

N° d'ordre : 1020

50376
1983
235

50376
1983
235

THESE

[]

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE I

pour obtenir le titre de

Docteur

en

MECANIQUE DES FLUIDES

par

AHMED CHAKROUN

MESURES TRIDIMENSIONNELLES DE L'ECOULEMENT EN
SORTIE DE ROUE D'UN VENTILATEUR CENTRIFUGE PAR
ANEMOMETRIE A FIL CHAUD



Soutenue le 7 Janvier 1983

devant la commission d'examen

Membres du Jury :

- Président : M. DYMENT, Professeur, Université de Lille I.
Rapporteur : M. OUZIAUX, Professeur, E.N.S.A.M., Lille.
Examineurs : M. TOURNIER, Professeur, Université de Valenciennes.
M. FLORENT, Professeur, Université de Valenciennes.
M. CAIGNAERT, Assistant, E.N.S.A.M., Lille.
M. DESMET, Assistant, E.N.S.A.M., Lille.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Mécanique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de LILLE, sous la direction de Monsieur le Professeur OUZIAUX.

Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de mon profond respect.

Pendant la durée de cette étude, j'ai travaillé en étroite collaboration avec Monsieur CAIGNAERT. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour cette aide amicale et efficace.

Je tiens également à remercier Monsieur DESMET pour l'aide qu'il m'a apporté au cours de ce travail.

Je remercie Monsieur le Professeur DYMENT de me faire l'honneur de présider mon jury. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance.

Messieurs les Professeurs TOURNIER et FLORENT ont bien voulu participer à mon jury. Je les en remercie vivement.

Je remercie Monsieur STEVENEART, membre du laboratoire, pour son aide efficace et son amitié.

Je ne terminerai pas cet avant-propos sans exprimer mes remerciements à l'ensemble du personnel technique de laboratoire pour leur amicale sympathie.

TABLE DES MATIERES

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE 1 - PRINCIPES MIS EN ŒUVRE EN ANEMOMETRIE A FIL CHAUD</u>	3
1.0 - Introduction	3
1.1 - Principe	3
1.2 - Anémomètre à température constante	4
1.3 - Loi de refroidissement du fil chaud	6
1.3.1 - Rappels	6
1.3.2 - Influence d'une variation de la température du fluide sur la corrélation de Collis et Williams	9
1.3.3 - Pertes statiques et quasi-statiques par conduction	11
1.3.4 - La loi de KING	16
1.4 - Refroidissement du fil chaud en régime non permanent	18
1.4.1 - Réponse dynamique du fil chaud	18
1.4.2 - Fréquence d'atténuation des pertes dynamiques par conduction	19
1.5 - Compensation d'une variation de la température du fluide	20
1.5.1 - Influence d'une variation de la température ambiante sur le calcul de la vitesse	20
1.5.2 - Techniques de compensation de la variation de la température du fluide	22
1.6 - Sensibilités du fil chaud à la vitesse et à la température	23
1.6.1 - Coefficients de sensibilité du fil chaud à la vitesse et à la température	23
1.6.2 - Température de chauffe du fil	26
1.7 - Réponse du système anémométrique à température constante	26
1.8 - Effets de paroi	29

<u>CHAPITRE 2 - ETALONNAGE EN VITESSE D'UN FIL CHAUD</u>	31
2.0 - Introduction	31
2.1 - Principe de l'étalonnage	31
2.2 - Linéarisation des courbes d'étalonnage	33
2.3 - Dispositif expérimental	34
2.4 - Description des sondes	35
2.4.1 - Sondes à un fil	35
2.4.2 - Sondes à 2 fils croisés	36
2.4.3 - Description de la sonde à 3 fils	36
2.5 - Procédure d'étalonnage utilisée	38
DISCUSSION	40
- Précision de l'utilisation d'une corrélation $E=(E_0^2+BU)^{1/2}$	40
- Coefficient de sensibilité	41
- Correction de la variation de la température ambiante	43
- Comparaison avec la corrélation de Collis et Williams	45
 <u>CHAPITRE 3 - INFLUENCE DE L'INCLINAISON DE LA VITESSE PAR RAPPORT AU FIL</u>	47
3.1 - Vitesse effective de refroidissement	47
3.1.1 - Effet d'une incidence longitudinale	47
3.1.2 - Effet d'une incidence transversale	49
3.2 - Démarche expérimentale de calcul des facteurs k et h	50
3.3 - Discussion des résultats	51
3.3.1 - Facteur longitudinal k	51
3.3.2 - Facteur transversal h	54
3.3.3 - Conclusion	55
3.4 - Intéraction des fils d'une sonde à deux fils croisés	56
3.4.1 - Sillage aérodynamique	56
3.4.2 - Sillage thermique	58
3.5 - Caractéristiques directionnelles de la sonde à 3 fils	60

3.6 - Coefficient de sensibilité du fil chaud à la vitesse et aux incidences	63
<u>CHAPITRE 4 - LES MESURES EN ANEMOMETRIE A FIL CHAUD</u>	65
4.1 - Expression générale de la vitesse effective de refroidissement	65
4.2 - Méthodes de mesure en anémométrie à fil chaud	66
4.2.1 - Méthode conventionnelle	67
4.2.2 - Limite de l'application de la méthode conventionnelle	79
4.2.3 - Méthodes de mesure dans les écoulements de grandes amplitudes de fluctuation	82
4.2.4 - Méthodes utilisant des techniques d'échantillonnage	84
<u>CHAPITRE 5 - MESURES DES ECOULEMENTS DANS LES TURBOMACHINES</u>	86
5.1 - Technique du fil chaud tournant	86
5.2 - Technique du fil chaud stationnaire	87
5.2.1 - Méthode de mesure avec une sonde à 3 fils	88
5.2.2 - Méthode de mesure avec un fil incliné	88
5.2.3 - Autres méthodes de mesure	88
5.3 - Détermination des caractéristiques du décollement tournant avec deux sondes à un fil	89
<u>CHAPITRE 6 - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION D'ESSAI</u>	91
6.1 - Banc d'essai	91
6.2 - Point de fonctionnement du ventilateur lors des essais	92
6.3 - Position du point de mesure dans le repère fixe	94
6.4 - Chaîne de mesure	94
6.5 - Réponse en fréquence de la chaîne de mesure	96

<u>CHAPITRE 7 - MESURES TRIDIMENSIONNELLES AVEC LA SONDE A 1 FIL INCLINE</u>	99
7.1 - Domaine d'utilisation de la sonde à fil incliné	99
7.2 - Moyennes périodiques	100
7.3 - Méthode de résolution	101
7.4 - Mesures	102
7.4.1 - Echantillonnage externe	103
7.4.2 - Echantillonnage interne	106
<u>CHAPITRE 8 - MESURES TRIDIMENSIONNELLES AVEC LA SONDE A 3 FILS</u>	113
8.1 - Domaine d'utilisation de la sonde à 3 fils	113
8.2 - Méthode de résolution	113
8.3 - Acquisition des données et moyennes périodiques	116
8.4 - Profils des composantes de la vitesse	117
8.5 - Evaluation des contraintes de turbulence	119
8.6 - Précisions des résultats	121
<u>CHAPITRE 9 - COMPARAISON DES DEUX METHODES DE MESURE</u>	122
9.1 - Calcul du débit volume et de la puissance indiquée	122
9.2 - Discussion sur l'emploi des deux méthodes	124
CONCLUSION	127
ANNEXE 1 - Détermination des coefficients de la relation de KING	A1-1 & 2
ANNEXE 2 - Application du critère des moindres carrés pour la détermination des caractéristiques directionnelles des sondes	A2-1 à 3
ANNEXE 3 - Echantillonnage et moyenne périodiques	A3-1 à 3
ANNEXE 4 - Communications sur le système HP-IB	A4-1 à 6
ANNEXE 5 - Résolution par la méthode de Newton	A5-1 à 3
BIBLIOGRAPHIE	B.1 à 6

INTRODUCTION

Des activités de recherche consacrées à l'étude des écoulements internes dans les turbomachines, et plus particulièrement dans les machines centrifuges à fluide incompressible (pompes et ventilateurs), ont été entreprises au laboratoire de mécanique de l'E.N.S.A.M. de Lille.

L'objet de notre travail se place dans ce cadre, et il consiste à utiliser l'anémométrie à fil chaud à température constante pour la mesure du profil de la vitesse à la sortie de la roue d'un ventilateur centrifuge au moyen d'un sonde fixe.

Ce travail se divise en deux grandes parties.

La première partie comprend les chapitres 1, 2, 3 et 4. Les trois premiers chapitres sont consacrés à un travail bibliographique et expérimental par l'anémométrie à fil chaud à température constante afin d'améliorer notre connaissance de cette technique. Nous y traitons notamment des opérations d'étalonnage du fil chaud d'une sonde donnée et de la détermination de ses caractéristiques directionnelles.

Dans le chapitre 4, nous avons établi d'une part l'équation de base régissant le refroidissement d'un fil chaud exposé à un écoulement de fluide de direction inconnue, et effectué d'autre part un travail bibliographique pour les méthodes de mesure avec l'anémomètre à fil chaud à température constante, utilisées par différents auteurs.

La seconde partie comprend les chapitres 5, 6, 7 et 8. Le chapitre 5 résume les travaux de quelques chercheurs ayant utilisé l'anémométrie à fil chaud dans les turbomachines. Dans les chapitres 6, 7 et 8, nous abordons la description de notre installation d'essai et des deux méthodes que nous utilisons pour la détection du profil tridimensionnel de la vitesse

à la partie de la roue de notre ventilateur au moyen d'une ponde fixe.
Ces méthodes se rapportent dans notre cas à la sonde utilisée :

- Méthode de mesure avec la sonde à un fil incliné DISA 55 P12
- Méthode de mesure avec la sonde à trois fils DISA 55 P91

Nous montrons comment obtenir les courbes des profils des trois composantes de la vitesse pour l'application de ces deux méthodes, compte-tenu des moyens disponibles au laboratoire pour acquérir et traiter les données issues des anémomètres. La validité des résultats obtenus est analysée par observation de leur évolution en fonction du nombre d'échantillons utilisés, et également par calcul des caractéristiques de la roue du ventilateur (débit et puissance indiquée).

CHAPITRE 1PRINCIPES MIS EN OEUVREEN ANEMOMETRIE A FIL CHAUD1.0. Introduction

Nous donnons dans ce chapitre, les résultats de travaux effectués par quelques auteurs sur l'anémomètre à fil chaud et plus particulièrement sur l'anémomètre à fil chaud à température constante. Ce travail bibliographique a été fait en vue de l'application de l'anémomètre à fil chaud à température constante à la détection du profil tridimensionnel de la vitesse à la sortie de la roue d'un ventilateur centrifuge ; ainsi nous n'avons abordé que les aspects de l'anémométrie utiles pour la résolution de ce problème.

1.1. Principe

L'élément sensible de l'anémomètre à fil chaud est un fil métallique mince de 1 à 5 μm de diamètre et de 0,5 à 2 mm de longueur. Les matériaux généralement utilisés sont le platine, le tungstène et quelquefois le platine rhodié.

Le fil est chauffé par un courant électrique à une température supérieure à la température du fluide et inférieure à 300° C, pour éviter une oxydation rapide du fil aux très hautes températures et la diminution de sa résistance à la traction, et est refroidi (principalement par convection) par l'écoulement.

Dans un écoulement permanent, l'équilibre thermique entre un fil infiniment long perpendiculaire à l'écoulement et le fluide s'écrit :

$$RI^2 = \varnothing (U , T_m - T_a) \quad (1)$$

où RI^2 est la quantité de chaleur apportée par unité de temps par le courant électrique et $\emptyset (U , T_m - T_a)$ la quantité de chaleur perdue par unité de temps par le fil dans l'écoulement avec :

R	: Résistance du fil chaud	(Ω)
I	: Intensité du courant dans le fil	(A)
U	: Vitesse de l'écoulement	(m/s)
T_m	: Température moyenne du fil	(K)
T_a	: Température du fluide	(K)

On ne considère généralement que la convection forcée. Aux vitesses supérieures à quelques m/s, les effets du rayonnement et de la convection naturelle sont négligeables.

Lorsque l'écoulement est fluctuant, l'inertie thermique du fil intervient et l'équation de l'équilibre thermique devient :

$$RI^2 = \emptyset (U , T_m - T_a) + C_w \frac{dT_m}{dt} \quad (2)$$

où C_w : capacité thermique du fil chaud.

Il existe deux procédés d'anémométrie à fil chaud : l'anémomètre à intensité constante et l'anémomètre à température constante.

Actuellement, l'anémomètre à intensité constante n'est plus utilisé que pour des mesures aux faibles vitesses à cause de sa fréquence de coupure haute qui est limitée par l'inertie thermique du fil. Par contre, la bande passante de l'anémomètre à température constante n'est pas limitée par l'inertie thermique du fil puisque sa température ne varie pas, et la fréquence de coupure peut être reportée jusqu'à 1MHz.

1.2. Anémomètre à température constante [12] [21] [32]

Le fil chaud forme un bras du circuit d'un pont de Wheastone

équilibré pour une résistance R du fil chaud (fig. 1). Une fluctuation de la température du fil et par conséquent de sa résistance due aux effets de refroidissement d'une variation (u) de la vitesse de l'écoulement entraîne un déséquilibre du pont ; le servo-amplificateur apporte sur la boucle de retour une modification (i) de l'intensité à travers le fil pour s'opposer à ce déséquilibre.

Lorsque les variations de la température sont modérées, on écrit que la résistance du fil est fonction linéaire de la température et :

$$R = R_r [1 + a(T_m - T_r)] \quad (3)$$

où R_r : Résistance du fil à la température de référence (en Ohms)
 R : Résistance du fil chaud (en Ohms)
 a : coefficient de résistivité du matériau du fil (en $^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T_r : Température de référence

L'équation classique de l'anémomètre à fil chaud permettant de relier la variation de la résistance r et la fluctuation de la vitesse u s'écrit :

$$r + M \frac{dr}{dt} = \frac{s}{(1 + M^2 \omega^2)^{1/2}} u \quad (4)$$

avec u et r : respectivement les variations de la vitesse de l'écoulement et de la résistance du fil chaud
 ω : pulsation des fluctuations de la vitesse en rad/s
 s : coefficient de sensibilité statique du fil chaud
 M : constante de temps de l'ensemble du système
 M est généralement compris entre 0,1 et $2 \cdot 10^{-3}$ s

Dans le cas de fluctuations lentes, $M^2 \omega^2 \ll 1$, et l'équation peut s'écrire :

$$r + M \frac{dr}{dt} = s \cdot u.$$

1.3. Loi de refroidissement du fil chaud en régime permanent

1.3.1. Rappels [11][12][21]

L'équation de transfert de chaleur statique d'un cylindre diffusant la chaleur par convection dans un écoulement de fluide s'écrit :

$$\dot{Q} = h \Pi d (2l) (T_m - T_a) \quad (5)$$

ou, en introduisant le nombre de Nusselt $Nu = \frac{hd}{Ka}$:

$$\dot{Q} = Nu.Ka.\Pi.(2l) (T_m - T_a) \quad (6)$$

avec (2l), d : longueur et diamètre du cylindre (m)

Ka : coefficient de conductivité thermique du fluide (W/m.K)

h : coefficient d'échange de chaleur par convection (W/m².K)

Le processus physique de la convection se réduit à la forme suivante en utilisant les nombres sans dimension :

$$Nu = Nu (Re, Gr, Ma, Pr, Kn, 2l/d, \psi, a_0) \quad (7)$$

où les termes expriment les différents effets physiques qui sont, dans le cas d'un fil chaud d'un système anémométrique :

Re : $\frac{Ud}{\nu_a}$: (Nombre de Reynolds) - Effets de la vitesse du fluide

Gr : $\frac{gd^3 \beta (T_m - T_a)}{\nu_a^2}$: (Nombre de Grasshof) - Effets de convection naturelle

Pr : $\frac{C_p \mu_a}{Ka}$: (Nombre de Prandtl) - Rapport de la viscosité à la diffusivité thermique

Ma : $\frac{U}{C}$: (Nombre de Mach) - Effets de compressibilité

$Kn : \frac{\lambda_m}{d} : (\text{Nombre de Knudsen}) - \text{Effets de non-continuité}$

$\frac{2l}{d} : (\text{Rapport de la longueur au diamètre}) - \text{Effets d'une longueur finie du fil}$

$\psi : \text{Orientation du fil par rapport à la direction de l'écoulement}$

$a_o : (T_m - T_a) / T_a - \text{Rapport de surchauffe du fil}$

Les constantes non-définies sont :

$\rho_a : \text{Masse volumique du fluide}$

$\nu_a \text{ et } \mu_a : \text{Viscosités cinématique et dynamique du fluide}$

$g : \text{accélération de gravité}$

$\beta : \text{coefficient de dilatation thermique du fluide}$

$C_p : \text{chaleur spécifique du fluide}$

$\lambda_m : \text{libre parcours moyen des molécules du fluide.}$

Nous travaillons sur les écoulements d'air dans un ventilateur. Nous limitons donc la discussion aux aspects de l'équation de transfert de chaleur dans un écoulement de fluide incompressible ($U < 100$ m/s pour l'air) à des températures de travail de l'ordre de 20° c.

L'équation de transfert de chaleur se réduit :

$$Nu : Nu (Re, Pr, 2l/d, \psi, a_o) \quad (8)$$

Des simplifications sont encore apportées, pour le cas des fils chauds dans le gaz, en considérant séparément la dépendance angulaire ψ , l'effet d'une longueur finie ($2l/d$), et la dépendance au rapport de surchauffe a_0 . L'équation s'écrit alors :

$$\text{Nu} : \text{Nu} (\text{Re}, \text{Pr}) \quad (9)$$

Même réduite, il n'existe pas de représentation analytique simple de la relation de Nu exprimant le refroidissement du fil en fonction de la vitesse de l'écoulement. D'où le recours à des corrélations empiriques de transfert de chaleur.

Plusieurs corrélations ont été proposées pour les fils chauds dans l'air, où Pr peut être considéré constant ($\text{Pr} \approx 0,71$), et sont similaires dans la forme à la relation originellement exprimée par King en 1914 :

$$\text{Nu} : a + b \text{Re}^{0.5} \quad (10)$$

Une corrélation largement utilisée pour les sondes à fils, valable pour les gaz et tout fluide Newtonien est la loi de Kramer :

$$\text{Nu}_f : 0,42 \text{Pr}_f + 0,57 \text{Pr}_f^{0.33} \sqrt{\text{Re}_f} \quad (11)$$

pour $0,7 < \text{Pr}_f < 1000$. L'indice f signifie que les différents paramètres sont évalués à la température du film.

$$T_f : \frac{T_m + T_a}{2} \quad (\text{Kelvin})$$

Mais la corrélation la plus utilisée et citée, reste celle établie par Collis et Williams [11] en 1959 :

$$Nu_{uf} \left(\frac{T_f}{T_a}\right)^{-n_1} = \begin{cases} 0.24 + 0.56 Re_e^n & \text{pour } 0.02 < Re < 44 \\ 0.48 Re^{0.5} & \text{pour } 44 < Re < 140 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{avec } n_1 = 0.17 \quad \text{et} \quad n = 0.45$$

Le terme $\left(\frac{T_f}{T_a}\right)^{-n_1}$ est un facteur de correction rendant cette corrélation applicable pour le domaine de température $30^\circ\text{c} < T_m - T_a < 300^\circ\text{c}$.

Nous adoptons pour nos applications, cette dernière corrélation.

1.3.2. Influence d'une variation de la température du fluide sur la corrélation de Collis et Williams.

Analysons l'importance des effets d'une variation de la température d'un écoulement d'air sur la corrélation de Collis et Williams pour le domaine ($0,02 < Re < 44$) correspondant à notre domaine de variation de la vitesse.

Nous appelons :

T_c : Température initiale de l'air

T_a : Nouvelle température de l'air

avec $\Delta T = T_c - T_a$ inférieur à 10°c .

Aux températures T_c et T_a , il vient :

$$Nu_1 (T_c) = \left[0.24 + 0.56 \left(\frac{Ud}{\nu a_1}\right)^n \right] \left(\frac{T_m - T_c}{2 T_c}\right)^{n_1}$$

$$Nu_2 (T_a) = \left[0.24 + 0.56 \left(\frac{Ud}{\nu a_2}\right)^n \right] \left(\frac{T_m - T_a}{2 T_a}\right)^{n_1}$$

$$\text{avec } Nu_1 = \frac{h_1 d}{Ka_1} \quad \text{et} \quad Nu_2 = \frac{h_2 d}{Ka_2}$$

Les indices 1 et 2 renvoient aux températures T_a et T_c .

ν_a et K_a sont calculés à la température du film :

$$T_{fa} = \frac{T_m + T_a}{2} \quad ; \quad T_{fc} = \frac{T_m + T_c}{2}$$

pour les relations données par Collis et Williams [11] pour l'air de 0°C à 200°C :

$$\nu_a = [0.15 + (T - 293) 10^{-3}] 10^{-4} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$K_a = [1 + 3,17 \cdot 10^{-3} (T - 273)] \cdot 2,408 \quad (\text{W/m.K}) \quad (13)$$

T étant en Kelvin.

Ainsi, pour $T_c = 20^\circ\text{C}$, on a : $\nu_{a1} = 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

et $K_{a1} = 2,56 \cdot 10^{-2} \text{ W/mK}$

Nous écrivons les coefficients de transfert de chaleur sous la forme :

$$h_1 = A_c + B_c U^n \quad \text{et} \quad h_2 = A_a + B_a U^n$$

où

$$A_c = \frac{0.24 K_{a1}}{d} \left(\frac{T_m + T_c}{2T_c} \right)^{n1} \quad B_c = \frac{0.56 K_{a1}}{d^{1-n} \nu_{a1}^n} \left(\frac{T_m + T_c}{2T_c} \right)^{n1}$$

$$A_a = \frac{0.24 K_{a2}}{d} \left(\frac{T_m + T_a}{2T_a} \right)^{n1} \quad B_a = \frac{0.56 K_{a2}}{d^{1-n} \nu_{a1}^n} \left(\frac{T_m + T_a}{2T_a} \right) \left[1 - \frac{0.5}{\nu_{a1}} 10^{-7} (T_c - T_a) \right]^{-n}$$

On exprime Ka_2 en fonction de Ka_1 par la relation (13).

Comme $\Delta T/T_c$ et $\Delta T/(T_m+T_a)$ sont très petit devant l'unité, et $n = 0,17$, il vient après développement en série binomiale et en négligeant les termes d'ordre supérieur à 1 :

$$Aa = Ac \left[1 + \Delta T \left(\frac{n_1 T_m}{T_c(T_m + T_c)} - \frac{3,817 \cdot 10^{-5}}{Ka_1} \right) \right]$$

$$Ba = Bc \left[1 + \Delta T \left(\frac{n_1 T_m}{T_c(T_m + T_c)} - \frac{3,817}{Ka_1} \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 10^{-7} \frac{n}{va_1} \right) \right]$$

si $n = 0,45$ $n = 0,17$ $T_m = 250^\circ c$ et $T_c = 20^\circ c$, alors

$$Aa = Ac \left[1 - 7,47 \cdot 10^{-4} \Delta T \right]$$

$$Ba = Bc \left[1 + 8,216 \cdot 10^{-4} \Delta T \right]$$

Les variations de Aa et Ba lorsque ΔT est de l'ordre de $10^\circ c$ sont inférieures à 1 % ; le coefficient de transfert de chaleur par convection h peut dès lors être considéré constant (Champagne [9]).

Ainsi, une variation légère de la température du fluide n'influe que très faiblement sur la validité de la corrélation de Collis et Williams.

1.3.3. Pertes statiques et quasi-statiques par conduction

Du fait d'une longueur finie, la perte par conduction dans les supports du fil chaud est appréciable. Elle a été étudiée et formulée pour les conditions des écoulements permanents par plusieurs auteurs dont Corrsin [13], Hinze [21] et plus récemment Freymuth [17].

Pour un transfert de chaleur quasi-statique, l'énergie fournie au fil par unité de temps doit être égale aux quantités de chaleur par

unité de temps perdues par convection et conduction.

$$RI^2 = \emptyset + Q_E \quad (14)$$

\emptyset = perte par convection

Q_E = perte par conduction dans les supports du fil

La perte par conduction est déterminée par le gradient de la température aux bouts du fil (FIG 2), soit :

$$Q_E = - 2Kw \frac{\pi d^2}{4} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=1} \quad (15)$$

avec Kw : conductivité thermique du fil (w/m.K)

l : moitié de la longueur du fil (m)

z : coordonnée le long du fil (m)

$T = T(z)$: température ponctuelle à la position z avec

$$T_m = \frac{1}{2l} \int_{-1}^1 T(z) . dz$$

la température moyenne du fil.

Pour estimer la perte par conduction Q_E , il faut considérer le profil de la température le long du fil ; ce profil a été obtenu par King [25] , et d'une façon plus complète avec les hypothèses nécessaires par Corrsin [13] .

En supposant que la température des extrémités du fil que nous appelons T_s est approximativement égale à celle de l'écoulement, (elle est en réalité légèrement plus grande), la relation donnant le profil de la température s'écrit :

$$1 - \frac{\cosh(\sqrt{Co}l/i)}{\cosh(\sqrt{Co}l)}$$

$$\frac{T - T_s}{T_m - T_s} = \frac{1 - \frac{\cosh(\sqrt{Co}l/i)}{\cosh(\sqrt{Co}l)}}{1 - \frac{1}{\sqrt{Co}} \tanh(\sqrt{Co}l)} \quad (16)$$

où $\sqrt{Co}l$ est le groupe sans dimension (Freymuth [16])

$$Co^2 = \frac{\emptyset - I^2 Ra (T_m - T_a) \cdot a}{2 \frac{\Pi d^2}{4} Kw \frac{(T_m - T_a)}{1}} \quad (17)$$

Le gradient de la température est

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T - T_s}{T_m - T_s} \right) = \frac{-\sqrt{Co}l \tanh(\sqrt{Co}l)}{1 - \frac{1}{\sqrt{Co}} \tanh(\sqrt{Co}l)}$$

$$\text{et } Q_E = 2 \frac{\Pi d^2}{4} Kw \frac{(T_m - T_s)}{1} \frac{Co^2 \tanh(\sqrt{Co}l)}{1 - \frac{\tanh(\sqrt{Co}l)}{\sqrt{Co}}} \quad (18)$$

où $\sqrt{Co}l$ s'écrit en fonction de l'allongement (2l/d)

$$\sqrt{Co}l = \frac{\frac{2l}{d} \left(\frac{Ka}{Kw} Nu \right)^{1/2}}{\left[1 + a(T_m - T_a) + \frac{a(T_m - T_s)}{\zeta - 1} \right]^{1/2}} \quad (19)$$

$$\text{avec } \zeta = \frac{\sqrt{Co}l}{\tanh(\sqrt{Co}l)}$$

Pour des valeurs de $\sqrt{Co}l \gg 2$, l'équation (19) converge rapidement lorsqu'on calcule en première approximation une première valeur de $\sqrt{Co}l$ en négligeant le terme $a(T_m - T_s)/(\zeta - 1)$ et ensuite en substituant la valeur trouvée dans ce terme pour une seconde approximation.

La désignation d'un fil par "court" ou "long" pour $a(T_m - T_a)$ et $a(T_m - T_s)$ fixés, dépend, outre de l'allongement du fil ($2l/d$), de Nu et du rapport $\frac{Ka}{Kw}$. D'un autre côté, une augmentation de $a(T_m - T_a)$ et $a(T_m - T_s)$ entraîne un "raccourcissement" du fil en diminuant $\sqrt{Co}l$.

Co s'exprime en fonction de "la longueur froide" l_c , qu'a introduite Betchov [6] en 1948

$$Co = \frac{1}{1 - \frac{l_c}{l}}$$

l_c peut être considérée comme la partie du fil voisine des supports, refroidie effectivement par ces derniers (Hinze [21]).

La figure (3), due à Freymuth [17], montre les profils de la température le long du fil pour différentes valeurs de $\sqrt{Co}l$.

Pour la plus petite valeur de $\sqrt{Co}l = 2$, le profil de la température est parabolique et le fil est appelé "court"; par contre, pour $\sqrt{Co}l = 20$, la répartition de la température est uniforme sur une zone très grande et le fil est appelé "long".

Exemples :

Un fil en tungstène avec $2l = 1,25 \text{ mm}$ $d = 5 \mu\text{m}$ $a = 3,610^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 $Kw = 70 \text{ W/m }^\circ\text{C}$, et chauffé à une température $T_m = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, dans un écoulement d'air de température $T_a = 20^\circ\text{C}$, soit :

$$va = 0,265 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad Ka = 3,286 \cdot 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

à la température du film

$$T_f = 135^\circ\text{C}$$

- A une vitesse de l'écoulement $U = 3\text{m/s}$, on a

$$\text{Nu} = 0,7027 \quad \text{et} \quad \frac{2l}{d} \approx 84,3 \sqrt{\text{Co}l}$$

Ainsi, le fil est "court" ($\sqrt{\text{Co}l} \leq 2$) lorsque $2l/d \leq 168$
et il est "long" ($\sqrt{\text{Co}l} \geq 20$) lorsque $2l/d \geq 1686$

Pour $\frac{2l}{d} = 250$, on a $\sqrt{\text{Co}l} \approx 1,25$ et $l_c = 0,5 \text{ mm}$

$$Q_E = 4,172 \cdot 10^{-3}\text{W} \quad \emptyset = 20,86 \cdot 10^{-3}\text{W} \quad \text{RI}^2 = \emptyset + Q_E = 25 \cdot 10^{-3}\text{W}$$

$$\text{soit} \quad \frac{Q_E}{\text{RI}^2} = 16,7 \%$$

- Et à une vitesse de l'écoulement de 20m/s , on a

$$\text{Nu} = 1,406 \quad \text{et} \quad \frac{2l}{d} \approx 59 \sqrt{\text{Co}l}$$

Le fil est "court" pour $\frac{2l}{d} \leq 118$ et "long" pour $\frac{2l}{d} \geq 1180$.

Pour $\frac{2l}{d} = 250$, on a $\sqrt{\text{Co}l} \approx 2,8$ et $l_c = 0,22 \text{ mm}$

$$Q_E = 5,157 \cdot 10^{-3}\text{W} \quad \emptyset = 41,73 \cdot 10^{-3}\text{W} \quad \text{RI}^2 = 46,9 \cdot 10^{-3}\text{W}$$

$$\text{soit} \quad \frac{Q_E}{\text{RI}^2} = 11 \%$$

La perte par conduction est relativement importante et diminue sensiblement lorsque $\sqrt{\text{Co}l}$ augmente, et la distribution de la température devient plus uniforme le long du fil. Une distribution quasi-uniforme ($\sqrt{\text{Co}l} \approx 10$) demanderait dans le cas du dernier exemple, un rapport $\frac{2l}{d} = 600$, mais des mesures ponctuelles doivent être faites avec des fils courts, et une valeur $\sqrt{\text{Co}l} \approx 5$ suffit pour qu'il

ait une distribution presque uniforme le long des 60 % centraux du fil, (Hinze [21]).

Champagne, Sleicher et Wehrmann [10] ont effectué des mesures de la température le long d'un fil chaud au moyen d'un détecteur à infra-rouge et ont confirmé qualitativement la distribution calculée de la température.

1.3.4. La loi de King

La loi de refroidissement d'un fil chaud d'un anémomètre à température constante, immergé dans un écoulement de fluide incompressible ($Ma \ll 1$) isotherme, s'exprime par une relation

$$E = f(U)$$

où E est la tension aux bornes du pont de l'anémomètre et U la vitesse de l'écoulement.

En substituant dans le loi de refroidissement (14)

$$RI^2 = \emptyset (U, T_m - T_a) + Q_E$$

la quantité

$$RI^2 = E^2 \frac{R}{(R + Rt)^2} \quad (20)$$

$$\text{avec } Rt = R_1 + R_c$$

R_1 = résistance d'un bras du pont

R_c = résistance du câble reliant la sonde à fil chaud à l'anémomètre,

et en introduisant la corrélation de Collis et Williams, on obtient

$$E^2 = (A_1 + B_1 U^n) (T_m - T_a) + Q_F \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{avec } A_1 &= 0,24 \text{ Ka } \Pi \text{ 21 } \frac{(R + Rt)^2}{R} \left(\frac{T_f}{T_a}\right)^{0,17} \\ B_1 &= 0,56 \text{ Ka } \Pi \text{ 21 } \frac{(R + Rt)^2}{R} \left(\frac{T_f}{T_a}\right)^{0,17} \left(\frac{d}{va}\right)^n \\ Q_F &= Q_E \frac{(R + Rt)^2}{R} \end{aligned}$$

Q_F est en général tacitement inclus dans le terme de perte de chaleur par convection en écrivant :

$$E^2 = (A_2 + B_1 U^n) (T_m - T_a) \quad (22)$$

$$\text{avec } A_2 = A_1 + \frac{Q_F}{T_m - T_a}$$

C'est le terme A_2 qui contient la perte par conduction et qui dépend donc, comme le montre Baillet [2], du rapport $\left(\frac{21}{d}\right)$ lorsque $\left(\frac{21}{d}\right)$ est inférieur à 1 000.

La relation (22) s'écrit encore sous la forme :

$$E^2 = A + BU^n \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{avec } A &= A_2 (T_m - T_a) \\ \text{et } B &= B_1 (T_m - T_a) \end{aligned}$$

On appelle d'une façon générale "Loi de King", les lois sous la forme (23) où A, B et n sont déterminés expérimentalement par la méthode d'étalonnage du fil chaud ; ces constantes et en particulier l'exposant n sont très sensibles à l'état du fil chaud comme par exemple le dépôt de particules extrêmement fines.

Gaulier [18] écrit que l'utilisation d'une loi de King du type (23) dans le domaine des vitesses $U = 0 ; 25$ m/s entraîne des erreurs de l'ordre de 20 % sur la mesure des vitesses, et il adopte une loi modifiée du type

$$E^2 = A + BU^n + CU \quad (23 a)$$

où A, B, C et n sont déterminés par une méthode d'étalonnage.

En appliquant cette relation, les erreurs sur ses vitesses sont du même ordre que les erreurs de mesures.

1.4. Refroidissement du fil chaud en régime non-permanent [12] [17] [21]

1.4.1. Réponse dynamique du fil chaud

En régime non-permanent, la réponse d'un fil chaud "long" ($\sqrt{Co}l \gg 20$) est donnée par l'expression

$$C_w \frac{dT_m}{dt} = RI^2 - \emptyset (U, T_m - T_a)$$

La plus petite durée caractéristique de l'écoulement est

$$\zeta = \frac{\eta_k}{U} \quad \text{en (s)}$$

où $\eta_k = \left(\frac{v^3}{E}\right)^{1/4}$ est la microéchelle de Kolgomorov (en m)

et $E = 2 v \int_0^{\infty} P(f) f^2 df$

la puissance par unité de masse dissipée par le fluide avec

f : fréquence des fluctuations

P(f) : puissance du spectre des fluctuations de vitesse.

En écoulement non-permanent la quantité de chaleur \emptyset s'exprime encore sous sa forme statique, car la durée caractéristique de l'écoulement ζ est plus grande que les autres durées caractéristiques de l'écoulement du voisinage du fil, dont les plus importantes sont

$\zeta_1 = \frac{d}{U}$: temps nécessaire à une particule du fluide pour parcourir une distance d .

$\zeta_2 = \frac{d^2}{\nu a}$: temps nécessaire pour qu'une diffusion visqueuse propage à une distance de l'ordre de d .

Exemple :

Pour un fil de $2,5 \mu\text{m}$ de diamètre dans un écoulement d'air de vitesse $U = 10 \text{ m/s}$ et d'intensité de turbulence de 5% , il vient : $\zeta = 10^{-5} \text{ s}$,
 $\zeta_1 = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ et $\zeta_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ (Comte - Bellot [12]).

1.4.2. Fréquence d'atténuation des pertes dynamiques par conduction

On considère un écoulement isotherme. En écoulement non-permanent, les fluctuations de vitesse entraînent des fluctuations des pertes par convection et par conduction. Ces pertes dynamiques ont été étudiées par Batchov [5], Hinze [20], Freymuth [16], ...

Aux hautes fréquences, les fluctuations de la perte par conduction, sont atténués à cause de l'atténuation des ondes de chaleur le long du fil. En supposant des fluctuations périodiques de fréquence f , Bel jaars [4] estime que cette atténuation intervient lorsque f est supérieure à une fréquence limite f_1 :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{40 D}{(2l)^2}$$

avec D : diffusivité thermique du matériau du fil (m^2/s)
 $(2l)$: longueur du fil (m)

Exemple :

Pour un fil de tungstène ($D = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) de longueur $2l = 1,25 \text{ mm}$, les pertes dynamiques par conduction sont atténuées pour les fréquences des fluctuations de vitesse :

$$f > f_1 = 257 \text{ Hz}$$

En conclusion, la loi de King, sous la forme (22) ou (23) reste valable lorsque l'écoulement est non-permanent.

1.5. Compensation d'une variation de la température du fluide

1.5.1. Influence d'une variation de la température ambiante sur le calcul de la vitesse

Lorsque la température de l'écoulement varie entre le moment de l'étalonnage, et le moment des mesures ou pendant les mesures, l'influence de ce changement doit être pris en compte. Les corrections à effectuer sont petites mais non négligeables.

Analysons l'effet du terme $(T_m - T_a)$ dans la relation (22) :

$$E^2 : (A_2 + B_1 U^n)(T_m - T_a)$$

où A_2 , B_1 et n sont considérés indépendants de la température

soit T_c : température de l'écoulement lors de l'étalonnage.

et T_a : température de l'écoulement lors des mesures :

avec $\Delta T = T_c - T_a < 10^\circ\text{C}$

La relation de King (22) s'écrit aux deux conditions :

$$E_c^2 = (A_2 + B_1 U^n)(T_m - T_c)$$

$$\begin{aligned} E_a^2 &= (A_2 + B_1 U^n)(T_m - T_a) \\ &= (A_2 + B_1 U^n)(T_m - T_c) + (A_2 + B_1 U^n)(\Delta T). \end{aligned}$$

(les indices a et c renvoient aux conditions T_a et T_c)

En ne tenant pas compte de la variation ΔT dans la dernière relation, il y a variation de la vitesse telle que

$$E_a^2 = (A_2 + B_1 U_m^n)(T_m - T_a)$$

U et U_m sont les vitesses réelles et mesurées, d'où

$$U_m^n = U^n \left[1 + \frac{a}{a_w} \left(1 + \frac{A_2}{B_1 U^n} \right) \Delta T \right]$$

avec $a_w = a(T_m - T_c)$ le rapport de surchauffe.

Après développement en série binomiale jusqu'au 1er ordre, on a

$$U_m = U \left[1 + b \Delta T \right] \quad (25)$$

avec
$$b = \frac{a}{na_w} \left(1 + \frac{A_2}{B_1 U^n} \right)$$

L'erreur relative est :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{U - U_m}{U} = b \Delta T$$

$\frac{A_2}{B_1}$ s'écrit aussi en fonction des constantes de la relation

de King A et B :

$$\frac{A_2}{B_1} = \frac{A}{B}$$

Exemples :

$$a = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad a_w = 0,8 \quad n = 0,45 \quad \text{et} \quad \frac{A}{B} = 2,5$$

alors
$$\frac{\Delta U}{U} = - \Delta T \left(1 + \frac{2,5}{U^n} \right) 10^{-2}$$

si $U = 5 \text{ m/s}$
$$\frac{\Delta U}{U} = - 2 \cdot 10^{-2} \Delta T$$

et $U = 100 \text{ m/s}$
$$\frac{\Delta U}{U} = - 1,25 \cdot 10^{-2} \Delta T$$

Ainsi, à une variation de la température ΔT de l'ordre de 1°C , pour une vitesse fixée U , comprise entre 5 m/s et 100 m/s , l'erreur relative est :

$$1 \% < \left| \frac{\Delta U}{U} \right| < 3 \%$$

1.5.2. Techniques de compensation de la variation de la température du fluide.

Il existe deux techniques de compensation d'une variation de la température de l'écoulement lorsqu'elle change lentement :

- Technique de corrections des données,
- Technique de variations de la température du fil chaud.

1) Technique de corrections des données

L'utilisation des constantes A , B et n de la relation de King obtenues à partir de la courbe d'étalonnage à une température T_c différente de celle de travail T_a est possible avec les corrections (Bearman [3]) :

$$E_c^2 = (A + B U^n)(T_m - T_c) = A_c + B_c U^n$$

$$E_a^2 = (A + B U^n)(T_m - T_a) = A_a + B_a U^n$$

$$\text{alors } A_a = c A_c \quad \text{et} \quad B_a = c B_c \quad (26)$$

avec $c = 1 + \frac{\Delta T}{T_m - T_c}$ l'exposant n demeurant constant.

Sur la figure (4a), nous avons tracé plusieurs courbes d'étalonnage d'un fil chaud avec différentes valeurs de $(T_m - T_a)$, et nous avons pointé sur la figure (4b) les valeurs de l'exposant n en fonction de $(T_m - T_a)$.

On remarque que l'exposant n est sensible à une variation de $(T_m - T_a)$ et cette sensibilité diminue pour les valeurs $(T_m - T_a)$ comprises entre 220 et 240°C.

Il apparait que la correction la plus précise consiste à faire plusieurs étalonnages pour différentes valeurs de $(T_m - T_a)$ couvrant le domaine de variations de la température de l'écoulement, et faire ensuite des interpolations pour chercher les courbes d'étalonnages à utiliser (TSI [41]).

Cette méthode de correction est utilisée lorsque la précision demandée est très grande, mais elle présente l'inconvénient d'être longue, compte-tenu de la fragilité des fils et du nombre d'étalonnages à effectuer après chaque réparation.

2) Technique de variations de la température du fil chaud

Elle consiste à faire varier la température de chauffe du fil pour que la tension aux bornes du fil soit indépendante d'une variation de la température de l'écoulement.

Il existe sur le marché des anémomètres munis d'un système de compensation automatique de la température. La sonde, outre le fil chaud, est munie d'un fil "froid" fonctionnant comme une résistance de thermomètre pour la détection des variations de température.

1.6. Sensibilités du fil chaud à la vitesse et à la température

1.6.1. Coefficients de sensibilité du fil chaud à la vitesse et à la température

Soient u et θ de petites variations de la vitesse et de la température du fluide et e la variation correspondante de la tension

aux bornes du pont, telles que :

$$\begin{aligned} U &= \bar{U} + u \\ T_a &= \bar{T}_a + \theta \\ E &= \bar{E} + e \end{aligned} \quad (27)$$

U , T_a et E sont les quantités instantanées, et \bar{U} , \bar{T}_a et \bar{E} sont les quantités moyennes.

Lorsque u , θ et e sont très petites devant \bar{U} , \bar{T}_a et \bar{E} , on peut écrire :

$$u = dU \quad \theta = dT_a \quad e = dE$$

en utilisant une relation de refroidissement du type

$$E = f(U, T_m - T_a)$$

On écrit :

$$dE = \frac{\partial E}{\partial U} dU + \frac{\partial E}{\partial T_a} dT_a \quad (28)$$

$$\text{ou } e = S_u \cdot u + S_\theta \cdot \theta$$

avec $S_u = \left. \frac{\partial E}{\partial U} \right|_{\theta = 0}$ le coefficient de sensibilité du fil chaud à la vitesse défini par $\sqrt{e^2} = S_u \sqrt{u^2}$ (29)

et $S_\theta = \left. \frac{\partial E}{\partial T_a} \right|_{u = 0}$ le coefficient de sensibilité du fil chaud à la température défini par $\sqrt{e^2} = S_\theta \sqrt{\theta^2}$ (30)

Les quantités $\sqrt{e^2}$, $\sqrt{u^2}$ et $\sqrt{\theta^2}$ sont les valeurs efficaces des quantités fluctuantes e , u et θ .

Il existe plusieurs situations où les variations de la vitesse s'accompagnent de variations de la température. Il convient donc de déterminer une température de chauffe T_m du fil pour qu'il soit plus

sensible aux variations de la vitesse qu'à celles de la température.
Nous utilisons la loi de King

$$E^2 = (A_2 + B_1 U^n) (T_m - T_a)$$

Nous avons vu qu'une faible variation de la température n'influe que très légèrement sur la corrélation de Collis et Williams, nous pouvons dès lors supposer que les coefficients A_2 , B_1 et n sont indépendants des températures T_m et T_a .

Les coefficients de sensibilités à la vitesse et à la température s'écrivent :

$$\begin{aligned} S_u &= \frac{n B_1 U^{n-1}}{2} \sqrt{\frac{T_m - T_a}{A_2 + B_1 U^n}} \\ S_\theta &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_2 + B_1 U^n}{T_m - T_a}} \end{aligned} \quad (31)$$

Sur la figure (4), nous avons tracé les fonctions $S_u = f(T_m - T_a)$ et $S_\theta = g(T_m - T_a)$ pour quelques vitesses fixées U , et pour les valeurs :

$$\begin{aligned} d &= 5 \cdot 10^{-6} \text{ m} & \lambda &= 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m} & a &= 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1} \\ & & & & & \text{(fil en tungstène)} \\ T_a = T_r &= 15^\circ\text{C} & R_a = R_r &= 4 \ \Omega & n &= 0,45 & n_1 &= 0,17 \end{aligned}$$

$$\nu_a = 0,15 + 10^{-3} (T_f - 293) \cdot 10^{-4}$$

$$K_a = [1 + 3,17 \cdot 10^{-3} (T_f - 273)] \cdot 2,408 \cdot 10^{-2}$$

$$T_f = \frac{T_m + T_a}{2} \text{ en } ^\circ\text{K}$$

$$Q_E = 0 \quad (A_2 = A_1)$$

Pour une vitesse donnée, S_u et S_θ varient inversement avec $(T_m - T_a)$ et une grande valeur de $(T_m - T_a)$ est alors recommandée pour la mesure des variations de vitesse. Nous observons cependant une sensibilité significative

à la température aux grandes valeurs de $(T_m - T_a)$ (supérieures à 200°C) devant la sensibilité à la vitesse. Et lorsque U augmente, S_u diminue, et les deux sensibilités sont du même ordre lorsque $U \geq 80\text{m/s}$. Il convient donc de surveiller les fluctuations de température lors des mesures des fluctuations de vitesse (Bruun [7]).

Inversement, pour obtenir une grande sensibilité à la température, on opère à de petites valeurs de $(T_m - T_a)$ et le fil fonctionne comme une résistance de thermomètre.

1.6.2. Température de chauffe du fil

La température de chauffe T_m du fil chaud est déterminée par la résistance de chauffe du fil R , de la résistance du fil "froid" à la température de référence que nous prenons comme étant la température du fluide T_a et une résistance de référence R_{20} par l'équation :

$$T_m = T_a + \frac{1}{a_{20}} \frac{R - R_a}{R_{20}}$$

a_{20} et R_{20} sont données par le fabricant.

Une autre expression donnant une indication de la température de chauffe du fil communément acceptée est le rapport de surchauffe :

$$a_w = \frac{R - R_a}{R_a} = a (T_m - T_a) \quad (32)$$

1.7. Réponse en fréquence du système anémométrique à température constante

La réponse en fréquence d'un anémomètre à température constante dépend de plusieurs facteurs dont les propriétés de l'élément sensible et du fluide, le rapport de surchauffe, la résistivité de l'élément sensible, la vitesse de l'écoulement, le gain et la largeur de bande de l'amplificateur, et la résistance du pont.

La réponse en fréquence du système anémométrique est égale à la plus petite des deux réponses en fréquence :

- la réponse en fréquence du fil chaud lui-même, et,
- la réponse en fréquence de l'appareillage électronique.

La réponse en fréquence du fil chaud dépend de deux facteurs : sa température de chauffe et ses dimensions. Disa [15] estime à 400 KHz la réponse en fréquence des fils en tungstène de 5 μm de diamètre. Mais le facteur le plus important est la différence ($T_m - T_a$). Plus cette différence est importante, plus grande est la réponse en fréquence. Rodi [35] propose un rapport de surchauffe :

$$a_w = 0,8$$

pour obtenir une grande réponse en fréquence.

La réponse en fréquence peut être déterminée en produisant un changement rapide de la vitesse de l'écoulement à mesurer et dans lequel est placé l'élément sensible. Mais il est très difficile de générer des fluctuations de hautes fréquences de vitesse ou de température d'amplitudes connues, d'où le recours à des méthodes indirectes.

La méthode la plus connue, consiste à mettre l'élément sensible dans un écoulement de fluide de faible intensité de fluctuation et de vitesse maximale connue égale à celle que l'on s'attend à mesurer. Des variations rapides de la vitesse sont alors simulées en envoyant un signal carré dans le pont, et on observe la sortie sur l'écran d'un oscilloscope.

Les anémomètres disponibles sur le marché sont généralement munis d'un générateur de signaux carrés. La réponse en fréquence peut alors être ajustée en faisant varier le gain et le filtre haute fréquence de l'amplificateur et du pont.

La réponse au test du signal carré doit produire sur l'écran

de l'oscilloscope une ligne montrant une impulsion la plus blève possible sans oscillations superposées. Si cette condition est réalisée, le pont et l'amplificateur sont parfaitement alignés.

On mesure ainsi un temps de réponse du système à une impulsion carrée.

La définition du temps de réponse et son interprétation en terme de réponse en fréquence change d'un auteur à l'autre (FIG 6).

Freytmuth [16] mesure un temps de réponse ζ_f à partir du début de l'impulsion jusqu'au point de front descendant à 3 % de la hauteur totale de l'impulsion, et définit une réponse en fréquence de ζ_f à laquelle la réponse est atténuée de (3 dB) :

$$f = \frac{1}{1,5 \zeta_f} \quad (\text{Hz}) \quad (33a)$$

Olivari et Borres [33] mesurent le temps de réponse ζ^* du début de l'impulsion jusqu'au point du front descendant à 37 % de la hauteur totale. Ils calculent la réponse en fréquence du système par la relation :

$$f = \frac{1}{2,6 \zeta^*} \quad (\text{Hz}) \quad (33b)$$

Tiller [39] suppose le système du premier ordre. Il mesure un temps de réponse ζ_t à partir de l'abscisse du maximum de l'impulsion jusqu'à celui du point de front descendant à 37 % de la hauteur totale, et calcule la bande passante du système :

$$f_t = \frac{1}{2\pi \zeta_t} \quad (\text{Hz}) \quad (33c)$$

Disa [15] donne les réponses en fréquence tracées pour plusieurs vitesses d'un écoulement d'air du système anémométrique 55 MO 5 pour différents types de sonde. Ainsi pour une sonde 55 F 31 (fil de 5 μm de

diamètre en tungstène), on lit les caractéristiques fréquentielles suivantes :

U	(m/s)	:	1	:	3	:	10	:	30	:	100	:
f	(KHz)	:	28	:	40	:	70	:	115	:	160	:

1.8. Effets de paroi

Les petites dimensions des sondes à fils chauds les désignent tout naturellement à l'emploi aux voisinages des parois. Mais la proximité d'une paroi froide introduit un accroissement du refroidissement du fil chaud, et les vitesses apparentes mesurées sont plus élevées que les vitesses réelles.

Aux petites vitesses, l'effet de paroi prédomine, et la vitesse apparente augmente d'autant plus que la distance à la paroi diminue. Il est maximal à vitesse nulle et peut être encore détecté à 1 mm de distance. L'effet de paroi cesse lorsque la distance sans dimension à la paroi est de :

$$\frac{y u^*}{\nu_a} = 5$$

(C. Bellot [12], Oka et Kostic [31]). Avec

- y : distance à la paroi
- u* : vitesse de frottement de la paroi
- ν_a : viscosité cinématique.

La figure (7) due à Oka et Kostic, montre un exemple de l'influence de la proximité de la paroi.

Des méthodes de corrections ont été proposées, la plus connue est celle de Wills (1963) utilisant des termes correctifs "laminaire" et "semi-laminaire", mais elle ne paraît pas adéquate d'après C. Bellot [12].

Oka et Kostic [31] ont établi un diagramme de travail pour déterminer la correction de l'influence de la paroi en fonction de la tension de l'anémomètre et de la distance à la paroi.

°
° °

CHAPITRE 2ETALONNAGE EN VITESSED'UN FIL CHAUD2.0. Introduction

L'opération d'étalonnage d'un fil chaud d'une sonde donnée consiste à tracer la courbe d'étalonnage exprimant la tension de sortie du pont de l'anémomètre en fonction de la vitesse de l'écoulement dans lequel est placée la sonde. Nous traitons dans ce chapitre du principe de cette opération et faisons un bref rappel sur les techniques de linéarisation de la courbe d'étalonnage. Nous discutons par ailleurs les résultats obtenus et notamment de la précision de l'utilisation d'une loi de King de type (23) corrélant les points expérimentaux.

2.1. Principe de l'étalonnage

Nous prenons la température de référence comme étant la température du fluide T_a .

Le fil chaud opère à une température moyenne de chauffe T_m . La résistance de chauffe affichée est calculée par :

$$R = R_a (1 + a_w) \quad (34)$$

avec $a_w = a(T_m - T_a)$, le rapport de surchauffe.

Nous avons choisi $T_m - T_a = 230^\circ\text{C}$, ce qui correspond à un rapport de surchauffe, pour un fil en tungstène ($a = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$)

de $a_w = 0,828$ et $R = 1,828 \cdot Ra$.

Soit un fil chaud perpendiculaire à un écoulement d'air de faible intensité de fluctuation. A une vitesse instantanée de l'écoulement $U(t)$ correspond une tension de sortie instantanée $E(t)$ du pont. Nous décomposons ces quantités en quantités moyennes et fluctuantes :

$$U(t) = \bar{U} + u(t)$$

$$E(t) = \bar{E} + e(t)$$

où les quantités moyennes \bar{U} et \bar{E} sont définies par :

$$\bar{U} = \frac{1}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} U(t) dt \quad \bar{E} = \frac{1}{T_2} \int_{t_0}^{t_0+T_2} E(t) dt \quad (35)$$

T_1 et T_2 , les temps d'intégration, doivent être assez larges pour assurer la convergence aux valeurs stationnaires \bar{U} et \bar{E} .

On définit l'intensité de fluctuation par $I = \sqrt{\overline{u^2}}/\bar{U}$ avec :

$$\overline{u^2} = \frac{1}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} (U(t) - \bar{U})^2 dt \quad (36)$$

Pour l'étalonner, le fil est placé perpendiculairement à un écoulement d'air, avec une intensité de fluctuation aussi faible que possible ($I < 2\%$), généré par une soufflerie. En faisant varier la vitesse de l'écoulement, on peut tracer l'évolution de la tension moyenne \bar{E} en fonction de la vitesse moyenne \bar{U} mesurée avec un pitôt. On approxime la courbe $\bar{E} = f(\bar{U})$ par la loi :

$$E = (A + BU^n)^{1/2} \quad (37)$$

A est déterminé en annulant la vitesse \bar{U} ; et $A = E_0^2$.

E_0 est une tension fictive obtenue par extrapolation de la courbe $\bar{E} = f(\bar{U})$. La tension réelle E_0' est en fait légèrement supérieure

à E_0 à cause de la convection naturelle qui n'est plus négligeable. On prend généralement $E_0 = 0,925 E_0^!$ (Baille [2], Hinze [21],...) pour établir une loi de type (37) pour les vitesses supérieures à 0,25 m/s (FIG 8).

Mais le fait de prendre $E_0^!$ à la place de E_0 n'entraîne pas d'erreur appréciable dans le calcul de B et n lorsque les valeurs mesurées du \bar{U} sont supérieures à quelques m/s (Baille [2]).

Compte-tenu des imprécisions de mesure, nous calculons les coefficients B et n de la loi de King suivant le critère des moindres carrés de telle sorte que la courbe de la fonction (37) passe au mieux par les points de mesure (\bar{U}, \bar{E}) .

2.2. Linéarisation des courbes d'étalonnage

La figure (9) montre un exemple d'une courbe d'étalonnage d'une sonde à un fil DISA 55 P 11. La courbe est non-linéaire et sa sensibilité est maximale aux faibles vitesses ($U < 10$ m/s), et diminue lorsque la vitesse augmente. Les constantes A, B et n dépendent des conditions du fil lors de son étalonnage, et l'exposant n est généralement différent de 0,5.

Une tension de sortie non-linéaire en fonction de la même vitesse présente les inconvénients suivants :

- elle ne permet pas l'utilisation de l'anémomètre en tant qu'instrument de mesure directe.

- un certain temps est nécessaire pour la conversion de la tension en terme de vitesse.

- lorsqu'il s'agit de nombreuses valeurs à convertir, par exemple par ordinateur ou calculateur, on doit prévoir une grande capacité de stockage.

Pour ces raisons, on utilise souvent un linéarisateur à la sortie du pont de l'anémomètre à température constante, et la tension linéarisée s'écrit en fonction de la vitesse :

$$E_L = S.U$$

S est la constante de linéarisation.

Mais il y a perte de la précision lorsqu'un signal passe par un circuit pour le modifier. Ainsi lorsqu'il s'agit de grandes précisions, on utilise directement la tension non-linéarisée.

Il existe néanmoins des applications de l'anémomètre à température constante rendues possibles grâce aux techniques de linéarisation.

Dans notre travail, notre chaîne de mesure ne comporte pas de linéarisateur et nous utilisons directement la tension de sortie du pont non-linéarisée.

2.3. Dispositif expérimental

Pour les opérations d'étalonnage et de détermination des différentes caractéristiques des sondes, nous disposons de l'appareillage suivant :

- une soufflerie générant des vitesses de 4 m/s à 40 m/s avec des intensités de fluctuations inférieures à 2 %.
- un dispositif de support de sondes permettant la rotation de la sonde de l'extérieur de la soufflerie dans un plan vertical.
- trois anémomètres à température constante type DISA 55 MØ 5.
- un jeu de sondes DISA :
 - . à un fil : 55 P11, 55 P12, P13, P15 ;
 - . à deux fils : 55 P61, 55 P64 ;
 - . à trois fils : 55 P91.

- un calculateur HP 9835A, utilisant la langage BASIC, équipé d'un logement pour cartouche de bande magnétique et acceptant les cartes d'interface GP/IO et HP-IB pour le transfert des données entre le calculateur et les périphériques.

- un multi-programmeur HP 6940B muni de plusieurs cartes enfichables dans le multiprogrammeur dont :
 - . carte de lecture de tension,
 - . cartes numérique/numérique.

ces cartes sont adressables par le calculateur par l'intermédiaire de la carte interface (utilisation générale/entrée - sortie) GP/IO 16 Bits reliant le calculateur au multiprogrammeur.

- un manomètre à affichage et sortie numériques YEW type 2654.
- une table traçante numérique HP 9872A.

2.4. Description des sondes

Nous appelons plan d'un fil d'une sonde, le plan formé par le fil lui-même et ses broches, et "normale du fil", la normale du fil dans son plan.

2.4.1. Sondes à un fil

Les sondes 55 P11 et 55 P12 sont des sondes droites à un fil droit et à un fil incliné respectivement. Dans le cas idéal, le fil de la sonde 55 P11 fait un angle droit avec ses broches, et la normale du fil est confondue avec l'axe de la sonde.

La normale du fil de la sonde 55 P12 fait un angle de 45° avec l'axe de la sonde dans le cas idéal, et le fil fait un angle de 45° avec l'une de ses broches et un angle de 135° avec l'autre broche.

Dans le cas de la sonde 55 P13, le fil est parallèle à l'axe de la sonde, et fait un angle droit avec chacune de ses broches.

2.4.2. Sondes à deux fils croisés

Dans le cas idéal, les deux fils de la sonde à deux fils croisés sont situés dans deux plans parallèles et les normales des premier et second fils font respectivement (45°) et (-45°) avec l'axe de la sonde dans le plan formé par le fil et ses broches (FIG 32).

2.4.3. Description de la sonde à trois fils

Les trois fils de la sonde 55 P91 fabriquée par DISA présentent les caractéristiques suivantes :

- diamètre du fil : $5 \mu\text{m}$
- longueur totale : $3,4 \text{ mm}$
- longueur de la partie sensible : $1,25 \text{ mm}$
- bouts dorés.

Chacun des fils de la sonde est perpendiculaire aux deux autres. On appelle $O x y z$, le trièdre orthogonal lié aux fils tel que le fil n° 1 soit parallèle à l'axe ox , le fil n° 2 parallèle à l'axe oy et le fil n° 3 parallèle à l'axe oz (FIG 10A)

Les broches des fils n° 1, 2 et 3 sont situées respectivement dans des plans parallèles aux plans oxy , oyz et ozx . Les extrémités de la partie sensible de chacun des fils est à $1,5 \text{ mm}$ de distance de l'origine du trièdre et l'ensemble des extrémités des parties sensibles des trois fils se trouvent sur la surface d'une sphère d'origine O et de 3 mm de diamètre.

L'axe de la sonde est confondu avec la première trissectrice du trièdre $oxyz$, et on obtient une permutation circulaire des fils lorsqu'une rotation de la sonde d'un angle de 120° autour de son axe est effectuée.

On appelle OXYZ un repère lié à la sonde et dont l'axe OX est confondu avec l'axe de la sonde (FIG 10B).

Les vecteurs unitaires de ce repère s'expriment dans oxyz.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} \\ -1 & 1 & 0 \\ \frac{-\sqrt{3}}{3} & \frac{-\sqrt{3}}{3} & \frac{2\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (38)$$

On calcule par les cosinus directeurs un angle de $54,74^\circ$ que fait chaque fil avec l'axe de la sonde.

Du fait de ces caractéristiques et des caractéristiques de notre soufflerie, nous avons étudié et réalisé un montage, à l'atelier de fabrication de l'ENSAM (Lille), pour les opérations d'étalonnage et de détermination des caractéristiques directionnelles des trois fils de la sonde.

Ce montage permet la rotation de la sonde autour de son axe pour réaliser la permutation circulaire des fils, l'inclinaison de $35,26^\circ$ et un angle de rotation externe à la soufflerie pour la détermination des caractéristiques directionnelles.

Nous effectuons l'étalonnage de chaque fil séparément.

L'axe de la sonde fait un angle de $35,26^\circ$ avec la direction de l'écoulement ; Nous réglons les autres angles de rotation de notre montage pour que le premier fil à étalonner soit perpendiculaire à la direction de l'écoulement, et le plan formé par le fil et ses broches dans le plan de l'écoulement. L'étalonnage du fil suivant est réalisé après une rotation de la sonde autour de son axe d'un angle de 120° .

2.5. Procédure d'étalonnage utilisée

Nous effectuons l'opération d'étalonnage, autant que possible avant chaque utilisation d'une sonde donnée. Aux conditions de mesure, la résistance du fil à la température du fluide au repos est mesurée et la résistance de chauffe R calculée et affichée. Le fil opère ainsi à une température T_m . La vitesse de l'écoulement est ensuite réglée à son maximum et on applique le test du signal carré : on règle alors le gain et le filtre HF du pont et de l'amplificateur, ainsi que la compensation du câble de la sonde pour optimiser la réponse en fréquence du système anémométrique. La procédure d'étalonnage est ensuite continuée à l'aide du calculateur programmé, lié au multiprogrammeur par la carte interface GP/IO.

La sortie du pont de l'anémomètre est reliée à l'entrée de la carte de lecture de tension dans le multiprogrammeur et la sortie numérique du manomètre numérique est reliée à l'entrée d'une carte Numérique/Numérique. Suite à une instruction de commande, le calculateur "lit" en données numériques sur les cartes d'entrée la tension aux bornes de l'anémomètre et la pression dynamique de l'écoulement dans la soufflerie en mm d'eau, utilisant un sous-programme de "lecture". Les conversions en grandeurs physiques sont effectuées aussitôt les mesures terminées.

La figure (11) montre la chaîne de mesure utilisée pour l'opération d'étalonnage.

Nous utilisons les conventions suivantes pour désigner les moyennes arithmétiques de la tension et de la vitesse :

$$\hat{E} = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} E(j\Delta t)$$

$$\hat{U} = \left(\frac{2\rho e.g}{\rho a} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} H(j\Delta t) \right)^{1/2} \quad (39)$$

avec ρ_e et ρ_a : les masses volumiques de l'eau et de l'air respectivement.

N_1 et N_2 : les nombres de relevés

Δt : le temps séparant deux relevés.

E et H sont les valeurs instantanées de la tension et de la hauteur d'eau à l'instant $j\Delta t$, et lorsque N_1 et N_2 sont suffisamment grands, nous avons :

$$\hat{E} \neq \bar{E} \quad \text{et} \quad \hat{U} \neq \bar{U}$$

Nous avons choisi, après un test de convergence $N_1 = 100$ et $N_2 = 20$ avec $\Delta t = 0,1$ s.

Le programme d'étalonnage d'un fil chaud mis au point comprend une partie "Mesures" et une partie "calcul" :

- mesures

A une vitesse moyenne \bar{U}_i fixée de l'écoulement dans la soufflerie, 100 valeurs instantanées de la tension et 20 valeurs instantanées de la hauteur d'eau, sont relevées permettant le calcul des moyennes \hat{E}_i et \hat{U}_i . A la fin des mesures, une série de N couples (\hat{U}_i, \hat{E}_i) est stockée dans la mémoire du calculateur.

- partie calcul

Cette partie calcule, avec les points (\hat{U}_i, \hat{E}_i) , les coefficients B et n de la loi de King suivant le critère des moindres carrés, en imposant la relation :

$$E = (E_0^2 + BU^n)^{1/2} \quad (40)$$

comme la fonction qui correspond à l'allure d'une courbe passant par les points expérimentaux.

Nous donnons en Annexe (1) le détail du calcul, et l'organigramme du programme.

DISCUSSION

Pendant nos mesures, la pression ambiante est d'environ un Bar et la température du fluide est comprise entre 16 et 23°C.

La figure (9) montre un exemple d'étalonnage de la sonde P11 et la figure (12) montre les étalonnages des trois fils de la sonde P91. Nous remarquons dans ce dernier cas que les courbes d'étalonnage diffèrent d'un fil à l'autre.

Nous discutons dans ce qui suit, quelques résultats de nos étalonnages :

- Précision de l'utilisation d'une corrélation $E = (E_0^2 + BU^n)^{1/2}$

E_0 est la tension aux bornes du pont mesurée à une vitesse nulle de l'écoulement, et les coefficients B et n sont calculés suivant le critère des moindres carrés avec les N points (U_i, \hat{E}_i) $i = 1, 2, \dots, N$

Nous étudions la précision de l'utilisation de la corrélation $E = (E_0^2 + BU^n)^{1/2}$. Nous calculons avec les tensions moyennes \hat{E}_i des vitesses moyennes \hat{U}_{ci} en utilisant les résultats de l'étalonnage telles que :

$$\hat{U}_{ci} = \left(\frac{\hat{E}_i^2 - E_0^2}{B} \right)^{1/n}$$

Nous considérons la précision relative :

$$\frac{\frac{\Delta \hat{U}_i}{\hat{U}_i}}{\hat{U}_i} = \frac{\hat{U}_i - \hat{U}_{ci}}{\hat{U}_i}$$

L'étalonnage de la sonde P12 à une température ambiante $T_a = 23^\circ\text{C}$ et avec une température de chauffe du fil de 250°C environ donne les résultats :

$$E_0 = 3,025 \text{ V} \quad B = 3,63 \quad n = 0,484$$

Le tableau suivant montre la précision relative obtenue en utilisant ces constantes.

\hat{U}_i m/s	4,79	7,1	9,86	15,59	21,83	29,01	35	38,67	41,61
\hat{E}_i V	4,094	4,307	4,491	4,798	5,036	5,269	5,409	5,505	5,571
$\frac{\Delta U_i}{U_i}$ %	3,55	- 0,56	- 0,61	- 2,37	- 1,01	- 1,03	1,69	1,24	1,54

La précision relative est, d'une façon générale contenue dans le domaine $0,2\% < \left| \frac{\Delta U_i}{U_i} \right| < 1,7\%$ pour $5 \text{ m/s} < U < 41 \text{ m/s}$

Les résultats des étalonnages effectués pour toutes nos sondes recourent ceux donnés dans cet exemple.

Nous pouvons ainsi considérer satisfaisante, compte-tenu des erreurs de mesure, la précision obtenue lors de l'utilisation d'une corrélation du type de celle de la loi de King lorsque les constantes B et n sont calculées suivant le critère des moindres carrés. Nous ne voyons pas, dès lors, la nécessité d'utiliser une loi modifiée de type (23A) donnée par Gaulier [18].

- Coefficient de sensibilité à la vitesse du fil chaud

Le coefficient de sensibilité à la vitesse du fil chaud est défini, lorsqu'il n'y a pas de fluctuations de température, par :

$$\sqrt{e^2} = S_u \cdot \sqrt{u^2} \Big|_{\theta = 0}$$

$\sqrt{e^2}$ et $\sqrt{u^2}$ sont les valeurs efficaces des quantités fluctuantes de la tension de sortie de pont et de la vitesse.

Su s'écrit, lorsque les quantités fluctuantes sont très petites devant les quantités moyennes

$$Su = \frac{\partial \bar{E}}{\partial \bar{U}} = \frac{nB\bar{U}^{n-1}}{2(E_0^2 + B\bar{U}^n)^{1/2}}$$

Nous calculons, lors des opérations d'étalonnages, les estimations des écarts quadratiques moyens :

$$\hat{e}_i^2 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} (E_i(j\Delta t) - \hat{E}_i)^2$$

$$\hat{u}_i^2 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} (Uci(j\Delta t) - \hat{U}ci)^2$$

où la valeur instantanée $Uci(j\Delta t)$ est calculée à partir de la valeur instantanée de la tension $E_i(j\Delta t)$

$$Uci(j\Delta t) = \left(\frac{E_i^2(j\Delta t) - E_0^2}{B} \right)^{1/n}$$

Nous calculons les coefficients de sensibilité à la vitesse Scu tels que :

$$(Scu)_i = \frac{\sqrt{\hat{e}_i^2}}{\sqrt{\hat{u}_i^2}}$$

Le tableau ci-dessous montre les différents résultats obtenus lors d'un étalonnage de la sonde P12.

$\hat{U}ci$ m/s	4,62	7,14	9,92	15,96	22,05	29,31	34,41	38,19	40,97
$100x \frac{\sqrt{\hat{u}_i^2}}{\hat{U}i}$	2,06	1,36	1,41	1,13	0,68	0,89	1,95	0,58	0,61
Su	$9,7 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^2$
Scu	$8,6 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^2$	$5,8 \cdot 10^2$	$4,1 \cdot 10^2$	$3,3 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$

Nous voyons que l'intensité de fluctuation $\sqrt{u^2}/\hat{U}$ de l'écoulement dans notre soufflerie est inférieure à 2 % pour les vitesses supérieures à 5 m/s .

Les écarts entre les coefficients de sensibilité S_u et S_{cu} sont négligeables. On vérifie ainsi la validité des calculs de la valeur efficace de la quantité fluctuante de la vitesse $\sqrt{u^2}$ par la relation :

$$\sqrt{u^2} = \frac{\sqrt{e^2}}{S_u}$$

lorsque la quantité fluctuante de la vitesse est petite devant la composante moyenne (Hinze [21], Rodi [36]).

- Correction de la variation de la température ambiante

Un étalonnage de la sonde P12 a été effectué à une température ambiante $T_a = 23,8^\circ\text{C}$ avec

- $R_a(23,8) = 4,11 \Omega$
- $a_w = 0,828$ ($T_m - T_a = 229,8^\circ\text{C}$)
- $R = 7,51 \Omega$

Nous obtenions les résultats :

$$E_{0c} = 3,088 \text{ V} \qquad B_c = 3,372 \qquad n_c = 0,507$$

Un second étalonnage a été réalisé à un jour d'intervalle à une température ambiante $T_a = 20,2^\circ\text{C}$ avec la même résistance de chauffe $R = 7,51 \Omega$. La résistance à froid du fil était $R_a(20,2) = 4,11$, ce qui correspond à un rapport de surchauffe $a_w = 0,892$

$$E_0 = 3,135 \text{ V} \qquad B_a = 3,559 \qquad n_a = 0,493$$

Nous corrigeons les résultats du premier étalonnage, suivant les corrections de Bearman [3], pour qu'ils soient applicables à une température

ambiante de 20,2°C. Nous comparons ensuite les résultats obtenus avec ceux du second étalonnage.

$$T = 23,8 - 20,2 = 3,6^{\circ}\text{C}$$

$$E_{o_m} = E_{o_c} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_m - T_a} \right)^{1/2} = 3,112$$

$$B_m = B_c \left(1 + \frac{\Delta T}{T_m - T_a} \right) = 3,425$$

E_{o_m} et B_m sont les coefficients corrigés. L'exposant n demeurant inchangé.

$$n_m = n_c = 0,507$$

Le tableau ci-dessous montre pour deux vitesses, les erreurs commises en utilisant les coefficients E_{o_c} et B_c sans et avec correction.

E Volts	U m/s calculée avec E_{o_a} , B_a et n_a	U _{sc} m/s (sans correc.) avec E_{o_c} , B_c et n_c	U corrigée m/s avec E_{o_m} , B_{o_m} et n_c	$\frac{U - U_{sc}}{U}$	$\frac{U - U_{corrigée}}{U}$
				x 100	X 100
4,5	8,841	9,779	9,225	- 10,6	- 4,34 %
5,5	34,6	35,892	34,313	- 3,73	- 0,829 %

Dans notre cas, pour $\Delta T = 3,6^{\circ}\text{C}$, l'erreur relative est plus importante lorsque les coefficients sont utilisés sans correction et dépasse 10 % aux petites vitesses ($U < 10 \text{ m/s}$). Avec les coefficients corrigés, elle diminue sensiblement et l'erreur est de 1 % pour $U \approx 35 \text{ m/s}$.

Lorsqu'un réétalonnage du fil n'est pas possible, les corrections de Bearman donnent des résultats très proches des vraies valeurs pour des écarts de températures ΔT de l'ordre de 1°C , afin que l'hypothèse (n est constant) reste valable.

- Comparaison avec la corrélation de Collis et Williams

Aux conditions de température $T_a = 20^\circ\text{C}$, nous obtenons les coefficients de la sonde P12 :

$$E_o = 3,035 \text{ V} \quad B = 3,565 \quad n = 0,488$$

$$\text{pour } R_a = 4,07 \, \Omega \quad \text{et} \quad R = 7,44 \, \Omega .$$

Nous exprimons la loi de King $E^2 = A + BU^n$ en terme de puissance fournie au fil :

$$(RI^2)_m = E^2 \frac{R}{(R + R_t)^2} = \frac{R}{(R + R_t)^2} (E_o^2 + BU^n) = A_m + B_m U^n$$

$$\text{avec } R_t = R_1 + R_c$$

$$R_1 = 50 \, \Omega$$

$$R_c = 0,3 \, \Omega : \text{résistance du câble de 5 m de long.}$$

On obtient :

$$A_m = 2,056 \cdot 10^{-2}$$

$$B_m = 7,957 \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Et pour } U = 3 \text{ m/s} & \text{on a } (RI^2)_m = 34,16 \cdot 10^{-3} \text{ W} \\ \text{et } U = 20 \text{ m/s} & \text{on a } (RI^2)_m = 54,89 \cdot 10^{-3} \text{ W} \end{array}$$

Nous comparons avec des résultats obtenus avec la corrélation de Collis et Williams. Nous mettons la relation (14) sous la forme :

$$RI^2 = \emptyset + Q_E = A_o + B_o U^n$$

avec $A_o = 0,24 \text{ Ka} \cdot \Pi \cdot 21 \cdot \left(\frac{T_m + T_a}{2T_a}\right)^{0,17} (T_m - T_a) + Q_E$

$$B_o = 0,56 \text{ Ka} \cdot \Pi \cdot 21 \cdot \left(\frac{d}{\nu a}\right)^n \left(\frac{T_m + T_a}{2T_a}\right) (T_m - T_a)$$

Aux conditions de notre étalonnage, nous obtenons

$$A_o = 7,536 \cdot 10^{-3} + Q_E \quad B_o = 7,793 \cdot 10^{-3}$$

Nous voyons d'ores et déjà que la corrélation de Collis et Williams donne une bonne estimation de facteur B_m .

Reprenons les résultats des exemples du paragraphe 1.3.3. calculés aux mêmes conditions :

Pour	$U = 3 \text{ m/s}$	$Q_E = 4,172 \cdot 10^{-3} \text{ W}$	et	$RI^2 = 25,03 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
et pour	$U = 20 \text{ m/s}$	$Q_E = 5,157 \cdot 10^{-3} \text{ W}$	et	$RI^2 = 46,89 \cdot 10^{-3} \text{ W}$.

$(RI^2)_m$ est supérieur à RI^2 pour nos deux exemples et la différence est moindre pour $U = 20 \text{ m/s}$ que pour $U = 3 \text{ m/s}$. La perte par conduction réelle est donc plus importante que la perte par conduction calculée, et relativement, elle est plus importante aux basses vitesses et diminue lorsque la vitesse augmente, et elle est principalement contenue dans E_o^2 .

Nos résultats d'étalonnage confirment d'une manière qualitative la validité de la corrélation de Collis et Williams.

o

o o

CHAPITRE 3INFLUENCE DE L'INCLINAISONDE LA VITESSE PAR RAPPORT AU FIL3.1. Vitesse effective de refroidissement

La vitesse entrant dans la relation de transfert de chaleur d'un fil chaud d'une sonde, est appelée "Vitesse effective de refroidissement". Elle dépend de la vitesse instantanée réelle et de son incidence par rapport à la normale du fil chaud.

3.1.1. Effet d'une incidence longitudinale

Soit le plan(ont) contenant la sonde. L'axe(on) est la normale au fil dirigé vers l'axe de la sonde et(ot) suivant le fil. Une vitesse de l'écoulement \vec{U}_o dans le plan(ont) fait un angle β avec l'axe (on), et elle se décompose dans ce plan en une composante normale U_n et une composante longitudinale U_t (FIG 13).

On suppose généralement que le refroidissement du fil chaud suit la "loi du cosinus", laquelle est tirée de l'analyse des fils infiniment longs, et qui considère que seule la composante normale de la vitesse refroidit le fil. La vitesse effective de refroidissement s'écrit dans ce cas :

$$V_r = U_o \cos \beta$$

Mais la non-uniformité de la température le long du fil entraîne une déviation de la loi du cosinus, et on cherche des relations empiriques pour exprimer la vitesse effective de refroidissement tenant compte de cette déviation.

Kronauer [27] observe que cette déviation dépend de l'allongement du fil ($\frac{2l}{d}$) et propose la relation :

$$V_r(\beta) = U_0 \cos \beta + 1.2 \left(\frac{d}{2l}\right)^{1/2} \sin^2 \beta$$

La relation la plus utilisée a été proposée initialement par Hinze [21] et s'écrit :

$$V_r(\beta) = U_0 \left[\cos^2 \beta + k^2 \sin^2 \beta \right]^{1/2} \quad (41)$$

où k prend des valeurs de l'ordre de 0,2.

Champagne, Sleicher et Wehrmann [10] mesurent la distribution de la température le long du fil. Ils indiquent que leur domaine d'investigation du nombre de Reynolds, $2 < Re < 15$, le degré de sensibilité à la composante longitudinale est exprimé par le facteur k dans la relation (41). Il dépend des paramètres qui régissent la distribution de la température le long du fil et principalement de l'allongement, et varie inversement avec $\frac{2l}{d}$. Ainsi, un fil en platine de $\frac{2l}{d} = 200$ admet un facteur $k = 0,2$ et lorsque $\frac{2l}{d} = 600$, k devient nul.

Baille [2], constate pour sa part, outre la dépendance à $\frac{2l}{d}$ que k varie sensiblement avec la vitesse dans l'intervalle (0,4 ; 4 m/s) pour se stabiliser aux vitesses supérieures et propose la formule empirique :

$$k = k_1(U_0) + k_2(\infty)$$

avec $k_1(U_0) = 1/(1 + \delta U)$ $\delta = 5 \text{ (m/s)}^{-1}$
 et $k_2(\infty) = 0,3 \exp(-2l/400d)$

$k_1 (U_0)$ devenant négligeable devant $k_2 (\infty)$ lorsque U_0 est supérieur à 4 m/s .

3.1.2. Effet d'une incidence transversale

Soit le repère ontb où ob est la binomiale au plan ont, (FIG 14).

Les composantes de la vitesse dans ontb s'écrivent :

$$\begin{aligned} U_n &: U_0 \cos\beta \cos\varphi \\ U_t &: - U_0 \sin\beta \\ U_b &: U_0 \cos\beta \sin\varphi \end{aligned} \quad (42)$$

Lorsque la composante transversale U_b n'est pas nulle, des effets des broches se font sentir. On utilise, pour exprimer la vitesse de refroidissement du fil chaud, en tenant compte des effets de refroidissement des trois composantes de la vitesse, la relation empirique donnée par Jørgensen [24].

$$V_r^2 = U_n^2 + k^2 U_t^2 + h^2 U_b^2 \quad (43)$$

En fonction de φ , β et U_0 , V_r s'écrit :

$$V_r = U_0 \left[\cos^2\beta (\cos^2\varphi + h^2 \sin^2\varphi) + k^2 \sin^2\beta \right]^{1/2} \quad (44)$$

Le facteur h est donné dans la littérature comme ayant une valeur comprise entre 1,1 et 1,3. Bammert et Mobarak, dans une discussion à la suite de l'article de Gorton et Laksh minarayana [19], indiquent que ces valeurs sont valables pour les faibles vitesses mais h augmente avec la vitesse et peut atteindre 1,7 à 110 m/s.

Jørgensen [24] mesure les facteurs k et h de deux sondes de type simple à fil droit tels que

$$k(\beta) = \left[\frac{1}{\sin^2\beta} \left(\frac{V_r^2(\beta)}{U_0^2} - \cos^2\beta \right) \right]^{1/2} \quad (45)$$

$$\varphi = 0$$

$$\text{et } h(\psi) = \frac{1}{\sin^2\psi} \left(\frac{V_F^2(\psi)}{U_0^2} - \cos^2\psi \right)^{1/2} \quad (46)$$

$$\beta = 0$$

et montre que l'erreur relative commise sur le calcul de la vitesse est minimum lorsque sont pris $k = k(\beta = 90^\circ)$ et $h = h(\psi = 90^\circ)$.

3.2. Démarche expérimentale de calcul des facteurs k et h

Le dispositif de fixation de la sonde à notre soufflerie nous permet une rotation dans un plan vertical de l'extérieur de la soufflerie.

Nous définissons deux inclinaisons du fil par rapport à la direction connue de la vitesse de l'écoulement. Nous désignons par $oxyz$ le repère portant la vitesse de l'écoulement \vec{U}_0 tel que \vec{U}_0 soit suivant l'axe ox . En position d'étalonnage, le fil est perpendiculaire à la direction de l'écoulement et le repère ontb lié au fil est confondu avec le repère $oxyz$. L'inclinaison transversale θ est obtenue en tournant le fil autour de l'axe oy et l'inclinaison longitudinale α est obtenue en tournant le fil autour de l'axe ob (FIG 15).

La vitesse de refroidissement du fil s'écrit en fonction de α et θ :

$$V_r(\alpha, \theta) = U_0 \left[\cos^2\theta (\cos^2\alpha + k^2 \sin^2\alpha) + h^2 \sin^2\theta \right]^{1/2} \quad (47)$$

A une vitesse fixée de l'écoulement dans la soufflerie, la vitesse effective de refroidissement moyenne \hat{V}_r est déduite de la loi de King à partir de 100 mesures de la tension de sortie de pont :

$$\hat{V}_r(\alpha, \theta) = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} \left(\frac{E_j^3(\alpha, \theta) - E_0^2}{B} \right)^{1/n} \quad (48)$$

Nous relevons les points $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha, \theta = \text{cte} = \emptyset)$ pour la détermination du facteur k et les points $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\theta, \alpha = \text{cte} = \emptyset)$ pour la détermination du facteur h .

Nous avons choisi de calculer les facteurs k et h qui minimisent les erreurs de mesure pour que les courbes de fonction

$$V_r = U_0 (\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha) \quad (\theta = 0) \quad (49)$$

$$V_r = U_0 (\cos^2\theta + h^2\sin^2\theta) \quad (\alpha = 0) \quad (50)$$

passent respectivement par les points $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha, \theta = 0)$ et $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\theta, \alpha = 0)$

Un défaut de positionnement du fil sur les broches, et une erreur d'alignement de la sonde peuvent s'accumuler et provoquer un glissement des points expérimentaux d'un angle qui reste inférieur à 5° . Un programme de calcul de k et h et de la valeur de cette déviation a été mis au point, utilisant le critère des moindres carrés. Il calcule d'autre part la vitesse \hat{U}_0 qui doit correspondre à la vitesse fixée de l'écoulement dans la soufflerie ; ce qui permet de voir l'erreur commise sur le calcul de la vitesse avec les facteurs définis k ou h et de la déviation correspondante.

Nous donnons en Annexe (2) le détail de calcul et l'organigramme du programme.

3.3. Discussion des résultats

3.3.1. Facteur longitudinal k

Des courbes $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha, \theta = 0)$ d'une sonde à un fil droit 55 P11 ont été tracées pour des vitesses fixées de l'écoulement de 18,2 ; 25 et 34 m/s . La figure (16) montre un exemple de ces courbes où la vitesse $U_0 = 18,2$ m/s est ramenée à l'unité. Tous les points sont corrélés à l'exception de ceux relevés à $\alpha = \pm 90^\circ$, par la relation :

$$\frac{V_r}{U_0} = (\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha)^{1/2}$$

avec $k : 0,15$.

Ceci rejoint les conclusions de Champagne, Sleicher et Wherman [10] et de Baille [2] sur l'indépendance du facteur k , d'un fil donné dans la plage étudiée de la vitesse lorsque cette dernière est supérieure à quelques m/s .

Sur la figure (17), nous avons pointé l'erreur relative sur le calcul de la vitesse e_r :

$$e_r = \frac{U_o - U_{ci}}{U_o} \times 100 \quad (51)$$

Les vitesses U_{ci} sont calculées avec $k = 0,15$ et les points de mesure (\hat{V}_{ri}, α_i) par la relation :

$$U_{ci} = \frac{\hat{V}_{ri}}{(\cos^2 \alpha_i + k^2 \sin^2 \alpha_i)^{1/2}} \quad (52)$$

L'erreur est inférieure à 1 % pour $|\alpha| < 60^\circ$. Elle augmente pour $|\alpha| > 70^\circ$ et atteint des valeurs supérieures à 7 % à $\alpha = \pm 90^\circ$.

Sur la figure (18) des courbes $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha, \theta = 0)$ d'une sonde à un fil incliné 55 P12 sont tracées pour plusieurs vitesses fixées U_o . Le fil fait un angle théorique de 45° avec l'une des broches et de 135° avec l'autre broche.

Les sommets des courbes sont légèrement décalés par rapport à l'axe des ordonnées et la normale au fil n'est donc pas exactement alignée sur la direction de l'écoulement. Nous avons calculé une déviation α_0 de $(- 2,5^\circ)$.

Il apparaît une dissymétrie des points par rapports à l'axe passant par les sommets des courbes contrairement aux courbes de la sonde à fil droit P11, et cette dissymétrie est très importante aux valeurs extrêmes de $\alpha = \pm 90^\circ$.

Lorsque nous utilisons une relation du type de la relation (45), nous calculons $k(135^\circ) \approx 0,1$ à $\alpha = 90^\circ$ et $k(45^\circ) = 0,21$ à $\alpha = -90^\circ$, les valeurs entre-parenthèses étant les angles théoriques que fait le fil avec l'une des broches.

Un calcul de l'erreur e_r commise en prenant la valeur de $k = 0,15$ trouvée pour la sonde à un fil droit P11 sur le calcul de la vitesse a été fait. e_r est inférieur à 1 % pour $-50^\circ < \alpha < 40^\circ$ et est supérieur à 10 % pour $\alpha < -70^\circ$ et $\alpha > 60^\circ$.

Du fait de la dissymétrie par rapport à l'axe passant par le sommet des courbes $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha)$, l'ensemble des points pour une vitesse fixée ne peut être corréler par une relation de type (49). Nous utilisons alors la relation (49) pour corréler séparément les deux groupes de points se situant de part et d'autre de l'axe des ordonnées. Les branches des courbes corrélant les différents groupes sont tracées sur la figure (18) avec :

$$\begin{aligned} k &= 0,2 && \text{pour} && -90^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ \\ k &= 0,16 && \text{pour} && 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{aligned}$$

Le calcul de l'erreur e_r montre que l'utilisation de $k = 0,2$ pour des angles $\alpha = (-90^\circ; 0^\circ)$ en tenant compte de la déviation α_0 entraînerait des erreurs inférieures à 1 % pour $\alpha \geq 80^\circ$ et de l'ordre de 5 % pour $\alpha = -90^\circ$

Dans la région $\alpha = (0^\circ, 90^\circ)$, lorsque $k = 0,16$, l'erreur est inférieure à 1 % pour $\alpha = (0^\circ, 50^\circ)$ et de l'ordre de 3 % pour $50^\circ < \alpha < 70^\circ$. Elle atteint environ 30 % lorsque $\alpha = 90^\circ$.

Nous retenons la valeur $k = 0,2$ lorsque nous effectuons des mesures pour lesquelles $-80^\circ \leq \alpha \leq 0$ et $k = 0,16$ pour $0^\circ \leq \alpha < 80^\circ$.

Nous constatons le même phénomène pour la sonde à deux fils croisés. Sur la figure (21), les courbes $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha)$ du fil n° 1 d'une sonde 55 P61 sont tracées pour plusieurs vitesses, celles du fil n° 2 étant similaires. Mais il apparaît une restriction naturelle dans l'utilisation de la sonde à 2 fils croisés, et on ne peut effectuer des mesures avec le fil 1 à des angles $\alpha > 0$ sans que l'écoulement ne vienne à rencontrer la broche du fil 2 avant le fil 2 lui-même.

Nous calculons les facteurs respectifs des deux fils : k_1 avec les points $\hat{V}_r = \hat{V}_r(\alpha)$, $\alpha = (-90^\circ \text{ à } 0^\circ)$ et k_2 avec des points $\alpha = (0^\circ \text{ à } 90^\circ)$.

Nous trouvons $k_1 = 0,11$ et $k_2 = 0,13$.

Nous calculons d'autre part une déviation de l'ordre de 2° , et les normales aux deux fils font un angle de 88° au lieu d'un angle droit.

3.3.2. Facteur transversal h

Les sondes à fil droit P11 et P13 présentent les mêmes similitudes dans le positionnement du fil sur les broches. Nous avons choisi de tracer les courbes $V_r = V_r(\theta, \alpha = 0)$ pour plusieurs vitesses, de la sonde P13 à cause de ses caractéristiques géométriques (FIG 20). Les points, pour une vitesse fixée, sont bien corrélés par une relation de type :

$$V_r = U_0 (\cos^2\theta + h^2 \sin^2\theta)^{1/2}$$

h est compris entre 1,14 et 1,16.

Sur la figure (21), nous avons ramené les vitesses fixées U_0 à l'unité, tenu compte du glissement θ_0 (Y_0 sur la figure (20)), et reporté les points $(\theta_i - \theta_0; \frac{\hat{V}_{ri}}{U_0})$.

La distribution des points est plus groupée pour $-40^\circ < \theta < 40^\circ$ et s'élargit pour $|\theta| > 40^\circ$. Nous retenons la valeur $h = 1,15$ pour les sondes à fil droit P11 et P13.

Sur la figure (22) nous avons pointé l'erreur e_r calculée par la relation (51) avec $h = 1,15$. L'erreur est inférieure à 2 % pour $|\theta| < 40^\circ$ et égale ou supérieure à 2 % pour $|\theta| > 40^\circ$.

En raison des caractéristiques géométriques de la sonde P12 (fil incliné d'un angle de 45° par rapport à l'axe de la sonde) nous relevons pour une vitesse fixée U_0 , les points $\hat{V}_{ri} = \hat{V}_{ri}(\theta_i, \alpha = \text{cte} = 45^\circ)$ (FIG 13). Nous utilisons la relation (47) pour corréler ces points. Elle s'écrit pour $\alpha = 45^\circ$:

$$V_r = U_0 \left[\frac{1}{2} (1 + k^2) \cos^2 \theta + h^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2} \quad (53)$$

nous prenons $k = 0,20$.

Les points les mieux corrélés sont ceux relevés pour $|\theta| < 60^\circ$ et le facteur h est en moyenne de 1,26.

3.3.3. Conclusion

Le facteur k dépend, outre de l'allongement $\frac{2l}{d}$, lorsque U_0 est supérieur à quelques m/s , de la géométrie de la sonde.

Dans le cas d'une sonde à fil droit (P11, P13), l'ensemble des points $\hat{V}_{ri} = \hat{V}_{ri}(\alpha_i)$ pour une vitesse fixée est bien corrélé par la relation (49). Nous supposons que ceci est dû à la symétrie du profil de la température le long du fil chaud par rapport à la normale du fil.

Lorsque le fil de la sonde est incliné d'un angle de 45° par rapport à l'axe de la sonde (sonde P12, sondes à deux fils croisés P61, P64), l'ensemble des points $\hat{V}_{ri} = \hat{V}_{ri}(\alpha_i)$ ne sont pas parfaitement symétriques par rapport à la normale du fil et particulièrement ceux pris aux valeurs extrêmes de (α_i) . Nous supposons que ceci est dû à la non-symétrie du profil de la température le long du fil par rapport à la normale au fil lorsque ce dernier n'est pas incliné du même angle avec ses deux broches. La partie du fil voisine de la broche faisant

un angle de 45° avec le fil, est plus refroidie ($k(45) = 0,21$) que celle voisine de la broche qui fait un angle de 135° avec le fil ($k(135^\circ) = 0,1$).

La géométrie de la sonde intervient quantitativement sur la valeur du facteur h . Nous avons calculé un facteur $h = 1,26$ de la sonde à fil incliné P12 supérieur à celui de la sonde P13 à fil droit : $h = 1,15$.

REMARQUE

Les facteurs k et h , particulièrement des fils des sondes à fil incliné, peuvent changer de façon significative après la réparation d'un fil cassé. Nous avons enregistré les valeurs les plus faibles pour les fils des sondes neuves.

3.4. Interaction des fils d'une sonde à deux fils croisés

Nous avons calculé plus haut les facteurs longitudinaux des deux fils de la sonde P61 ($k_1 = 0,11$ et $k_2 = 0,13$). Nous calculons dans ce qui suit les facteurs transversaux h_1 et h_2 des deux fils et voyons l'influence de l'interaction des fils sur ces facteurs. Du fait de la géométrie de la sonde, nous relevons les points $\hat{V}_{ri} = \hat{V}_{ri}(\theta_i, \alpha = \text{cte} = 45^\circ)$ pour une vitesse fixée, d'un fil donné, et corrérons ces points par la relation (47).

3.4.1. Sillage aérodynamique

Sur les figures (24) et (25) nous avons relevé les points $\hat{V}_{ri} = \hat{V}_{ri}(\theta_i)$ des fils 1 et 2 respectivement en maintenant l'autre fil non-chauffé. Sur la figure (24) par exemple, la partie des points pour $\theta_i = (-90^\circ; 0^\circ)$ est mesurée avec le fil 1 devant le fil 2, et la partie des points pour $\theta_i = (0^\circ; 90^\circ)$ est relevé avec le fil 1 dans le sillage aérodynamique du fil 2.

Nous voyons que l'ensemble des points pour un fil n'est pas corrélaté par la relation (47) du fait de la dissymétrie existante entre les deux parties des points situées de part et d'autre d'un axe passant par le minimum des courbes. Nous corrélatons alors chaque partie séparément.

Pour le fil 1, la corrélation de la partie hors sillage, donne

$$h_1 = 1,185 \quad \text{et un décalage} \quad \theta_{01} = -6^\circ$$

et celle de la partie dans le sillage aérodynamique du fil 2 donne

$$h_{a1} = 1,16 \quad \text{et} \quad \theta_{01} = -6^\circ$$

et pour le fil 2, et pour la partie hors sillage

$$h_2 = 1,26 \quad \text{et} \quad \theta_{02} = 5^\circ$$

et pour la partie dans le sillage aérodynamique du fil 1

$$h_{a2} = 1,17 \quad \text{et} \quad \theta_{02} = 5^\circ$$

Les points dans le sillage aérodynamique jusqu'à $\theta = 15^\circ$ pour le fil 1 et à $\theta = -15^\circ$ pour le fil 2 sont bien corrélatés par les courbes corrélatant les points hors sillage.

On remarque d'une part, que la proximité d'un second fil non chauffé provoque un glissement de fait des courbes $V_r = f(\theta)$ d'un angle θ_0 d'un fil donné, et d'autre part, que lorsqu'un fil est situé entièrement dans le sillage aérodynamique d'un autre, son refroidissement diminue de

$$\frac{h - h_a}{h} = 2,11 \% \text{ (pour le fil 1) à } 7,14 \% \text{ (pour le fil 2)}$$

3.4.2. Sillage thermique

Les manipulations sont refaites en maintenant les deux fils chauffés. La figure (26) montre l'influence des sillages aérodynamique et thermique additionnés du fil 2 sur le refroidissement du fil 1 pour $\theta_i = (0^\circ ; 90^\circ)$, et la figure (27) montre celle du fil 1 sur le refroidissement du fil 2 pour $\theta_i = (-90^\circ ; 0^\circ)$.

Les corrélations des points hors sillage sont toujours valables comme plus haut pour des points dans les sillages jusqu'à $\theta = 15^\circ$ pour le fil 1 et $\theta = -15^\circ$ pour le fil 2 avec les mêmes facteurs h_1 et h_2 et décalages θ_{01} et θ_{02}

Il convient donc d'utiliser la sonde à deux fils croisés pour $\theta = (-15^\circ ; 15^\circ)$ en utilisant les facteurs h_1 et h_2 calculés avec les points hors sillage et en tenant compte des décalages θ_{01} et θ_{02} .

Nous discutons maintenant l'effet du sillage thermique d'un fil sur le refroidissement de l'autre. Les points situés dans le sillage thermique peuvent être aussi corrélés par la relation (47).

En même temps qu'une diminution du facteur h , les courbes admettent contrairement aux corrélations des points situés dans le sillage aérodynamique uniquement, des minimums inférieurs à ceux trouvés pour les corrélations des points hors sillage. Ceci s'explique par l'une des deux possibilités suivantes :

- une diminution de la vitesse fixée U_0 , ce qui est impossible.
- ou un changement de la nature de la relation de la vitesse effective de refroidissement (47) ce que nous allons examiner.

Nous corrélons les points dans les sillages thermique et aérodynamique additionnés par la relation :

$$V_r = U_a (\cos^2 \theta + H_s^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (54)$$

où U_a est une vitesse apparente et H_s un facteur transversal apparent.

Nous remplaçons dans la relation (47) $\alpha = 45^\circ$ et appelons K_s le terme k^2 . L'indice s désignant les sillages thermique et aérodynamique additionnés.

$$V_r = U_o \left[\frac{1}{2}(1 + K_s)\cos^2\theta + h_s^2\sin^2\theta \right]^{1/2} \quad (55)$$

En identifiant les relations (54) et (55), la vitesse apparente s'écrit :

$$U_a = U_o \sqrt{\frac{1 + K_s}{2}} \quad (56)$$

et H_s s'écrit :

$$H_s = h_s / \sqrt{\frac{1 + K_s}{2}} \quad (57)$$

Le programme de calcul donne U_a , H_s et un décalage θ_s . U_o étant connue, nous calculons avec les deux équations (56) et (57) les deux inconnues h_s et K_s . Nous trouvons :

- pour le fil 1 $h_s = 1,1$ $\theta_s = - 10,8^\circ$ et $K_s = - 0,07$
- pour le fil 2 $h_s = 1,15$ $\theta_s = 5,5^\circ$ et $K_s = - 0,04$

Nous remarquons d'une part une diminution du facteur h et des dérapages θ_s plus importants, et d'autre part, un changement du signe du terme K_s . Nous faisons

$$K_s = - k_s^2$$

Il vient pour le fil 1 $k_{s1} = 0,26$ et pour le fil 2 $k_{s2} = 0,2$,
et la relation (55) corrélat les points dans les sillages pour $\alpha = 45^\circ$
s'écrit :

$$V_r = U_o \left[\frac{1}{2} (1 - k_s^2) \cos^2\theta + h_s^2 \sin^2\theta \right]^{1/2} \quad (58)$$

à la différence de celle qui corrèle les points hors sillage qui s'écrit :

$$V_r = U_0 \left[\frac{1}{2} (1 + k^2) \cos^2 \theta + h^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2}$$

Ceci signifie le repliement des branches des courbes $V_r = V_r(\alpha)$.

Ainsi, lorsqu'un fil est situé dans le sillage d'un autre, chauffé, l'apport de chaleur de ce dernier diminue son refroidissement et entraîne donc le repliement des branches de ses courbes $V_r = V_r(\alpha)$. Et lorsqu'il est entièrement situé dans le sillage, l'apport de chaleur provoque une diminution de son refroidissement de :

$$\frac{h - h_s}{h} = 7,2 \% \text{ (pour le fil 1) à } 8,73 \% \text{ (pour le fil 2)}.$$

La présence des sillages aérodynamique et thermique a été décelée par Beguier [4] et Baille [2] plus récemment.

3.5. Caractéristiques directionnelles de la sonde à trois fils

Pendant les mesures avec la sonde à trois fils, la sonde doit être positionnée pour que l'écoulement soit situé dans un cône d'axe ox , l'axe de la sonde et d'angle au sommet de $70,5^\circ$ afin d'éviter que l'un des fils ne vienne dans le sillage des autres fils.

Pour cette raison, les fils doivent être étalonnés et leurs caractéristiques directionnelles déterminées dans le domaine d'utilisation de la sonde.

Huffman [23] a mis au point une procédure d'étalonnage des trois fils de la sonde DISA 55 P91 et de détermination de leurs facteurs h et k en utilisant un algorithme de recherche numérique. Il effectue deux séries de mesures. La première est réalisée en alignant l'axe de la sonde suivant la direction de l'écoulement et en faisant varier la vitesse de

l'écoulement, et la seconde est réalisée pour une vitesse fixée de l'écoulement et en faisant varier l'angle de rotation de la sonde autour de son axe. Il spécifie des valeurs initiales des facteurs h et k des trois fils, et calcule avec son algorithme une première estimation des constantes des lois de King des trois fils en utilisant la première série de mesure. Il utilise alors la seconde série de mesure pour déterminer une nouvelle approximation des facteurs k et h des trois fils avec les constantes des lois de King déjà déterminées. La procédure est continuée jusqu'à ce qu'un niveau de précision acceptable est atteint.

Nous avons choisi, pour notre part, les procédures d'étalonnage et de détermination des facteurs h et k utilisées pour les autres sondes. Le positionnement de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement est réalisé au moyen du dispositif décrit au paragraphe 2.4.3.

L'étalonnage d'un fil donné est effectué en alignant la normale du fil sur la direction de l'écoulement avec le plan formé par le fil et ses broches dans le plan de l'écoulement.

Pour déterminer le facteur k de l'un des fils, nous traçons la courbe $V_r = V_r(\alpha, \theta = \text{cte} = 0)$ pour une vitesse fixée U_0 . Nous faisons varier l'angle α en tournant la sonde autour d'un axe parallèle à l'axe ob , le plan du fil étant situé dans le plan de l'écoulement.

Nous traçons la courbe $V_r = V_r(\theta, \alpha = \text{cte} = 0)$ à une vitesse U_0 fixée pour déterminer le facteur h d'un fil donné. Les valeurs de l'angle θ sont obtenues en tournant la sonde autour d'un axe parallèle au fil.

Sur la figure (28), nous avons tracé les courbes $V_r = V_r(\alpha, \theta = 0)$ et $V_r = V_r(\theta, \alpha = 0)$ du fil 1 pour $U_0 = 37,5$ m/s. Les courbes des autres fils sont comparables.

- courbe $V_r = V_r(\alpha, \theta = 0)$

Les points reportés pour $\alpha = (-90^\circ \text{ à } 0^\circ)$ sont relevés avec le fil en dehors des sillages des autres fils. Nous calculons le facteur k en

corrélant les points relevés pour $\alpha = (0^\circ \text{ à } 90^\circ)$ avec la relation (49).

Nous trouvons :

$$k_1 = 0,086 \quad \text{pour le fil 1}$$

$$k_2 = 0,071 \quad \text{pour le fil 2}$$

$$k_3 = 0,107 \quad \text{pour le fil 3}$$

$$\text{- courbe } \underline{V_r = V_r (\theta, \alpha = 0)}$$

Seul le point reporté pour $\theta = -90^\circ$ est relevé avec le fil situé en dehors des sillages des autres fils. Nous calculons le facteur h avec ce point seulement par la relation :

$$h = \frac{V_r (\theta = -90^\circ)}{U_0}$$

Nous trouvons :

$$h_1 = 1,03 \quad \text{pour le fil 1}$$

$$h_2 = 1,032 \quad \text{pour le fil 2}$$

$$h_3 = 1,004 \quad \text{pour le fil 3.}$$

REMARQUE

On note la diminution du refroidissement du fil due à l'effet d'un sillage thermique pour les points de la courbe $V_r = V_r (\theta, \alpha = 0)$ relevés pour $\theta = (-80^\circ \text{ à } -20^\circ)$ et les points de la courbe $V_r = V_r (\alpha, \theta = 0)$ relevés pour $\alpha = (-70^\circ \text{ à } -40^\circ)$. Par contre, nous notons contrairement à la sonde à deux fils, une augmentation du refroidissement du fil dans les sillages des autres pour les points de la courbe $V_r = V_r (\theta, \alpha = 0)$ relevés pour $\theta = (-20^\circ \text{ à } 90^\circ)$ et les points de la courbe $V_r = V_r (\alpha, \theta = 0)$ relevés pour $\alpha = (-90^\circ \text{ à } -70^\circ)$. Nous supposons que ceci est dû aux effets des turbulences engendrées par les broches des fils situés devant le fil expérimenté.

3.6. Coefficients de sensibilité du fil chaud à la vitesse et aux incidences

Sur la figure (15), les angles α et θ définissent les inclinaisons du fil par rapport à la direction connue de l'écoulement. La relation (47) exprime la vitesse effective de refroidissement en fonction de ces inclinaisons.

$$V_r = U_0 \left[\cos^2 \theta (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) + h^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2}$$

La valeur de V_r étant déterminée à partir de la tension E de la loi de King

$$V_r = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{B} \right)^{1/n}$$

Nous appelons S_{vr} le coefficient de sensibilité à la vitesse de refroidissement

$$S_{vr} = \frac{\partial E}{\partial V_r} = \frac{n B V_r^{n-1}}{2(E_0^2 + B V_r^n)^{1/2}} \quad (59)$$

et S_u le coefficient de sensibilité à la vitesse U_0

$$S_u = \frac{\partial E}{\partial U_0} = \frac{\partial E}{\partial V_r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial U_0} = S_{vr} \frac{\partial V_r}{\partial U_0} \quad (60)$$

Les coefficients de sensibilité du fil chaud aux composantes longitudinale et transversale en fonction des inclinaisons α et θ s'écrivent :

$$S_v = \frac{S_{vr}}{U_0} \frac{\partial V_r}{\partial \alpha} \quad (61)$$

$$S_w = \frac{S_{vr}}{U_0} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \quad (62)$$

avec

$$\frac{\partial V_r}{\partial U_0} = \left[\cos^2 \theta (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) + h^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{U_0} \frac{\partial V_r}{\partial \alpha} = \frac{-\sin \alpha \cos \alpha (1 - k^2) \cos^2 \theta}{[\cos^2 \theta (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) + h^2 \sin^2 \theta]^{1/2}}$$

$$\frac{1}{U_0} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} = \frac{-\cos \theta \sin \theta (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha - h^2)}{[\cos^2 \theta (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) + h^2 \sin^2 \theta]^{1/2}}$$

Supposons maintenant un écoulement bidimensionnel avec δ un angle pouvant être α ou θ et C le facteur correspondant k ou h .

Pour que le fil chaud soit sensible de façon égale aux variations des deux composantes de la vitesse, il faut que

$$\frac{S_u}{S_\delta} = \frac{\partial V_r}{\partial U_0} \bigg/ \left(\frac{1}{U_0} \frac{\partial V_r}{\partial \delta} \right) = 1$$

soit
$$\frac{\cos^2 \delta + c^2 \sin^2 \delta}{\cos \delta \sin \delta (c^2 - 1)} = 1$$

On obtient l'équation du second degré :

$$C^2 \tan^2 \delta - \tan \delta (c - 1) + 1 = 0 \quad (63)$$

Pour que l'équation (63) admette des racines réelles, il faut que

$$C \leq 0,41 \quad \text{ou} \quad C \geq 2,41$$

C'est le facteur longitudinal k de l'ordre de (0,2) qui remplit la condition, et le fil chaud est plus sensible aux incidences longitudinales de la vitesse qu'aux incidences transversales.

Si $\theta = 0$ et $\delta = \alpha$, et en supposant vraie la loi du cosinus ($k = 0$) alors

$$\frac{S_v}{S_u} = -\tan \alpha = 1 \quad \alpha = -45^\circ$$

d'où l'utilisation des sondes à fils inclinés de 45° .

La figure (29) montre les courbes S_{vr} , S_u , $S_v = f(\alpha, \theta = 0)$ pour $U_0 = 30; 40$ et 60 m/s.

CHAPITRE 4LES MESURES EN ANEMOMETRIEA FIL CHAUD

Dans ce chapitre, nous établissons l'expression générale de la vitesse effective de refroidissement d'un fil chaud d'une sonde placée dans un écoulement de direction inconnue.

Nous décrivons d'autre part, les méthodes de mesure utilisées en anémométrie à fil chaud et donnons les descriptions de quelques applications de ces méthodes que l'on trouve dans la littérature.

4.1. Expression générale de la vitesse effective de refroidissement

Nous appelons $oxyz$ le repère de référence tel que l'axe de la sonde soit confondu avec l'axe ox . La position de la sonde est définie dans $oxyz$ par l'angle α d'inclinaison de la normale au fil par rapport à l'axe de la sonde et l'angle γ de rotation de la sonde autour de son axe.

Soit $oxy_i z_i$ le repère lié à la sonde et confondu avec $oxyz$ pour un angle de rotation γ nul. Dans le plan oxy_i , la normale ox au fil fait un angle α avec l'axe ox . L'angle de rotation γ est obtenu en tournant le repère $oxy_i z_i$ lié à la sonde autour de ox (FIG 29).

La direction de la vitesse de l'écoulement est défini dans le repère $oxyz$ par les angles ψ et θ .

Les composantes U_n , U_t et U_b de la vitesse dans le repère lié au fil ont b s'expriment en fonction des composantes U , V et W de la vitesse

dans le repère de référence oxyz :

$$\begin{bmatrix} U_n \\ U_t \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \sin\alpha \cos\gamma \sin\alpha \sin\gamma \\ -\sin\alpha \cos\alpha \cos\gamma \cos\alpha \sin\gamma \\ 0 \quad -\sin\gamma \quad \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (64)$$

La vitesse effective de refroidissement s'écrit :

$$V_r = \left[AU^2 + BV^2 + CW^2 + DUV + EUW + FVW \right]^{1/2} \quad (65)$$

avec

$$A = \cos^2\alpha + k^2 \sin^2\alpha$$

$$B = \cos^2\gamma (\sin^2\alpha + k^2 \cos^2\alpha) + h^2 \sin^2\gamma$$

$$C = \sin^2\gamma (\sin^2\alpha + k^2 \cos^2\alpha) + h^2 \cos^2\gamma$$

$$D = \sin 2\alpha (1 - k^2) \cos\gamma$$

$$E = \sin 2\alpha (1 - k^2) \sin\gamma$$

$$F = \sin 2\gamma (\sin^2\alpha + k^2 \cos^2\alpha - h^2)$$

La valeur instantanée de la vitesse effective de refroidissement est calculée à partir de la tension instantanée de sortie de l'anémomètre en utilisant la loi de King.

4.2. Méthodes de mesure en anémométrie à fil chaud

Différentes techniques de mesure ont été établies par les auteurs. Elles dépendent de l'écoulement dans lequel sont effectuées les mesures et des quantités à mesurer.

Nous distinguons de ces travaux trois méthodes de mesure :

- méthode conventionnelle,
- méthodes de mesure dans des écoulements de grandes amplitudes de fluctuation,
- méthode utilisant des techniques d'échantillonnage périodique du signal instantanée et d'enregistrement des données en vue de traitement ultérieur.

Cette méthode est appliquée aux écoulements périodiques et notamment aux écoulements à l'entrée et à la sortie des roues tournantes des turbomachines.

4.2.1. Méthode conventionnelle [1][21][36]

La méthode dite conventionnelle est une méthode courante appliquée aux mesures effectuées avec des sondes à un fil, deux ou trois fils, dans des écoulements à faibles amplitudes de fluctuation. Elle utilise la moyenne temporelle de la vitesse effective de refroidissement \bar{V}_r et la valeur ^{efficace} de son terme fluctuant

La valeur instantanée de V_r s'écrit :

$$V_r(t) = \bar{V}_r + v_r(t) \quad (66)$$

avec
$$\bar{V}_r = \limite_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V_r(t) dt$$

La moyenne temporelle de la quantité fluctuante v_r étant nulle pour T tendant vers l'infini.

La valeur efficace du terme fluctuant est définie par

$$\sqrt{\overline{v_r^2}} = \left(\limite_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (V_r(t) - \bar{V}_r)^2 dt \right)^{1/2} \quad (67)$$

Ces quantitiés sont calculées à partir des mesures de la composante continue de la tension \bar{E} et de la valeur efficace de sa composante fluctuante $\sqrt{e^2}$ en utilisant la relation de King.

La tension instantanée s'écrit :

$$E = \bar{E} + e \quad \text{avec} \quad \bar{e} = 0 \quad \text{pour} \quad T \rightarrow \infty \quad (68)$$

En remplaçant dans la relation de King E et V_r , on obtient

$$(\bar{E} + e)^2 = E_0^2 + B (\bar{V}_r + v_r)^n = E_0^2 + \bar{V}_r^n \left(1 + \frac{v_r}{\bar{V}_r} \right)^n$$

On suppose $\frac{v_r}{\bar{V}_r} \ll 1$ et le terme $\left(1 + \frac{v_r}{\bar{V}_r} \right)^n$ est développé

en série binomiale jusqu'à l'ordre 2

$$\bar{E}^2 + 2e\bar{E} + e^2 = E_0^2 + B\bar{V}_r^n \left(1 + \frac{nv_r}{\bar{V}_r} + \frac{n(n-1)}{2} \frac{v_r^2}{\bar{V}_r^2} + 0 \right) \quad (3)$$

On néglige e^2 devant $(\bar{E}^2 + 2e\bar{E})$ et $\frac{n(n-1)}{2} \frac{v_r^2}{\bar{V}_r^2}$ devant

$\left(1 + n \frac{v_r}{\bar{V}_r} \right)$, il vient

$$\bar{E}^2 + 2e\bar{E} \neq E_0^2 + B\bar{V}_r^n \left(1 + \frac{n v_r}{\bar{V}_r} \right) \quad (69)$$

La moyenne temporelle des deux membres donne :

$$\bar{E}^2 \neq E_0^2 + B\bar{V}_r^n \quad (70)$$

De la différence entre les équations (69) et (70), on a

$$2e\bar{E} = B\bar{V}_r^n n \frac{v_r}{\bar{V}_r} \quad \text{ou} \quad e = \left(\frac{n B \bar{V}_r^{n-1}}{2 \bar{E}} \right) v_r$$

On élève les deux membres à la puissance 2 et on moyenne par rapport au temps :

$$\overline{e^2} = \left(\frac{n B \overline{V}_r^{n-1}}{2 \overline{E}} \right)^2 \overline{v_r^2}$$

La valeur efficace de la quantité fluctuante de la tension s'écrit en fonction de celle de composante fluctuante de V_r :

$$\sqrt{\overline{e^2}} = \left(\frac{n B \overline{V}_r^{n-1}}{2 \overline{E}} \right) \sqrt{\overline{v_r^2}}$$

$$\text{ou } \sqrt{\overline{e^2}} = S_{vr} \sqrt{\overline{v_r^2}} \quad (71)$$

$$\text{avec } S_{vr} = \frac{n B \overline{V}_r^{n-1}}{2 \overline{E}}$$

S_{vr} étant le coefficient de sensibilité du fil chaud à la vitesse effective de refroidissement.

Lorsqu'un linéarisateur est utilisé la vitesse effective de refroidissement instantanée est directement déduite de la tension linéarisée instantanée E_L .

$$E_L = \overline{E}_L + e_L \quad \text{avec } \overline{e}_L = 0 \quad (72)$$

$$\text{et } E_L = S V_r$$

S étant une constante de linéarisation,

$$\text{on a alors } \overline{V}_r = \frac{\overline{E}_L}{S} \quad \text{et } \sqrt{\overline{v_r^2}} = \frac{\sqrt{\overline{e_L^2}}}{S} \quad (73)$$

On utilise un voltmètre continu pour mesurer la composante continue \overline{E} (ou \overline{E}_L) et un voltmètre efficace (RMS) pour mesurer la valeur efficace de la composante fluctuante $\sqrt{\overline{e^2}}$ (ou $\sqrt{\overline{e_L^2}}$)

Revenons maintenant à l'expression (65) de la vitesse effective de refroidissement. La moyenne temporelle de V_r s'écrit :

$$\bar{V}_r = \left[AU^2 + BV^2 + CW^2 + DUV + EUW + FVW \right]^{1/2} \quad (74)$$

Une équation facilement résolvable ne peut être obtenue de (74) qu'en développant les deux membres en série de Taylor. Ceci suppose que l'écoulement suit une direction privilégiée connue, et admet de faibles amplitudes de fluctuation.

Soit l'axe ox , la direction privilégiée de l'écoulement. L'expression (65) s'écrit :

$$V_r = \sqrt{A} U [1 + g(U, V, W)]$$

$$\text{avec } g(U, V, W) = \frac{1}{A} \left[DV + EW + B\frac{V^2}{U^2} + C\frac{W^2}{U^2} + F\frac{VW}{U^2} \right]$$

$g(U, V, W)$ étant supposé du premier ordre.

Le développement de V_r au voisinage de $(U, 0, 0)$ donne une approximation de V_r . En négligeant les quantités d'ordre supérieur à 2, il vient :

$$V_r = A_1 U + D_1 V + E_1 W + B_1 \frac{V^2}{U} + C_1 \frac{W^2}{U} + F_1 \frac{VW}{U} + O(3) \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \text{avec } A_1 &= \sqrt{A} \\ B_1 &= \sqrt{A} \left(\frac{B}{2A} - \frac{D^2}{8A^2} \right) \\ C_1 &= \sqrt{A} \left(\frac{C}{2A} - \frac{E^2}{8A^2} \right) \\ D_1 &= \frac{D}{2\sqrt{A}} \\ E_1 &= \frac{E}{2\sqrt{A}} \\ F_1 &= \sqrt{A} \left(\frac{F}{2A} - \frac{DE}{4A^2} \right) \end{aligned}$$

En exprimant les composantes U, V, W par leurs parties moyennes et fluctuantes

$$U = \bar{U} + u$$

$$V = \bar{V} + v$$

$$W = \bar{W} + w$$

et
$$\bar{v}_r = \bar{V}_r + v_r \quad \text{avec} \quad \bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = \bar{v}_r = 0$$

alors

$$\begin{aligned} \bar{V}_r + v_r \neq & A_1 (\bar{U} + u) + D_1 (\bar{V} + v) + E_1 (\bar{W} + w) + B_1 \left(\frac{\bar{V}^2 + v^2}{\bar{U}} \right) + \\ & + C_1 \left(\frac{\bar{W}^2 + w^2}{\bar{U}} \right) + F_1 \left(\frac{\bar{V}\bar{W} + v\bar{w}}{\bar{U}} \right) + 2B_1 v \frac{\bar{V}}{\bar{U}} + \\ & + 2C_1 w \frac{\bar{W}}{\bar{U}} + F_1 \left(\frac{v\bar{w} + w\bar{v}}{\bar{U}} \right) \end{aligned} \quad (77)$$

et en moyennant / temps :

$$\begin{aligned} \bar{V}_r \neq & A_1 \bar{U} + D_1 \bar{V} + E_1 \bar{W} + B_1 \frac{\bar{V}^2}{\bar{U}} + C_1 \frac{\bar{W}^2}{\bar{U}} + F_1 \frac{\bar{V}\bar{W}}{\bar{U}} + B_1 \frac{\overline{v^2}}{\bar{U}} + \\ & C_1 \frac{\overline{w^2}}{\bar{U}} + F_1 \frac{\overline{v\bar{w}}}{\bar{U}} \end{aligned} \quad (78)$$

Les termes des quantités de fluctuation $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$, $\overline{v\bar{w}}$ sont considérés négligeables comparés aux termes en \bar{U} , \bar{V} , \bar{W} , ... (Rodi [36]; Gorton et Lakshminarayana [19]) et

$$\bar{V}_r \neq A_1 \bar{U} + D_1 \bar{V} + E_1 \bar{W} + B_1 \frac{\bar{V}}{\bar{U}} + C_1 \frac{\bar{W}}{\bar{U}} + F_1 \frac{\bar{V}\bar{W}}{\bar{U}} \quad (79)$$

La différence entre les équations (77) et (79) donne l'approximation de v_r :

$$v_r \approx A_1 u + D_1 v + E_1 w + B_1 \frac{v^2}{U} + C_1 \frac{w^2}{U} + F_1 \frac{vw}{U} + 2B_1 v \frac{\bar{v}}{U} + 2C_1 w \frac{\bar{w}}{U} + F_1 \left(\frac{\bar{v}\bar{w} + \bar{w}\bar{v}}{U} \right)$$

Les deux membres sont élevés à la puissance 2 et moyennés par rapport au temps. Négligeant les termes tels que $\overline{u^2}$, $\overline{u^4}$, $\overline{v^2 u^2}$, ... on obtient l'expression de $\overline{v_r^2}$:

$$\begin{aligned} \overline{v_r^2} = & A_1 \overline{u^2} + \left[D_1^2 + 4B_1 D_1 \frac{\bar{v}}{U} + 2D_1 F_1 \frac{\bar{w}}{U} + 4B_1^2 \left(\frac{\bar{v}}{U} \right)^2 + F_1^2 \left(\frac{\bar{w}}{U} \right)^2 + 4B_1 F_1 \frac{\bar{v}\bar{w}}{U^2} \right] \overline{v^2} + \\ & + \left[E_1^2 + 2E_1 F_1 \frac{\bar{v}}{U} + 4C_1 E_1 \frac{\bar{w}}{U} + F_1^2 \left(\frac{\bar{v}}{U} \right)^2 + 4C_1^2 \left(\frac{\bar{w}}{U} \right)^2 + 4C_1 F_1 \frac{\bar{v}\bar{w}}{U^2} \right] \overline{w^2} + \\ & + \left[2A_1 D_1 + 4A_1 B_1 \frac{\bar{v}}{U} + 2A_1 F_1 \frac{\bar{w}}{U} \right] \overline{uv} + \left[2A_1 E_1 + 2A_1 F_1 \frac{\bar{v}}{U} + 4A_1 C_1 \frac{\bar{w}}{U} \right] \overline{uw} + \\ & + \left[2D_1 E_1 + 4 \frac{\bar{v}}{U} (D_1 F_1 + B_1 E_1) + 2 \frac{\bar{w}}{U} (E_1 F_1 + 2C_1 D_1) + 4B_1 F_1 \frac{\bar{v}^2}{U^2} + \right. \\ & \left. + 4C_1 F_1 \frac{\bar{w}^2}{U^2} + 2 \frac{\bar{v}\bar{w}}{U^2} (F_1^2 + 4B_1 C_1) \right] \overline{vw} \end{aligned}$$

(80)

Nous notons brièvement les différentes applications de cette méthode :

a) Calcul des quantités fluctuantes avec une sonde à 1 fil.

La figure (30) montre la décomposition d'un champ d'écoulement $(\bar{U} + u, v, w)$ suivant les axes du repère lié au fil. Le fil est situé dans le plan oxy et sa normale fait un angle α avec l'axe ox .

$$\begin{aligned} \text{soit } U_n &= (\bar{U} + u) \cos \alpha + v \sin \alpha \\ U_t &= (\bar{U} + u) \sin \alpha + v \cos \alpha \\ U_b &= w \end{aligned}$$

La relation (80) s'écrit pour le fil dans la plan oxy ($\gamma = 0$) :

$$\overline{v_{r(xy)}^2} = \cos^2 \alpha \left[(1 + k^2 \tan^2 \alpha) \overline{u^2} + \tan^2 \alpha (1 - 2k^2 - k^2 \tan^2 \alpha) \overline{v^2} + 2 \tan \alpha (1 - k^2) \overline{uv} + 0(3) \right]$$

l'indice (xy) désigne le plan de mesure oxy.

Pour 3 valeurs de α choisies habituellement $\alpha = -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$, on obtient 3 équations de $\overline{v_r^2}$ permettant d'extraire $\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{uv}$

$$\begin{aligned} \overline{u^2} &= \overline{v_r^2} (\alpha = 0) \\ \overline{v^2} &= \frac{\overline{v_r^2} (\alpha = 45^\circ) + \overline{v_r^2} (\alpha = -45^\circ) - \overline{v_r^2} (\alpha = 0)(1 + k^2)}{1 - 3k^2} \\ \overline{uv} &= \frac{\overline{v_r^2} (\alpha = 45^\circ) - \overline{v_r^2} (\alpha = -45^\circ)}{2(1 - k^2)} \end{aligned} \quad (83)$$

On obtient des équations similaires dans le plan (oxz) ($\gamma = \frac{\pi}{2}$). La relation (78) s'écrit pour $\alpha = \gamma = 0$

$$\overline{v_r} \# \overline{U} \left[1 + \frac{k^2}{2} \frac{\overline{v^2}}{\overline{U^2}} + \frac{h^2}{2} \frac{\overline{w^2}}{\overline{U^2}} \right] \quad (84)$$

En négligeant les termes des fluctuations, on déduit la module de la vitesse \overline{U} :

$$\overline{U} = \overline{v_{r(xy)}} (\alpha = 0) \quad (85)$$

Acrivlellis [1] élève les 2 membres à la puissance 2 et néglige les termes d'ordre supérieur à 2, il obtient :

$$\overline{V}_r^2 (\alpha = 0) = \overline{U}^2 + k^2 \overline{V}^2 + h^2 \overline{W}^2$$

\overline{V}^2 et \overline{W}^2 étant déjà calculés, \overline{U} se déduit de :

$$\overline{U} = (\overline{V}_r^2 - k^2 \overline{V}^2 - h^2 \overline{W}^2)^{1/2} \quad (86)$$

b) Application de la méthode conventionnelle aux mesures avec la sonde à 2 fils croisés.

On applique à des mesures effectuées avec la sonde à 2 fils croisés la méthode conventionnelle pour la détermination de la direction moyenne de la vitesse dans un écoulement bidimensionnel et des quantités de fluctuations (FIG 32).

* Mesure de la vitesse moyenne de l'écoulement

La vitesse de l'écoulement fait un angle ψ avec l'axe ox de la sonde dans le plan oxy. ψ doit satisfaire à la condition :

$$|\psi| < 45^\circ$$

pour que l'écoulement ne vienne à rencontrer la broche de l'un des fils avant le fil lui-même.

Les expressions des vitesses effectives de refroidissement moyennes \overline{V}_{r1} et \overline{V}_{r2} des deux fils s'écrivent de (79) pour $\overline{W} = 0$ et $\gamma = 0$:

$$\overline{V}_r(\alpha) = \sqrt{A} \overline{U} + \frac{D}{2\sqrt{A}} \overline{V} + \sqrt{A} \left(\frac{B}{2A} - \frac{D^2}{8A^2} \right) \frac{\overline{V}^2}{U} \quad (87)$$

On considère le cas idéal de deux fils identiques :

$$k_1 = k_2 = k \quad \text{et} \quad h_1 = h_2 = h$$

$$\text{et} \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 45^\circ$$

Il vient pour le fil 1 $A = B = \frac{1}{2} (1 + k^2)$ et $D = + (1 - k^2)$
 et pour le fil 2 $A = B = \frac{1}{2} (1 + k^2)$ et $D = - (1 - k^2)$.

Les valeurs \overline{V}_{r1} et \overline{V}_{r2} se déduisent des lois de King respectifs des deux fils.

La résolution des équations \overline{V}_{r1} et \overline{V}_{r2} donne les composantes moyennes de la vitesse \overline{U} et \overline{V} .

* Mesures des quantités de fluctuations

La sonde à deux fils croisés est généralement utilisée pour les mesures de quantités de fluctuations dans le plan de la sonde ($\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, \overline{uv} dans le plan oxy par exemple) ; la sonde étant alignée sur la direction de la vitesse ($\overline{V} = \overline{W} = 0$). Aux voltmètres efficaces, s'ajoute un appareil, appelé processeur de turbulence, permettant les opérations de sommation et de soustraction des composantes e_1 et e_2 des tensions de sortie des deux fils et d'intégration.

La sonde est placée dans un champ de vitesse ($\overline{U} + u, v, w$) isotherme de faibles amplitudes de fluctuation. On utilise la théorie linéarisée : une faible variation de la vitesse de refroidissement entraîne une faible variation de la tension qui s'écrit :

$$dE = \frac{\partial E}{\partial V_r} dV_r$$

ou encore
$$dE = \frac{\partial E}{\partial V_r} \left[\frac{\partial V_r}{\partial U} dU + \frac{\partial V_r}{\partial V} dV + \frac{\partial V_r}{\partial W} dW \right]$$

Les composantes fluctuantes étant faibles, on peut écrire

$$e = S_u \cdot u + S_v \cdot v + S_w \cdot w \quad (88)$$

S_u , S_v et S_w étant les coefficients de sensibilité à la vitesse du fil.

La vitesse effective de refroidissement instantanée du fil 1 s'écrit :

$$V_r = U (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$$

pour $\alpha = 45^\circ$, il vient :

$$\begin{aligned} S_u &= S_{vr} \frac{(1 + k^2)^{1/2}}{2} \\ S_v &= S_{vr} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{(1 - k^2)}{(1 + k^2)} \\ S_w &= 0 \end{aligned}$$

Les composantes fluctuantes des tensions des deux fils s'écrivent :

$$\begin{aligned} e_1 &= S_u \cdot u + S_v \cdot v \\ e_2 &= S_u \cdot u - S_v \cdot v \end{aligned} \quad (89)$$

et on déduit les quantités fluctuantes :

$$\begin{aligned} \overline{u^2} &= \frac{1}{(2S_u)^2} \overline{(e_1 + e_2)^2} \\ \overline{v^2} &= \frac{1}{(2S_v)^2} \overline{(e_1 - e_2)^2} \\ \overline{uv} &= \frac{1}{4S_u S_v} \overline{(e_1 + e_2)(e_1 - e_2)} \end{aligned} \quad (90)$$

* Influence de l'interaction des fils de la sonde sur la mesure des quantités de fluctuation

Du fait de l'interaction des fils, le coefficient de sensibilité à une incidence transversale S_w n'est pas nul, et la formulation pour la

sonde à deux fils s'écrit (Beguiet [4]) :

$$\begin{aligned} e_1 &= S_{u1} u + S_{v1} v + S_{w1} w \\ e_2 &= S_{u2} u + S_{v1} v + S_{w1} w \end{aligned} \quad (91)$$

Au paragraphe 3.4.2. du chapitre 3, nous avons détecté des dérapages θ_s dûs aux influences des sillages aérodynamique et thermique additionnés d'un fil sur l'autre.

Les coefficients de sensibilité (60), (61) et (62) du fil 1, par exemple avec $\alpha = 45^\circ$ et en tenant compte du dérapage $\theta = -\theta_{01}$:

$$\begin{aligned} S_{u1} &= S_{vr1} \left[\frac{1}{2} (1 + k_1^2) \cos^2 \theta_{01} + h_1^2 \sin^2 \theta_{01} \right]^{1/2} \\ S_{v1} &= - S_{vr1} \frac{(1 - k_1^2)}{2} \frac{\cos^2 \theta_{01}}{\left[\frac{1}{2} (1 + k_1^2) \cos^2 \theta_{01} + h_1^2 \sin^2 \theta_{01} \right]^{1/2}} \\ S_{w1} &= \frac{S_{vr1}}{2} (1 + k_1^2 - 2h_1^2) \frac{\cos \theta_{01} \cdot \sin \theta_{01}}{\left| \frac{1}{2} (1 + k_1^2) \cos^2 \theta_{01} + h_1^2 \sin^2 \theta_{01} \right|^{1/2}} \end{aligned} \quad (92)$$

On suppose :

$$\theta_{01} = -\theta_{02} = \theta_0$$

$$S_{u1} = S_{u2} = S_u$$

$$S_{v1} = -S_{v2} = S_v$$

$$S_{w1} = -S_{w2} = S_w$$

alors

$$\begin{aligned} \overline{u^2} &= \frac{(e_1 + e_2)^2}{4 S_u^2} \\ \overline{v^2} &= \frac{(e_1 - e_2)^2}{4 S_v^2} - \left(\frac{S_w}{S_v}\right)^2 \overline{w^2} - 2 \left(\frac{S_w}{S_v}\right) \overline{vw} \\ \overline{uv} &= \frac{\overline{e_1^2} - \overline{e_2^2}}{4 S_u S_v} - \left(\frac{S_w}{S_v}\right) \overline{uw} \end{aligned} \quad (93)$$

Si l'écoulement est plan ($\overline{uw} = \overline{vw} = 0$) le maximum de correction portera sur $\overline{v^2}$ (Béguier [4]). Si l'on ne tient pas compte du dérapage θ_0 on mesure une quantité :

$$\overline{v^2}_m = \frac{\overline{(e_1 - e_1')^2}}{4S_v^2(\theta_0 = 0)}$$

et si on considère $\overline{v^2} = \overline{w^2}$, on a la vraie valeur :

$$\overline{v^2} = \frac{\overline{(e_1 - e_2)^2}}{4(S_v^2 + S_w^2)}$$

l'erreur sur le calcul de $\overline{v^2}$ est donc de :

$$\frac{\overline{v^2} - \overline{v^2}_m}{\overline{v^2}} = 1 - \frac{(S_v^2 + S_w^2)}{S_v^2(\theta_0 = 0)} \quad (94)$$

Prenons les moyennes des valeurs trouvées pour les deux fils :

$$k = 0,12 \quad h = 1,22 \quad \text{et} \quad \theta_0 = 5,5^\circ$$

nous trouvons l'erreur :

$$\frac{\overline{v^2} - \overline{v^2}_m}{\overline{v^2}} = - 1,45 \%$$

Béguier [4] considère que l'effet des sillages thermique et aérodynamique sur le calcul de $\overline{v^2}$ devient négligeable lorsque l'écart entre les deux fils de la sonde satisfait à :

$$e \geq 1,5(2l) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$2l$ étant la longueur d'un fil et (δ) l'angle que font entre eux les deux fils, généralement égal à 90° .

Nous avons dans notre cas, pour des sondes DISA P61 et P64 :

$$e = 0,66 \text{ mm}$$

$$2l : 1,25 \text{ mm}$$

$$\delta \approx 90^\circ$$

$$\text{d'où} \quad 1,5(2l)\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0,98 > e$$

c) Application aux mesures tridimensionnelles

Gorton et Lakshminarayana [19] appliquent la méthode conventionnelle à leurs mesures effectuées avec une sonde à trois fils dans le canal d'une roue tournante d'une turbomachine. En plus des valeurs moyennes des tensions des trois fils \bar{E}_1 , \bar{E}_2 et \bar{E}_3 et des valeurs efficaces

$\sqrt{e_1^2}$, $\sqrt{e_2^2}$ et $\sqrt{e_3^2}$, ils déduisent les quantités $\overline{e_1 e_2}$, $\overline{e_1 e_3}$ et $\overline{e_2 e_3}$ au moyen d'un circuit de sommation et de soustraction et d'un intégrateur.

Les composantes moyennes de la vitesse sont obtenues par la résolution du système de trois équations de type (79) des vitesses effectives de refroidissement des trois fils, par une méthode d'approximation successives, les valeurs de \bar{v}_{r1} , \bar{v}_{r2} et \bar{v}_{r3} étant déduites de \bar{E}_1 , \bar{E}_2 et \bar{E}_3 .

Les six quantités de fluctuation $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$, \overline{uv} , \overline{vw} , \overline{uw} , sont obtenues par la résolution du système de six équations $\overline{v_{r1}^2}$, $\overline{v_{r1}v_{r2}}$, ... Les valeurs de $\overline{v_{r1}^2}$, $\overline{v_{r1}v_{r2}}$, ... sont déduites de $\overline{e_1^2}$, $\overline{e_1 e_2}$, ...

4.2.2. Limite de l'application de la méthode conventionnelle

La restriction la plus importante apportée par l'application de la méthode conventionnelle aux mesures dans les écoulements tridimensionnels est sinon la connaissance de la direction de la vitesse, du moins une direction privilégiée.

D'autre part, les équations des quantités de fluctuation ne sont vraies que lorsque les corrélations d'ordre supérieur à deux sont négligeables devant les corrélations doubles.

Ainsi, la méthode conventionnelle suppose que l'intensité de fluctuation est petite afin de rendre possible la linéarisation de la réponse du fil chaud aux fluctuations de vitesse. Hinze [21] vérifie à quelle intensité de fluctuation cette linéarisation est vraie pour mesurer la vitesse moyenne et les quantités de fluctuation sans commettre de grandes erreurs.

Il considère un fil chaud aligné sur la direction de la vitesse moyenne \bar{U} d'un champ d'écoulement $(\bar{U} + u_1, u_2)$ où u_1 est une fluctuation perpendiculaire au fil suivant la direction \bar{U} et u_2 une fluctuation transversale perpendiculaire au fil. La vitesse effective de refroidissement s'écrit pour $k = 0$ et $h = 1$:

$$V_r = \left[(\bar{U} + u_1)^2 + u_2^2 \right]^{1/2} \quad (95)$$

La tension de sortie moyenne mesurée est, en toute rigueur :

$$\bar{E} = (E_0^2 + BV_r^n)^{1/2} \quad (96)$$

En supposant les hypothèses de linéarisation fondées, on mesure une vitesse moyenne \bar{U}_{mes} telle que :

$$\bar{E} = (E_0^2 + B\bar{U}_{mes}^n)^{1/2} \quad (97)$$

Dans (96), V_r^n est développé en série binomiale jusqu'à l'ordre 3 et l'approximation de (96) moyennée par rapport au temps. De l'égalisation de (97) avec l'approximation de (96) moyennée, il vient pour l'anémomètre à fil chaud à température constante, et en négligeant les termes d'ordre supérieur à 2 (Hinze [21]).

$$\bar{U}_{mes} = \bar{U} \left[1 + \frac{2(n-1) - \delta n}{4} \frac{\bar{u}_1^2}{\bar{U}^2} + \frac{1}{2} \frac{\bar{u}_2^2}{\bar{U}^2} + O(3) \right]$$

avec
$$\delta = \frac{B\bar{U}^n}{E_0^2 + B\bar{U}^n} \quad (98)$$

Pour des valeurs typiques $E_0 = 3,1$ V $B = 3,37$ et $n = 0,5$ et pour une vitesse $\bar{U} = 40$ m/s, on a $\delta \approx 0,7$ et (98) s'écrit :

$$\bar{U}_{mes} = \bar{U} \left[1 - 0,34 \frac{\overline{u_1^2}}{\bar{U}^2} + \frac{\overline{u_2^2}}{\bar{U}^2} + 0(3) \right] \quad (99)$$

en supposant des intensités de fluctuations :

$$\frac{\sqrt{\overline{u_1^2}}}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\overline{u_2^2}}}{\bar{U}} = 20 \%$$

on a l'erreur relative :

$$\frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}} = \frac{\bar{U} - \bar{U}_{mes}}{\bar{U}} \approx - 0,64 \% \quad (100)$$

et pour des intensités de fluctuation de 30 %, on obtient $\frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}} \approx - 1,44 \%$

Dans le cas où un linéarisateur est utilisé, on mesure

$$\frac{E_1}{S} = \bar{U}_{mes} = \bar{V}_r$$

avec
$$\bar{V}_r = \left[(\bar{U} + u_1)^2 + u_2^2 \right]^{1/2} \quad (101)$$

(101) est développé jusqu'au second ordre, il vient :

$$\bar{U}_{mes} = \bar{U} \left[1 + \frac{\overline{u_2^2}}{2\bar{U}^2} + 0(3) \right]$$

pour $\frac{\sqrt{\overline{u_2^2}}}{\bar{U}} = 20 \%$ on a $\frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}} \approx - 2 \%$

et pour $\frac{\sqrt{\overline{u_2^2}}}{\bar{U}} = 30 \%$ on a $\frac{\Delta \bar{U}}{\bar{U}} \approx - 4,5 \%$

Les grandes amplitudes de fluctuation affectent systématiquement les mesures de la valeur moyenne de \bar{V}_r par la relation linéarisée (70) ; mais les erreurs relatives sont négligeables lorsque l'intensité de fluctuation est inférieure à 20 %.

Lorsqu'un linéarisateur est utilisé, les erreurs relatives sont plus importantes que lorsque l'anémomètre à température constante fonctionne sans linéarisateur.

Hinze [21] montre d'autre part que la mesure d'une quantité ($\overline{u_1^2}$) par la méthode conventionnelle pour $\sqrt{\overline{u_2^2}} / \bar{U} = 20\%$ entraîne des erreurs de 10 % en utilisant la relation (71), des erreurs supérieures lorsqu'un linéarisateur est utilisé.

Pour contourner cette difficulté, on fait des étalonnages "dynamiques" pour déterminer le coefficient de sensibilité du fil chaud en traçant les courbes $\sqrt{e^2} = f(\sqrt{u_1^2})$ (Baille [2]). Le fil est alors oscillant dans l'écoulement, transversalement ou longitudinalement, simulant une fluctuation unidimensionnelle de haute intensité. Cependant ces étalonnages apportent des conclusions trop optimistes et les corrections obtenues sur les mesures des quantités de fluctuation sont d'applications douteuses du fait de la supposition que le mouvement relatif de fluctuation est une harmonique pure et non aléatoire (C.Bellot [12]).

On utilise d'une façon générale, la méthode conventionnelle lorsque l'intensité de fluctuation est inférieure à 25 %.

4.2.3. Méthodes de mesure dans les écoulements de grandes amplitudes de fluctuation

Pour les mesures dans les écoulements à grandes amplitudes de fluctuations, les auteurs utilisent des méthodes basées sur la moyenne du carré de la vitesse effective de refroidissement $\overline{V_r^2}$.

Rodi [36] et Acrivlellis [1] utilisent des multiplieurs obtenant ainsi la carré de la tension linéarisée :

$$\overline{V_r^2} = \frac{\overline{E_L^2}}{S^2}$$

Gaulier [18] calcule $\overline{V_r^2}$ par les quantités $\overline{V_r^2} + \overline{v_r^2}$ où $\overline{V_r^2}$ est déterminée à partir de $\overline{E^2}$ et de $\overline{e^2}$, et $\overline{v_r^2}$ à partir des quantités $(\overline{V_r}, \overline{E}, \overline{e^2}, \overline{e^3}, \overline{e^4})$ où $\overline{e^3}$ et $\overline{e^4}$ sont déduites des quantités instantanées e et e^2 introduites dans un corrélateur.

Pour illustrer la principale difficulté inhérente à cette méthode revenons à la figure (30) et aux composantes (81). La moyenne temporelle de $V_r^2(\alpha)$ donne :

$$\begin{aligned} \overline{V_r^2} &= (\overline{U^2} + \overline{u^2}) (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha) + \overline{v^2} (\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha) + \\ &+ \overline{uv} \sin 2\alpha (1 - k^2) + h^2 \overline{w^2} \end{aligned}$$

On remarque que $\overline{U^2}$ et $\overline{u^2}$ ne peuvent être calculés séparément. Rodi (1975) contourne la difficulté en utilisant la vitesse de refroidissement moyennée $\overline{V_r}(\alpha)$ et l'équation correspondante (84). Par exemple pour $\alpha = 0$ et $k \neq 0$:

$$\overline{V_r}(\alpha = 0) = \overline{U} \left[1 + \frac{h^2}{2} \frac{\overline{w^2}}{\overline{U^2}} + o(3) \right]$$

ce qui suppose qu'il connaisse la direction de la vitesse moyenne.

Gaulier [18] détermine les composantes de la vitesse moyenne et des quantités de fluctuations $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$ d'un courant d'air provenant d'un brûleur à fuel domestique dont les intensités de turbulences ne dépassent pas 60 %. Il utilise pour ce faire une sonde à 3 fils. Pour le fil n° 1, par exemple, V_r^2 s'écrit :

$$V_r^2 = k^2 U^2 + V^2 + h^2 W^2$$

$$\text{et } \overline{V_r^2} = \overline{(V_r + v_r)^2} = k^2 \overline{(U + u)^2} + \overline{(V + v)^2} + h^2 \overline{(W + w)^2}$$

Il suppose cette identité vraie dans tous les cas, et donc vraie pour :

$$v_r = u = v = w = 0$$

et écrit
$$\overline{V_r^2} = k^2 \overline{U^2} + \overline{V^2} + h^2 \overline{W^2}$$

d'où
$$\overline{v_r^2} = k^2 \overline{u^2} + \overline{v^2} + h^2 \overline{w^2}$$

En conclusion, les mesures dans les écoulements à grandes amplitudes de fluctuation nécessitant outre les voltmètres continus et efficaces, un autre appareil : un multiplieur ou un corrélateur. D'autre part, des hypothèses sont nécessaires pour pouvoir calculer séparément la vitesse moyenne et les quantités de fluctuations.

4.2.4. Méthodes utilisant des techniques d'échantillonnage

Ces méthodes nécessitant un système d'acquisition du signal et de traitement des données, sont évidemment les plus coûteuses. Elles sont néanmoins nécessaires pour les mesures dans les champs d'écoulement périodiques, notamment à la sortie d'une roue tournante de turbomachine aux moyens de sondes fixes, en association avec une technique d'échantillonnage périodique.

Après un signal de déclenchement, une série de mesures de la tension instantanée du fil est prise et enregistrée. Ceci peut être fait au moyen d'un enregistreur analogique ce qui nécessite un système de conversion analogique/numérique ; ou encore au moyen d'une mémoire numérique où le signal est échantillonné et converti avant stockage. Les valeurs sous forme numérique, sont enfin introduites dans un ordinateur ou un calculateur et traitées.

Ces techniques permettent donc l'obtention d'une série de valeurs de la vitesse effective de refroidissement à partir des valeurs enregistrées des tensions instantanées.

On applique ces techniques aux mesures effectuées avec des sondes à un, deux ou trois fils.

Dans le cas d'une sonde à un fil, on calcule pour 3 orientations (γ) de la sonde, les moyennes périodiques de $V_r(\gamma)$ et on applique la méthode conventionnelle pour déterminer les composantes moyennes périodiques à partir du système de trois équations de type (79).

Les mesures effectuées au moyen d'une sonde à 3 fils en utilisant ces techniques sont les plus précises. Les signaux des trois fils sont enregistrés simultanément permettant la calcul des composantes instantanées de la vitesse. Les moyennes périodiques des composantes de la vitesse et les quantités de fluctuation peuvent être déduites aisément.

o
o o

CHAPITRE 5

MESURES DES ECOULEMENTS

DANS LES TURBOMACHINES

Nous consacrons ce chapitre à la description des méthodes de mesure dans les turbomachines à l'aide de l'anémomètre à fil chaud utilisées par quelques auteurs. Ces mesures sont effectuées pour la détection des profils de la vitesse moyenne, des quantités de fluctuation ou encore des décollements tournants et des recirculations.

Dans un rotor de turbomachine, l'écoulement est tridimensionnel et dans un fonctionnement normal, il peut être considéré comme stationnaire dans le référentiel lié à la roue. De ce fait, l'application de l'anémomètre à fil chaud aux mesures des écoulements dans les turbomachines fait apparaître quelques difficultés.

On distingue deux techniques de mesure :

- technique du fil chaud tournant,
- technique du fil chaud stationnaire.

5.1. Technique du fil chaud tournant

Gorton et Lakshminarayana [19] ont initialement utilisé cette technique avec une sonde à trois fils. Cette technique nécessite un collecteur tournant pour relier les fils de la sonde aux anémomètres, et un mécanisme permettant la commande de l'extérieur de la turbomachine du déplacement de la sonde dans un canal. Lakshminarayana [28] décrit les mécanismes utilisés dans quelques centres de recherche.

Gorton et Lakshminarayana [19] appliquent la méthode conventionnelle à leurs résultats et obtiennent ainsi pour deux positions axiales et cinq positions radiales de la sonde dans un canal du rotor, les composantes de la vitesse et les quantités de fluctuations.

5.2. Technique du fil chaud stationnaire

Cette technique est appliquée pour mesurer l'écoulement aube à aube à la sortie de la roue en utilisant l'une des deux méthodes suivantes :

- méthode de mesure avec une sonde à un fil incliné,
- méthode de mesure avec une sonde à trois fils.

La principale difficulté rencontrée dans l'application de cette méthode est due à sa nature même : la sonde étant située dans un référentiel fixe, et le champ d'écoulement à la sortie de la roue est instationnaire dans ce référentiel avec une composante périodique dont la fréquence est la fréquence de passage d'une ailette de la roue, et une composante aléatoire due à la turbulence. Alors on est amené à appliquer une technique d'échantillonnage et de moyenne périodique dont on trouve un rappel dans l'annexe (3).

Les auteurs qui utilisent cette technique [20], [22], [32], [34], suivent la démarche suivante : un signal de déclenchement de la mesure fourni à la fréquence de passage des ailettes (par une cellule photoélectrique par exemple) déclenche l'acquisition d'un signal d'un fil chaud de la sonde située à un point donné à quelques millimètres de la roue. Il y a contribution de tous les canaux de la roue aux résultats obtenus. Le passage d'un point de mesure à un autre est effectué en décalant le début de l'acquisition par rapport au signal de déclenchement. Après une série d'acquisitions, les données sont stockées sous forme analogique ou numérique sur disque ou bande magnétique et traitées par la suite par ordinateur.

5.2.1. Méthode de mesure avec une sonde à trois fils

Cette méthode a été développée et utilisée par le groupe de Lakshminarayana à la Pennsylvania State University [29]. Les signaux des trois fils sont enregistrés simultanément permettant l'obtention des composantes instantanées de la vitesse. Les moyennes périodiques des composantes sont effectuées directement avec leurs valeurs instantanées et les quantités de fluctuations sont déduites par la suite à partir des valeurs instantanées et des moyennes périodiques des composantes.

5.2.2. Méthode de mesure avec un fil incliné

Cette méthode a été utilisée par Larguier et De Sivers [30], Hirsch et Kool [22], Okiishi et Schimdt [32].

La sonde utilisée est une sonde droite à un fil incliné de 45° ou encore de $54,74^\circ$ par rapport à l'axe de la sonde. Au point de mesure et pour une orientation initiale de la sonde, une série de mesures obtenues par rotation de la sonde autour de son axe des angles choisis habituellement de (-120°) et (120°) par rapport à l'orientation initiale.

Les valeurs ainsi obtenues pour un point donné permettent l'obtention des moyennes périodiques des composantes de la vitesse.

Nous appliquons les deux méthodes de la sonde stationnaire et utilisons dans le cas de la sonde à un fil incliné, la méthode conventionnelle.

5.2.3. Autres méthodes de mesure

Goulas et Baker [20] mesurent le profil de l'écoulement à la sortie de la roue d'un compresseur centrifuge de petite dimension au moyen de trois sondes à un fil, le fil de chaque sonde étant orienté différemment.

A un point donné, l'acquisition du signal du fil d'une sonde est effectuée à la fréquence de rotation des ailettes de la roue, et 1 024 échantillons sont stockés sur bande magnétique.

Ils considèrent la moyenne de trois échantillons du fil de chaque sonde et supposent que les valeurs ainsi obtenues comme étant les résultats de trois mesures simultanées. Ils effectuent la résolution d'un système de trois équations de la vitesse effective de refroidissement, à trois inconnues pour obtenir les trois composantes instantanées de la vitesse dans le référentiel relatif. Ils effectuent ensuite des moyennes périodiques avec les composantes instantanées pour obtenir les profils des composantes moyennes et des contraintes de turbulence.

5.3. Détermination des caractéristiques du décollement tournant avec deux sondes à un fil

Dans une zone de débits inférieurs au débit d'adaptation d'une turbomachine, on peut obtenir deux points de fonctionnement différents pour une même caractéristique du circuit (FIG 34). Lorsqu'on opère à débit croissant, on obtient le point de fonctionnement auquel apparaît une zone fortement perturbée entre un certain nombre d'aubages et tournante par rapport à la roue : c'est ce qu'on appelle le décollement tournant.

On peut utiliser deux sondes à un fil chaud placées à l'amont de la roue étudiée (Caignaert [8] ; Suzuki, Ugai et Harada [38] ...), suffisamment près de la roue et décalées d'un angle σ pour détecter l'apparition du décollement. On relie les sorties des deux anémomètres à un oscilloscope pour observer les signaux des fils en fonction du temps.

Lorsque le décollement tournant apparaît, on constate une augmentation de l'amplitude de la vitesse et des fluctuations à l'entrée de la roue. A partir du décalage σ entre les sondes et de l'intervalle

de temps entre les moments d'apparition du décollement à l'endroit des deux fils, on déduit la vitesse de rotation du décollement tournant par rapport au repère fixe, le nombre de zones décollées et l'amplitude d'une zone décollée.

La détermination du profil des vitesses en sortie de roue lors d'un fonctionnement avec décollement tournant devient beaucoup plus délicate car il faut moyennner séparément sur la zone décollée et la zone non décollée ce qui pose le problème du déclenchement conditionnel des acquisitions des données.

o

o o

CHAPITRE 6DESCRIPTION DE L'INSTALLATION D'ESSAI

Nous abordons dans ce chapitre la description de notre ventilateur et définissons son point de fonctionnement lors des essais. Nous décrivons ensuite la chaîne de mesure et étudions sa réponse en fréquence pour le point de fonctionnement du ventilateur.

6.1. Banc d'essai

Le ventilateur utilisé pour nos essais est un ventilateur centrifuge à volute aspirant l'atmosphère par un pavillon. Ses principales dimensions sont données par la figure (33). La roue comporte 16 aubes droites couchées en arrière à profil symétrique NACA 16 - 009. L'angle de sortie des aubes est de 57° par rapport à la direction tangentielle, et la largeur de sortie est de 60 mm.

Le ventilateur est entraîné directement par un moteur-balance à courant continu alimenté par une armoire à thyristors pilotés par une régulation de vitesse. La vitesse de rotation peut être variée de façon continue jusqu'à 3 000 t/mn.

Les caractéristiques de notre ventilateur ont été mesurées par Stevenaert [37] suivant la méthode du caisson réduit (Norme NF X 10 - 200). La figure (34) montre les courbes caractéristiques $\mu = f(\delta)$, $\zeta = f(\delta)$ et $\eta = f(\delta)$ où

- μ : coefficient de travail net
- ζ : coefficient de puissance sur l'arbre
- η : rendement global
- δ : coefficient de débit

Nous effectuons des mesures tridimensionnelles au moyen d'une sonde fixe placée à quelques millimètres à la sortie de la roue du ventilateur. Nous avons étudié et réalisé à l'atelier de fabrication de l'E.N.S.A.M. (Lille) un dispositif de manipulation permettant la fixation et le positionnement de la sonde sur le point de mesure, le balayage en largeur des canaux et l'orientation de la sonde autour de son axe. La figure (35) montre le schéma de ce dispositif.

6.2. Point de fonctionnement du ventilateur lors des essais

Nous faisons les essais avec une vitesse de rotation de la roue de 2 000 t/mn au point du meilleur rendement (diamètre du diaphragme du caisson = 250 mm ; débit = 2 m³/s). Pour ce point de fonctionnement, on a les coefficients :

$$\delta = 0,284 \quad \mu = 0,523 \quad \zeta = 0,184 \quad \eta = 0,805$$

La puissance sur l'arbre est $P_r = 7355$ W et la puissance nette est $P_n = 5937$ W.

En faisant une évaluation des pertes, Stevenaert [37] calcule pour notre ventilateur un coefficient de débit dans la roue de :

$$\delta_r = 0,285$$

et un coefficient de travail indiqué de :

$$\mu_i = 0,619$$

On déduit avec ces quantités les différentes grandeurs du triangle des vitesses en considérant un écoulement à une dimension. La figure (36) montre la construction du triangle des vitesses à la sortie de la roue

avec :

- U_2 : Vitesse circonférentielle
- W_r : Vitesse relative
- C_d : Vitesse débitante
- C : Vitesse absolue
- C_u : Projection de la vitesse absolue sur la direction tangentielle.

Nous avons dans ce cas :

$$\delta_r = \frac{Q_r}{\omega_r R_2^2} \quad \mu_i = \frac{\rho U_2 C_u}{\rho \omega^2 r R_2^2} \quad (102)$$

avec :

- $Q_r = 2\pi R_2 b_2 C_d$: débit dans la roue
- ω_r : vitesse de rotation en rad/s
- $R_2 = 0,325$ m : rayon extérieur de la roue
- $b_2 = 0,06$ m : largeur des canaux.

Et nous calculons les quantités :

$$\begin{aligned} C_d &= 19,4 \text{ m/s} \\ C_{u2} &= 42,13 \text{ m/s} \\ \alpha_2 &= \text{Artang} \left(\frac{C_d}{C_{u2}} \right) = 24,7^\circ \end{aligned}$$

6.3. Position du point de mesure dans le repère fixe

La figure (37) montre la formulation des paramètres géométriques du point de mesure P. R_3 est la distance du point de mesure P à l'axe de la roue, et Δ l'angle que fait l'axe de la sonde avec la direction tangentielle au point P d'une roue fictive de diamètre $2R_3$, supérieur au diamètre de la roue $2R_2$. $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$ est le référentiel mobile lié à la roue. Connaissant Δ , les composantes de la vitesse calculées dans le référentiel fixe lié à la sonde sont par la suite, projetées dans $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$.

On positionne la sonde à une distance de la roue qui reste inférieure à 10 mm. La position du point de mesure P est définie par la longueur du tube de guidage à introduire dans la volute du ventilateur et l'angle de la rotation du rapporteur.

Connaissant la longueur du tube de guidage et le rayon R_3 , nous calculons la rotation ψ_1 du rapporteur et l'angle Δ avec les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 D &= (T^2 + e^2)^{1/2} \\
 \psi_2 &= \text{Arc Sin} \left(\frac{L^2 + D^2 - R_3^2}{2DL} \right) - \theta_1 \\
 \psi_1 &= \psi_2 + \text{Arctang} \left(\frac{e}{T} \right) \\
 \psi_1 &= \text{Artang} \left(\frac{D \cos \psi_2 - L \sin \theta_1}{L \cos \theta_1 - D \sin \psi_2} \right) \\
 \Delta &= \psi_2 - \psi_1
 \end{aligned}
 \tag{103}$$

6.4. Chaîne de mesure

La chaîne de mesure est représentée sur la figure (38).

Le transiscope DIFA TR1030 est à 4 voies. La mémoire numérique de chacune des voies a une capacité de 4 096 mots de 10 bits et la fréquence d'échantillonnage maximale est de 1 MHz. Les mémoires numériques de TR 1030 sont des "Mémoires à accès aléatoire" (RAM) statiques, et dans un milieu parasite, leur contenu peut être perturbé après un délai de 10 mn environ.

Chaque voie est divisible en un maximum de 16 blocs de 256 points de capacité. Le TR1030 peut échantillonner à une fréquence d'échantillonnage externe inférieure à 1 MHz et comprend les fonctions "déclenchement" (interne et externe) et "retard".

Le TR1030 est muni d'un filtre anti-repliement placé en amont du convertisseur analogique/numérique pour atténuer les signaux de fréquence supérieure au $\frac{1}{5}$ de la fréquence d'échantillonnage. Le filtre est également réglable manuellement afin de diminuer ou d'augmenter la fréquence de coupure.

Notre TR1030 est équipé des deux interfaces en parallèle : l'Interface DMA (accès direct à la mémoire) et l'Interface IEC - BUS, et utilise les caractères ASCII dans ses communications avec les autres appareils.

L'interface IEC - BUS est du type à bits parallèles, octets en série conformément à la norme IEC - 625, compatible avec la norme IEEE 488 - 1975. Nous utilisons cette interface pour le transfert des données entre le TR1030 et le calculateur HP 9835 A par l'intermédiaire du système HP - IB ainsi que pour la télécommande complète du TR1030.

Nous décrivons en Annexe (4) quelques caractéristiques des BUS d'interface suivant la norme IEEE - 488.

La cellule photoélectrique excitée par une raie lumineuse liée à l'arbre de la roue fournit une impulsion au retardateur d'éclat du stroboscope qui déclenche à son tour, après un retard, le stroboscope.

Nous utilisons le signal fourni par le stroboscope pour déclencher la mémoire pour l'acquisition des signaux sur le même passage d'un même point de la roue, ou comme fréquence d'échantillonnage externe.

Après une instruction de commande fournie par le calculateur par l'intermédiaire des BUS d'interface HP - IB, et lorsque les conditions de déclenchement sont remplies, le TR1030 commence l'acquisition des signaux de sortie des anémomètres. Aussitôt terminée, l'acquisition de 4 096 échantillons sur les voies en fonction, il envoie un signal " demande de service " (SRQ) au calculateur. Ce dernier demande alors le transfert des données pour les stocker sur un disque en vue de traitements ultérieurs.

6.4. Réponse en fréquence de la chaîne de mesure

Le pont de l'anémomètre à fil chaud doit suivre d'une façon précise les variations de la vitesse à la sortie de la roue du ventilateur. La fréquence fondamentale du signal de la vitesse moyenne dépend de la vitesse de rotation et du nombre d'aubes de la roue.

$$f = \frac{N_r Z}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (104)$$

avec N_r = vitesse de rotation de la roue (tours/mn)
 Z = nombre d'aubes

Si l'écoulement peut être considéré comme stationnaire dans le référentiel lié à la roue, le profil de la vitesse moyenne $F(t)$ à la sortie de la roue peut être analysé en utilisant les séries de Fourier :

$$F(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n \left[a_i \cos\left(\frac{if}{2\pi} t\right) + b_i \sin\left(\frac{if}{2\pi} t\right) \right] \quad (105)$$

n est un entier qui tend vers l'infini.

Le système anémométrique répond aux harmoniques dont la fréquence satisfait à la relation (Goulas et Baker [20]) :

$$if \leq fa \quad (106)$$

où f_a est la fréquence de coupure du système anémométrique, et coupe les harmoniques de fréquences supérieures à f_a .

Nous effectuons le réglage dynamique d'un système anémométrique en utilisant le test du signal carré fourni par le générateur inclus dans l'unité de base de l'anémomètre 55 M. Le fil chaud est exposé dans notre soufflerie à un écoulement de faible intensité de fluctuations ($\leq 2\%$) et de vitesse maximale 40 m/s, légèrement inférieure à la vitesse en sortie de roue du ventilateur.

En utilisant la relation (33b), nous mesurons dans nos deux cas d'utilisation de la sonde à un fil incliné 55 P12 et de la sonde à trois fils 55 P 91 des réponses en fréquence des systèmes anémométriques meilleures que 34 KHz.

Nous avons relevé à l'aide d'un analyseur de signaux HP 5423 utilisant la transformée de Fourier rapide, le spectre linéaire du signal de la tension de sortie du pont d'un anémomètre avec une sonde à un fil incliné, sur une largeur de bande de 12 KHz. Le fil étant positionné au milieu de la largeur de la roue à environ 5 mm de cette dernière.

La figure (39a) montre le spectre linéaire. Les ordonnées sont graduées en module.

A la fréquence nulle, on lit une valeur a_0 , ou encore la moyenne temporelle de la tension de sortie du pont ($a_0 = 5,45$ Volts).

La fréquence fondamentale f du spectre linéaire de la composante alternative (FIG 39b) est égale à 550 Hz, ce qui correspond à une vitesse

de rotation de 2 062 t/mn. Les termes d'amplitudes significatives correspondent ensuite à des fréquences multiples de f (jusqu'à l'ordre 6 environ).

On peut voir sur ce spectre que tout ce qui se trouve au dessus de 8 KHz peut être négligé. La fréquence de coupure des filtres du TR1030 doit donc satisfaire à :

$$f_t \geq 8 \text{ KHz}$$

°
° °

CHAPITRE 7MESURES TRIDIMENSIONNELLESAVEC LA SONDE A UN FIL INCLINE

La sonde à un fil incliné DISA 55 P12 est une sonde droite et le fil, dans le cas idéal, fait un angle de 45° avec l'axe de la sonde. Nous nous intéressons, dans le cas d'utilisation de cette sonde, aux composantes moyennes de la vitesse et négligeons le calcul des quantités de fluctuations de la vitesse en raison du temps relativement long que nécessite ce calcul.

La méthode de mesure consiste à enregistrer la réponse du fil pour trois orientations (γ) de la sonde autour de son axe et effectuer la résolution ultérieurement. Nous choisissons les orientations $\gamma = -120^\circ$, 0° et $+120^\circ$.

7.1. Domaine d'utilisation de la sonde à fil incliné

L'angle que fait la normale au fil avec l'axe de la sonde α , et les orientations γ de la sonde autour de son axe, définissent son domaine d'utilisation (FIG 32).

0, 1 et 2 sont les trois positions de mesure. La position 0 est la position initiale de référence ($\gamma = 0$). Les positions 1 et 2 sont obtenues par rotation d'un angle γ_1 et γ_2 respectivement, avec $\gamma_1 = -\gamma_2$.

Pour éviter les effets des broches sur le fil, il faut que la direction de la vitesse soit contenue dans le cône d'axe ox et d'angle

au sommet égal à $2\Psi'$ avec :

$$\Psi' = \left| \text{Arctang} \left(\frac{\cos \delta_1}{\text{tang} \alpha} \right) \right| \quad (107)$$

Dans notre cas, nous avons $\alpha \approx 45^\circ$ et $\gamma_1 = 120^\circ$, d'où

$$\Psi' = 26,6^\circ$$

Dans le cas particulier d'une sonde avec un fil incliné de $54,74^\circ$, par rapport à l'axe de la sonde ($\alpha = 35,26^\circ$) et pour $\gamma = 120^\circ$, il vient :

$$\Psi' = 35,26^\circ$$

et les trois positions du fil forment un trièdre rectangle.

Lors d'une utilisation de la sonde à un fil incliné, il convient de "situer" la direction privilégiée de l'écoulement et d'aligner l'axe de la sonde sur cette direction. Nous choisissons pour cette raison un angle Δ d'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport à la direction tangentielle à la roue fictive de diamètre $2R_3$ tel que :

$$\Delta \neq \alpha_2 \quad (108)$$

Nous supposons que les variations de la direction de l'écoulement autour de l'axe de la sonde soient contenues dans le cône d'angle au sommet

$$2\Psi' = 53^\circ \quad (109)$$

7.2. Moyennes périodiques

Nous avons choisi d'effectuer les moyennes périodiques avec les mesures effectuées au passage d'un même point à la sortie de la roue. La période de ce passage est égale à la période de rotation de la roue.

A l'instant t , la tension du fil satisfait à la condition :

$$\tilde{E}(t) = \tilde{E}(t + nT)$$

L'instant $t = 0$ est le moment de l'événement d'un signal fourni par la cellule photoélectrique à chaque tour de la roue, et T est la période de rotation de la roue :

$$T = \frac{60}{N_r} = 30 \text{ m s} \quad (110)$$

Après conversion des données en vitesses effectives de refroidissement instantanées, nous effectuons les moyennes périodiques pour chaque orientation (γ) de la sonde au même point.

$$\left[\tilde{v}_r(t) \right]_{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[v_r(t + nT) \right]_{\gamma} \quad (111)$$

La variance de la quantité fluctuante v_r se déduit de :

$$\left[\tilde{v}_r^2(t) \right]_{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[(v_r(t + nT))_{\gamma} - (\tilde{v}_r(t))_{\gamma} \right]^2 \quad (112)$$

7.3. Méthode de résolution

Nous supposons un écoulement avec une intensité de fluctuation dans les trois directions inférieure à 25 %. La direction privilégiée de l'écoulement étant supposée suivant l'axe ox de la sonde, nous appliquons à nos mesures la méthode conventionnelle.

L'équation de la vitesse effective de refroidissement moyennée et linéarisée pour une orientation γ est donnée par l'expression (79).

En remplaçant les moyennes temporelles par les moyennes périodiques, elle s'écrit :

$$\tilde{V}_r(\gamma) = A_1 \tilde{U} + D_1 \tilde{V} + E_1 \tilde{W} + B_1 \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_1 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} + F_1 \frac{\tilde{V}\tilde{W}}{\tilde{U}}$$

Pour les trois orientations, on obtient un système de trois équations non-linéaires à trois inconnues. Nous effectuons sa résolution par la méthode d'approximations successives de Newton à convergence quadratique, pour extraire les composantes moyennes \tilde{U} , \tilde{V} , et \tilde{W} dans le référentiel oxyz lié à la sonde.

On effectue ensuite le transfert dans le référentiel $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$ lié à la roue pour obtenir les composantes moyennes \tilde{U}_1 , \tilde{U}_2 et \tilde{U}_3 , avec

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \\ \tilde{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \Delta & -\cos \Delta & 0 \\ \cos \Delta & \sin \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U} \\ \tilde{V} \\ \tilde{W} \end{bmatrix} \quad (113)$$

\tilde{U}_1 est la composante radiale, \tilde{U}_2 la composante tangentielle et \tilde{U}_3 , la composante axiale.

Nous donnons dans l'annexe (5) le détail de calcul et l'organigramme du programme de résolution.

7.4. Mesures

Dans le cas des mesures avec la sonde à un fil incliné, nous avons envisagé deux types d'échantillonnage. Le premier est un échantillonnage externe au TR1030, et nous l'utilisons pour l'étude de l'effet du nombre d'échantillons sur le calcul des moyennes périodiques de la vitesse effective de refroidissement d'une part, et sur le calcul des composantes de la vitesse à la sortie de la roue d'autre part.

Le second type d'échantillonnage est interne, et nous l'utilisons pour le tracé des profils des composantes à la sortie de trois canaux environ.

7.4.1. Echantillonnage externe

Dans ce cas, l'impulsion d'échantillonnage est fournie par le stoboscope à chaque tour de la roue, et la fréquence d'échantillonnage est égale à la fréquence de rotation de la roue. A un point de mesure à la sortie de la roue, nous relevons 1 024 échantillons de la tension pour chaque orientation de la sonde, et le passage d'un point à un autre est réalisé au moyen du retardateur d'éclat lié au stoboscope.

Nous avons effectué des mesures en six points dans un plan perpendiculaire à l'axe de la roue et passant par le milieu de ses canaux. La figure (40) montre la position des points de mesures dans ce plan.

a) Effet du nombre d'échantillons sur le calcul des moyennes

Le tableau ci-dessous donne en pourcent, les estimations des intensités de fluctuations de la vitesse effective de refroidissement $\sqrt{\tilde{v}_r^2} / \tilde{V}_r$ calculées avec 1 024 échantillons dans les six points et pour les trois orientations.

Orientation	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
$\gamma = 0$	6,42	6,14	9,9	8	21,5	5,45
$\gamma = 120^\circ$	5,37	5,37	9,97	13,16	19,85	5,37
$\gamma = -120^\circ$	5,17	7,31	12,43	10,95	18,8	6,25

Les plus fortes intensités de fluctuations sont enregistrées pour le point 5 vers la zone de sillage de la face en dépression d'une ailette et les plus faibles pour les points 1 et 6.

Nous calculons avec la relation (2) de l'annexe (3) l'erreur commise sur le calcul de l'intensité de fluctuation avec 1 024 échantillons, on a :

$$\epsilon_2 = \sqrt{\frac{2}{N}} = 4,42 \%$$

En tenant compte de cette erreur, l'intensité maximale serait de 22,5 % et l'intensité minimale de 5,4 %.

Avec la relation (1) de l'annexe (3), nous calculons avec ces intensités l'erreur commise sur le calcul de la moyenne périodique de V_r . Il vient dans le premier cas :

$$\epsilon_1 = \frac{1}{N} \frac{\sqrt{\tilde{V}_r^2}}{\tilde{V}_r} = 0,7 \%$$

et $\epsilon_1 = 0,17 \%$ dans le second cas.

Nous négligeons ϵ_1 et supposons vraies les moyennes \tilde{V}_r calculées avec 1 024 échantillons.

Nous calculons l'erreur relative :

$$\frac{\Delta \tilde{V}_r}{\tilde{V}_r} = \left[\frac{\tilde{V}_r(N) - \tilde{V}_r(1024)}{\tilde{V}_r(1024)} \right]$$

pour N variant entre 10 et 1 024 échantillons.

Nous avons tracé sur les figures (41a) et (41b) les résultats pour deux positions de la sonde.

On vérifie que l'erreur est fonction de l'intensité de fluctuations et du nombre d'échantillons. L'erreur est inférieure à 1 % lorsque l'intensité de fluctuation est de 5,4 % et à 5 % lorsque l'intensité de fluctuation est de 22,5 % pour N comprise entre 10 et 1 024.

b) Effet du nombre d'échantillons sur le calcul des composantes moyennes

Nous calculons pour les six points, les moyennes des composantes dans le référentiel lié à la roue avec \tilde{V}_r calculée avec 128 et 1 024 échantillons.

Le tableau ci-dessous donne les quantités

$$100 \frac{\Delta \tilde{V}_r}{\tilde{V}_r} = \frac{\tilde{V}_r(128) - \tilde{V}_r(1024)}{\tilde{V}_r(1024)} \times 100$$

Orientation	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
$\gamma = 0$	- 0,322	2,77	- 5,17	1,72	- 1,7	0,34
$\gamma = 120^\circ$	1,13	1,57	0,24	1,24	- 4,52	0,47
$\gamma = -120^\circ$	1,1	0,27	- 2,45	- 1,01	- 1,95	- 1,5

Les quantités les plus faibles correspondent aux points 1 et 6 et les plus importantes aux points 3 et 5. Nous avons reporté les résultats des calculs des composantes sur la figure (42). Les plus faibles écarts sont situés aux points 1 et 6 et les plus importants aux points 3 et 5.

c) Conclusion

Une grande précision dans le calcul des moyennes périodiques nécessite un grand nombre d'échantillons. Et il est d'autant plus grand que l'intensité de fluctuation est importante.

D'autre part, des erreurs supérieures à 1,5 % dues à un nombre insuffisant d'échantillons, sur les calculs des moyennes \tilde{V}_R pour les trois orientations de la sonde peuvent entraîner des erreurs jusqu'à 10 % sur le calcul de la composante radiale, supérieures à 2 % sur le calcul de la composante tangentielle et supérieures à 30 % sur le calcul de la composante axiale.

7.4.2. Echantillonnage interne

Nous avons divisé les voies du TR1030 en 16 blocs de 256 échantillons chacun et choisi une fréquence d'échantillonnage interne pour mesurer l'écoulement à la sortie de trois canaux environ de la roue tournant à 2 000 t/mn.

Après une commande de démarrage d'une mesure, le TR1030 commence l'acquisition du signal dans un bloc de chaque voie utilisée, après réception d'un signal de déclenchement fourni par le stroboscope à chaque tour de la roue. L'acquisition s'arrête lorsque les 16 blocs des diverses voies sont "remplies". Les mémoires du TR1030 sont alors "vidées" et les données sont stockées sur disquette avant de répéter à nouveau l'opération.

Nous avons ainsi relevé dans chaque bloc d'une même voie, 256 échantillons du signal d'un fil chaud enregistrés au passage des mêmes canaux.

a) Période d'échantillonnage

La roue comporte 16 aubages. Si n_c est le nombre de canaux à balayer et N la vitesse de rotation de la roue en t/mn, le temps de ce balayage est :

$$t_b = \frac{n_c}{16} \cdot \frac{60}{N} \quad (\text{s}) \quad (114)$$

La période d'échantillonnage est alors :

$$t = \frac{tb}{N_e - 1} \quad (115)$$

N_e étant le nombre d'échantillons d'un bloc.

Pour $N_r = 2\,000$ t/mn, $n_c = 3$ canaux et $N_e = 256$ échantillons, la période d'échantillonnage arrondie est :

$$\Delta t = 23 \mu s \quad (116)$$

Connaissant R_3 et la vitesse de rotation de la roue en tours par minute, on peut calculer la distance séparant deux points mesurés dans le canal inter-aubes :

$$d = 2\pi R_3 \frac{N_r}{60} \cdot \Delta t \quad (117)$$

Nous utilisons les filtres anti-repliement du TR1030. A notre fréquence d'échantillonnage, leurs fréquences de coupure est :

$$f_t = 12 \text{ KHz}$$

Pour une orientation γ de la sonde, nous prenons avec le TR1030, six mesures sur une seule voie divisée en 16 blocs, soit au total 96 blocs de 256 points. Dans chacun des blocs, la tension $E(t)$ aux bornes du pont est échantillonnée avec une période d'échantillonnage Δt ; l'instant $t = 0$ correspond au moment du déclenchement de l'enregistrement d'un bloc.

A un instant $t = k \Delta t$, nous avons donc :

$$\tilde{E}(k \Delta t) = \tilde{E}(k \Delta t + nT)$$

avec $k = 0, 1, \dots, 255$

$n = 1, 2, \dots, 96$

et T la période de rotation de la roue

Après la conversion des données en vitesses effectives de refroidissement instantanées, nous effectuons les moyennes périodiques suivantes pour chacun des points :

$$\tilde{V}_{r(\gamma)}(k\Delta t) = \frac{1}{96} \sum_{n=1}^{96} V_{r(\gamma)}(k\Delta t + nT)$$

b) Profils des composantes moyennes de la vitesse

Nous avons réalisé des mesures aube à aube à la sortie de la roue dans cinq plans le long des canaux (FIG 44). Les plans sont distants de 10 mm l'un de l'autre et les plans 1 et 5 sont respectivement à 10 mm des flasques arrière et avant. La sonde est située à 3,3 mm de la roue, et la période d'échantillonnage est de 23 μ s. La distance séparant deux points mesurés dans le canal inter-aubes d est donc de 1,58 mm.

Nous désignons par U_c la vitesse circonférentielle calculée pour le rayon R_3 :

$$U_c = \omega_r \cdot R_3 \quad (118)$$

Les figures 46, 47, 48, 49 et 50 montrent les profils des composantes moyennes dans le référentiel $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$ lié à la roue. Les abscisses sont graduées en intervalles de temps Δt , et à un point (p) de l'abscisse correspond l'instant $t = p \Delta t$ avec $\Delta t = 23 \mu$ s.

On localise la présence des ailettes par les minimums du profil de la composante radiale dans les plans 1, 2, 3 et 4 aux environs des points $p = 20, 100$ et 180 . Cette localisation est moins aisée dans le plan 5, situé à 10 mm du flasque avant, où le profil de la composante radiale devient écrasé.

Dans les plans 2, 3 et 4 on distingue les zones de sillage et de jet sur le profil de la composante radiale à la sortie d'un canal inter-aubes.

La zone de sillage est due au décollement de la couche limite sur la face en dépression de l'ailette et comprend environ 30 % du pas. Nous avons relevé les plus fortes intensités de fluctuations de la vitesse effective de refroidissement dans cette zone, et ils sont de l'ordre de 20 % pour les trois orientations de la sonde.

La zone de jet comprend la plus grande partie de l'écoulement et le maximum de la composante radiale dans cette zone est situé vers la face en pression de l'aubage.

Dans le plan 1 vers le flasque arrière, la zone de sillage semble être plus atténuée, et la zone de jet est plus large que dans les plans 2, 3 et 4, avec un profil plus uniforme.

Les plus fortes variations de la composante radiale sont enregistrées pour les plans 2 et 3, et les plus faibles pour les plans 4 et 5. En moyenne, la vitesse débitante est plus importante vers le flasque avant et atteint la valeur calculée en considérant un écoulement à une dimension. La figure (51a) montre l'évolution en moyenne de la composante radiale en fonction des plans de mesure.

Le profil de la composante tangentielle admet un minimum dans le début de la zone de la couche limite de la face en pression suivi par un maximum dans la zone de sillage de la face en dépression d'un aubage. Les plus importantes variations de la composante tangentielle sont dans les plans 2 et 3, et les plus faibles dans les plans 4 et 5. En moyenne, elle est plus faible vers le flasque avant, et plus importante au milieu du canal où elle atteint la valeur calculée en considérant un écoulement uni-dimensionnel. La figure (51b) montre l'évolution en moyenne de la composante tangentielle en fonction des plans de mesures.

Dans un canal inter-aubes, la composante axiale dans le plan 1 est positive (dirigée du flasque arrière vers le flasque avant) dans la plus grande partie du canal à partir de la face en dépression d'un aubage. Elle diminue à l'approche du second aubage et devient négative au voisinage de la face en pression.

Dans le plan 2, la composante axiale est positive dans la zone de jet et négative dans la zone de sillage. Dans les plans 3 et 4, la partie négative devient plus importante, et la partie qui est positive dans le plan 2 diminue et devient négative dans le plan 4.

Dans le plan 5, la composante axiale est négative dans presque la totalité du canal avec des pics positifs à l'endroit des faces en pression des aubages. On remarque la similitude des profils de la composante axiale dans les plans 1 et 5 avec un changement de signe.

La composante axiale n'est pas toujours négligeable devant la composante radiale et atteint des valeurs de 50 % de la composante radiale dans la zone de jet dans les plans 1 et 5.

Les figures 52, 53 et 54, montrent respectivement l'évolution du profil de la composante radiale, tangentielle et axiale, en fonction des plans de mesure.

En conclusion, les variations de la composante radiale sont plus atténuées près des flasques, et en moyenne, la vitesse débitante est plus élevée vers les flasques que dans la zone centrale des canaux. A l'approche du flasque avant, la variation de la composante tangentielle diminue et dans le plan 5 à 10 mm du flasque avant, les passages des aubages sont moins marqués sur le profil de la composante radiale que dans les autres plans. La structure d'écoulement avec jet et zone décollée vers la face en dépression des aubages est plus marquée dans la zone centrale des canaux, et la composante axiale est plus importante à l'approche des flasques.

Desmet [14] a mesuré l'écoulement aube à aube dans plusieurs plans à la sortie de notre ventilateur au moyen d'une sonde à deux fils croisés. Il utilise l'analyseur de signaux HP 5423 comme mémoire numérique de capacité 512 points sur chacune de ses deux voies. Il suppose l'écoulement bidimensionnel et applique la méthode conventionnelle pour déterminer les profils des composantes radiale et tangentielle. A la

vitesse de rotation de la roue de 2 000 t/mn, ses résultats sont comparables à ceux que nous obtenons avec la technique de la sonde à un fil incliné dans la zone centrale des canaux.

c) Précision des résultats

La précision des résultats dépend des trois types de précisions suivantes :

* précision dans l'utilisation de la loi d'étalonnage du fil : elle dépend de la précision de l'opération d'étalonnage du fil chaud, et de son degré d'encrassement pendant les mesures.

* précision du dispositif de positionnement de la sonde : une erreur de positionnement de la sonde par rapport à l'axe de la roue peut intervenir, et influencer sur le calcul de l'angle Δ . Nous estimons la détermination de Δ meilleure qu'1 degré, et l'erreur est inférieure à 0,7 m/s sur le calcul de la composante radiale et à 0,4 m/s sur le calcul de la composante tangentielle.

* précision de l'utilisation de la technique de la sonde à un fil incliné et de la méthode conventionnelle ; elle dépend des facteurs suivants :

- nombre d'échantillons : nous avons utilisé 96 échantillons pour le calcul des moyennes périodiques des vitesses effectives de refroidissement. Dans la zone de sillage, l'intensité de fluctuation maximale de la vitesse effective de refroidissement est de 22 %. L'erreur commise, dans ce cas, sur le calcul de \tilde{V}_r est de 2,25 %. Dans la zone de jet, l'intensité maximale est de 10 % et l'erreur sur le calcul de \tilde{V}_r est de 1 %.
- équations linéarisées des vitesses effectives de refroidissement : pour appliquer ces équations, on suppose l'écoulement dirigé essentiellement suivant l'axe de la sonde d'une part, et les intensités de turbulence dans les trois directions inférieures à 25 % d'autre part.

Nous avons simulé sur ordinateur un champ de vitesse avec des intensités de turbulence nulles. Nous établissons les valeurs des vitesses effectives de refroidissement du fil avec des valeurs connues des trois composantes de la vitesse, et cherchons à retrouver ces composantes en effectuant la résolution du système des équations linéarisées.

A la limite du domaine d'utilisation de la sonde ($2\psi' = 53^\circ$), et dans le repère fixe lié à la sonde $oxyz$, l'erreur sur le calcul de la composante le long de l'axe (ox) est inférieure à 0,4 %. L'erreur sur les calculs des autres composantes sont plus importantes, et elle peut atteindre 6 % de la vraie valeur.

Pendant nos mesures, la direction de l'écoulement reste dans tous les cas dans un cône d'angle au sommet inférieur à 40° .

Il y a donc accumulation de plusieurs erreurs, lorsque la technique de la sonde à un fil incliné est utilisée en appliquant la méthode conventionnelle.

°
° °

CHAPITRE 8MESURES TRIDIMENSIONNELLESAVEC LA SONDÉ A TROIS FILS

Nous utilisons les désignations du paragraphe 2.4.3. et des figures 10 a et 10 b.

La méthode de mesure avec la sonde à trois fils consiste à enregistrer simultanément les réponses des trois fils qui donnent accès aux composantes instantanées de la vitesse. Nous développons cette méthode pour mesurer les composantes périodiques et les quantités de fluctuations dans le référentiel mobile lié à la roue.

8.1. Domaine d'utilisation de la sonde à trois fils

Chacun des trois fils de la sonde fait un angle de $54,74^\circ$ avec l'axe OX de la sonde et un plan formé par deux fils, forme un angle de $35,26^\circ$ avec cet axe. Lors de mesure avec cette sonde, l'écoulement doit être situé dans un cône de sommet O , d'axe OX et d'angle au sommet égal à $70,5^\circ$ pour éviter que l'un de ces fils ne vienne dans le sillage d'un autre.

8.2. Méthode de résolution

Nous désignons par V_1 , V_2 et V_3 les composantes instantanées de la vitesse dans le repère $oxyz$ lié aux fils. Les équations des vitesses

effectives de refroidissement des trois fils s'expriment en fonction de V_1 , V_2 et V_3 :

$$\begin{aligned}
 V_{r1}^2 &= k_1^2 V_1^2 + V_2^2 + h_1^2 V_3^2 \\
 V_{r2}^2 &= h_2^2 V_1^2 + k_2^2 V_2^2 + V_3^2 \\
 V_{r3}^2 &= V_1^2 + h_3^2 V_2^2 + k_3^2 V_3^2
 \end{aligned} \tag{119}$$

les indices de V_r , h et k renvoient au numéro du fil.

En utilisant l'écriture matricielle, on a :

$$\left\| \left\| V_{ri}^2 \right\| \right\| = M \left\| \left\| V_i^2 \right\| \right\| \tag{120}$$

avec

$$\left\| \left\| V_{ri}^2 \right\| \right\| = \begin{bmatrix} V_{r1}^2 \\ V_{r2}^2 \\ V_{r3}^2 \end{bmatrix} \quad \left\| \left\| V_i^2 \right\| \right\| = \begin{bmatrix} V_1^2 \\ V_2^2 \\ V_3^2 \end{bmatrix}$$

et la matrice M :

$$M = \begin{bmatrix} k_1^2 & 1 & h_1^2 \\ h_2^2 & k_2^2 & 1 \\ 1 & h_3^2 & k_3^2 \end{bmatrix}$$

Les composantes instantanées V_1 , V_2 et V_3 se déduisent de :

$$\left\| \left\| V_i^2 \right\| \right\| = M^{-1} \left\| \left\| V_{ri}^2 \right\| \right\|$$

M^{-1} est la matrice inverse de la matrice M .

Dans oxyz, les composantes V_1 , V_2 et V_3 sont négatives, d'où :

$$||V_i|| = - \left[M^{-1} ||V_i^*|| \right]^{1/2} \quad (121)$$

Le passage du repère oxyz lié aux fils vers le repère lié à la sonde s'effectue par la matrice :

$$[P] = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} \\ -1 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{2\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \quad (122)$$

Pendant nos mesures, le plan OXZ est perpendiculaire à l'axe de rotation de la roue et confondu avec le plan $(\vec{r}, \vec{\theta})$ du référentiel mobile et l'axe OX fait un angle Δ avec la direction tangentielle $(\vec{\theta})$ (FIG 45).

Le transfert du repère fixe OXYZ vers le référentiel mobile $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$ s'effectue par la matrice de passage :

$$[D] = \begin{bmatrix} -\sin\Delta & 0 & -\cos\Delta \\ -\cos\Delta & 0 & \sin\Delta \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (123)$$

Comme dans le cas de la sonde à un fil incliné; nous choisissons un angle Δ de l'ordre de α_2 pour que la direction supposée de l'écoulement soit suivant l'axe de la sonde.

Nous désignons par U_1 , U_2 et U_3 , les composantes instantanées de la vitesse dans le référentiel relatif $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$, \tilde{U}_1 , \tilde{U}_2 et \tilde{U}_3 les composantes périodiques et u_1 , u_2 et u_3 les quantités fluctuantes.

$$U_i(t) = \tilde{U}_i(t) + u_i(t) \quad i = 1, 2, 3$$

U_i se déduit de V_i de

$$\|U_i\| = [D][P] \|V_i\| \quad (124)$$

8.3. Acquisition des données et moyennes périodiques

Nous effectuons avec cette sonde des mesures du profil de la vitesse en utilisant l'échantillonnage interne au TR1030. Trois voies du TR1030 sont en fonction, divisées en 16 blocs chacun, et chaque voie enregistre un signal d'un des fils de la sonde. Après un signal de déclenchement, un bloc de chaque voie enregistre la réponse échantillonnée sur 256 points de fil correspondant avec une période d'échantillonnage Δt .

Ainsi au n -ième signal de déclenchement, les tensions $E_1(t)$, $E_2(t)$ et $E_3(t)$ des trois fils sont enregistrées simultanément dans le n -ième bloc des voies 1, 2 et 3 respectivement. L'instant $t = 0$ correspond au moment du déclenchement.

Dans un plan de mesure au point P dans le repère fixe, nous prenons trois mesures avec le TR1030. Ceci nous fait au total 48 blocs de 256 points sur chaque voie.

A l'instant $t = k \Delta t$, nous avons donc :

$$\tilde{E}_i(k \Delta t) = \tilde{E}_i(k \Delta t + nT)$$

$i = 1, 2, 3$: numéro du fil

$k = 0, 1, \dots, 255$

$n = 1 \text{ à } 48$

T : période de rotation de la roue.

Après la conversion des données, on effectue la résolution pour obtenir les composantes U_1 , U_2 et U_3 dans le référentiel mobile $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{z})$. A l'instant $t = k \Delta t$, nous avons :

$$\tilde{U}_j(k \Delta t) = \tilde{U}_j(k \Delta t + nT) \quad j = 1, 2, 3$$

Nous calculons les moyennes périodiques des composantes :

$$\tilde{U}_j(k \Delta t) = \frac{1}{48} \sum_{n=1}^{48} U_j(k \Delta t + nT)$$

les variances :

$$\tilde{u}_j^2(k \Delta t) = \frac{1}{48} \sum_{n=1}^{48} \left[U_j(k \Delta t + nt) - \tilde{U}_j(k \Delta t) \right]^2 \quad (125)$$

et les covariances :

$$\begin{aligned} \tilde{u}_j u_l(k \Delta t) &= \frac{1}{48} \sum_{n=1}^{48} \left[U_j(k \Delta t + nT) - \tilde{U}_j(k \Delta t) \right] * \\ & * \left[U_l(k \Delta t + nT) - \tilde{U}_l(k \Delta t) \right] \quad (126) \end{aligned}$$

$$J, l = 1, 2, 3$$

$$J \neq l$$

8.4. Profils des composantes de la vitesse

Nous effectuons les mesures de l'écoulement aube à aube, dans les mêmes plans (FIG 44) et à la sortie des mêmes canaux que dans le cas des mesures avec la sonde à un fil incliné. La vitesse de rotation de la roue est de 2 000 t/mn et la distance entre les fils de la sonde et l'axe de la roue est $R_3 = 333,3$ mm. La période d'échantillonnage interne Δt est de 23 μs et la distance entre deux points mesurés est $d = 1,6$ mm.

Les figures (55), (56), (57), (58), et (59) montrent les profils des composantes moyennes dans les référentiels liés à la roue dans les plans 1, 2, 3, 4 et 5 respectivement.

D'une façon générale, les allures des profils sont comparables à celles des profils obtenus au moyen de la sonde à un fil incliné.

La composante radiale prend des valeurs maximales dans le plan 3 au milieu des canaux. Ses variations sont plus importantes dans la zone centrale des canaux que dans les plans 1 et 5 près des flasques. Les zones de sillage et de jet sont bien marquées dans les plans 2, 3 et 4, et la zone de sillage semble être très atténuée dans les plans 1 et 5.

En moyenne, la vitesse débitante est plus importante vers le flasque avant dans le plan 5 et au milieu des canaux que dans les plans 2 et 4, et elle s'approche de la valeur calculée en considérant un écoulement à une dimension dans le plan 5. La figure (60a) montre l'évolution en moyenne de la vitesse débitante en fonction des plans en mesure.

La composante tangentielle admet les mêmes valeurs minimales dans tous les plans et prend ses valeurs maximales dans le plan 2. Sa variation diminue dans les autres plans et les variations les plus petites sont dans les plans 1 et 5.

Le profil de la composante tangentielle admet un minimum vers la face en pression suivi par un maximum dans la zone de sillage de la face en dépression de l'aubage. Dans un canal inter-aubes, le profil de la composante tangentielle évolue avec la structure de l'écoulement. Il est "pointu" lorsque la zone de sillage est petite et il "s'élargit" lorsque la zone de sillage devient plus importante.

Les valeurs de la composante tangentielle sont inférieures à ceux détectées avec la sonde à un fil incliné. En moyenne la composante tangentielle est plus importante dans les plans 3 et 4 que dans les autres plans et elle n'atteint pas la valeur calculée en considérant un écoulement à une dimension. La figure (60b) montre l'évolution en moyenne en fonction des plans de mesure.

Les valeurs de la composante axiale sont plus importantes que celles déterminées avec la technique de la sonde à un fil incliné, et dans la zone de jet, dans le plan 2, les composantes axiales et radiales sont du même ordre.

Dans le plan 1, la composante axiale est positive dans la majeure partie d'un canal inter-aubes, et elle est maximale vers la face en dépression. Elle diminue et devient négative à l'approche de la face en pression d'un aubage. Dans le plan 2, elle est strictement positive. Elle est minimale dans la zone de jet et augmente vers la face en pression et devient maximale dans la zone de sillage.

Dans le plan 3, la composante axiale est maximale à la fin de la zone de sillage. Elle diminue dans la zone de jet et devient négative avec un minimum à l'approche de la face en pression. Dans les plans 4 et 5, vers le flasque avant, elle est positive dans la zone de jet et maximale à l'approche de la face en pression. Elle diminue à l'endroit de l'aubage et devient négative dans la zone de sillage.

Les figures (61), (62), et (63) montrent les évolutions des profils des composantes radiale, tangentielle et axiale en fonction des plans de mesure.

8.5. Evaluation des contraintes de turbulence

Compte-tenu du nombre d'échantillons insuffisants (48 échantillons), nos résultats ne peuvent donner qu'une indication approximative sur les contraintes normales et les contraintes de cisaillement.

Nous avons tracé sur les figures (64), (65), (66), (67), et (68) les profils des intensités de turbulence $\sqrt{\tilde{u}_1^2}/\tilde{U}_1$ et $\sqrt{\tilde{u}_2^2}/\tilde{U}_2$ suivant les directions radiale et tangentielle dans les cinq plans.

Dans les cinq plans, l'intensité de turbulence suivant la direction tangentielle est inférieure à 10 % dans la majeure partie d'un canal inter-aubes. Elle augmente vers la face en pression de l'aubage et admet un maximum dans la zone de sillage qui peut atteindre 20 %.

L'intensité de turbulence suivant la direction radiale est plus importante et évolue avec la structure de l'écoulement. Elle prend des valeurs importantes dans la majeure partie d'un canal inter-aubes dans les plans 2, 3 et 4 où la zone de sillage est très marquée., et des valeurs petites dans la majeure partie du canal dans les plans 1 et 5 près des flasques où la zone de sillage est plus atténuée. Les valeurs minimales sont situées dans la zone de jet vers la face en pression d'un aubage et sont comprises entre 10 et 15 % pour les 5 plans. Elle prend des valeurs supérieures à 30 % dans la zone de sillage dans les plans 1, 2, 3 et 4 avec des pics à l'endroit des aubages.

Les quantités \tilde{u}_3^2 sont du même ordre de grandeur que les quantités \tilde{u}_1^2 , dans les 5 plans. \tilde{u}_3^2 est importante dans les zones de sillage et plus faible dans les zones de jet. Compte-tenu des petites valeurs des composantes axiales, l'intensité de turbulence suivant la direction axiale peut dépasser 100 %. La figure (69) montre le profil de \tilde{u}_3^2 comparé avec celui de \tilde{u}_1^2 dans le plan 3.

Nous avons tracé sur la figure (70) l'estimation des quantités :

$$100 * \frac{\tilde{u}_1 \tilde{u}_2}{\sqrt{\tilde{u}_1 \tilde{u}_2} * c} \quad (127)$$

$\tilde{u}_1 \tilde{u}_2$ sont les estimations de la contrainte de cisaillement dans le plan $(\vec{r} \vec{\theta})$ et c la projection de la vitesse absolue dans le plan $(\vec{r} \vec{\theta})$.

$$c = (\tilde{U}_1^2 + \tilde{U}_2^2)^{1/2} \quad (128)$$

On note des valeurs relativement plus importantes dans les zones de sillage que dans les zones de jet.

8.6. Précisions des résultats

La précision de ces résultats dépend des facteurs suivants :

a) précision des lois d'étalonnage des trois fils et du degré d'encrassement des fils. D'autre part, les fils n'étant pas exposés de la même façon à l'écoulement, le degré d'encrassement peut varier d'un fil à l'autre.

b) précision du dispositif de positionnement de la sonde. Nous estimons comme dans le cas de la sonde à un fil incliné, que l'erreur sur le calcul de la composante radiale instantanée est inférieure à 0,4 m/s et celle commise sur le calcul de la composante tangentielle instantanée est inférieure à 0,7 m/s.

c) erreurs dues à un nombre insuffisant d'échantillons : nous supposons que l'intensité de turbulence dans la direction radiale est inférieure à 35 % dans la zone de sillage et à 20 % dans la zone de jet. L'erreur commise sur le calcul de la composante moyenne avec 48 échantillons dans ces deux zones est respectivement inférieure à 5 % et 2,9 %. Dans le cas de la composante tangentielle, nous estimons à 2,9 % l'erreur commise sur le calcul de la moyenne avec 48 échantillons à l'endroit des aubages et à 1,4 % dans le reste du canal inter-aubes.

En conclusion, l'accumulation des erreurs est moindre dans le cas d'utilisation de la sonde à trois fils que dans celui de la sonde à un fil incliné, et les profils des composantes moyennes obtenus avec la méthode de mesure avec la sonde à trois fils sont sans doute les plus proches des profils réels.

o

o o

CHAPITRE 9COMPARAISON DES DEUX METHODES DE MESURE

Dans ce chapitre, nous vérifions la validité de nos mesures en calculant les estimations du débit volume et de la puissance indiquée avec les résultats obtenus par les deux techniques, et en les comparant

aux valeurs moyennes déterminées par la méthode du caisson réduit. Nous donnons ensuite nos observations sur l'emploi de chacune des deux techniques.

9.1. Calcul du débit volume et de la puissance indiquée

A notre point de fonctionnement à 2 000 t/mn, le débit volume et la puissance nette calculés par la méthode du caisson réduit sont respectivement de 2 m³/s et 5 937 W et la puissance sur l'arbre du ventilateur est de 7 355 W. Nous faisons un calcul approché du débit volume et de la puissance indiquée avec les résultats obtenus avec les deux sondes.

A une distance R_3 de l'axe de la roue, nous calculons un débit volume Q avec la relation :

$$Q = \frac{Z}{n_c} \sum_{m=1}^5 \left[\sum_{i=1}^{256} (\tilde{U}_{1i} \cdot d)_m \right] \Delta z_m \quad (129)$$

où $Z = 16$ nombre de canaux de la roue

n_c = nombre de canaux balayés

d = distance entre deux points mesurés dans un canal.

m = indice du plan de mesure

Δz_m = intervalles le long de la largeur de la roue (FIG 44)

avec

$$\Delta z_1 = \Delta z_5 = 15 \text{ mm}$$

$$\Delta z_2 = \Delta z_3 = \Delta z_4 = 10 \text{ mm}$$

Nous obtenons avec les résultats des mesures de la sonde à trois fils un débit de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (le même que celui donné par la méthode du caisson réduit) et $1,89 \text{ m}^3/\text{s}$ avec les résultats des mesures effectuées avec la sonde à un fil incliné.

Nous calculons la puissance indiquée avec :

$$P_i = \frac{Z}{n_c} \rho_a U_c \sum_{m=1}^5 \left[\sum_{i=1}^{256} (\widetilde{U_{1i} U_{2i}} \cdot d)_m \right] \Delta z_m \quad (130)$$

avec ρ_a : masse volumique de l'air
 U_c : vitesse circonférentielle

La puissance indiquée d'un ventilateur doit être comprise entre la puissance nette et la puissance sur l'arbre. Nous obtenons avec les résultats de la sonde à un fil incliné une puissance indiquée de 6 148 W, et avec les résultats de la sonde à trois fils 5 851 W. Cette dernière semble donc inacceptable, étant inférieure à la puissance nette.

Ces valeurs ne sont que des estimations de la puissance indiquée et du débit compte tenu du petit nombre de plans de mesure et des erreurs qui interviennent dans les calculs des composantes moyennes. D'autre part, nous avons effectué les mesures dans chaque plan à un seul point dans le repère fixe derrière la roue. Du fait de la présence de la volute, le profil de l'écoulement à la sortie d'un canal n'est sans doute pas le même à d'autres points dans le repère fixe, ce qui évidemment peut modifier les résultats de calcul des moyennes des vitesses dans un plan de mesure. Des mesures avec une sonde dans un canal, tournante avec la roue doivent donner plus de satisfaction à ce niveau.

Les ordres de grandeur trouvés sont néanmoins proches des valeurs moyennes du débit et de la puissance indiquée mesurées avec la méthode du caisson réduit, et ceci nous donne confiance sur la validité de nos mesures.

9.2. Discussion sur l'emploi des deux méthodes

La méthode de mesure avec la sonde à trois fils nous donne des estimations des contraintes de turbulence. Elles sont importantes dans la partie centrale des canaux (plans 2, 3 et 4) et petites vers les flasques (plans 1 et 5). Nous pouvons dès lors en déduire pour la sonde à fil incliné que la méthode conventionnelle est applicable aux mesures effectuées près des flasques alors qu'elle s'avère impropre pour la partie centrale des canaux. Remarquons d'autre part que l'évolution en moyenne de la composante radiale en fonction des plans de mesure, semble plus acceptable dans le cas de la sonde à trois fils (FIG 60a), que dans le cas de la sonde à un fil incliné (FIG 51a).

Il paraît en effet plus logique que la vitesse débitante admette un maximum dans le plan 3 situé au milieu des canaux.

CONCLUSION

Nous donnons ici nos observations sur l'emploi des deux sondes. La sonde à un fil incliné est d'un prix modique, de réparation facile, et ne nécessite qu'un seul étalonnage. Pour effectuer des mesures tridimensionnelles, un dispositif permettant la rotation de la sonde autour de son axe est nécessaire, et on mesure pratiquement le même point de l'écoulement avec différentes orientations de la sonde. Pour déterminer les différentes quantités, on utilise l'équation moyenne de la vitesse effective de refroidissement pour chaque orientation de la sonde et lorsque la détermination des contraintes de turbulence est souhaitable, on doit mesurer l'écoulement avec 6 orientations de la sonde.

La sonde à un fil incliné est généralement utilisée pour mesurer les écoulements à faibles intensités de turbulence et on applique la méthode conventionnelle. Des méthodes sont proposées par Acrivlellis [1] et Rodi [36] pour la mesure des écoulements à grandes amplitudes de fluctuation mais elles supposent néanmoins connue la direction de l'écoulement.

La sonde à trois fils est d'un prix très élevé et d'une grande fragilité. La réparation ne peut être réalisée que chez le constructeur et le prix de la réparation est de l'ordre du quart du prix de la sonde. Trois étalonnages sont nécessaires, et un dispositif spécial doit être prévu pour effectuer les opérations d'étalonnage et de détermination des caractéristiques directionnelles des fils. Les fils de la sonde sont distants l'un de l'autre, et on ne mesure pas l'écoulement au même point. Lorsqu'on utilise une technique d'échantillonnage, on peut effectuer des mesures simultanées avec les trois fils et en déduire les composantes instantanées de la vitesse. Il n'est pas nécessaire dans ce cas de prévoir un dispositif d'orientation de la sonde autour de son axe, et on peut déterminer pour la même orientation et un nombre d'échantillons suffisamment élevé, les composantes moyennes de la vitesse et les contraintes de turbulence dans un écoulement d'intensité de turbulence quelconque.

Nous avons rendu automatique la procédure d'enregistrement du signal par le TR1030, le transfert des données vers le calculateur et le stockage sur disque. Pour la sonde à un fil incliné, on intervient pour changer l'orientation de la sonde. Pour les deux sondes, notre temps de mesure pour le même nombre d'échantillons et la même période d'échantillonnage est comparable (de l'ordre de 10 mn pour 48 enregistrements de 256 points) et c'est le transfert des données du TR1030 vers le calculateur qui constitue la majeure partie de ce temps (55s pour le transfert de 4 096 échantillons d'une voie).

En conclusion, et compte-tenu de ce qui précède, le principal défaut de notre méthode d'utilisation de la sonde à un fil incliné est l'application aux mesures de la méthode conventionnelle. Il est donc

fortement avantageux de mettre au point une méthode de résolution adaptée aux écoulements de grandes amplitudes de fluctuation sans direction privilégiée dans la zone d'utilisation de la sonde.

o
o o

CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons développé une méthode d'étalonnage d'un fil chaud d'une sonde donnée, et nous avons montré la validité de l'emploi de la loi de King.

Nous avons également mis au point une technique de détermination des caractéristiques directionnelles d'un fil chaud. Nous avons noté que les facteurs k et h varient d'un fil à l'autre, et lorsque le fil est incliné de 45° (sonde à un fil incliné, sonde à deux fils croisés), il convient de calculer le facteur k avec les points expérimentaux relevés dans la zone d'utilisation de la sonde. Lorsque l'écoulement est situé dans la zone où le fil fait un angle de 45° avec une broche, le refroidissement du fil est plus important que lorsqu'il est situé dans la zone où le fil fait un angle de 135° avec l'autre broche.

On utilise les sondes à fil incliné (sonde à un ou deux fils) dans la première zone où on calcule un facteur k plus élevé que celui de l'autre zone.

On montre d'autre part l'influence des sillages aérodynamique et thermique sur les calculs des facteurs k et h des fils des sondes à deux fils croisés, et lors de mesures effectuées avec ce type de sonde il faut s'assurer que l'écoulement est proche d'un écoulement bidimensionnel pour éviter que l'un des fils ne vienne dans le sillage de l'autre.

Dans la seconde partie de notre travail, nous avons mis au point une procédure d'acquisition rapide des données et de traitement sur mini-calculateur des mesures tridimensionnelles effectuées avec une sonde à un

à un fil incliné et une sonde à trois fils en un point fixe à la sortie de la roue d'un ventilateur. Nous avons montré la parfaite adaptabilité de l'anémométrie à fil chaud à ce type de mesure.

Nous avons mis en évidence la répartition fortement tridimensionnelle de l'écoulement en sortie de roue, sa structure jet - sillage dans la zone centrale des canaux et l'influence des flasques avant et arrière sur l'atténuation des zones de sillage.

Nous avons montré enfin qu'il y a recoupement de nos mesures avec les caractéristiques globales du ventilateur et nous avons fait une comparaison entre nos deux méthodes.

Une utilisation systématique par déplacement du point de mesure dans la volute ou le diffuseur, devrait mettre en évidence la non-uniformité éventuelle de l'écoulement autour de la roue ; un déplacement radial de point de mesure devrait permettre de voir le degré d'amortissement du phénomène jet - sillage en vue de bien analyser les conditions d'entrée dans un diffuseur aubé, par exemple.

TRAVAUX A POURSUIVRE

- Développement d'une méthode de résolution applicable à la sonde à un fil incliné pour les écoulements à grandes amplitudes de fluctuation et sans direction privilégiée.
- Développement de techniques d'acquisitions conditionnelles des données lors de fonctionnement perturbé (décollement tournant par exemple)
- Comparaison des mesures en sortie de roue avec des mesures avec une sonde tournante embarquée dans la roue.
- Comparaison des répartitions des vitesses obtenues avec les répartitions calculées.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ACRIVLELLIS M.

Hot-wire measurements in flows of low and high turbulence intensity.

DISA Information n° 22, pages 15-20 - Décembre 1977.

[2] BAILLE A.

Lois de refroidissement des fils chauds aux faibles vitesses.

Bulletin de la direction des études et recherches,
Electricité de France, Série A n° 3 - 1973.

[3] BEARMAN P.W.

Corrections for effect of ambient temperature drift on hot-wire measurements in incompressible flow.

DISA Information n° 11, pages 25-30 - Mai 1971.

[4] BEGUIER C.

Interaction entre les fils d'une sonde anémométrique à fils croisés.

C.R. Acord. sc. Paris Tome 271 n° 7 Série A, pages 392-395
Août 1970.

[5] BALJAARS A.C.M.

Dynamic behavior of the constant temperature anemometer due to the thermal inertia of the wire.

Appl. Sci. Res. 32, pages 509-518 - 1976.

[6] BETCHOV R.

Théorie non-linéaire de l'anémomètre à fil chaud.

Proceeding koninklijke nederlandse akademie.

Van Wetenschappen vol. 52 n°3 - 1949.

[7] BRUUN H.H.

Multiprobes and higher moments.

Proceedings of the dynamic flow conference 1978 on
dynamic measurements in unsteady flows pages 427-463.

[8] CAIGNAERT G.

Analyse du décollement tournant dans une roue de turbo-machine.

Journée d'études : analyse du signal en mécanique
ENSAM de LILLE - Novembre 1980.

[9] CHAMPAGNE F.H.

The temperature sensitivity of hot wires. Proceeding of
dyn. flow conf. 1978, pages 101-114.

[10] CHAMPAGNE F.H., SLEICHER C.A. et WEHRMAN O.H.

Turbulence measurements with inclined hot wires ; Part. 1
heat transfer experiments with inclined hot-wire.

J. Fluid. Mech. Vol. 28, Pt 1 pages 153-175 - 1967.

[11] COLLIS D.C. et WILLIAMS M.J.

Two dimensional convection from heated wires at low reynolds
number.

J. FLUID. Mech., 6, pages 357-384 - 1959.

[12] COMTE-BELLOT G.

The hot-wire and the hot film anemometers.

Von Karman institute - lecture serie 73

Meas. of unsteady fluid dynamic phenomena.

Janvier 27-31 - 1975.

[13] CORRSIN S.

Turbulence : experimental methods.

Handbuch der physic 8/2 (523-590) spinger varlag
Berlin 1963.

[14] DESMET B.

Mesures de pressions et de vitesses dans un ventilateur cen-
trifuge avant et après l'appartion et la disposition des dé-
collement tournants.

Article à paraître dans la Houille Blanche n°2/3 - 1982.

[15] DISA

Documents de l'anémomètre 55 M.

- [16] FREYMUTH P.
Feedback central theory for constant temperature hot-wire anemometers.
The review of scientific instruments. Vol 38 n°5
pages 677.681 - Mai 1967.
- [17] FREYMUTH P.
Engineering estimate of heat conduction loss in constant temperature thermal sensors.
TSI Quarterly vol V, issue 3 - Août/Septembre 1979.
- [18] GAULIER C.
Measurement of air velocity by means of a triple hot-wire probe.
DISA Information n° 21, pages 16-20 - Avril 1977.
- [19] GORTON C.A. et LAKSHMINARAYANA A.
A method of measuring the three dimensionnal mean flow and turbulence quantities inside a rotating turbo-machinery passage.
Journal of eng. for power vol. 98, series A, n° 2
pages 137.146 - Avril 1976.
- [20] GOULAS A. et BAKER R.C.
Hot wire measurements at the exit of a centrifugal compressor impeller.
Proceeding of the institution of mechanical engeneers.
Vol. 193, pages 341-347 - Septembre 1979.
- [21] HINZE J.O
Turbulence 2e édition
Mc Graw-Hill 1975.
- [22] HIRSCH Ch et KOOL. P
Measurement of the three-dimensionnal flow field behind an axial compressor stage.
J. of Eng. for power, Vol. 99, series A, n° 2
pages 168.180 - Avril 1977.

- [23] HUFFMAN G.D
Calibration of triaxial hot-wire probes using a numerical search algorithm.
J. Phys - E : Sci. instrum.
Vol. 13, pages 1177.1182 - Novembre 1980.
- [24] JØRGENSEN F.E.
Directional sensitivity of wire and fiber-film probes. An experimental study.
DISA Information n° 11, pages 31.37 - Mai 1971.
- [25] KING L.V.
Phil. Trans. Roy. soc. London
214 A, 373 (1914)
- [26] KORGANOFF A.
Méthodes de calcul numérique.
Tome 1, DUNOD - 1961.
- [27] KRONAUER R.E.
Pratt and whitney res-report n° 137 - 1953.
- [28] LAKSHMINARAYANA B.
Techniques for aeraudynamic and turbulence measurements in turbomachinery rotors.
J. of Eng. for Power, Vol. 103, pages 384.392 - Avril 1981.
- [29] LAKSHMINARAYANA B.
Three sensor hot wire/film technique for three dimensionnal mean and turbulence flow field measurement.
TSI Quarterly vol. VIII, Issue 1 - JANVIER MARS 1982.
- [30] LARGUIER R. et DE SIVERS A.
Méthodes de mesures instationnaires dans les turbomachines.
L'aéronautique et l'astronautique n° 4 6,
pages 9.18 - 1974.3.
- [31] OKA S. et KOSTIC Z.
Influence of wall proximity on hot-wire velocity measurements
DISA Information n° 13, pages 29.33 - Mai 1972.

- [32] OKIISHI H. et SCHMIDT D.P.
Measurement of the periodic variation of turbomachine flow fields.
Proceeding of D.F.C. 1978, pages 249.269.
- [33] OLIVARI D. et BORRES R.
Theory and design of a constant temperature linearized hot wire anemometer.
Von Karman institute technical memorandum 24, Octobre 1974
- [34] RAJ A. et LAKSHMINARAYANA B.
Three dimensional characteristics of turbulent wakes behind rotors of axial flow turbomachinery.
J. of eng. for power vol. 98, series A, n°2
pages 218.228, Avril 1976
- [35] RODI W.
The prediction of turbulent boundary layers by use of two equation model of turbulence.
Ph. D. Thesis ; university of London - 1973.
- [36] RODI W.
A new method of analysing hot-wire signals in highly turbulent flow, and its evaluation in a round jet.
DISA Information n° 17, pages 9.19 - Février 1975.
- [37] STEVENAERT P.
Etude expérimentale de l'écoulement dans un ventilateur centrifuge.
Mémoire de diplôme d'ingénieur.
Centre régional du CNAM de LILLE - Juillet 1981.
- [38] SUZUKI, UGAI et HARRADA.
Noise characteristics in partial discharge of centrifugal fans.
Bull. J.S.M.E., Vol. 21, n° 154, pages 689.696
Avril 1978.
- [39] TILLNER W.
Hitzdraht und Heißfilmanemometrie anwendungsmöglichkeiten in kleingebäudebau.
Feinwerktechnik et messtechnik 88, pages 195.198 (1980)4

[40] ISI

Hot-film and hot wire anemometry
Theory and application Technical bulletin 5

[41] ISI

Temperature compensation of thermal sensors.
Technical bulletin 16.

ANNEXE 1

Détermination des coefficients de la relation de KING.

L'expérience donne le tableau des valeurs (U_i, E_i) que nous supposons liées par la relation de King $E^2 = E_0^2 + BU^A$

Nous déterminons les coefficients suivant le critère des moindres carrés. Compte tenu de l'exposant A, nous décomposons la relation de King de la manière suivante :

$$Y = E^2 - E_0^2$$

$$X = U$$

$$\text{d'où } Y = BX^A$$

Nous cherchons le minimum de l'écart quadratique :

$$S(A, B, X_i) = \sum_{i=1}^N \left[\ln Y_i - (\ln B + A \ln X_i) \right]^2$$

$$\text{Il faut avoir } \frac{\partial S}{\partial A} = 0 \text{ et } \frac{\partial S}{\partial B} = 0$$

Pour la simplification de l'écriture, nous posons :

$$S_1 = \sum_{i=1}^N \ln X_i \quad S_2 = \sum_{i=1}^N (\ln X_i)^2 \quad S_3 = \sum_{i=1}^N (\ln Y_i)$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^N (\ln Y_i)^2 \quad S_5 = \sum_{i=1}^N (\ln Y_i \ln X_i)$$

$$\text{et, } R_1 = N S_2 - S_1^2 \quad R_2 = N S_4 - S_3^2 \quad R_3 = N S_5 - S_1 S_3$$

Il vient, tous calculs faits :

$$A = \frac{R_3}{R_1} \quad B = \exp \left[(S_3 - A S_1) / N \right]$$

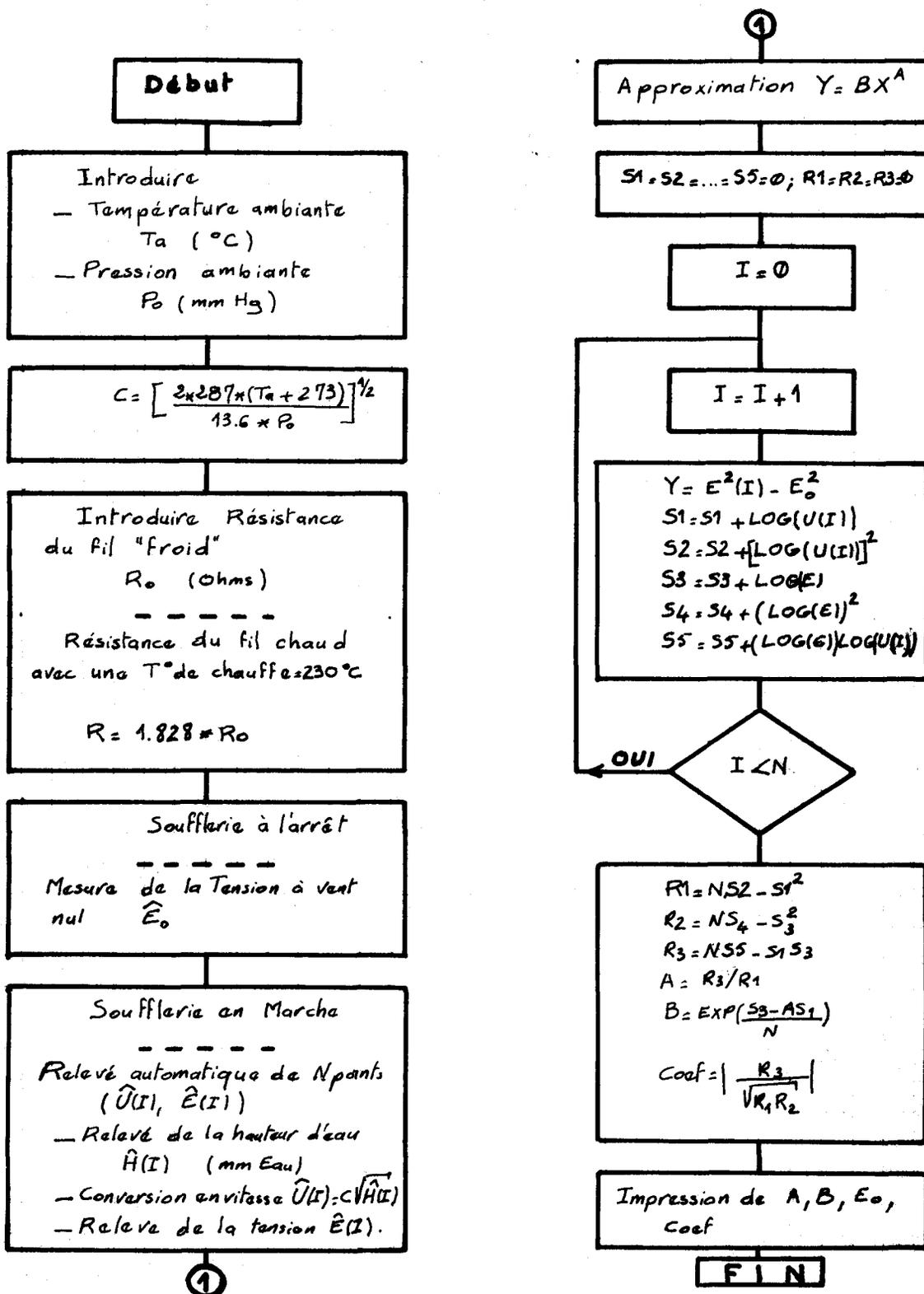
Il faut s'assurer de la validité statistique du calcul en calculant le coefficient de corrélation R, défini par :

$$R = \left| \frac{R_3}{\sqrt{R_1 R_2}} \right|$$

o

o . o

ORGANIGRAMME DU PROGRAMME D'ETALONNAGE



ANNEXE 2

Application du critère des moindres carrés pour la détermination des caractéristiques directionnelles des sondes.

A une vitesse U fixée, nous relevons les points $(\alpha_{mi}, \hat{V}_{ri})$ pour la détermination du facteur k et les points $(\theta_{mi}, \hat{V}_{ri})$ pour la détermination du facteur h . α_{mi} et θ_{mi} sont les angles mesurés sur le rapporteur, et ils contiennent les déviations α_o et θ_o tenant compte des défauts de positionnement du fil par rapport à la direction de l'écoulement :

$$\alpha_{mi} = \alpha_i + \alpha_o$$

$$\theta_{mi} = \theta_i + \theta_o$$

Nous appliquons le critère des moindres carrés en supposant que les points (α_i, \hat{V}_{ri}) sont approximés par une courbe de fonction :

$$V_R = U (\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha)^{1/2} \quad \text{si} \quad \theta = 0$$

et les points (θ_i, \hat{V}_{ri}) sont approximés par une courbe de fonction :

$$V_R = U (A\cos^2\theta + h^2\sin^2\theta)^{1/2}$$

ou $A = \cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha$

avec α fixé = 0° dans le cas d'une sonde à fil droit,

et α fixé = 45° dans le cas d'une sonde à fil incliné

(P12, P61, P64)

— Approximation par une courbe de fonction :

$$V = U (A \cos^2 x + C^2 \sin^2 x)^{1/2}$$

Nous appelons $x_{mi} = x_i + x_0$ les angles relevés sur le rapporteur et V_i les vitesses effectives de refroidissement. Nous appliquons la méthode des moindres carrés pour calculer le facteur C , la déviation x_0 et la vitesse fixée U .

On considère l'écart quadratique :

$$S(U, x_0, C) = \sum_{i=1}^N \left[V_i^2 - U^2 (\cos^2(x_{mi} - x_0) + C^2 \sin^2(x_{mi} - x_0)) \right]^2$$

On cherche les valeurs de C , x_0 et U qui minimisent $S(U, x_0, C)$. Il faut avoir :

$$\frac{\partial S}{\partial C^2} = 0 \quad \frac{\partial S}{\partial U^2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial S}{\partial x_0} = 0$$

La déviation x_0 n'excède pas 10° : nous pouvons donc faire l'approximation du premier ordre

$$\sin x_0 \approx x_0$$

Nous posons, pour la simplification de l'écriture :

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{i=1}^N \sin 2x_{mi} & S_2 &= \sum_{i=1}^N \cos 2x_{mi} & S_3 &= \sum_{i=1}^N \sin x_{mi} \sin^2 x_{mi} \\ S_4 &= \sum_{i=1}^N \cos 2x_{mi} \sin^2 x_{mi} & S_5 &= \sum_{i=1}^N \sin^2 x_{mi} & S_6 &= \sum_{i=1}^N \sin^2 2x_{mi} \\ S_7 &= \sum_{i=1}^N \sin^4 x_{mi} & S_8 &= \sum_{i=1}^N V_i^2 \sin 2x_{mi} & S_9 &= \sum_{i=1}^N V_i^2 \cos 2x_{mi} \\ S_{10} &= \sum_{i=1}^N V_i^2 \sin^2 x_{mi} & S_{11} &= \sum_{i=1}^N V_i^2 & S_{12} &= \sum_{i=1}^N V_i^4 \end{aligned}$$

$$\text{et } P_1 = N (S_3 S_{10} - S_7 S_8) + S_5 (S_5 S_8 - S_1 S_{10}) + S_{11} (S_1 S_7 - S_3 S_5)$$

$$P_2 = N (2S_7 S_9 - 2S_4 S_{10} + S_3 S_8 - S_6 S_{10}) - 2S_5 (S_2 S_{10} - S_5 S_9)$$

$$P_3 = S_{11} (2S_4 S_5 - 2S_2 S_7 + S_5 S_6 - S_1 S_3) + S_1 (S_1 S_{10} - S_5 S_8)$$

On obtient tous calculs faits :

$$x_0 = P_1 / (P_2 + P_3) \quad (\text{radians})$$

$$C^2 = A(1 - (NS_8 + S_4 * S_{11}) / (S_5 * S_8 - S_3 * S_{11}))$$

$$U^2 = S_{11} / [AN - (A - C^2) S_5]$$

N étant le nombre total de points.

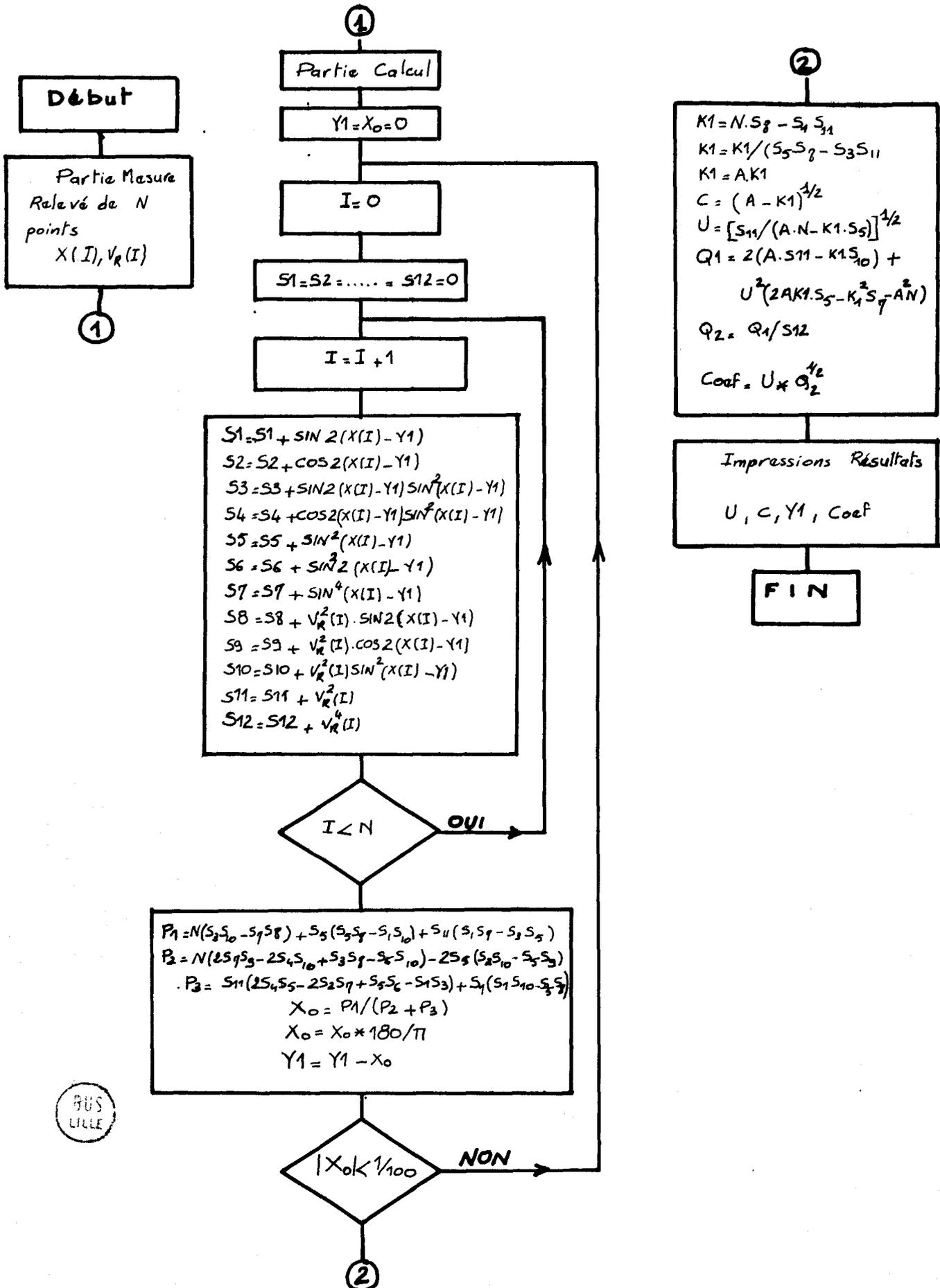
Nous nous assurons de la validité statistique du calcul en définissant un coefficient de corrélation R tel que :

$$S(U, X_0, C) = \sum_{i=1}^N V_i^4 (1-R^2)$$

$$\text{Alors } R^2 = \frac{U^2}{S_{12}} \left[2(S_{11}A - (A-C^2)S_{10}) + U^2(2A(A-C^2)S_5 - (A-C^2)^2 S_7 - \hat{A}N) \right]$$

o
o o

ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE DETERMINATION DES FACTEURS h ET k



ANNEXE 3

Echantillonnage et moyenne périodiques

La détermination du champs de l'écoulement à la sortie d'une roue tournante au moyen d'une sonde fixe requiert l'emploi d'une technique d'échantillonnage périodique du signal.

On peut effectuer deux sortes de moyennes d'une fonction arbitraire $g(t)$:

La première est la moyenne temporelle classique :

$$\bar{g} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt$$

et la seconde est la moyenne périodique définie par :

$$g(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N g(t + mT)$$

où T est la période et N un entier.

Soit maintenant un signal $S(t)$ composé d'une partie continue \bar{P} , d'une partie strictement périodique $p(t)$ de moyenne nulle et d'une partie aléatoire $n(t)$ due aux bruits ou aux fluctuations.

$$S(t) = \bar{P} + p(t) + n(t)$$

La composante périodique doit satisfaire à la condition

$$p(t) = p(t + mT) \quad \forall m$$

Les moyennes temporelles des trois composantes s'écrivent

$$\bar{p}(t) = \bar{n}(t) = 0 \quad \bar{S}(t) = \bar{P}$$

La moyenne temporelle ne reproduit pas la composante périodique $P(t)$. On utilise alors la moyenne périodique des échantillons obtenus à partir de l'échantillonnage périodique du signal $S(t)$ avec une période T :

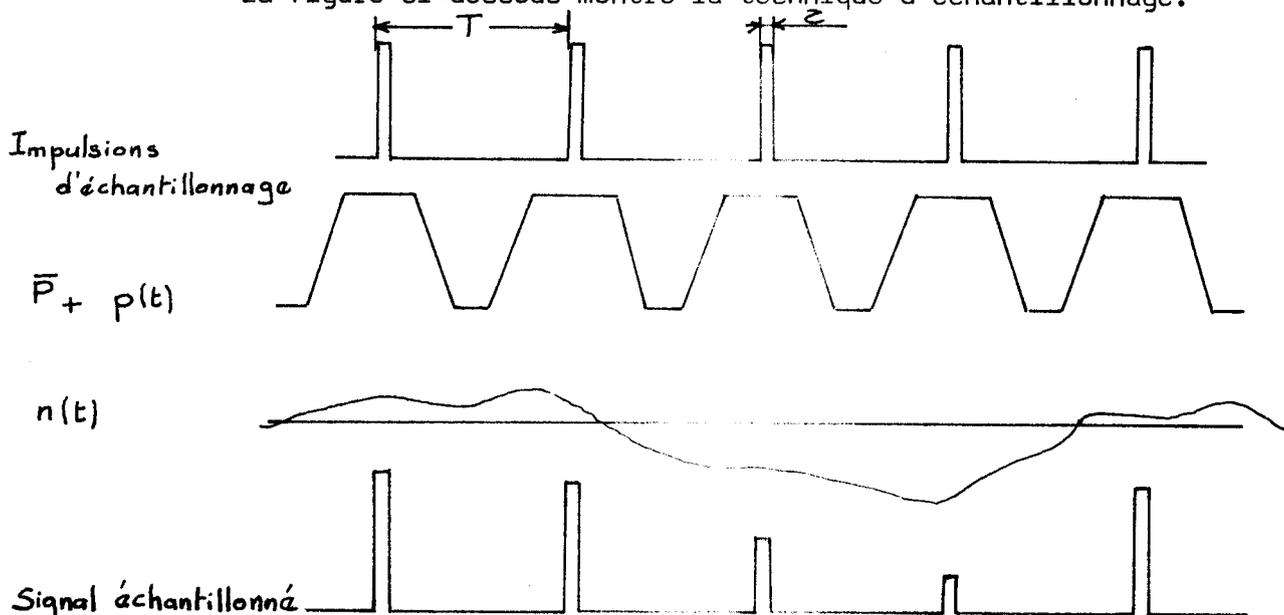
$$S(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N S(t+mT)$$

Pour $N \rightarrow \infty$, la moyenne périodique de la composante aléatoire est nulle

$$\limite \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N n(t+mT) = 0$$

$$\text{et } S(t) = \bar{P} + p(t)$$

La figure ci-dessous montre la technique d'échantillonnage.



Le signal $S(t)$ est échantillonné pendant une durée brève z à une fréquence d'échantillonnage $F_e = \frac{1}{T}$. Les échantillons de la composante périodique s'additionnent de façon cohérente tandis que les échantillons de la partie aléatoire s'additionnent de façon non-cohérente.

La valeur moyenne de N échantillons de la partie aléatoire est elle-même une variable aléatoire distribuée autour de la valeur moyenne du bruit considérée nulle lorsque $N \rightarrow \infty$.

Soit $U(t)$ une vitesse instantanée, $\tilde{U}(t)$ sa moyenne périodique et $n(t)$ la composante fluctuante.

La précision de la moyenne périodique $\tilde{U}(t)$ dépend largement du nombre d'échantillons N , et l'erreur commise sur son calcul lorsque le nombre N est limité, est donnée par l'expression (Lakshminarayana [29], Hirsch et Kool [22]) :

$$E \left[\frac{(\tilde{U} - \tilde{U}_\infty)^2}{\tilde{U}_\infty^2} \right] = \varepsilon_1 = \frac{I}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

\tilde{U} est calculée avec N échantillons, \tilde{U}_∞ est la moyenne vraie supposée existante lorsque N tend vers l'infini et I l'intensité de turbulence.

Ainsi pour une intensité de fluctuation de 10 % et $N = 120$ l'erreur sur l'estimation de la moyenne est inférieure à 1 %.

On calcule une moyenne périodique de la variance de la quantité fluctuante :

$$\tilde{u}^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [U(t+mT) - \tilde{U}(t)]^2$$

En supposant que la densité de probabilité de la vitesse est gaussienne, l'erreur commise sur le calcul de l'intensité de turbulence I tel que

$$I = \frac{\sqrt{\tilde{u}^2}}{\tilde{U}}$$

est donnée par l'expression (Lakshminarayana [29])

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{2}{N}} \quad (2)$$

Ainsi en fixant une précision $\varepsilon_2 = 1\%$ sur le calcul de l'intensité de turbulence, il faut avoir $N = 20\,000$ échantillons.

ANNEXE 4*Communications sur le système HP-IB*

1 - APERÇU SUR LE SYSTEME HP-IB

Un système d'interface est généralement destiné à relier un ordinateur (contrôleur du bus) à un ou plusieurs appareils en vue d'échanges d'informations entre ordinateurs et appareils ou appareils entre eux.

L'interface est construit dans l'appareil et il est constitué de câbles passifs et de circuits d'entrée/sortie numériques. La liaison entre deux interfaces de deux appareils munis du même interface est effectuée au moyen d'un câble constitué d'un faisceau de lignes appelées lignes de bus.

Nous donnons dans ce qui suit un aperçu sur le système d'interface HP-IB conçu suivant la norme IEEE 488-1975.

Ce type de système présente l'avantage de connecter jusqu'à 15 appareils permettant ainsi un contrôle total des appareils et des transferts rapides des données.

La figure 71 montre un exemple de connexions des appareils sur le HP-IB.

1.1 Lignes de bus.

Le bus est constitué de 16 lignes de signaux actives classées en trois groupes suivant leurs fonctions (Fig. 71).

Huit de ces lignes sont désignées comme étant les lignes de données. Elles sont utilisées pour transférer les données, les adresses des appareils et les informations sur les états des appareils reliés aux bus. Les données sont transférées sous forme numérique d'un mot de 8 bits (octet) codé ASCII, en une donnée à la fois, c'est-à-dire mots en série et bits en parallèle.

Le transfert des données est contrôlé par trois lignes appelées lignes de transfert. On appelle *handshake* la séquence des opérations que remplissent ces trois lignes lorsqu'une donnée est transférée d'un appareil à un autre. Les appareils utilisent la technique du *handshake* verrouillé pour un transfert asynchrone des données à la vitesse de l'appareil le plus lent.

Les cinq lignes restantes sont les lignes de contrôle. Elles gouvernent l'écoulement de l'information sur les lignes de données et les lignes de transfert.

Les appareils connectés aux lignes des bus du HP-IB sont classés en trois catégories :

- contrôleur : c'est un appareil capable de contrôler la communication sur le HP-IB. Il définit l'opération à effectuer en désignant l'appareil qui émet la donnée et l'appareil qui la reçoit. Il peut donc envoyer les adresses des appareils et des mots de commande.

- récepteur : c'est un appareil capable de recevoir une donnée du bus lorsqu'il est adressé, et après réception d'un mot de commande pour recevoir la donnée.

- émetteur : c'est un appareil capable d'envoyer une donnée sur le bus lorsqu'il est adressé et après réception d'un mot de commande pour envoyer la donnée.

Sur le système HP-IB, le contrôleur est généralement un calculateur. Un seul appareil peut être émetteur actif à la fois sur le système HP-IB et jusqu'à 14 appareils peuvent être simultanément récepteurs. Un appareil peut être alternativement émetteur et récepteur.

1.2 Adressage.

Pour transférer un message d'un appareil à un autre, on désigne l'appareil émetteur et les appareils récepteurs. Chaque appareil doit donc avoir sa propre adresse qui le distingue des autres appareils. Un appareil reçoit les instructions d'un programme lorsqu'il

est désigné pour recevoir.

Lorsqu'il est désigné pour émettre, un appareil peut sortir des données de mesure ou encore sortir les instructions d'un programme lorsqu'il est contrôleur (calculateur).

Les appareils sont généralement munis de 5 commutateurs pour le choix de leurs adresses, soit pour chaque appareil 31 choix possibles d'adresse de 0 à 30 en code décimal.

1.3 Demande de service (service request).

La notion de "demande de service" est liée à la notion d'"interruption" du calculateur. Nous parlons du mode "Interruption" dans le paragraphe suivant.

Un appareil peut avoir la capacité de demander une interaction avec le contrôleur, et ceci pour une variété de raisons. Un appareil demande le service lorsqu'il a fini une mesure, lorsqu'il est en saturation lors de la prise d'une mesure, etc... Le contrôleur localise l'appareil qui a émis la demande et détermine s'il faut ou non répondre à sa demande. La localisation s'effectue par la méthode de recherche en parallèle ou la méthode de recherche en série.

- Recherche en série. (serial poll).

Cette méthode consiste à obtenir de chaque appareil un octet unique (8 bits) appelé mot d'état (status byte). Le bit 6 du mot d'état indique si l'appareil a demandé le service et les autres bits indiquent l'état de l'appareil.

En exemple on trouvera dans le paragraphe suivant la signification du mot d'état du Transiscope TR 1030.

C'est cette méthode de localisation que nous utilisons dans la mise au point de notre programme de transfert des données entre le TR 1030 et le calculateur.

- Recherche en parallèle (parallel poll).

Cette méthode consiste à obtenir simultanément une information d'un groupe d'appareils. En réponse à une recherche en parallèle, chaque appareil envoie un bit unique d'état sur une ligne de donnée, permettant la localisation parmi un groupe de 8

appareils au maximum de celui qui a émis la demande de service. Il faut ensuite faire une lecture du mot d'état de l'appareil concerné pour déterminer la cause de l'envoi d'une demande de service.

2 - COMMUNICATIONS ENTRE LE HP 9835 A ET LE TR 1030.

Sur notre système HP-IB, le calculateur HP 9835 A est l'appareil contrôleur, et le Transiscope DIFA TR 1030 est d'une part un appareil récepteur lorsqu'il reçoit les informations du calculateur pour la programmation de ses paramètres et pour le démarrage d'un enregistrement, et d'autre part un appareil émetteur lorsqu'il sort les données de mesure vers le calculateur.

Nous avons rencu les opérations de mesure automatiques pour optimiser le temps de mesure et ne pas subir un milieu bruyant trop longtemps. Pour cela, nous avons programmé le calculateur pour fonctionner en mode d'interruption, et nous utilisons les valeurs du mot d'état du TR 1030.

2.1 Calculateur en mode d'interruption.

Ce mode donne au calculateur la capacité d'interrompre le déroulement normal du programme pour se brancher à un autre endroit du programme déjà spécifié.

L'interruption est fournie par la carte d'interface HP-IB enfichée dans le calculateur. Cette interruption est programmable pour avoir lieu à l'une des conditions suivantes du mot d'état de la carte HP-IB :

:	:	:
: BIT 7=1 :	Demande de service	:
: BIT 6=1 :	Contrôleur actif	:
: BIT 5=1 :	Emetteur actif	:
: BIT 4=1 :	Recepteur actif	:
: BIT 3=1 :	Registre d'entrée plein	:
: BIT 2=1 :	Registre de sortie vide	:
: BIT 1=1 :	autres causes d'interruption	:
: BIT 0 :		:

La carte interface HP-IB peut être programmée par exemple, pour fournir une interruption lorsqu'elle reçoit un signal SRQ (bit 7 = 1), lorsque son registre d'entrée est plein (bit 3 = 1)...

Généralement, le calculateur est le contrôleur actif, et seule la condition d'interruption (demande de service) est utilisée. Dans ce cas, il y a interruption lorsque le mot d'état de la carte HP-IB est égal à 128 (2^7).

2.2 Mot d'état du TR 1030.

Après une recherche en série, le calculateur lit le mot d'état du TR 10.30. Les bits composant cet octet ont la signification suivante :

:	:	:	:	:	:	:	:	:
: BIT 7	: BIT 6	: BIT 5	: BIT 4	: BIT 3	: BIT 2	: BIT 1	: BIT 0	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:
: OV.	: SRQ	: BUSY	: OR	: EO	: ER	: E1	: E0	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:

Bits 0 et 1 : ils renseignent sur le type d'une erreur commise pendant l'insertion d'ordres de données.

Bit 2 (ER) : ce bit est placé à la fin d'un enregistrement.

Bit 3 (EO) - ce bit est placé à la fin d'une sortie.

Bit 4 (OR) - demande de sortie - ce bit indique que le TR 1030 désire extraire des données via le bus.

Bit 5 (BUSY) - ce bit est placé au cours d'une fonction d'entrée ou de sortie.

Bit 6 (SRQ) - ce bit est placé lorsque l'appareil émet une demande de service au contrôleur.

Bit 7 (OV) - saturation - ce bit est placé lorsqu'un enregistrement est saturé.

Le TR 1030 peut être programmé pour envoyer un SRQ (Bit 6 = 1) à la fin d'un enregistrement, à la fin d'une sortie, ou à la fin d'une saturation.

A la suite d'une recherche en série, la valeur du mot d'état est affectée dans notre programmation à une variable S.

Nous utilisons les valeurs suivantes de S :

S = 4 (Bit 2 = 1) : fin d'enregistrement

S = 68 (Bit 6 = 1, Bit 2 = 1) : fin d'enregistrement
avec signal SRQ

S = 32 (Bit 5 = 1) le TR 1030 est en état occupé :
enregistrement ou sortie des données.

S \geq 128 (Bit 7 = 1, ...) : enregistrement saturé.

S = 160 (Bit 7 = 1, Bit 5 = 1) : état occupé avec sa-
turation d'un enregistrement.

Pour la compréhension du système HP-IB, et la mise au point
de nos programmes, nous avons utilisé les documents des constructeurs :

- Documents du calculateur HP 9835 A : Extended I/O ROM
- Document de la carte interface : Hewlett-Packard 98034
A HP-IB INTERFACE - Installation and service manual.
- Documents de l'analyseur HP 5423 A : utilisation sur le
HP-IB.
- Document d'utilisation du Transiscope DIFA TR 1030.

o

o o

PROGRAMME D'ACQUISITION DES DONNÉES

CALCULATEUR HP9835A ET TRANSISCOPE DIFATR1030
 CONNECTÉS SUR LE SYSTEME D'INTERFACE HP-IB
 - Echantillonnage Interne -

Position du point de mesure P

$$L_r = 529,2 \text{ (mm)}$$

$$T_{et} = 32,7 \text{ (Degrés)}$$

$$E_r = 22 \text{ (mm)}$$

$$X_r = L_r * \cos(T_{et})$$

$$Y_r = L_r * \sin(T_{et})$$

Introduire :

- Longueur de la tige
 Tige (mm)

- Rayon R_3 (mm)
 $R_3 > 325 \text{ mm}$

R_3 : Distance entre le point de mesure P
 et l'axe de la roue dans le plan de la roue

$$L = (Tige^2 + E_r^2)^{1/2}$$

$$Phi_2 = \frac{L_r * L_r + L * L - R_3 * R_3}{2 * (L_r * L)}$$

$$Phi_2 = \text{ArcSin}(Phi_2) - T_{et}$$

$$Phi_1 = Phi_2 - \text{ATN}(E_r / Tige)$$

$$Psi = \text{ATN}\left(\frac{L * \cos(Phi_2) - Y_r}{X_r - L * \sin(Phi_2)}\right)$$

$$Delta = Phi_2 - Psi$$

Impression des résultats

Effectuer une rotation
 du rapporteur d'un angle
 de Phi_1

①



$Phi_1 = 0$ correspond à la position
 verticale de l'axe de la sonde

Calcul de la période d'échantillonnage

①

Introduire :

- Vitesse de rotation de la roue Ntours (1/mn)
- Nombre de canaux à balayer Ncanaux (1 à 16)
- Rayon R₃ (> 325mm)

$$Par = 1 + \frac{Ncanaux \times 10^6 \times 15}{1020 \times Ntours}$$

$$Par = \text{Arrondi de } (Par)$$

$$Ncanaux = \frac{4020 \times Ntours \times 10^{-6}}{15}$$

$$Dd = Ncanaux \times \pi \times R_3 / 2040$$

Impressions des Résultats

TR 1030 en état Télécommandé

Introduction des paramètres :

- Voies divisées en 16 blocs
- Période d'échantillonnage
- interne = Par
- Conditions de déclenchement
- Filtrage antirapportement en
- marche
- Etc...

Réglaqe automatique des amplitudes des voies en fonction amplitudes

Introduire les estimations des amplitudes

Branchement sur SS. Program. me. Réglaqe

②

BUS LITTE

Programmation des paramètres du TR 1030

Ncanaux : Nouveaux nombre de canaux

Dd : Distance en mm entre deux points mesurés le long de la circonférence d'une roue fichée de ϕ 2.R3.

Mesures

②

Introduire le nombre d'échantillons pour un point
 $N_{moy} (16, 32, 48, \dots)$

$N_{mas} = N_{moy} / 16$

Interruption fournie par la carte de l'interface HP-IB (Code 7)

Branchement au sous-Programme Srq à l'évènement d'une interruption

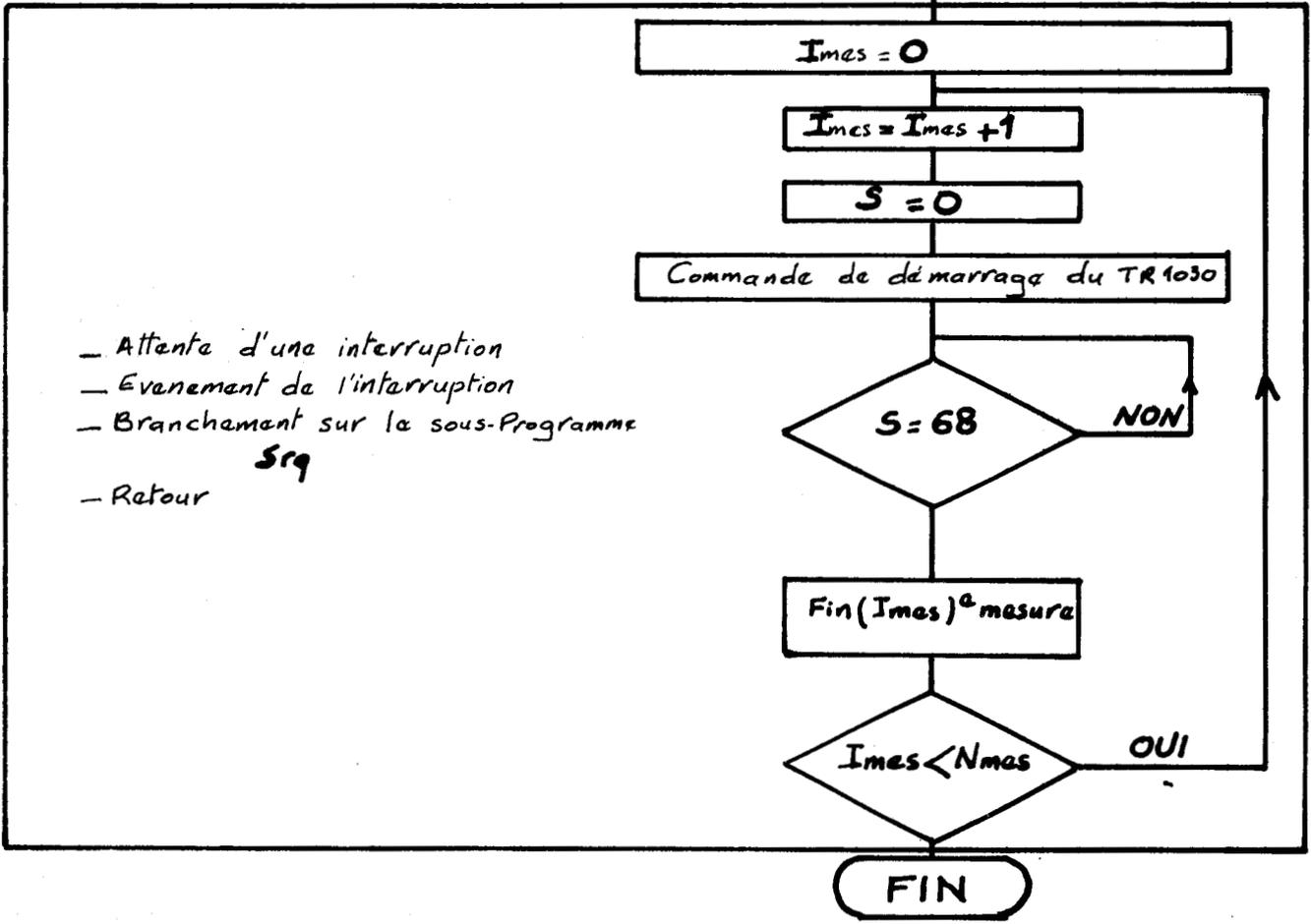
Condition d'interruption: Réception de la carte d'interface HP-IB d'un signal de demande de service (mot d'état de la carte = 128)

Programmation du TR 1030 pour envoyer un signal (SRQ) au calculateur

- À la fin d'un enregistrement
- Lorsqu'il est en saturation

Définition des conditions d'interruption du déroulement du programme

- Le mot d'état du TR 1030 est:
- égal à 68 (Bit 6 = 1, Bit 2 = 1) à la fin d'un enregistrement
 - Supérieur à 128 (Bit 7 = 1, Bit 6 = 1, ...) à la suite d'une saturation

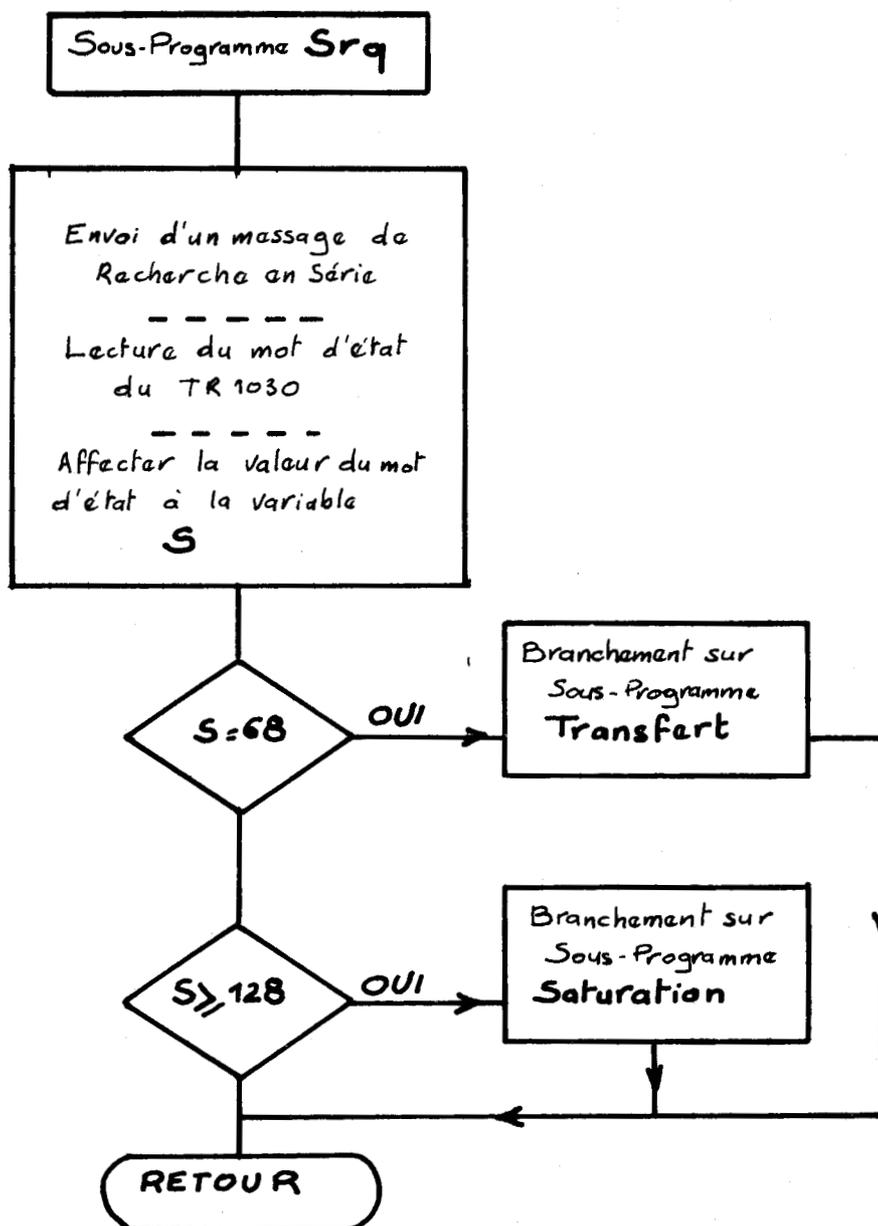


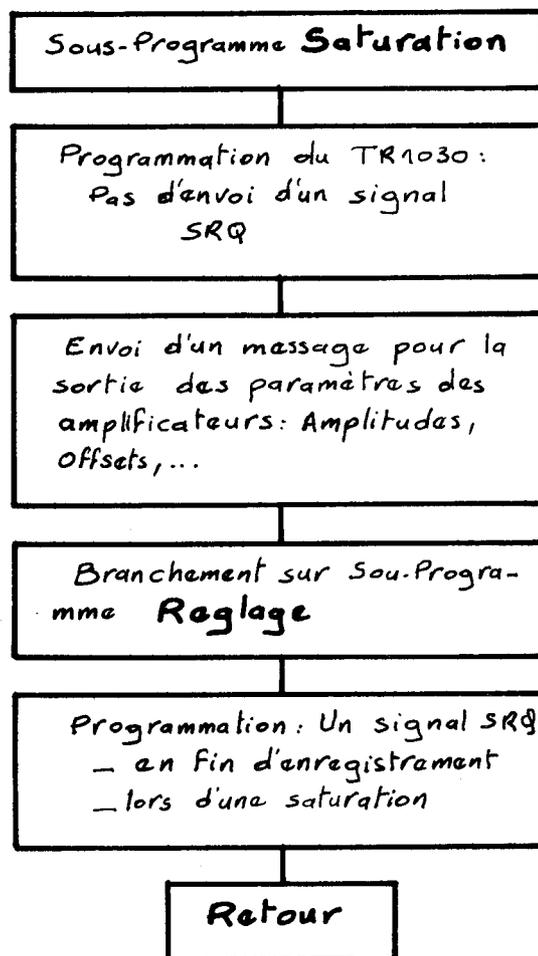
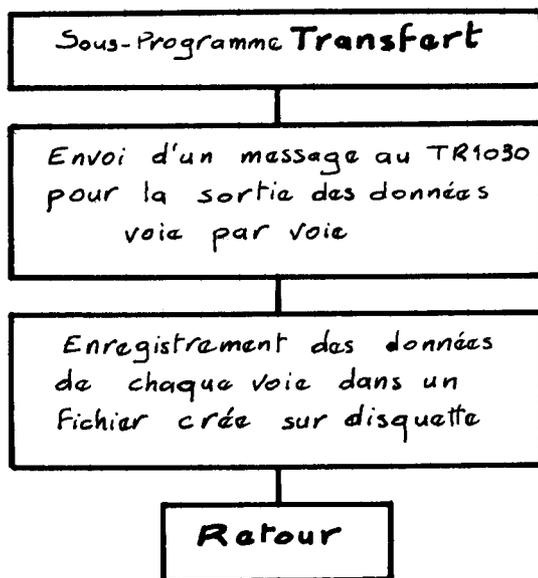
- Attente d'une interruption
- Evènement de l'interruption
- Branchement sur le sous-Programme Srq
- Retour

REMARQUE

Dans le cas de mesures avec la sonde à un fil incliné, nous utilisons une seule voie (voie 1), et la partie encadrée de l'étape "mesures" de l'organigramme est répétée pour trois orientations de la sonde : $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 120^\circ$, et $\gamma = -120^\circ$.

Dans le cas de mesures avec la sonde à trois fils, nous utilisons trois voies (voie 1, voie 2 et voie 3) et la partie encadrée est effectuée une seule fois.





REMARQUES SUR LE SOUS-PROGRAMME "REGLAGE"

Le TR 1030 possède un groupe de mots que l'on désigne par "status" qui indique la date de l'enregistrement, la voie qui a satisfait la première aux conditions de déclenchement, les voies ayant saturé et la nature de la saturation.

Nous utilisons ce groupe de mots pour le réglage automatique des amplitudes des voies en fonction et le positionnement des origines.

INDICATIONS

A - Paramètres des amplificateurs :

Par une voie donnée on a :

- Amp : amplitude en volts
- Offset : position de l'origine en % de l'amplitude

Exemples :

Si on enregistre un signal alternatif d'amplitude A, alors

Amp = 2A

offset = 50 %

Lorsqu'il s'agit d'un signal continu, on a :

Amp = valeur maximale de l'amplitude du signal

offset = 0 %

B - Paramètres du groupe "status" :

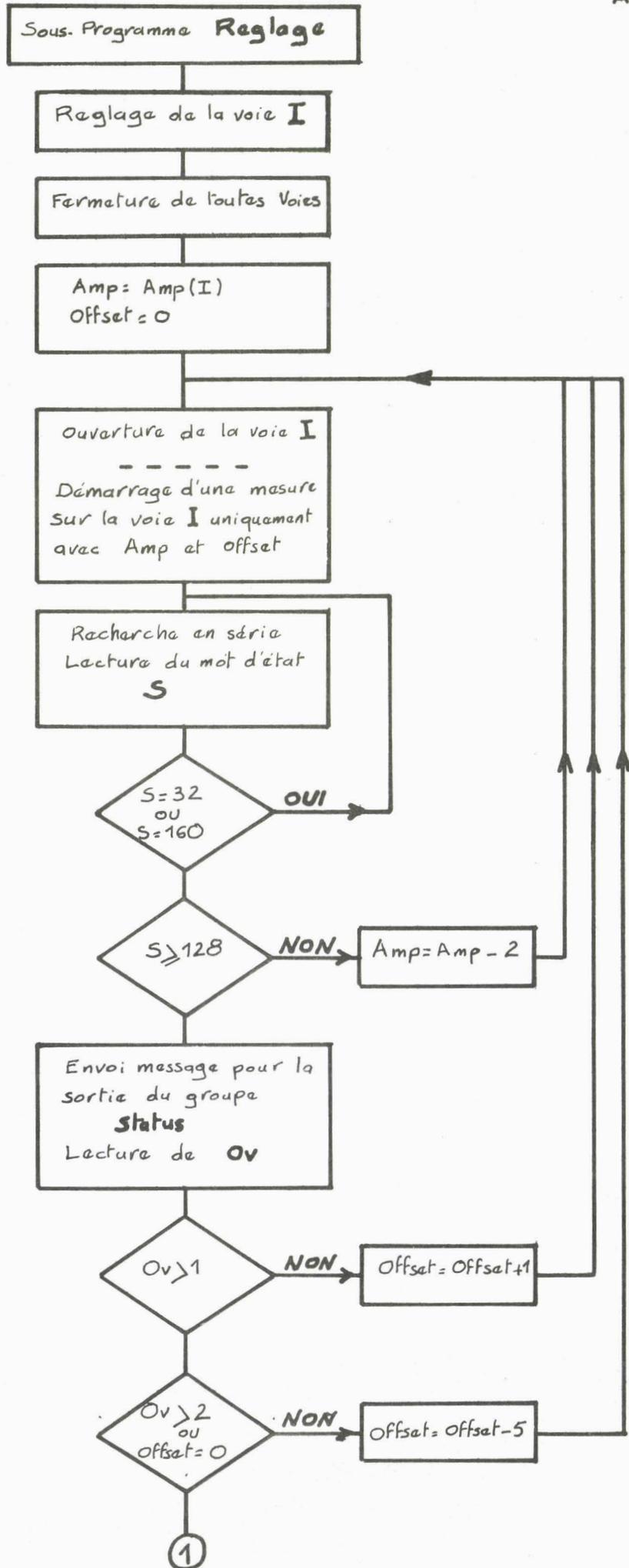
Nous utilisons le groupe "status" pour la connaissance de la nature de la saturation d'un enregistrement sur une voie. Nous désignons par Ov le paramètre qui prend les valeurs suivantes :

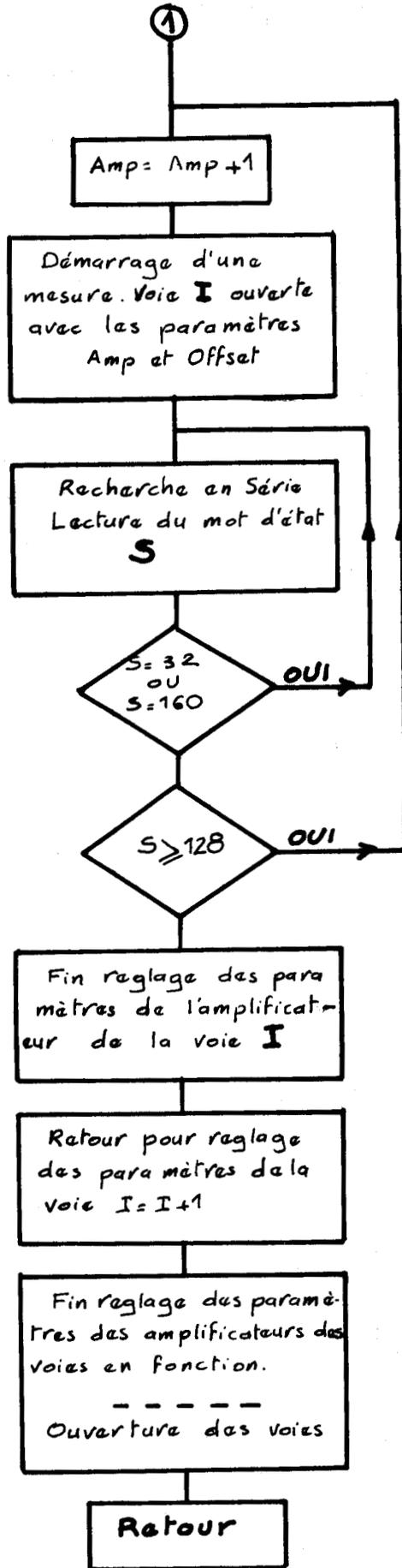
Ov = 0 Pas de saturation sur la voie désignée ;

Ov = 1 Saturation positive

Ov = 2 Saturation négative

Ov = 3 Saturation positive et négative.





ANNEXE 5

Résolution par la méthode de Newton.

Pour les trois orientations de la sonde à un fil incliné nous avons les moyennes périodiques des vitesses effectives de refroidissement en fonction des moyennes périodiques U, V et W :

$$\tilde{V}_{R0} (\alpha=0) = A_1 \tilde{U} + D_0 \tilde{V} + B_0 \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_0 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}}$$

$$\tilde{V}_{R1} (\alpha=\alpha_1) = A_1 \tilde{U} + D_2 \tilde{V} + E_1 \tilde{W} + B_1 \frac{\tilde{V}}{\tilde{U}} + C_1 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} + F_1 \frac{\tilde{V}\tilde{W}}{\tilde{U}}$$

$$\tilde{V}_{R2} (\alpha=-\alpha_1) = A_1 \tilde{U} + D_1 \tilde{V} - E_1 \tilde{W} + B_1 \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_1 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} - F_1 \frac{\tilde{V}\tilde{W}}{\tilde{U}}$$

Avec $A = \cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha$

$$B_0 = \sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha$$

$$B = B_0 \cos^2 \alpha_1 + h^2 \sin^2 \alpha_1$$

$$C = B_0 \sin^2 \alpha_1 + h^2 \cos^2 \alpha_1$$

$$D_0 = (1-k^2) \sin 2\alpha$$

$$D = D_0 \cos \alpha_1$$

$$E = D_0 \sin \alpha_1$$

$$F = (B_0 + h^2) \sin 2\alpha_1$$

$$B_{01} = \sqrt{A} \left(\frac{B_0}{2A} - \frac{D_0^2}{8A^2} \right)$$

$$C_{01} = \sqrt{A} \frac{h^2}{2A}$$

$$D_{01} = \frac{D_0}{2\sqrt{A}}$$

$$A_1 = \sqrt{A}$$

$$B_1 = A_1 \left(\frac{B}{2A} - \frac{D^2}{8A^2} \right)$$

$$C_1 = A_1 \left(\frac{C}{2A} - \frac{E^2}{8A^2} \right)$$

$$D_1 = \frac{D}{2A_1}$$

$$E_1 = \frac{E}{2A_1}$$

$$F_1 = A_1 \left(\frac{F}{2A} - \frac{DE}{4A^2} \right)$$

Pour la résolution nous avons choisi la méthode d'approximations successives de Newton à convergence quadratique.

Soit x le vecteur $(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W})$ et f le vecteur (f_1, f_2, f_3) tel que :

$$f_1 = f_1(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}) = 0$$

$$f_2 = f_2(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}) = 0$$

$$f_3 = f_3(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}) = 0$$

La résolution s'effectue suivant le processus itératif suivant :

$$x^{i+1} = x^i - [F_x(x^i)]^{-1} \cdot f(x^i)$$

où l'indice i désigne l'itération, et $[F_x]$ la matrice des dérivés d'éléments $\frac{\partial f_n}{\partial x_j}$; n et j étant respectivement les lignes et les colonnes.

Nous avons :

$$f_1 = A_1 \tilde{U} + D_{01} \tilde{V} + B_{01} \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_{01} \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} - \tilde{V}_{R0}^2 = 0$$

$$f_2 = A_1 \tilde{U} + D_1 \tilde{V} + E_1 \tilde{W} + B_1 \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_1 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} + F_1 \frac{\tilde{V}\tilde{W}}{\tilde{U}} - \tilde{V}_{R1}^2 = 0$$

$$f_3 = A_1 \tilde{U} + D_1 \tilde{V} - E_1 \tilde{W} + B_1 \frac{\tilde{V}^2}{\tilde{U}} + C_1 \frac{\tilde{W}^2}{\tilde{U}} - F_1 \frac{\tilde{V}\tilde{W}}{\tilde{U}} - \tilde{V}_{R2}^2 = 0$$

Les éléments de la matrice $[F_x]$ sont :

$$F_x(1,1) = \frac{\partial f_1}{\partial \tilde{U}} = A_1 - \frac{1}{\tilde{U}^2} (B_{01} \tilde{V}^2 + C_{01} \tilde{W}^2)$$

$$F_x(1,2) = \frac{\partial f_1}{\partial \tilde{V}} = D_{01} + 2 B_{01} \frac{\tilde{V}}{\tilde{U}}$$

$$F_x(1,3) = \frac{\partial f_1}{\partial \tilde{W}} = 2 C_{01} \frac{\tilde{W}}{\tilde{U}}$$

$$F_x(2,1) = \frac{\partial f_2}{\partial \tilde{U}} = A_1 - \frac{1}{\tilde{U}^2} (B_1 \tilde{V}^2 + C_1 \tilde{W}^2 + F_1 \tilde{V}\tilde{W})$$

$$F_x(2,2) = \frac{\partial f_2}{\partial \tilde{V}} = D_1 + \frac{1}{U} (2B_1 \tilde{V} + F_1 \tilde{W})$$

$$F_x(2,3) = \frac{\partial f_2}{\partial \tilde{W}} = E_1 + \frac{1}{U} (2C_1 \tilde{W} + F_1 \tilde{V})$$

$$F_x(3,1) = \frac{\partial f_3}{\partial U} = A_1 - \frac{1}{U^2} (B_1 \tilde{V}^2 + C_1 \tilde{W}^2 + F_1 \tilde{V} \tilde{W})$$

$$F_x(3,2) = \frac{\partial f_3}{\partial \tilde{V}} = D_1 + \frac{1}{U} (2B_1 \tilde{V} - F_1 \tilde{W})$$

$$F_x(3,3) = \frac{\partial f_3}{\partial \tilde{W}} = -E_1 + \frac{1}{U} (2C_1 \tilde{W} - F_1 \tilde{V})$$

Nous arrêtons le processus itératif lorsque le test suivant est satisfait :

$$|x^{i+1} - x^i| < 10^{-4}$$

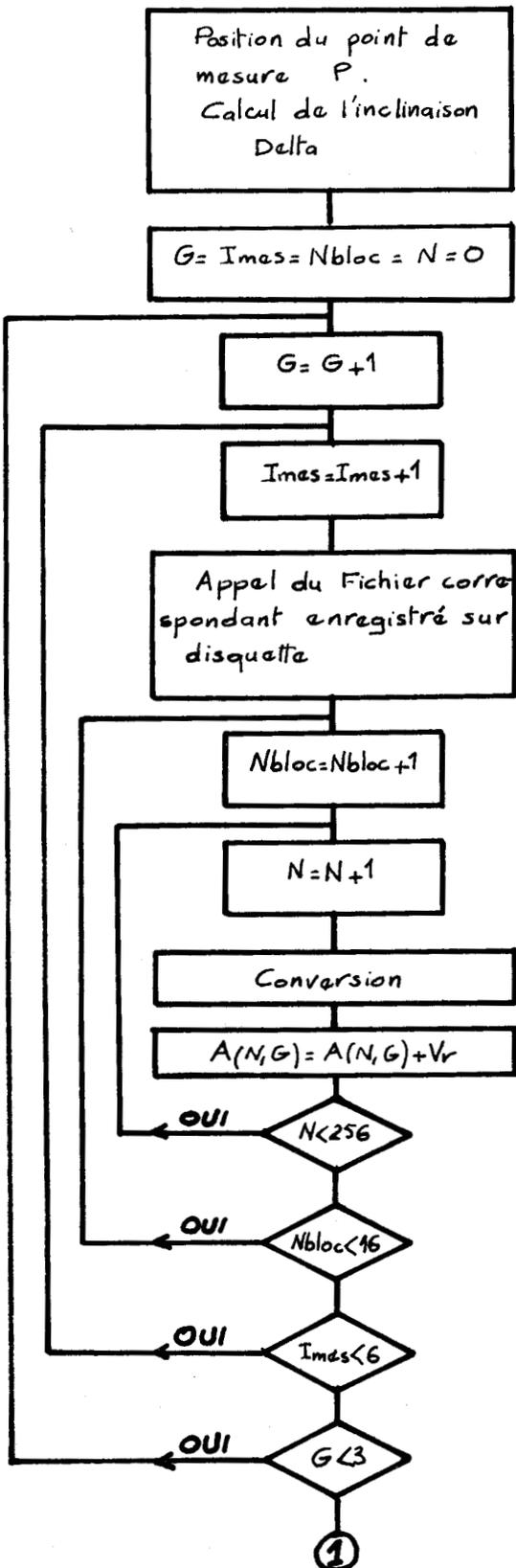
Dans tous les cas, ce test d'arrêt est satisfait après 5 itérations au plus.

o

o

o

**- MESURES AVEC LA SONDE A UN FIL INCLINE. -
ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE
RESOLUTION PAR APPROXIMATIONS
SUCCESSIVES**



G: Orientation de la sonde
 $\gamma = 0$ (G=1), $\gamma = 120^\circ$ (G=2), $\gamma = -120^\circ$ (G=3)

Imes = 1 à 6 : Numéro d'un enregistrement

Nbloc = 1 à 16 : Chaque enregistrement compte 16 blocs

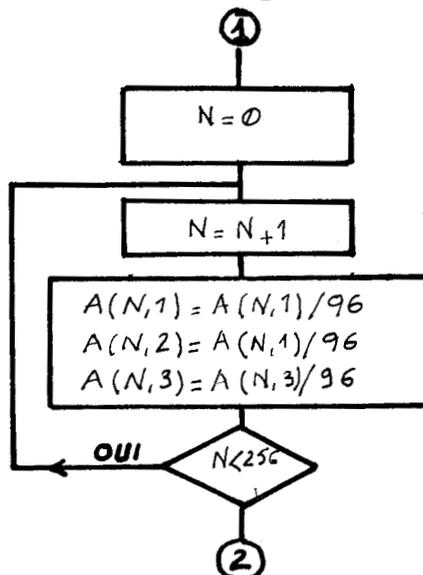
Conversion: - Conversion d'une donnée enregistrée en chaîne de caractères en une valeur numérique codée sur 10 bits (Ecodé)
 Ecodé prend des valeurs entre 0 et 1024
 - Conversion en tension E

$$E = (E_{\text{codé}} - 12 - 10 \times \text{Offset}) * \text{Amp} / 1000$$

avec Amp: Amplitude programmée sur le TR1030
 Offset: Position de l'origine en % d'amplitude

- Conversion en Vitesse effective de refroid.

$$Vr = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{B} \right)^{1/n}$$



②

Calcul par la méthode de Newton

Calcul des Coefficients

$$K = 0.21$$

$$H = 1.23$$

$$\text{Alfa} = 45 \text{ (degrés)}$$

$$\text{Gam} = 120 \text{ (degrés)}$$

$$A = \cos^2(\text{Alfa}) + (K \cdot \sin(\text{Alfa}))^2$$

$$B_0 = \sin^2(\text{Alfa}) + (K \cdot \cos(\text{Alfa}))^2$$

$$D_0 = (1 - K^2) \cdot \sin 2(\text{Alfa})$$

$$B = B_0 \cos^2(\text{Gam}) + (H \cdot \sin(\text{Gam}))^2$$

$$C = B_0 \sin^2(\text{Gam}) + (H \cdot \cos(\text{Gam}))^2$$

$$D = D_0 \cdot \cos(\text{Gam})$$

$$E = D_0 \cdot \sin(\text{Gam})$$

$$F = (B_0 - H^2) \cdot \sin 2(\text{Gam})$$

$$A_1 = \sqrt{A}$$

$$B_{01} = A_1 \left(\frac{B_0}{2A} - \frac{D_0^2}{8A^2} \right)$$

$$B_1 = A_1 \left(\frac{B}{2A} - \frac{D^2}{8A^2} \right)$$

$$C_{01} = A_1 \cdot H^2 / 2A$$

$$C_1 = A_1 \left(\frac{C}{2A} - \frac{E^2}{8A^2} \right)$$

$$D_{01} = D_0 / 2A_1$$

$$D_1 = D / 2A_1$$

$$E_1 = E / 2A_1$$

$$F_1 = A_1 \left(\frac{F}{2A} - \frac{D \cdot E}{4A^2} \right)$$

Valeurs initiales

$$V_1(1) = 60 \text{ (m/s)}$$

$$V_1(2) = 0$$

$$V_1(3) = 0$$

Précision

$$\text{Eps1} = 10^{-4}$$

Nombre maximum

$$\text{d'itérations } N_{\text{max}} = 20$$

③

③

$$N = 0$$

$$N = N + 1$$

$$V_{R\phi} = A(N, 1)$$

$$V_{R1} = A(N, 2)$$

$$V_{R2} = A(N, 3)$$

$$I = 0$$

$$I = I + 1$$

$$U = V_i(1) = V1(1)$$

$$V = V_i(2) = V1(2)$$

$$W = V_i(3) = V1(3)$$

$$F_f(1) = A_1 U + D_{01} V + B_{01} V^2 / U + C_{01} W^2 / U - V_{R\phi}^2$$

$$F_f(2) = A_1 U + D_1 V + E_1 W + B_1 V^2 / U + C_1 W^2 / U + F_1 W / U - V_{R1}^2$$

$$F_f(3) = A_1 U + D_1 V - E_1 W + B_1 V^2 / U + C_1 W^2 / U - F_1 W / U - V_{R2}^2$$

$$F_x(1,1) = A_1 - (B_{01} V^2 + C_{01} W^2) / U^2$$

$$F_x(1,2) = D_{01} + 2B_{01} V / U$$

$$F_x(1,3) = 2C_{01} W / U$$

$$F_x(2,1) = A_1 - (B_1 V^2 + C_1 W^2 + F_1 W) / U^2$$

$$F_x(2,2) = D_1 - (2B_1 V + F_1 W) / U$$

$$F_x(2,3) = E_1 + (2C_1 W + F_1 V) / U$$

$$F_x(3,1) = A_1 - (B_1 V^2 + C_1 W^2 - F_1 W) / U^2$$

$$F_x(3,2) = D_1 + (2B_1 V - F_1 W) / U$$

$$F_x(3,3) = -E_1 + (2C_1 W - F_1 V) / U$$

$$[M1] = [F_x]^{-1}$$

$$\|Epsx\| = [M1] * \|F_f\|$$

$$\|V1\| = \|V_i\| - \|Epsx\|$$

$$Eps2 = |Epsx|$$

Eps2 < Eps1 OUI

I > Nmax NON

Impression: Précision Non-Attainte

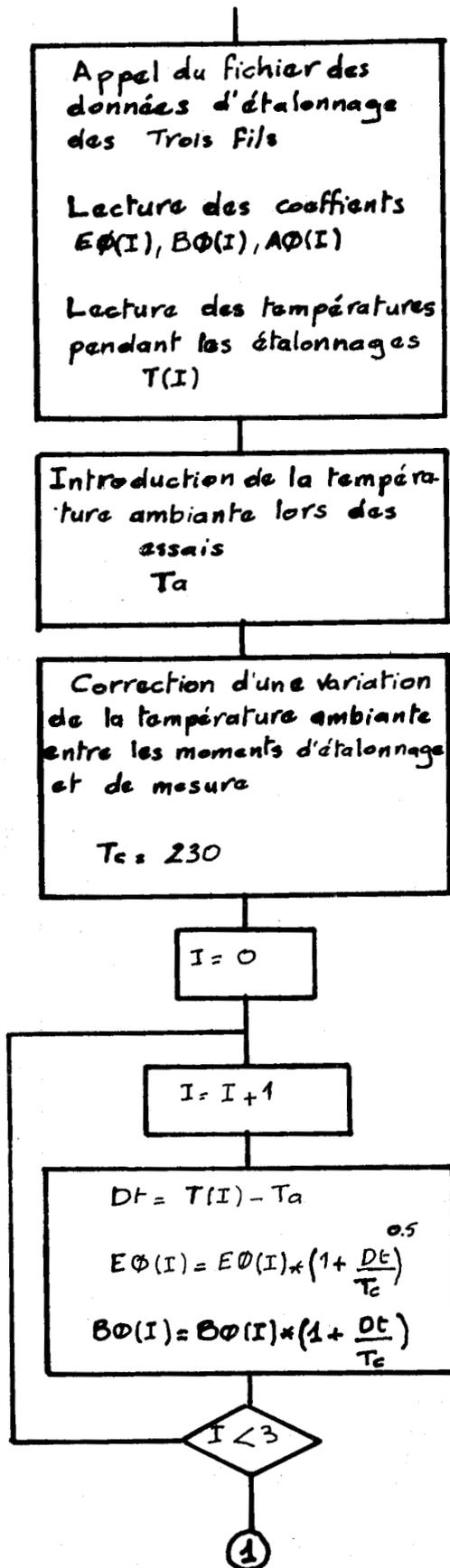
$$U = V1(1); V = V1(2); W = V1(3)$$

N < 256 OUI

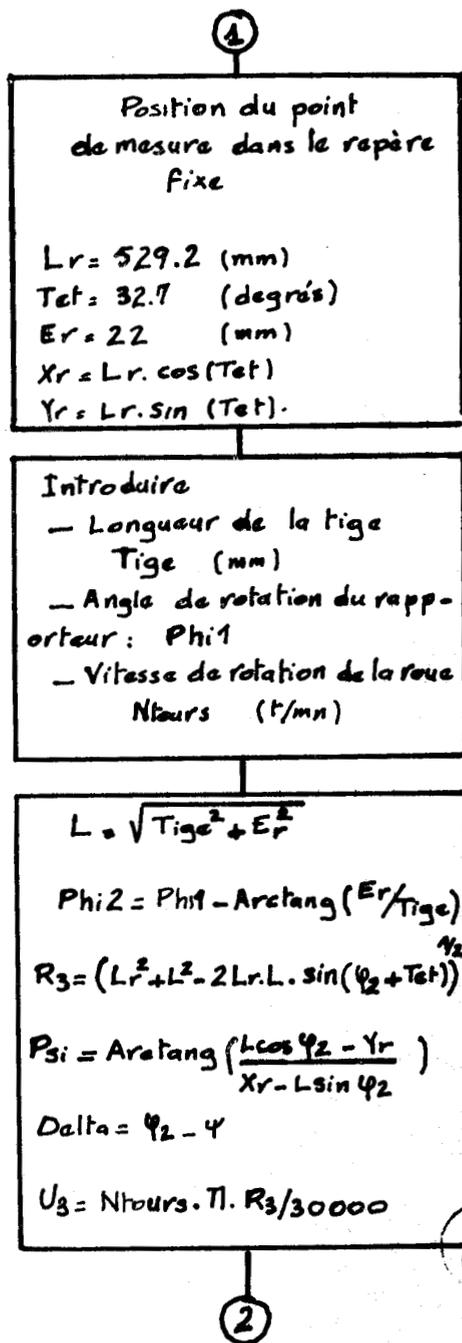
FIN

Annexe 6 - Mesures avec la sonde à trois fils -
 ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE
 RESOLUTION POUR L'OBTENTION DES

Début COMPOSANTES INSTANTANÉES



I=1,2,3 : Numéro du fil



SUIS LILLE

②

$K1 = 0,086$
 $K2 = 0,071$
 $K3 = 0,107$
 $H1 = 1,03$
 $H2 = 1,032$
 $H3 = 1,004$

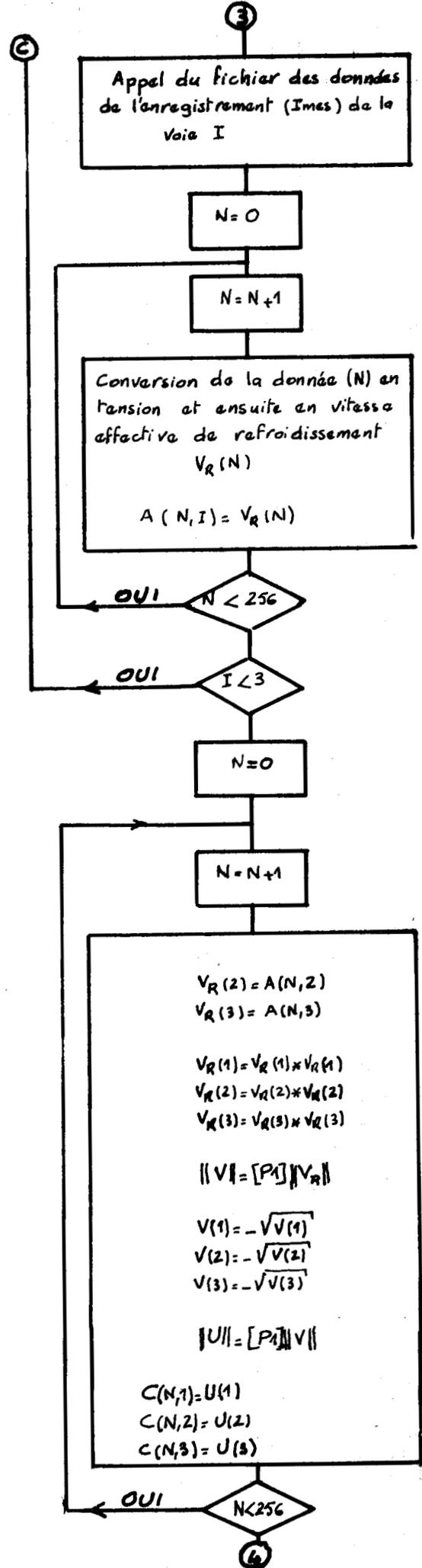
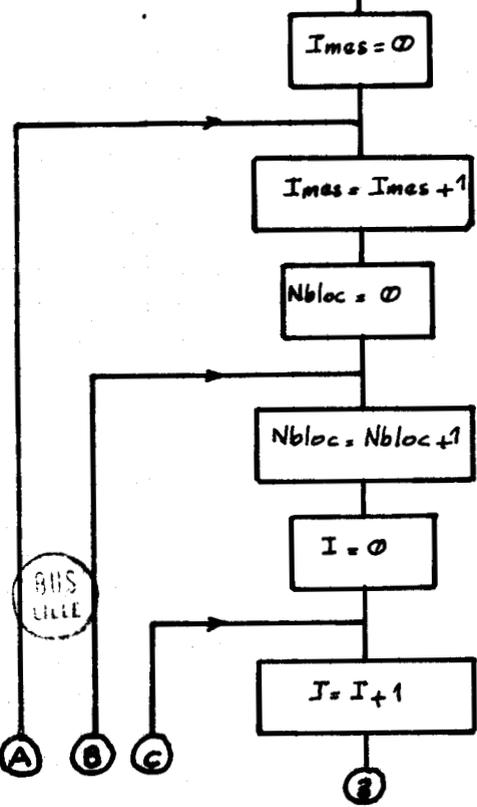
$M(1,1) = K1 \times K1$
 $M(1,3) = H1 \times H1$
 $M(2,1) = H2 \times H2$
 $M(2,2) = K2 \times K2$
 $M(3,2) = H3 \times H3$
 $M(3,3) = K3 \times K3$
 $M(1,2) = M(2,3) = M(3,1) = 1$

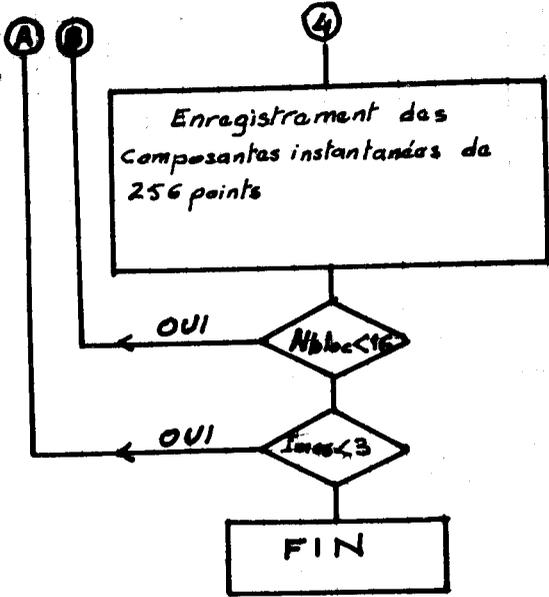
$M1 = [M]^{-1}$

$P(1,1) = P(1,2) = P(1,3) = \frac{\sqrt{12}}{6}$
 $P(2,1) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$
 $P(2,2) = \frac{\sqrt{2}}{2}$
 $P(3,1) = P(3,2) = -\frac{\sqrt{6}}{6}$
 $P(3,3) = \frac{\sqrt{6}}{3}$

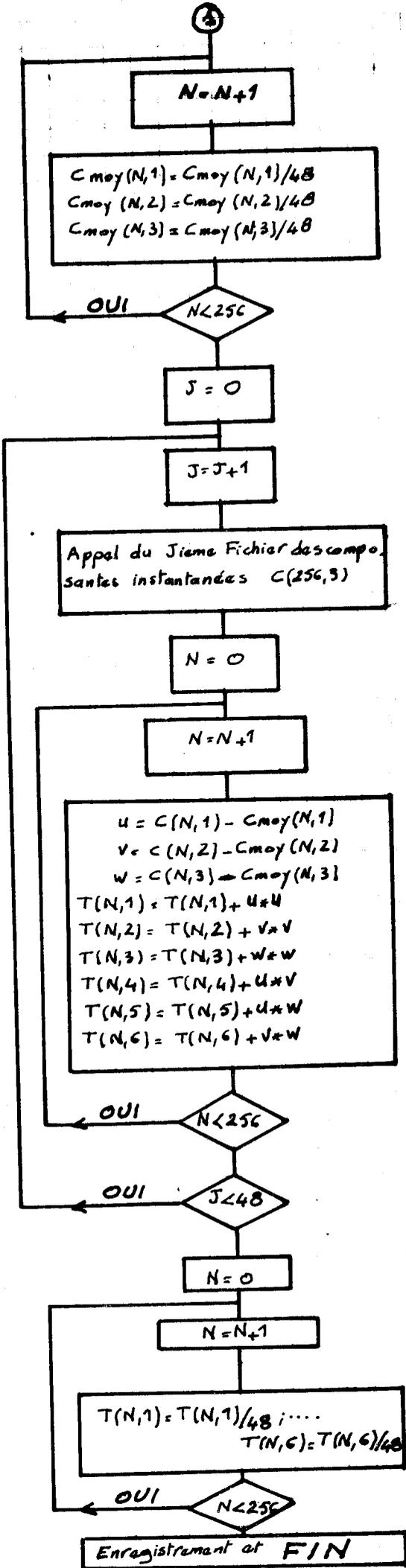
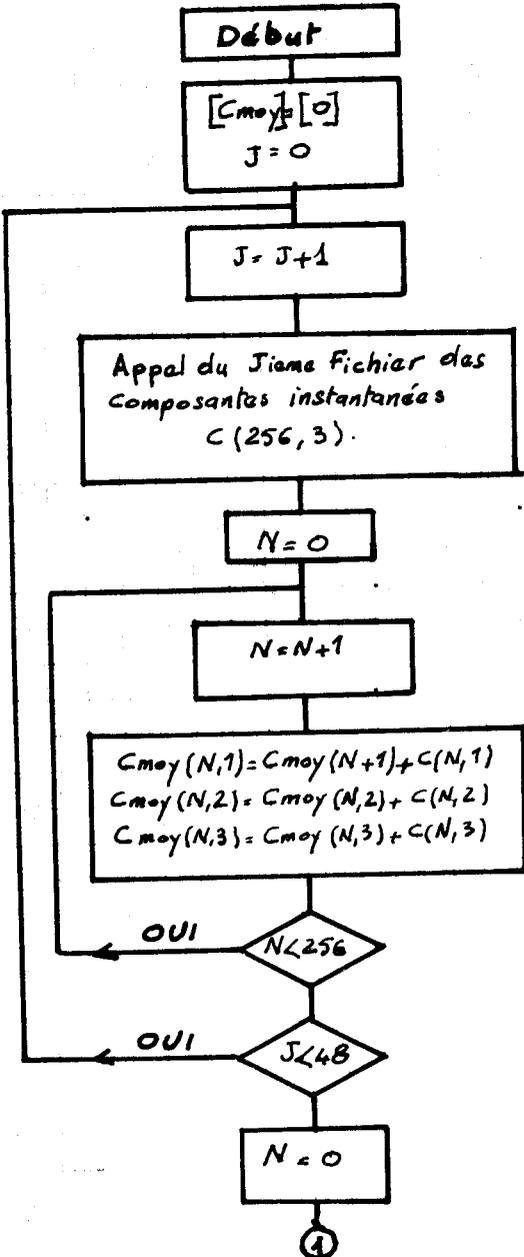
$D(1,1) = -\sin(\Delta)$
 $D(1,3) = D(2,1) = -\cos(\Delta)$
 $D(2,3) = \sin(\Delta)$
 $D(3,2) = 1$
 $D(1,2) = D(2,2) = D(3,1) = D(3,3) = 0$

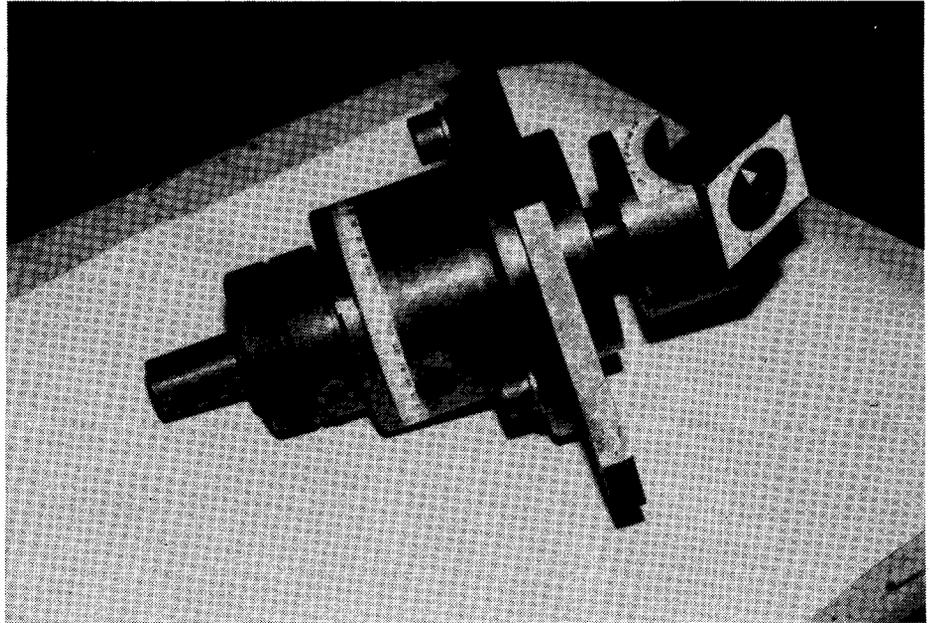
$[P1] = [D][P]$





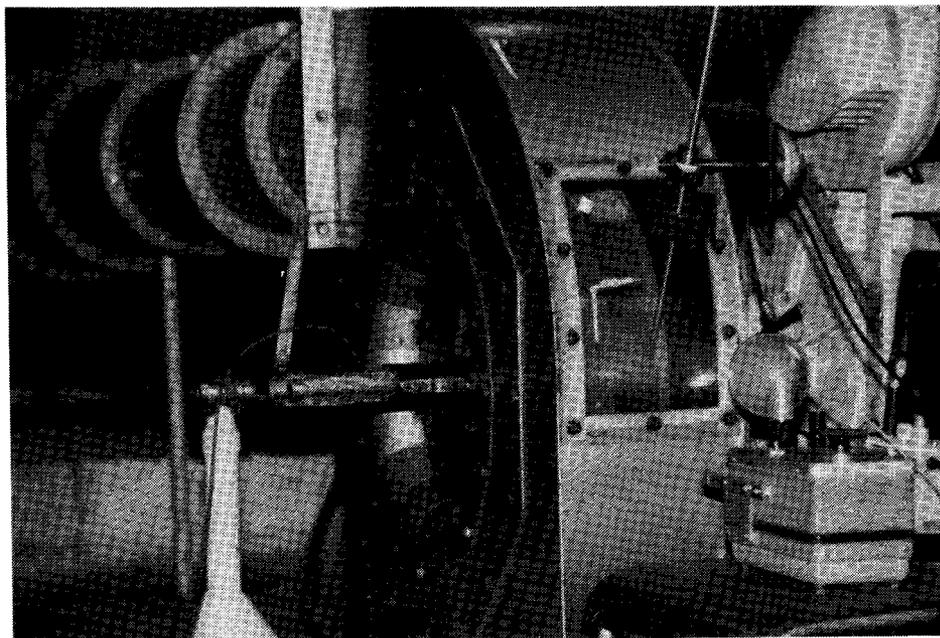
Calcul des moyennes et des
Contraintes de turbulence



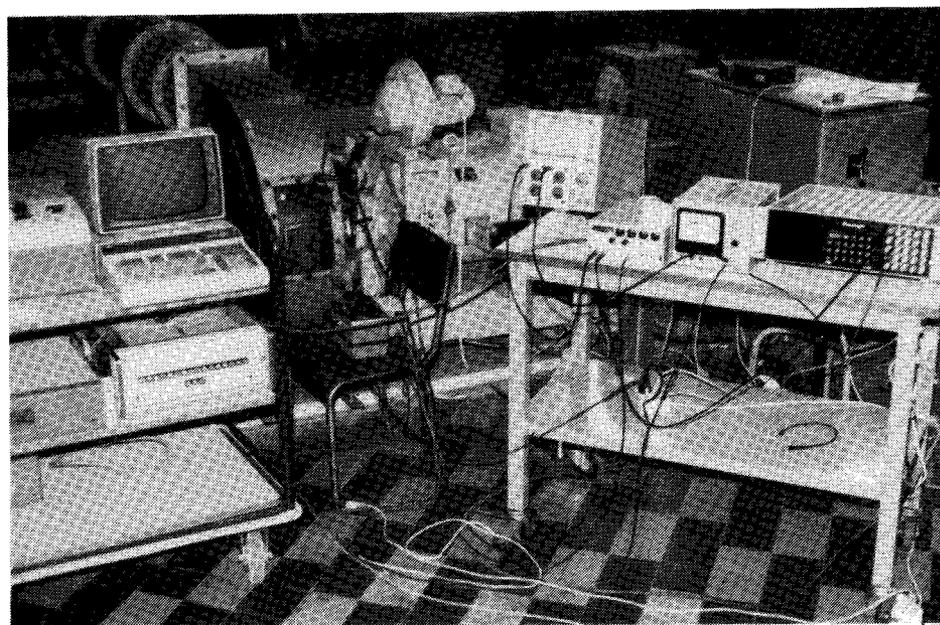


Dispositif pour l'étalonnage et la détermination
des caractéristiques directionnelles de la sonde
à trois fils.





Ventilateur et dispositif de manipulation.



Chaine de mesure.

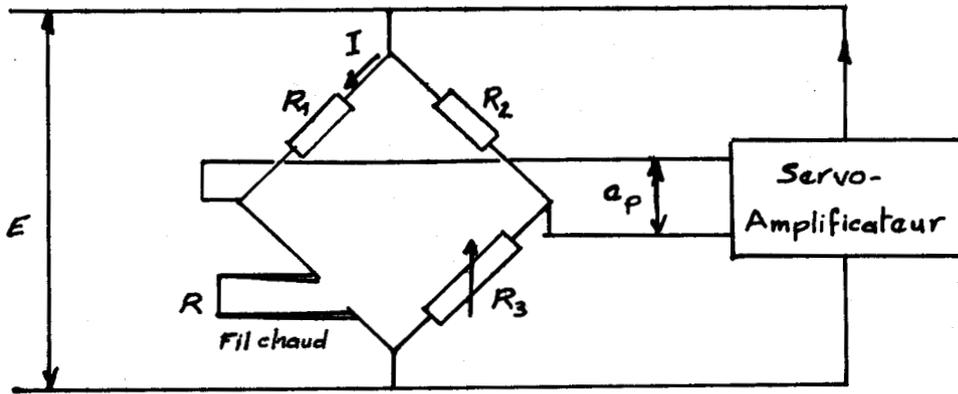


FIG 1

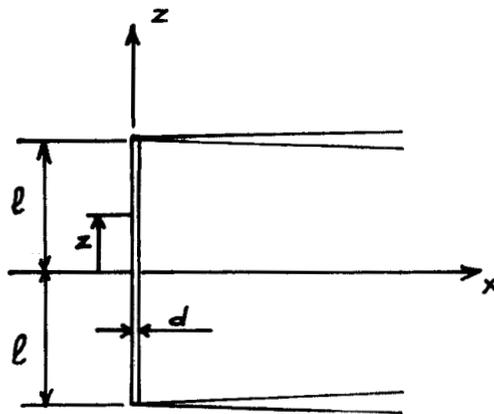


FIG 2

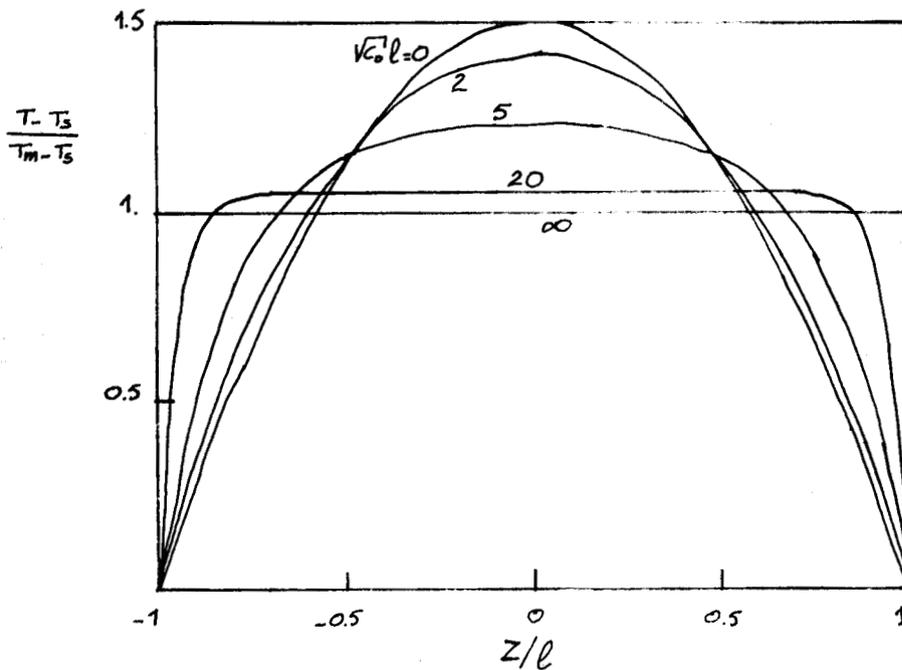


FIG 3. Distribution de la Température le long du fil (D'après Freymuth)



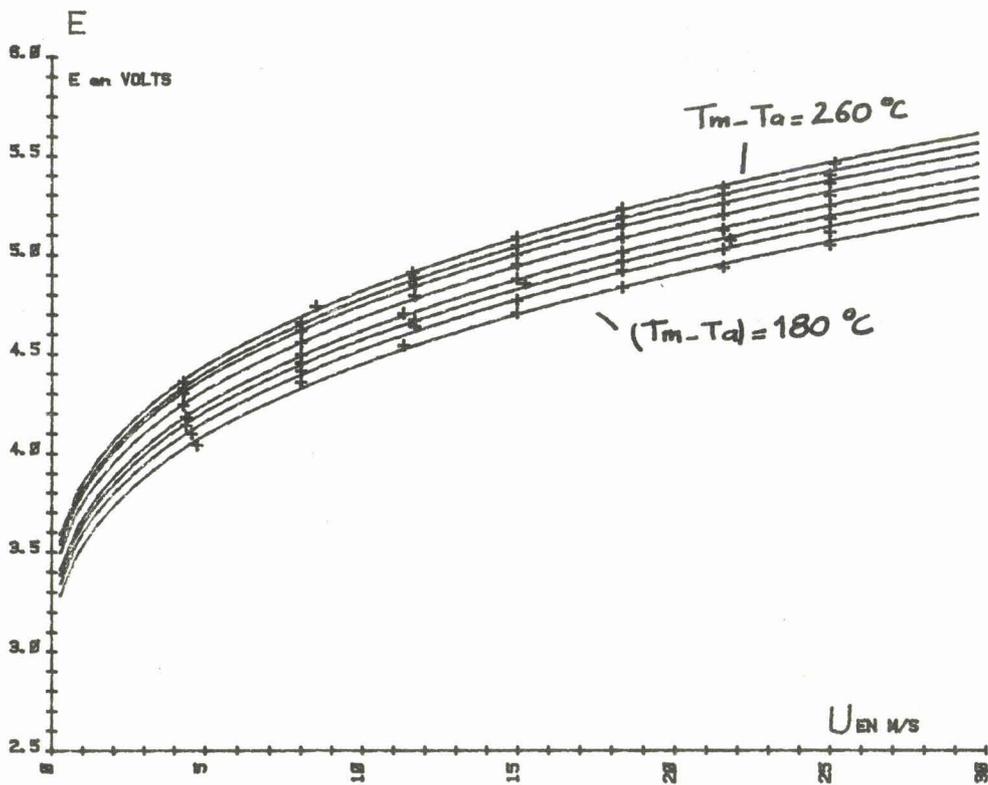


FIG (4a)

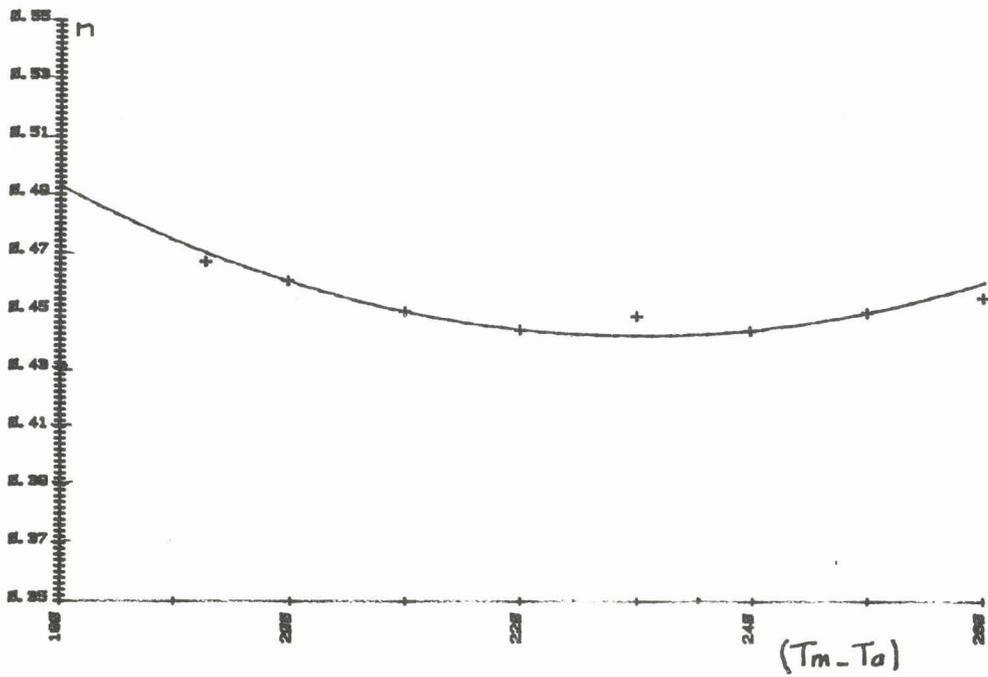


FIG (4b)

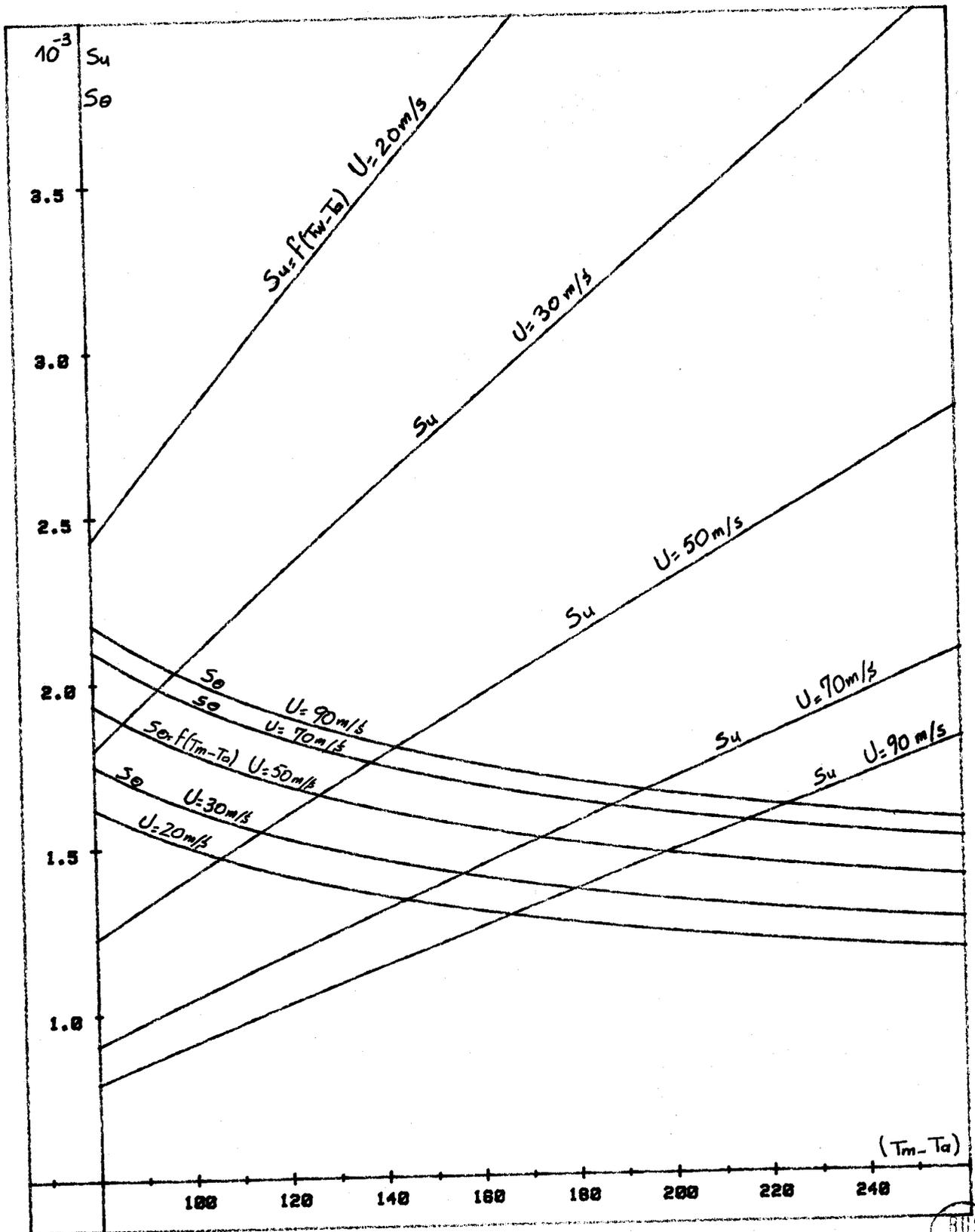


FIG 5 - Sensibilités du fil chaud
à la vitesse et à la température

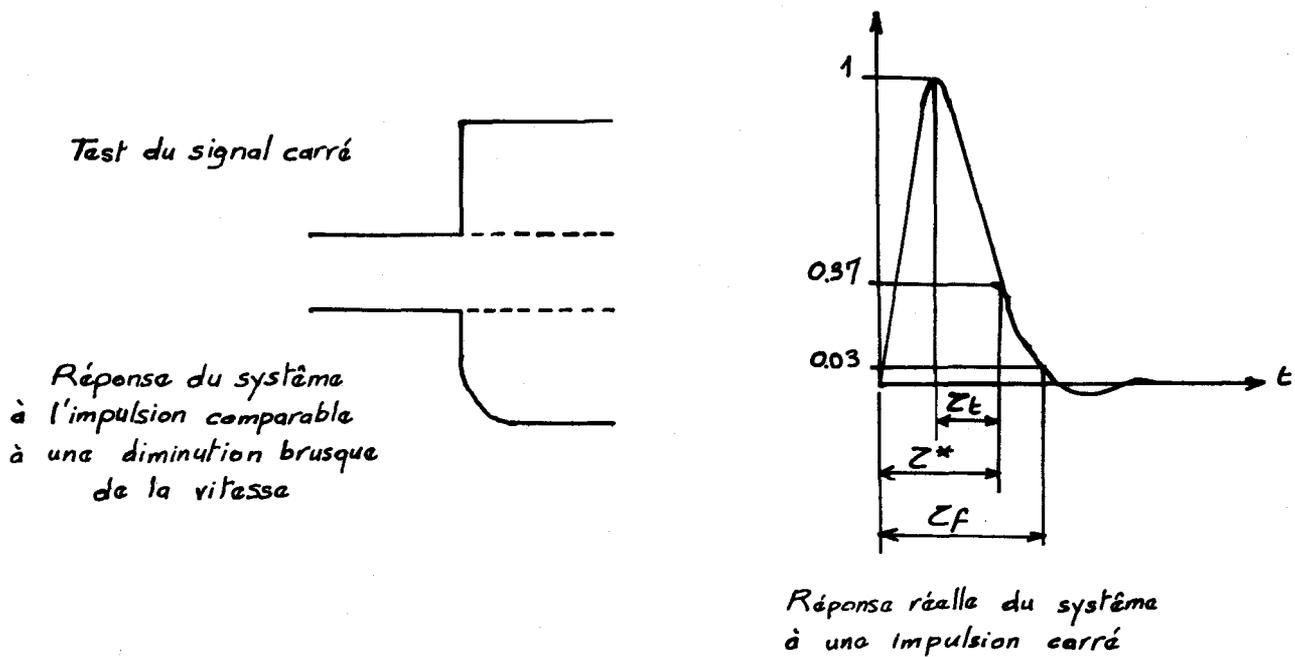


FIG 6

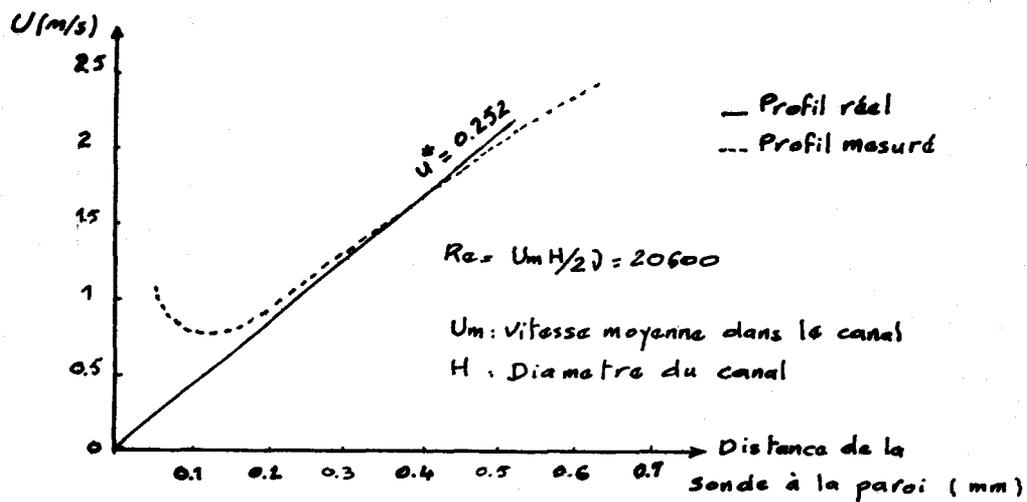


FIG 7 - Influence de la proximité d'une paroi sur le profil mesuré de la vitesse (d'après OKA et KOSTIC)

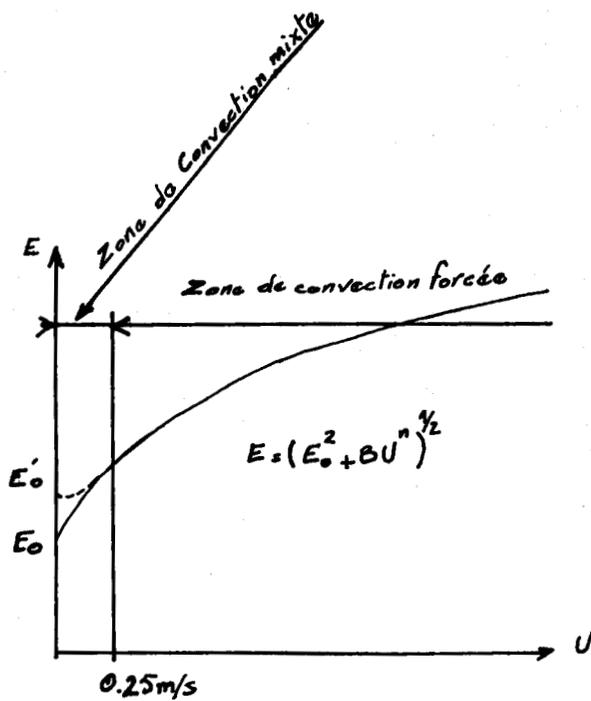


FIG 8

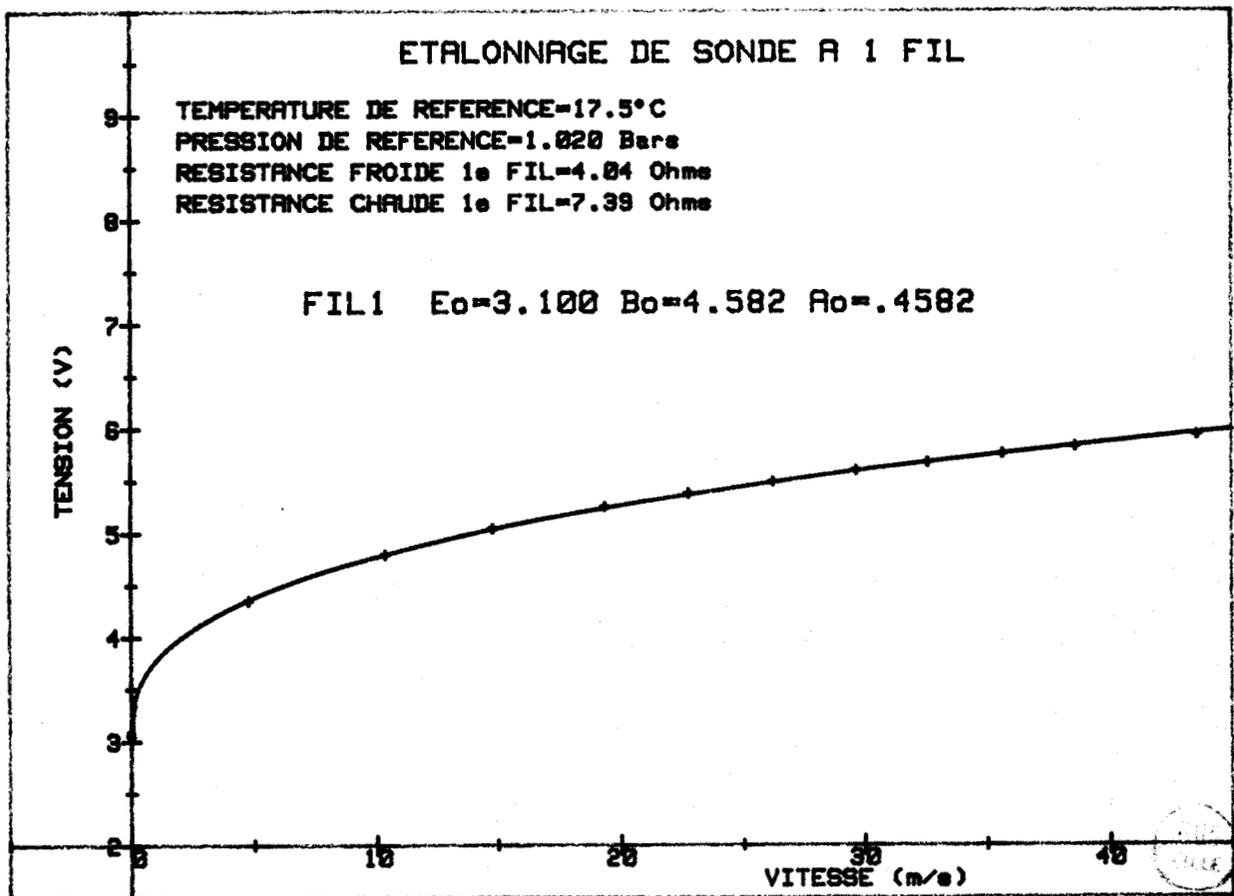


FIG 9

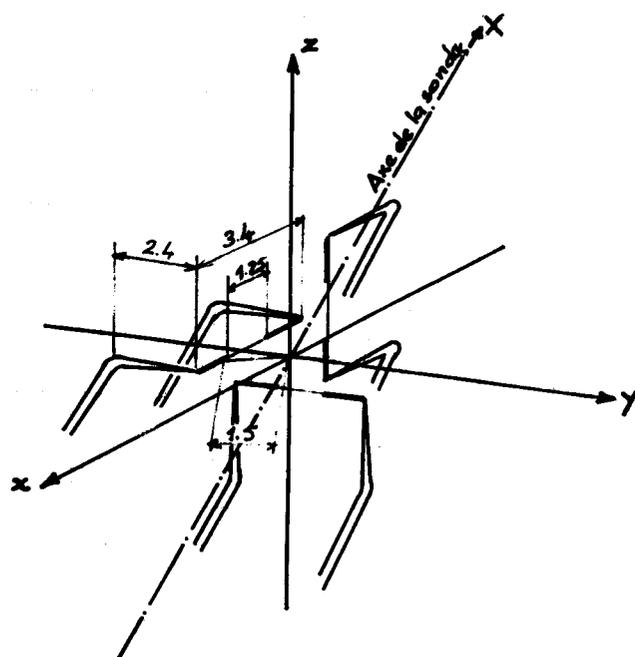


FIG 10 a - Disposition des fils de la sonde DISA 55P91

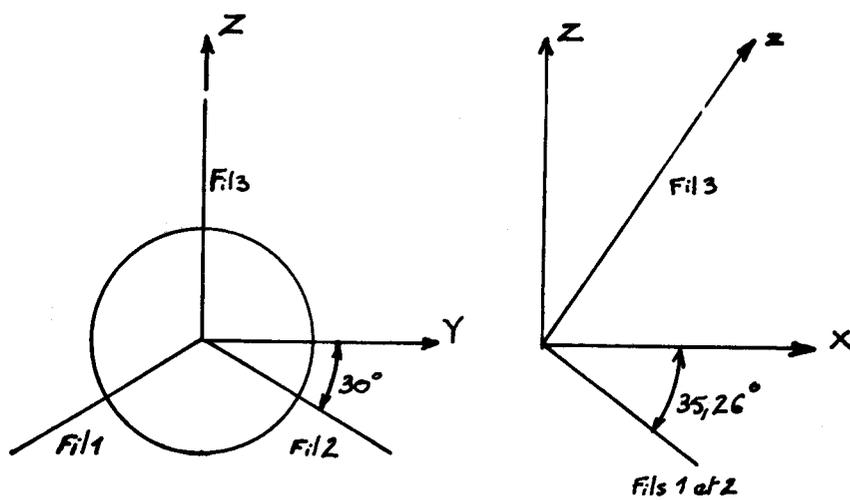


FIG 10 b - Orientations des fils par rapport à l'axe de la sonde

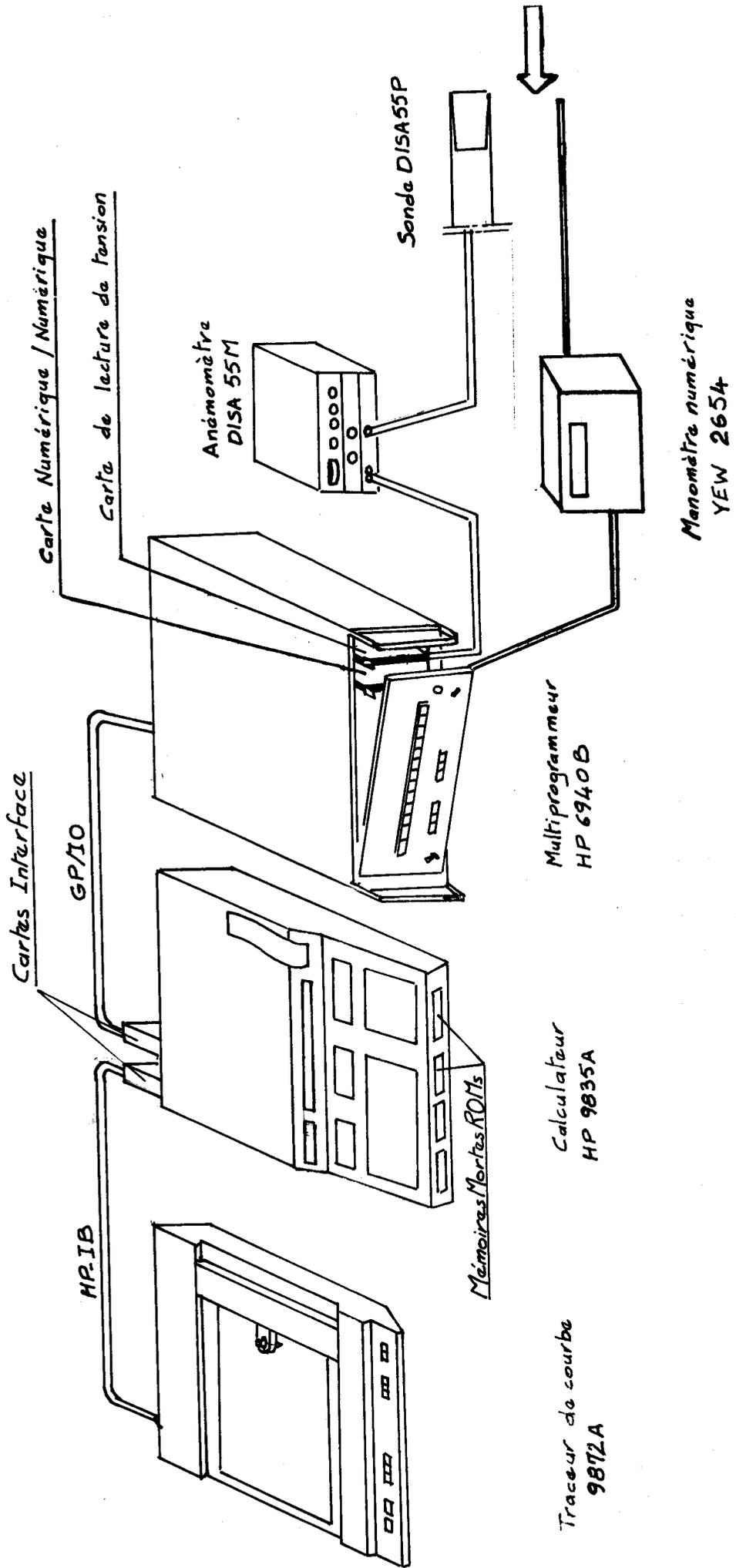


FIG 11 - Chaîne de mesure pour l'opération d'étalonnage et pour la détermination des caractéristiques directionnelles

ETALONNAGE SONDE P91

TEMPERATURE DE REFERENCE=18.0°C
PRESSION DE REFERENCE=1.015 Bars

# 1	$E_o=2.792$	$B_o=4.150$	$A_o=.4627$
# 2	$E_o=2.880$	$B_o=4.064$	$A_o=.4815$
# 3	$E_o=3.121$	$B_o=3.088$	$A_o=.5271$

TENSION (V)

9
8
7
6
5
4
3
2

VITESSE (m/s)

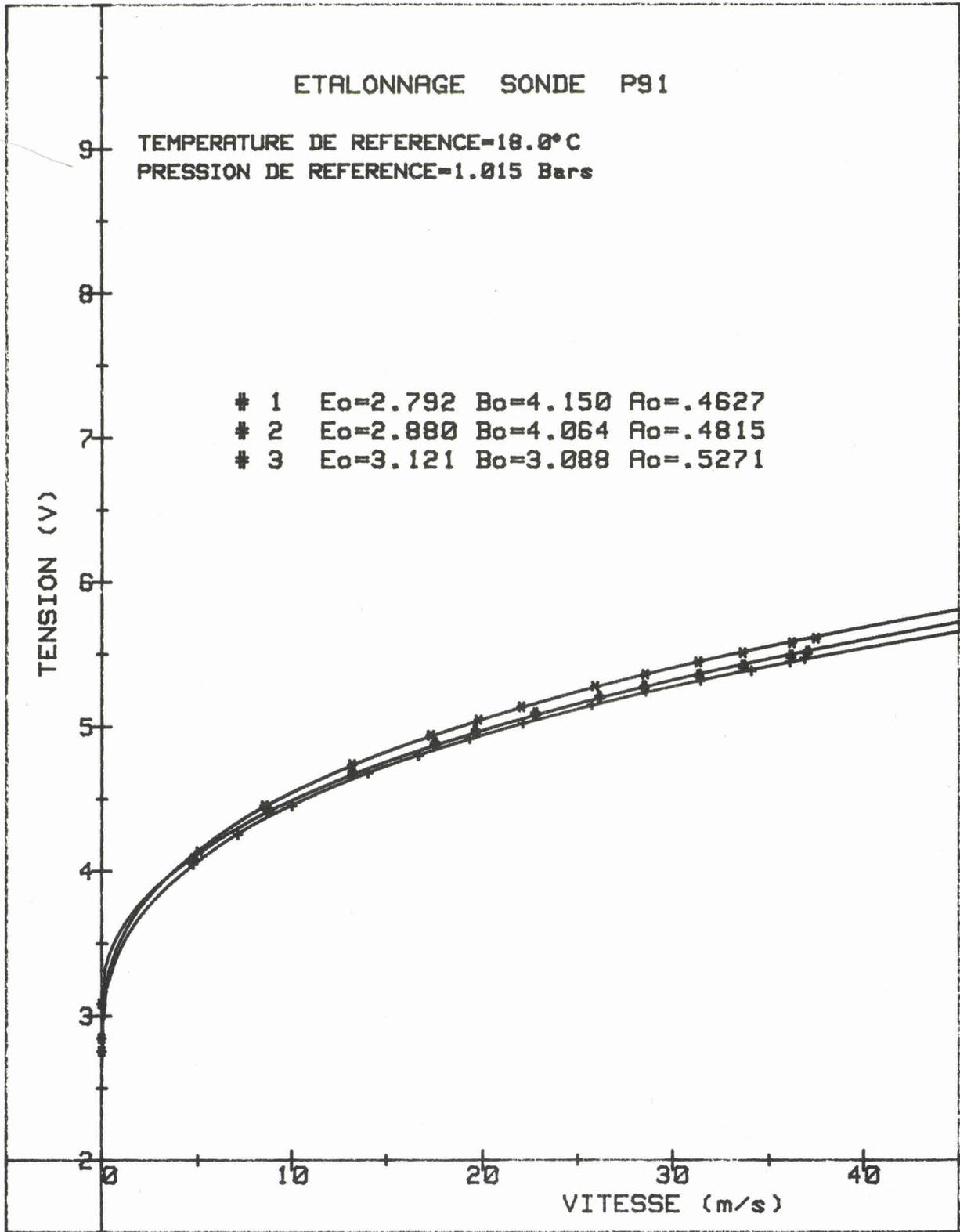


FIG 12 - Etalonnages des trois fils de la sonde DISA 55 P91

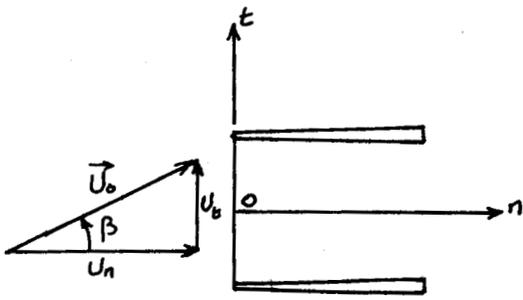


FIG 13

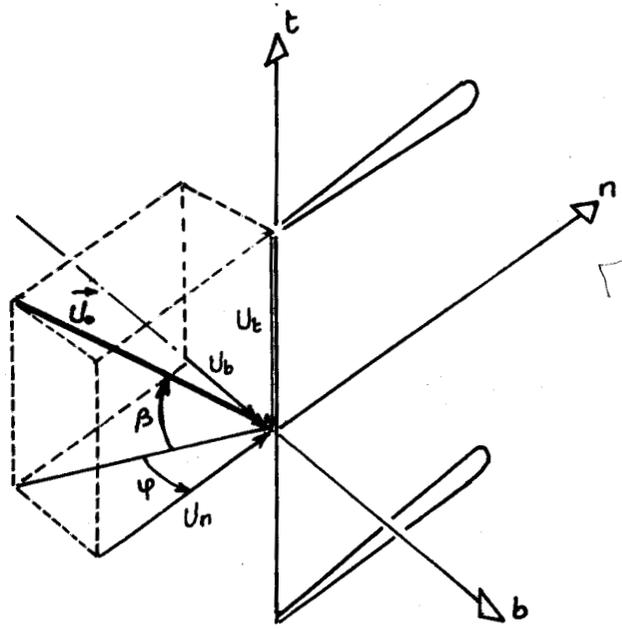


FIG 14

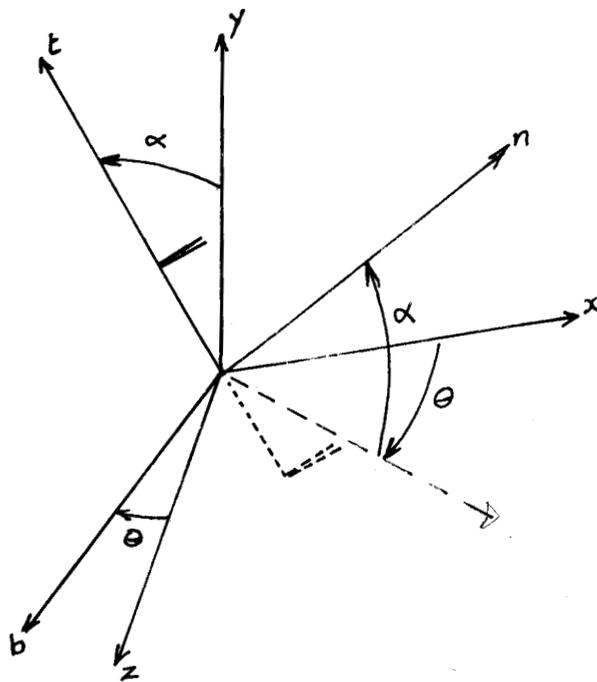


FIG 15

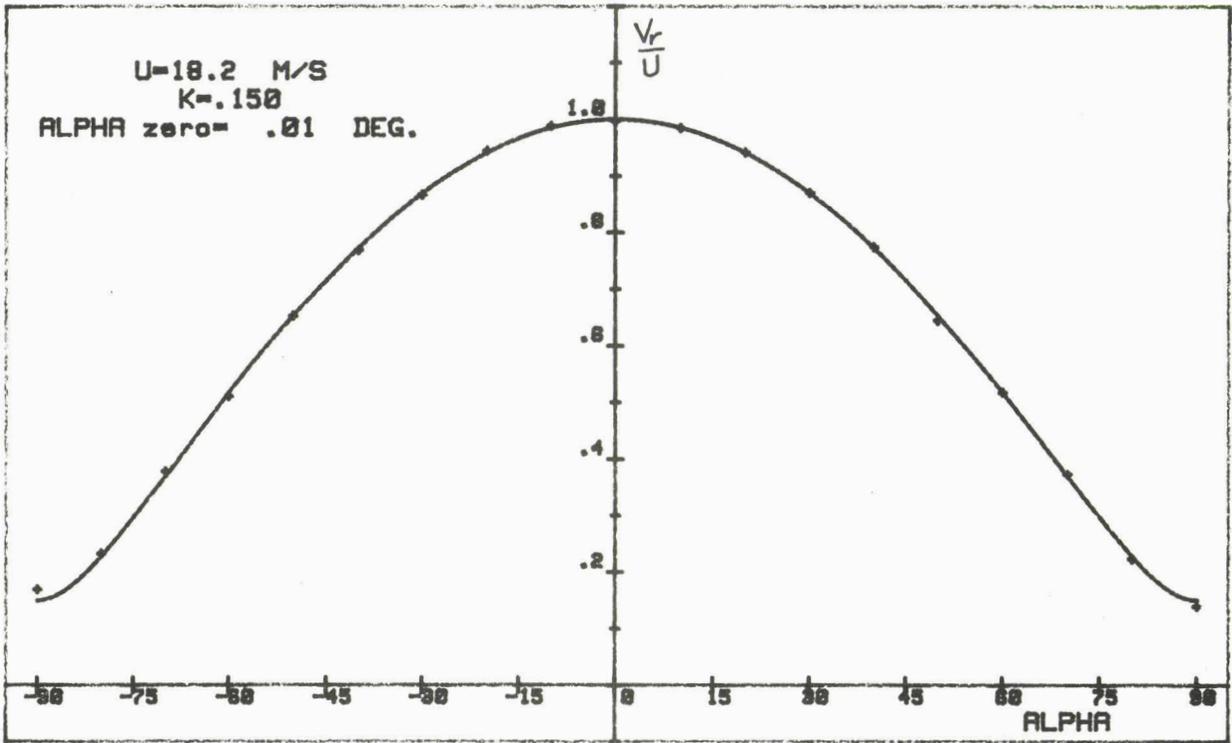


FIG 16

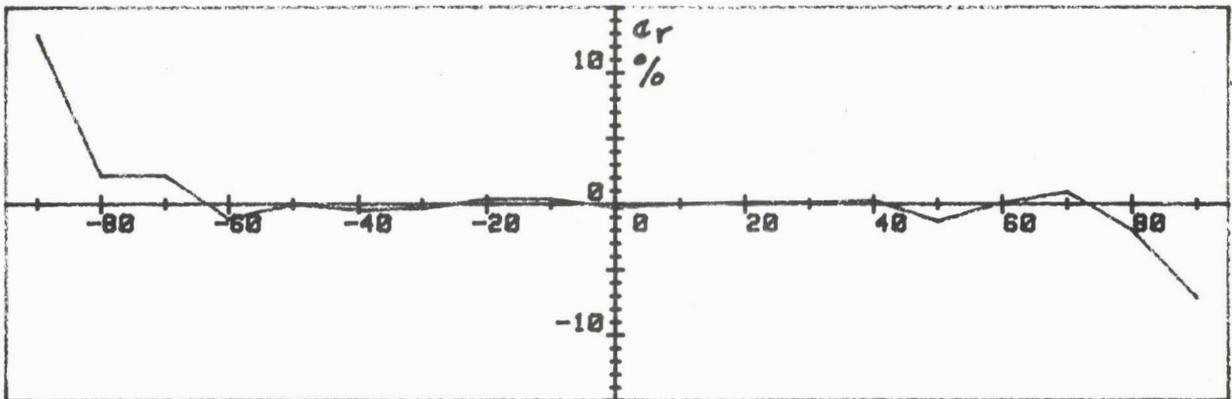


FIG 17

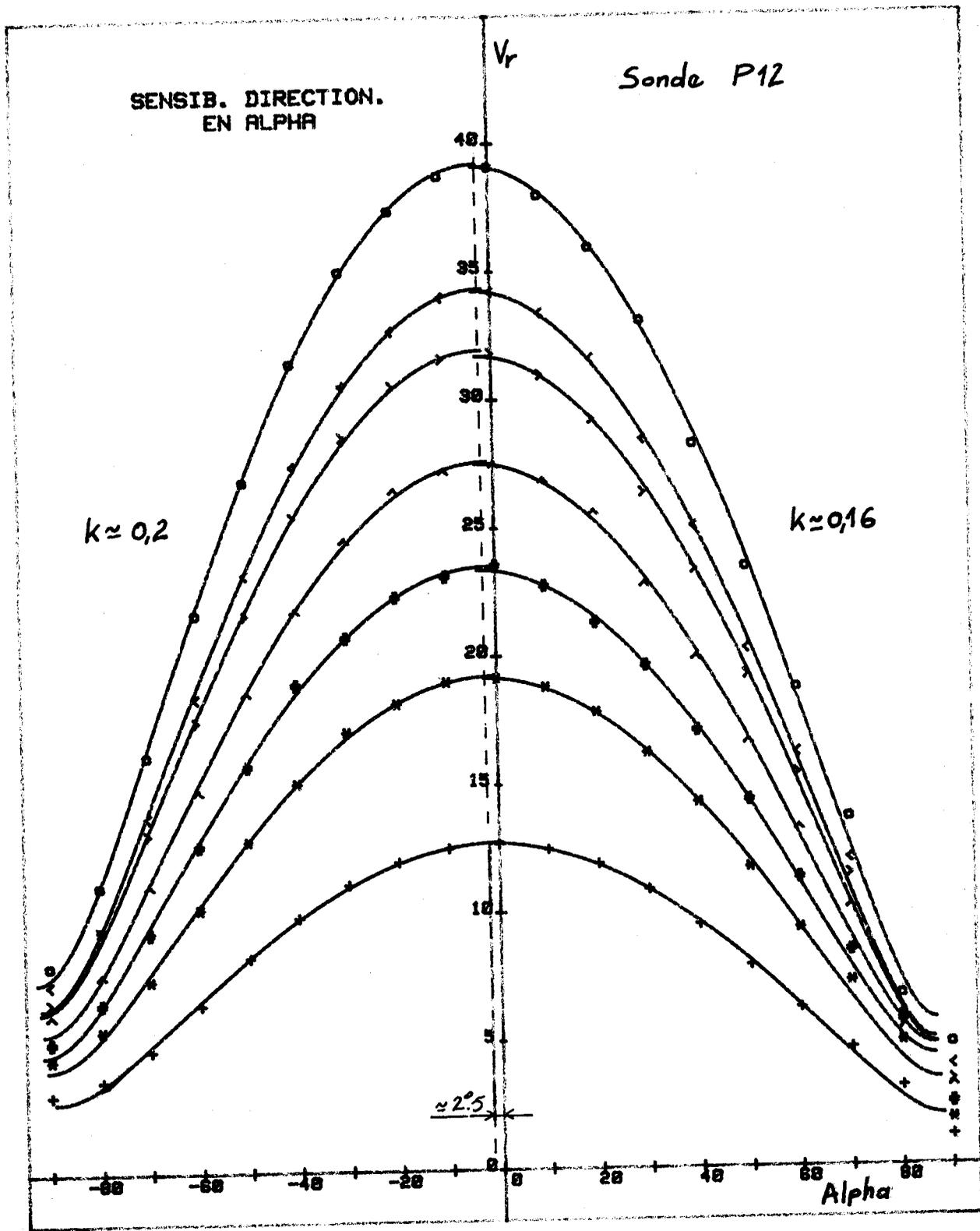
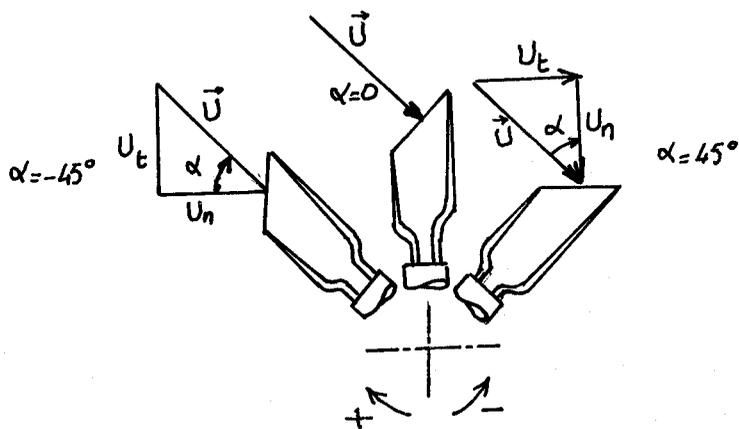


FIG 18



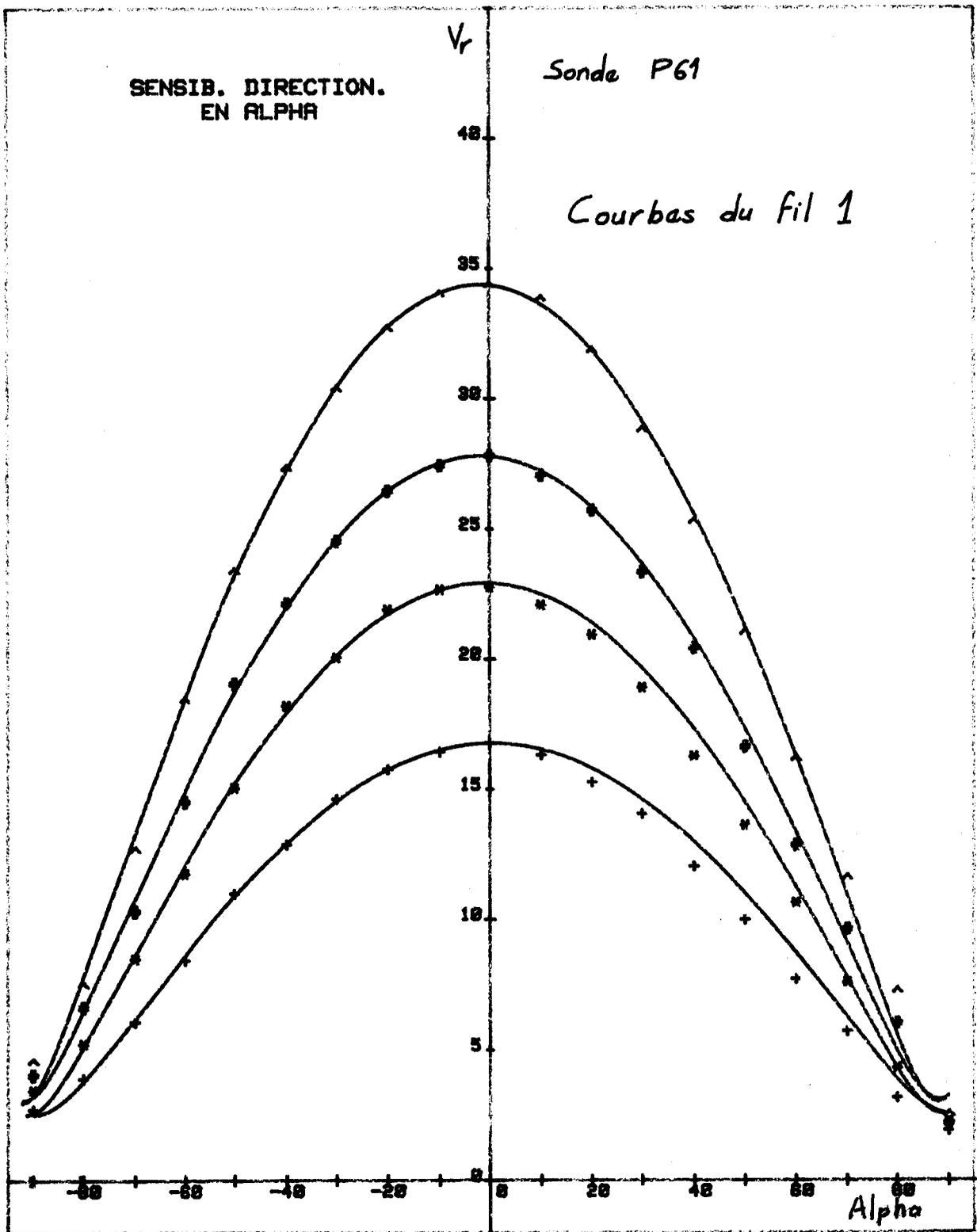
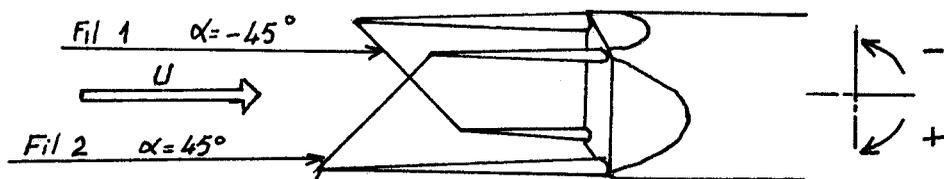
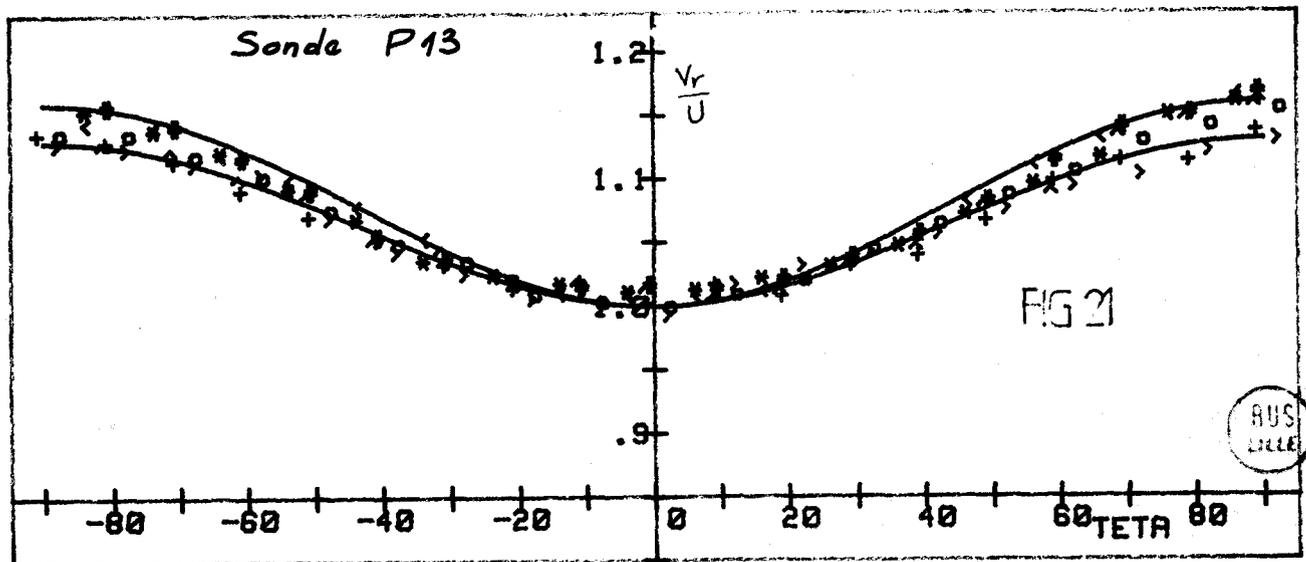
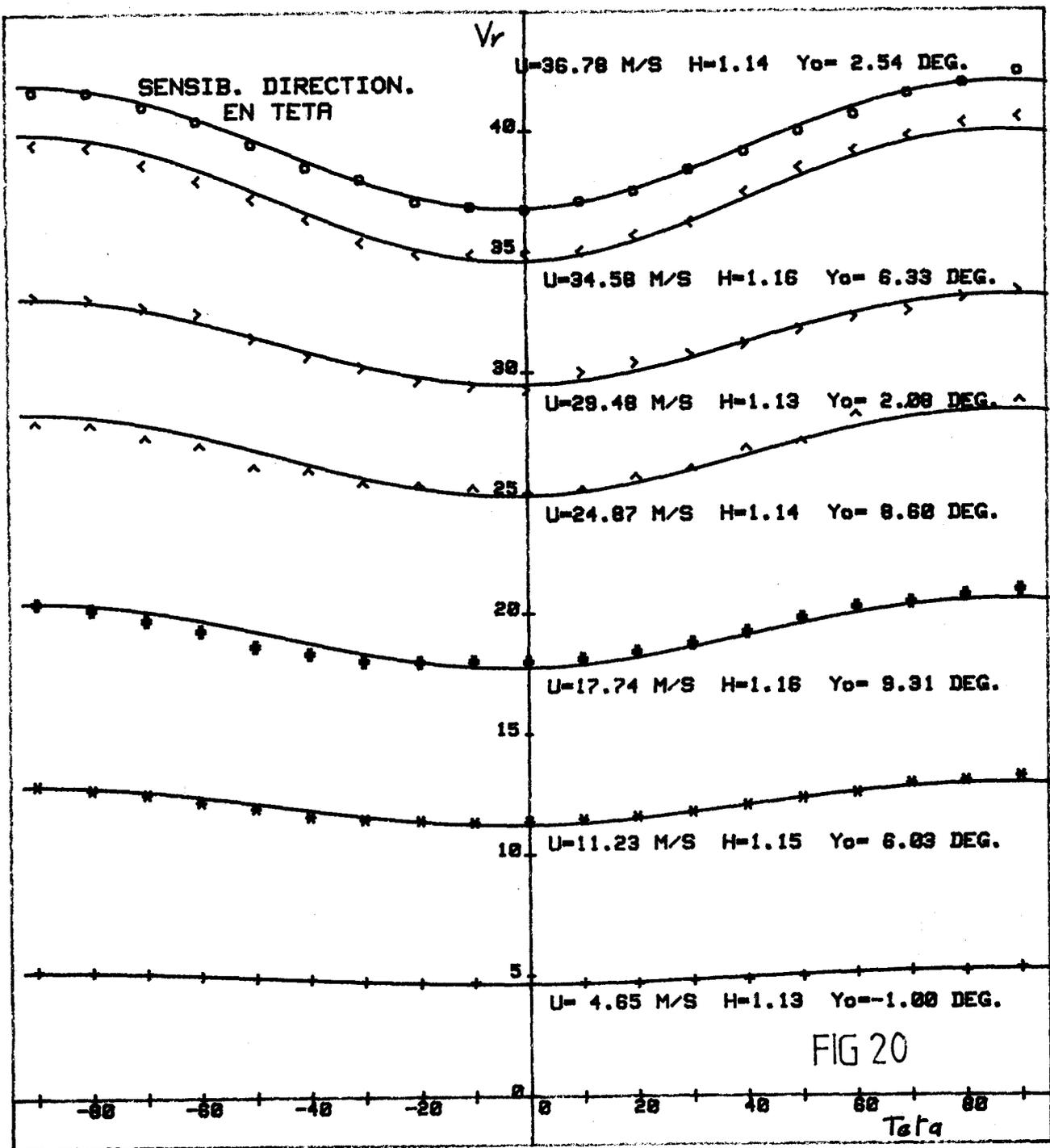


FIG 19





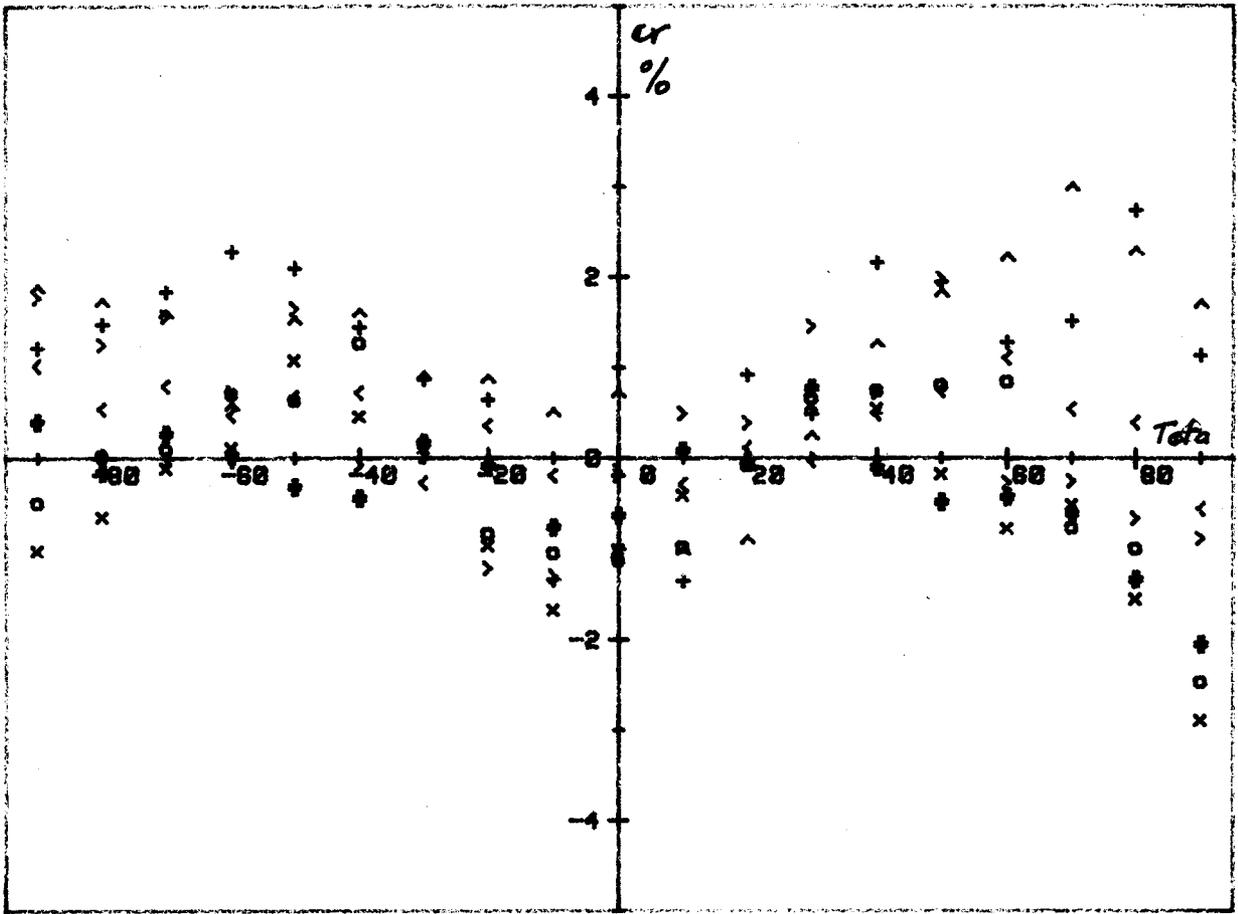
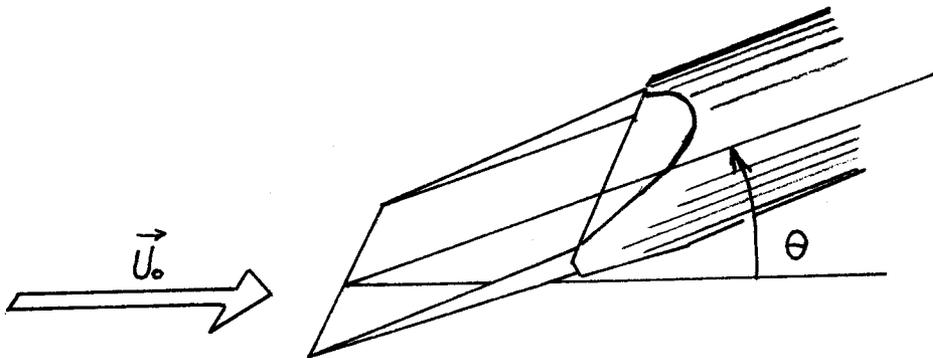


FIG 22



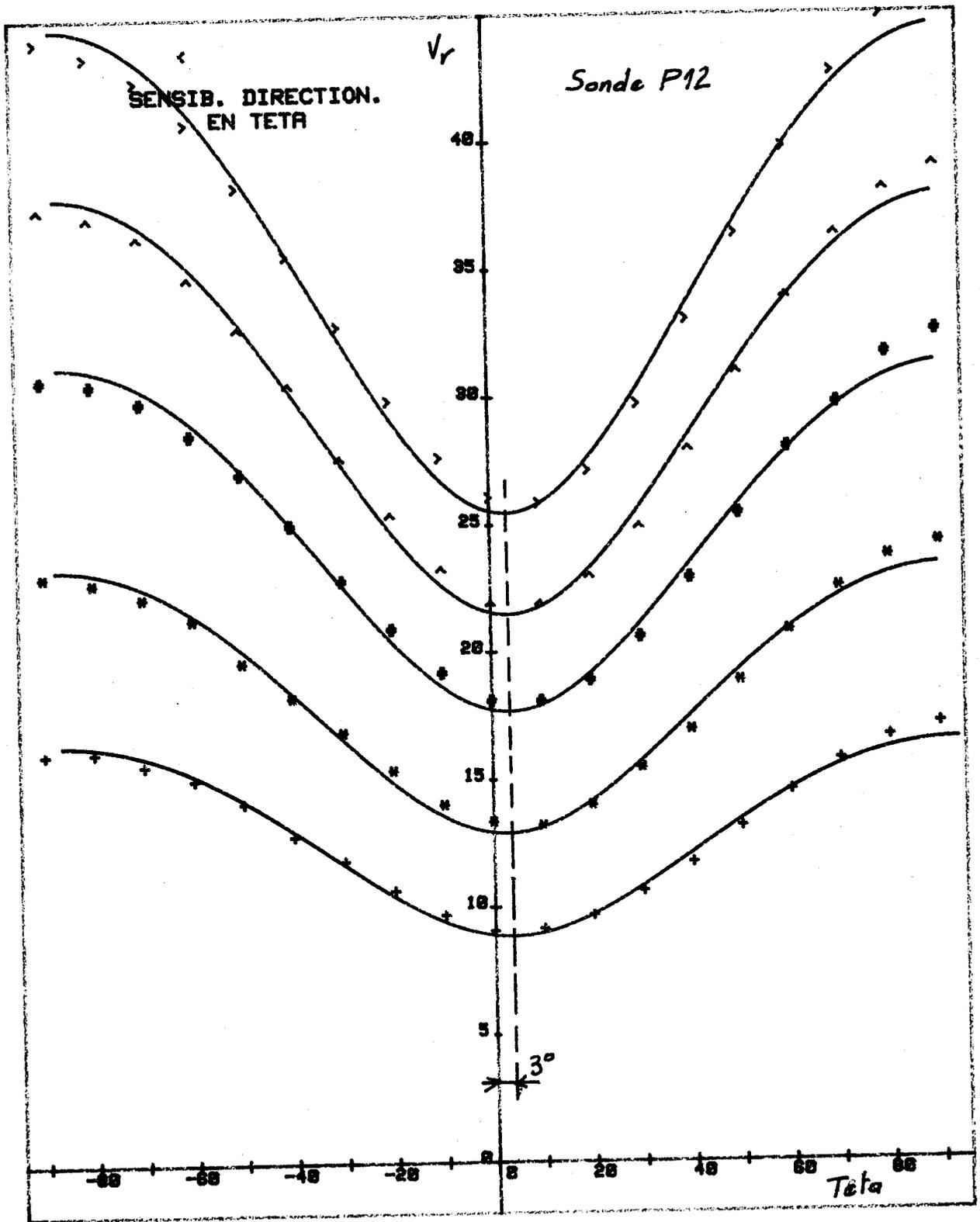


FIG 23



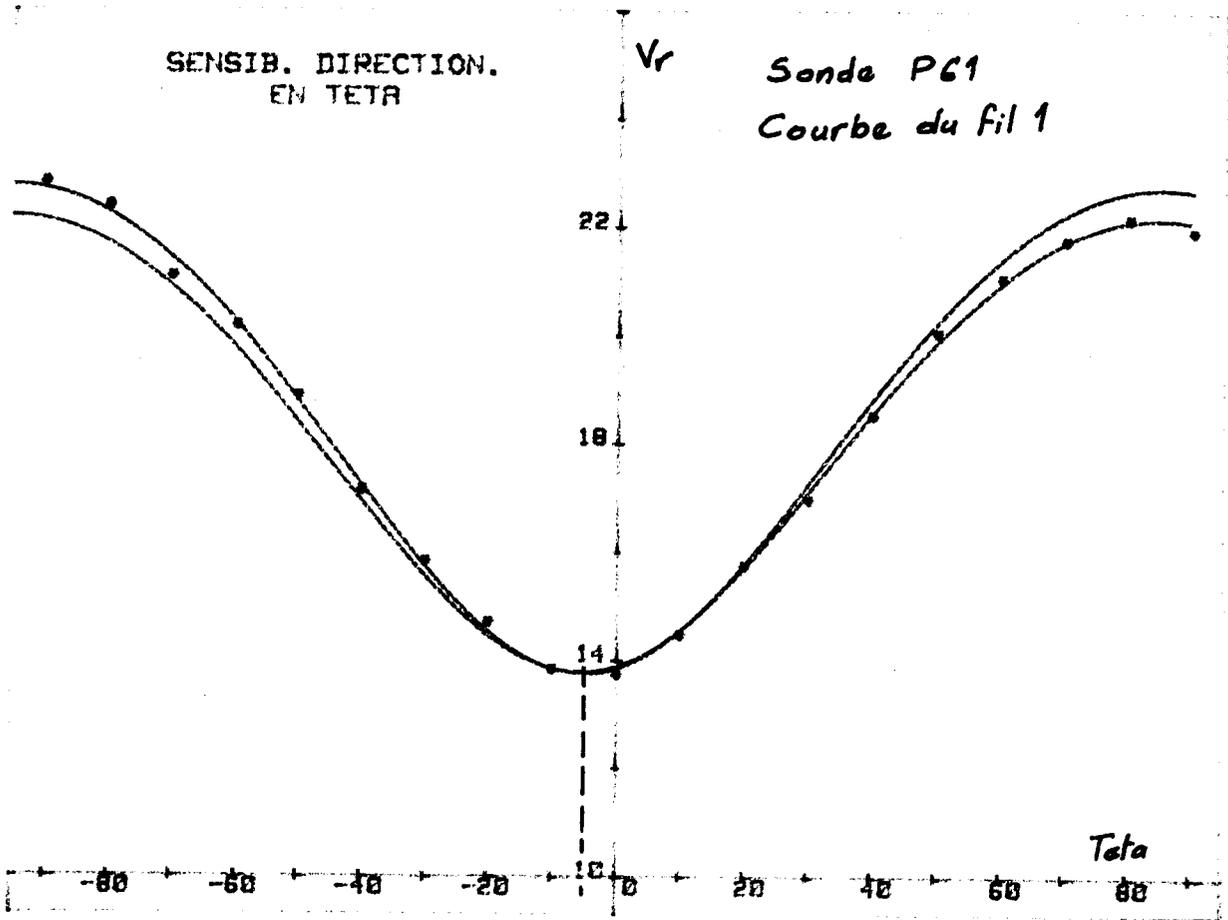


FIG 24

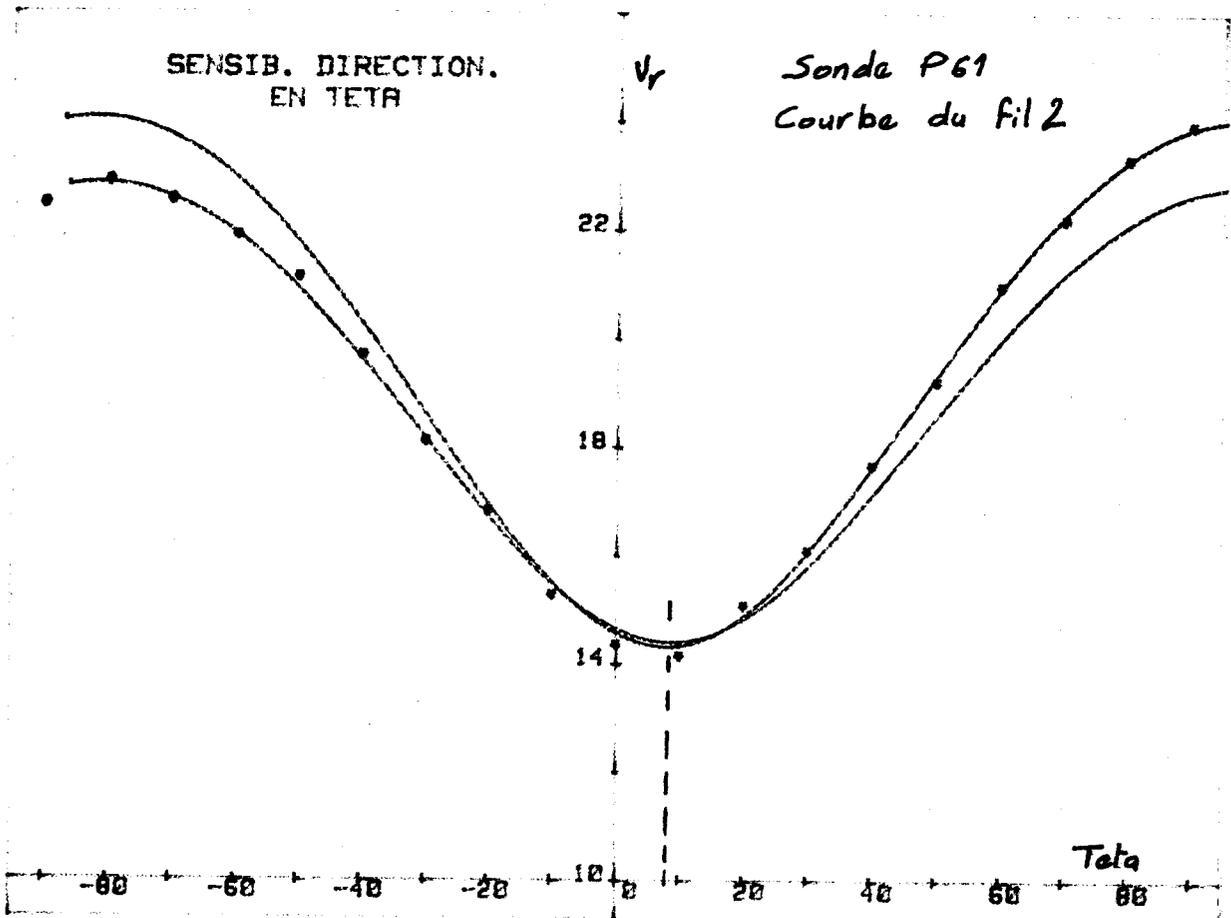


FIG 25

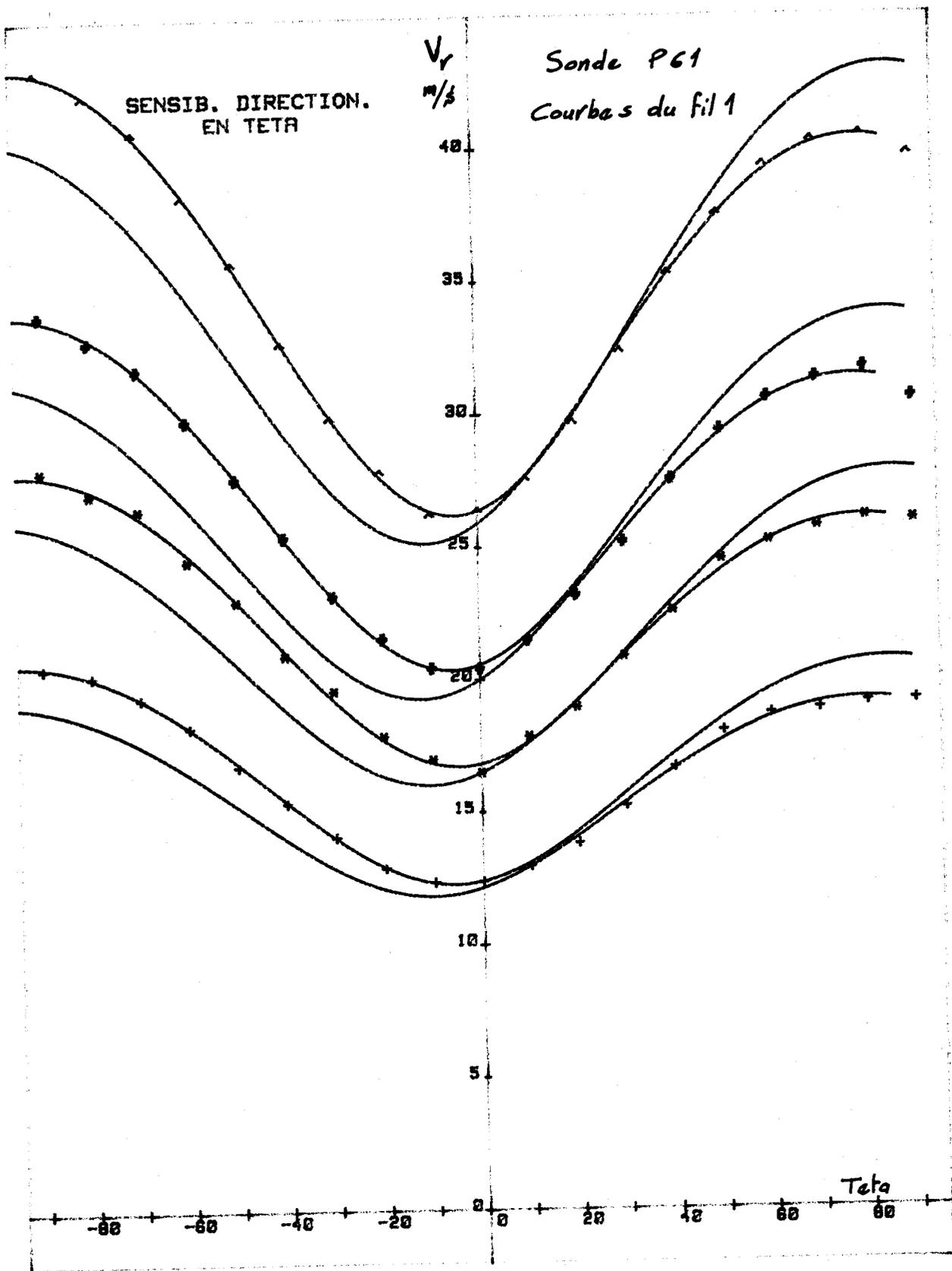


FIG 26



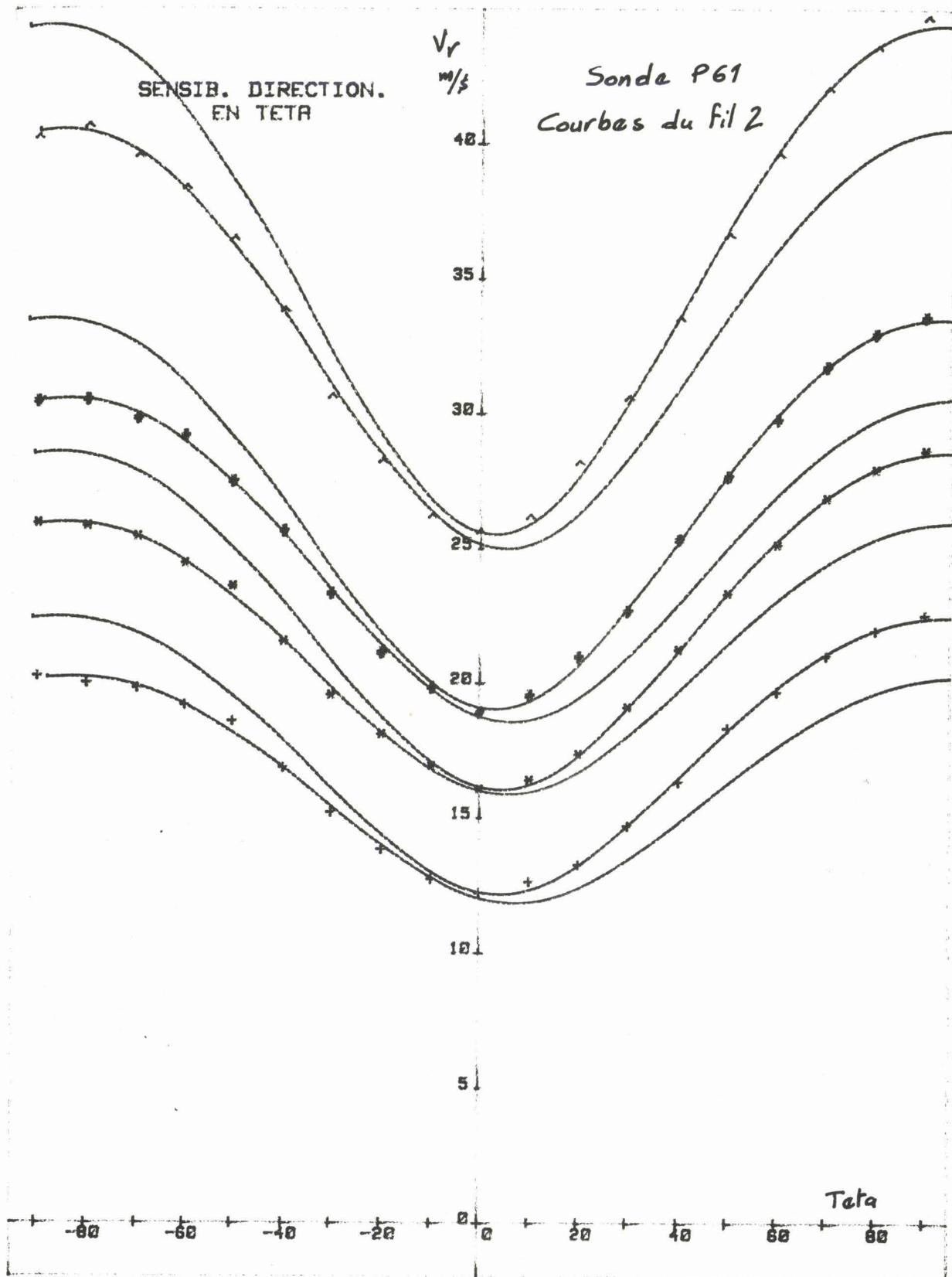


FIG 27

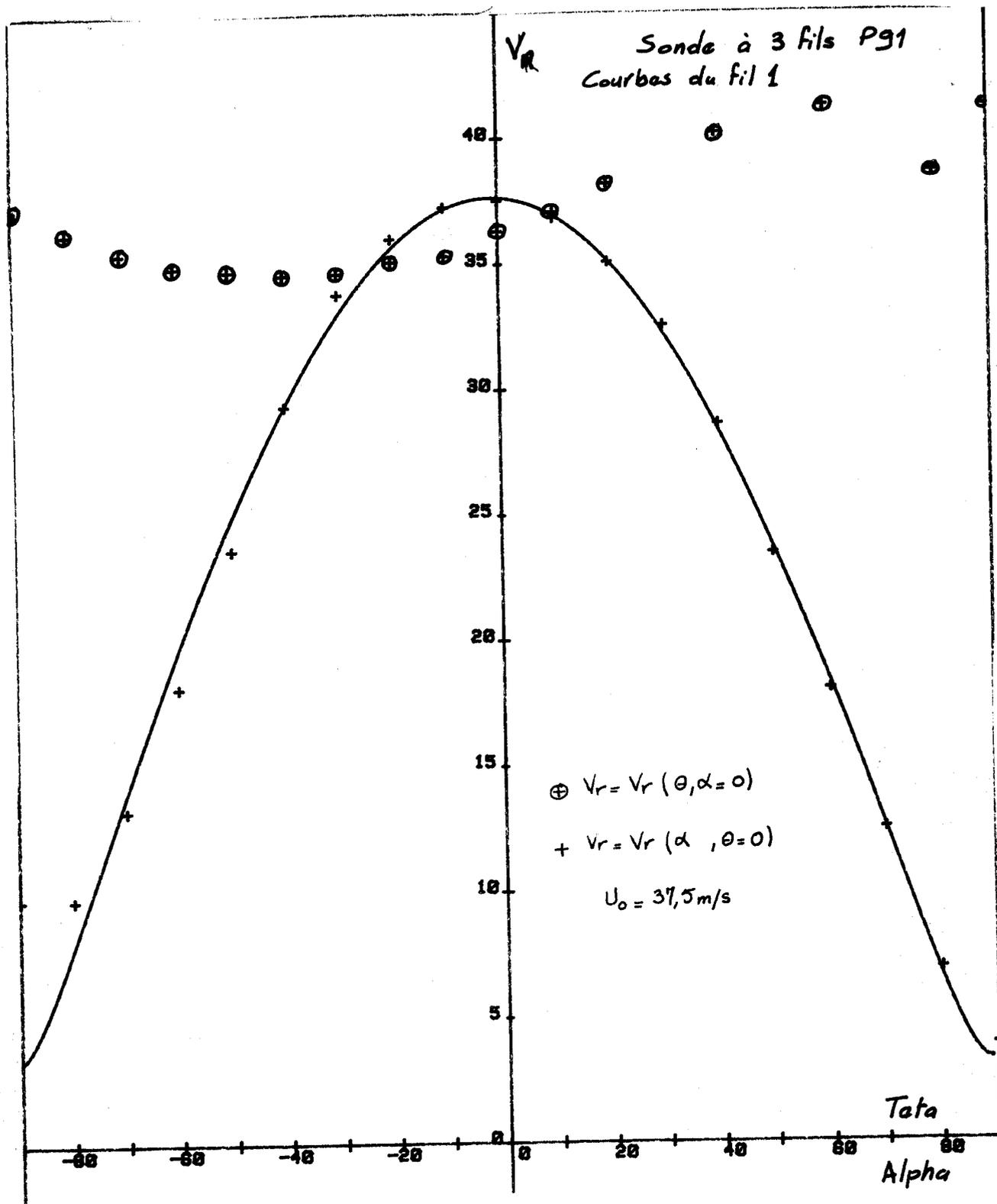


FIG 2B - Caractéristiques directionnelles
du fil 1 de la sonde P91

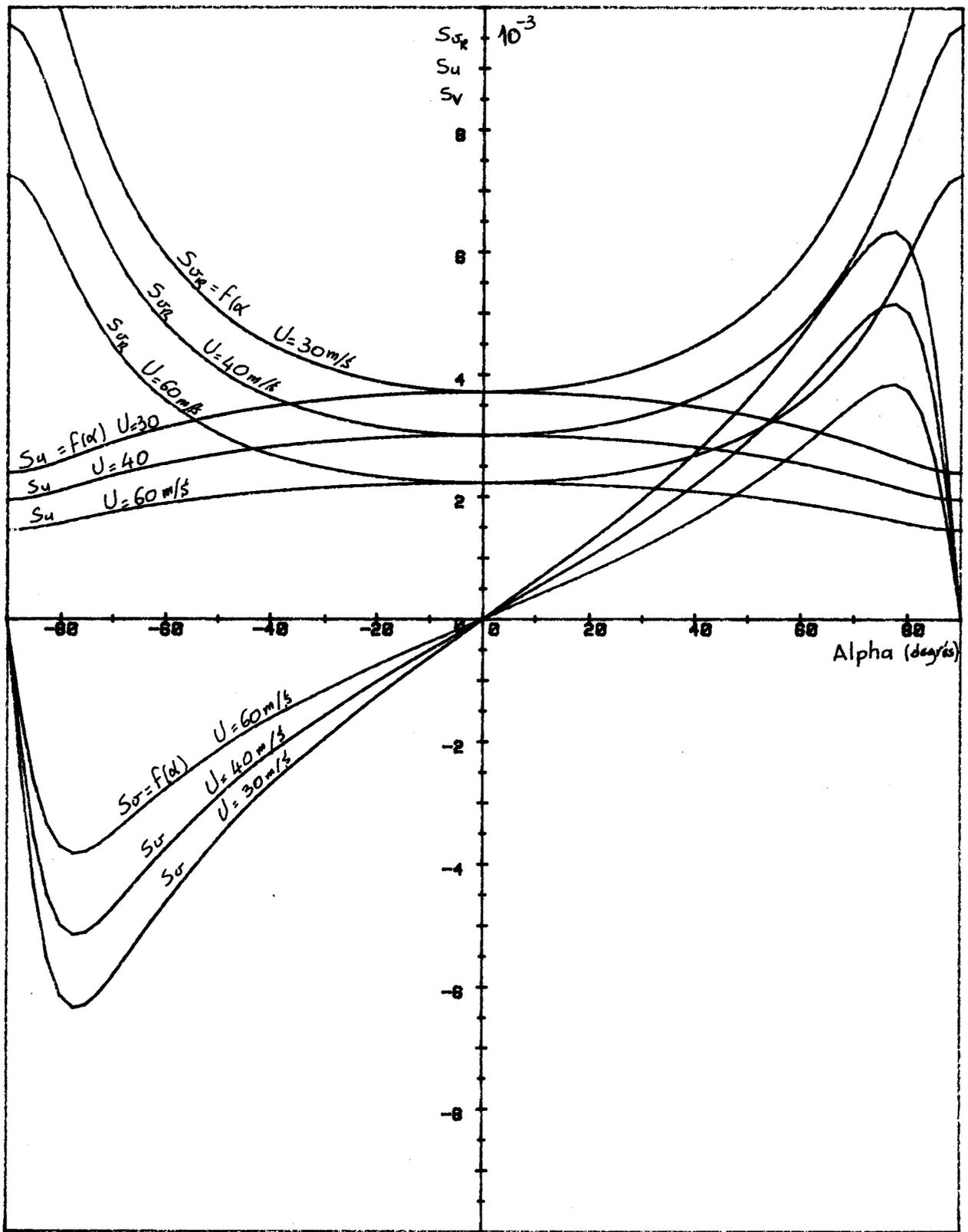


FIG 29

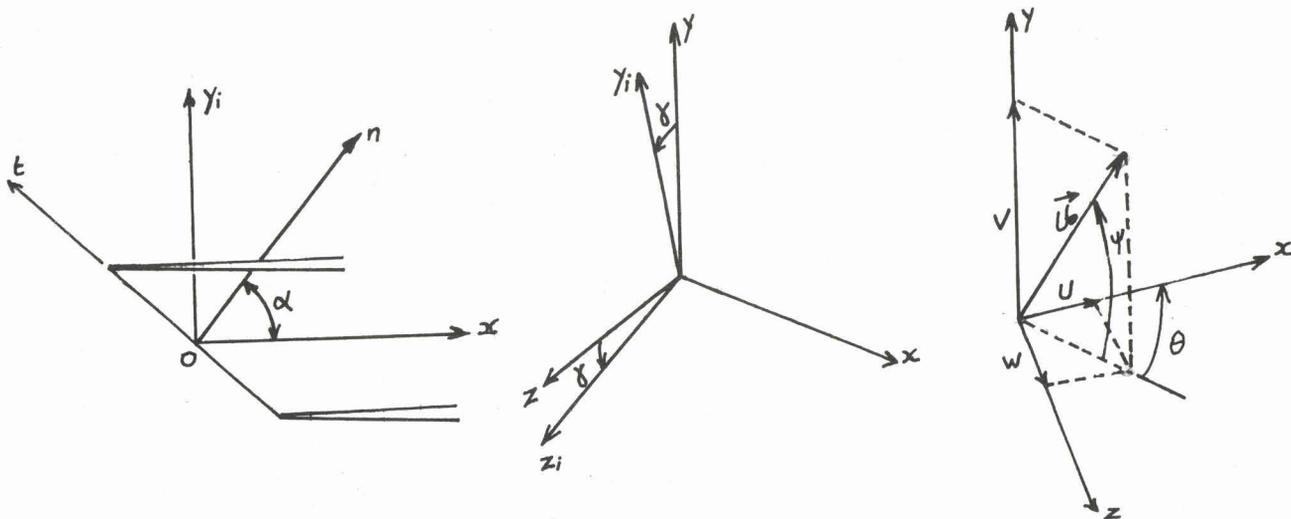


FIG 30

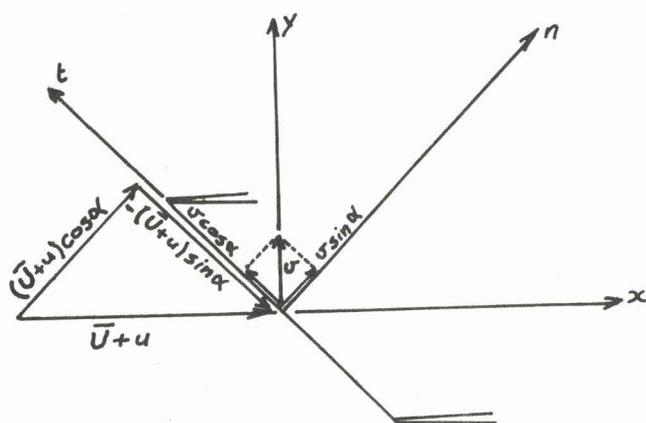


FIG 31

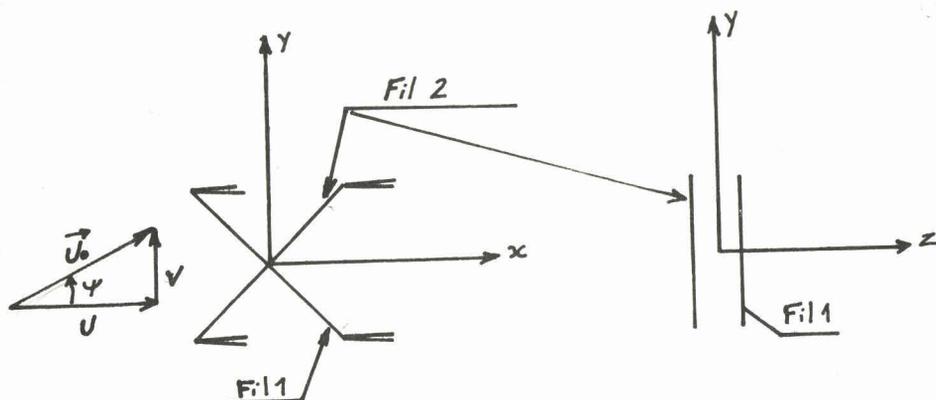


FIG 32

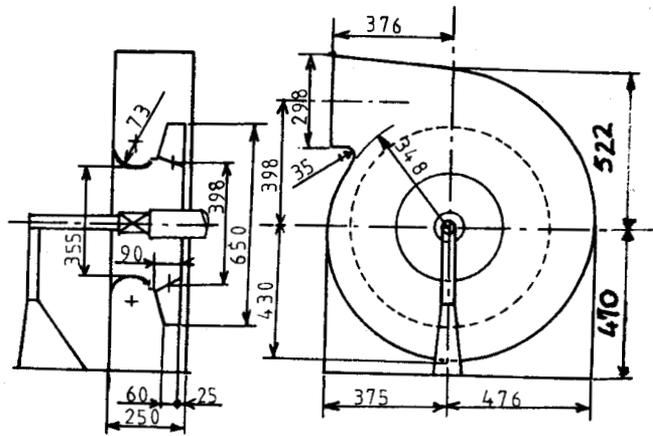


FIG 33 Schéma du Ventilateur

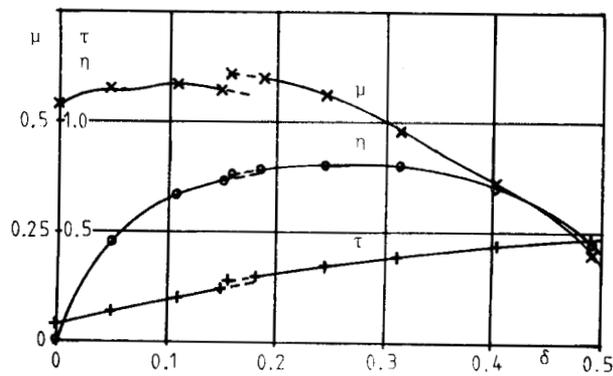


FIG 34 Caractéristiques du ventilateur

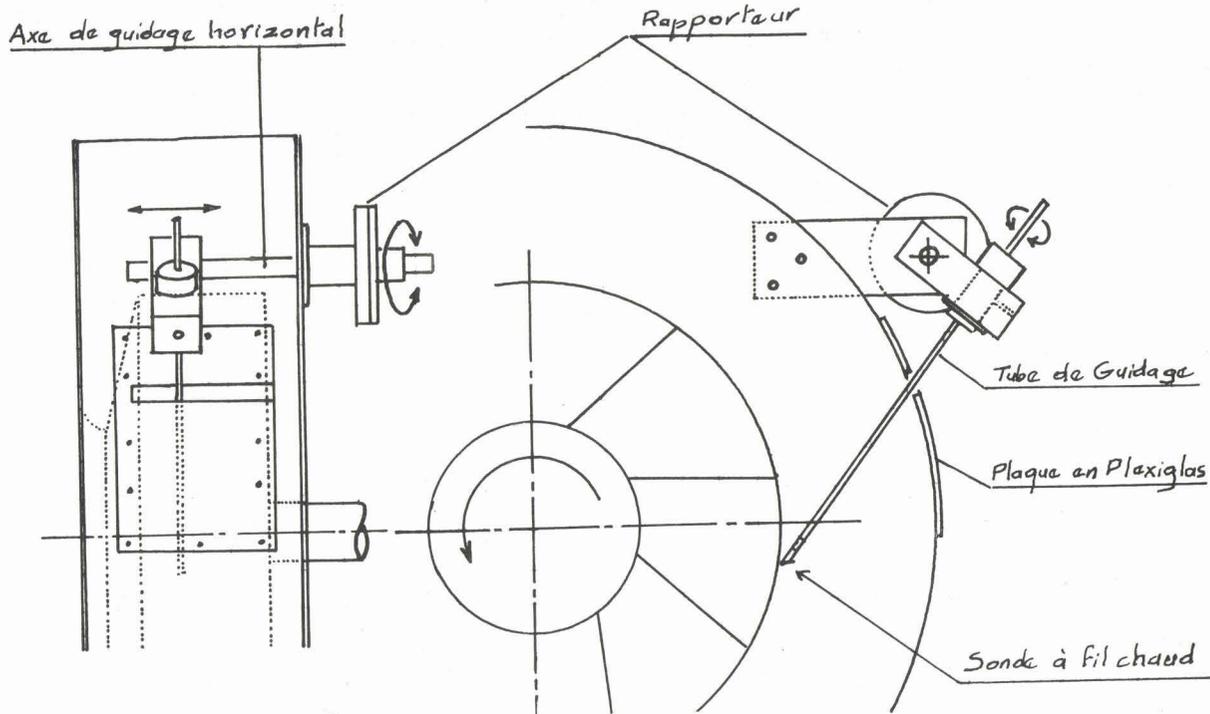


FIG 35 - Schéma du dispositif de manipulation

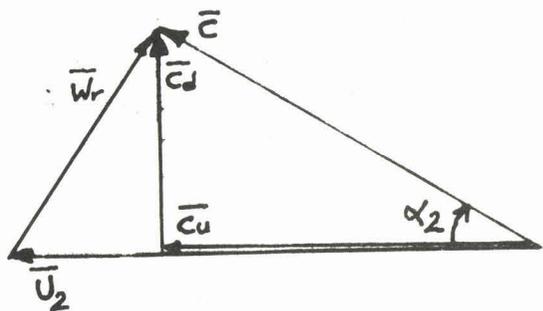


FIG 36 - Triangle des vitesses

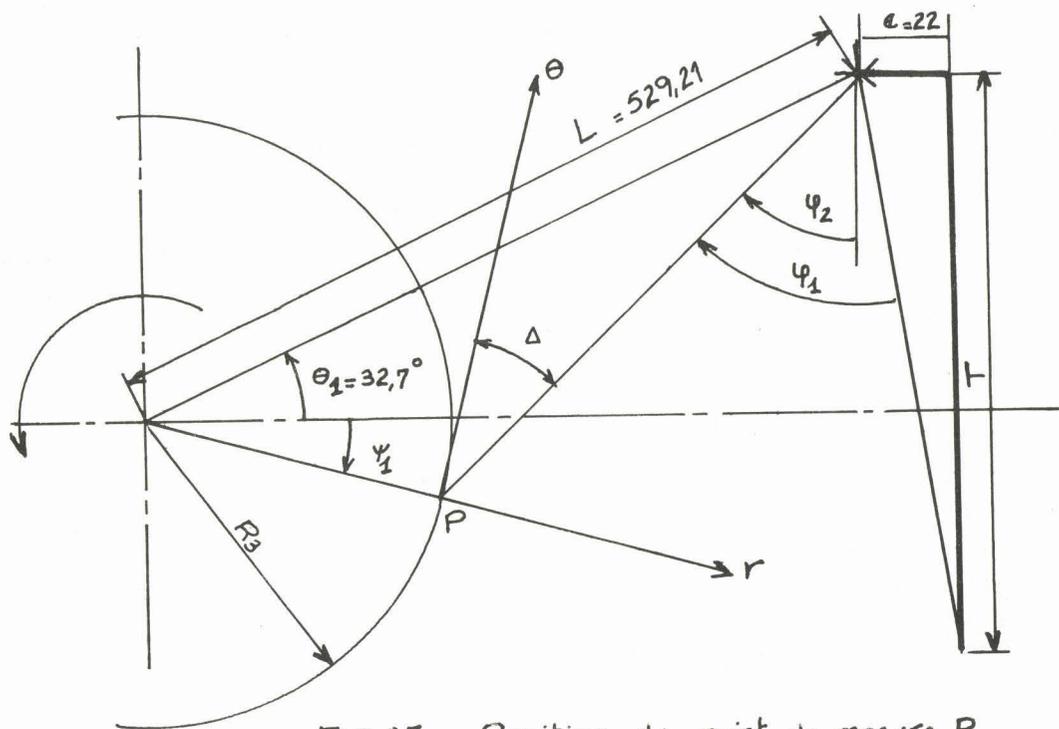


FIG 37 - Position du point de mesure P dans le référentiel fixe - Définition du référentiel tournant (r, θ, z) lié à la roue.

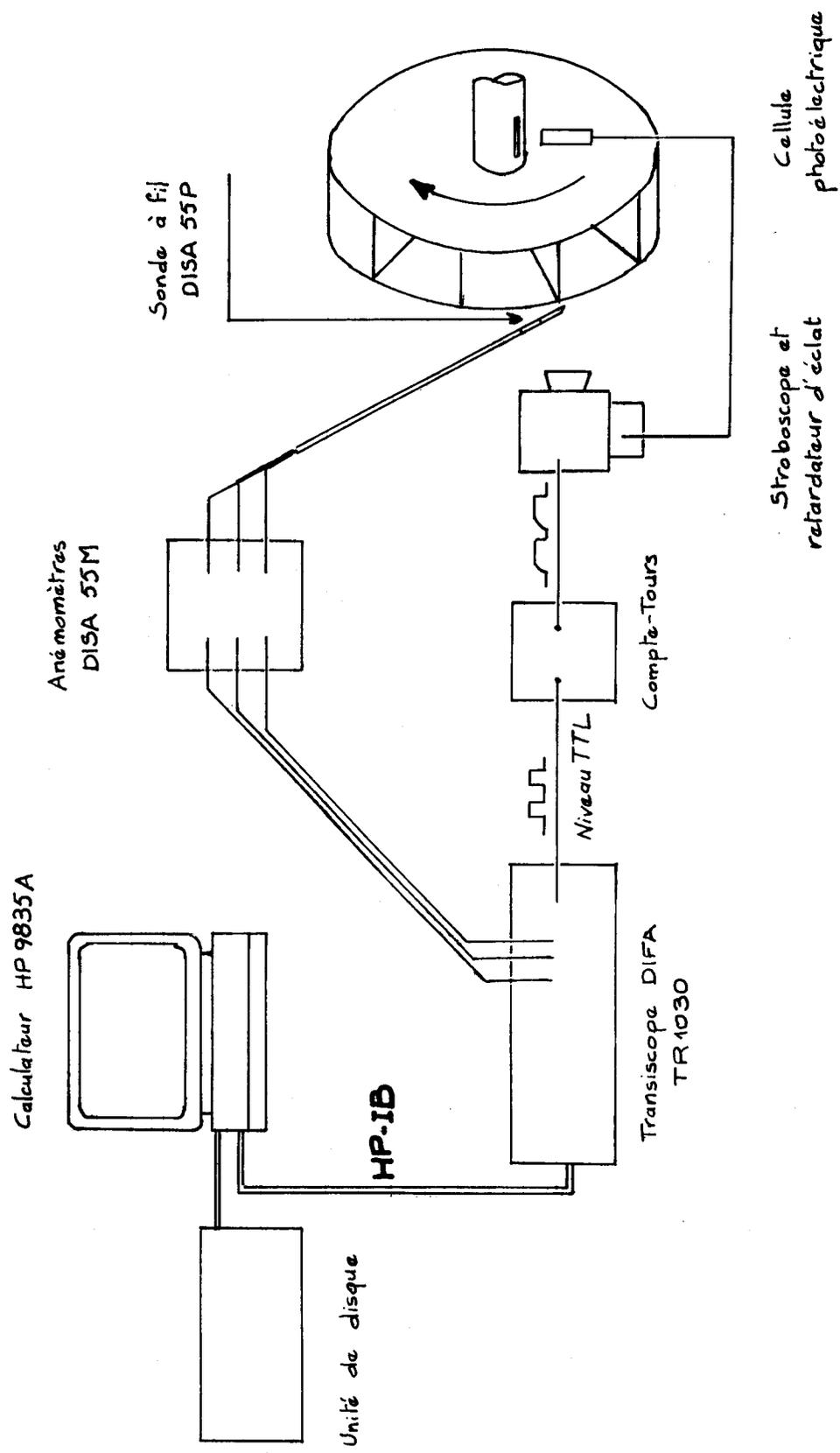


FIG 38 - Chaîne de mesure

X: 0.0
L SPEC 1

Y: 5.4512

#A: 1

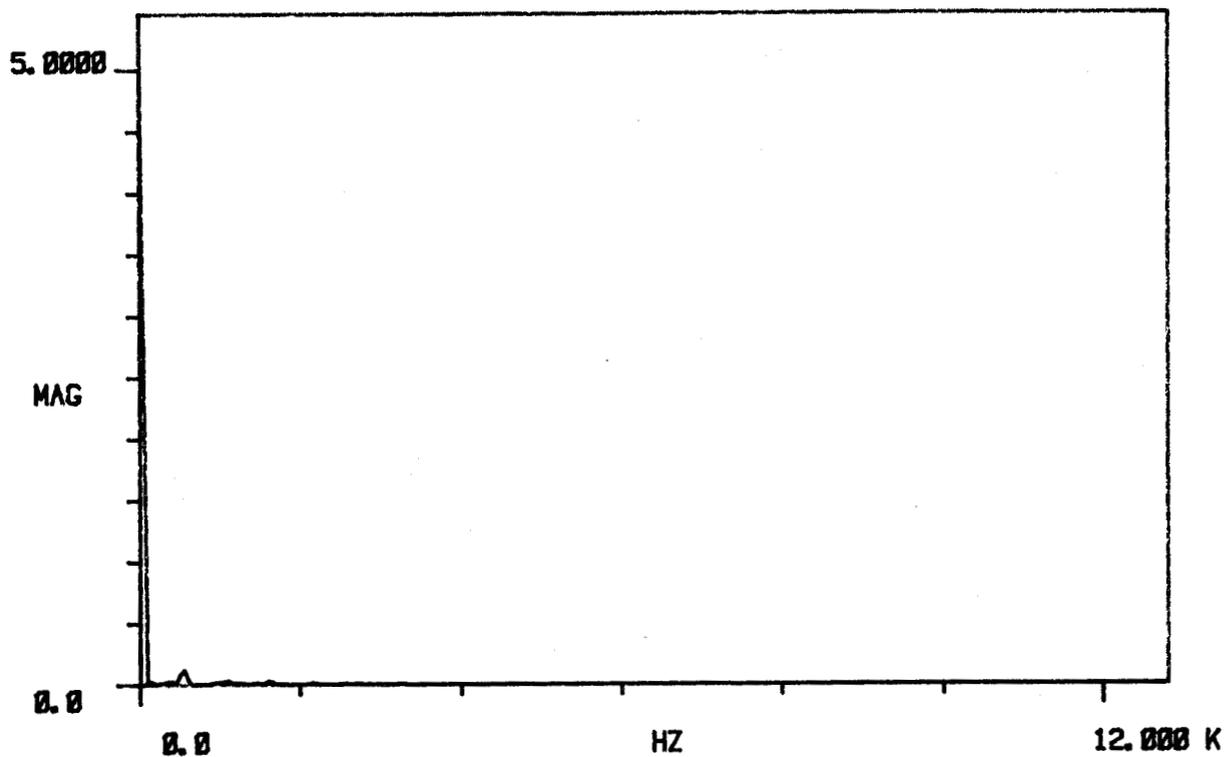


FIG 39a - Spectre linéaire

X: 550.00
L SPEC 1

Y: 118.04 m

#A: 1

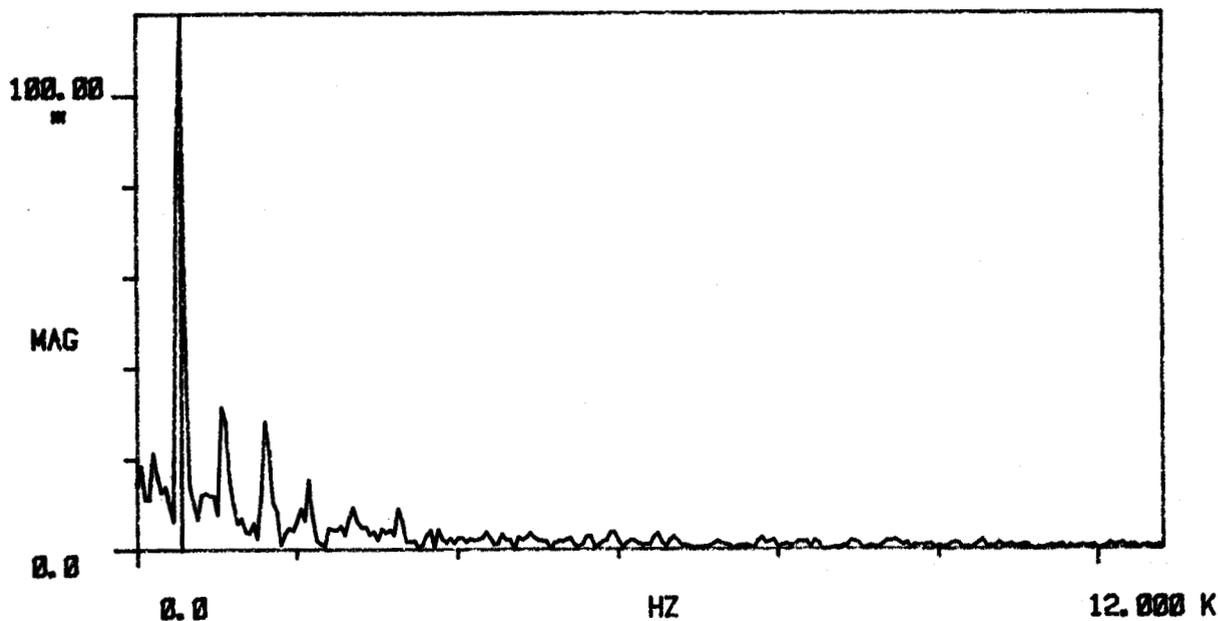


FIG 39b - Spectre linéaire de la composante alternative

BUS
LILLE

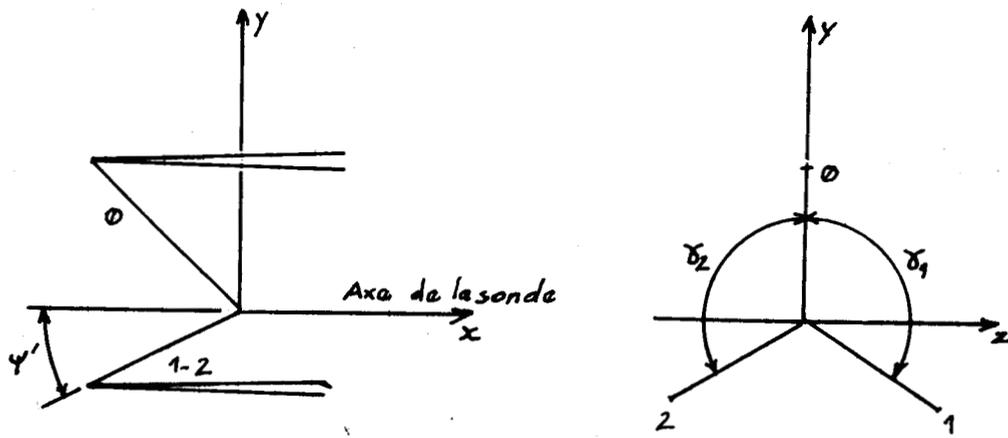


FIG 40 - Orientations
de la sonde à un fil incliné

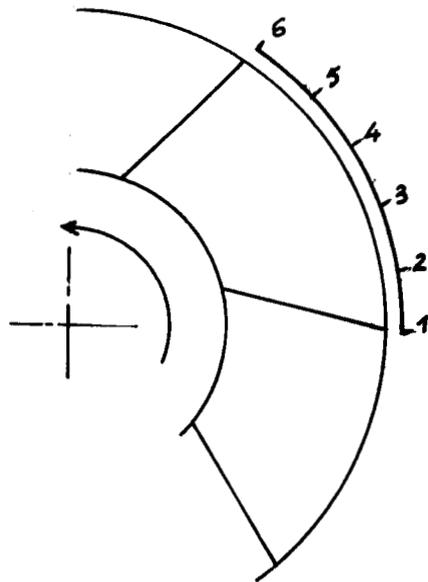


FIG 41 - Positions des points
de mesure dans la
référéntiel mobile

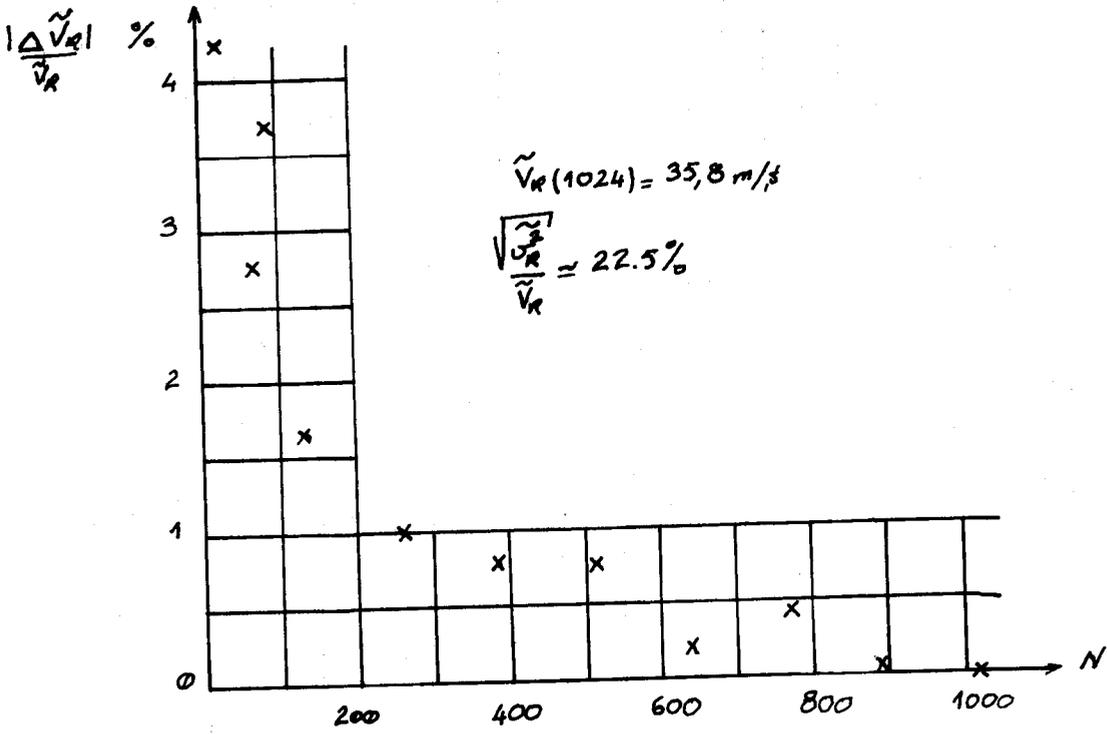


FIG 42a

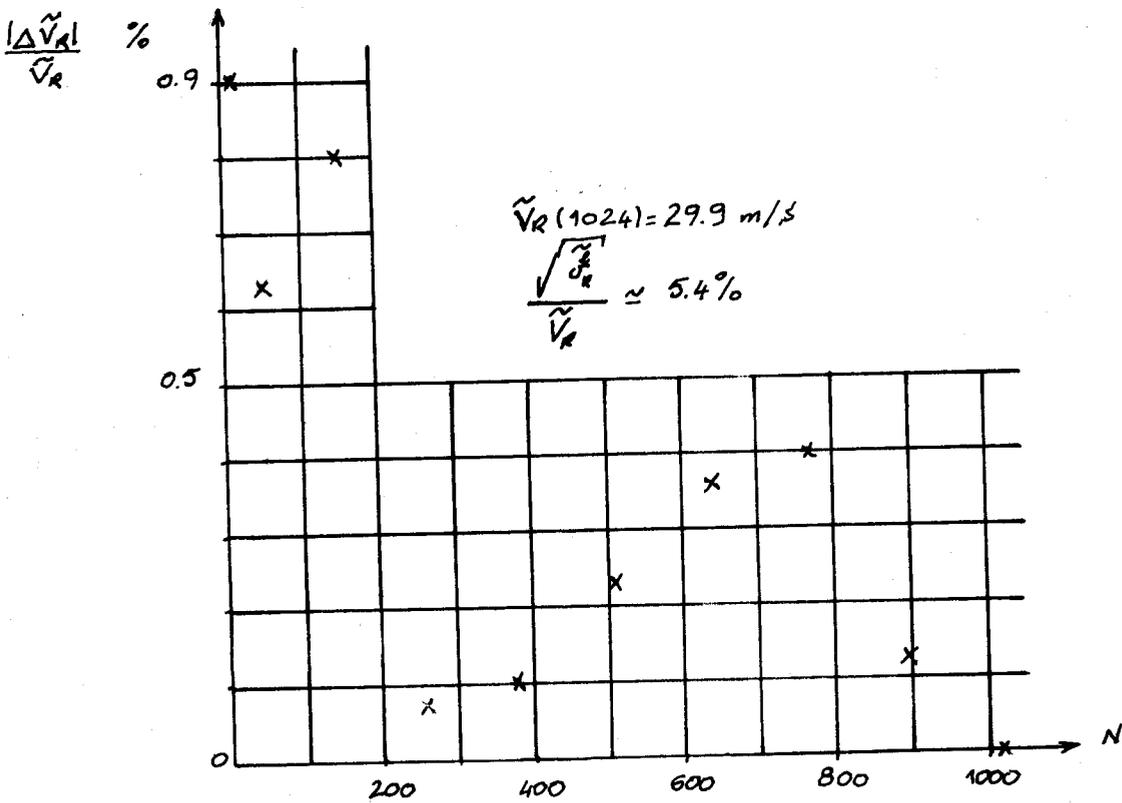


FIG 42b



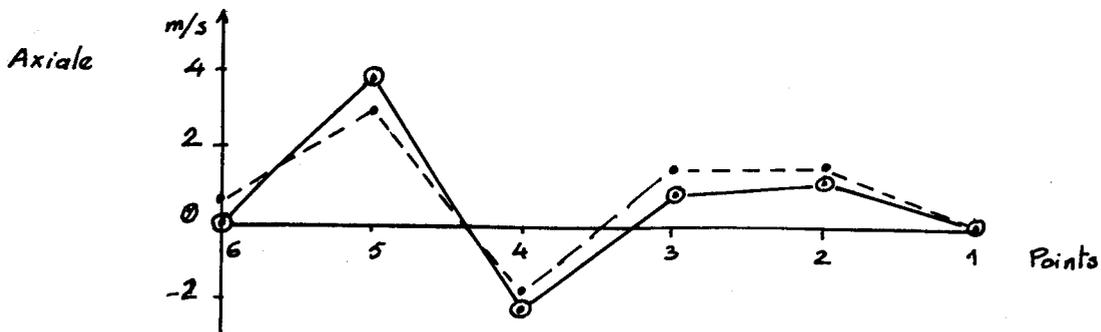
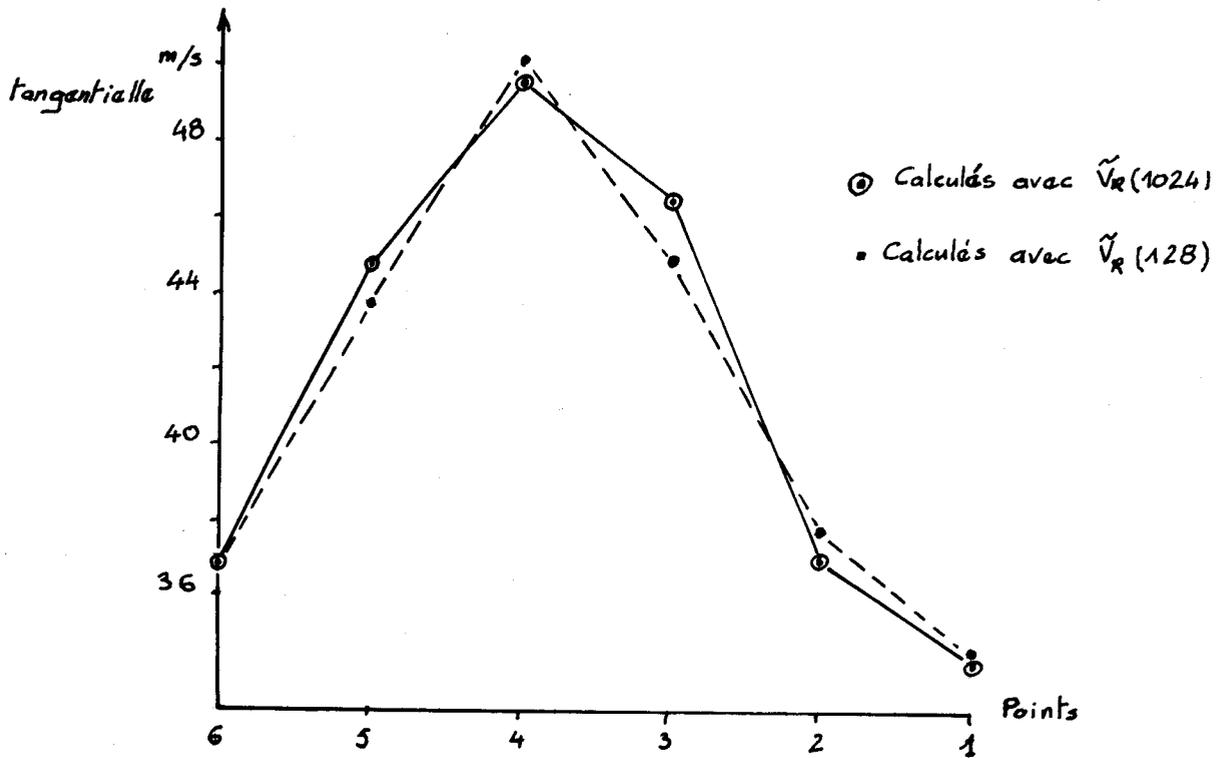
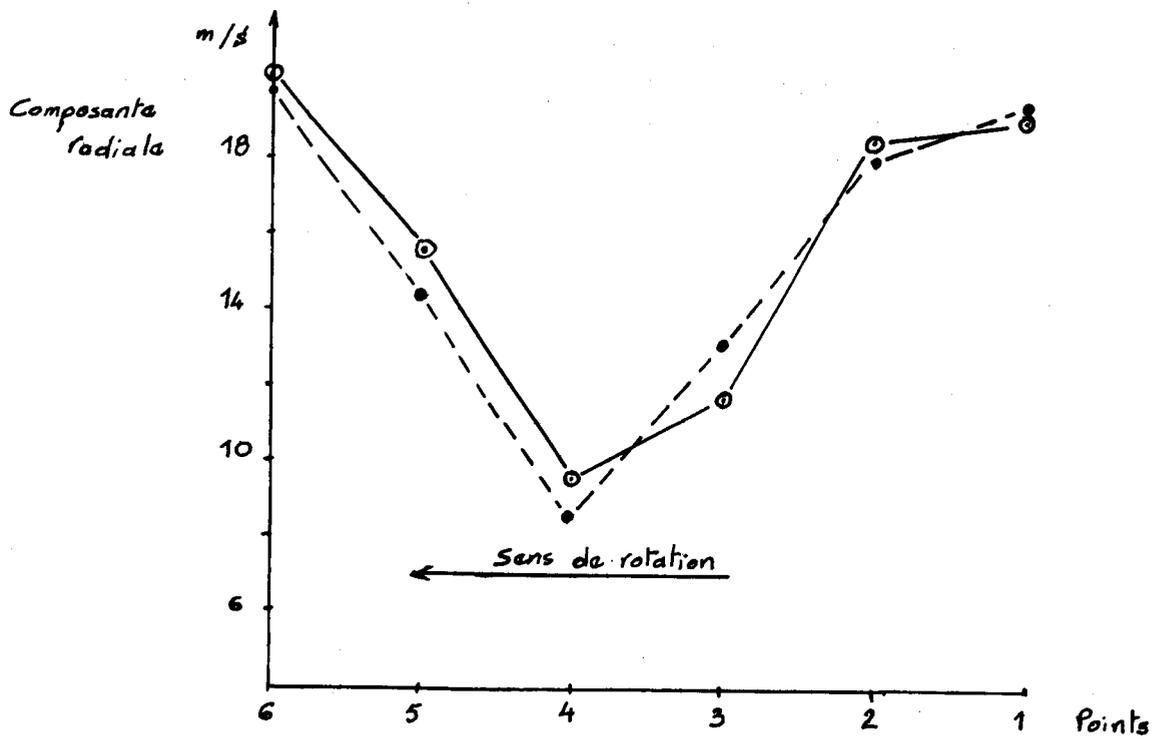


FIG 43 - Profils des composantes dans le référentiel lié à la roue

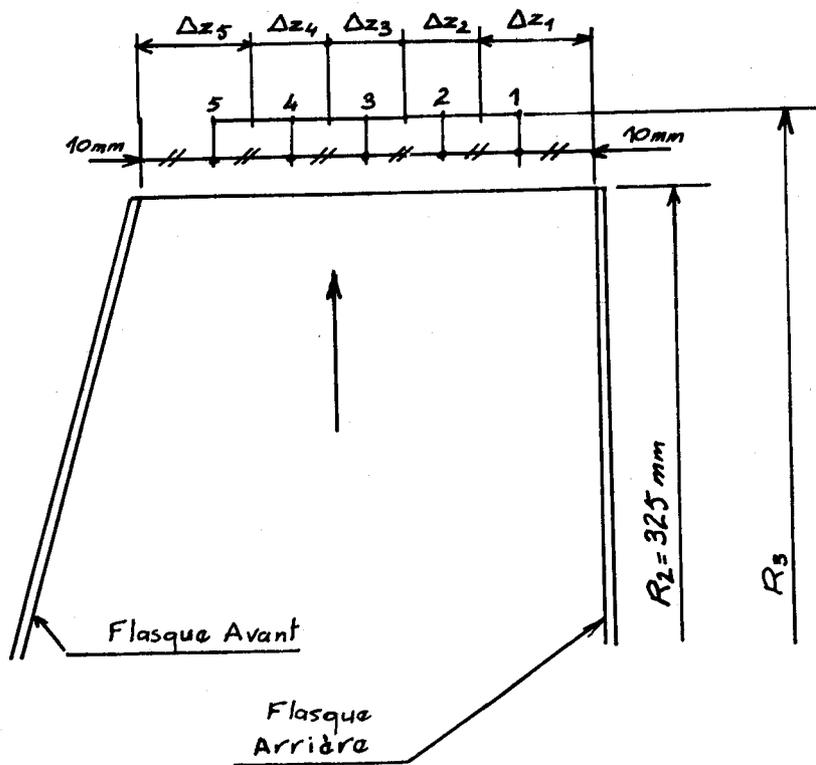


FIG 44 - Position des plans de mesure

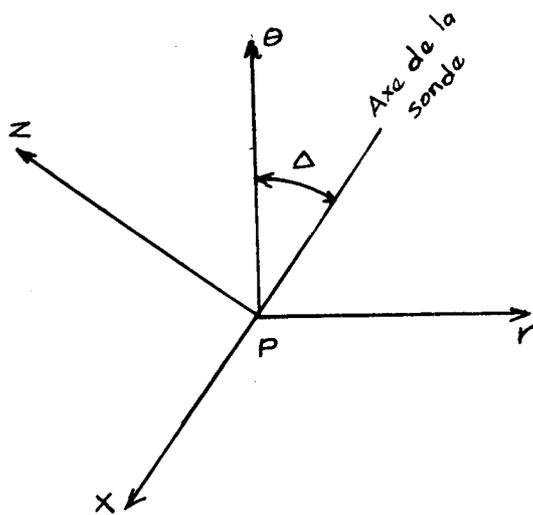


FIG 45

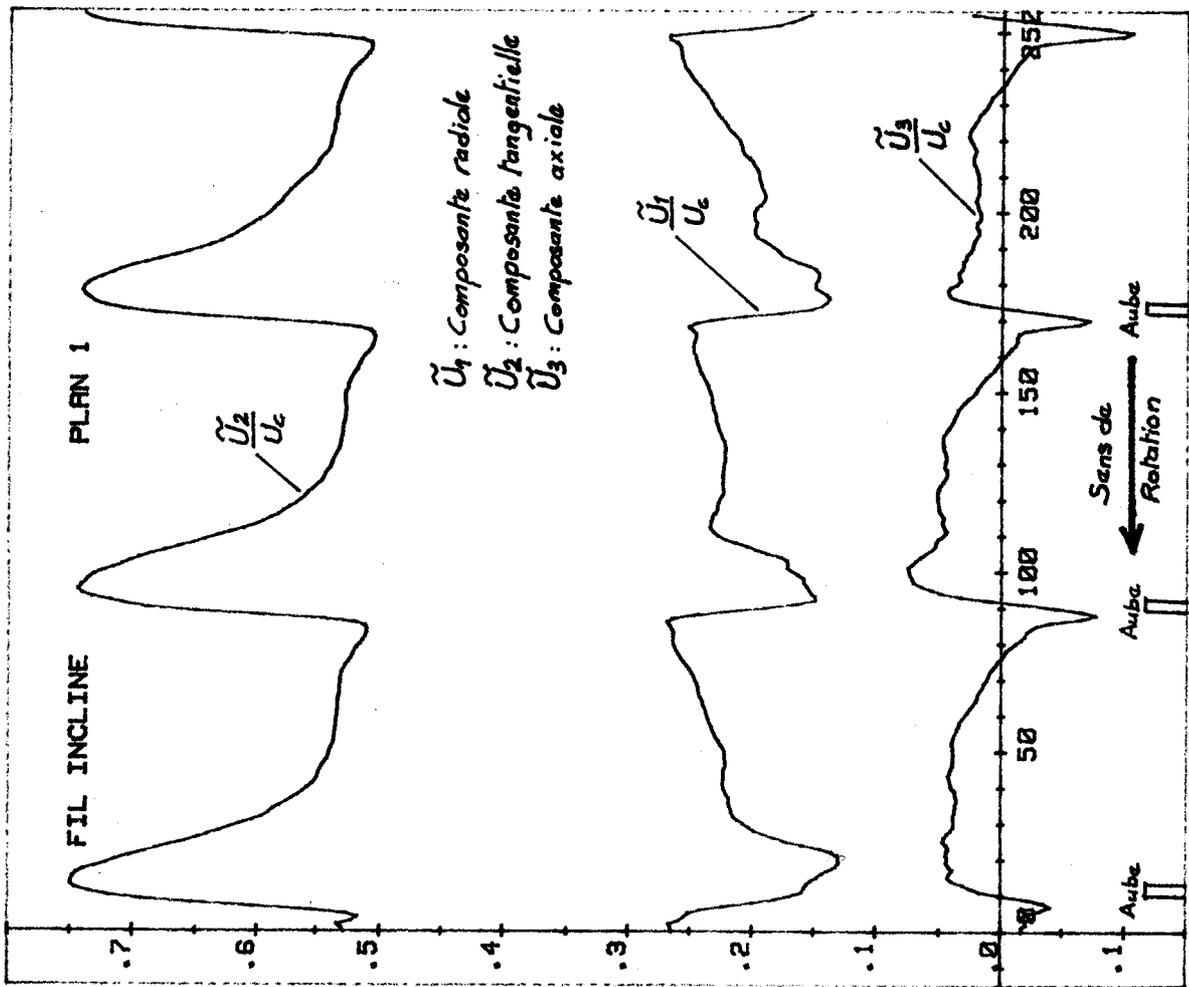


FIG 46

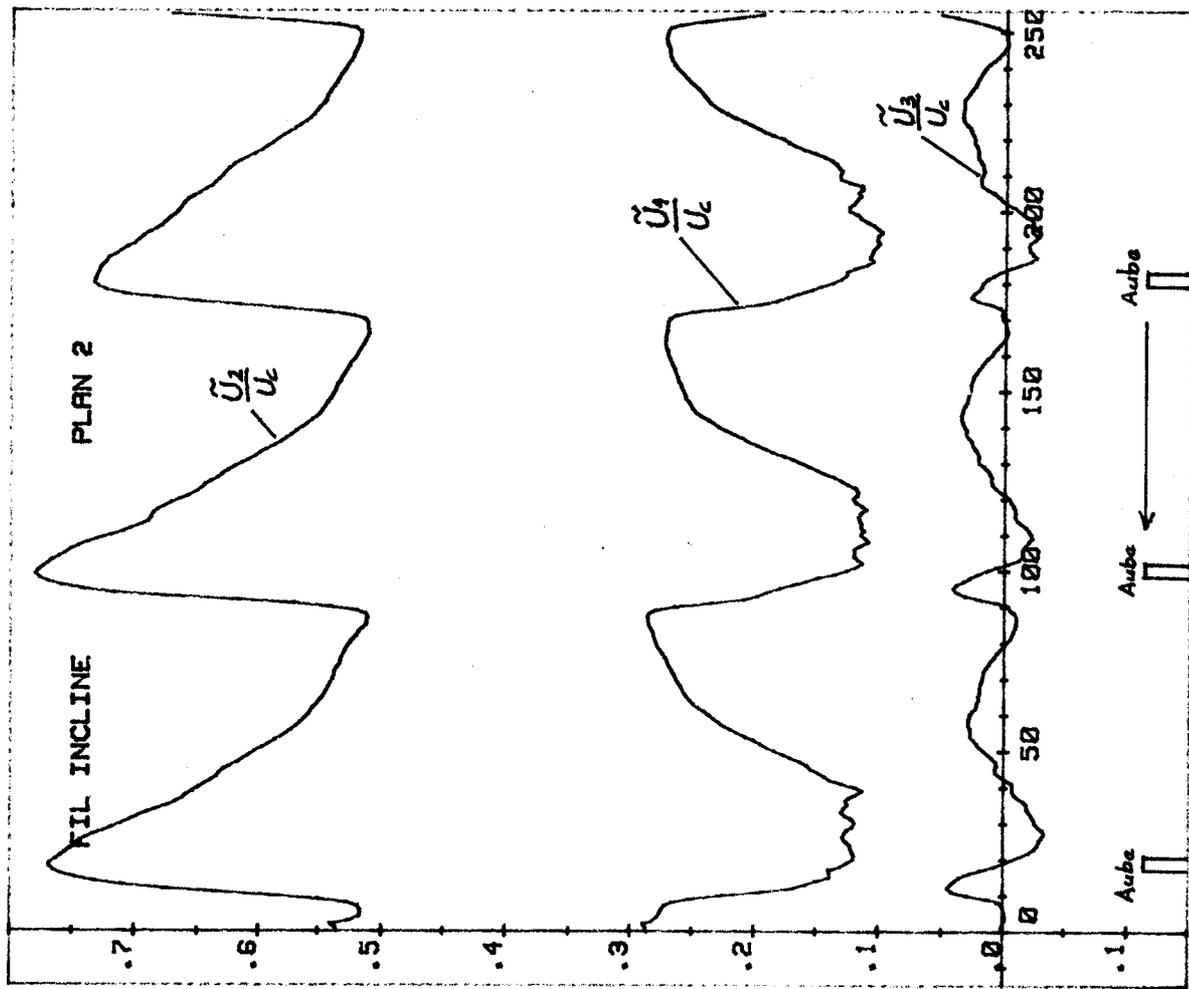


FIG 47

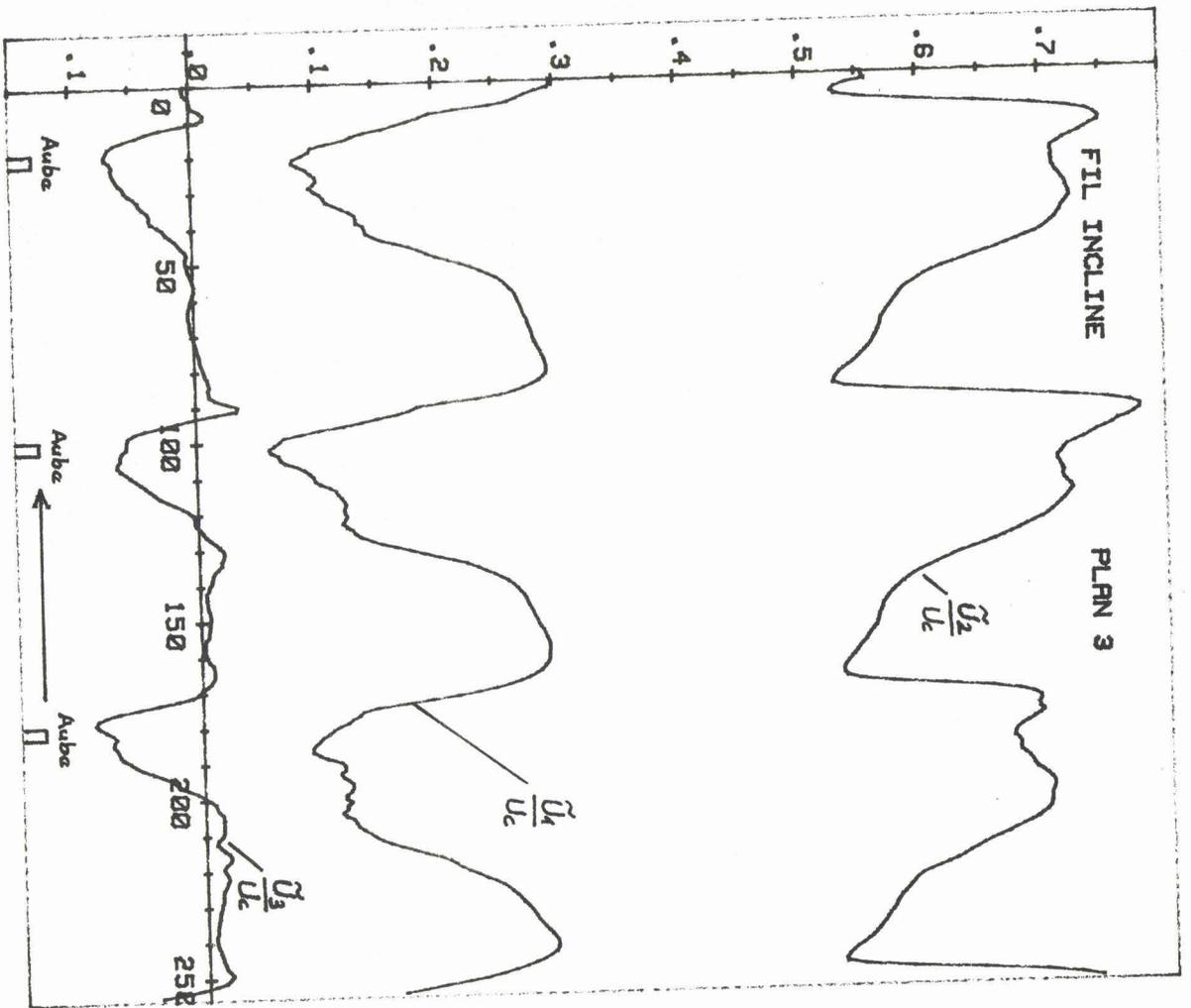


FIG 48

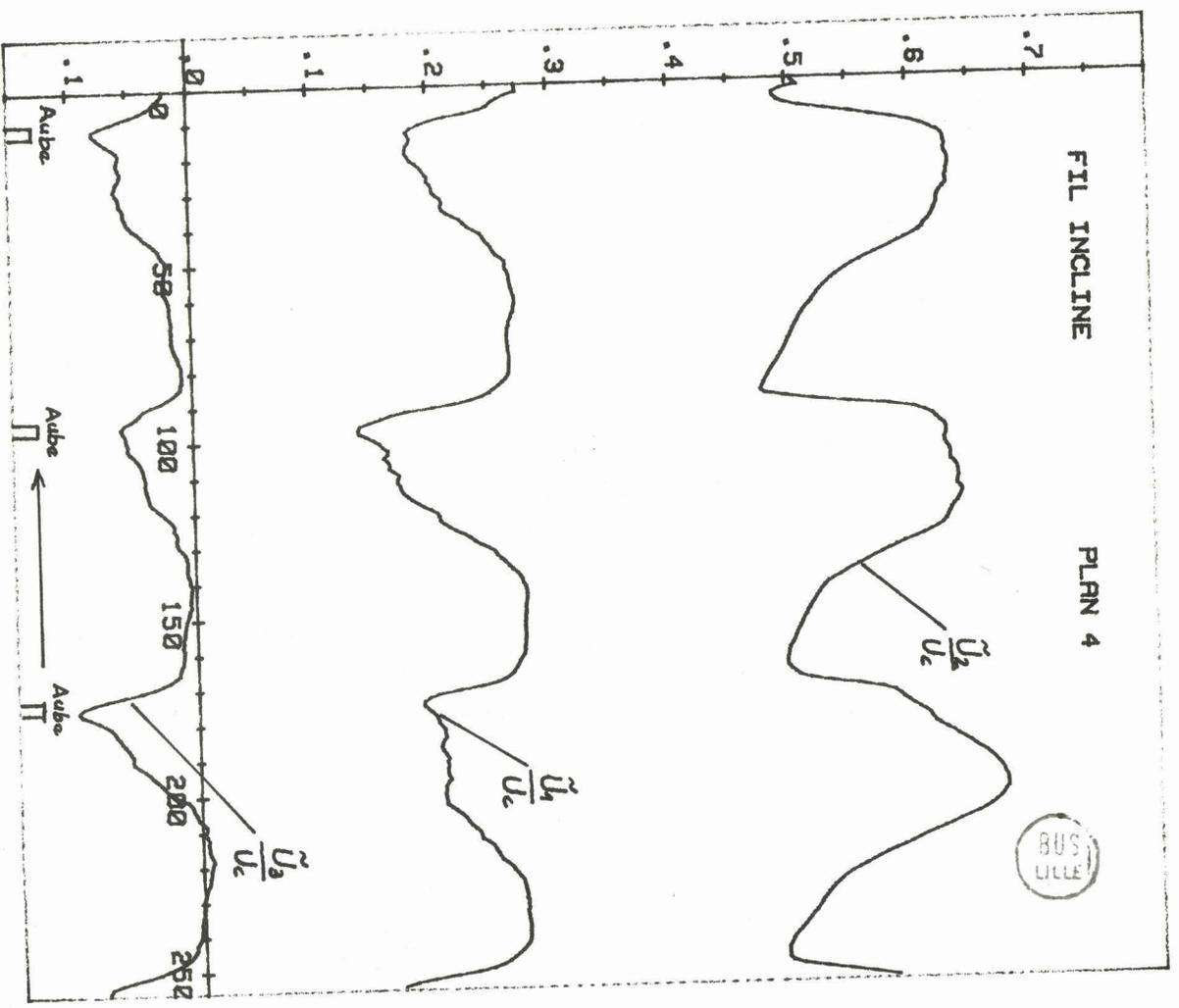


FIG 49

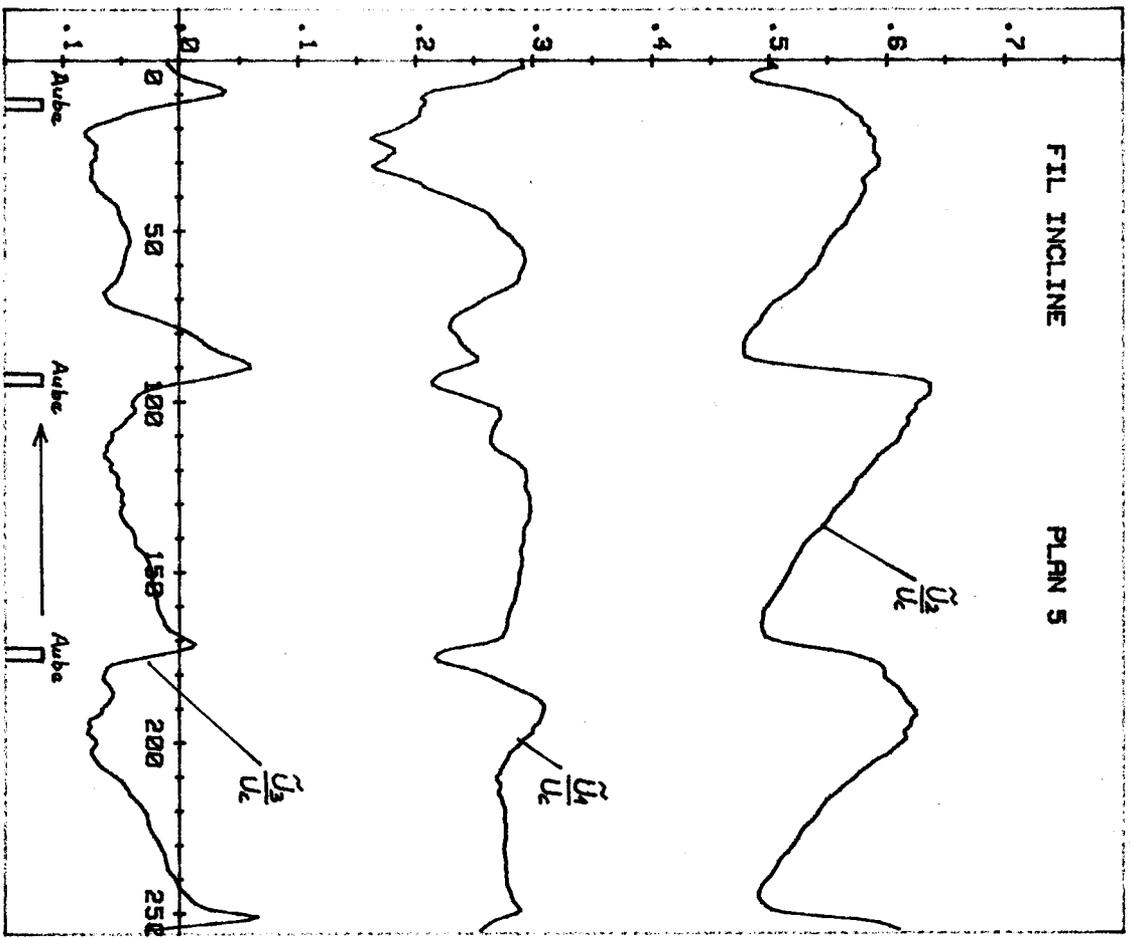


FIG 50

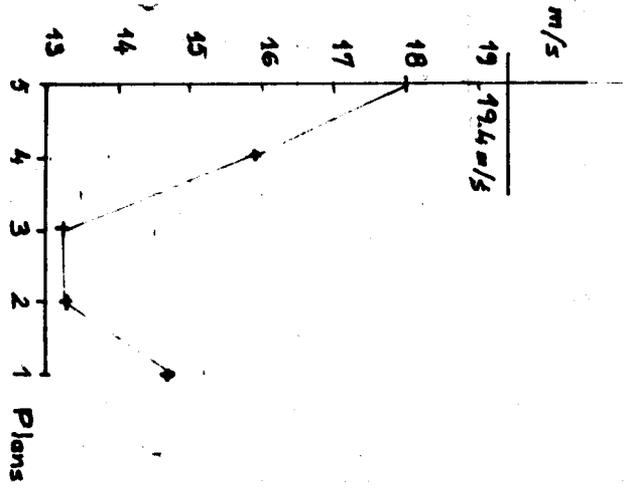


FIG 51a - Evolution en moyenne de la composante radiale en fonction des plans de mesure.

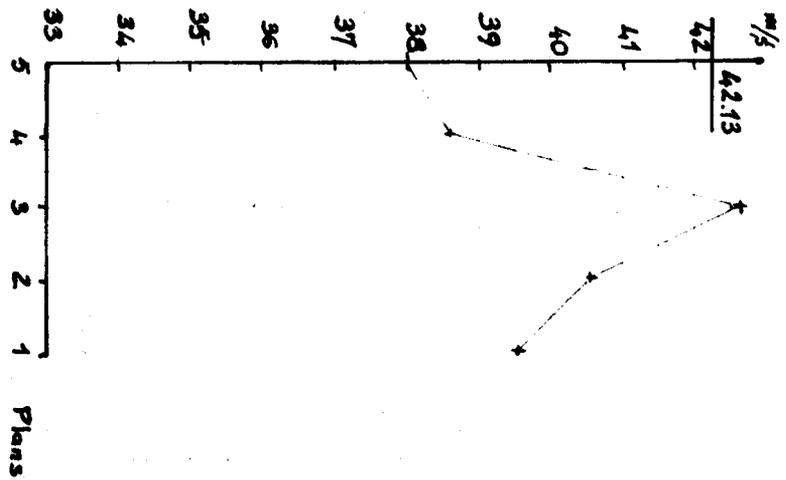


FIG 51b - Evolution en moyenne de la composante tangentielle en fonction des plans de mesure.

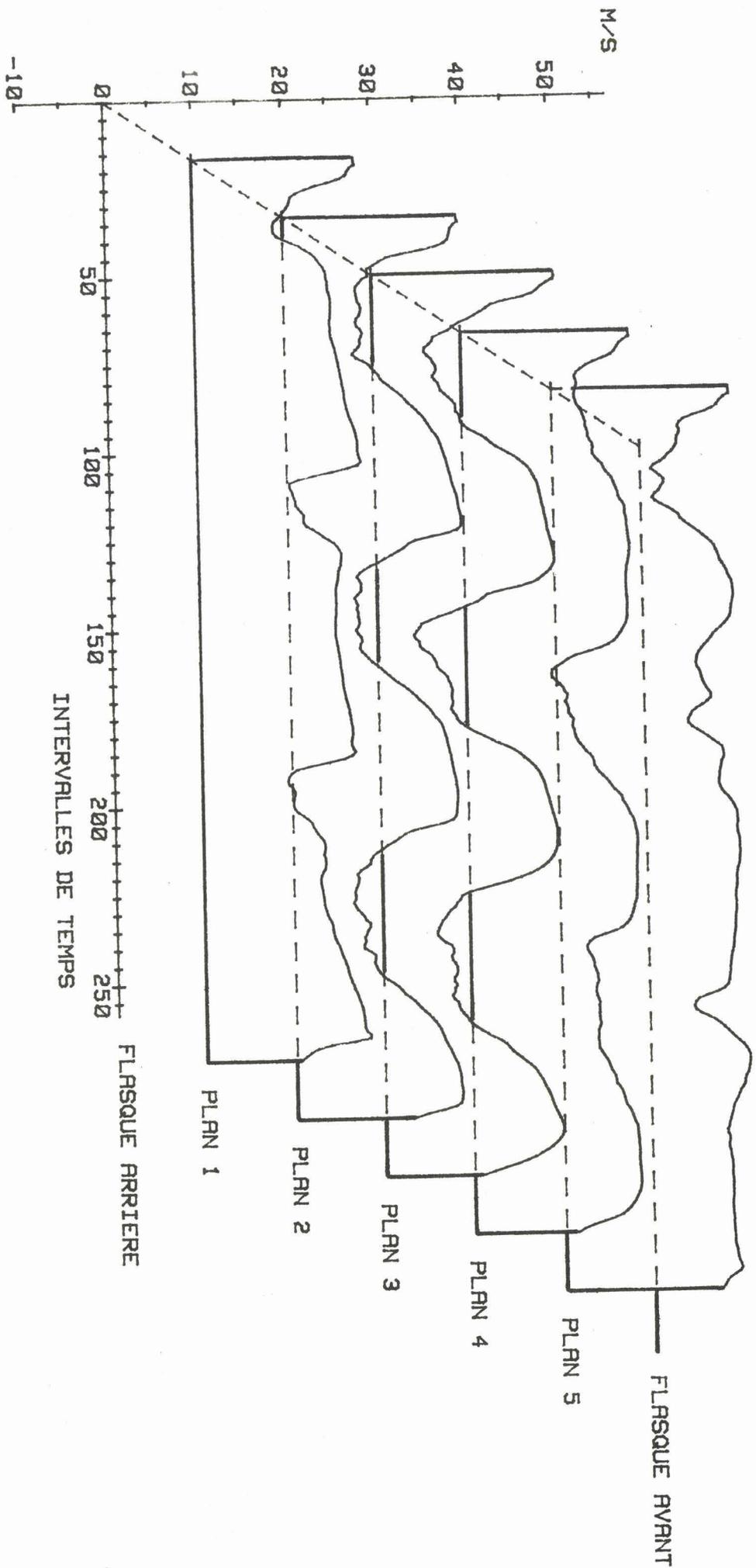


FIG 52 - (FIL INCLINE) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE RADIALE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

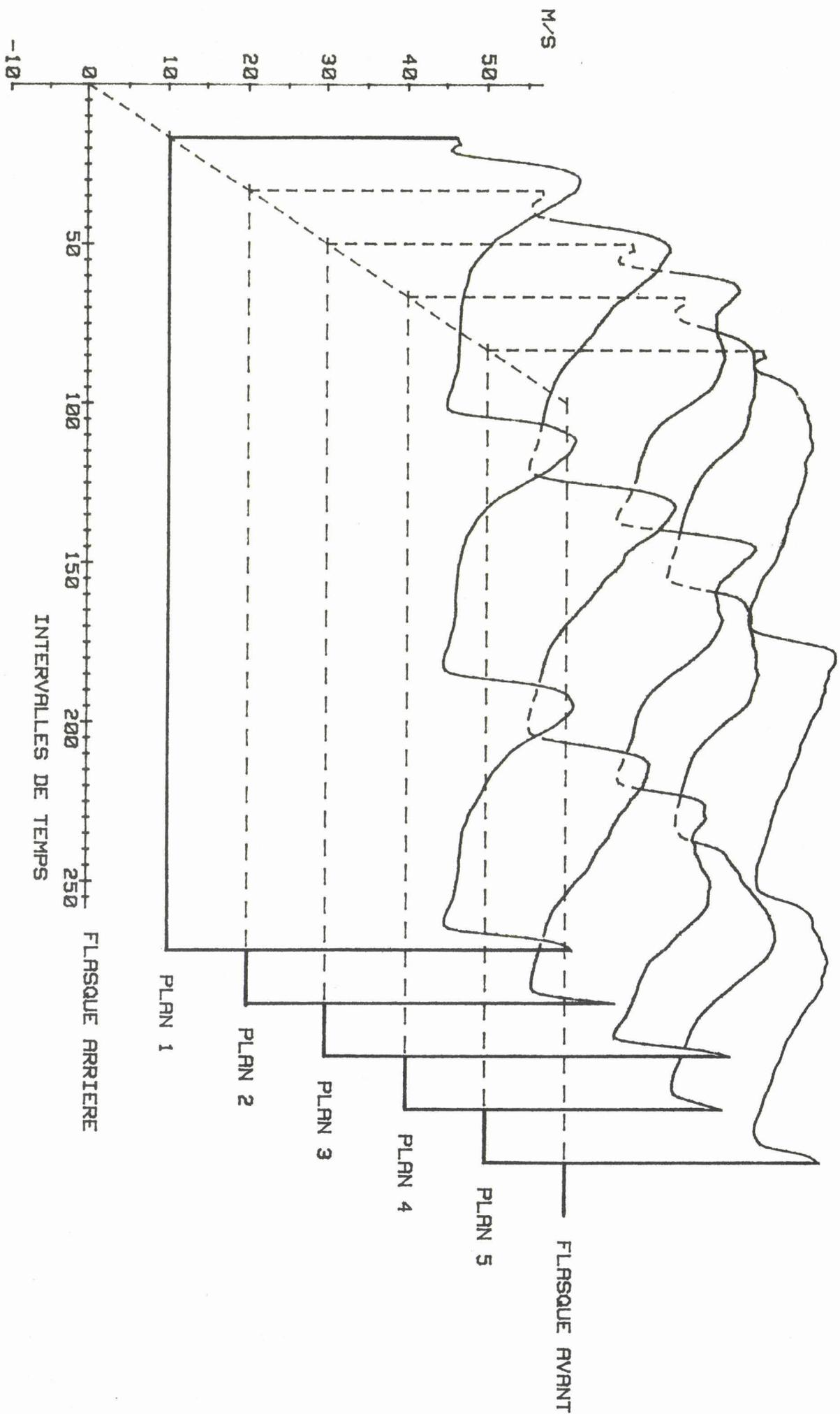


FIG 53 - (FIL INCLINE) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE TANGENTIELLE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

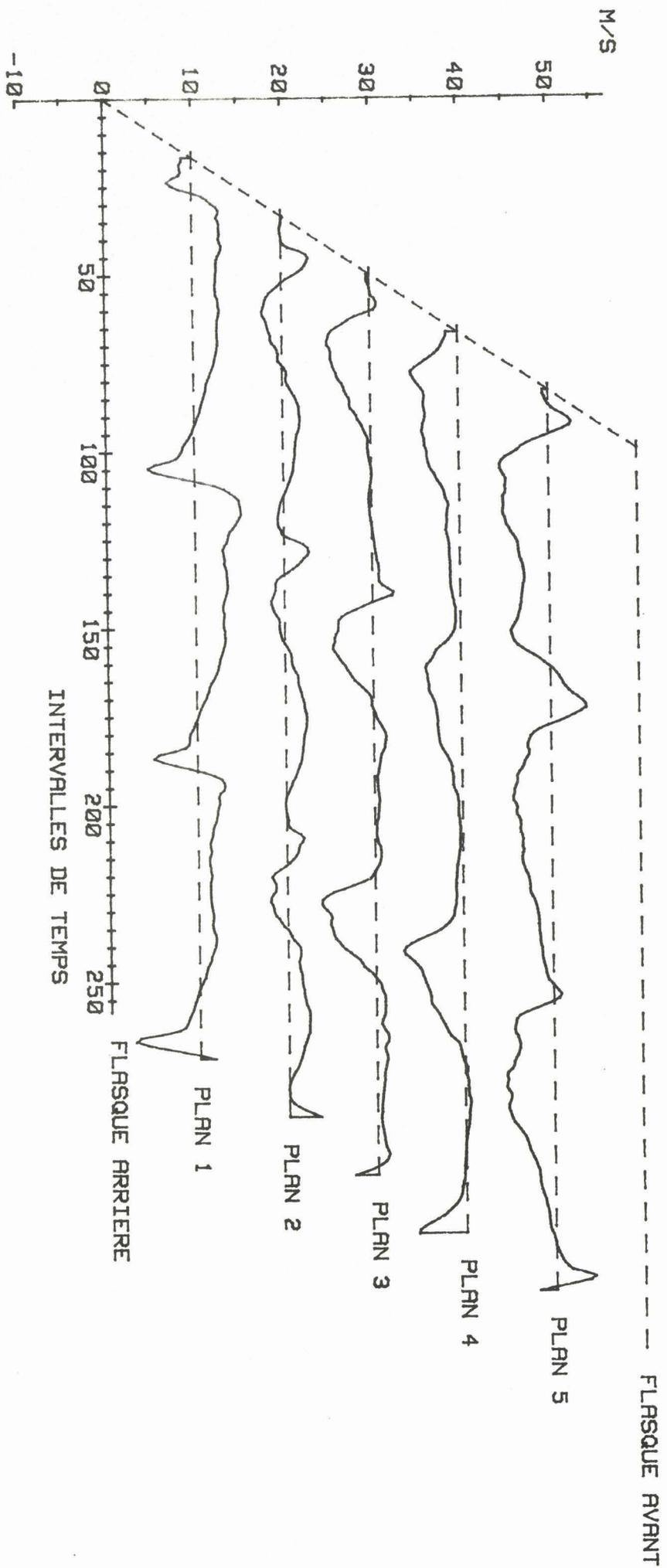


FIG 54 - (FIL INCLINE) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE AXIALE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

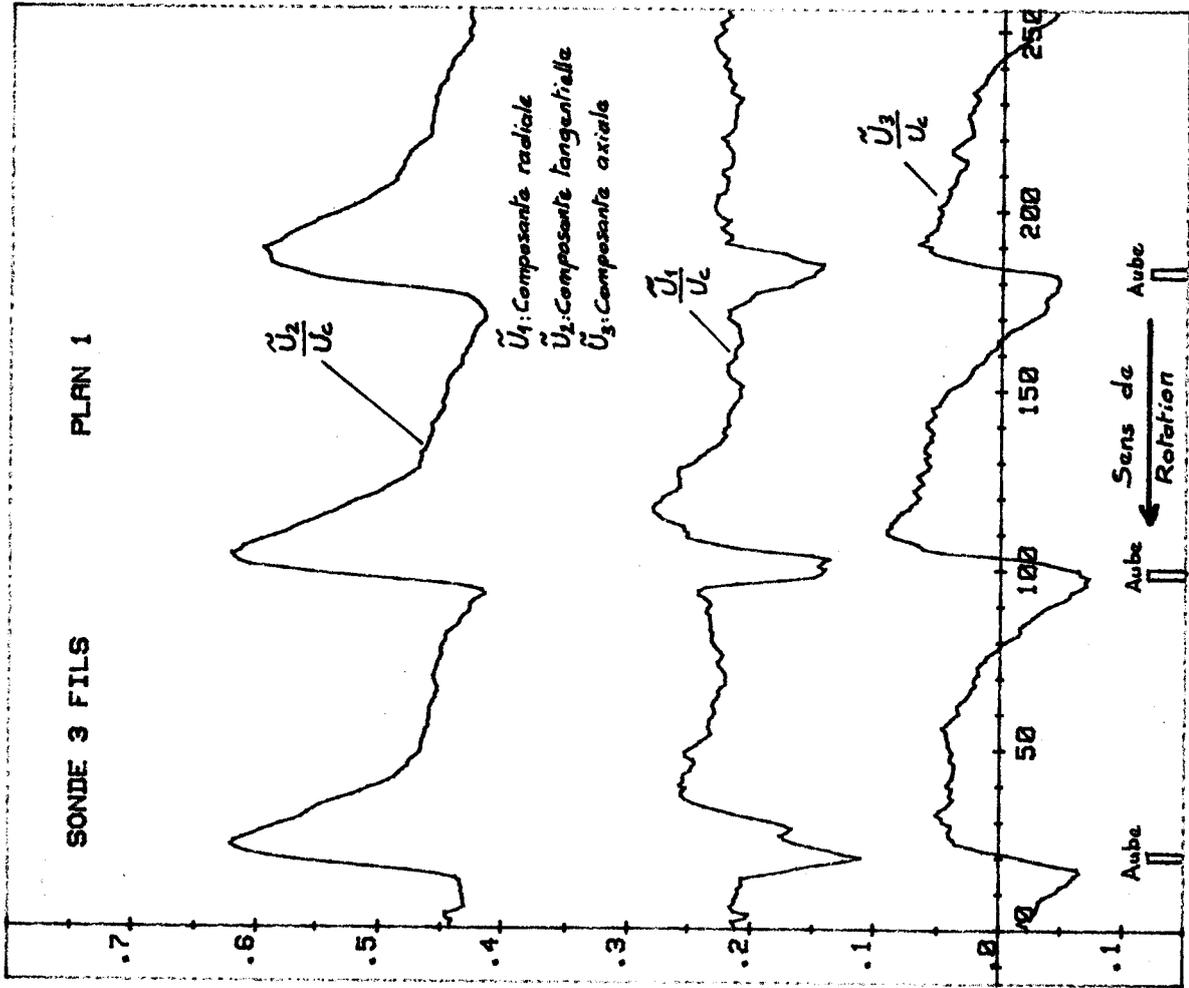


FIG 55

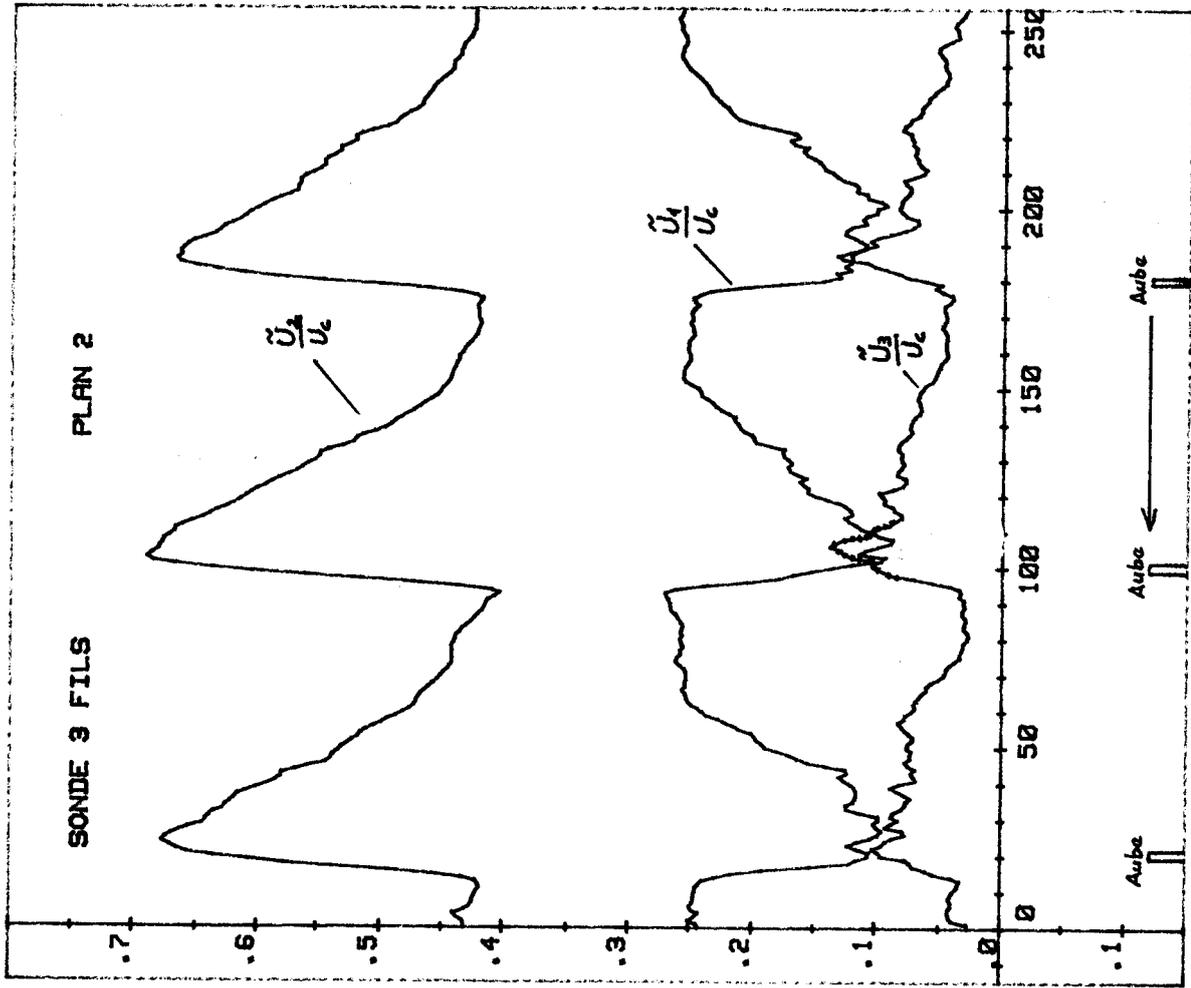


FIG 56

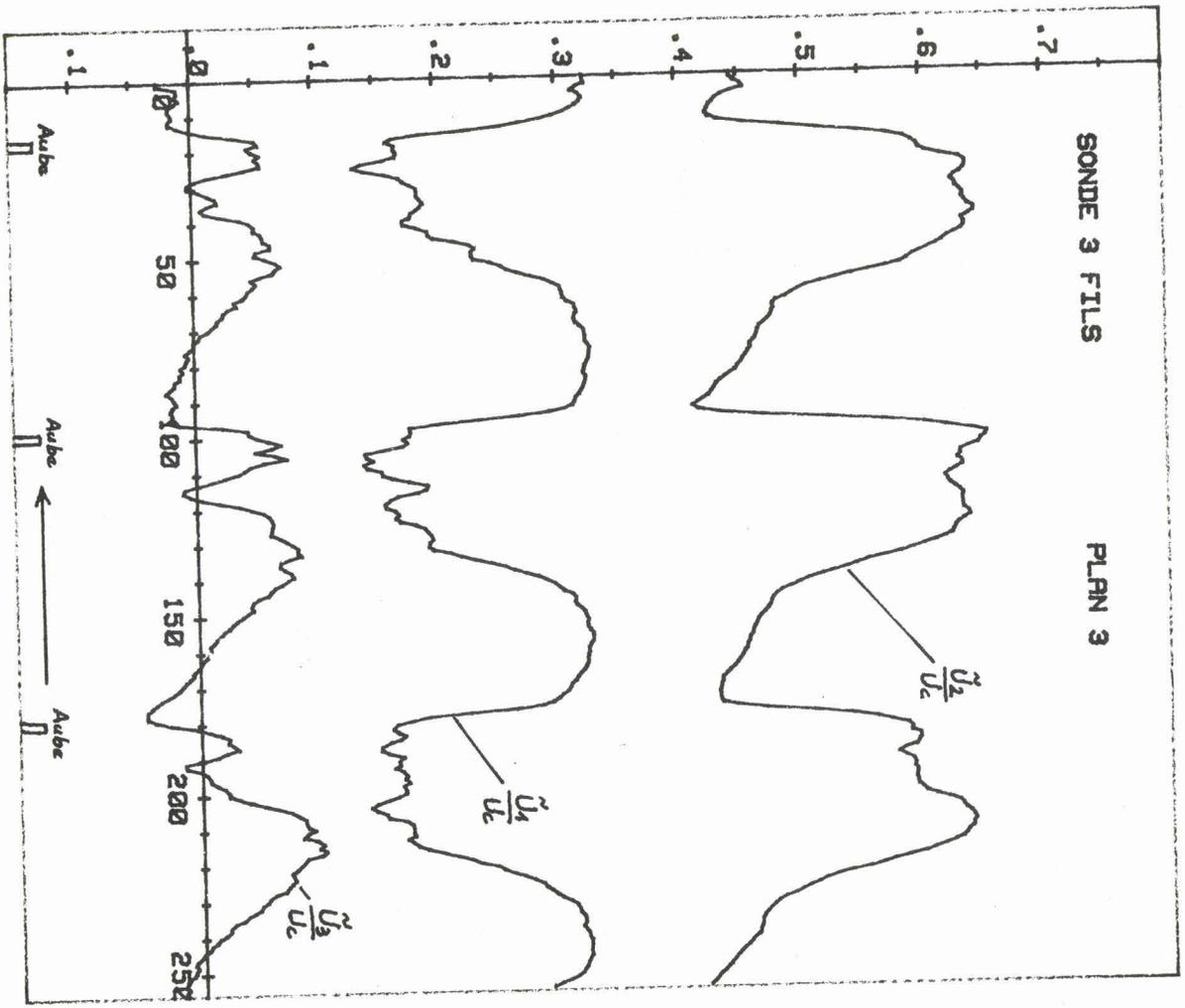


FIG 57

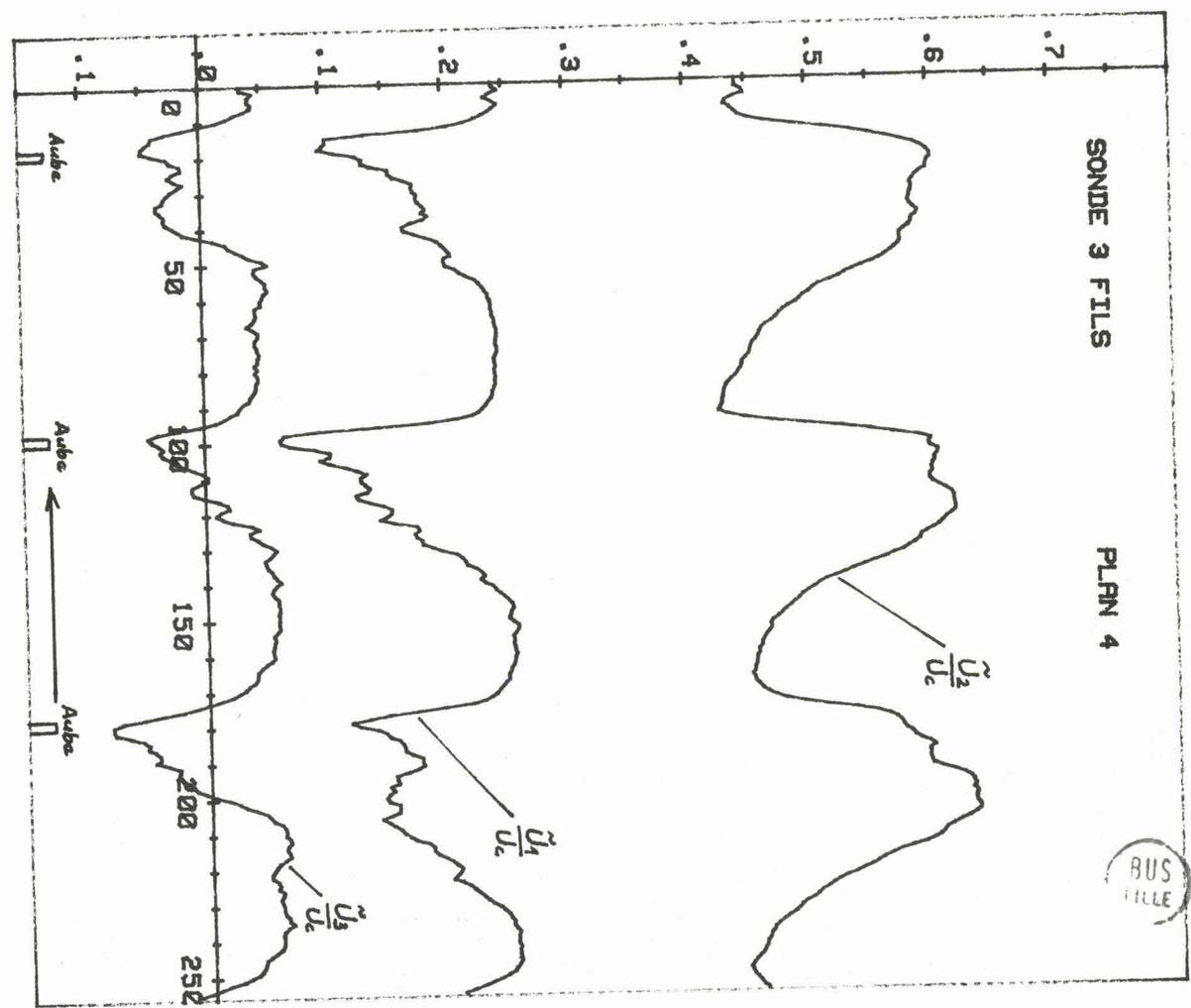


FIG 58

BUS
FILLE

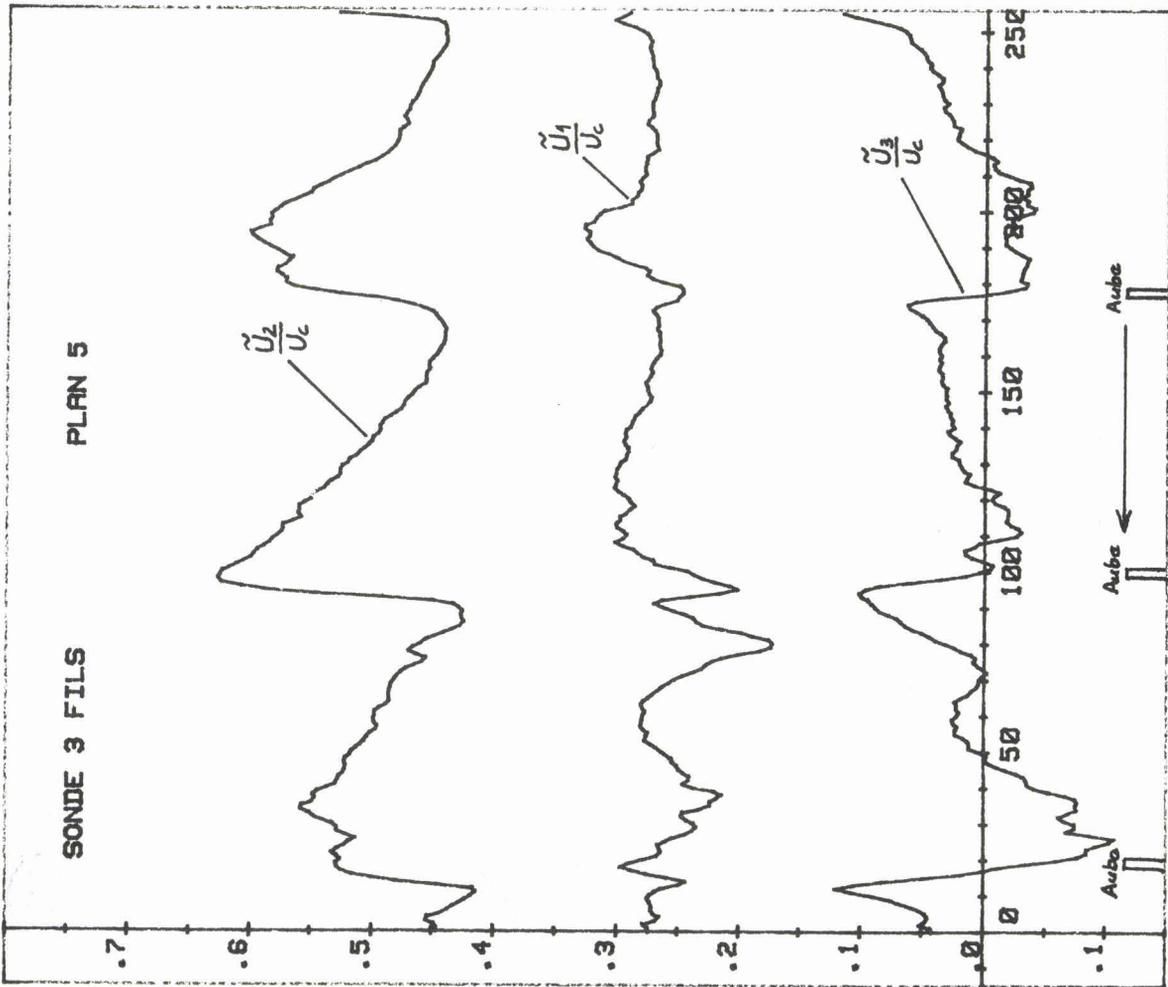


FIG 59

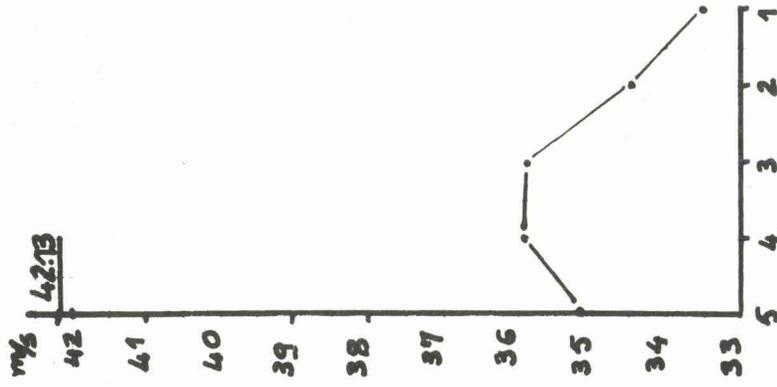


FIG 60b - Evolution en moyenne de la composante tangentielle en fonction des plans de mesure

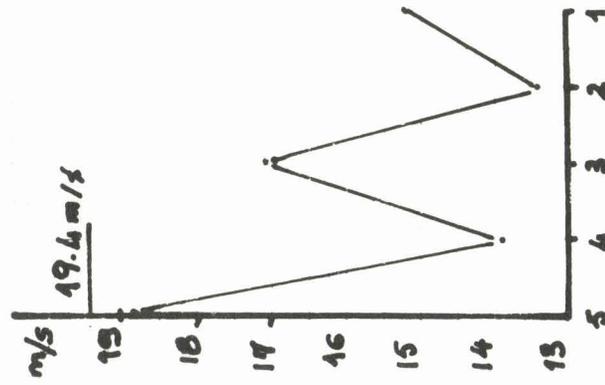


FIG 60a - Evolution en moyenne de la composante radiale en fonction des plans de mesure

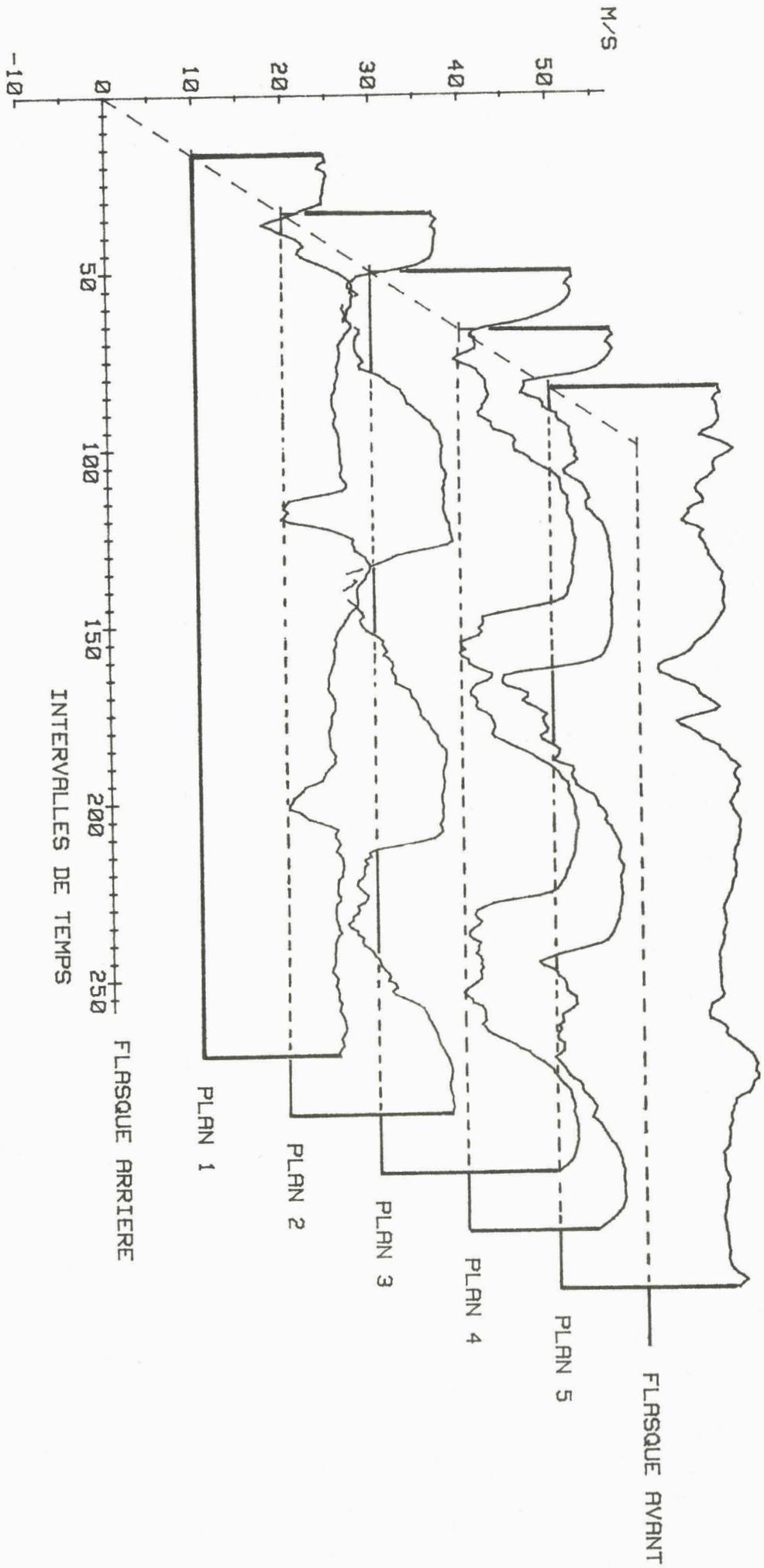


FIG 61 - (SONDE A 3 FILS) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE RADIALE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

AUS
VILLE

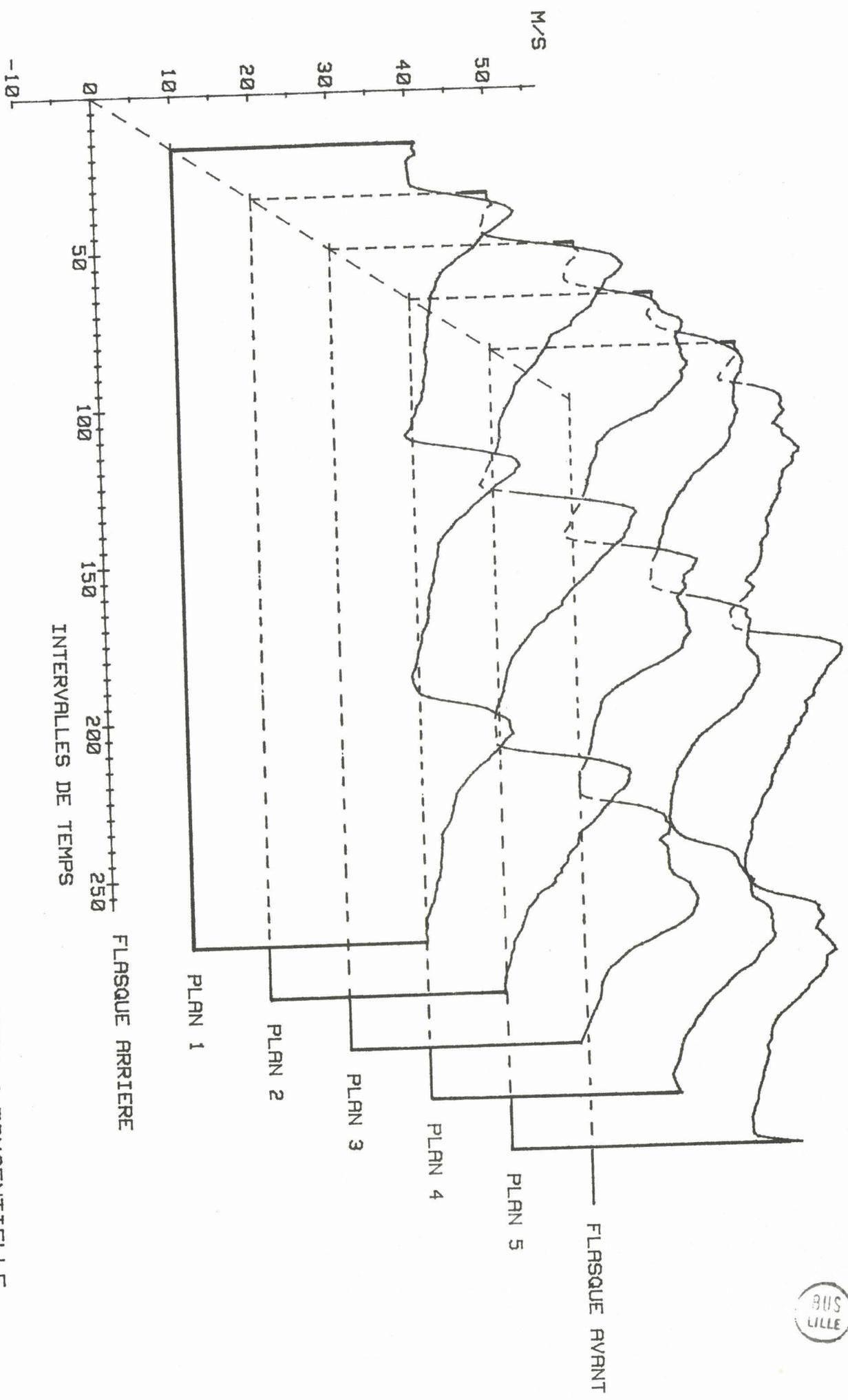


FIG 62 - (SONDE A 3 FILS) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE TANGENTIELLE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

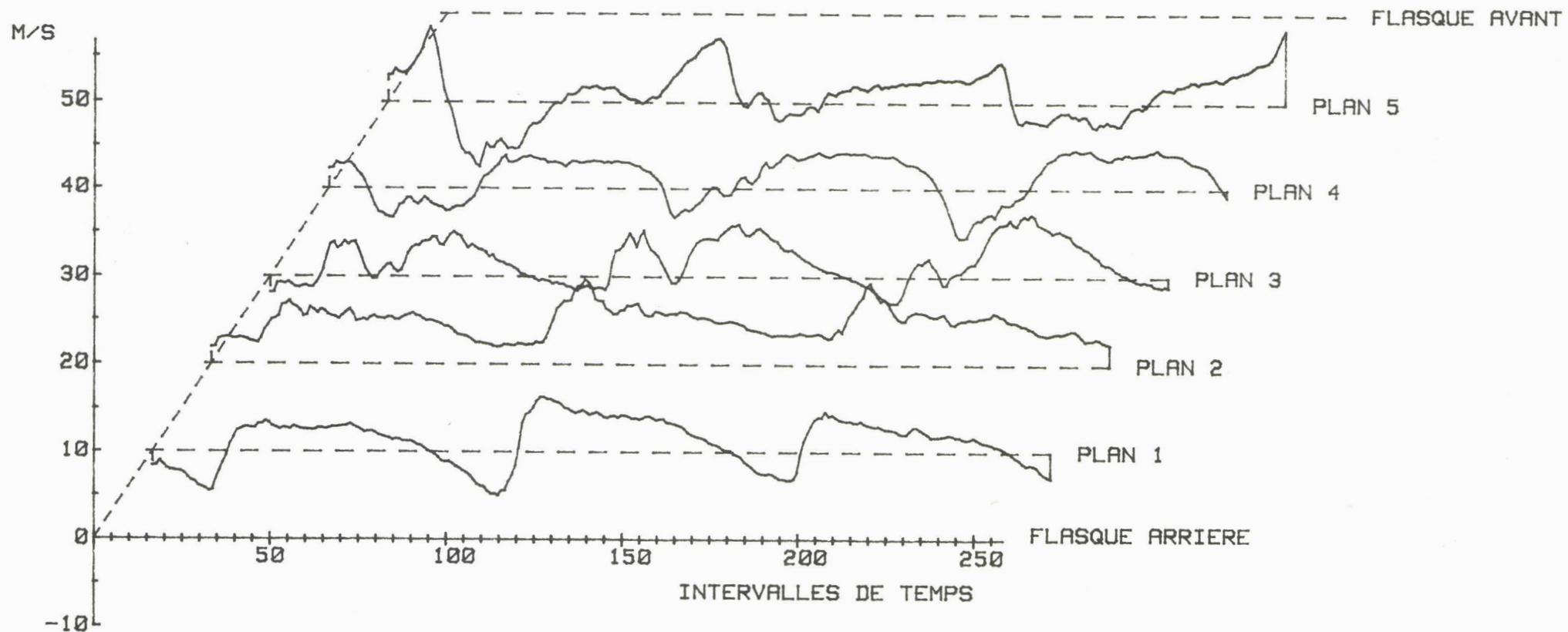


FIG 63 - (SONDE A 3 FILS) - EVOLUTION DU PROFIL DE LA COMPOSANTE AXIALE EN FONCTION DU PLAN DE MESURE

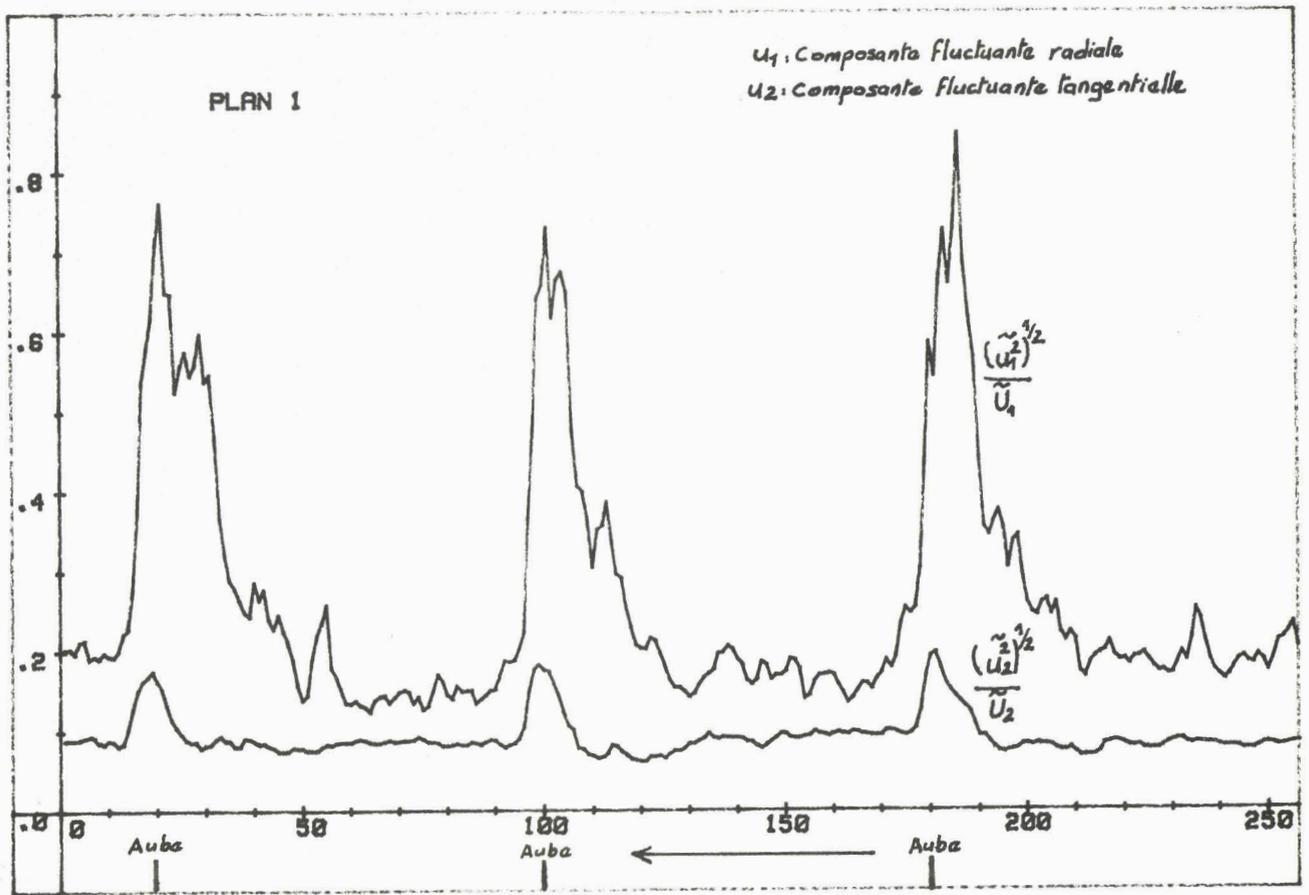


FIG 64

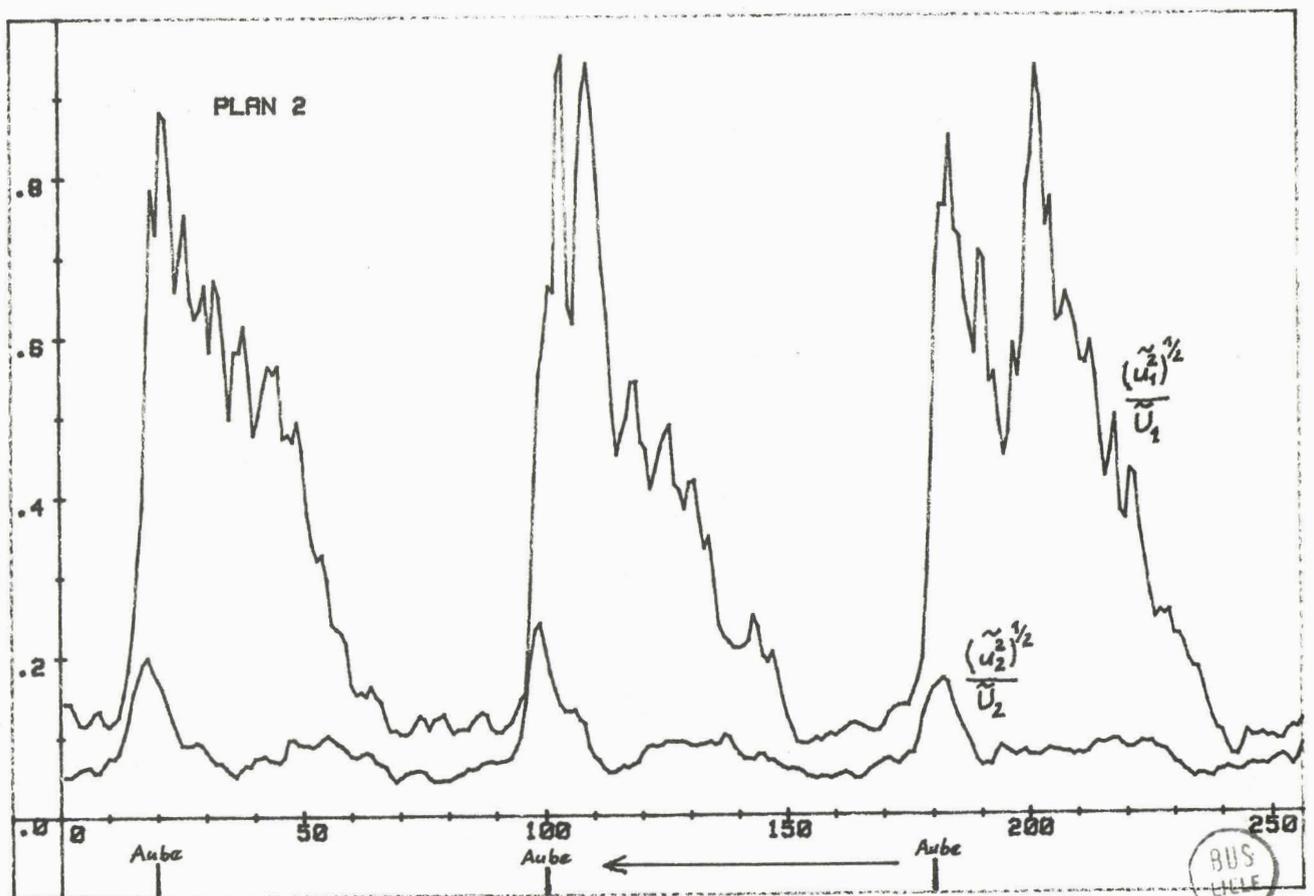


FIG 65

BUS
LILLE

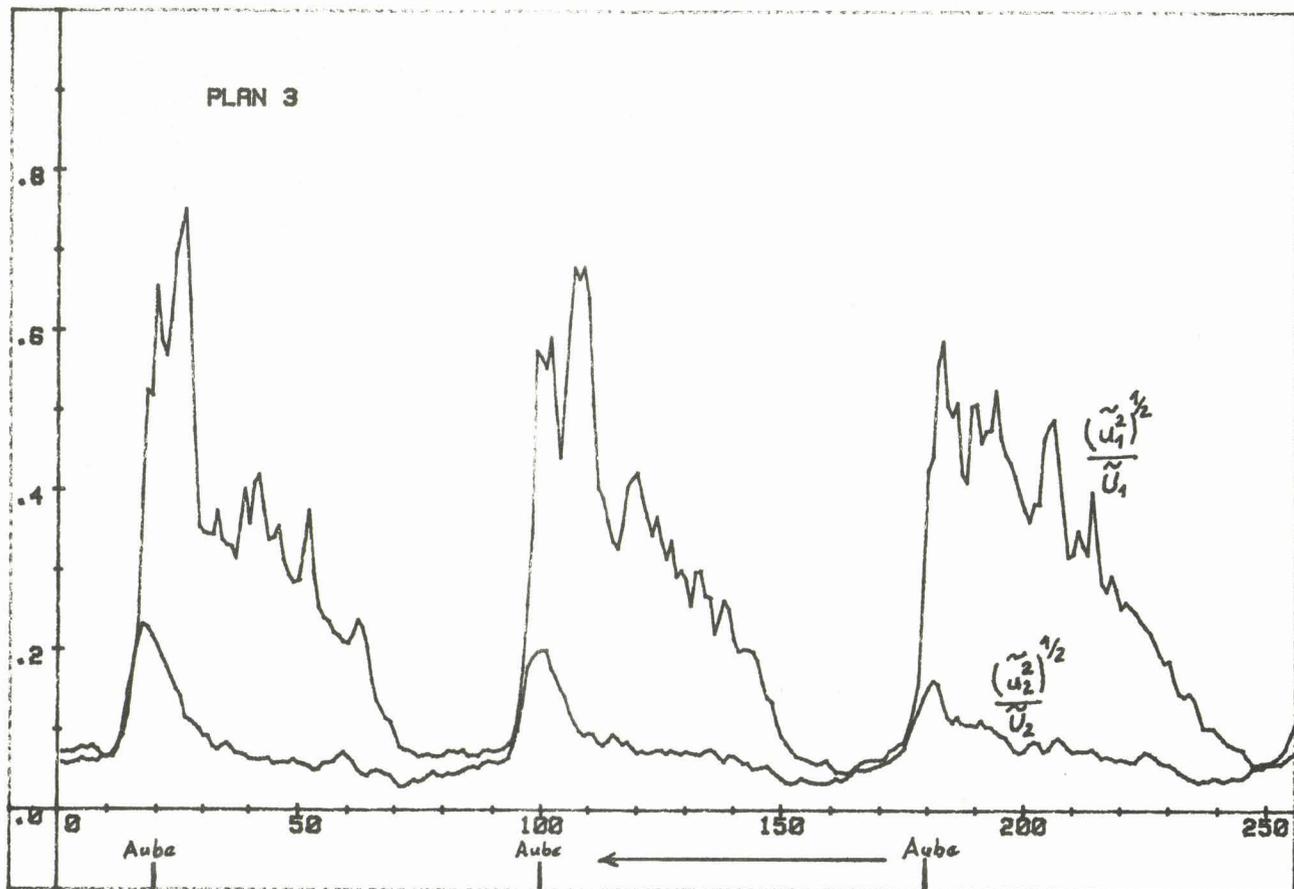


FIG 66

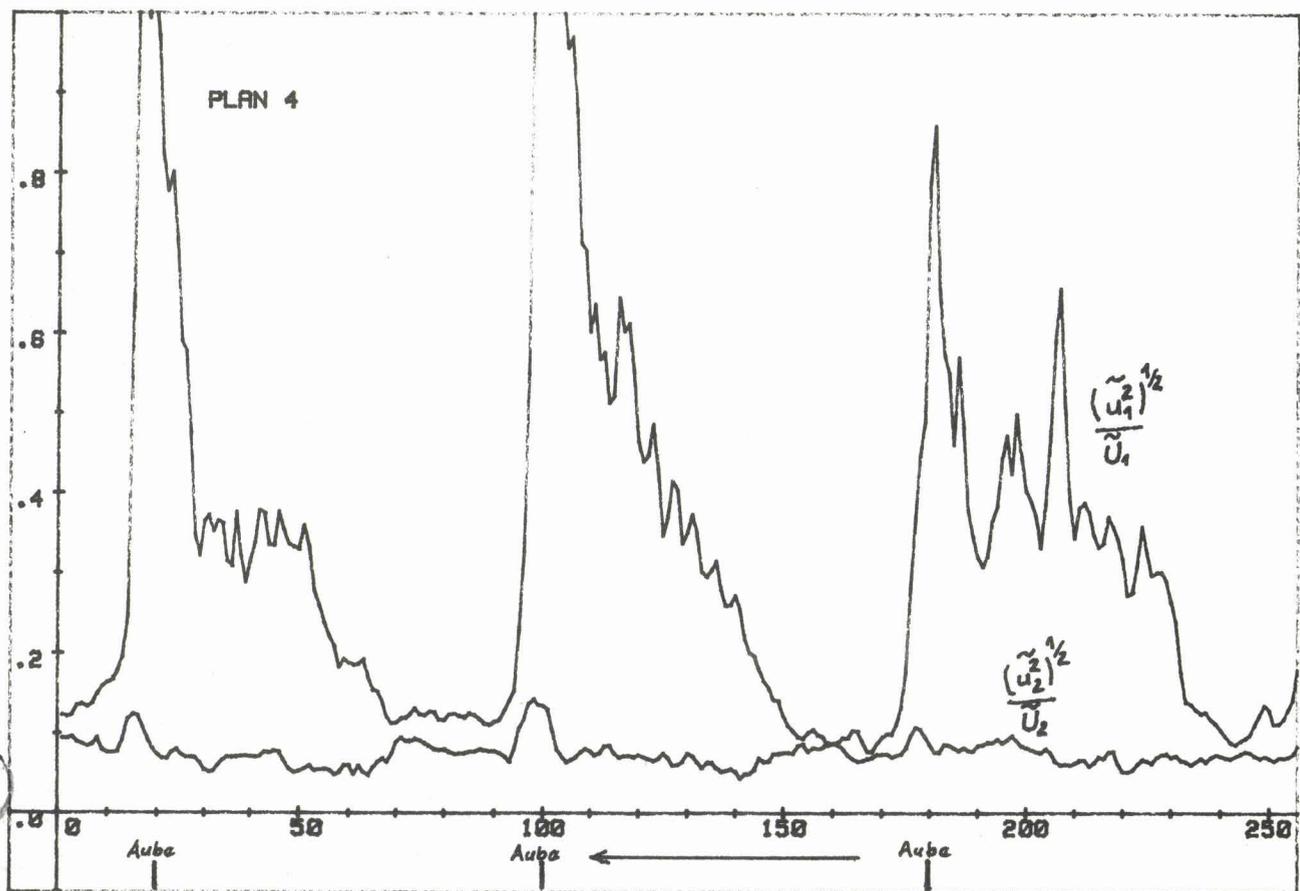


FIG 67

BUS
LILLE

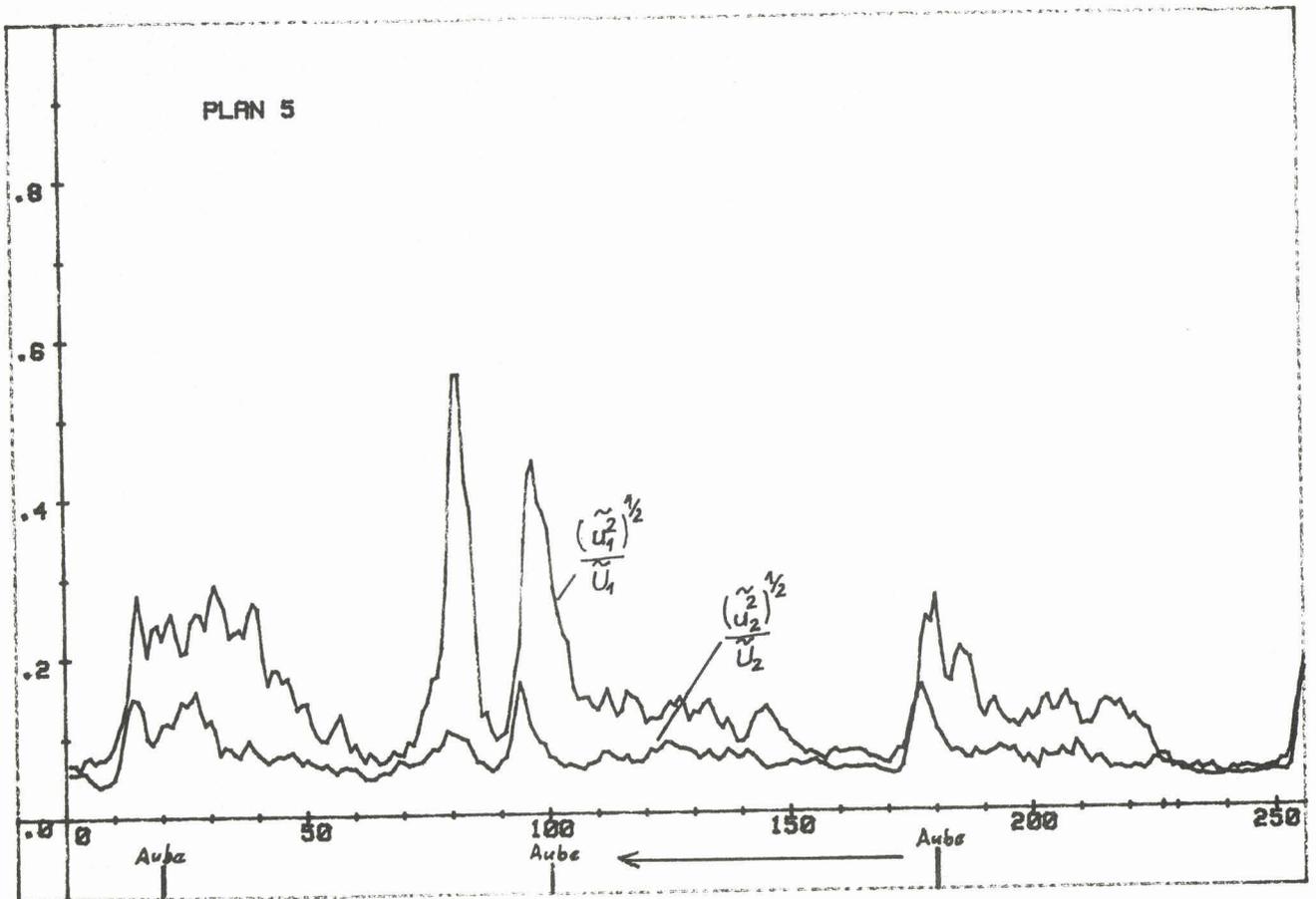


FIG 68

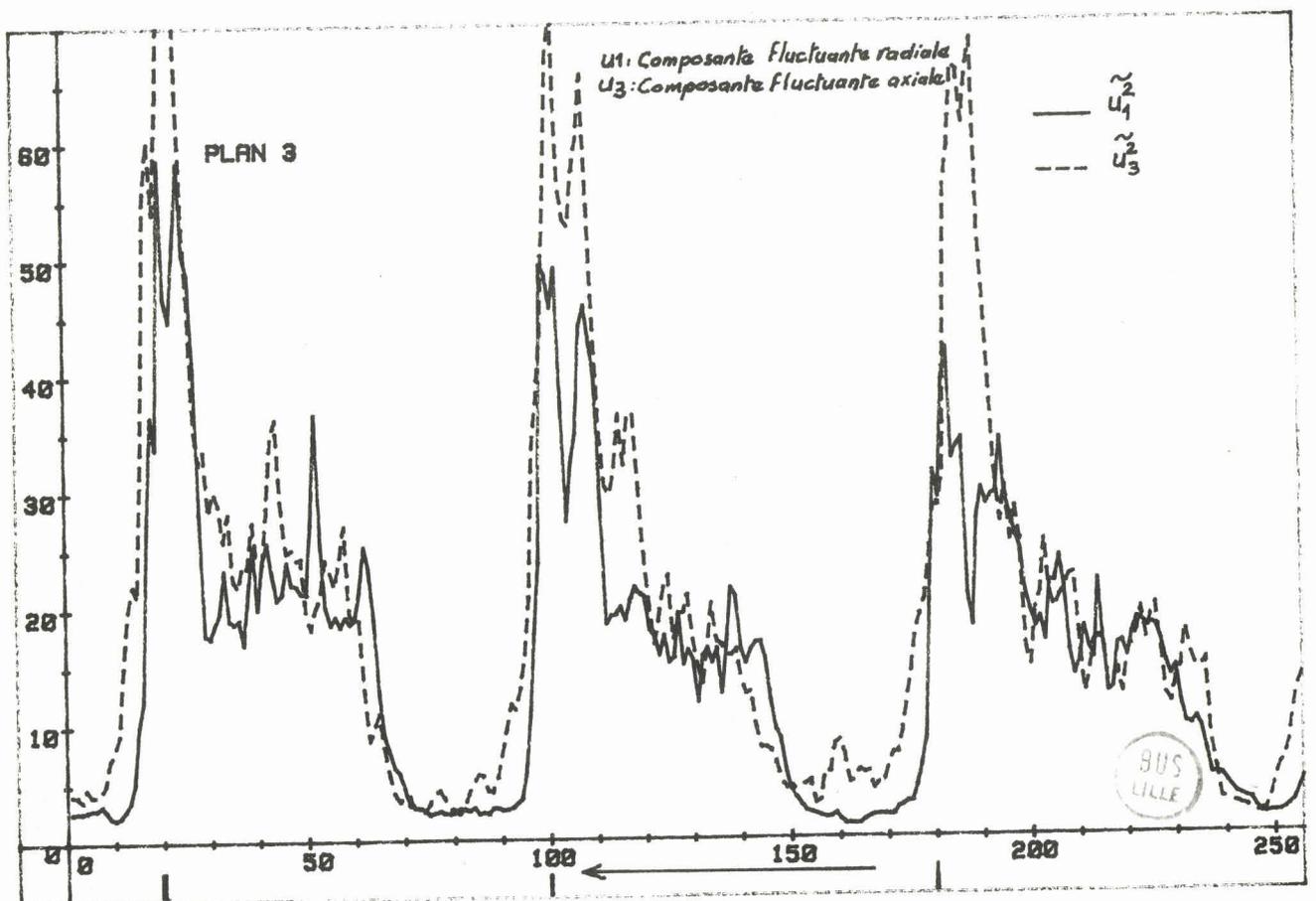


FIG 69

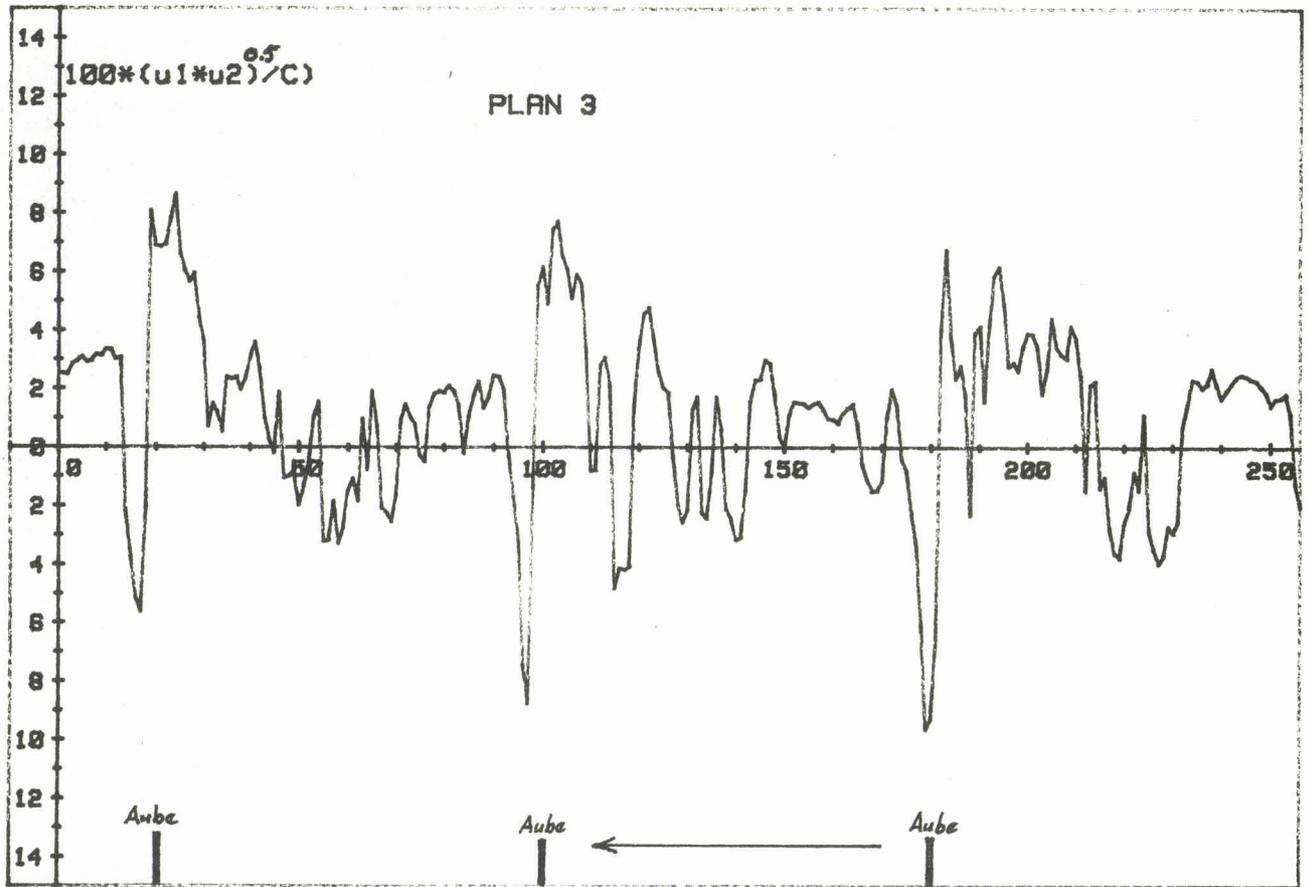
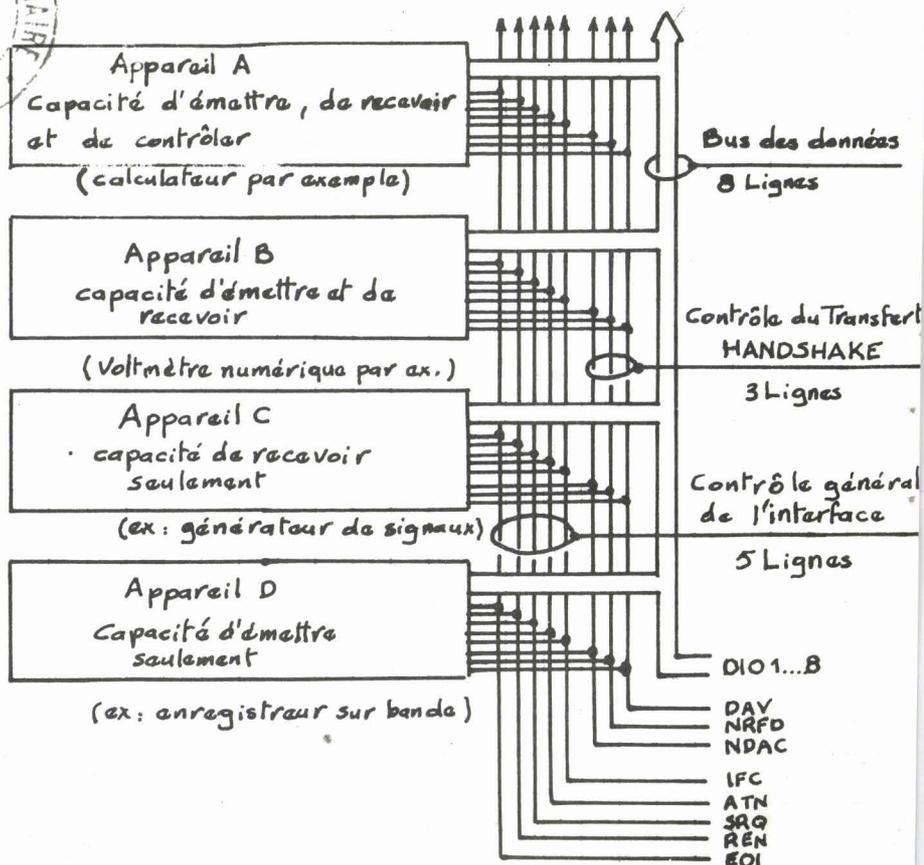


FIG 70



FIG 71

Connexions de l'Interface HRIB
et Structure du Bus



ANEMOMETRIE A FILS CHAUDS
PROFIL DES VITESSES
VENTILATEUR CENTRIFUGE

Dans la première partie, des techniques d'étalonnage d'un fil chaud à température constante, et de détermination de ses caractéristiques directionnelles, sont développées ; ces opérations sont effectuées de façon semi-automatique par couplage avec un micro-calculateur. On montre en particulier l'influence de la géométrie de la sonde ainsi que l'importance des effets des sillages aérodynamique et thermique sur la détermination de ces coefficients de sensibilité directionnelle dans le cas d'une sonde à plusieurs fils.

Deux méthodes de mesures tridimensionnelles sont ensuite exploitées et comparées pour l'analyse de la vitesse de l'écoulement à la sortie de la roue d'un ventilateur centrifuge.

La première utilise une sonde à un fil incliné à partir des résultats obtenus pour trois orientations de la sonde, et en utilisant des techniques d'acquisition rapide des données, suivi d'un traitement sur calculateur, on obtient la répartition des composantes moyennes de la vitesse de l'écoulement dans un canal inter-aubes ; l'effet du nombre d'échantillons utilisés pour la détermination de ces moyennes est analysé.

La seconde méthode utilise une sonde à trois fils qui permet d'accéder aux composantes instantanées de la vitesse et donc d'obtenir à la fois les répartitions de vitesses moyennes et les contraintes de turbulence.

La répartition fortement tridimensionnelle de l'écoulement en sortie de roue est ainsi mise en évidence (structure jet-sillage de l'écoulement, influence des flasques), au point d'adaptation de la machine.