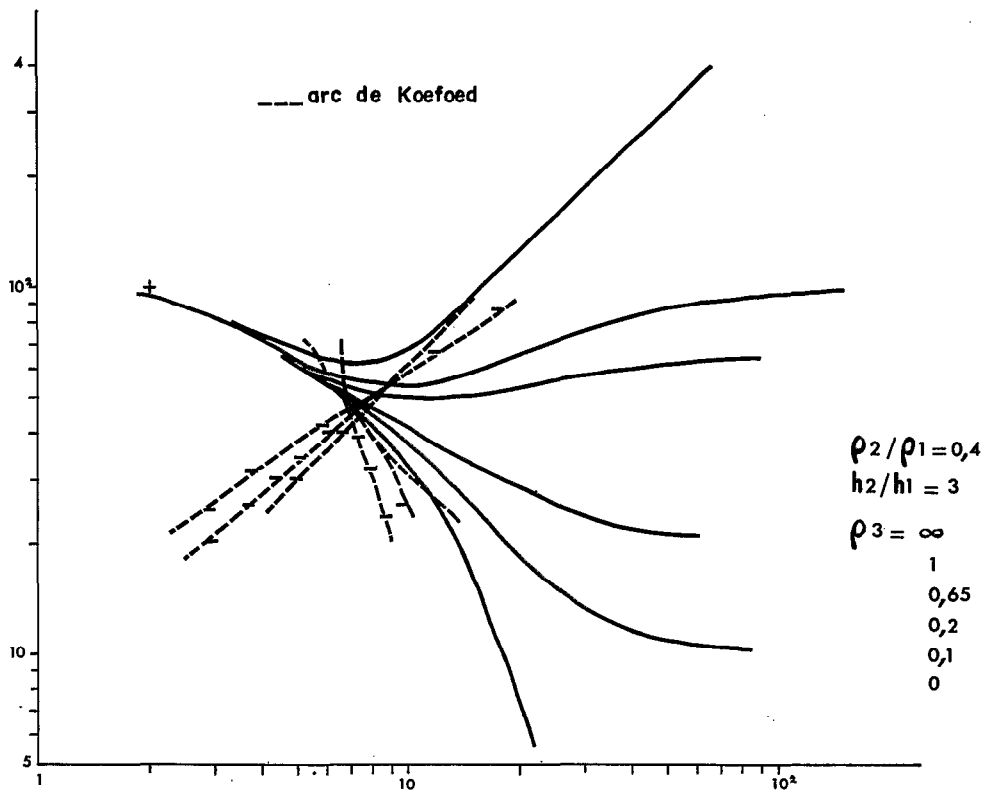


Fig. 16 - Types H et Q ; croisement des 2 faisceaux d' "Arcs de Koefoed"

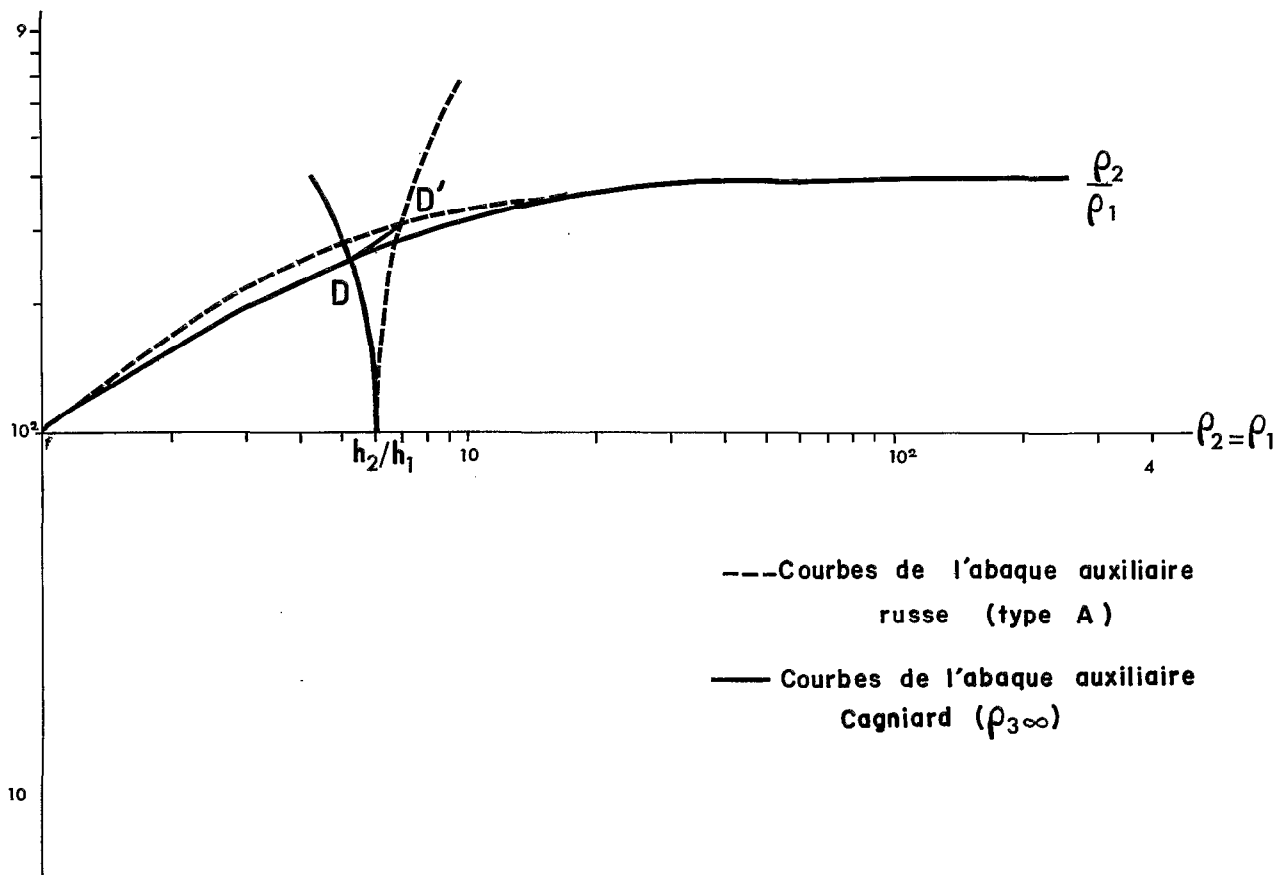


Fig. 17 - Schéma de l'équivalence de 2 abaques d'écoles différentes

SCHEMA DE LA FUSION

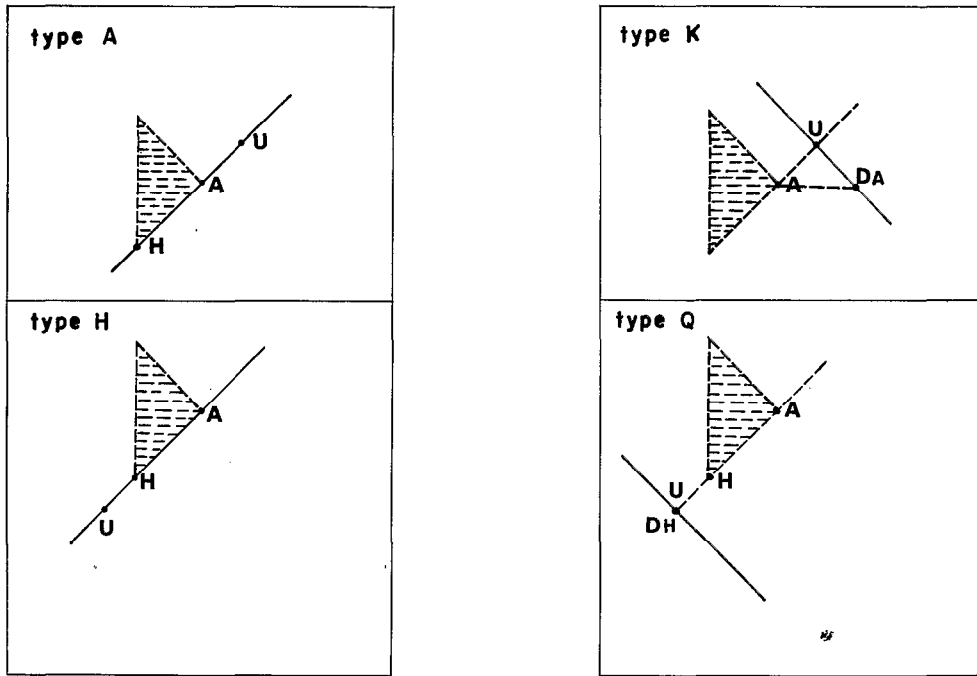


Fig. 18 - Obtention du point unique U

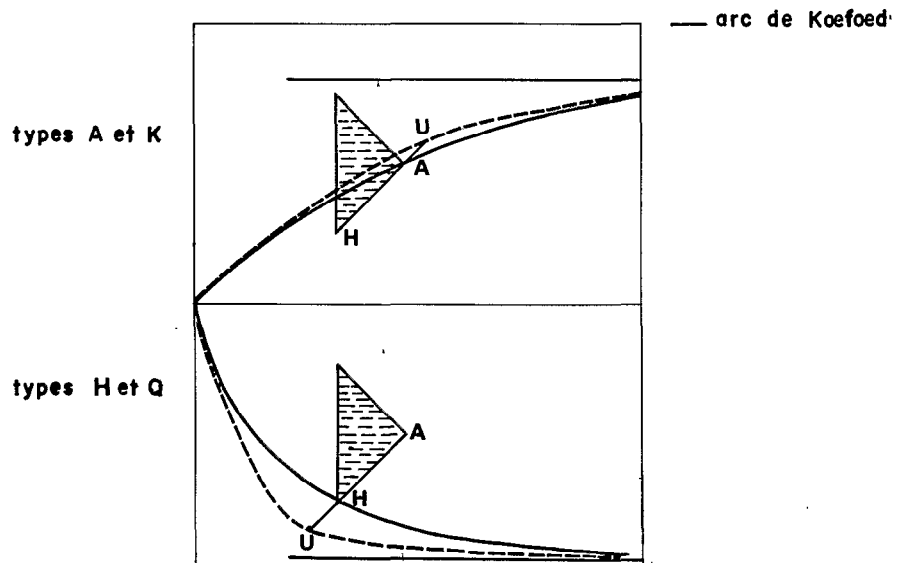


Fig. 19 - Abaque unifié

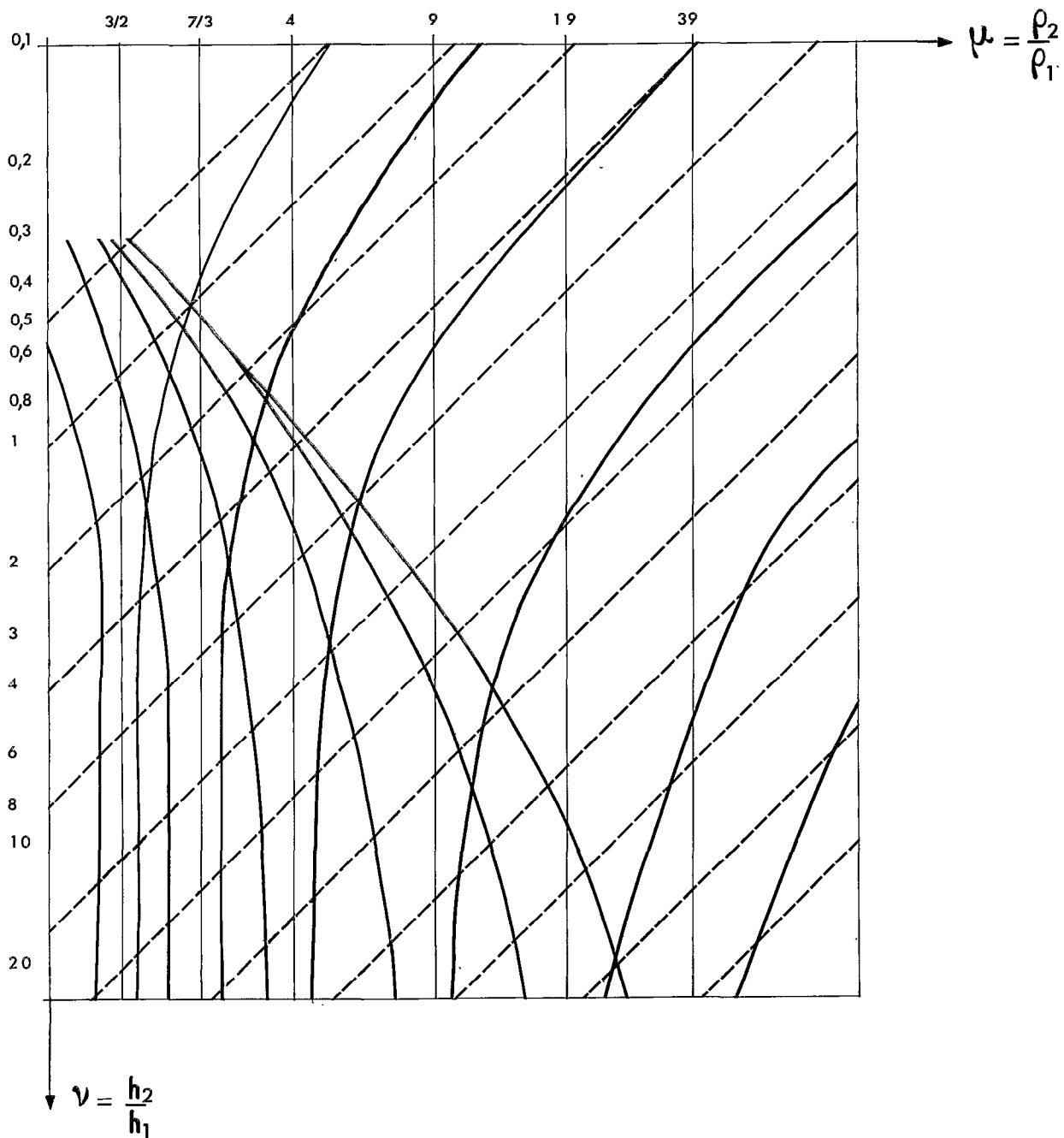


Fig. 20 - Nomogramme de Pylaev pour le type K ($\rho_3 = \rho_1$)