



CONVENTION N° 9.04.0077

89.04.0077

ACTION 2

CATALOGUE DES COEFFICIENTS
DE PERTE D'ÉNERGIE MÉCANIQUE

S. BECIRSPAHIC

J. DAGONNOT

 AGENCE FRANÇAISE POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE	RAPPORT INTERMÉDIAIRE
	CONTRAT N° 89.04.0077
	Date de publication AVRIL 1990

NTO 90289 B

Avril 1990

DESCRIPTIF

- 0 AVANT-PROPOS
- 1 PERTE D'ENERGIE MECANIQUE DANS UN ECOULEMENT
 - 1.1 THEOREME DE BERNOULLI
 - 1.2 THEOREME DE BERNOULLI GENERALISE
 - 1.3 CALCUL DES COEFFICIENTS DE PERTES D'ENERGIE
 - 1.4 DETERMINATION EXPERIMENTALE
 - 1.5 METHODE EXPERIMENTALE PROPOSEE
 - 1.6 INSTALLATION D'ESSAI (TUYERES SONIQUES LMEF)
 - 1.7 INSTALLATION D'ESSAI (TUYERES A LONG RAYON ET PETIT RAPPORT D'OUVERTURE)
- 2 RESULTATS D'ESSAIS DE 4 CROISILLONS ETOILE $D = 250$ ET DE 2 CROISILLONS ETOILE $D = 400$
- 3 RESULTATS D'ESSAIS DE COMPOSANTS
- 4 CONCLUSION

0 - AVANT PROPOS

Pour pouvoir prévoir avec une incertitude réduite le débit d'air qui circulera effectivement dans une installation aéraulique, il est indispensable de connaître la résistance opposée par les divers composants à l'écoulement.

De nombreuses recherches expérimentales ont été réalisées dans le passé dans ce domaine : on trouve des valeurs numériques caractérisant cette résistance dans les divers catalogues bien connus (Chappuis, Miller, Idel'cik, etc...).

Or, on peut aisément constater que les auteurs donnent souvent pour les mêmes éléments de circuit des coefficients très différents. Les raisons de ces désaccords sont multiples :

- les définitions mêmes des grandeurs ne sont pas identiques,
- les méthodes de détermination sont variées, souvent mal expliquées,
- les effets d'interaction provenant de conditions aux frontières différentes ne sont pas toujours bien appréciés.

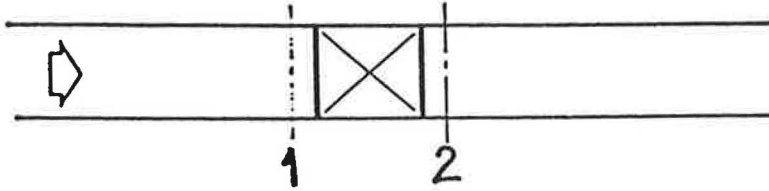
Un vaste programme expérimental a été entrepris par le CETIAT en collaboration avec les laboratoires étrangers, en vue d'aboutir à un catalogue de coefficients caractéristiques incontestables. Il a fallu d'abord définir une méthode expérimentale et effectuer une comparaison entre les laboratoires, afin de s'assurer de la validité de la technique utilisée. Cette première phase est actuellement terminée et des essais systématiques d'un grand nombre de composants aérauliques vont commencer.

Parallèlement à cette action internationale, le CETIAT, soutenu par l'AFME, a entrepris la détermination des coefficients de perte d'énergie mécanique des éléments de circuits de ventilation les plus couramment utilisés. Les résultats de cette étude sont exposés dans le présent rapport.

1 - PERTE D'ENERGIE MECANIQUE DANS UN ECOULEMENT

1.1 - Théorème de Bernoulli

La perte d'énergie mécanique d'un écoulement fluide dans un composant est déterminée en général en appliquant le théorème de Bernoulli aux sections immédiatement amont et aval du composant.



La perte d'énergie mécanique par unité de masse, exprimée en J/kg, est donnée par :

$$(\Delta y)_1^2 = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

p pression absolue

v vitesse

z altitude

ρ masse volumique

g accélération de la pesanteur

Cette perte est souvent présentée sous forme de perte pondérique appelée perte de charge en hydraulique et exprimée en mètres du fluide.

$$(\Delta H)_1^2 = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + (z_1 - z_2)$$

Elle est également présentée sous forme de perte volumique exprimée en pascals

$$(\Delta p)_1^2 = p_1 - p_2 + \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) + \rho g (z_1 - z_2)$$

Cette dernière forme est improprement appelée "perte de charge" en aéraulique.

Deux hypothèses importantes ont été prises ici :

a) le fluide doit être isochore c'est à dire de masse volumique ρ constante tout le long du circuit

b) la répartition des vitesses dans une section est considérée uniforme.
Dans les fluides réels, ce n'est pas le cas, et il faut en tenir compte pour la détermination de l'énergie cinétique.

Pour les fluides réels et compressibles, comme l'air, il faut en toute rigueur appliquer le théorème de Bernoulli généralisé développé par Cotton et Fortier.

1.2 - Théorème de Bernoulli généralisé

La perte d'énergie mécanique par unité de masse, exprimée en J/kg est donnée par :

$$(\Delta y)_{12}^2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{12}} + \alpha_{A1} \frac{V_{m1}^2}{2} - \alpha_{A2} \frac{V_{m2}^2}{2} + g (z_1 - z_2)$$

V_m vitesse moyenne

α_A coefficient d'énergie cinétique

Le coefficient d'énergie cinétique α_A doit être déterminé par une exploration du champ des vitesses dans la section A :

$$\alpha_A = \frac{\iint_A (\rho v^2 v_n) dA}{q_m V_m^2}$$

q_m débit-masse

v_n composante de vitesse dans la direction générale de l'écoulement

La grandeur ρ_{12} est définie en toute rigueur par la relation :

$$\rho_{12} = \frac{q_m (P_1 - P_2)}{\iint_V (\vec{v} \cdot \text{grad } p) dv}$$

V volume du composant essayé

1.3 - Calcul des coefficients de pertes d'énergie

Le coefficient de perte d'énergie mécanique d'un composant est défini par la relation :

$$\zeta_{12}^k = \frac{2(\Delta y)_1^2}{\left(\frac{q_{mk}}{A_k \rho_k}\right)^2}$$

où l'indice k indique une section de référence.

Ce sont les valeurs de ζ qui doivent être déterminées expérimentalement et fournies dans les catalogues.

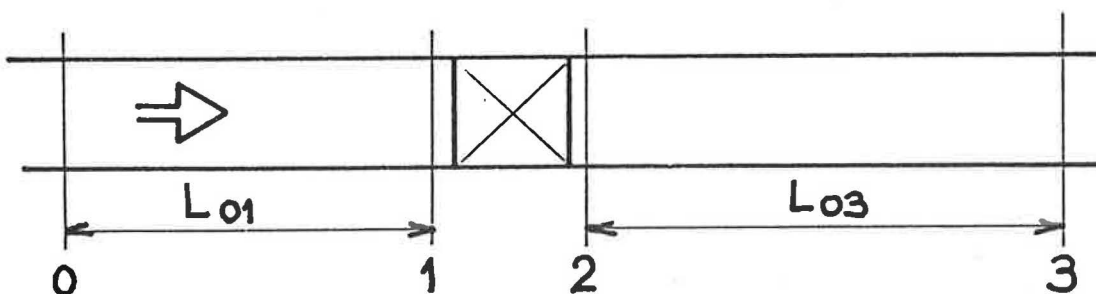
En pratique, pour la ventilation mécanique, l'écoulement peut être considéré isochore et la perte d'énergie volumique d'un composant sera simplement :

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

où ρ est la masse volumique de l'air et v la vitesse moyenne.

1.4 - Détermination expérimentale

La présence même du composant inséré dans un circuit aéraulique modifie la structure de l'écoulement aussi bien en amont qu'en aval. C'est surtout en aval du composant que l'écoulement peut être très perturbé. Pour permettre une détermination correcte des flux d'énergie, on utilise généralement l'installation suivante :



Un conduit droit de longueur L01 est installé en amont et un conduit droit de longueur L23 en aval du composant. Les mesures sont effectuées dans les sections 0 et 3, donc relativement éloignées des perturbations. Les caractéristiques de l'écoulement sont ensuite calculées pour les sections 1 et 2, puis utilisées dans le théorème de Bernoulli pour obtenir la perte d'énergie mécanique du composant.

Le choix des longueurs L01 et L02 et les hypothèses sur l'écoulement dans ces conduits peuvent produire les différences dans les résultats finaux.

1.5 Méthode expérimentale proposée

Il n'y a pas de valeur intrinsèque pour le coefficient de perte d'énergie d'un composant aéraulique. Pour chaque condition d'écoulement amont on trouvera une valeur différente. Par conséquent, l'utilisation d'un long conduit en amont n'est qu'une des conditions possibles. La variation de cette longueur et des conditions d'entrées peuvent modifier l'écoulement immédiatement en amont du composant.

Il est donc indispensable que tout le monde utilise exactement la même installation. C'est pour cette raison que le CETIAT a proposé d'installer en amont un conduit d'une longueur L01 égale à 20 D avec une tôle perforée à l'entrée.

L'écoulement en aval dépend du composant en essai. Généralement, une grande longueur de conduit devrait permettre une mesure correcte. Or, pour une même longueur de conduit, la perte d'énergie peut être très différente surtout avec un écoulement giratoire. Le CETIAT a proposé d'installer "le tronçon commun", circuit utilisé pour les essais des ventilateurs, permettant une mesure correcte avec une longueur réduite.

L'avantage important de cette méthode est l'élimination de la nécessité de détermination du facteur d'énergie cinétique aussi bien en amont qu'en aval : on le prend égal à 1. Si un composant en essai produit un écoulement irrégulier très giratoire, la perte d'énergie dans le croisillon sera beaucoup plus élevée que la valeur conventionnelle utilisée pour le calcul. Le coefficient de perte d'énergie du composant en essai apparaîtra plus élevé. On considère que cette façon de présenter les caractéristiques est correcte car, en pratique, l'énergie giratoire sera de toute façon perdue et cette perte est produite par le composant (même si elle n'est pas produite dans le composant). Il faut remarquer que dans les méthodes généralement utilisées (long conduit en aval), le principe est le même, mais la mesure est plus difficile et la dispersion des résultats plus grande.

1.6 - Installation d'essai du CETIAT

Le schéma de l'installation d'essai est présenté sur la figure 1. La mesure du débit d'air est effectuée à l'aide des tuyères soniques placées en parallèle entre deux chambres de tranquillisation. Un ventilateur de haute pression et un système de vannes permettent de faire varier le débit dans de larges limites.

L'incertitude associée à la valeur du coefficient de perte déterminée dépend essentiellement de l'erreur commise lors de la mesure de la pression. En fait, pour la majorité des composants, l'erreur relative sur le coefficient de perte est au moins le double de celle sur la pression. Or, les pressions différentielles mesurées sont souvent de l'ordre de quelques pascals ; d'où la nécessité de disposer de moyens de mesure de faibles différentielles très précis. Le micromanomètre FORTIER a été utilisé pour ces essais. Une étude d'amélioration de la technique est actuellement engagée par le CETIAT et une comparaison internationale est envisagée.

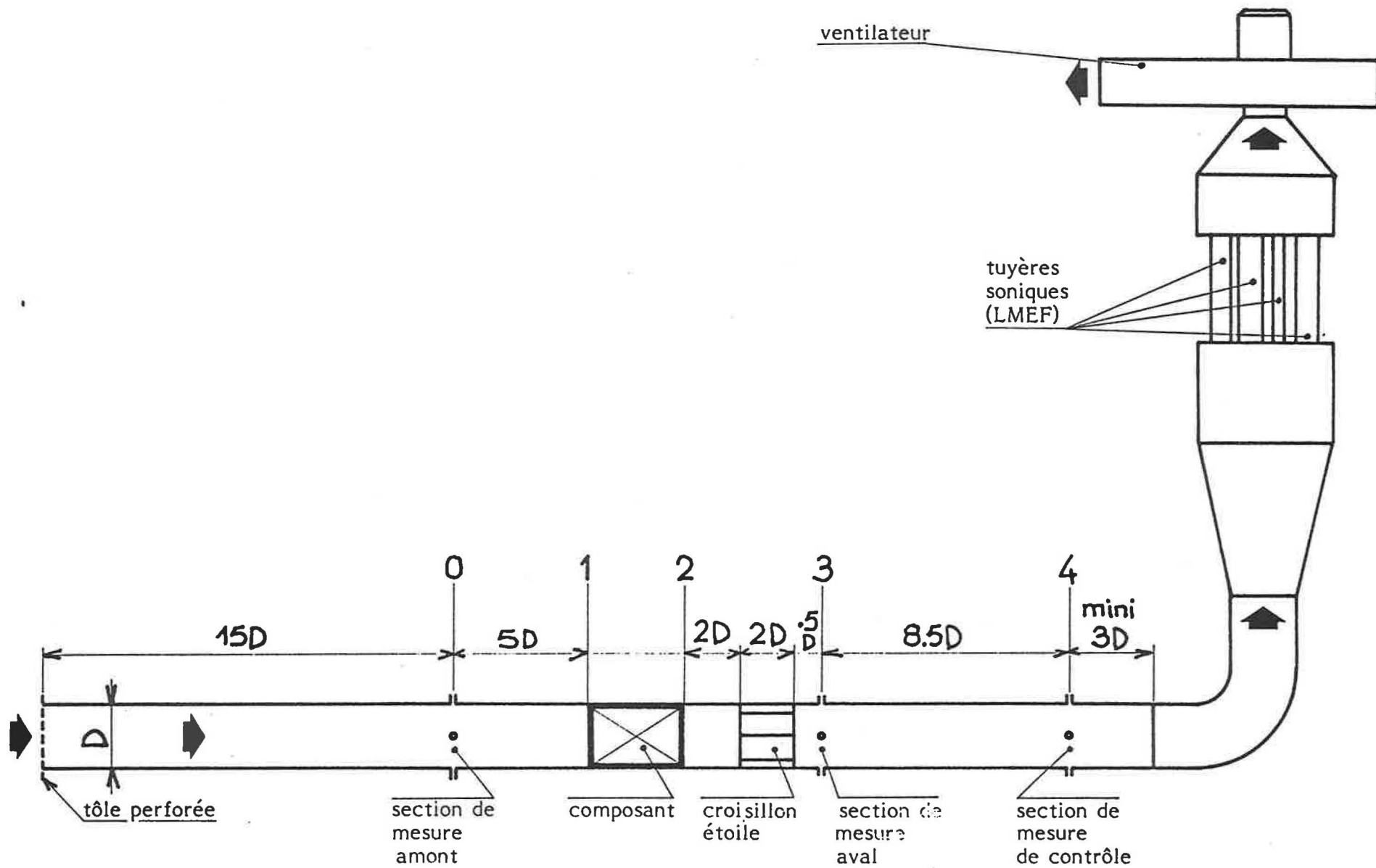


FIGURE 1

1.7 - Installation d'essai (tuyères à long rayon et petit rapport d'ouverture)

Une seconde installation d'essai a été réalisée et est opérationnelle depuis juin 1989.

Cette installation est du type tuyères montées en caisson selon la méthode ASHRAE/AMCA.

Cette installation permet d'essayer notamment les composants de $D = 400$ mm.

Le débit maximum d'utilisation est de $12000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui autorise des vitesses de circulation dans le conduit de $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le schéma de principe de cette installation est présenté sur la figure N° 2 et les détails de réalisation sur les figures N° 3 et 4.

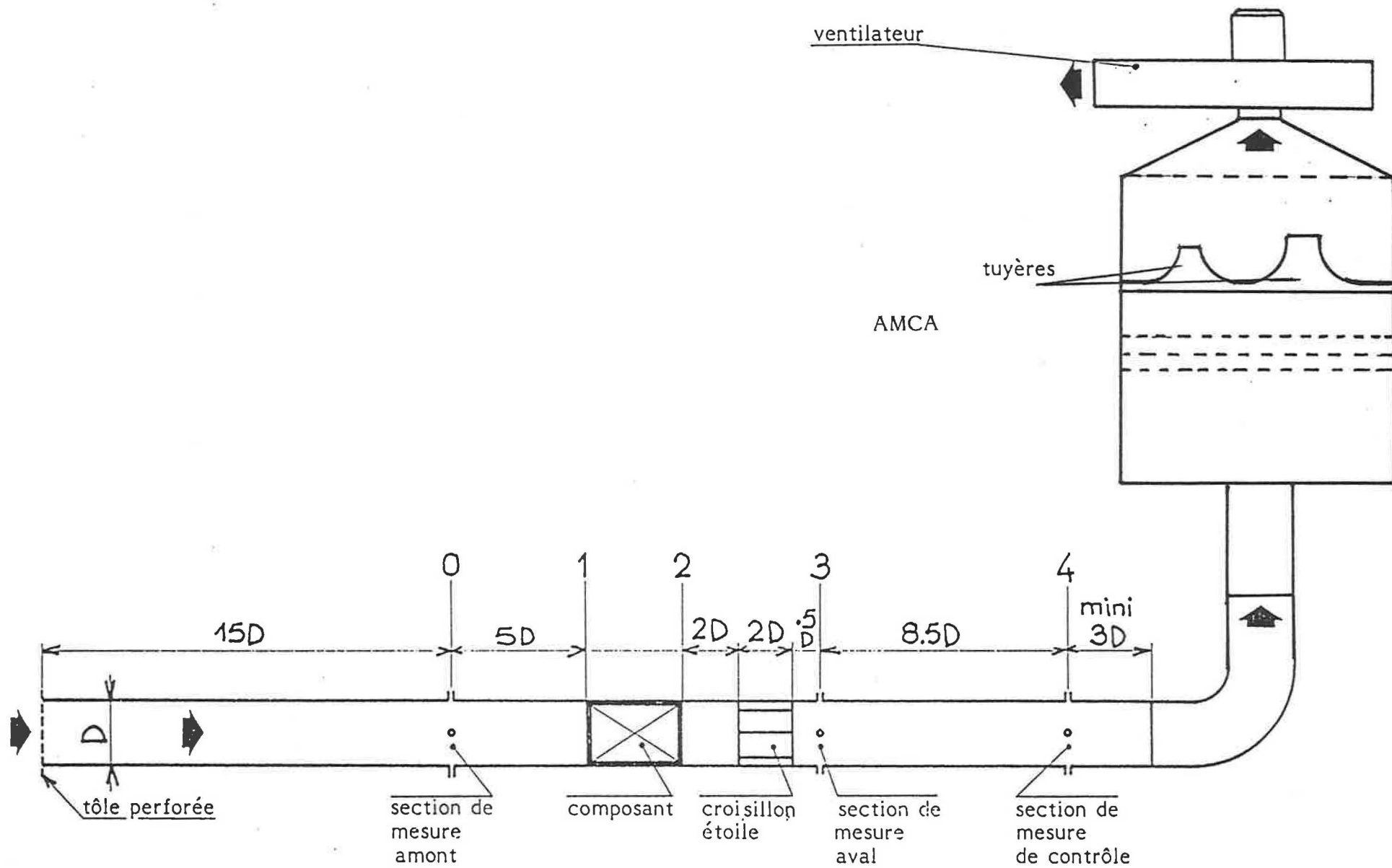


FIGURE 2

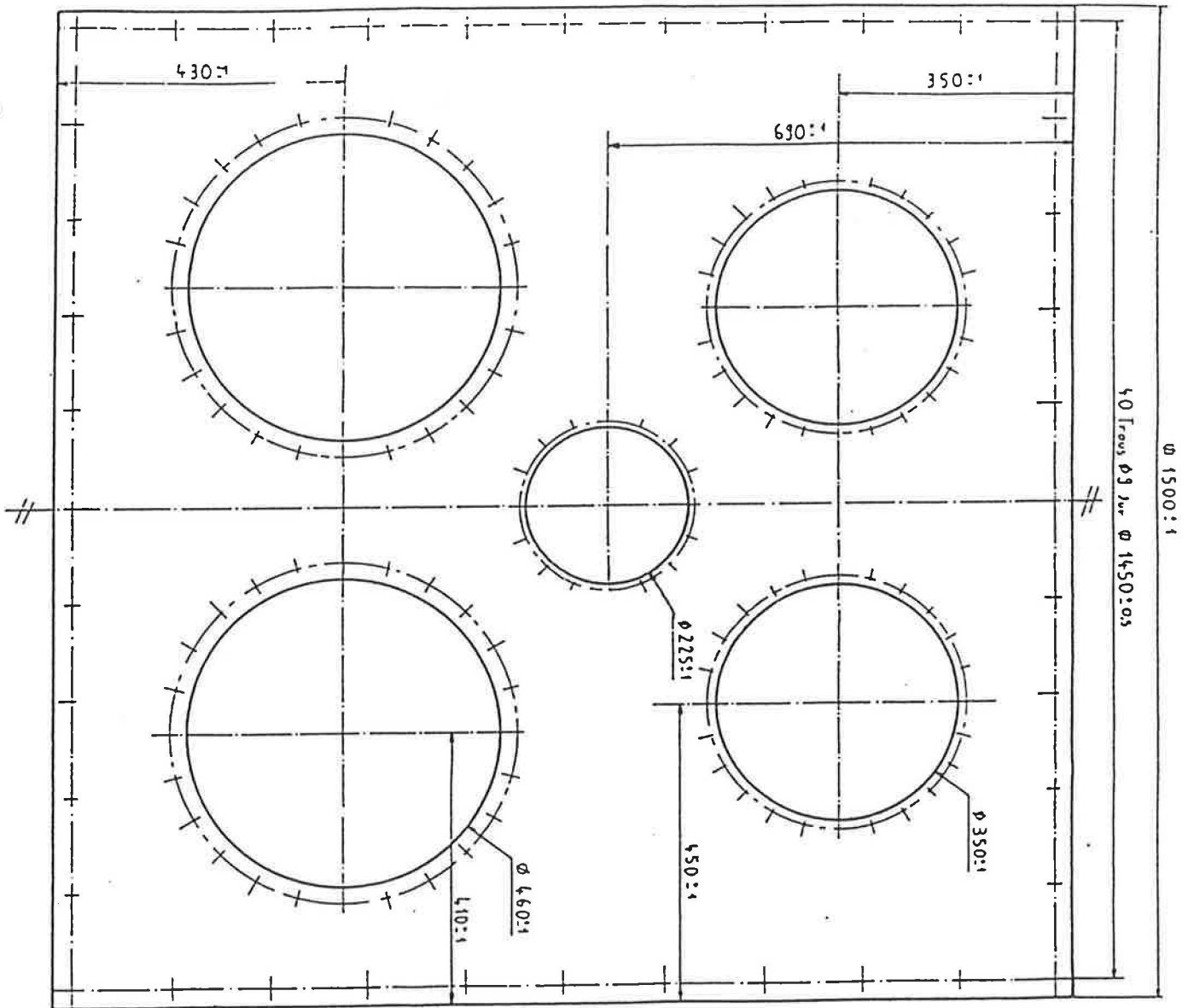


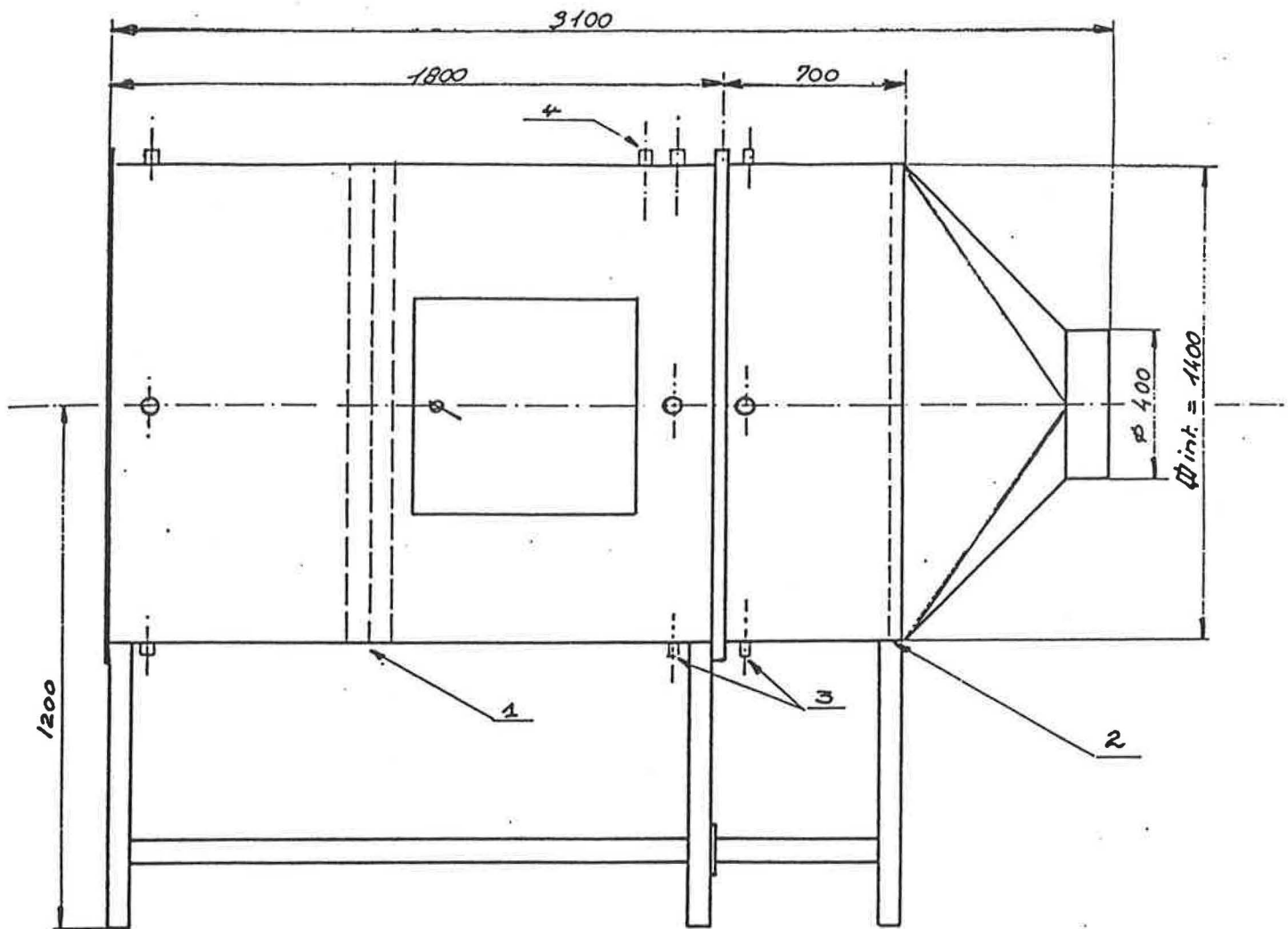
Schéma d'implantation des tuyères de la nouvelle installation

2 tuyères \varnothing 200 mm

2 tuyères \varnothing 150 mm

1 tuyère \varnothing 100 mm

FIGURE 3



N°	Désignation
1	3 tôles perforées
2	1 tôle perforée
3	12 prises de pression
4	1 prise de température

Schéma de la nouvelle installation

FIGURE 4

2 - COMPARAISON DES RESULTATS D'ESSAIS DES 4 CROISILLONS ETOILES

D = 250 mm

Dans le cadre du programme d'essai européen de composants aérauliques, le CETIAT a dû réaliser et tester les tronçons communs de mesure pour équiper les quatre laboratoires effectuant ces essais.

Le tableau N° 1 donne les résultats des 4 croisillons D = 250 mm.

La figure N° 5 montre la bonne homogénéité des résultats obtenus pour D = 250 mm.

Le tableau N° 2 donne les résultats des 2 croisillons D = 400 mm.

La figure N° 6 montre la bonne homogénéité des résultats obtenus pour D = 400 mm.

Les croisillons testés ont été insérés dans les installations d'essais comme un composant normal c'est-à-dire entre la manchette de mesure amont $L = 20D$ et un autre croisillon étoile en aval du croisillon à tester.

COMPARAISON DE RESULTATS
DE 4 TRONCONS COMMUNS DE MESURE DE PRESSION AVAL
(croisillon étoile D = 250 mm)

Croisillon A		Croisillon B		Croisillon C		Croisillon D	
Re	DZETA	Re	DZETA	Re	DZETA	Re	DZETA
334258	0,239	337198	0,233	345075	0,239	341826	0,231
281944	0,244	284268	0,237	290701	0,244	287672	0,236
225115	0,253	226463	0,246	231850	0,254	229419	0,246
204881	0,254	206207	0,248	211139	0,258	209099	0,249
180117	0,258	181224	0,254	185799	0,263	183915	0,254
159255	0,264	159898	0,255	163947	0,269	162192	0,258
125767	0,270	125909	0,264	229346	0,273	128018	0,267
114040	0,274	114370	0,267	117277	0,277	116124	0,272
80363	0,286	80568	0,280	82667	0,293	81794	0,291
45475	0,324	45643	0,325	46806	0,328	46406	0,336

TABLEAU 1

CROISILLON ETOILE

D = 250

DZETA

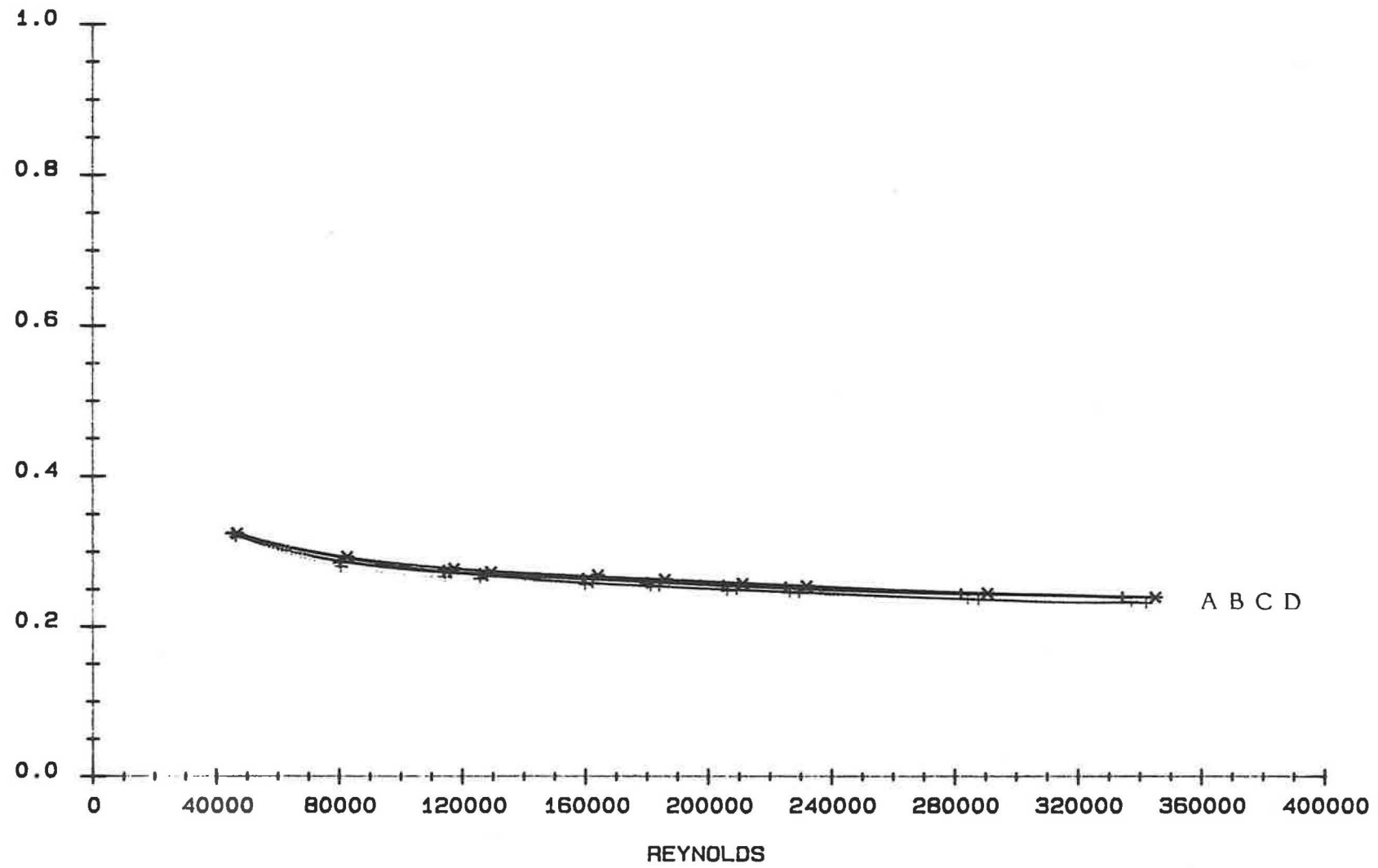


FIGURE 5

COMPARAISON DE RESULTATS
DE 2 TRONCONS COMMUNS DE MESURE DE PRESSION AVAL
(croisillon étoile D = 400 mm)

Croisillon A		Croisillon B	
Re	DZETA	Re	DZETA
657469	0,189	646442	0,188
584949	0,193	575648	0,185
509080	0,201	501241	0,193
433006	0,206	425080	0,202
409017	0,206	401504	0,202
286270	0,217	288929	0,213
227686	0,220	227935	0,228
192898	0,228	192621	0,227
172581	0,233	171592	0,230
149390	0,244	151107	0,240
135428	0,243	136375	0,244
100766	0,248	101760	0,257
89409	0,258		
57468	0,324		

TABLEAU 2

CROISILLON ETOILE

D = 400

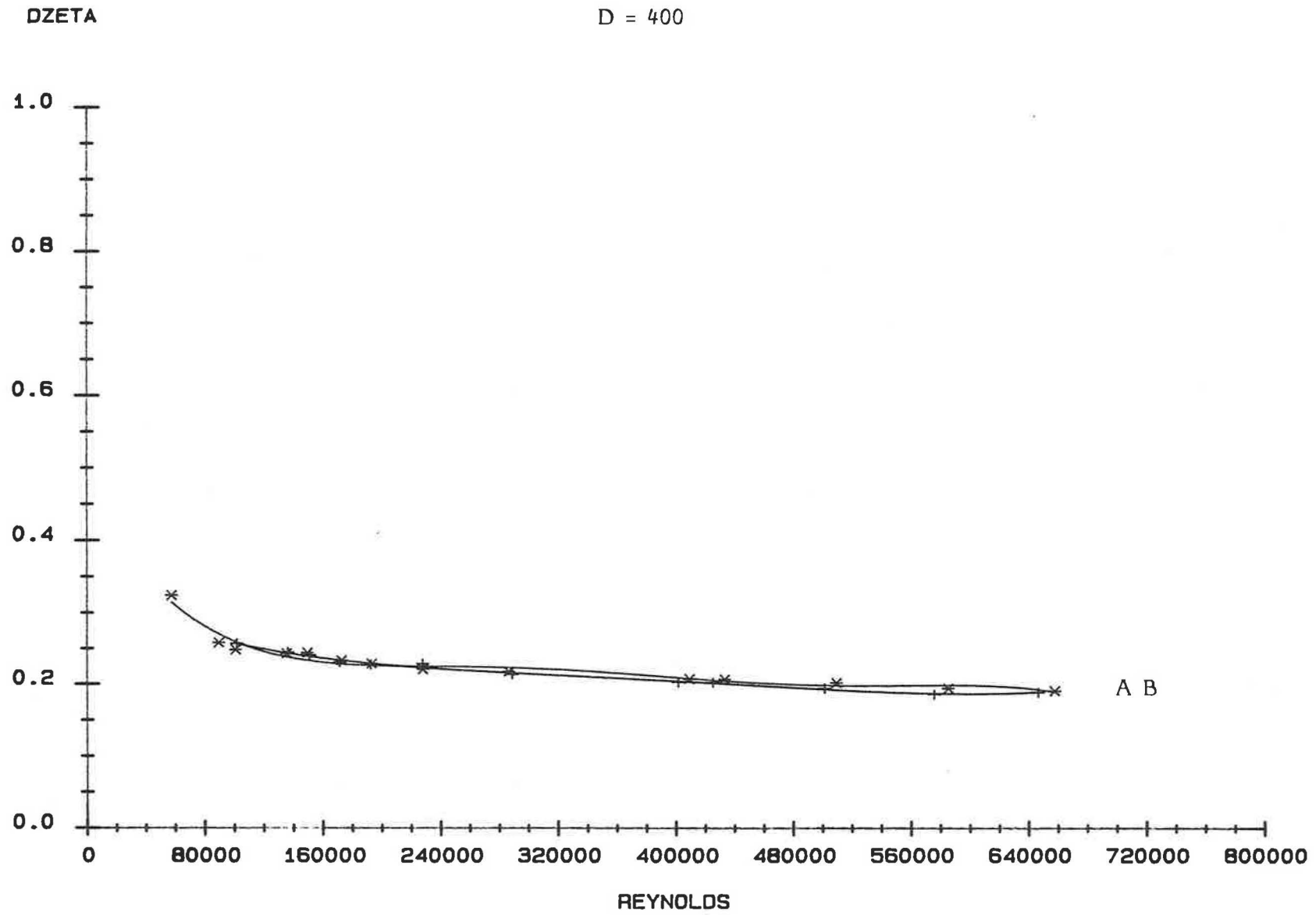


FIGURE 6

3 - RESULTATS D'ESAI DE COMPOSANTS

3.1 - La figure N° 7 présente les résultats de coudes à éléments de $D = 250$ $r/D = 1$ avec angle α $30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 90^\circ$.

3.2 - La figure N° 8 présente les résultats comparatifs entre un coude à éléments trois tronçons et un coude à éléments deux tronçons de $D = 250$ $r/D = 1$ avec angle α 45° .

3.3 - La figure N° 9 présente les résultats comparatifs entre un coude à éléments et un coude embouti de $D = 250$ $r/D = 1$ avec angle α 90° .

3.4 - La figure N° 10 présente les résultats de coudes à éléments de $D = 400$ $r/D = 1$ avec angle α $30^\circ - 45^\circ - 60^\circ - 90^\circ$.

3.5 - La figure N° 11 présente les résultats et la dispersion obtenue entre six coudes à éléments de six constructeurs différents coude $D = 400$, avec angle α 90° .

La figure N° 15 regroupe l'ensemble des résultats des deux coudes + LD pour angle α $45^\circ - 60^\circ - 90^\circ$.

3.6 - Le tableau N° 3 présente les résultats comparatifs de DZETA entre les valeurs mesurées sur les composants réunis et les valeurs calculées à partir des résultats de mesure du composant séparé pour une configuration en S horizontale de deux coudes à éléments $D = 250$ associé à une longueur droite $D = 250$ avec angle coude 45° longueur droite $1 D - 3 D - 5 D$.

La figure N° 12 présente les résultats des composants associés.

La figure N° 12a présente le coefficient obtenu entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

3.7 - Le tableau N° 4

La figure N° 13

La figure N° 13a

mêmes essais qu'au § 3.6 pour coudes $\alpha = 60^\circ$.

3.8 - Le tableau N° 5

La figure N° 14

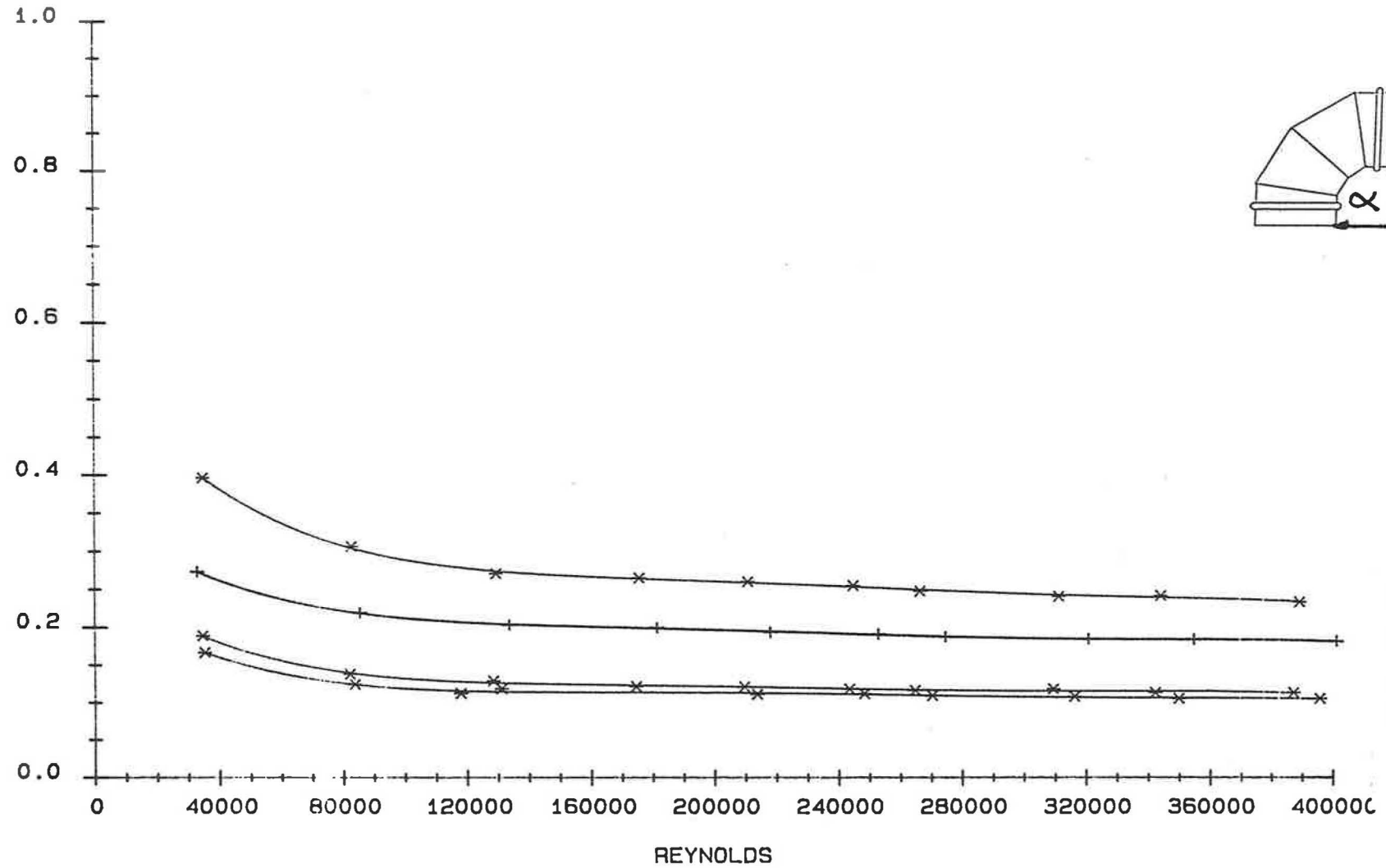
La figure N° 14a

mêmes essais qu'au § 3.6 pour coudes $\alpha = 90^\circ$.

COUDE A ELEMENTS

D = 250

DZETA



α
90°
60°
45°
30°

FIGURE 7

COUDE A 45°
C à éléments
D brusque
D = 250

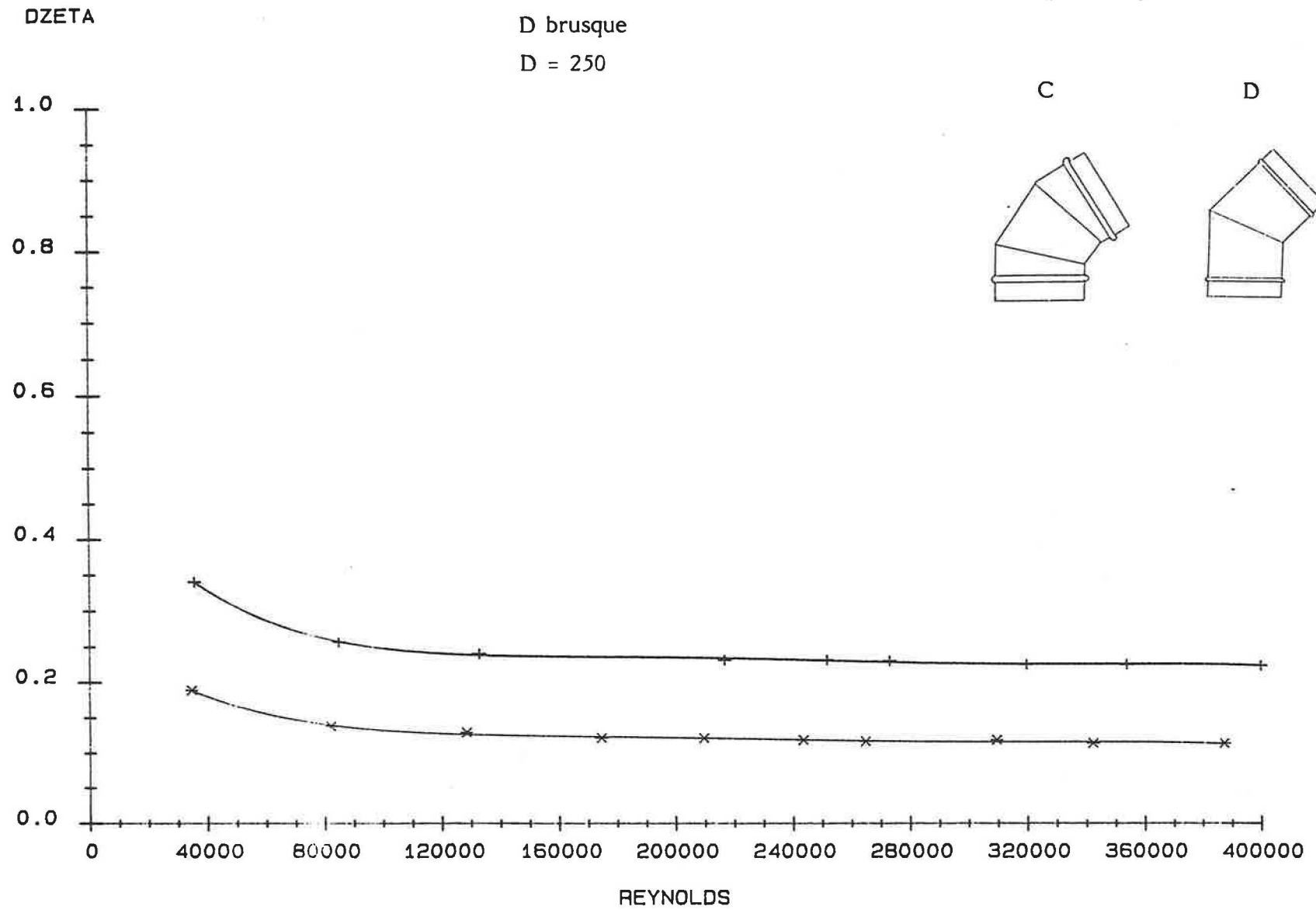


FIGURE 8

DZETA

COUDE A 90°

A à éléments

B embouti

D = 250

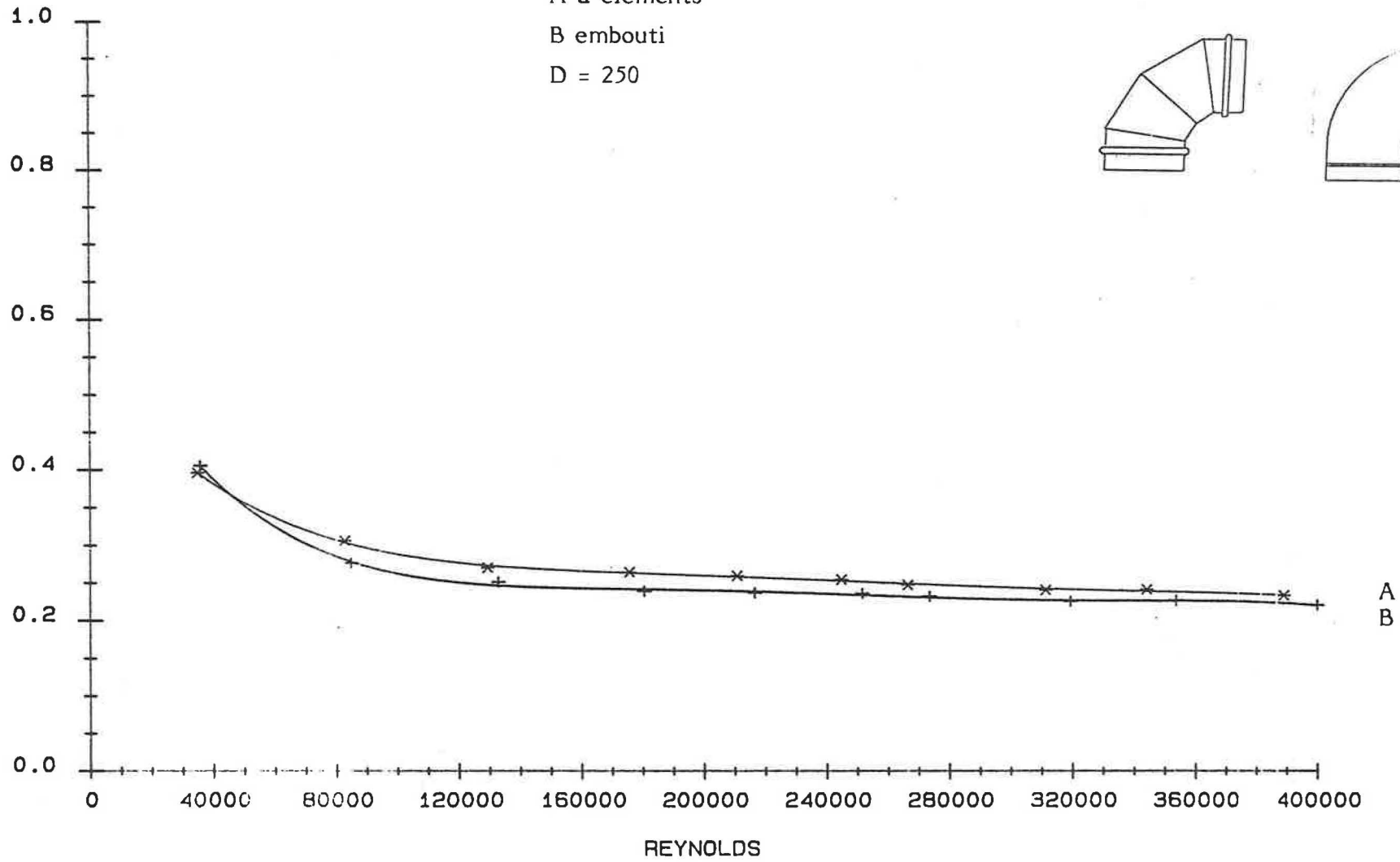
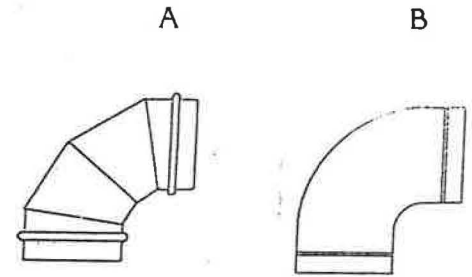


FIGURE 9

D = 400

COUDE A ELEMENTS

DZETA

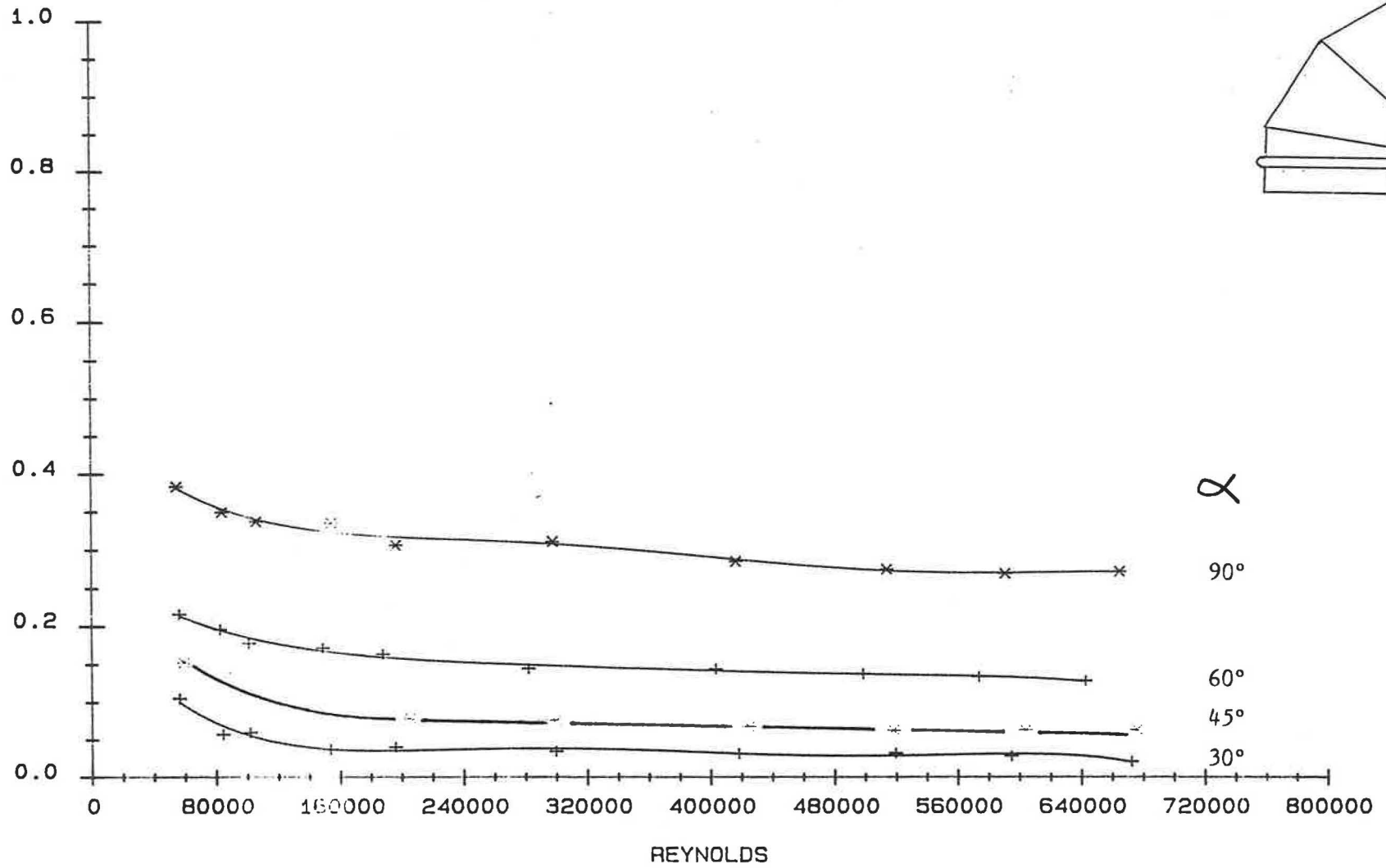


FIGURE 10

COUDE A ELEMENTS 90°
D = 400

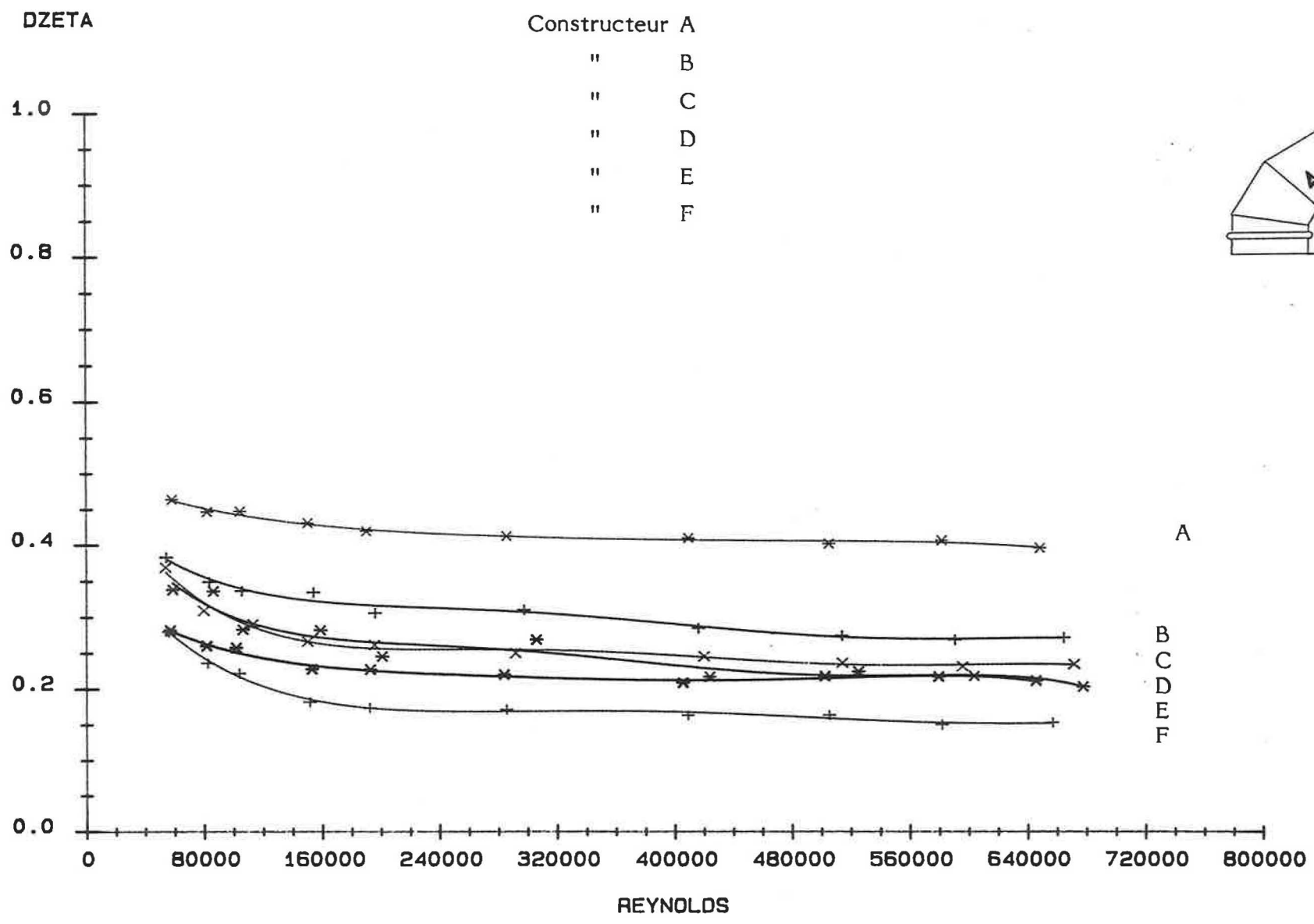


PLANCHE 11

COMPARAISON ENTRE LA VALEUR DZETA DE COMPOSANTS MESURES
SEPAREMENT ET LA VALEUR DZETA DES MEMES COMPOSANTS REUNIS
CONFIGURATION S POSITION HORIZONTALE Ø 250

ReD	DEZTA			
	Coude 45°	L/D		
		1	3	5
380000	0,11431	0,01588	0,0476	0,07942
250000	0,11853	0,01711	0,05134	0,08558
40000	0,18387	0,0261	0,0784	0,13066

ReD	$\frac{L}{D}$	DZETA		K
		2 coudes + L/D (1) (mesurés)	2 coudes + L/D (2) (sommés)	
380000	1	0,023317	0,2445	0,95
"	3	0,025346	0,27622	0,82
"	5	0,28690	0,30804	0,93
250000	1	0,24164	0,25417	0,95
"	3	0,26630	0,27996	0,95
"	5	0,30421	0,3142	0,97
40000	1	0,34923	0,39384	0,87
"	3	0,38978	0,44614	0,87
"	5	0,44907	0,4984	0,90

K DZETA 2 COUDES + L/D (mesurés) (1)
DZETA 2 COUDES + L/D (sommés) (2)

TABLEAU 3

PLUS UNE LONGUEUR DROITE ENTRE LES COUDES PLAN HORIZONTAL

DZETA

D = 250

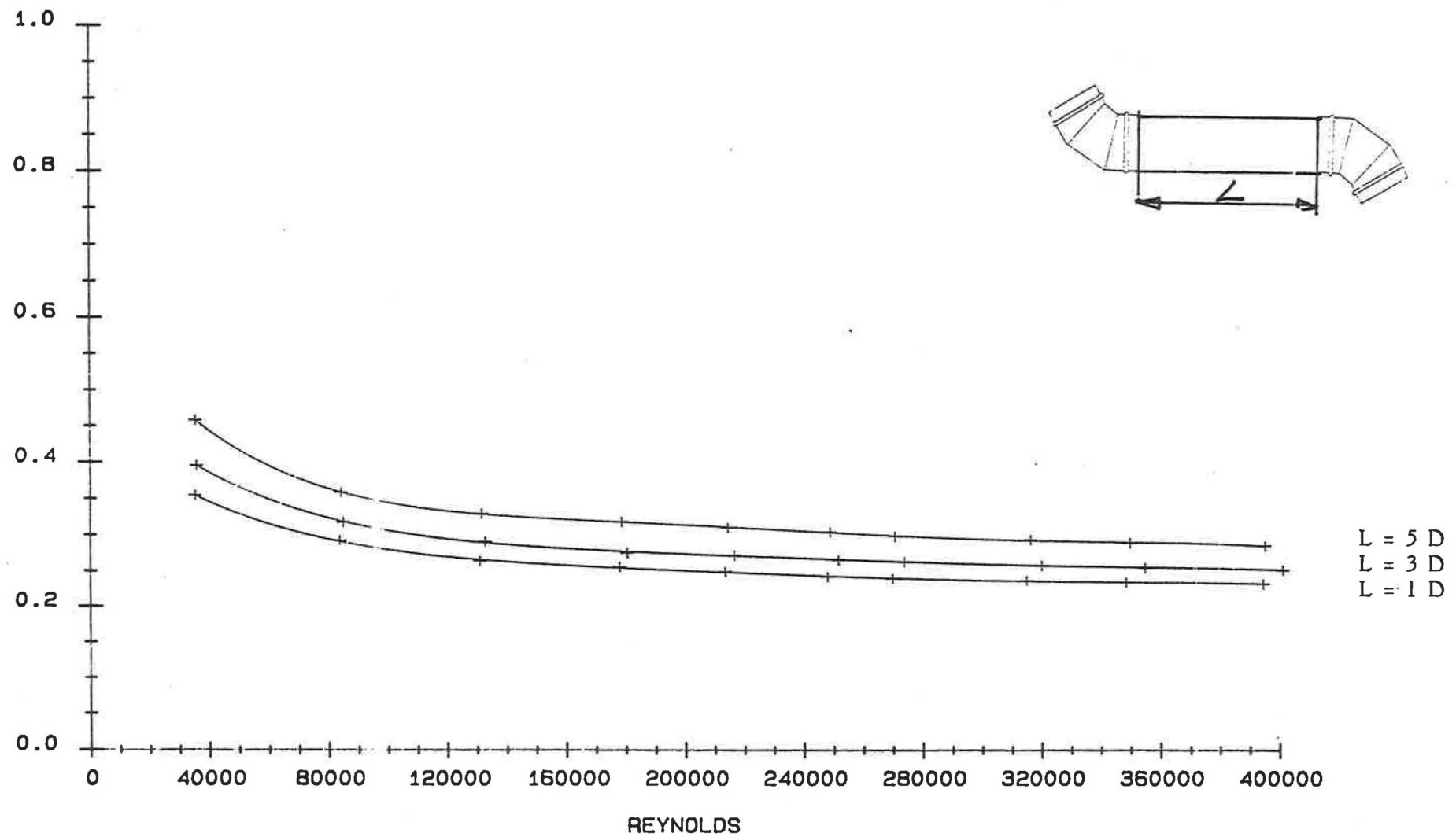


FIGURE 12

Rapport entre les valeurs DZETA des composants réunis
valeurs DZETA des composants séparés

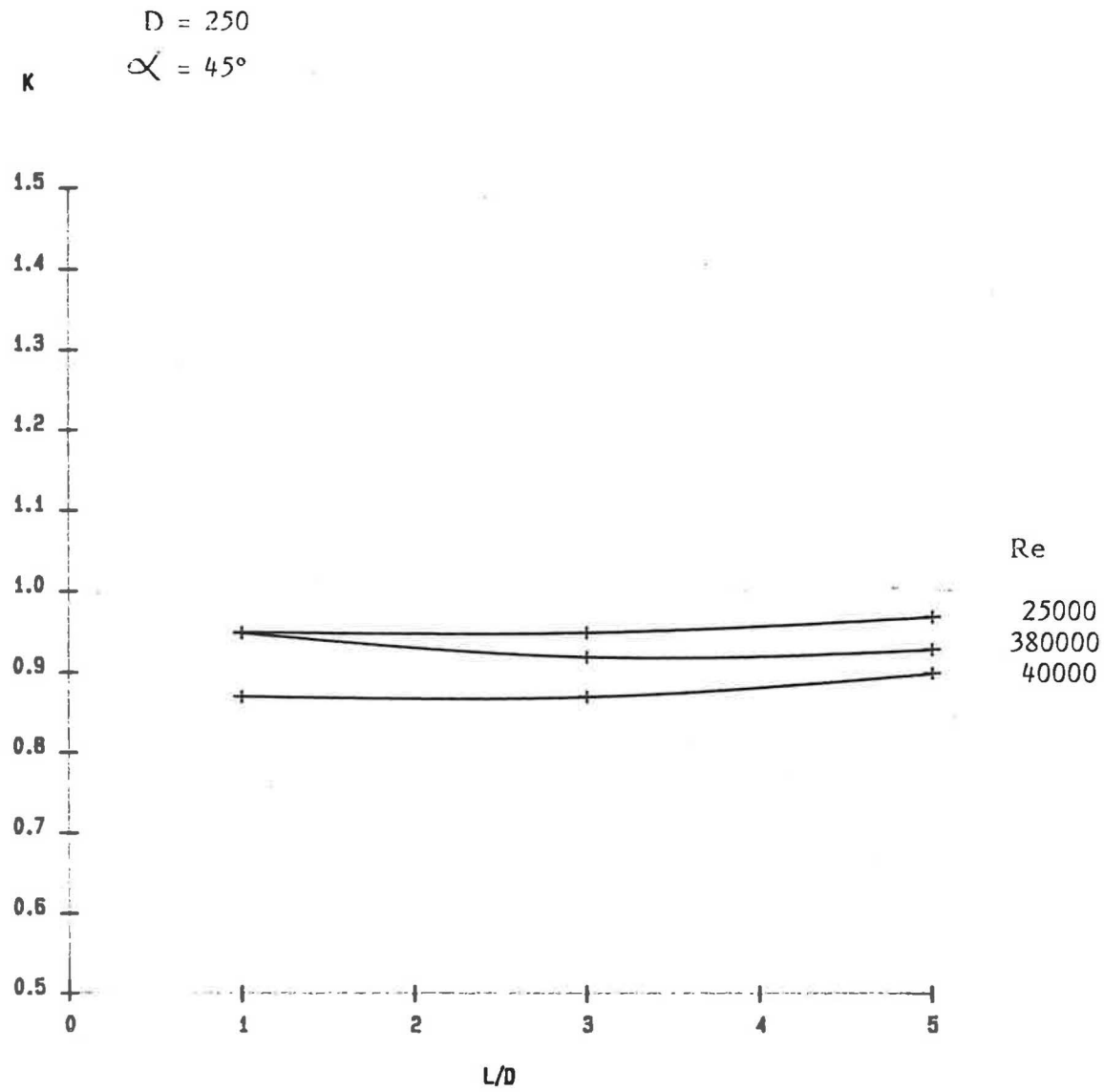


FIGURE 12a

COMPARAISON ENTRE LA VALEUR DZETA DE COMPOSANTS MESURES
SEPAREMENT ET LA VALEUR DZETA DES MEMES COMPOSANTS REUNIS
CONFIGURATION S POSITION HORIZONTALE ϕ 250

ReD	DEZTA			
	Coude	L/D		
	60°	1	3	5
380000	0,18253	0,01588	0,0476	0,07942
250000	0,19092	0,01711	0,05134	0,08558
40000	0,26840	0,0261	0,0784	0,13066

ReD	$\frac{L}{D}$	DZETA		K
		2 coudes + L/D (1) (mesurés)	2 coudes + L/D (2) (sommés)	
380000	1	0,42716	0,38094	1,12
"	3	0,42316	0,41266	1,03
"	5	0,46185	0,44448	1,04
250000	1	0,43950	0,39895	1,10
"	3	0,44099	0,43318	1,02
"	5	0,48170	0,46742	1,03
40000	1	0,59045	0,5629	1,05
"	3	0,59932	0,6152	0,97
"	5	0,65591	0,66746	0,98

K DZETA 2 COUDES + L/D (mesurés) (1)

DZETA 2 COUDES + L/D (sommés) (2)

TABLEAU 4

DOUBLES COUDES A ELEMENTS 60°
 PLUS UNE LONGUEUR DROITE ENTRE LES COUDES PLAN HORIZONTAL

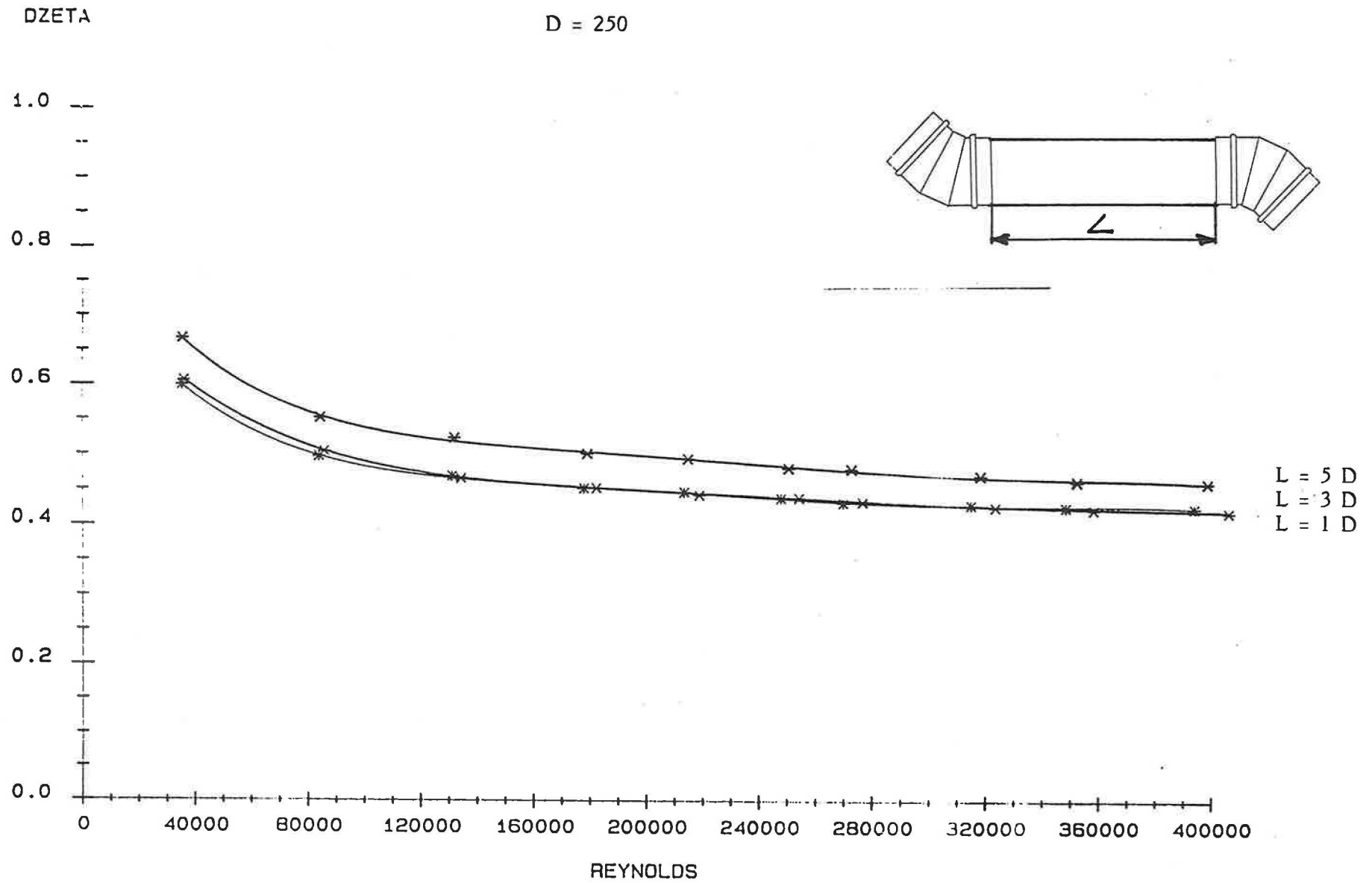


FIGURE 13

Rapport entre les valeurs DZETA des composants réunis
valeurs DZETA des composants séparés

$D = 250$

$\alpha = 60^\circ$

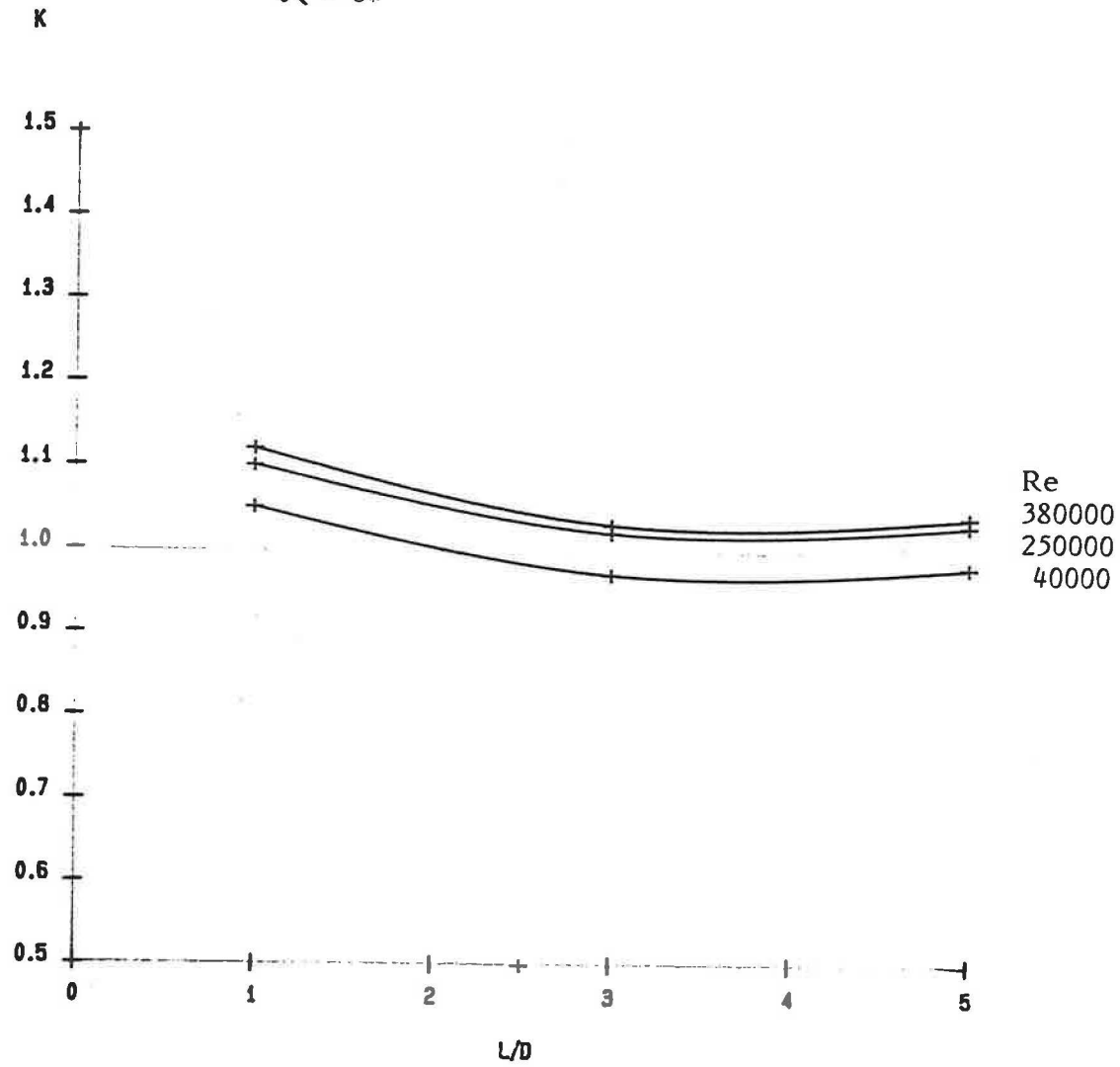


FIGURE 13a

COMPARAISON ENTRE LA VALEUR DZETA DE COMPOSANTS MESURES
SEPAREMENT ET LA VALEUR DZETA DES MEMES COMPOSANTS REUNIS
CONFIGURATION S POSITION HORIZONTALE Ø 250

ReD	DEZTA			
	Coude 45°	L/D		
		1	3	5
380000	0,23621	0,01588	0,0476	0,07942
250000	0,25463	0,01711	0,05134	0,08558
40000	0,38679	0,0261	0,0784	0,13066

ReD	$\frac{L}{D}$	DZETA		K
		2 coudes + L/D (1) (mesurés)	2 coudes + L/D (2) (sommés)	
380000	1	0,53957	0,4883	1,10
"	3	0,55732	0,52002	1,06
"	5	0,59686	0,55184	0,90
250000	1	0,55919	0,52637	1,07
"	3	0,58022	0,5606	1,03
"	5	0,62404	0,59484	0,88
40000	1	0,71814	0,79968	1,08
"	3	0,75072	0,85198	1,05
"	5	0,79245	0,90424	0,80

K DZETA 2 COUDES + L/D (mesurés) (1)
DZETA 2 COUDES + L/D (sommés) (2)

TABLEAU 5

PLUS UNE LONGUEUR DROITE ENTRE LES COUDES PLAN HORIZONTAL

DZETA

D = 250

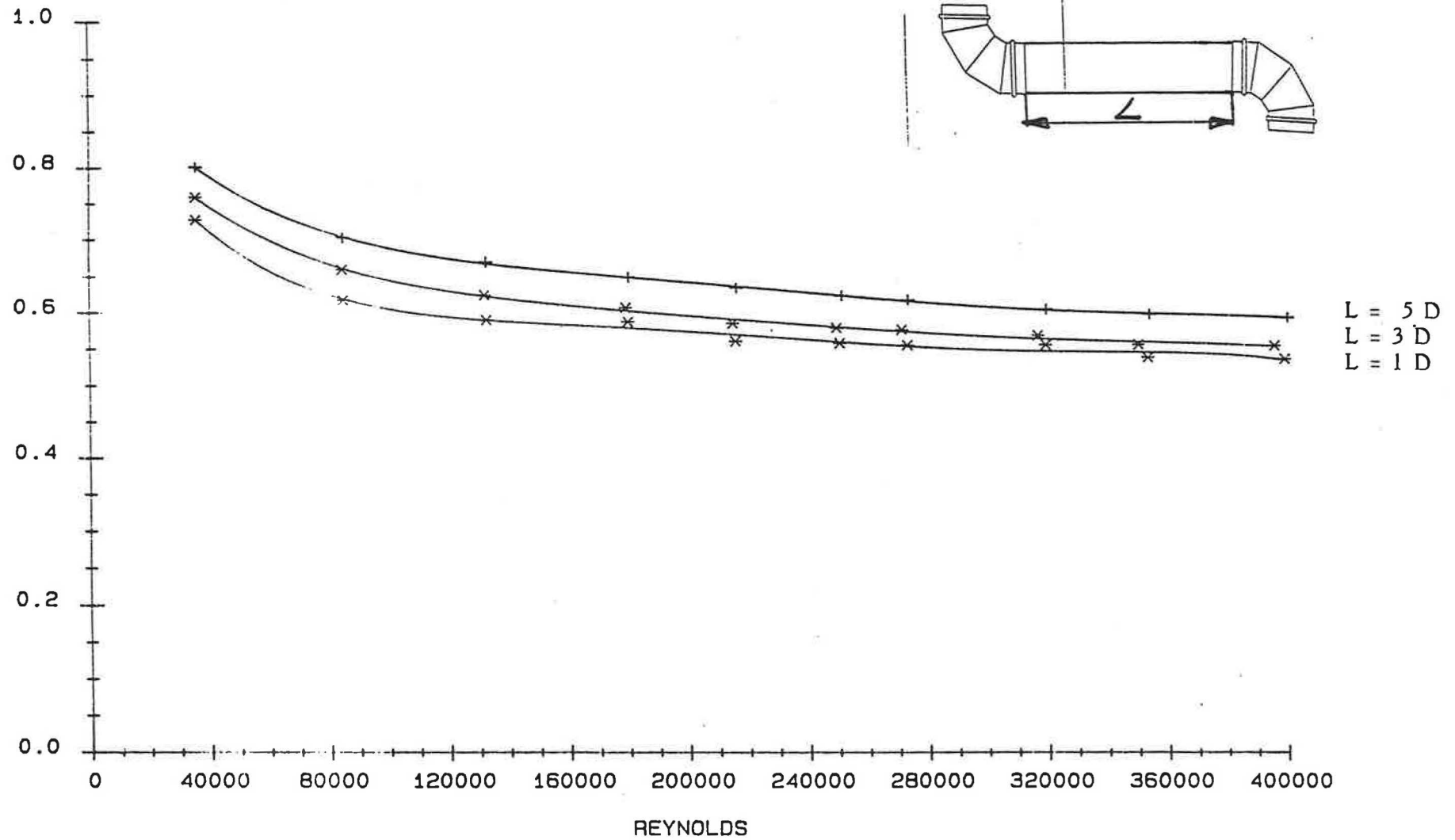


FIGURE 14

Rapport entre les valeurs DZETA des composants réunis
valeurs DZETA des composants séparés

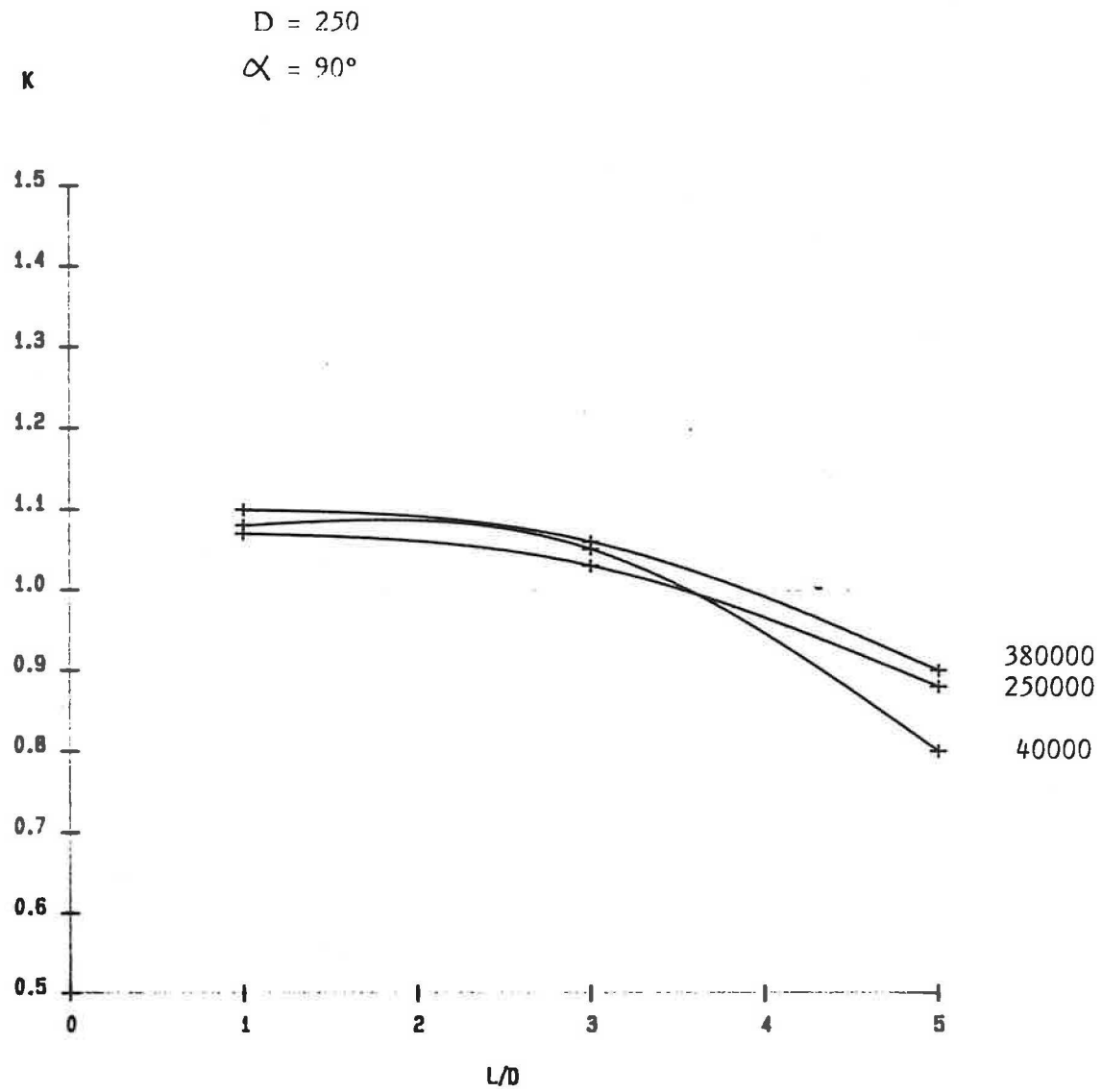


FIGURE 14a

DOUBLE COUDES + LONGUEUR DROITE PLAN HORIZONTAL

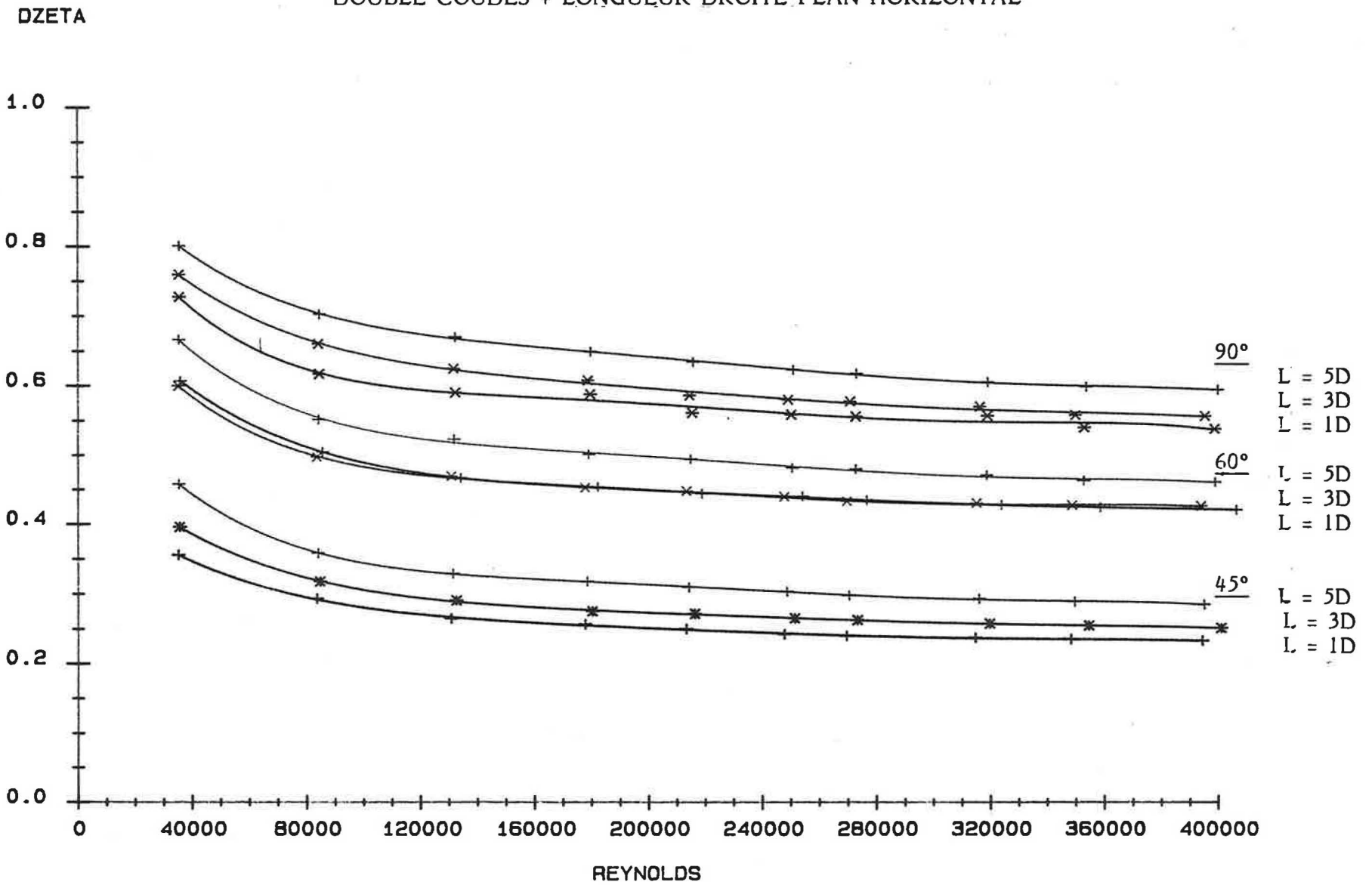


FIGURE 15

4 - CONCLUSION

Nous n'avons présenté qu'une quantité limitée de résultats d'essais, l'ensemble des résultats regroupés des quatre laboratoires européens sera rassemblé dans le rapport final et le catalogue qui devrait être terminé en 1991.