

EUR 2801.f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

LIBRARY COPY

**ETUDE DES CONTRAINTES RESIDUELLES
ENGENDREES PAR LE PROCEDE DE SOUDAGE
VERTICAL MONTANT**

par

W. SOETE (*), M. LEFEVRE (**), A. VINCKIER (**),
J. LEMOINE (*) et A. BERGHMANS (**)

(*) Université de Gand
(**) Arcos s.a., Bruxelles

1966



Accord de Coopération Euratom/Etats-Unis

Rapport EURAEC N° 1562 établi par
ARCOS s.a., Bruxelles, Belgique

Contrat Euratom N° 053-61-12 RDB

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission de la Communauté Européenne de l'Energie Atomique (EURATOM) en application du programme commun défini par l'Accord de coopération, signé le 8 novembre 1958, entre le gouvernement des Etats-Unis d'Amérique et la Communauté Européenne de l'Energie Atomique.

Il est précisé que la Commission d'EURATOM, le gouvernement des Etats-Unis, la United States Atomic Energy Commission, leurs contractants, ou toutes personnes agissant en leur nom :

Ne garantissent pas explicitement ou implicitement l'exactitude, le caractère complet ou l'utilité des informations contenues dans le présent document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconques divulgués dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privatifs.

N'assument aucune responsabilité quant à l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou de procédés quelconques divulgués dans le présent document, ni quant aux dommages résultant de ladite utilisation.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4^e page de couverture

au prix de FF 17,50	FB 175,—	DM 14,—	Lit. 2 180	Fl. 12,65
---------------------	----------	---------	------------	-----------

Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.

Imprimé par Guyot, s.a.
Bruxelles, mai 1966

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

EUR 2801.f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

ETUDE DES CONTRAINTES RESIDUELLES
ENGENDREES PAR LE PROCEDE DE SOUDAGE
VERTICAL MONTANT

par

W. SOETE (*), M. LEFEVRE (**), A. VINCKIER (**),
J. LEMOINE (*) et A. BERGHMANS (**)

(*) Université de Gand

(**) Arcos s.a., Bruxelles

1966



Accord de Coopération Euratom/Etats-Unis

Rapport EURAEC N° 1562 établi par
ARCOS s.a., Bruxelles, Belgique

Contrat Euratom N° 053-61-12 RDB

RESUME

La recherche a comporté la détermination des contraintes résiduelles en surface ainsi que l'étude, la mise au point et l'application des méthodes de détermination des contraintes en profondeur pour des soudures électroslag et électro-gaz déposées en une passe sur des tôles de 15 à 100 mm d'épaisseur. L'influence de ce dernier facteur sur le régime thermique, les déformations et les contraintes ainsi que l'apport d'énergie calorifique, la forme et la dimension du bain de fusion ont également été étudiés.

Table des Matières

	page
I. <u>BUT DE LA RECHERCHE</u>	1
II. <u>EXECUTION DES ESSAIS</u>	3
A-) Acier de base	3
B-) Métaux d'apport	4
C-) Préparation des éprouvettes	5
D-) Exécution du soudage	5
III. <u>REPARTITION DE L'ENERGIE CALORIFIQUE</u>	6
A-) Chaleur totale	7
B-) Chaleur évacuée par les patins	8
C-) Chaleur évacuée par les tôles	10
IV. <u>CONTROLE DES TEMPERATURES</u>	11
A-) Méthode de mesures	11
B-) Résultats	12
C-) Conclusions	15
V. <u>FORME ET DIMENSIONS DU BAIN DE FUSION</u>	16
A-) Forme du bain	16
B-) Dimensions du bain ou pénétration	17
VI. <u>DEFORMATIONS DES TOLES PENDANT ET APRES SOUDAGE..</u>	18
A-) Introduction	18
B-) Méthodes de mesure	18
C-) Résultats :	
1) Déplacements relatifs pendant le sou- dage et forme des tôles après soudure	20
2) Retrait transversal des bords du joints	24
3) Déformations angulaires des tôles ...	25
4) Déformations des tôles dans leur plan	26

	page
D-) Conclusions	31
VII. <u>DETERMINATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES EN</u>	
<u>SURFACE</u>	33
A-) Introduction	33
B-) Zones ayant subi uniquement des déforma- tions élastiques	36
C-) Zones de la tôle ayant subi des déforma- tions plastiques	36
D-) Méthode de mesure	39
E-) Résultats des mesures de contraintes en surface	41
F-) Conclusions concernant les contraintes résiduelles en surface	48
VIII. <u>DETERMINATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES EN</u>	
<u>PROFONDEUR</u>	50
A-) Introduction	50
B-) Formules d'élasticité	51
C-) Techniques utilisées pour la mesure des dilatations	52
D-) Etalonnage et relaxation	56
E-) Résultats	57
F-) Mesure des contraintes dans les couches extérieures	59
G-) Conclusions	63
IX. <u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	64
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	63

I. BUT DE LA RECHERCHE. (x)

Les nouveaux procédés de soudage automatique électroslag et électrogaz se distinguent des autres procédés essentiellement par le fait qu'ils réalisent le cordon de soudure en une passe et qu'ils s'exécutent en verticale montante, ceci contrairement aux autres procédés où le cordon de soudure est constitué de plusieurs passes exécutées en position horizontale.

Le fait de réaliser la soudure en une passe doit avoir une répercussion directe sur le régime thermique de soudage, sur les déformations et sur la distribution des contraintes résiduelles.

Au point de vue du régime thermique, la succession d'un nombre parfois très élevé de cycles d'échauffement et de refroidissement très rapides est remplacée par un seul cycle beaucoup plus lent.

La forme symétrique du chanfrein et son remplissage en une seule passe doivent supprimer la déformation angulaire du joint et modifier la valeur du retrait transversal et longitudinal.

La distribution des contraintes résiduelles en est également affectée. En effet, quand le chanfrein est rempli en plusieurs passes, les dernières, qui se déposent nécessairement en surface, se refroidissent en dernier lieu et sont donc le siège de fortes contraintes résiduelles de traction, lesquelles doivent être équilibrées par des contraintes de compression. Les contraintes perpendiculaires au cordon de soudure, doivent s'équilibrer suivant l'épaisseur de la pièce, ce qui veut dire que dans la partie centrale de l'épaisseur, il existe des contraintes de compression. Les contraintes de soudage parallèles au cordon sont en général équilibrées par des contraintes de compression situées dans le métal de base

(x) Manuscrit reçu le 22 mars 1966

Cette répartition a été vérifiée par plusieurs chercheurs. Toutefois, pour des tôles épaisses, il est possible de trouver dans la direction parallèle au cordon de soudure, des contraintes de compression dans la partie centrale de l'épaisseur. (*) (1)

La réalisation du cordon de soudure en une passe a pour effet de refroidir d'abord le métal situé en surface et ensuite le métal sousjacent. Ceci doit avoir pour effet de créer des contraintes de compression en surface et des contraintes de traction à l'intérieur, ce qui a été vérifié expérimentalement. (2)

L'originalité de la recherche est donc caractérisée par :

- a) la détermination des contraintes résiduelles en surface et en profondeur, dans des soudures déposées en une passe,
- b) l'étude et la mise au point préalable des méthodes pour déterminer les contraintes en profondeur,
- c) l'étude du facteur " épaisseur " sur le régime thermique, les déformations et les contraintes, dans les limites de 15 à 100 mm.

Outre ces objectifs principaux, nous avons contrôlé certains facteurs en relation avec les contraintes résiduelles, à savoir :

- l'apport d'énergie calorifique,
- la forme et les dimensions du bain de fusion.

Les détails de tous les essais ont été donnés au fur et à mesure de l'avancement des travaux dans une série de 11 rapports trimestriels. Le présent rapport fournit les données, la synthèse des résultats et les conclusions d'ensemble de la recherche.

(*) Les chiffres entre parenthèses renvoient à la bibliographie en fin de rapport.

II. EXECUTION DES ESSAIS.

Les essais ont porté sur 8 éprouvettes d'épaisseur différente soudées en verticale montante sous gaz protecteur (procédé Electrogaz désigné dans la suite par EG) ou sous laitier liquide (procédé Electroslag désigné dans la suite par ES). Ces deux procédés ont été décrits dans la littérature (3) et sont suffisamment connus pour ne pas en reprendre la description.

Les caractéristiques du métal de base et des métaux d'apport utilisés sont données ci-après :

A-) Acier de base :

Qualité Soudotenax nuance 42/50, calmé grain fin; état normalisé et détentionné à 650°.

Provenance : S.A. Cockerill-Ougrée - Coulée 6974.

TABLEAU 2.1

Caractéristiques de l'acier.

Analyse sur coulée	Propriétés mécaniques (état normalisé et détentionné)					
	Ep (mm)	E (kg/mm ²)	R (kg/mm ²)	A5d %	K ^{Mes} vieilli (kgm/cm ²)	KV-10° (kgm/cm ²)
C 0,135	15	35,6-36,2	50,0-50,4	29,6-31,1	9,3- 9,6	8,2- 9,0
Mn 1,19	30	34,7-35,6	48,0-48,6	29,6-30,9	11,5-11,9	14,2-15,2
Si 0,187	60	34,4-36,4	48,9-50,3	25,5-28,5	7,2-12,5	14,6-18,4
S 0,035	100	34,0-36,7	48,2-49,6	25,5-27,1	7,2-13,2	10,6-18,4
P 0,024						

B-) Métaux d'apport.

Les métaux d'apport utilisés sont des fils composites de la nuance Vertomax 2M. Ces fils sont constitués d'une enveloppe en acier doux contenant une poudre comprenant des éléments désoxydants et des matières formant laitier. Comme le volume de laitier nécessaire dépend de l'épaisseur des tôles à souder, les fils Vertomax sont fabriqués en plusieurs types, désignés " X ", " XY " et " Y " contenant chacun la quantité de poudre requise.

TABLEAU 2.2

Caractéristiques des métaux d'apport.

Procédé	Epais à souder	Fil Vertomax Ø 3,2mm	Analyse (*)	Propriétés mécaniques (*)
EG	15	2M/GX	C : 0,07 - 0,10 Mn: 1,30 - 1,50 Si: 0,25 - 0,40 S : <0,030 P : <0,030	E : 33-38 kg/mm ² R : 50-55 " A5d : 22-27 % K _{UF} ⁺²⁰ : 7- 9 kgm/cm ² K _V ⁻¹⁰ : 3- 6 "
	30	2M/GY		
ES	30	2M/X	C : 0,07 - 0,10 Mn: 1,30 - 1,50 Si: 0,30 - 0,50 S : <0,03 P : <0,03	E : 33-38 kg/mm ² R : 50-55 " A5d : 22-27 % K _{UF} ⁺²⁰ : 6- 8 kgm/cm ² K _V ⁻¹⁰ : 2- 4 "
	60	2M/XY		
	100	2M/Y		

(*) Les analyses et les propriétés mécaniques dépendent de la pénétration qui incorpore au métal d'apport une quantité assez élevée et variable de métal de base fondu. Les valeurs ci-dessus sont par conséquent données à titre indicatif.

C-) Préparation des éprouvettes.

Les éprouvettes sont constituées de deux tôles de 500x1500 dans les épaisseurs de 15, 30 et 60 mm et 600x2000 en épaisseur de 100 mm. Les tôles, coupées à bord droit, sont maintenues à un écartement constant sur toute la longueur du joint par un talon inférieur assurant en outre le départ du soudage en dehors de l'éprouvette proprement dite, et un ou plusieurs étriers destinés à maintenir l'écartement pendant le soudage. Elles sont en outre prolongées par des talons de sortie permettant de terminer le soudage également en dehors de l'éprouvette. (fig. 2.1).

Les éprouvettes sont fixées par des serre-joints, soit directement sur le bâti de la machine, soit sur un bâti indépendant. (fig. 2.2 a et b).

D-) Exécution du soudage.

Les conditions d'exécution des éprouvettes sont résumées dans le tableau 2.3 ci-après :

TABLEAU 2.3

Epr n°	Dimens.	Ep.	Ouverture moy. du joint (mm)	Proc.	Crt de soudage			Durée d'exé- cution (min)	Vitesse de soud cm/min.
					Nat.	Ten- sion moy V	Int. moy A		
1	1500x1000	15	17	EG	=+	35	600	16	9,70
4	1500x1000	30	17	EG	=+	37	615	24	6,20
5	1500x1000	30	25	ES	~	35	590	36	4,45
7	1500x1000	60	28	ES	~	32	650	78	2,10
8	1500x1000	60	28,5	ES	~	36,4	655	84	2,05
9	1500x1000	60	27	ES	~	42	670	75	2,33
14	2000x1200	100	32	ES 1 fil	~	42,5	735	144	1,57
15	2000x1200	100	24	ES 2 fils	~	40,5	635	73	3,04

III. REPARTITION DE L'ENERGIE CALORIFIQUE.

Le bilan calorifique du soudage sous laitier liquide a été déterminé par Patton (4). Selon l'auteur, dans le cas des tôles de 90 mm, 99 % des calories dégagées sont absorbées par l'échauffement et la fusion des tôles, la fusion du fil et du laitier; 1 % seulement perdu par rayonnement. Dans le cas étudié par l'auteur, la chaleur utilisée passait dans les tôles à concurrence de 83 %, et 16 % étaient évacués par les patins. Cette répartition dépend évidemment de l'épaisseur des tôles, peut être du procédé. Pour en faire la vérification, nous avons déterminé dans chaque essai :

- la chaleur totale développée à partir de l'énergie électrique dépensée,
- la chaleur évacuée par les patins à partir du débit et de l'échauffement de l'eau de refroidissement.

Si on néglige la très petite quantité de chaleur perdue par rayonnement, on peut en déduire par différence la chaleur évacuée par les tôles.

Les résultats obtenus sont donnés au tableau 3.1.

TABLEAU 3.1

1) Epr. N°	2) Epais éprouv e	3) Apport de cha- leur (joules/cm)	4) Chaleur éva- cuée par les patins (joules/cm)	5) Chaleur éva- cuée par les tôles (joules/cm)
1	15	130.000	91.600	38.400
4	30	221.000	103.000	118.000
5	30	278.000	154.000	124.000
7	60	593.000	237.000	356.000
8	60	700.000	255.000	445.000
9	60	725.000	312.000	413.000
14	100	1.200.000	355.000	845.000
15	100	1.020.000	230.000	790.000

A-) Chaleur totale.

Remarquons que l'apport de chaleur est 10 à 100x plus élevé qu'en soudage multipasses manuel ou automatique. La chaleur développée dans le bain par cm courant augmente avec l'ouverture du joint et avec l'épaisseur des tôles.

Si on divise cet apport de chaleur par la section transversale du joint, on trouve l'apport de chaleur correspondant à l'unité de volume du métal d'apport fondu. Ces valeurs qui sont données au tableau 3.2 montrent que la chaleur développée par unité de volume est à peu près constante.

TABLEAU 3.2

Eprouvette n°	Chaleur apportée (joules/cm ³)
1	51.200
4	43.500
5	37.200
7	35.400
8	41.000
9	44.800
14	37.500
15	42.500

Elle vaut en moyenne 41.600 joules/cm³, soit environ 10 kcal/cm³ ou encore 1,5 kWh/kg de métal fondu. A titre indicatif la chaleur développée en soudage à l'arc manuel ou automatique est de 2,6 kWh/kg et la chaleur théorique d'échauffement et de fusion du fer est de 0,4 kWh/kg.

B-) Chaleur évacuée par les patins.

On voit dans le tableau 3.1 que la proportion de chaleur évacuée par les patins varie effectivement, dans de très larges limites, en fonction de l'épaisseur des tôles. Ceci provient de ce que la largeur des patins en contact avec le bain liquide est à peu près constante et devient relativement d'autant plus petite que l'épaisseur des tôles augmente.

Si on suppose que l'évacuation de la chaleur développée dans le bain se répartit entre les patins et les tôles proportionnellement à la longueur de leur contact avec le bain, la proportion de chaleur évacuée par les patins peut s'exprimer par la formule :

$$\frac{l}{l + e}$$

l étant la largeur apparente du cordon,
 e étant l'épaisseur des tôles.

Dans le tableau 3.3 nous avons rapporté dans la colonne 5 la proportion de chaleur évacuée par les patins, déduite des mesures données dans le tableau 3.1 et dans la colonne 6 les mêmes valeurs calculées selon la formule $\frac{l}{l+e}$.

Si on porte en diagramme les valeurs calculées en fonction des valeurs mesurées (fig. 3.1) on constate que ces dernières sont généralement un peu moins élevées. Mais en fait les patins sont en contact non seulement avec le bain, mais aussi avec la zone adjacente à haute température sur une distance totale environ égale à 2,5x la largeur du bain. On doit en conclure que le coefficient de transmission global des patins est sensiblement inférieur à celui des tôles.

TABLEAU 3.3

1) Eprouv n°	2) Ep " e " (mm)	3) Ouvertu- re du joint "d" (mm)	4) Largeur de la soudure "l" (mm)	5) Chaleur évacuée par pa- tins (%)	6) Rapport $\frac{l}{l+e}$ %	7) Rapport $\frac{d}{d+e}$ %
1	15	17	28	70,5	65	53
4	30	17	26,8	46,5	47	36
5	30	25	35,7	55,5	54,5	45
7	60	28	36,6	40	38	32
8	60	28,5	44,9	36,5	43	32
9	60	27	50,4	43,1	46	31
14	100	32	50	29,5	33	24
15	100	24	59	22,6	37	19

Comme on ne connaît pas à priori la largeur "l" du cordon, nous avons fait le même calcul en prenant l'ouverture de joint avant soudage "d" au lieu de la largeur du cordon (colonne 7 du tableau 3.3). La mise en diagramme des résultats (droite n° 2 de la fig. 3.1) montre que les valeurs calculées sont proportionnelles aux valeurs mesurées et que le rapport $\frac{\text{pertes calculées}}{\text{pertes mesurées}}$ vaut 0,8.

On peut donc prédéterminer de façon simple, et avec une précision suffisante, la proportion de chaleur évacuée par les patins ou par les tôles, en fonction de l'épaisseur "e" et de l'ouverture du joint "d".

On a : proportion de chaleur évacuée par les patins = $1,25 \frac{d}{d+e}$
 proportion de chaleur évacuée par les tôles = $1,25 \frac{e}{d+e}$

La chaleur évacuée par les tôles et les patins peut aussi être prédéterminée en valeur absolue en se basant sur la valeur de 10 kcal développée par cm³ de chanfrein.

C-) Chaleur évacuée par les tôles.

La chaleur qui passe dans les tôles par cm courant de la tranche du joint est donnée à la colonne 5 du tableau 3.1 et rappelée dans la colonne 3 du tableau 3.4.

Si on divise ces valeurs par l'épaisseur de la tôle, on trouve la chaleur transmise par cm² de la tranche du joint (colonne 4 du tableau 3.4).

TABLEAU 3.4

1) Eprouvette n°	2) Epaisseur	3) Chaleur évacuée par les tôles (joules/cm)	4) Chaleur évacuée par la tranche du joint (joules/cm ²)
1	15	38.400	25.600
4	30	118.000	39.400
5	30	124.000	41.300
7	60	356.000	59.300
8	60	445.000	74.100
9	60	413.000	68.900
14	100	845.000	84.500
15	100	790.000	79.000

On constate que la quantité de chaleur à évacuer par cm² augmente avec l'épaisseur même si l'ouverture du joint reste constante, ce qui résulte de la réduction de la perte de chaleur évacuée par les patins. On doit en déduire que le régime thermique de soudage est d'autant plus chaud que les tôles sont plus épaisses, ce qui sera confirmé par les mesures de température exposées au chapitre IV.

IV. CONTROLE DES TEMPERATURES.

Le contrôle des températures pendant le soudage et au cours du refroidissement a été effectué dans un double but :

- 1° Déterminer le régime thermique propre aux procédés de soudage vertical montant.
- 2° Disposer de données sur la valeur et la répartition des températures qui pourraient être nécessaires pour expliquer les résultats obtenus dans les mesures de déformations et de contraintes résiduelles.

A-) Méthode de mesures.

Les premières mesures ont été effectuées par le moyen classique de couples Fe-Constantan, Chromel-Alumel ou Pt - Pt-Rh insérés dans des trous forés dans les tôles. Bien que les essais préliminaires aient été satisfaisants, et que toutes les précautions fussent prises pour assurer un bon contact du couple au fond du trou, il est apparu, après l'exécution des trois premières éprouvettes, des erreurs tantôt occasionnelles, tantôt systématiques.

Après essais complémentaires, nous avons été amenés à remplacer les couples par contact par des couples soudés (voir annexes III, VIII, IX et XIII aux rapports trimestriels). Comme ces couples ne pouvaient pas être placés à la surface des tôles pour laisser le libre passage des patins de refroidissement et que nous estimions préférable de faire les mesures dans le centre, ils ont été préalablement soudés sur des tiges d'acier insérées à frottement doux dans des trous situés à mi-épaisseur de la tôle (fig. 4.1).

En insérant ces tiges à des profondeurs plus ou moins grandes, on situait les couples à une distance variable de la tranche de la tôle. Après sciage de l'éprouvette, on mesure sur les coupes effectuées au droit des couples leur distance exacte à la ligne de fusion. Les 10 à 12 couples utilisés sur chaque éprouvette étaient échelonnés de 100 en 100 mm environ le long du joint, comme représenté à la fig. 4.2.

Cet échelonnement a supprimé une erreur systématique qui se produit lorsque les couples sont situés sur une même ligne transversale au joint, ce qui était le cas des couples par contact utilisés dans les 3 premières éprouvettes. A partir de ce moment, les résultats obtenus concordent bien entre eux et avec ceux fournis par la profondeur de la zone de modification structurale.

Rappelons que l'enregistrement a été fait au moyen d'un enregistreur Consolidated avec galvanomètre à miroir, branché sur les couples au moyen d'un commutateur à 12 contacts. Les mesures ont été faites en continu pendant la phase des grandes variations et de façon intermittente en dehors.

B-) Résultats.

Les relevés des températures se présentent sous la forme de la fig. 4.3. Les températures relevées pour chaque couple y sont portées en fonction du temps et de la position du bain; sous le diagramme sont reportées les positions des couples le long du joint. A partir de ces mesures on peut tracer les courbes isothermes qui définissent le régime quasi stationnaire des températures accompagnant le bain de métal (fig. 4.4).

Le régime thermique peut également être caractérisé d'une façon plus schématique par la courbe des températures maxima successivement atteintes par des points situés sur une ligne transversale à la soudure (fig. 4.5).

Ces dernières courbes ont été établies pour chaque éprouvette; elles diffèrent assez peu lorsqu'on passe du procédé Electrogaz au procédé Electroslag (fig. 4.6) ou lorsque la pénétration varie (fig. 4.7 et 4.8).

Par contre, la fig. 4.9 montre l'influence prépondérante de l'épaisseur des tôles. Cette influence ressort également des valeurs rassemblées dans le tableau 4.1, à savoir :

Colonne 3 : la profondeur moyenne de la zone ayant dépassé 900° (zone d'influence).

Colonne 4 : la vitesse moyenne de refroidissement dans l'intervalle de température de 900 à 700°, déterminée à partir des courbes analogues à celles de la fig. 4.3. Cette vitesse de refroidissement dépend de la distance du point considéré à la ligne de fusion, mais les valeurs relevées ont montré un écart assez faible entre les points situés tout près de la ligne de fusion et ceux situés à l'extrémité de la zone d'influence c'est-à-dire à 5 ou 10 mm du métal fondu. C'est pourquoi nous avons donné la moyenne des résultats obtenus.

Pour fixer les idées, nous avons rappelé, dans le bas du tableau, l'ordre de grandeur des valeurs trouvées en soudage manuel (5).

TABLEAU 4.1

1) Eprouvette n°	2) Epaisseur	3) Profondeur moyenne de la zone d'influence (mm)	4) Vitesse moyenne de refroidissement de la zone d'influence entre 900 et 700° 1°/sec.
1	15	7	5
4	30	11,5	3
5	30	13	2,6
7	60	15	1,10
8	60	16,5	1,05
9	60	14	1,20
14	100	18	0,72
15	100	20,3	0,74
Soudage manuel à l'arc.	6	6	45
	12	4	72
	25	3	90
	40	2	95

Les différents critères caractérisant le régime thermique :

- chaleur évacuée par la tranche des tôles,
- profondeur de la zone d'influence,
- vitesse moyenne de refroidissement dans la zone d'influence.

ont été portés en diagramme en fonction de l'épaisseur des tôles (fig. 4.10).

La faible dispersion des points relatifs à une même épaisseur et qui correspondent :

pour l'épaisseur de 30 mm - à l'emploi des procédés différents (Electrogaz et Electroslag),

pour l'épaisseur de 60 mm - à une pénétration différente,

pour l'épaisseur de 100mm - à l'emploi de 1 ou 2 fils conjugué à une vitesse de soudage et une pénétration différente,

montre que toutes ces variables n'ont pas une influence déterminante. Par contre, l'épaisseur doit être retenue comme facteur prépondérant gouvernant le régime thermique.

La fig. 4.11 permet la comparaison des vitesses de refroidissement en soudage manuel à l'arc et électroslag et montre l'influence inverse de l'épaisseur des tôles selon le procédé.

C-) Conclusions.

Les chiffres rassemblés dans le tableau 4.1 et les diagrammes des fig. 4.10 et 4.11 montrent que le régime thermique est d'autant plus chaud que l'épaisseur des pièces est élevée, à l'inverse de ce qui se passe dans les procédés habituels de soudage manuel ou automatique en multipasses.

Il en résulte du point de vue soudabilité métallurgique du métal de base, des conséquences importantes à l'avantage du soudage vertical montant :

- 1) A épaisseur égale, l'effet de trempe subi par le métal de base au voisinage de la soudure est sensiblement moindre qu'en soudage multipasses. La limite de soudabilité métallurgique des aciers spéciaux se trouve donc déplacée vers les nuances plus élevées en résistance ou en éléments d'alliage pour autant que ces aciers ne nécessitent pas un régime thermique froid.

- 2) A qualité égale, l'effet de trempe diminue au lieu d'augmenter avec l'épaisseur (fig. 4.11). L'épaisseur ne constitue donc plus une limite à la soudabilité métallurgique des aciers.
- 3) Tant du point de vue nuance qu'épaisseur, le préchauffage, appliqué dans le but de reculer la limite de soudabilité, n'est plus nécessaire; ceci est particulièrement intéressant pour les fortes épaisseurs ou l'application du préchauffage se heurte à des difficultés matérielles importantes et grève sensiblement le coût du soudage.
- 4) En outre, les valeurs moins élevées du gradient des températures autour du bain de fusion doivent faire présumer un abaissement correspondant du gradient des contraintes internes. Ce point sera examiné ultérieurement dans le chapitre relatif aux contraintes.

V. FORME ET DIMENSIONS DU BAIN DE FUSION.

A-) Forme du bain.

La section transversale du cordon présente une forme légèrement convexe pour les fortes épaisseurs, c'est-à-dire en 60 et 100 mm et une forme droite ou légèrement concave en 30 mm d'épaisseur (fig. 5.1).

On remarque, dans toutes les épaisseurs, un évasement très net de la forme du cordon au voisinage de la surface des tôles, sur une profondeur assez constante d'environ 7 mm. Sur l'épaisseur de 15 mm il ne subsiste que cet effet d'évasement qui donne au cordon l'aspect d'un chanfrein X très élargi. Cette particularité est confirmée par de nombreux essais et par d'autres auteurs (4) mais elle ne semble pas avoir reçu d'explication satisfaisante à ce jour.

L'intention primitive de modifier sensiblement la forme du cordon dans une éprouvette en 60 mm s'est avérée irréalisable pour cette épaisseur relativement faible et a été abandonnée. Comme on le verra ultérieurement, par les mesures de contraintes et de température en épaisseur, il est peu probable que la forme des cordons, dans les limites opératoires possibles, puisse constituer un facteur de variation important.

B-) Dimensions du bain ou pénétration.

La seule dimension du cordon qui puisse varier est sa largeur moyenne, laquelle est égale à l'ouverture du joint plus deux fois la profondeur moyenne de pénétration. Comme cette profondeur est assez variable le long de la ligne de fusion et n'offre généralement pas un grand intérêt en elle-même, elle est souvent remplacée par la valeur de la pénétration qui exprime en % le rapport volumétrique du métal de base fondu au métal apporté.

Cette pénétration a été contrôlée pour chaque éprouvette ainsi que dans des essais préliminaires effectués sur une tôle n° 6. En examinant les valeurs trouvées en fonction des paramètres, tension, intensité, épaisseur des tôles, on a constaté que la pénétration dépendait principalement de la tension de soudage. La figure 5.2 représente les valeurs moyennes obtenues dans les essais préliminaires et définitifs en fonction de la tension de soudage. Outre la dispersion assez importante d'une éprouvette à l'autre que l'on constate sur ce diagramme, nous avons également trouvé dans quelques cas une assez forte dispersion dans une même éprouvette.

Si on désire modifier la pénétration, on agira donc sur la tension de soudage dans le sens indiqué, mais il sera prudent de ne pas trop se fier au résultat escompté en valeur absolue, même sur la base d'essais préliminaires. Cette question pourrait être approfondie, mais tel n'était pas le but de l'étude.

VI. DEFORMATIONS DES TOLES PENDANT ET APRES SOUDAGE.

A-) Introduction.

La connaissance des déformations qui se manifestent pendant et après soudage, est utile pour le constructeur afin qu'il puisse en tenir compte lors du montage des pièces avant soudage.

Afin de mieux étudier la déformation des éprouvettes après soudage, on a procédé à des mesures avant, pendant et après le chauffage et le refroidissement de la pièce. Dans beaucoup d'études de déformations, les auteurs se contentent de mesures faites avant et après soudage et essayent d'expliquer les résultats en ne prenant en considération que le phénomène du refroidissement. En agissant ainsi, ils négligent la phase intermédiaire du chauffage qui, comme on le verra, est essentielle pour comprendre l'ensemble des déformations et la répartition des contraintes résiduelles.

Toutefois, les mesures pendant le soudage sont difficiles; elles se sont limitées à quelques bases de mesure, s'étendant sur la largeur et la hauteur de l'éprouvette. Il est évident que ces mesures ne donnent que des valeurs moyennes des déformations et qu'en vue de connaître la variation locale de celles-ci il est nécessaire d'utiliser des petites bases de mesure.

Le présent chapitre résume les mesures des déformations faites pendant et après soudage des différentes éprouvettes

B-) Méthodes de mesure.

Comme déjà signalé, les tôles sont maintenues par un talon inférieur de départ en forme de U et par un étrier fixé sur les talons supérieurs de sortie (fig. 2.1).

Les efforts engendrés par le chauffage et le refroidissement sont tels que ces clames de fixation ne peuvent avoir qu'un faible effet sur les déformations. Les déformations mesurées sont donc pratiquement représentatives pour des pièces soudées librement.

Les déformations des tôles pendant le soudage ont été relevées au moyen de comparateurs dont la sensibilité était de 0,01 mm. Ceux-ci étaient placés aux endroits indiqués à la fig. 6.1. Les lectures ont été faites pendant le chauffage et le refroidissement complet des éprouvettes.

Le retrait transversal des cordons de soudure a été relevé en mesurant des bases de 200 mm placées à cheval sur le cordon de soudure (fig. 6.2) à l'aide d'un pied à coulisse dont la sensibilité était de 0,05 mm.

Pour la mesure des déformations longitudinales et transversales locales, des réseaux rectangulaires (fig. 6.2) ou triangulaires (fig. 6.3) ont été matérialisés sur les deux faces des éprouvettes. Cette matérialisation était réalisée soit par des petits trous coniques pour l'emploi du déformètre de Whitemore (base de mesure 254 mm - sensibilité 2,54 μ) soit par des billes serties pour l'emploi du déformètre Pfender (base de mesure 100 mm ou 20 mm - sensibilité 1 μ).

Un relevé plus détaillé des déformations longitudinales à mi-longueur du cordon de soudure entre les lignes G et H (fig. 6.4A), a été effectué avec le déformètre de Whitemore. De même, pour les déformations transversales, un relevé plus serré a été effectué selon les lignes X, Y, Z (fig. 6.4B), avec le déformètre de Pfender sur des bases de 20 mm.

Le retrait angulaire était pratiquement nul, grâce à la forme symétrique du chanfrein utilisé pour les procédés électrogaz et électroslag.

C-) Résultats des mesures.

1) Déplacements relatifs pendant le soudage et forme des tôles après soudure.

Les déplacements transversaux pendant le soudage, à mi-longueur et au sommet des éprouvettes sont donnés dans les figures 6.5 et 6.6. On constate que les variations des retraits à mi-longueur (fig. 6.5) suivent la même allure pour toutes les tôles; le joint se ferme graduellement au fur et à mesure que le dépôt de soudure monte. Au moment où ce dépôt atteint le milieu de la tôle, les bords des joints se sont rapprochés de 1,5 à 3 mm. Le déplacement, qui atteint 2 à 3,5 mm lorsque la soudure est terminée s'agrandit pendant le refroidissement jusqu'à la température ambiante pour atteindre environ 5 mm.

Le déplacement au sommet de la tôle, fig. 6.6, varie fort peu, environ 0,5 mm pendant le soudage même. Pendant le refroidissement à la température ambiante, on constate un déplacement de 1,5 à 3 mm.

Les déplacements Z1 et Z2 de la tôle n° 15 de 100 mm font exception à cette règle. Cette irrégularité est probablement due à une déformation excessive pendant le soudage, quoique ceci ait pu être généralement évité pour toutes les autres tôles par l'étrier de sortie. Lors du refroidissement le rapprochement des tôles suit toutefois la même loi que pour les autres éprouvettes. Ceci montre clairement que les étriers, si leurs dimensions sont appropriées, empêchent les déplacements excessifs des tôles pendant le soudage, mais ne peuvent toutefois pas empêcher le retrait pendant le cycle de refroidissement.

La figure 6.7 nous donne, pour la tôle n° 14 de 100 mm, les déplacements relevés aux endroits indiqués à la figure 6.1 en fonction de la position du bain de fusion le long du joint, puis en fonction du temps pendant le refroidissement. Au cours du soudage, le retrait du bord inférieur Z3 augmente régulièrement jusqu'à 1,9 mm en fin de soudage et se stabilise à 3 mm lorsque la tôle est complètement refroidie. Le déplacement le long de Z1 au milieu de la tôle atteint au total 5 mm. Le déplacement le long de Z2 au sommet de la tôle est légèrement négatif pendant le soudage, les bords du joint s'écartent légèrement; mais dans le stade final et pendant le refroidissement, le joint se referme de 2,3 mm.

Les fibres longitudinales extérieures Z5 se raccourcissent d'abord pendant le soudage sous l'effet de la flexion des tôles, raccourcissement qui est ensuite annulé par un allongement dû à l'échauffement graduel de la pièce. Finalement, les fibres extérieures se raccourcissent de 1,2 mm pendant le refroidissement.

Les fibres longitudinales Z4 situées à environ 130 mm du bord du joint s'allongent sous l'effet de l'échauffement et la flexion de la tôle par les efforts thermiques. Un allongement permanent de ces fibres, d'environ 0,1 mm, subsiste après refroidissement total.

Dans le tableau 6.1 on a repris, pour toutes les tôles, les retraits aux divers endroits Z1 à Z5 :

- 1) mesurés au moment où la soudure est achevée,
- 2) après refroidissement à l'ambiante de la tôle,
- 3) en outre, on a donné, à titre de comparaison, les valeurs obtenues par intégration des déformations le long de ces lignes.

TABLEAU 6.1.

Retrait le long des lignes Z1 à Z5, figure 1.

Tôle	Ep. (mm)	retrait en mm														
		Z1			Z2			Z3			Z4			Z5		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	15	+1,5	-	+2,1	-1,5		+0,1	-	-	+1,3	-	-	+0,55	-	-	+0,7
4	30	-	-	+2,3	-		-0,1	-	-	+1,2	-	-	-0,1	-	-	+0,4
5	30	+2,0	-	+2,6	+0,6		+1,3	-	-	+1,7	-	-	+0,1	-	-	+0,7
7	60	+3,1	-	+3,4	+0,7		+1,9	-	-	+1,9	-	-	0,0	-	-	+0,9
8	60	+3,7	+5,3	+4,7	+0,6	+3,3	+2,7	-	-	+3,3	-	-	+0,2	-	-	+0,9
9	60	+3,0	+4,7	+3,7	+0,4	+2,3	+1,1	+2,0	+3,6	+2,5	-2,9	0,0	+0,2	-0,4	+1,3	+0,9
11	100	+3,5	+5,0	+4,4	+0,2	+2,3	+1,4	+1,9	+2,9	+2,2	-3,8	+0,1	+0,15	-0,2	+1,2	+1,25
15	100	+1,4	+4,6	+4,0	-2,8	-1,3	-1,5	+1,0	+2,9	+3,0	-3,2	-0,4	-0,1	-0,4	+0,9	+1,5

(1) retrait au moment où la soudure est achevée.

(2) retrait après refroidissement de la tôle à l'ambiante.

(3) retrait déterminé à partir des mesures des déformations.

Sur la base de ces mesures on a reconstitué la forme prise par la tôle 14 à titre d'exemple, à différents stades d'exécution du joint (fig. 6.8). Dans cette figure les tôles sont dessinées à l'échelle de 1/20; les déplacements sont amplifiés 2 fois. On constate donc que sous l'effet d'un bain de fusion montant, les fibres longitudinales du joint s'allongent sous l'effet de l'échauffement; les deux tôles fléchissent dans leur plan et les bords du joint deviennent convexes. Le retrait transversal se manifeste sur la presque totalité de la hauteur de la tôle, à l'exception du sommet où le joint s'ouvre. A la fin du soudage l'éprouvette atteint pratiquement sa forme définitive. Comme la température de la tôle est à ce moment de 100 à 200°C, un retrait général se produit pendant le refroidissement et la tôle se raccourcit de 2,5 mm dans le sens longitudinal, et de 1,4 mm dans le sens transversal.

La figure 6.9 nous donne la forme prise par la tôle n° 5 de 30 mm reconstruite en partant des mesures de déformations du réseau triangulaire.

Les déformations obtenues par mesure des petites bases du réseau confirment celles obtenues par les grandes bases pendant et après soudage.

Ces constatations sont d'ailleurs en bon accord avec celles faites par Okerblom dans son traité " Schweissspannungen in Metalkonstruktionen ".

Il est utile d'observer ici que beaucoup d'auteurs, en négligeant les déformations préalables dues au chauffage et en ne considérant que le phénomène du refroidissement, se font une image fautive de la pièce déformée après soudage. Ainsi, il est largement diffusé que les bords libres prennent une forme convexe.

2) Retrait transversal des bords du joint.

Comme on le verra plus loin, paragraphe 4, le retrait transversal de la tôle se localise pratiquement dans sa totalité dans le joint même, les déformations transversales élastiques et plastiques du métal de base étant négligeable vis-à-vis de ce retrait. La figure 6.10 donne le retrait transversal du joint pour les tôles n° 7, 8 et 9 de 60 mm, et la figure 6.11 pour les tôles n° 14 et 15 d'épaisseur 100 mm.

Si l'apport de chaleur par cm est plus élevé, le retrait transversal augmente (comparer tôles 8 et 7). Si, par contre, l'apport de chaleur par cm est tenu pratiquement constant, mais la vitesse de soudage s'accroît, le retrait à mi-hauteur de la tôle reste constant, mais le retrait au début du joint augmente et l'ouverture du joint au sommet de la tôle a tendance à s'ouvrir d'avantage. Dans ce dernier cas, la rotation des deux parties de l'éprouvette est plus prononcée. Toutefois, la courbure des bords du joint est sensiblement la même pour toutes les tôles soudées. Cela implique que la distribution des contraintes résiduelles sera sensiblement la même dans toutes les tôles.

Le retrait transversal du joint à mi-hauteur de la tôle, exprimé en pourcentage de l'ouverture du joint (tableau 2.3), varie entre 10,4 et 16,5 %, mais semble fort peu dépendant de l'épaisseur de la tôle (fig. 6.12).

Ces chiffres sont inférieurs aux valeurs trouvées pour le soudage manuel des soudures en V et en X, mais comparables aux valeurs obtenues pour le soudage par des procédés automatiques conventionnels. Toutefois, on doit se rappeler que l'ouverture du joint en électrogaz ou électroslag, comparée à la largeur moyenne théorique des chanfreins en V ou en X, est environ 8 fois plus grande pour des tôles de 15 mm et 2 fois plus grande pour des tôles de 60 mm. La figure 6.13 donne le retrait transversal à mi-hauteur de la tôle en fonction

de la section nette du joint à exécuter (épaisseur de la tôle multipliée par l'ouverture du joint). Comme on pouvait s'y attendre le retrait augmente sensiblement d'une façon linéaire avec le volume du métal déposé par unité de longueur. Ce retrait à mi-longueur du joint peut être prédéterminé par la formule suivante :

$$r = 1,8 + 0,00075 S \quad \text{ou}$$

r = retrait en mm
S = section nette du joint en mm²

3) Déformations angulaires des tôles.

Les déformations angulaires ont été déterminées indirectement par la mesure du retrait transversal sur les deux faces de la soudure. Si on appelle γ l'angle de la déformation, on a :

$$\text{tg } \gamma = \frac{r_{AV} - r_{AR}}{e}$$

r_{AV} : retrait transversal face avant, mm.

r_{AR} : retrait transversal face arrière, mm.

e : épaisseur de la tôle, mm.

Les déformations angulaires sont données dans le tableau 6.2.

On peut donc constater que les déformations angulaires sont en général inférieures à 30'. Notons que les soudures multipasses donnent des distorsions angulaires d'environ 1° pour des joints en X soigneusement exécutés et peuvent même dépasser 5° pour des joints en V ou en U.

Le retrait angulaire est donc négligeable dans les joints E.S ou E.G, comme on pouvait s'y attendre puisque l'exécution du joint et le refroidissement sont symétriques.

TABLEAU 6.2

Déformations angulaires en 1° des tôles soudées.

Tôle n°	Ep mm	Bas		Milieu		Haut	
		mm	angle 1°	mm	angle 1°	mm	angle 1°
1	15	-0,1	-23'	+0,05	+11'	+0,55	+2°10'
4	30	-0,7	-1°20'	+0,15	+17'	-0,4	-0°45'
5	30	+0,1	+11'	+0,15	+17'	+0,4	+0°45'
7	60	+0,1	+ 5'	+0,2	+11'	+0,1	+ 5'
8	60	-	-	-	-	-	-
9	60	-0,3	-17'	+0,4	+23'	+0,4	+23'
14	100	-0,9	-31'	-0,8	-27'	+0,65	+22'
15	100	+0,35	+12'	+0,9	+31'	+1,7	+58'

Toutefois, la tôle n° 1 de 15 mm montrait un gauchissement sévère dont le maximum atteint 25 mm, relevé en posant l'éprouvette sur une table plane. Dans le cas de soudage par le procédé électrogaz ou électroslag des tôles dont l'épaisseur est de l'ordre de 15 mm, il faudra éventuellement prendre certaines précautions pour éviter le gauchissement des pièces.

4) Déformations des tôles dans leur plan.

Les déformations dans le plan de la tôle sont constituées de déformations élastiques et plastiques. Pour séparer la zone des déformations élastiques de celle des déformations plastiques, il faudrait les contraintes. Dans le cas de traction simple, la séparation des zones élastique et plastique est facile; il suffit en effet de tracer la ligne ayant comme dilatation la valeur

$$\epsilon_{el} = \frac{\sigma_{el}}{E}$$

ou σ_{el} est la limite élastique de l'acier et E est le module d'élasticité.

Mais comme l'état de contrainte en surface est double et que les directions principales ne sont pas connues, il s'avère difficile de tracer la ligne de séparation entre les zones élastiques et plastiques sans détermination des contraintes résiduelles par relaxation élastique.

Si les directions principales sont connues, on peut, en acceptant par exemple comme condition de plasticité le critère de Huber-Von Mises, exprimer celui-ci en dilatations utilisant les formules de Hooke. Mais, comme la mesure des contraintes résiduelles constituait une partie essentielle de la recherche, on a préféré déterminer l'étendue de la zone élastique par la relaxation des déformations élastiques.

Comme les déformations dans le plan de la tôle sont pratiquement indépendantes de l'épaisseur de celle-ci, on s'est contenté de donner ici les résultats obtenus sur la tôle n° 9 de 60 mm.

- a) Déformations longitudinales mesurées parallèlement au joint, suivant les lignes A, B, C, D, E et F de la fig. 6.2. Les résultats sont donnés à la fig. 6.14. On constate donc que le long des lignes A, B et C on mesure un raccourcissement qui provient du fait que ces endroits sont le siège des contraintes de compression. Si, aux extrémités des lignes E et D on constate un raccourcissement, par contre la partie centrale de ces lignes s'allonge.

- b) Déformations longitudinales mesurées perpendiculairement au joint : ces déformations ont été mesurées suivant les lignes GH au centre de la tôle (fig. 6.2 et 6.4). Les résultats sont donnés à la figure 6.15. Ces données confirment celles des fig. 6.14. On voit que la déformation longitudinale est pratiquement nulle à une distance de 15 à 20 cm du joint (ligne D de la fig. 6.14).

- c) Déformations transversales mesurées parallèlement au joint : ces déformations ont été mesurées sur des bases comprises entre les lignes A-B, B-C, C-D et D-E (fig. 6.2). Les résultats sont consignés aux figures 6.16. On constate donc dans la partie centrale que les bases s'allongent alors qu'aux extrémités elles se raccourcissent.
- d) Déformations transversales mesurées perpendiculairement au joint : ces déformations ont été déterminées sur des bases de 20 mm, suivant les trois lignes X, Y et Z de la fig. 6.2; la disposition des bases de mesure est donnée à la fig. 6.4B. Conformément aux figures 6.16, les bases s'allongent dans la section XX, toutefois en se rapprochant du cordon elles se raccourcissent (fig. 6.17). Les variations au sommet de la tôle (ligne YY) et au 3/4 de la hauteur (ligne ZZ), sont données aux fig. 6.17, Y et Z).

La figure 6.18 établie à partir des relevés précédents nous montre, sur la partie gauche, la distribution des déformations longitudinales ϵ_x et sur la moitié droite, la distribution des déformations transversales ϵ_y . Cette distribution des déformations correspond à une flexion complexe de la tôle mettant les fibres extérieures en compression et les bords du joint en traction. Au chapitre VII les contraintes résiduelles calculées à partir de ces déformations élastiques et les contraintes résiduelles trouvées par relaxation directe sont comparées entre elles.

Dans toutes les éprouvettes, les déformations longitudinales et transversales montrent une transition très brutale entre les allongements et les contractions à une distance d'environ 50 mm de la ligne de fusion.

Dans cette région la détermination des déformations est d'ailleurs très difficile étant donné l'endommagement fréquent des bases de mesure par la proximité du bain de fusion. Cette zone est sans doute la région qui a subi une déformation plastique permanente pendant le cycle thermique du soudage. L'allongement longitudinal atteint est maximal à une distance du bord de la ligne de fusion de 25 mm pour la tôle de 15 mm, de 30 à 35 mm pour les tôles de 30 et 60 mm et de 40 à 50 mm pour les tôles de 100 mm d'épaisseur.

Les déformations transversales sont toujours plus petites que les déformations longitudinales. Au milieu de l'éprouvette elles sont pratiquement constantes et de l'ordre de $+200.10^{-6}$. Le retrait transversal dû aux contraintes élastiques dans la tôle est donc de l'ordre de +0,2 mm si l'éprouvette a une largeur de 1000 mm. Ce retrait est donc faible vis-à-vis du retrait de la soudure (5,0 mm environ).

Dans le tableau 6.3 nous avons groupé les déformations longitudinales moyennes de toutes les tôles. Ces résultats sont dessinés dans la figure 6.19. A part les résultats obtenus sur les tôles 1 et 4, on peut constater que les déformations longitudinales varient fort peu avec l'épaisseur de la tôle ou le mode d'exécution du joint.

TABLEAU 6.3

Déformations longitudinales moyennes en $\epsilon 10^{-6}$.

Tôle n°	Ep. mm	A b s c i s s e													
		A		B		C		D		E		F		G	
		d	ϵ_m	d	ϵ_m	d	ϵ_m	d	ϵ_m	d	ϵ_m	d	ϵ_m	d	ϵ_m
1	15	440	-495	315	-450	190	-430	65	-270	-	-	-	-	-	-
4	30	440	-204	313	- 26	195	+ 27	65	+130	65	+130	65	+ 26	-	-
5	30	440	-435	313	-280	195	-150	65	+ 56	65	+ 56	65	- 21	-	-
7	60	430	-544	305	-335	195	-125	65	+114	65	+114	65	+ 55	-	-
8	60	485	-635	385	-465	285	-277	185	-200	85	- 68	85	-138	-	-
9	60	485	-600	385	-420	285	-260	185	-205	85	- 44	85	+ 18	-	-
14	100	570	-606	470	-470	370	-285	270	-200	170	-112	70	- 35	70	-36
15	100	570	-720	470	-506	370	-340	270	-195	170	- 85	70	+ 10	70	+29

d = distance à l'axe de la soudure.

m = déformation longitudinale moyenne.

D-) Conclusions.

Bien que l'épaisseur des tôles, l'ouverture des joints, le régime thermique différent d'une tôle à l'autre, les résultats obtenus ont permis de dégager quelques conclusions générales :

- a) Les retraits mesurés sur la largeur totale des éprouvettes ne diffèrent que très peu des retraits déterminés à l'aide des bases de mesure courtes placées à cheval sur la soudure. Le retrait transversal se localise donc uniquement dans le joint même.
- b) Le retrait transversal atteint sa valeur maximale à peu près à mi-longueur du joint.
- c) La fermeture du joint à mi-hauteur des tôles pendant le soudage atteint environ 2/3 du retrait total après refroidissement. Il faut tenir compte de ce retrait pour éviter des court-circuits entre les becs d'électrodes et les parois de la tôle
- d) Le retrait transversal du joint à mi-hauteur de la tôle augmente linéairement en fonction de la section nette du joint et donc approximativement avec l'épaisseur des tôles; le retrait "r" peut être prédéterminé par la formule suivante :
$$r = 1,8 + 0,00075 S$$
où "S" est la section nette du joint en mm² et "r" le retrait en mm.
- e) Le retrait longitudinal des bords extérieurs des tôles est de l'ordre de 0,5 à 0,7 mm par mètre de longueur.
- f) Le retrait longitudinal du cordon est négligeable et est de l'ordre de $\pm 0,1$ mm par mètre de longueur.

g) Il résulte du retrait transversal et longitudinal que les bords parallèles au joint présentent une légère concavité et les bords perpendiculaires une légère convexité.

h) Les retraits angulaires sont négligeables et inférieurs à 30'. Néanmoins des précautions sont à prendre pour des tôles minces qui peuvent se gauchir sévèrement pendant l'exécution du joint.

i) Les déformations dans le plan de l'éprouvette reflètent une flexion complexe des tôles. Ces déformations sont plastiques dans le cordon et dans une zone parallèle au cordon qui s'étend sur une largeur de 25 à 50 mm de part et d'autre de la ligne de fusion dans la gamme des épaisseurs étudiées.

VII. DETERMINATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES EN SURFACE.

A-) Introduction.

Dans la littérature technique on peut trouver beaucoup de résultats de mesures de contraintes résiduelles dans des ouvrages soudés. Toutefois, ces données ont généralement trait à des soudures réalisées par des procédés utilisant la technique multipasses. Ces résultats ont souvent été relevés sur des éprouvettes de laboratoire, c'est-à-dire dont la largeur ne dépassait guère 50 cm et dont l'épaisseur atteignait au maximum 40 mm. Ces mesures ont montré que les contraintes longitudinales dans le cordon de soudure sont des contraintes de traction de l'ordre de grandeur de la limite élastique du métal déposé et qu'elles diminuent rapidement dans le métal de base où elles changent de signe. Les contraintes transversales sont nettement plus faibles; elles peuvent toutefois atteindre des valeurs élevées quand les pièces sont bridées; dans ce cas la valeur des contraintes transversales dépend de la largeur de la pièce; la valeur des contraintes diminue quand la largeur augmente. Peu de données sont disponibles sur l'influence de l'épaisseur des tôles. Les chercheurs admettent en général que la répartition des contraintes suivant l'épaisseur est constante. Cette hypothèse simplifie énormément le problème puisqu'il suffit de mesurer en surface la relaxation des contraintes situées dans le plan de la pièce pour connaître la contrainte supposée constante sur toute l'épaisseur.

La limitation de la largeur et de l'épaisseur des tôles soudées rendent difficile la transposition des mesures sur des constructions réelles. L'augmentation de la largeur de la pièce a pour effet de la rendre plus raide dans son plan, ce qui doit avoir une répercussion sur les contraintes et sur les déformations plastiques dans le cordon et dans le métal de base.

On conçoit facilement que le soudage de deux bandes étroites créera dans le cordon des contraintes plus faibles que le soudage de deux tôles larges. La rigidité de la tôle est en effet proportionnelle à $e l^3$ ou e est l'épaisseur et l la largeur de chaque tôle non soudée. Pour pouvoir transposer à des constructions réelles les mesures faites sur éprouvettes, il faut assurer à ces dernières une rigidité suffisante. Dans la recherche décrite la largeur des pièces assemblées était de 50 ou de 60 cm. Les deux tôles soudées avaient la même largeur, l'éprouvette était donc symétrique. Okerblom a attiré l'attention sur l'influence de la position du cordon de soudure vis-à-vis des bords libres. Si le cordon n'est pas dans l'axe de la pièce soudée, la répartition des contraintes est dissymétrique.

Outre les grandes dimensions des éprouvettes, cette étude a comme particularité l'emploi d'un procédé de soudage déposant le cordon en une seule passe.

Les contraintes résiduelles créées par le soudage trouvent leur origine dans deux causes différentes : la première est de nature thermique, la seconde de nature mécanique. Les contraintes d'origine thermique apparaissent dans des zones ayant atteint une température minimale qui se subdivisent en deux : la première qui subit le cycle de chauffage suivi du cycle de refroidissement (essentiellement le métal de base); la seconde qui ne subit que le cycle de refroidissement (métal déposé). Les contraintes d'origine mécanique qui apparaissent dans des zones n'ayant pas dépassé la température maximale, sont dues aux déformations de la pièce. Ces déformations peuvent être élastiques ou plastiques.

La situation du métal déposé peut être représentée dans un diagramme $\sigma - \epsilon$ (fig. 7.1) par le point B. Il est impossible de déterminer l'abscisse "b" de ce point; pour connaître l'ordonnée BD, c'est-à-dire la contrainte, il faut relaxer le métal.

La relaxation totale étant élastique se produit suivant la ligne BA; si la relaxation est totale, la technique de la mesure des contraintes résiduelles consiste à mesurer la dilatation "d" qui se manifeste après relaxation; certains procédés de relaxation ne sont que partiels, représentés par exemple par BC, et ne permettent donc que la mesure de la grandeur "c". La théorie de l'élasticité permet, dans certains cas, de calculer "d" en partant de la connaissance de "c". Enfin, l'application de la loi de Hooke permet de calculer la contrainte BD en partant de la dilatation mesurée ou calculée "d".

$$\sigma_B = E_d$$

La situation du métal de base ayant subi le cycle de chauffage et de refroidissement, peut également être représentée par le point B, toutefois, avec cette différence qu'une mesure avant et après soudage donne la grandeur "b" de l'abscisse de B. L'ordonnée de B se détermine par relaxation comme décrit ci-dessus. La situation du métal de base resté froid mais ayant subi, lors du refroidissement du cordon, une déformation plastique, est également représentée par le point B; des mesures avant et après soudage et avant et après relaxation permettent la détermination des coordonnées du point B.

Enfin, la situation du métal de base qui reste froid et qui n'a subi que des déformations élastiques lors du refroidissement du cordon, est représentée par le point F. Des mesures avant et après soudage permettent de situer exactement la position du point F. Ici la relaxation n'est donc pas nécessaire, mais peut constituer une vérification de la déformation mesurée après soudage.

Les déformations "b" et "f", mesurées avant et après soudage ont été exposées en détail dans le chapitre VI. Comme exposé ci-dessus, elles n'intéressent les contraintes que pour autant qu'elles restent élastiques (cas du point F).

B-) Zones ayant subi uniquement des déformations élastiques.

Les déformations mesurées avant et après soudage doivent être inférieures à $\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$ pour le cas de l'état simple de contrainte où σ_e est la limite élastique du métal de base et "E" le module d'élasticité. Dans le cas de l'état double de contrainte, les dilatations mesurées doivent satisfaire la condition de Hübner-Hencky-von Mises, c'est-à-dire que :

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2 \sigma_1 \sigma_2 \leq 2 \sigma_e^2$$

Si ces conditions sont réalisées, les contraintes se calculent directement par les formules :

$$\sigma_1 = E \epsilon \quad \text{dans le cas de l'état simple}$$

$$\text{et } \sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2) \quad \text{dans le cas de l'état double.}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1)$$

Ces contraintes, provenant de la flexion des tôles dans leur plan, ne présentent pas de gradient suivant l'épaisseur de la tôle.

Les résultats obtenus par les mesures directes de déformation avant et après soudage, et par les mesures indirectes avant et après relaxation des bases de mesures sont données dans le paragraphe E.

C-) Zones de la tôle ayant subi des déformations plastiques.

1. Relaxation.

Comme signalé ci-dessus, la détermination des contraintes n'est possible qu'en faisant des mesures avant et après la relaxation qui peut être totale ou partielle.

2. Relaxation totale.

La relaxation totale s'obtient par libération des bases de mesure : ceci peut se faire par forage, sciage ou usinage. La réalisation pratique de ces opérations se butte souvent à de sérieuses difficultés. Si les pièces sont petites, le clamage risque de provoquer, même sous des efforts faibles, des déformations plastiques faussant définitivement les mesures. Si par exemple la fixation dans la machine exige un effort qui crée une contrainte σ_u le point B se déplacera vers B' ou B" en provoquant des déformations plastiques; finalement on détermine les contraintes du point B'1 ou B"1 au lieu du point B (fig. 7.2).

Mais surtout la séquence des opérations de relaxation peut introduire des déformations plastiques. Un exemple simple est celui qui se manifeste souvent quand on procède par forage. Si par exemple une pièce (fig. 7.3) est soumise à des contraintes résiduelles de traction, il est absolument impératif de commencer le forage à l'extrémité de la base de mesure AB, c'est-à-dire à gauche du point A et à droite du point B. Un forage comme indiqué en pointillé crée en effet une forte contrainte de traction dans la direction CD qui doit soumettre le métal entre A et B à des déformations plastiques, déplaçant le point B de la fig. 7.2 vers B".

Cet exemple est donné à titre indicatif, mais la séquence de relaxation est souvent difficile à déterminer.

Pendant les opérations de relaxation, il faut éviter de faire les coupes de relaxation trop près des bases de mesure et il faut essayer de limiter, autant que possible, l'extension ou la compression des zones déformées plastiquement. Ceci n'est pas toujours facile.

Nonobstant, le fait que les chercheurs étaient conscients de ces impératifs, certains résultats de mesure (tôles 7, 8 et 15) doivent être considérés comme faussés par une erreur commise dans la technique de relaxation.

Comme constaté dans les chapitres précédents, la pièce soudée prend la forme générale indiquée à la fig. 7.4; on voit donc que les tôles assemblées ont subi une flexion dans leur plan, créant des contraintes de compression le long des côtés longitudinaux libres. Tenant compte de cette déformation, la relaxation la plus logique consisterait à couper des bords vers le centre, en respectant la symétrie dans l'espace et le temps. Ceci exige malheureusement deux scies. Il était, pour des raisons pratiques, exclu d'utiliser deux machines. Rappelons d'ailleurs que la scie a fait l'objet d'une étude et qu'il n'existait pas sur le marché une machine capable de scier les grosses tôles de la recherche. Cette machine spéciale a été construite pour la recherche suivant les indications des chercheurs (fig. 7.5). Afin de respecter la symétrie dans l'espace, la plupart des tôles ont été sciées suivant le schéma de la figure 7.4, les chiffres indiquant l'ordre chronologique des coupes 1 et 2. Pour certaines tôles cette séquence n'a pas été observée et on a procédé suivant la ligne 3 de la fig. 7.4. Les conséquences de cette relaxation seront examinées lors de la discussion des résultats.

3. Relaxation partielle.

La relaxation totale postule la libération de toutes les contraintes; pour atteindre ce but, il faudrait enlever le plus complètement possible le métal sous-jacent de la base de mesure. La libération en tronçons portant les bases de mesure est facile. Par contre, la libération des bases situées en surface, du métal sous-jacent du tronçon, est très délicate. En découpant des tronçons portant les bases de mesure sur les deux faces libres, on libère quasi toutes les contraintes situées dans le plan de la tôle, mais il

se peut, surtout dans les tôles épaisses, que des contraintes subsistent dans le tronçon, lesquelles ne peuvent être libérées que par découpage en tranches suivant l'épaisseur du tronçon. Pour les tôles relativement minces le découpage en tronçons constitue pratiquement une relaxation totale et les mesures faites sur les faces libres sont représentatives des contraintes pratiquement constantes suivant l'épaisseur. Mais pour les tôles épaisses le découpage en tronçons n'est pas suffisant et un découpage suivant l'épaisseur est nécessaire si l'on ne se contente pas d'une valeur moyenne des contraintes supposées constantes suivant l'épaisseur. Des essais ont montré que la réduction de l'épaisseur des tronçons à 15 mm donne une relaxation suffisante pour obtenir une libération pratiquement totale des contraintes locales en surface.

D-) Méthode de mesure.

1. Bases de mesure.

Les bases de mesure placées en TA avaient une longueur de 20 mm. Elles étaient matérialisées par des billes de 1/16" serties à la surface des tôles.

Cette opération était effectuée après soudage. La variation des bases de mesure avant et après relaxation a été déterminée avec l'extensomètre Pfender, fig. 7.6 à droite, qui a une sensibilité de 0,5 μ . Les dilata-tions étaient donc mesurées avec une précision de $25 \cdot 10^{-6}$. La relaxation des contraintes résiduelles a été obtenue par découpage de tronçons carrés d'environ 35 mm de côté, fig. 7.6 à gauche.

Dans certains cas, ces bases ont été doublées d'extensomètres ohmiques.

2. Calcul

La différence des lectures faites avant et après sciage des tronçons donne les dilatations $\xi_a, \xi_b, \xi_c, \xi_d$ en 10^{-6} mm/mm (fig. 7.7). Les formules suivantes donnent les contraintes principales résiduelles σ_1 et σ_2 en valeur et en direction ψ

$$\sigma_1 = \frac{E}{2} \left[\frac{\xi_d + \xi_b}{1-\eta} + \frac{1}{1+\eta} \sqrt{(\xi_d - \xi_b)^2 + \frac{4}{3} (\xi_c - \xi_a)^2} \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2} \left[\frac{\xi_d + \xi_b}{1-\eta} - \frac{1}{1+\eta} \sqrt{(\xi_d - \xi_b)^2 + \frac{4}{3} (\xi_c - \xi_a)^2} \right]$$

$$\text{tg } 2\psi = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\xi_c - \xi_a}{\xi_d - \xi_b} \right)$$

où "E" est le module d'élasticité de l'acier : 21.000 kg/mm² et η le coefficient de Poisson : 0,3.

L'angle ψ entre la perpendiculaire à l'axe de la soudure et la contrainte σ_1 est mesuré positif dans le sens antihorlogique (fig. 7.7). Pour faciliter la comparaison des contraintes sur les deux faces, leur sens a été conservé le même sur les deux faces antérieure et postérieure.

Entre les 4 dilatations $\xi_a, \xi_b, \xi_c, \xi_d$

il existe la relation :

$$\xi_d^* = 2\xi_c + 2\xi_a - 3\xi_b$$

Ceci permet de contrôler les grandeurs mesurées.

Si la valeur calculée " ξ_d^* " différait de plus de $500 \cdot 10^{-6}$ de la valeur mesurée " ξ_d " on contrôlait les mesures " après découpage " et celles-ci étaient éventuellement écartées.

Toutes les contraintes étaient calculées à l'aide d'une machine calculatrice IBM au laboratoire du Professeur Grosjean de l'Université de Gand.

Pour contrôler l'efficacité de la relaxation par sciage en bloc de 35 x 35 mm, on a fait quelques mesures au moyen d'extensomètres ohmiques collés sur les deux faces extérieures des tronçons découpés dans la soudure. De ceux-ci furent ensuite dégagées deux tranches de 15 mm d'épaisseur supportant les bases de mesure. On constate que cette opération apporte une relaxation supplémentaire variant de -3 à +3 kg/mm².

3. Placement des bases de mesure.

En moyenne 150 points par éprouvette furent placés sur la face avant et arrière; le plus grand nombre de bases étant situé sur le cordon de soudure et sur la section transversale à mi-longueur de la tôle. Les autres bases étaient réparties le long des sections transversales parallèles. Une fois que les résultats obtenus eurent confirmé la symétrie des valeurs des contraintes, les mesures furent limitées à des points situés d'un côté de la soudure. La figure 7.8 montre la répartition des bases de mesure sur la tôle n° 5 de 30 mm.

E-) Résultats des mesures de contraintes en surface.

Dans le tableau n° 7.1, nous rappelons, pour chaque tôle, les références des tableaux et des figures des contraintes résiduelles en surface données dans les dix rapports trimestriels.

Rappelons que l'on a écarté systématiquement, dans toutes les figures, les contraintes dont le ϵ_d calculé différerait de plus de $500 \cdot 10^{-6}$ de la valeur mesurée ϵ_d .

TABLEAU 7.1

Tôle n°	Epais mm	Rapport n°	Tableau n°	Page	Figures n°
1	15	3	3	5- 9	67 - 68
4	30	3	4	13-17	72 - 73
5	30	4	2	14-17	87 - 88
7	60	5	2	3- 8	105 -106
8	60	7	2	3- 8	129 -130
		8	2	3	129B-130B
9	60	6	2	2- 8	125 -126
14	100	9	3-4	4-10	179 -180
15	100	10	3-4	5-11	206 -207

La répartition des contraintes en surface est remarquablement analogue dans toutes les éprouvettes. Les fig. 7.9 et 7.10 donnent les résultats de ces mesures pour la tôle n° 5 de 30 mm soudée en électrogaz. Les figures 7.11 et 7.12 donnent les résultats obtenus sur la tôle n° 9 de 60 mm, soudée en électroslag. On constate que dans la soudure, les directions principales coïncident parfaitement avec l'axe du cordon. Les valeurs des contraintes longitudinales restent pratiquement constantes le long du cordon sauf pour les extrémités où cette contrainte diminue rapidement pour devenir approximativement nulle. La contrainte transversale reste faible, elle est de compression aux extrémités et oscille entre une légère traction ou compression dans la partie centrale.

Dans les autres parties de la tôle, on constate que les directions principales varient graduellement d'un point à l'autre. Cette variation des directions est sensiblement égale pour toutes les tôles étudiées, sauf en certains points dont on parlera plus loin. La fig. 7.13 nous donne, pour la tôle n° 9, l'allure des lignes isostatiques qui sont les tangentes aux directions principales des contraintes résiduelles.

La figure 7.14 donne la répartition des contraintes longitudinales σ_x et transversales σ_y (moyennes des deux faces) le long de l'axe transversal de l'éprouvette n° 9.

Les contraintes longitudinales sont de compression sur les fibres extérieures de l'ordre de 24 kg/mm². Elles diminuent progressivement et passent par zéro à environ 150 mm de l'axe de la soudure. Au delà elles deviennent de traction et atteignent leur valeur maximum au centre du cordon soit environ 22 kg/mm². On constate qu'il n'existe pas un équilibre entre les efforts de traction dans la zone centrale et de compression dans les parties extérieures de l'éprouvette. Les contraintes transversales nécessairement égales à zéro aux bords extérieurs de l'éprouvette, atteignent rapidement une valeur de -7 kg/mm² et deviennent légèrement positives, environ +3 kg/mm² au centre de la soudure.

Il est intéressant de comparer, fig. 7.15, les valeurs des contraintes résiduelles obtenues par relaxation complète des bases de mesure, aux valeurs calculées à partir des déformations longitudinales et transversales exposées dans le chapitre VI. Dans le tableau 7.2 nous avons repris les résultats des bases T Δ qui se trouvent à l'endroit des bases de mesure longitudinales GH (fig. 6.4A).

La concordance entre les valeurs des contraintes longitudinales obtenues par deux voies très différentes est très bonne. Par contre, les valeurs des contraintes transversales obtenues par relaxation sont nettement inférieures à celles calculées à partir des déformations.

TABLEAU 7.2

Comparaison des contraintes résiduelles calculées par les déformations mesurées après soudage avec celles mesurées par relaxation (tôle n° 9).

Distan- ce du bord (mm)	Déformations en 10^{-6}		Contraintes cal- culées par dé- formation kg/mm ²		Contraintes me- surées par re- laxation kg/mm ²	
	longit. σ_x	transv σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
0	- 1050	+ 320	-22,1	0	- 23,0	0
100	- 750	+ 250	-15,7	0	- 19,0	- 9,0
200	- 420	+ 210	- 8,25	+1,95	- 13,0	- 9,0
300	- 80	+ 180	- 0,35	+3,60	- 5,5	- 7,5
400	+ 370	+ 200	+ 9,95	+7,2	+ 6,0	- 3,0

La figure 7.16 montre les valeurs des mêmes contrain-
tes longitudinales σ_x et transversales σ_y pour toutes les
tôles. On constate que l'allure des courbes varie peu d'une
tôle à l'autre. Les valeurs des contraintes résiduelles
maximales restent sensiblement en dessous de la limite
élastique de l'acier de base (34 à 36 kg/mm²) ou du métal
d'apport (33 à 38 kg/mm²). On constate toutefois que les
contraintes longitudinales de compression sur les bords
augmentent avec l'épaisseur et que par contre les contrain-
tes de traction dans le cordon diminuent avec l'épaisseur
des tôles. On a constaté (chapitre III-C) que la quantité
de chaleur absorbée par cm² de la tranche de la tôle aug-
mente plus vite que l'épaisseur. Les efforts thermiques
qui en résultent sont donc plus grand dans le cas des tô-
les fortes que dans le cas des tôles minces. Ceci a pour
effet que les contraintes de compression sur les bords li-
bres augmentent avec l'épaisseur et que par contre les con-
traintes de traction dans le cordon diminuent avec l'épais-
seur. On doit se rappeler que les valeurs des contraintes
résiduelles dans les soudures multipasses sont générale-
ment plus élevées et atteignent fréquemment la limite élas-
tique du métal d'apport.

Dans les figures 7.17 à 7.21, nous avons superposé pour chacune des tôles les valeurs des contraintes longitudinales σ_x et transversales σ_y , dans le cordon de soudure sur les faces avant et arrière. Les observations faites pour la tôle n° 9 restent valables pour toutes les tôles. Le tableau 7.3 donne les valeurs des contraintes moyennes σ_x et σ_y dans le cordon.

TABLEAU 7.3

Tôle n°	Epaisseur (mm)	Procédé	σ_x kg/mm ²	σ_y kg/mm ²
1	15	Electrogaz	+ 26,6	+ 4,7
4	30	Electrogaz	+ 20,5	- 2,2
5	30	Electroslag	+ 23,3	+ 2,1
7	60	Electroslag	+ 13,2	+ 1,7
8	60	Electroslag	+ 16,3	+ 0,25
9	60	Electroslag	+ 15,4	- 2,0
14	100	Electroslag	+ 21,3	+ 1,6
15	100	Electroslag	+ 17,9	- 0,7

Il ressort de ce tableau, comme déjà signalé, que la contrainte longitudinale σ_x diminue quand l'épaisseur de la tôle augmente.

Les tôles n° 14 et 15 montrent une augmentation des contraintes; toutefois, il faut se rappeler que la largeur de ces tôles était de 60 cm au lieu de 50 cm, ce qui a pour effet d'augmenter la raideur et par conséquent de diminuer les contraintes de compression sur les bords et d'augmenter les contraintes de traction dans le cordon.

Quelques valeurs isolées dont l'allure était tout à fait irrégulière par rapport à ce qu'on attendait des contraintes en ces points, ne nous ont pas inquiétés au début de notre recherche (par exemple : tôle n° 1 face avant, points 4, 15 et 62).

Mais dans la tôle n° 7 de 60 mm, toute une série de points localisés dans une zone centrale en dehors de la soudure donnaient des valeurs de contraintes assez normales (fig. 7.22 et 7.23). Des contraintes biaxiales de traction, dont les valeurs dépassaient souvent la limite élastique de l'acier, avaient toujours leurs directions principales dans le même sens, aussi bien sur la face avant que sur la face arrière de la tôle. Après maintes discussions, il fut admis que ces valeurs anormales avaient pu être provoquées soit par l'omission du traitement de relaxation de la tôle, soit par un refroidissement local trop brutal après ce traitement. Mais les tôles n° 8 de 60 mm et les tôles 14 et 15 de 100 mm montraient à nouveau la même anomalie. On constatait que les zones avec des valeurs de contraintes irrégulières étaient toujours situées sur la partie gauche de l'éprouvette, opposée au côté où l'on entamait le sciage de relaxation en bandes parallèles. On observait aussi que les parties extrême des tôles n'étaient jamais affectées par ces anomalies.

Nous pensons actuellement que ces anomalies trouvent leur origine dans les faits suivants :

Les tôles, après l'exécution du joint, sont déformées dans le sens indiqué à la fig. 7.24A, comme exposé en détail au chapitre VI.

Considérons la première phase du découpage à la scie (fig. 7.24B). La scie vient de découper la zone 1 en compression. Les contraintes internes le long de cette coupe se relaxent. Mais comme l'éprouvette est encore suffisamment rigide dans son plan, aucune déformation notable ne se produit.

Dès qu'on dépasse le cordon de soudure, fig. 7.24C on a relaxé les fortes contraintes de traction à la hauteur du cordon. En même temps, la section transversale nette de la tôle est diminuée de telle façon qu'un fléchissement très prononcé des deux parties a lieu dans le sens des flèches. On peut alors constater que les deux faces coupées se referment complètement aux bords extérieurs (1).

Les fibres extérieures de la zone 2, légèrement courbées, ont tendance à se redresser graduellement au fur et à mesure que la coupe avance dans la partie gauche de la tôle. L'effet de resserrement des deux faces coupées commence dès qu'on a dépassé le cordon, s'aggrave graduellement, atteint son maximum, puis diminue quand la coupe s'approche des fibres extérieures en 2.

Ce fléchissement, visible à l'oeil nu, provoque une relaxation des contraintes de compression à l'endroit 2 et un allongement de ces fibres. Mais à la hauteur de l'entaille 3 créée par la scie, il y a une concentration des contraintes dues au fléchissement, ce qui provoque localement une déformation plastique en compression. Cette zone comprimée plastiquement accompagne, pendant un certain temps l'entaille de la scie. Comme le trait de scie passe tout près des bases de mesure, il peut se faire que, localement, ces bases $T\Delta$ soient perturbées par cette déformation plastique accidentelle. On mesure donc sur ces bases un raccourcissement dans une direction qui est plus ou moins perpendiculaire au trait de la scie. La déformation de compression mesurée trouve son origine non dans une relaxation des contraintes internes, mais dans une déformation plastique concentrée, imposée par des efforts secondaires pendant l'opération de la relaxation. Le calcul des contraintes à partir de ces valeurs faussées fait donc apparaître ces points comme étant le siège de fortes contraintes de traction.

F-) Conclusions concernant les contraintes résiduelles en surface.

- La distribution des contraintes résiduelles dans des tôles soudées par le procédé électroslag ou électrogaz se présente comme suit : le cordon est le siège des contraintes de traction, dont les valeurs moyennes longitudinales semblent être sensiblement inférieures à la limite élastique du métal déposé. En plus, les valeurs moyennes diminuent dans le cordon avec l'épaisseur des tôles à largeur égale. Les contraintes transversales oscillent entre une compression au début et à la fin du cordon et une faible contrainte de traction au centre de l'éprouvette.
- La distribution des contraintes résiduelles en surface est très régulière d'une tôle à l'autre. La grandeur des contraintes et leurs directions principales diffèrent très peu dans des points placés symétriquement vis-à-vis du cordon de soudure ou sur les faces avant ou arrière.
- Exception faite de la tôle n° 1, il y a peu de différence entre les grandeurs des contraintes dans des points situés sur les faces avant ou sur les faces arrières. Ceci indique que le plan à mi-épaisseur de la tôle est un plan de symétrie et que la distorsion ou gauchissement des tôles dans leur plan est négligeable.
- Dans les parties qui se trouvent à une distance d'au moins 5 cm du bord de fusion, la grandeur des contraintes résiduelles mesurées par relaxation complète ou par calcul direct, partant des déformations avant et après soudure, ont approximativement la même valeur. Ceci indique que dans ces endroits les contraintes résiduelles sont créées par des déformations élastiques des tôles dues aux efforts engendrés par le refroidissement du cordon et la déformation plastique des zones adjacentes.

- Seul le métal de base tout près du cordon a subi une déformation plastique permanente lors du soudage de la pièce. La largeur de la bande de déformation plastique est de l'ordre de 100 mm.

- La méthode de relaxation peut donner naissance à des erreurs dans les mesures des contraintes résiduelles. Ces erreurs sont dues à des déformations plastiques que le métal subit lors de la relaxation.

II. DETERMINATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES EN PROFONDEUR.

A-) Introduction.

Dans la demande de la recherche une méthode avait été proposée pour la détermination des contraintes résiduelles en profondeur. Cette méthode était basée sur la résolution des équations de Beltrami et exigeait la mesure des dilatations après découpage de tronçons longitudinaux et transversaux, ainsi que de tranches coupées suivant l'épaisseur. Elle était basée sur les hypothèses suivantes :

- a) le champ des contraintes ne varie pas le long de la soudure,
- b) les directions principales des contraintes coïncident avec les axes de l'éprouvette.

La détermination des contraintes en surface montre que ces hypothèses sont vérifiées dans la partie centrale du cordon de soudure. Les déterminations des contraintes résiduelles en profondeur doivent donc forcément se limiter à cette partie de l'éprouvette.

Toutefois, la variation assez rapide des contraintes en surface indiquait que, pour arriver par la méthode proposée à des résultats sûrs, il était nécessaire de faire les mesures avec une précision que ni les extensomètres mécaniques, ni les extensomètres électriques n'étaient à même d'assurer. Les valeurs souvent très faibles des dilatations à mesurer pendant les diverses opérations de relaxation seraient probablement entachées d'erreurs, dont l'ordre de grandeur excéderait les valeurs à mesurer. Dans ces conditions, la double différentiation suivie d'intégration nécessaire pour résoudre les équations de Beltrami perdrait toute confiance. En conclusion, si en théorie la méthode permet de résoudre le problème, en pratique les outils de mesure actuellement disponibles ne permettent pas son exécution.

Inspirés par une étude d'origine russe, les chercheurs ont remplacé la technique de la relaxation progressive par une technique de mesure directe des dilatations.

En principe, la méthode consiste à mesurer les dilatations dans l'épaisseur de la pièce suivant des directions faisant un angle avec le plan de la tôle. Les formules de la théorie d'élasticité qui permettent le calcul des contraintes et les outils de mesure utilisés sont décrits dans les paragraphes suivants.

B-) Formules d'élasticité.

1) Cas où les directions principales sont connues (fig.8.1)

Supposons que les directions principales coïncident avec les axes xyz, en faisant des mesures de dilatation suivant les directions x (perpendiculaire à la face) v et w; les dilatations principales ϵ_1 , ϵ_2 , et ϵ_3 suivant les axes xyz sont données par :

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \epsilon_x \\ \epsilon_2 &= 2 \epsilon_v - \epsilon_x \\ \epsilon_3 &= 2 \epsilon_w - \epsilon_x\end{aligned}$$

Les valeurs des contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 se calculent à partir de ces formules par les relations de Hooke.

2) Cas où une direction principale est connue (fig. 8.3).

Supposons que la direction connue coïncide avec l'axe des x (perpendiculaire à la face de la tôle). En mesurant les 4 dilatations suivant les axes x, u, v et w, on peut calculer les glissements correspondants; ceux-ci sont donnés par les formules :

$$\begin{aligned}\gamma_{wv} &= (\xi_x + \xi_u) - (\xi_v + \xi_w) \\ \gamma_{vu} &= (\xi_x + \xi_w) - (\xi_u + \xi_v) \\ \gamma_{uw} &= (\xi_x + \xi_v) - (\xi_u + \xi_w)\end{aligned}$$

A partir de l'état de déformation $\xi_u, \xi_v, \xi_w, \gamma_{wv}, \gamma_{vu}, \gamma_{uw}$ on peut calculer l'état principal ξ_1, ξ_2, ξ_3 d'où on déduit l'état de contraintes principales.

3) Cas où les directions principales ne sont pas connues (fig. 8.3).

Dans ce cas, il est nécessaire de mesurer 7 dilatations par exemple suivant les directions x, u, v, w, u', v' et w' .

Les glissements γ_{vw}, γ_{wu} et γ_{uv} sont donnés par les expressions :

$$\begin{aligned}\gamma_{vw} &= \xi_x + \frac{3}{2} \xi_{u'} - \frac{1}{2} \xi_u - (\xi_v + \xi_w) \\ \gamma_{wu} &= \xi_x + \frac{3}{2} \xi_{v'} - \frac{1}{2} \xi_v - (\xi_w + \xi_u) \\ \gamma_{uv} &= \xi_x + \frac{3}{2} \xi_{w'} - \frac{1}{2} \xi_w - (\xi_u + \xi_v)\end{aligned}$$

L'état de déformation est donc complètement défini par les grandeurs $\xi_u, \xi_v, \xi_w, \gamma_{vw}, \gamma_{wu}, \gamma_{uv}$. Les formules classiques de la théorie de l'élasticité permettent le calcul des grandeurs et des directions des contraintes principales à partir de ces valeurs.

C-) Techniques utilisées pour la mesure des dilatations.

1) Forage.

La mesure de la dilatation suivant des directions inclinées aux faces de la tôle n'est pas simple, surtout si l'on ne se limite pas à mesurer la variation de la distance entre deux points situés sur les faces opposées, mais si l'on désire connaître la variation

entre deux points situés sur la direction à l'intérieur de la tôle. La solution idéale consisterait à encastrier un extensomètre ohmique à un seul brin dans la pièce. Il est évident que ce cas idéal est irréalisable. L'introduction d'un pick-up exige le forage de trous suivant les directions choisies. Pour ce faire, une foreuse spéciale a été construite dont la tête peut être inclinée suivant la direction dans laquelle on désire mesurer. La foreuse est fixée sur la tôle au moyen de clames magnétiques (fig. 8.4). Le diamètre des trous a été choisi aussi petit que possible afin de réduire au maximum les perturbations dans la répartition des contraintes. Toutefois, vu qu'un forage n'était utilisé que pour mesurer la dilatation dans le sens de la génératrice du trou cylindrique, il a été admis que celui-ci n'avait pratiquement pas d'influence sur la dilatation mesurée. Cette hypothèse a été confirmée par l'expérience.

2) Outils utilisés - Tensiosonde.

Dans les trous forés, il convient de placer l'outil de mesure dénommé plus loin tensiosonde. La mesure de la dilatation, devant nécessairement se faire à distance, est obtenue par l'emploi d'extensomètres ohmiques. Différentes techniques ont été essayées; la plupart ont dû être abandonnées parce que la reproductibilité était insuffisante.

Quelques unes des tensiosondes essayées sont signalées ci-dessous :

a) Système boulon-écrou.

Les "strain gages" sont placés sur le corps du boulon dont on réduit la section afin d'augmenter la sensibilité (fig. 8.5).

Les résultats obtenus n'étaient pas reproductibles. Le système a été amélioré en interposant des roulements à bille dans une articulation sphérique (fig. 8.6). Ce système a donné des résultats reproductibles; toutefois, il faut que la précontrainte soit suffisante. Malgré ces résultats le système n'a pas été utilisé, puisque prenant appui sur les faces de la tôle, il ne donne que des valeurs moyennes des dilatations. Pour des tôles relativement minces, cette technique peut être utilisée.

b) Système vis en traction ou compression (fig.8.7 a et b et fig. 8.8 a).

Cette tensiosonde est constituée d'une vis dont le corps mesurant 3 mm x 3 mm est muni de deux " strain gages ". Le corps de la vis est mis en compression. Des différences systématiques ont été constatées entre la première lecture et les suivantes. On a essayé d'améliorer la première lecture par l'emploi d'un second boulon de serrage (fig. 8.8 b). Le résultat était insuffisant.

c) Tube en aluminium.

Le système de serrage mécanique ne donnant pas satisfaction, on a ensuite essayé de fixer l'élément qui porte le " strain gage " par collage. Le premier élément essayé était un petit tube en aluminium, ouvert le long d'une de ses génératrices; le " strain gage " était collé dans le tube. Le tube était collé dans le trou foré dans la pièce. On constata que les lectures dépendaient de la raideur du petit tube, ainsi que de l'épaisseur de la couche de colle. Le système fut abandonné.

d) Elément en matière synthétique.

Le " strain gage " fut collé sur un élément obtenu par mélange de poudre de fer et d'un liquide durcissant. La plaquette ainsi obtenue fut placée dans le trou qui ensuite était complètement bourré de la même matière synthétique. La reproductibilité était insuffisante.

e) Tensiosonde type a.

L'épaisseur de la couche de colle étant probablement à la base des résultats irréguliers, il fut décidé de fixer la sonde par calage, obtenu par l'introduction d'une vis conique dans les têtes (fig. 8.9). Le calage était insuffisant.

f) Tensiosonde type b.

Le principe de cette sonde est le même que celui de la précédente. Le calage a été modifié (fig. 8.9 b), les têtes de la sonde sont en outre munies de deux pas filetés. Malgré toutes les précautions prises, on constate toujours une différence entre la première lecture et les suivantes. Il est évident que, pour la mesure de contraintes résiduelles basées sur la première et unique mesure, ce défaut est inadmissible.

3) Emploi de " strain gages ".

L'utilisation de systèmes mécaniques du genre tensiosonde ne donnant pas entière satisfaction, on a été contraint de chercher une autre solution, notamment le collage de " strain gages suivant les génératrices dans les trous forés et couvrant l'entièreté de la paroi du trou; mais les "strain gages" disponibles n'étaient pas assez large. On a résolu le problème en utilisant deux " strain gages " placés en série suivant deux génératrices décalées de 90°.

Le collage des " strain gages " dans des trous forés à travers la tôle offre certaines difficultés vu que le diamètre des trous est choisi aussi petit que possible afin de ne pas trop perturber le champ des contraintes résiduelles. On a réussi à coller des " strain gages " à la profondeur désirée, en utilisant un dispositif sous pression d'air. Les " gages " étaient fixés provisoirement sur un tube en caoutchouc (fig.8.10) monté sur un tube en cuivre muni de plusieurs petits trous. Le dispositif est alors glissé dans le trou et fixé à la profondeur voulue, puis mis sous pression d'air jusqu'au durcissement de la colle des " strain gages ".

Cette méthode a été essayée sur des blocs étalon sollicités en compression (fig. 8.11). Cet étalonnage permet de déterminer la fonction qui relie les dilatations mesurées aux dilatations réelles dans la même direction dans une pièce sans trou.

Les lectures faites lors de la première mise sous sollicitation étaient identiques à celles faites lors des sollicitations suivantes. Ce résultat satisfaisant a incité les chercheurs à utiliser cette technique pour l'auscultation des contraintes résiduelles dans les tôles de 60 et 100 mm d'épaisseur.

D-) Etalonnage et relaxation.

En se basant sur l'hypothèse que dans la partie centrale de l'éprouvette l'état de contrainte reste constant le long du cordon de soudure, on a limité l'auscultation des contraintes résiduelles en profondeur à cette partie centrale. Les " strain gages " ont été placés dans des trous faisant respectivement 90 et 45° avec le plan de la tôle.

Deux forages à 45° ont été exécutés, notamment dans un plan transversal et longitudinal du cordon de soudure. Les " gages " ont été placés soit à mi-épaisseur, soit au quart de l'épaisseur. La relaxation a été faite en deux phases. La première consistait à découper des blocs d'environ 270 x 130 pour la tôle de 60 mm et de 370 x 170 pour la tôle de 100 mm (fig. 8.12), contenant les trous avec leurs " strain gages ". Cette figure montre la disposition des 4 blocs de mesure de l'éprouvette n° 15. Les blocs découpés à la scie étaient ensuite usinés sur les faces perpendiculaires au cordon de soudure. Après cet usinage les blocs étaient comprimés suivant l'axe de la soudure dans une machine Amsler de 200 t. Cet étalonnage permettait de comparer les lectures des " strain gages " avec les valeurs des dilatations théoriques dans les mêmes directions dans une pièce massive sans trou. La fig. 8.13 donne les coefficients de correction m_x , m_y et m_w déduit de cet étalonnage.

Après le calibrage, on a découpé le bloc en tronçons de 40 x 40 mm portant les trous de mesure, libérant ainsi pratiquement toutes les contraintes résiduelles. La différence des lectures initiales (avant découpage du bloc) et finales (après découpage en tronçons) donne les dilatations ϵ_{xm} , ϵ_{ym} et ϵ_{wm} , provoquées par la relaxation totale des contraintes résiduelles au niveau des " strain gages ". En multipliant par le coefficient individuel d'étalonnage, on obtient directement les dilatations réelles ϵ_x , ϵ_y et ϵ_w , à partir desquelles on peut calculer les contraintes résiduelles internes σ_1 , σ_2 et σ_3 .

E-) Résultats.

Le tableau 8.1 donne les résultats obtenus sur l'éprouvette n° 8 de 60 mm et n° 14 de 100 mm à mi-épaisseur de la tôle, et sur l'éprouvette n° 15 de 100 mm au quart et à mi-épaisseur de la tôle.

TABLEAU 8.1

Eprouv	Epais. mm	Bloc	Niveau	σ_1 kg/mm ²	σ_2 kg/mm ²	σ_3 kg/mm ²
8	60	I	1/2	+ 21,2	+ 4,3	- 3,0
		II	1/2	+ 19,3	- 1,6	- 5,4
14	100	I	1/2	+ 4,6	- 0,5	- 7,0
		II	1/2	+ 0,4	- 2,8	- 5,2
		III	1/2	+ 1,0	+ 1,1	- 9,4
15	100	I	1/2	+ 16,0	+ 0,8	+ 0,3
		II	1/2	+ 17,1	+ 2,7	+ 1,1
		III	1/2	+ 9,5	- 7,8	- 3,6
		IV	1/2	+ 8,3	+ 5,6	- 3,4
		I	1/4	+ 23,9	+ 12,7	+ 3,6
		II	1/4	+ 28,4	+ 4,7	+ 6,7
		III	1/4	+ 20,2	+ 5,0	+ 2,5
		IV	1/4	+ 22,7	+ 16,4	- 5,3

Les figures 8.14 - 8.15 et 8.16 représentent les valeurs des contraintes triaxiales à l'intérieur du cordon de soudure de ces trois tôles.

Les résultats trouvés indiquent que la contrainte résiduelle interne σ_1 dans le sens du cordon est approximativement égale à la contrainte résiduelle σ_1 en surface, à l'exception des valeurs trouvées pour la tôle n° 14 de 100 mm qui donnent des valeurs nettement inférieures. La valeur de σ_2 , contrainte perpendiculaire à l'axe du cordon, est sensiblement la même à mi-épaisseur qu'en surface de la tôle. La contrainte σ_3 perpendiculaire à la surface, toujours très faible, semble être de la compression.

F-) Mesure des contraintes dans les couches extérieures.

1) Principe de la méthode.

La technique décrite ne permet que la détermination des contraintes moyennes sur base de mesure correspondante à la longueur des strain gages (soit environ 10 mm). Elle n'est malheureusement pas applicable à la détermination des contraintes dans les fibres voisines de la surface où le gradient peut être trop raide. Pour cette raison les auteurs ont essayé d'utiliser la technique décrite par Soete et Van Crombrugge dans l'article " Détermination of residual stresses below the surface " édité par W.R. Osgood.

Dans les couches voisines de la surface, on peut encore admettre que l'état des contraintes est biaxial; en effet, la contrainte σ_3 perpendiculaire à la surface est nulle tout près de cette surface et les contraintes σ_1 et σ_2 sont parallèles à la surface.

La méthode consiste à mesurer, à l'aide des " strain gages " la relaxation à la surface pendant le forage d'un trou dans le métal. Si on relève la courbe des dilatations relaxées en fonction de la profondeur du forage, on peut déterminer d'une façon continue les contraintes résiduelles locales sur une profondeur de l'ordre de grandeur du diamètre du trou.

La détermination des contraintes biaxiales en surface (voir chapitre VII) a confirmé que les directions principales coïncident pratiquement avec les axes de symétrie de l'éprouvette. On peut donc postuler que les contraintes dans les couches extérieures auront les mêmes directions principales. Deux mesures dans ces deux directions sont donc suffisantes pour la détermination de ces contraintes. On a utilisé que des strain gages placés en forme de croix, suivant les axes de symétrie, fig. 8.17.

On obtient une relaxation partielle par forage d'un trou au centre des 4 jauges. Il est évident qu'à partir d'une certaine profondeur du trou les "gages" placés en surface ne suivront plus les relaxations locales au fond du trou : l'auscultation des contraintes par cette technique se limite donc aux fibres superficielles des tôles.

Si on représente par ϵ'_{0} et ϵ'_{90} les dilatations totales mesurées à la surface après forage d'un trou, on peut calculer les dilatations réelles ϵ_{0} et ϵ_{90} que l'on devrait obtenir par une relaxation complète des gauges par les formules :

$$\begin{aligned}\epsilon_{0} &= (K_1 + 2K_2) \epsilon'_{0} + 2K_2 \epsilon'_{90} \\ \epsilon_{90} &= (K_1 + 2K_2) \epsilon'_{90} + 2K_2 \epsilon'_{0}\end{aligned}$$

Dans ces formules K_1 et K_2 sont des fonctions du diamètre du trou, de la longueur des strain gages et de la distance du centre du trou aux "gages". On a :

$$K = \frac{3}{B'} \quad K_2 = \frac{AB' - A'B}{2A'B'}$$

dans lesquelles :

$$A = 0,35$$

$$B = 0,65$$

$$A' = - \frac{1 + \eta}{2} \cdot \frac{a^2}{r_1 \cdot r_2}$$

$$B' = \frac{2a^2}{r_1 r_2} \left(-1 + \frac{1 + \eta}{4} \cdot a^2 \frac{r_1^2 + r_1^2 + r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right)$$

avec

η : coefficient de Poisson ou 0,3.

$2a$: diamètre du trou.

r_1, r_2 : distance du centre du trou aux extrémités de l'extensomètre.

Si on suppose que la distribution des contraintes est constante en profondeur, la mesure de la relaxation pendant le forage même permet l'enregistrement des courbes des déformations relaxées ϵ'_z en fonction de la profondeur du trou. Si ϵ_z représente la relaxation locale à une profondeur z et ϵ'_z la relaxation mesurée en surface

$$\epsilon'_z = f(z) \epsilon_z$$

Si toutefois la distribution des contraintes n'est pas homogène en profondeur, on aura :

$$\frac{d\epsilon'_z}{dz} = \epsilon_z \frac{df(z)}{dz}$$

d'où on déduit que :

$$z = \frac{d\epsilon'_z}{dz} \frac{df(z)}{dz}$$

Dans cette expression $\frac{d\epsilon'_z}{dz}$ est la tangente à la courbe enregistrée ϵ_z en fonction de z et $\frac{df(z)}{dz}$ la dérivée à la courbe expérimentale qui a été déterminée dans le cas d'un état homogène de contrainte en profondeur. Cette deuxième fonction a été établie par Soete et Vancrombrugge pour un état simple et double de contrainte, fig. 8.18 dans une tôle de 10 mm.

2) Résultats des essais.

Des mesures ont été faites en quelques points sur les tôles n° 14 et 15 de 100 mm. Au centre des quatre " gages " placés en forme de croix, on a foré un trou de 6 mm de diamètre; les lectures ont été relevées tous les 0,5 mm. La figure 8.12 montre la répartition des 4 points de mesure 15MI à 15MIV sur la face avant du cordon de soudure. Notons qu'après ces mesures les mêmes trous ont été utilisés pour forer les trous perpendiculaires à la tôle destinés aux mesures à mi-épaisseur de la tôle.

Les mesures montrent une variation des déformations suivant les directions représentées à la figure 8.19 et le calcul conduit à une variation des contraintes données à la fig. 8.20. Aux endroits M II et M III, de la tôle 14, où l'on avait enlevé par meulage la surépaisseur de la soudure avant collage des "strain gages", on a constaté la disparition des contraintes de compression tout près de la surface. Dans les autres endroits les fibres extérieures sont le siège des contraintes biaxiales de compression jusqu'à une profondeur de 2 mm. En-dessous de ce niveau les contraintes résiduelles changent de signe et deviennent de la traction.

Il semble toutefois que les valeurs calculées des contraintes sont trop élevées et leur gradient difficile à expliquer.

Pour vérifier la technique de mesure on a appliqué la méthode à deux éprouvettes détensionnées au four; la première sans contrainte, la deuxième mise sous une contrainte de flexion connue.

Les résultats obtenus dans l'éprouvette sans contrainte montrent que, pendant le forage, les "strain gages" enregistrent de légères relaxations, qui peuvent être provoquées soit par des variations dans l'humidité, soit par des changements de propriété des adhésifs; ces variations correspondent déjà à des contraintes fictives non négligeables (fig. 8.21) : de 15 kg/mm² en compression à la surface, à +20 kg/mm² en traction, à une profondeur de 4 mm. Notons que des erreurs de mesure dues à l'appareil sont chaque fois exclues étant donné que, pendant ces diverses opérations, on a utilisé plusieurs "strain gages" étalon.

Un deuxième essai sur l'éprouvette sollicitée en flexion a donné comme résultats des valeurs qui ne correspondent pas quantitativement aux valeurs réelles des contraintes, mais présentent seulement une allure semblable (fig. 8.22).

On constate donc que les résultats obtenus par cette technique, dans les conditions où elle était appliquée, sont aléatoires et n'ont en tout cas qu'une valeur qualitative. En effet, tous les résultats de contraintes ont une même allure, exception faite pour les deux points où la surépaisseur était enlevée par meulage

G-) Conclusions.

On peut donc conclure que le procédé Electroslag ne crée pas des contraintes résiduelles triaxiales dangereuses au centre du cordon. La valeur maximale de σ_1 reste sensiblement inférieure à la limite élastique du métal déposé et les contraintes σ_2 et σ_3 sont négligeables vis-à-vis de σ_1 . Les valeurs σ_3 , voisines de zéro au centre de la soudure s'expliquent au vu du faible gradient de température suivant l'épaisseur près du bord de fusion qui existe, au cours du cycle thermique de soudage, lors du refroidissement du métal déposé.

Quant aux contraintes dans les couches voisines de la surface, on peut admettre qu'elles sont biaxiales et de compression et qu'en dessous d'un niveau d'environ 2 mm de profondeur elles changent de signe et deviennent des contraintes de traction.

IX. CONCLUSIONS GENERALES.

L'étude a permis de faire une analyse complète des déformations qui se manifestent pendant le soudage et le refroidissement consécutif. Dans la pièce soudée, deux zones peuvent être distinguées : la première englobant le cordon ainsi qu'une bande du métal de base parallèle au cordon, la seconde englobant le restant de l'éprouvette.

La première zone a été soumise aux hautes températures et a subi des déformations plastiques pendant le chauffage. Dans la seconde zone, la limite élastique du métal n'a pas été atteinte et la température y est restée relativement basse. La connaissance des déformations dans cette zone permet la détermination directe des contraintes.

La mesure des déformations pendant et après soudage a confirmé les théories du Professeur Okerblom : lors du soudage, le chauffage des bords provoque une dilatation de ceux-ci, qui déforme les deux tôles en trapèzes curvilignes, le bord du chanfrein prenant une forme convexe, le bord libre, par contre, une forme concave. Pendant le retrait du métal déposé, une rotation des deux tôles à souder se manifeste autour d'un point situé environ au tiers inférieur du cordon. Ce mécanisme explique que la grandeur des déformations et l'amplitude de la rotation dépendent de la raideur des tôles dans leur plan, c'est-à-dire que la déformation de deux tôles très larges sera plus petite que celle de deux tôles étroites, et que, dans le cas d'assemblage de tôles de largeurs différentes, les déformations des deux tôles ne seront pas égales. Il en résulte que le champ des contraintes résiduelles dépend des dimensions et des formes des tôles à assembler. Cette conclusion est plus stricte pour les tôles fortes que pour les tôles minces, toute relaxation par gauchissement étant quasi exclue par les fortes épaisseurs.

De cette constatation il résulte également qu'un procédé de soudage ne peut pas être caractérisé par un champ de contraintes résiduelles type. Celui-ci dépend en effet plus des dimensions et de la forme des pièces à assembler que du procédé de soudage. Il est toutefois évident que l'apport de chaleur propre à une technique de soudage a une influence directe sur le gradient de température, c'est-à-dire sur la répartition des contraintes résiduelles.

Dans l'étude entreprise, les deux tôles à assembler ont la même forme et les mêmes dimensions, c'est-à-dire que le cordon de soudure constitue un axe de symétrie de la pièce soudée.

Les conclusions générales que l'on peut dégager de la mesure des contraintes résiduelles de ces soudures sont les suivantes :

- 1) La distribution des contraintes résiduelles engendrées dans des tôles soudées par le procédé électroslag ou électrogaz est généralement la même que celle engendrée par les procédés classiques de soudage : le cordon est le siège de contraintes longitudinales de traction équilibrées par des contraintes de compression. Toutefois, les valeurs des contraintes longitudinales dans le cordon sont sensiblement inférieures à la limite élastique du métal déposé; ces contraintes diminuent quand l'épaisseur des tôles augmente; ceci est probablement dû à l'apport de chaleur qui est proportionnellement plus élevé pour les tôles fortes que pour les tôles minces, les autres dimensions étant constantes.

- 2) La grandeur des contraintes transversales et des contraintes dirigées suivant l'épaisseur dans le cordon de soudure ne sont qu'une fraction de la limite élastique du métal.

- 3) Les contraintes biaxiales en surface du cordon sont des contraintes de compression jusqu'à une profondeur d'environ 2 mm; à partir de ce niveau elles changent de signe et deviennent des contraintes de traction.

- 4) Les contraintes triaxiales au centre du cordon n'ont pu être déterminées que dans quelques cas. Les contraintes longitudinales et transversales ont sensiblement les mêmes valeurs que celles déterminées par des mesures de surface. La contrainte dirigée suivant l'épaisseur de la tôle est faible et de l'ordre de grandeur de la contrainte transversale.

- 5) Pour une même épaisseur de tôle, les contraintes engendrées par le procédé électroslag ou électrogaz sont sensiblement les mêmes.

- 6) Par comparaison aux soudures obtenues par les procédés classiques, la distribution et la grandeur des contraintes résiduelles engendrées par le procédé électroslag semblent moins dangereuses pour la propagation des ruptures fragiles. Leur distribution est en effet plus régulière et les valeurs des contraintes ne dépassent que rarement la limite élastique du métal déposé.

Conclusions finales.

La contribution principale de cette étude est plutôt qualitative que quantitative. Alors qu'au départ les chercheurs s'étaient posés comme but principal la connaissance des contraintes résiduelles engendrées par les nouveaux procédés de soudage électrogaz et électroslag, but parfaitement

atteint, ils ont dû constater que la connaissance en soi de ces contraintes ne constitue pas un caractère propre à un procédé et ne les aidera probablement que peu dans la compréhension du comportement complexe d'un assemblage soudé.

Par contre, l'ensemble de mesures faites pendant et après le soudage sur des éprouvettes dont les dimensions dépassent largement celles des pièces classiques de laboratoire, leur a permis de voir clair dans le mécanisme de déformation. Ces déformations, dont certaines se manifestent à des températures critiques ont une répercussion directe sur les propriétés de ductilité et de résistance.

De la connaissance des contraintes résiduelles on peut se faire une image de l'énergie élastique accumulée dans les constructions et celle-ci a un effet direct sur la propagation de la rupture. Toutefois, pour des constructions nucléaires, le premier critère à respecter est l'absence de tout amorçage de rupture fragile. Il semble dès lors plus important d'étudier les causes éventuelles d'une diminution de la ductilité. Comme signalé, les déformations plastiques contribuent à ce phénomène. Une étude détaillée de ces déformations et des températures auxquelles elles se manifestent s'impose donc. A priori il semble que les procédés électrogaz et électroslag présentent des avantages sérieux vis-à-vis des autres procédés du fait que le métal déposé est pratiquement exempt de toute solution de continuité et que d'autre part le métal de base, qui subit les déformations plastiques, n'est soumis qu'à un seul cycle tensothermique.

BIBLIOGRAPHIE

1. Method for measuring the residual stresses in the interior of the material.
R. Gunnert.
Svetsen n° 6 1956 et I.I.W.-X-162-57 O.E.

2. Etude des propriétés mécaniques d'une soudure électroslag.
W. Soete.
Revue de la Soudure n° 4, 1959.

3. Fusion sous laitier liquide et soudage automatique montant.
F. Danhier et P. de Coninck van Noyen.
Revue Arcos n° 144 - 1960.

- Le procédé russe de soudage automatique sous flux fondu.
J. Sebille.
Revue de la Soudure n° 4, 1959.

- A new Electroslag Welding Process.
DJW Boag and WKB Marshall.
British Welding Journal, november 1959.

- Automatic Welding in the Vertical Position, Electroslag and Electrogaz.
J.E. Norcross.
Iron and Steel Engeneer, June 1964.

- Elektroschlacke Schweissung und Elektrokohlensäure Schweissung.
K. Krekeler and W. Krieweth.
Industrie Anzeiger, 22.7.1958.

4. Electroslag Welding
P.E. Patton.
American Welding Society.

5. Guide to Weldability of Steels.
American Welding Society.

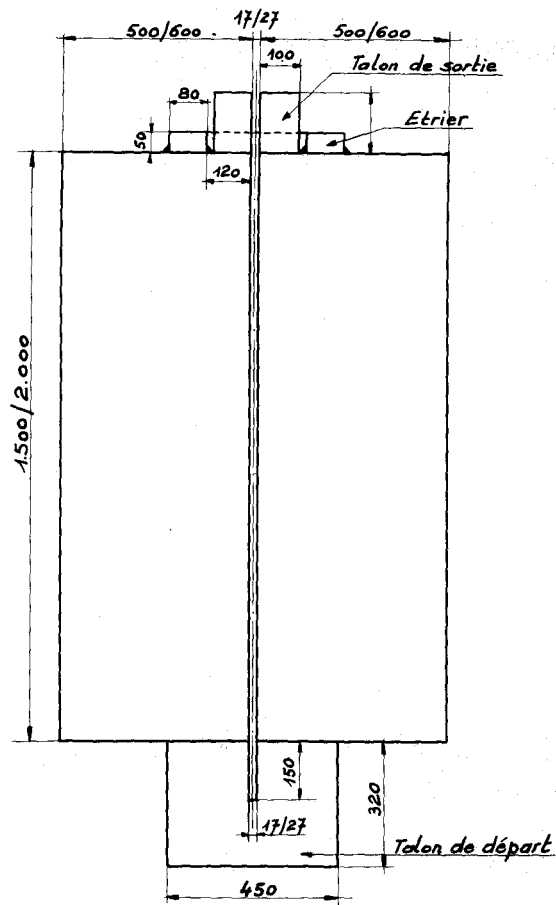


Fig. 2-1 — Dimensions des éprouvettes

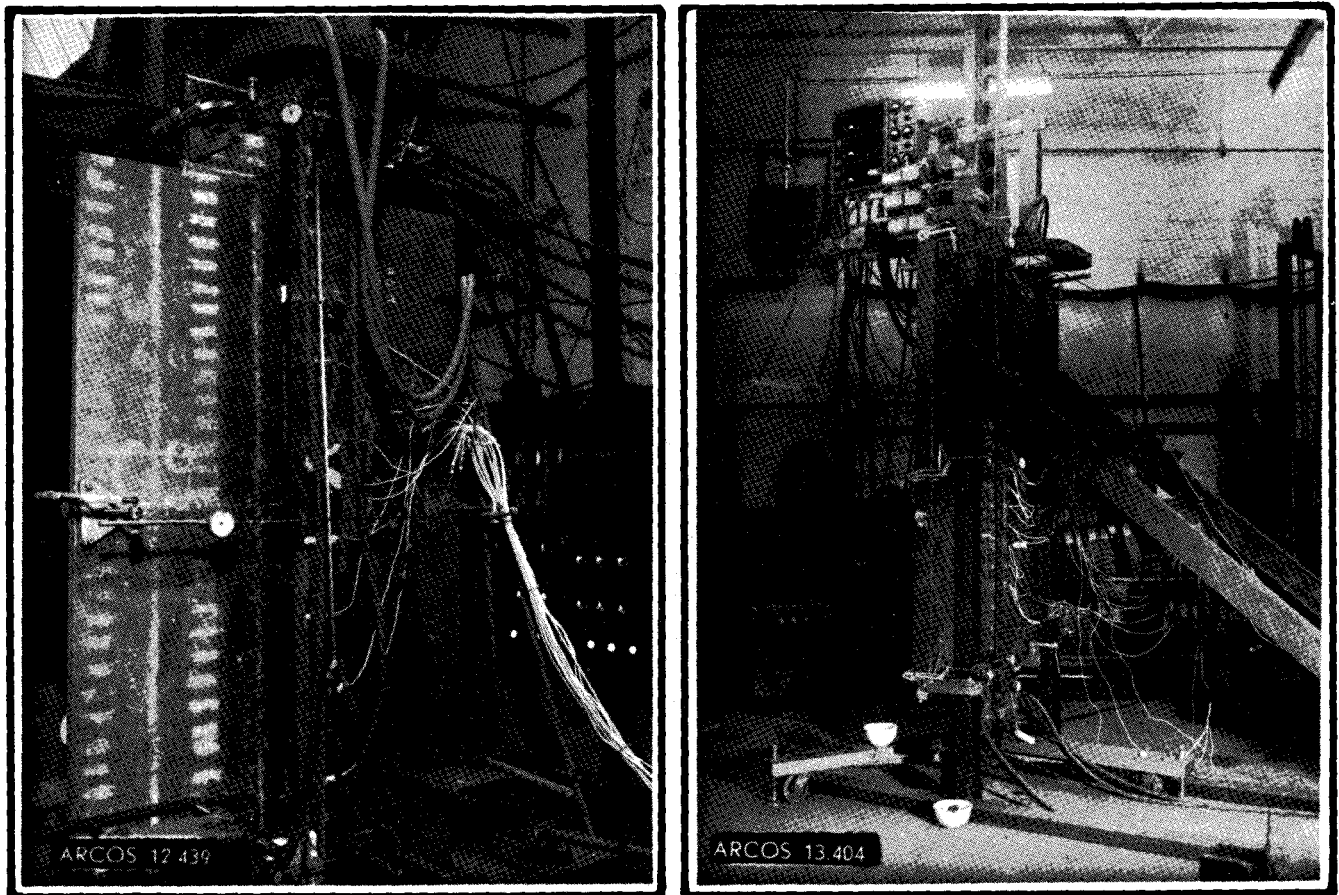


Fig. 2-2 — Éprouvettes en position de soudage

a) Éprouvette n° 5
fixée sur le bâti de la machine

b) Éprouvette n° 15
fixée sur le bâti indépendant

Vue de la face avant avec les bases de mesure des déformations, les montres de mesure des déplacements pendant le soudage et le raccordement des couples de mesure des températures.

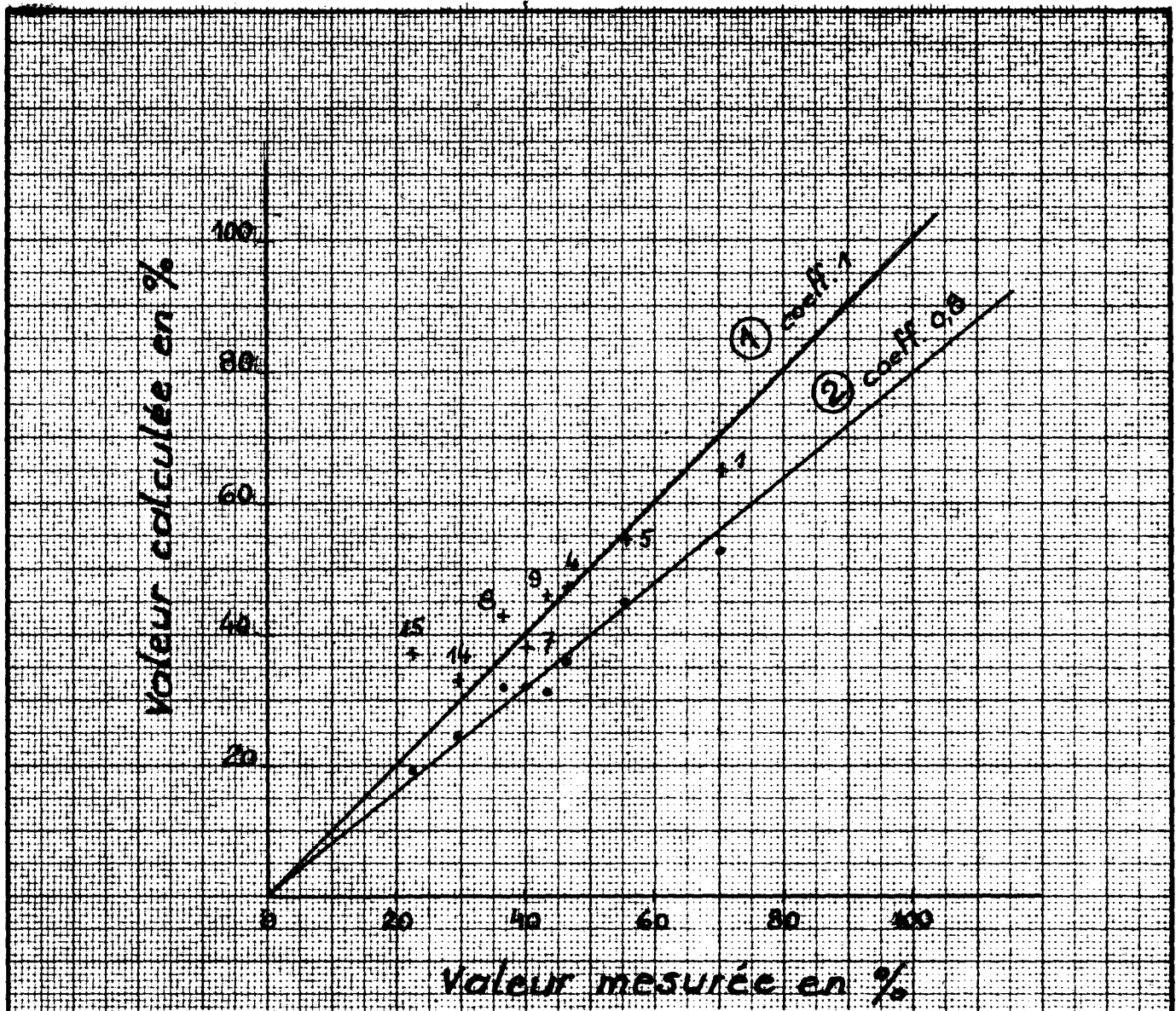


Fig. 3-1 — Chaleur évacuée par les patins en % de la chaleur totale

+① perte calculée en fonction
de la largeur du cordon « l »

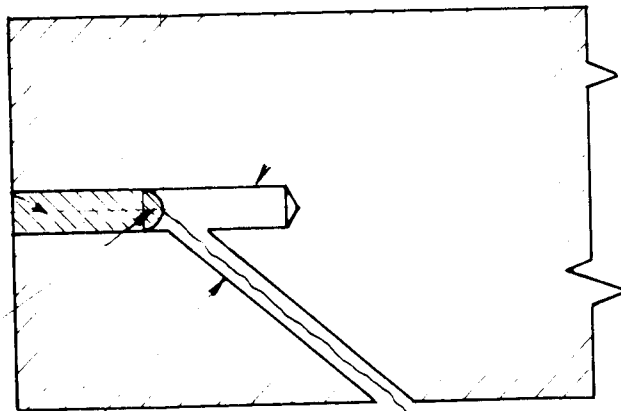
o② perte calculée en fonction
de l'ouverture du joint « d »

distance du couple
au bord de la tôle

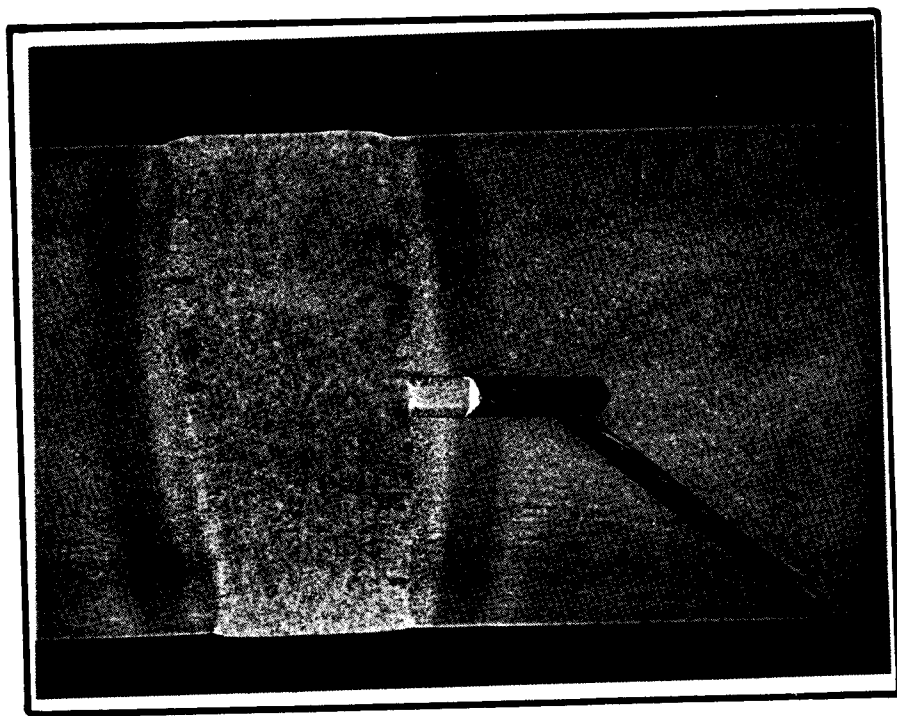
trou foré à mi-épaisseur
de la tôle.

tige insérée
dans le forage

Couple soudé



trou p^r le dégagement
des fils du couple



Coupe au droit d'un couple soudé sur tige

Fig. 4-1 — Disposition des couples soudés sur tige

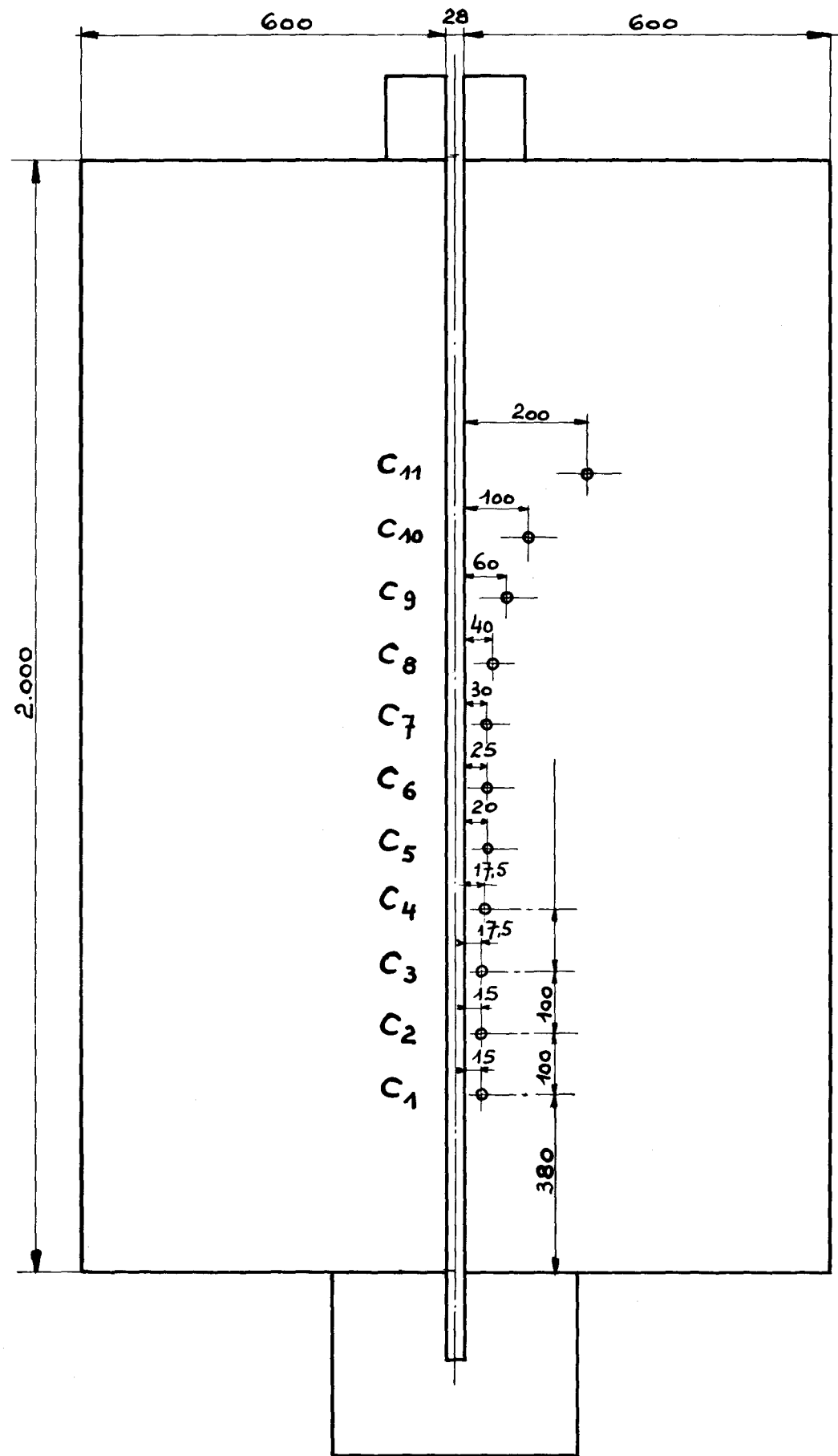
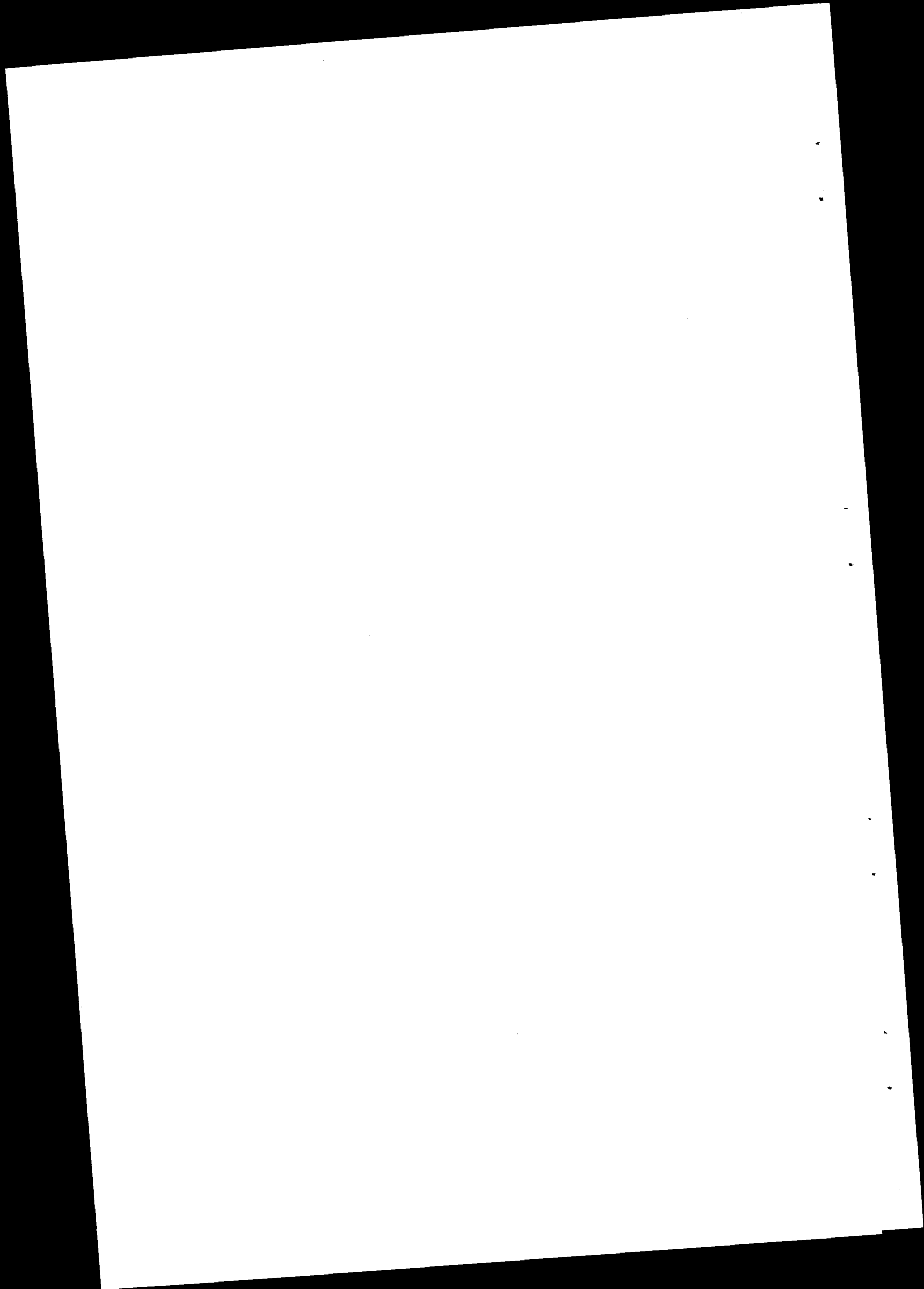


Fig. 4-2 — Emplacements des couples le long du joint
Eprouvettes n°s 14 et 15, épais. : 100



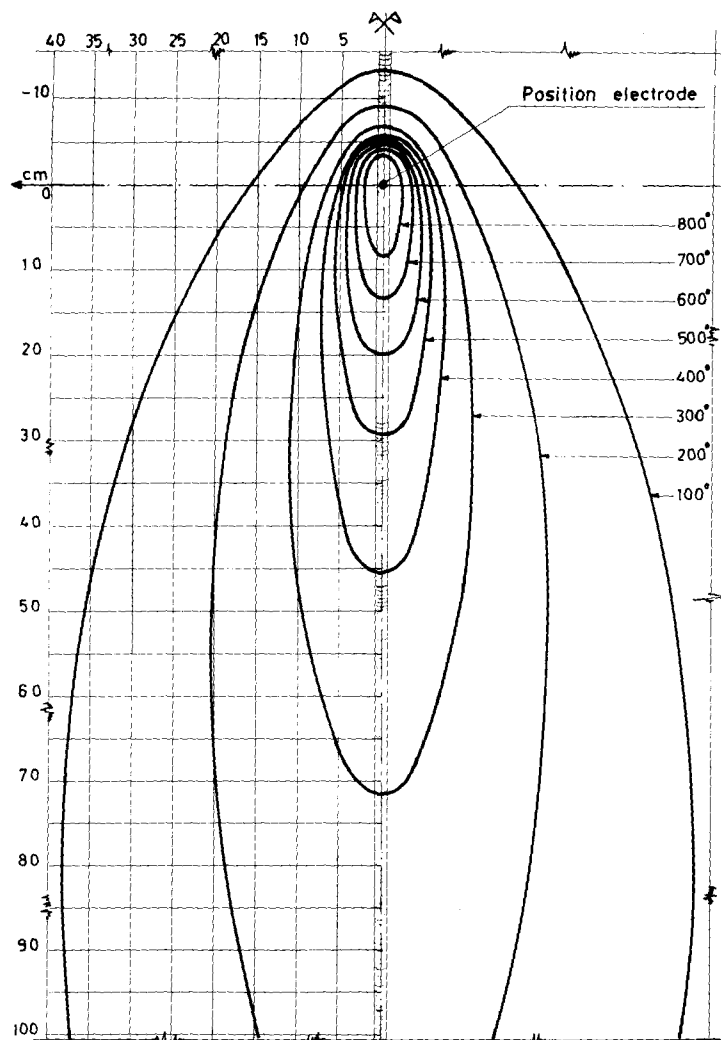


Fig. 4-4 — Courbes isothermes du champ quasi stationnaire de température
Eprouvette n° 14

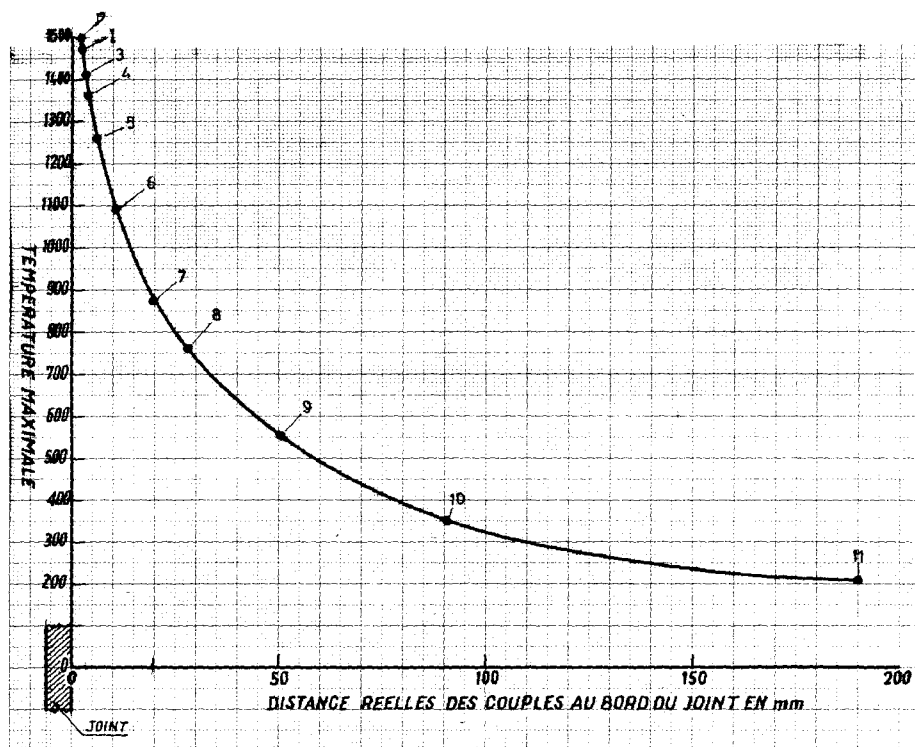


Fig. 4-5 — Répartition transversale des températures maximales
Eprouvette n° 14, épais. 100

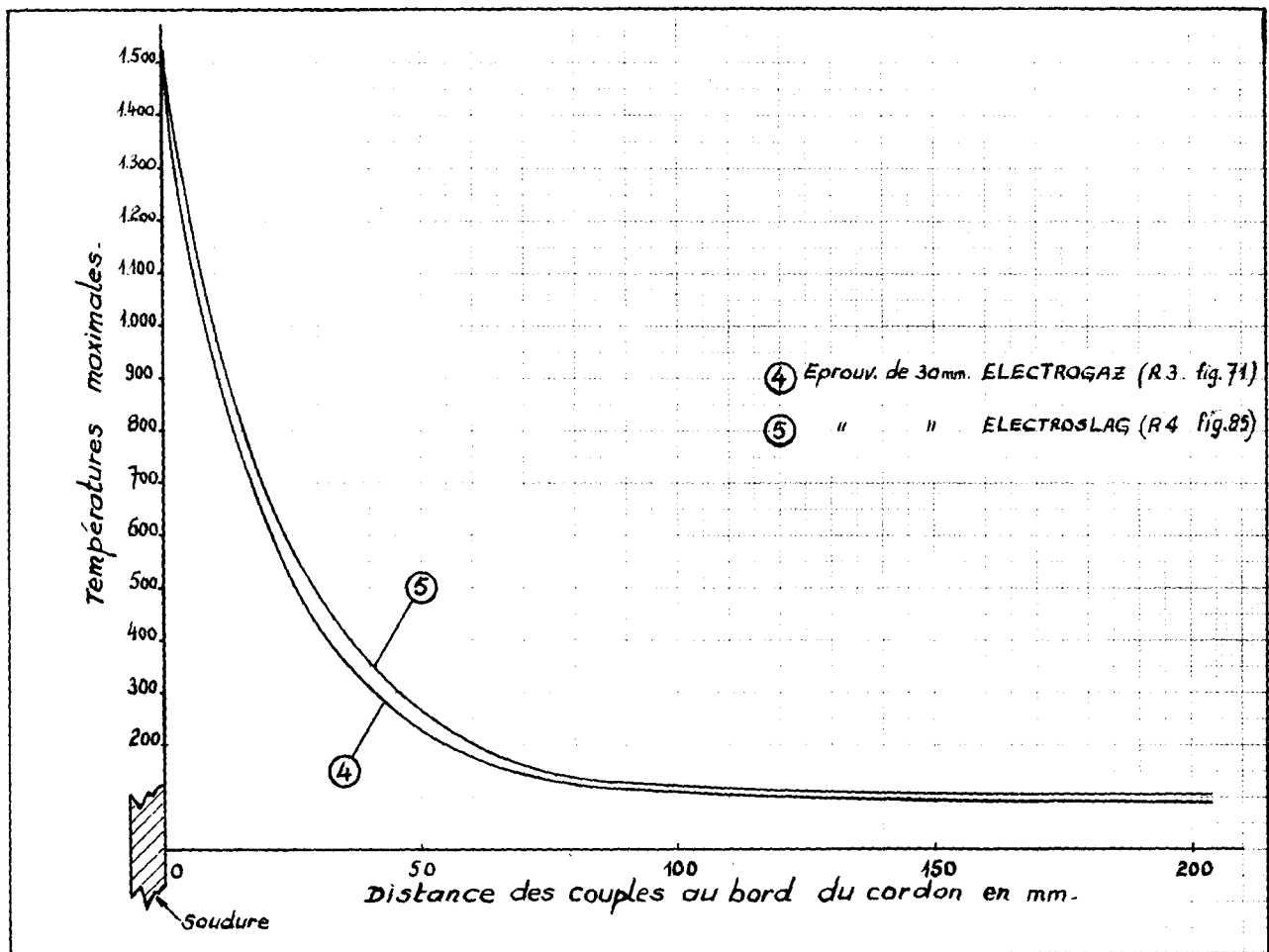


Fig. 4-6 — Répartition transversale des températures maximales
Eprouvettes n°s 4 et 5

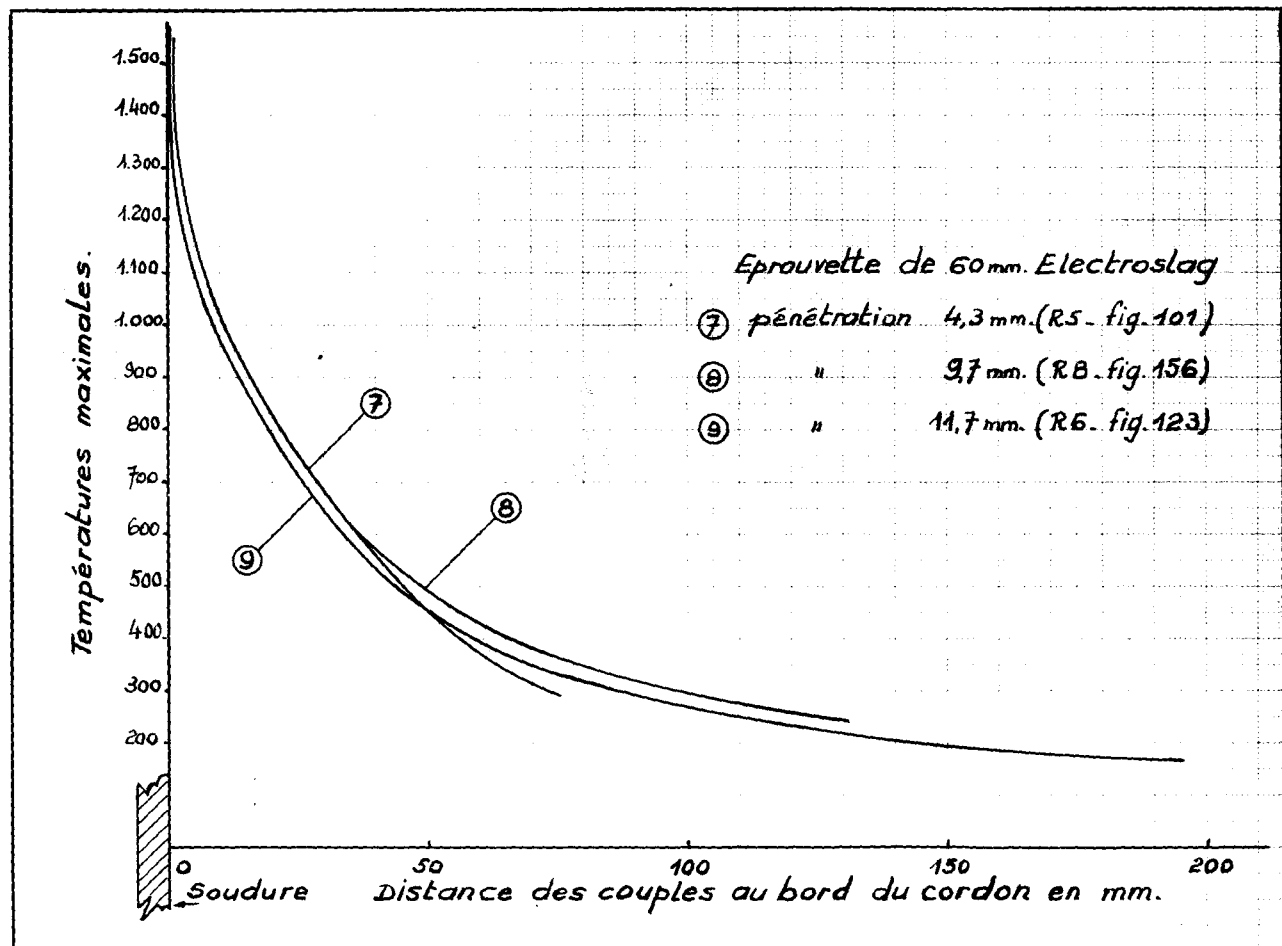


Fig. 4-7 — Répartition transversale des températures maximales
Eprouvettes n°s 7-8-9

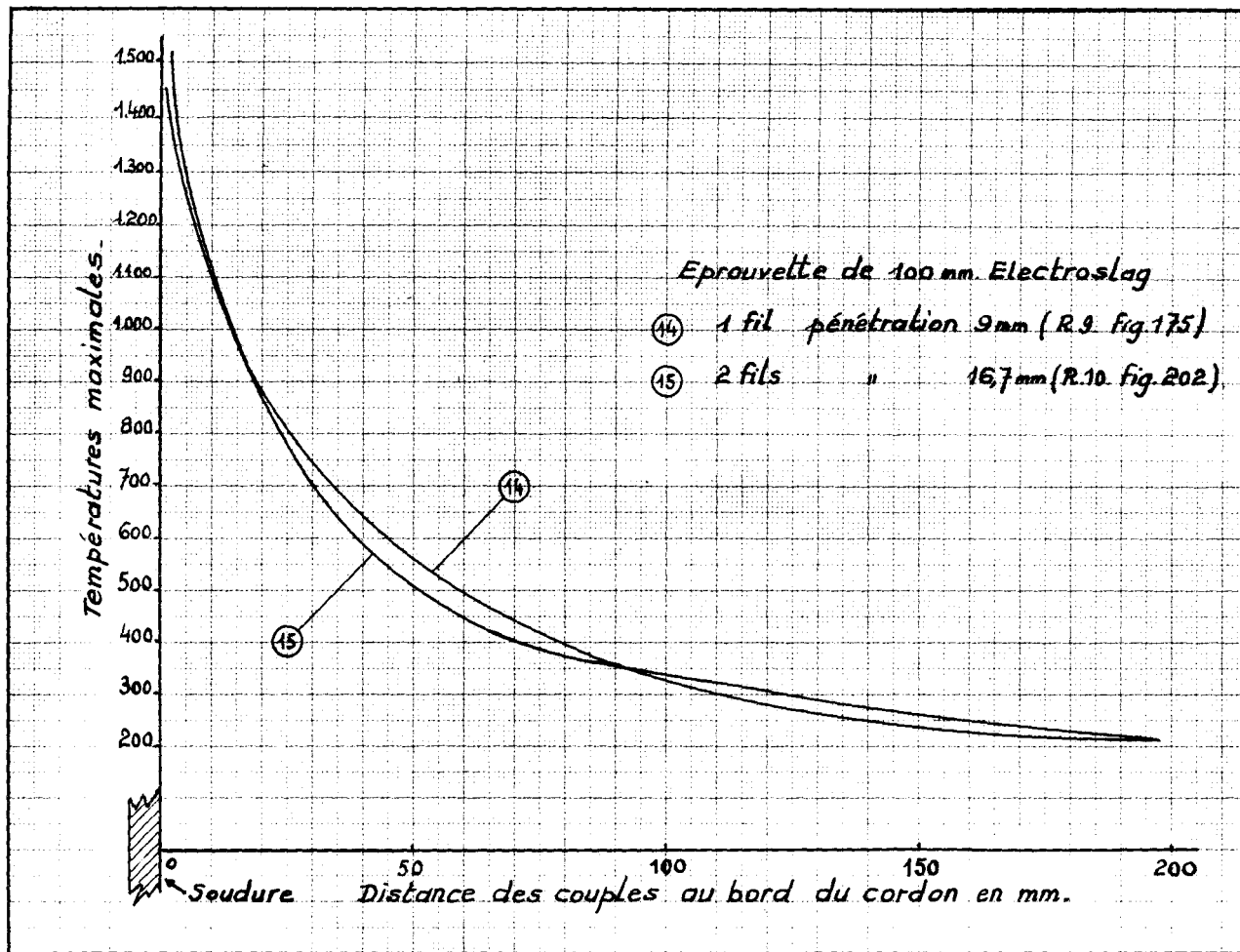


Fig. 4-8 — Répartition transversale des températures maximales
Eprouvettes n^{os} 14 et 15

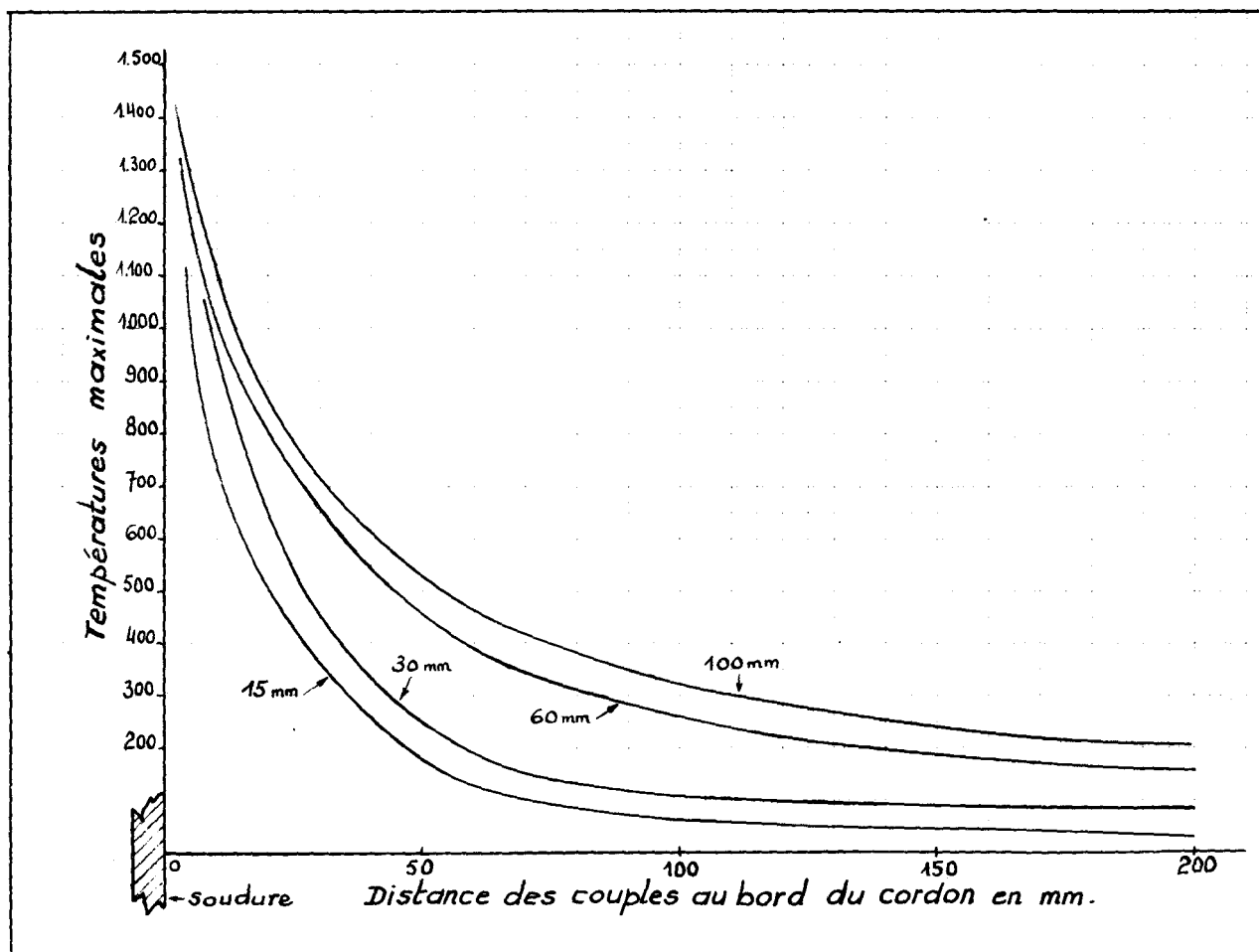


Fig. 4-9 — Répartition des températures maximales en fonction des épaisseurs

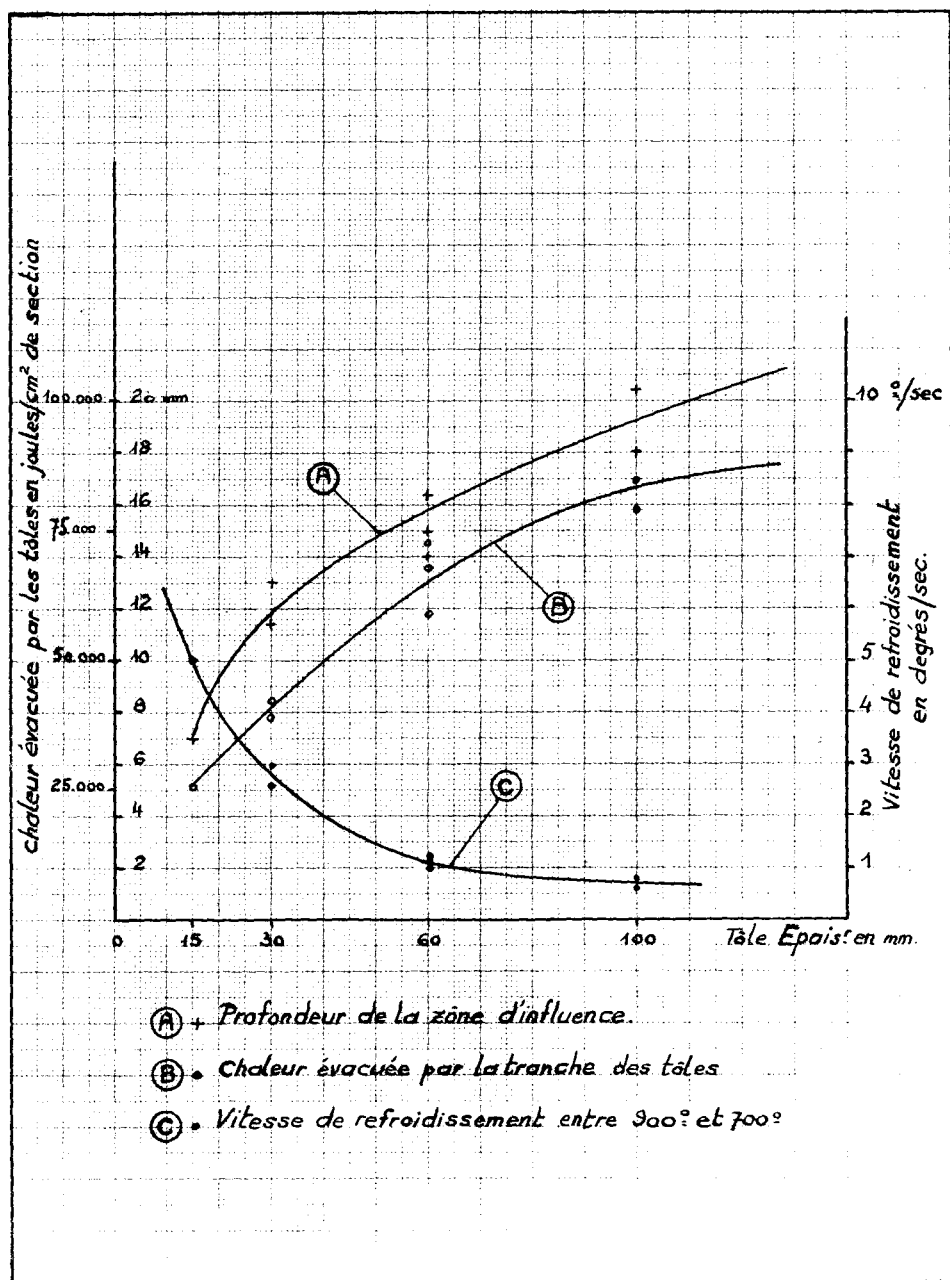


Fig. 4-10 — Influence de l'épaisseur sur le régime thermique

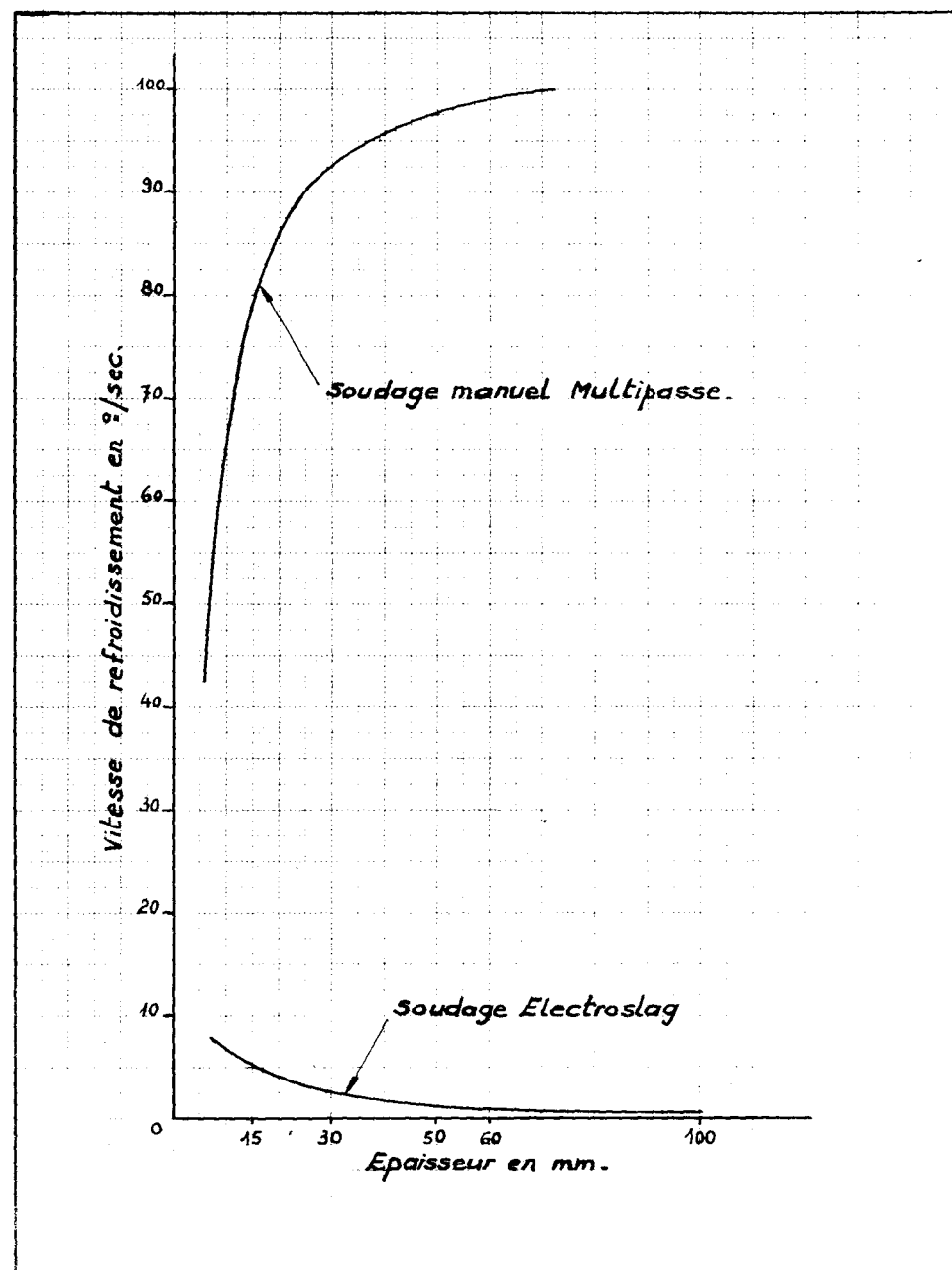
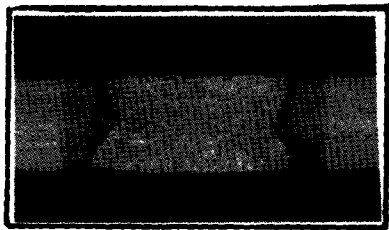
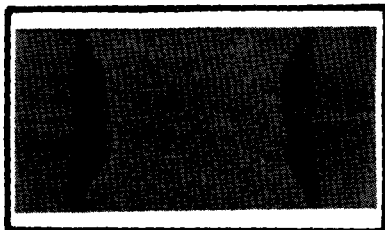


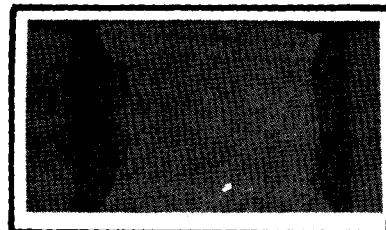
Fig. 4-11 — Vitesse de refroidissement en soudage multipasse et electroslag



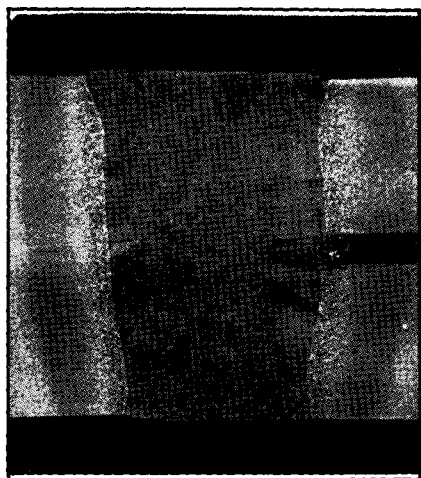
Eprouv. 1. 15 mm. EG
Echelle: 0,75



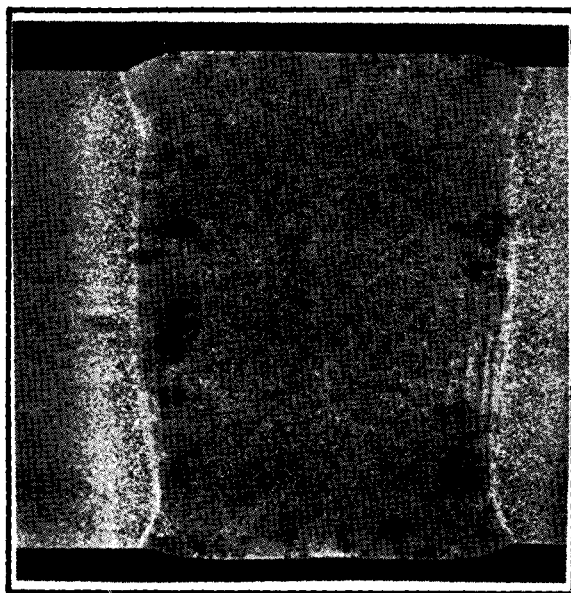
Eprouv. 4. 30 mm. EG
Echelle: 0,60



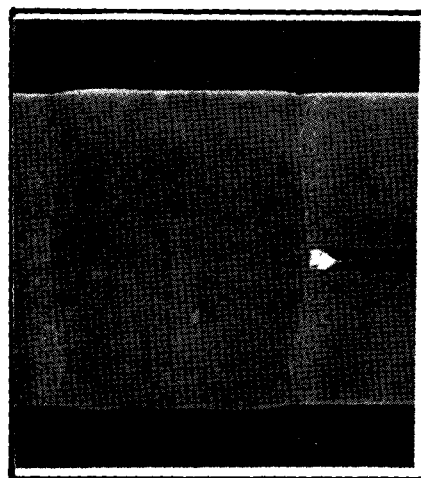
Eprouv. 5. 30 mm. ES.
Echelle: 0,75



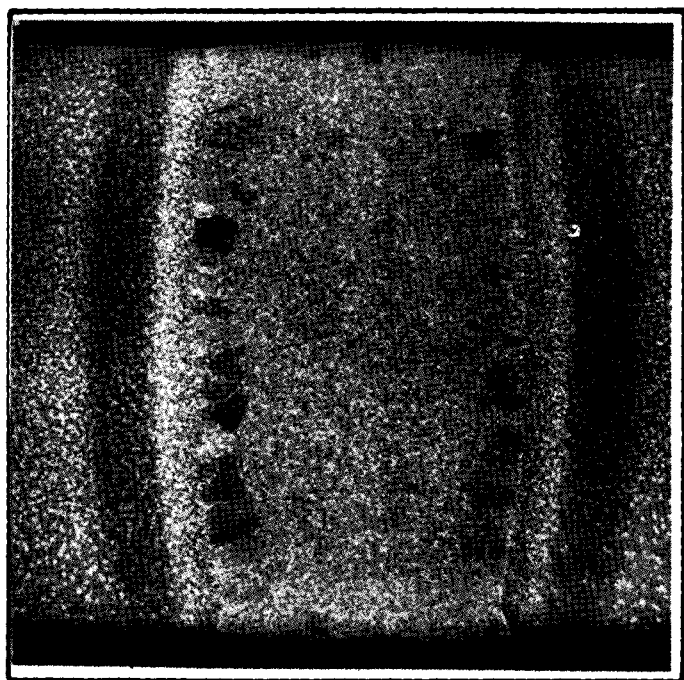
Eprouv. 7. 60 mm. ES
Echelle: 0,75



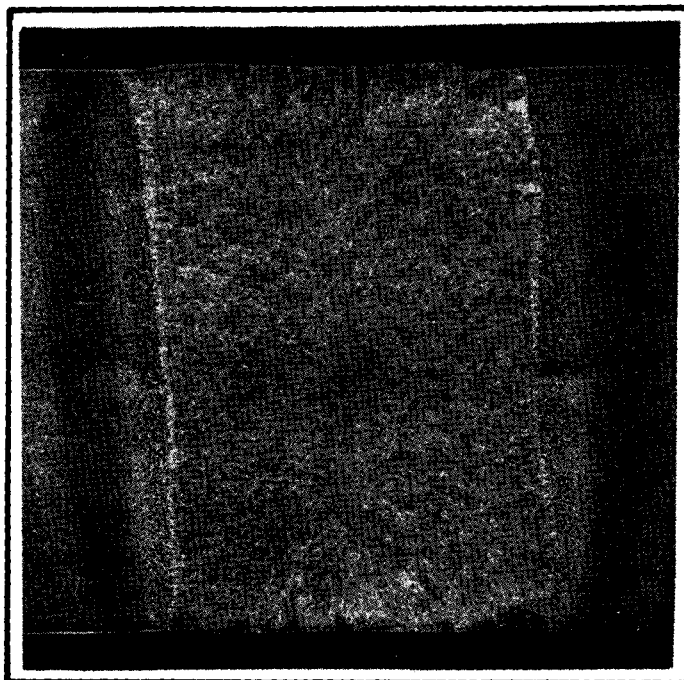
Eprouv. 8. 60 mm. ES.
Echelle: 1



Eprouv. 9. 60 mm. ES
Echelle: 0,65

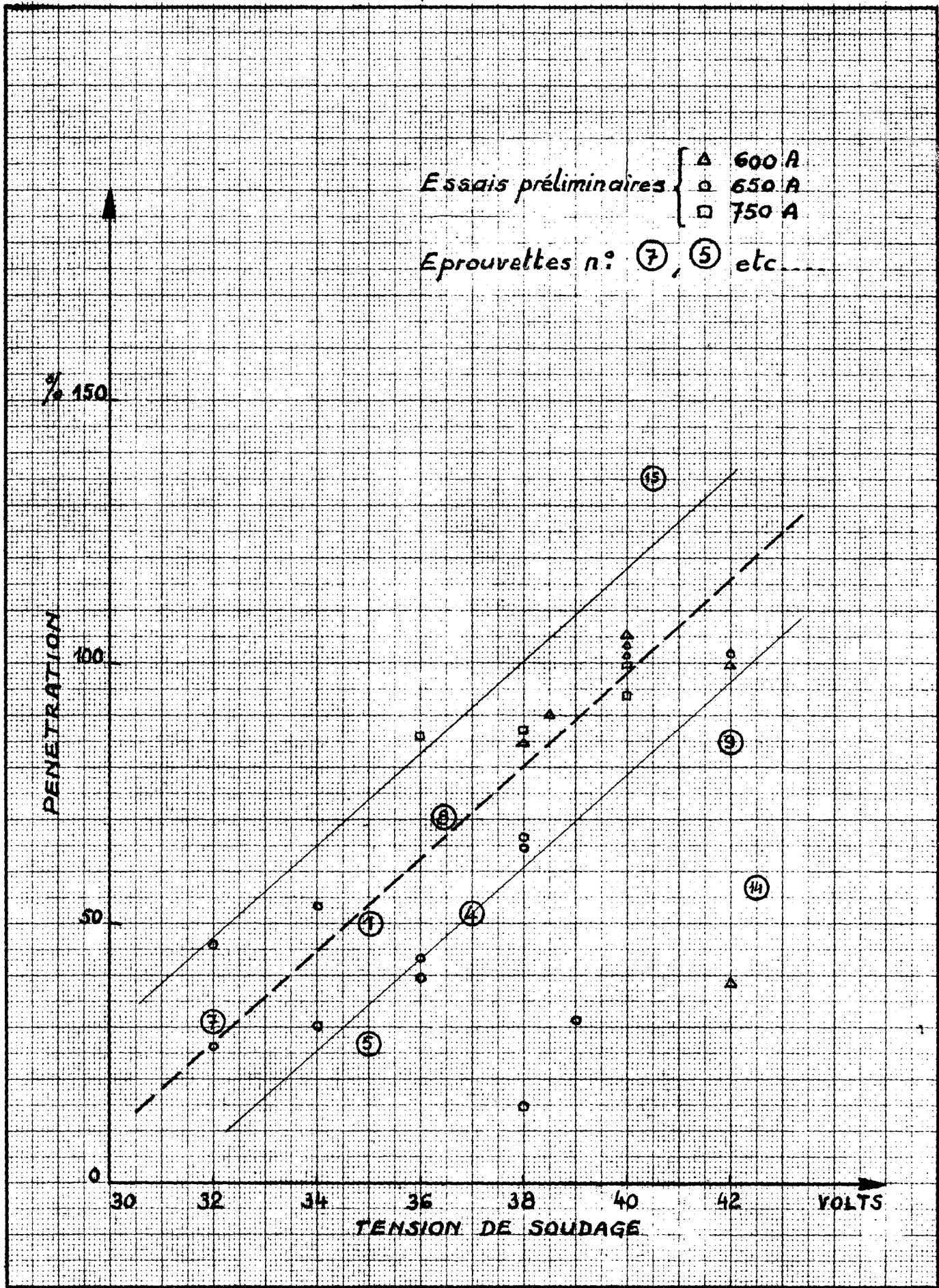


Eprouv. 14. 100 mm. ES. 1 fil.
Echelle: 0,75



Eprouv. 15. 100 mm. ES. 2 fils
Echelle: 0,75

Fig. 5-1 — Coupes transversales des cordons de soudure



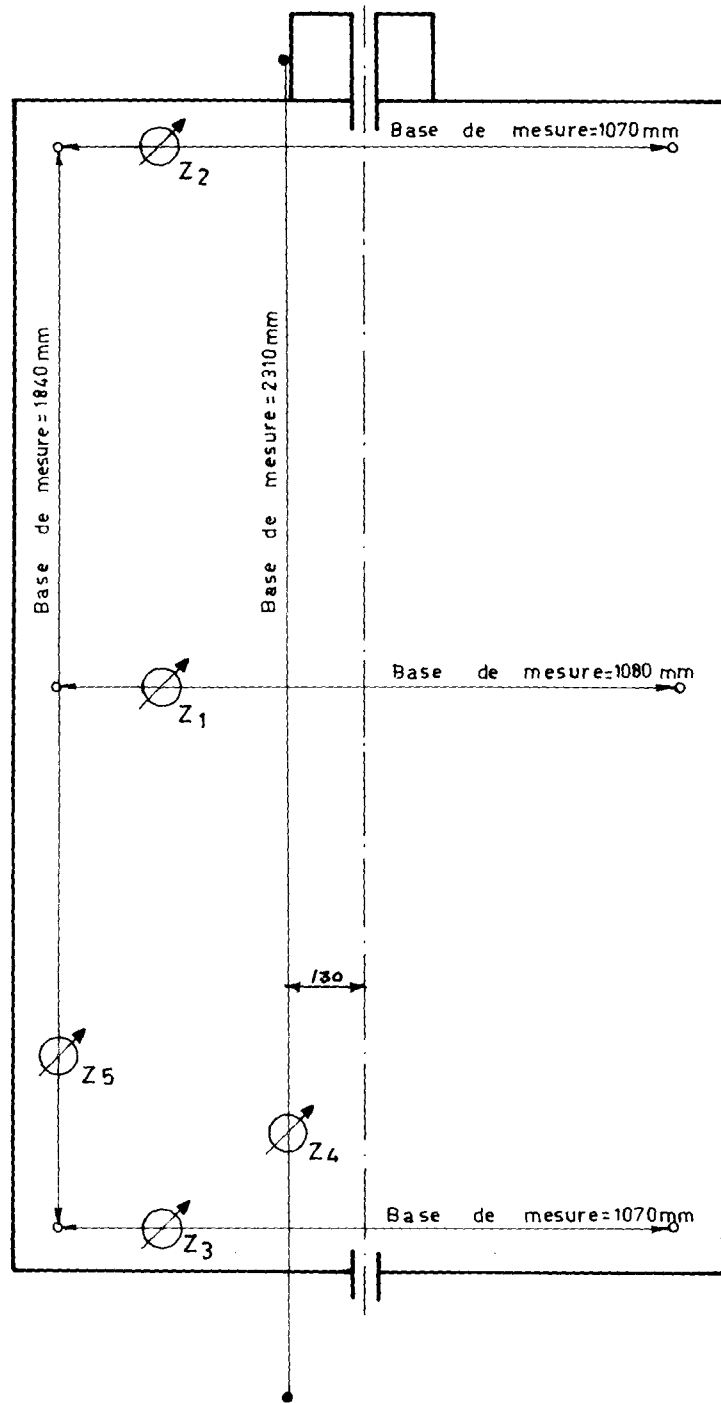


Fig. 6-1 — Placement des comparateurs
Eprouvette n° 14, épais. 100

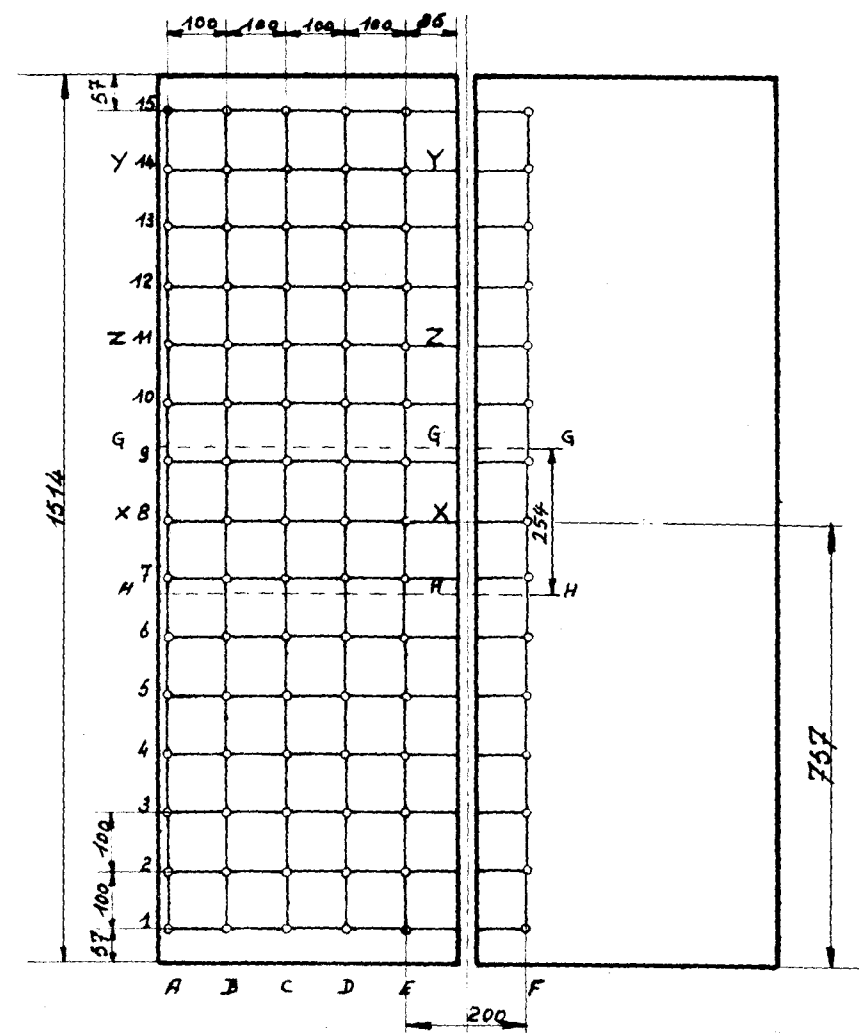


Fig. 6-2 — Mesure des déformations
Réseau des bases de mesure
Pfenster 100 mm
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

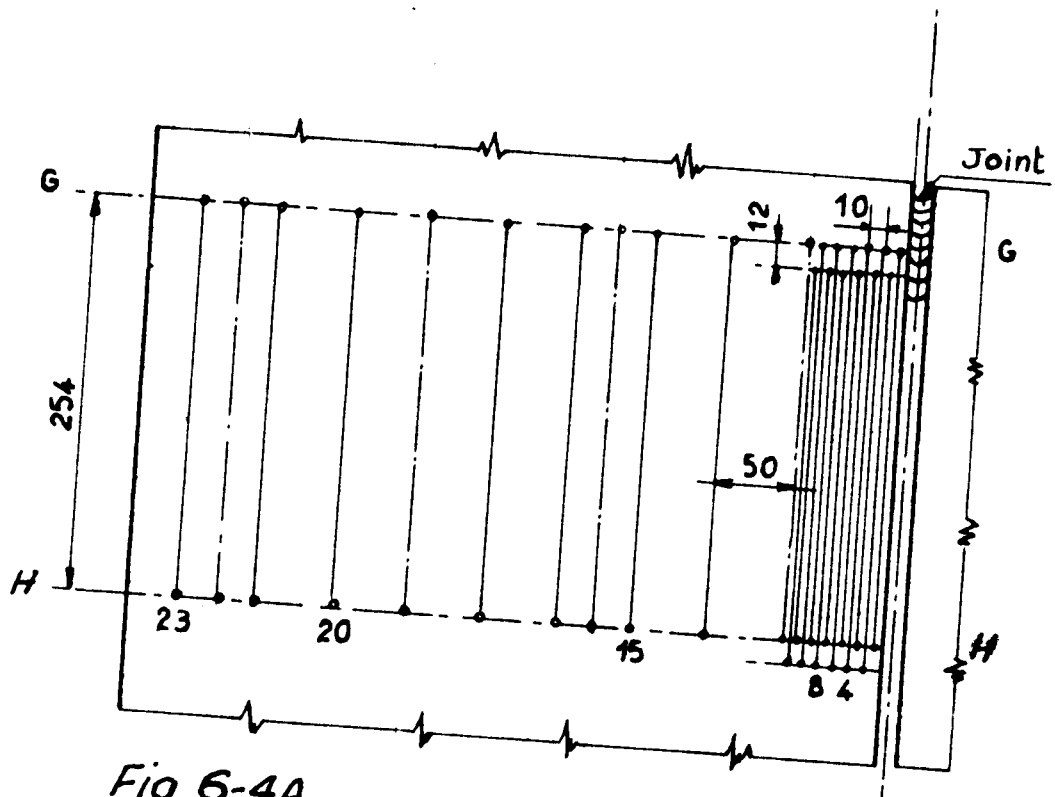


Fig 6-4A

DEFORMETRE WHITTEMORE BASE
DE MESURE DE 254 mm

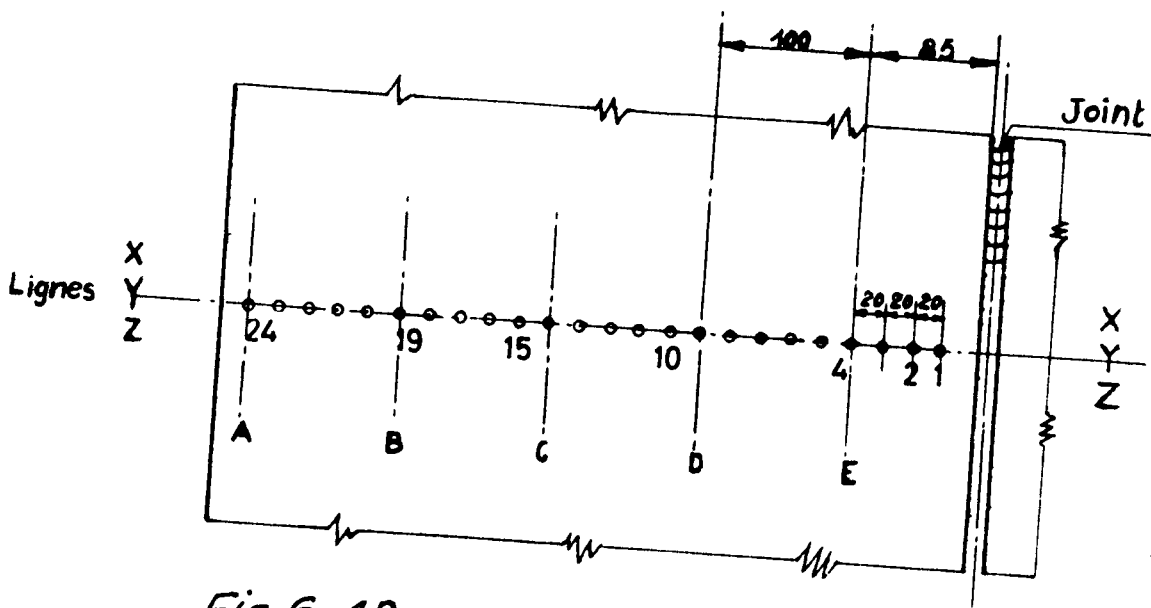
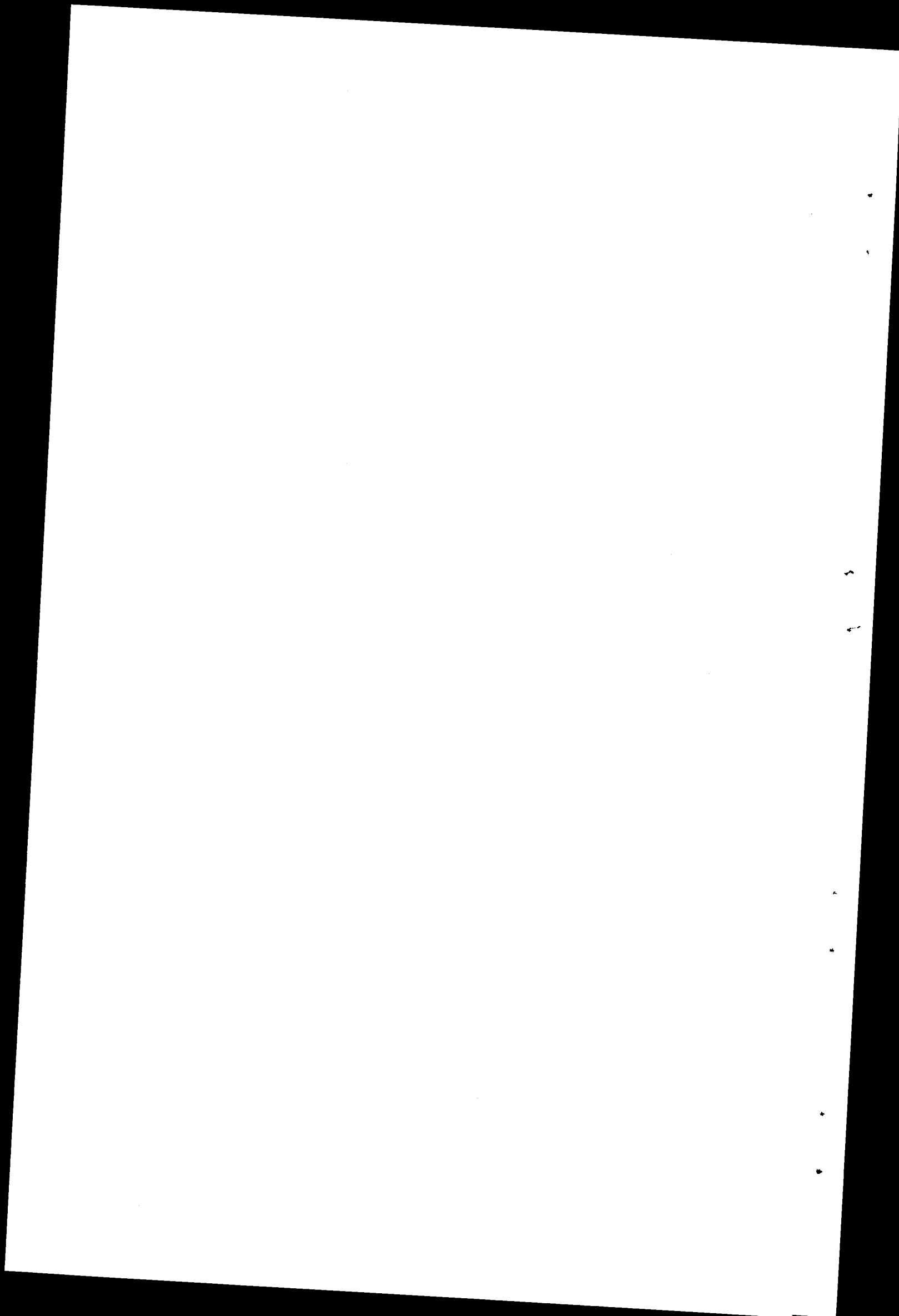


Fig 6-4B

DEFORMETRE PFENDER BASE
DE MESURE 20 mm

Fig. 6-4 — Mesure des déformations
fig. A : Longitudinales perpendiculairement au joint
fig. B : Transversales perpendiculairement au joint
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm



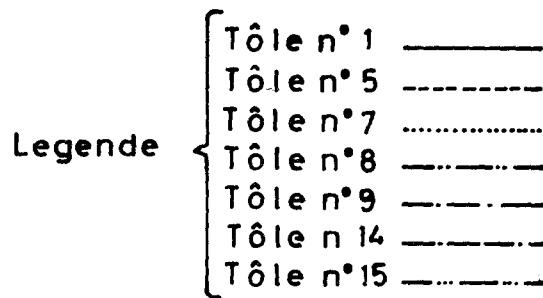
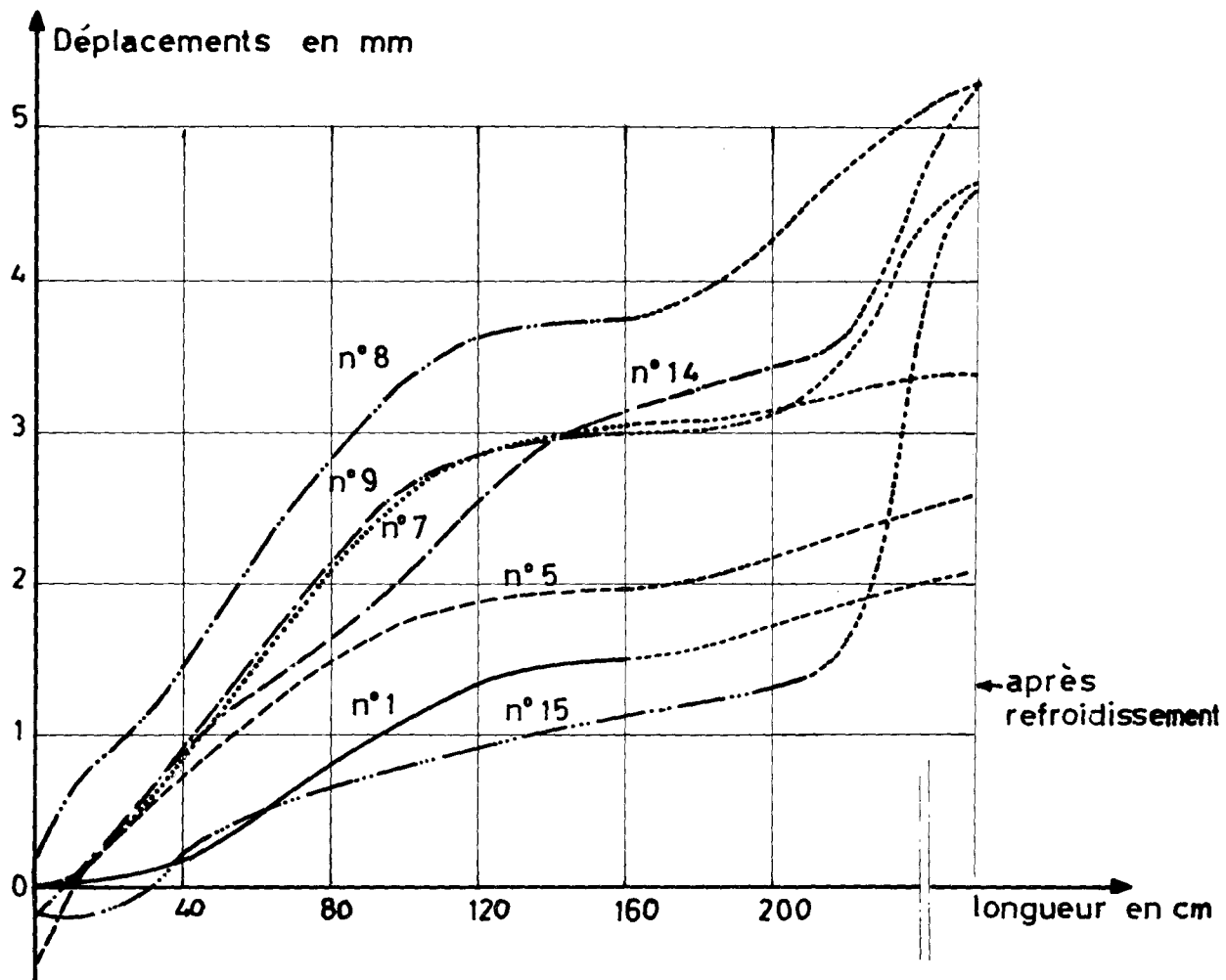


Fig. 6-5 — Déplacements à mi-hauteur (Z_1)

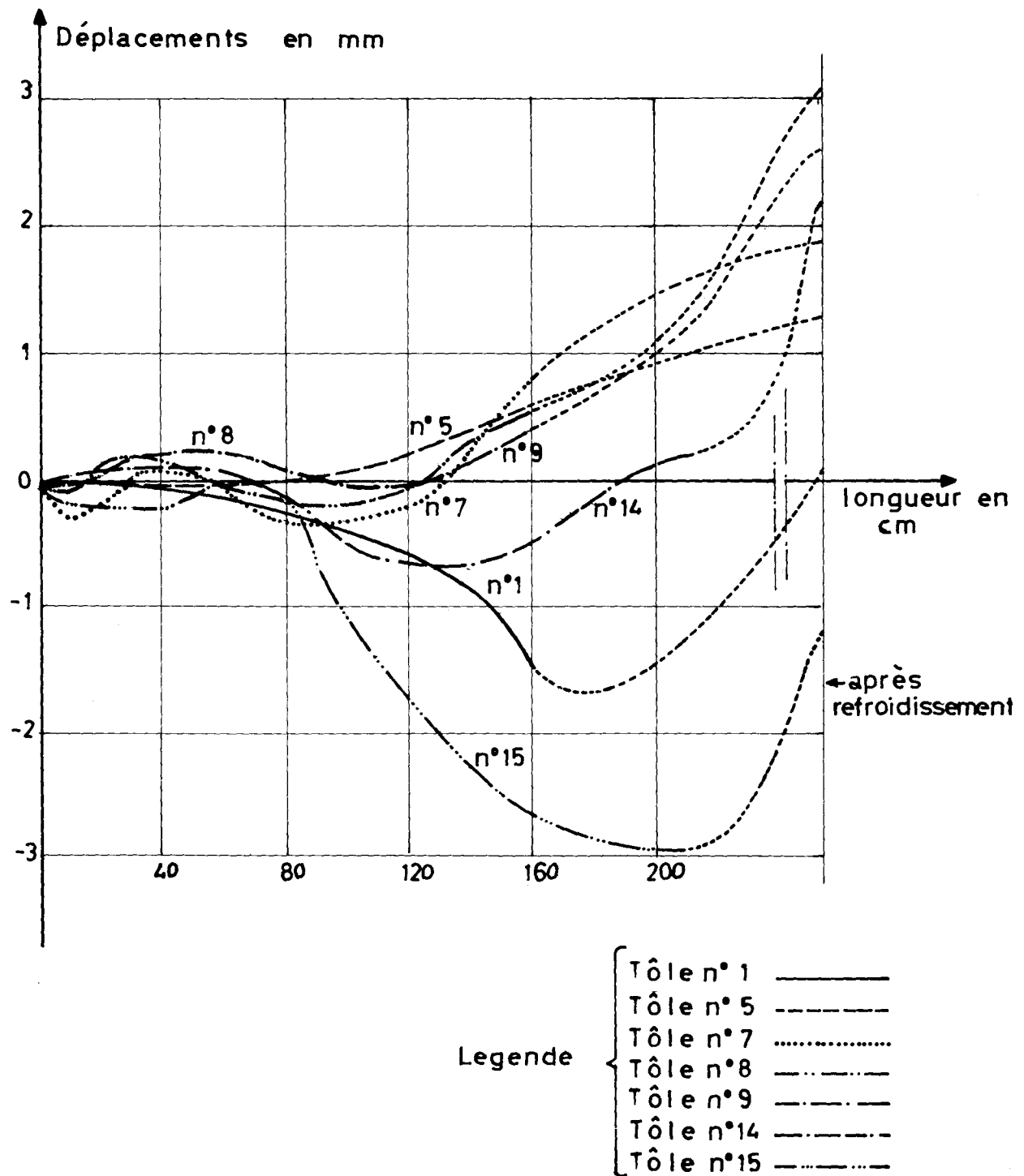
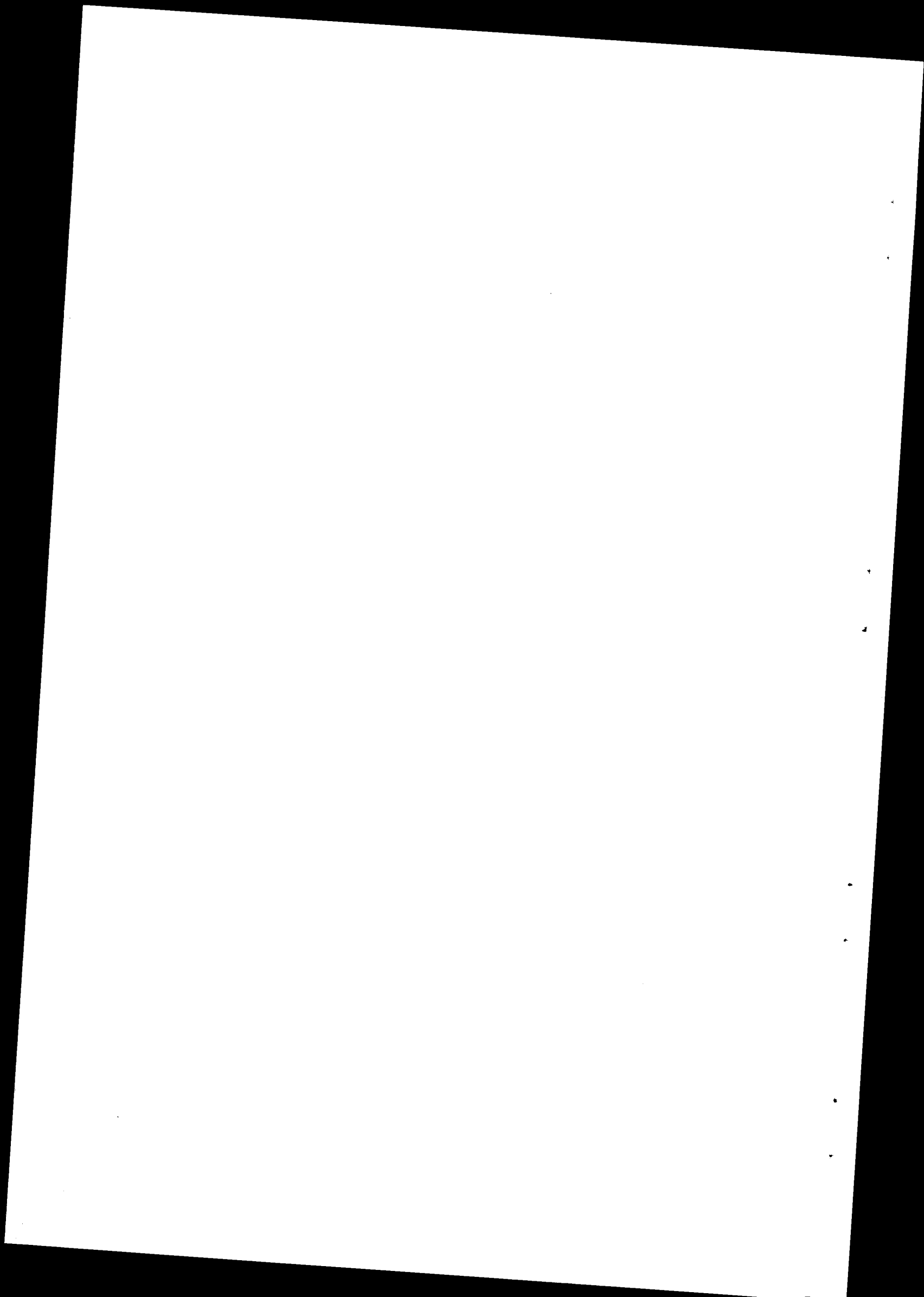
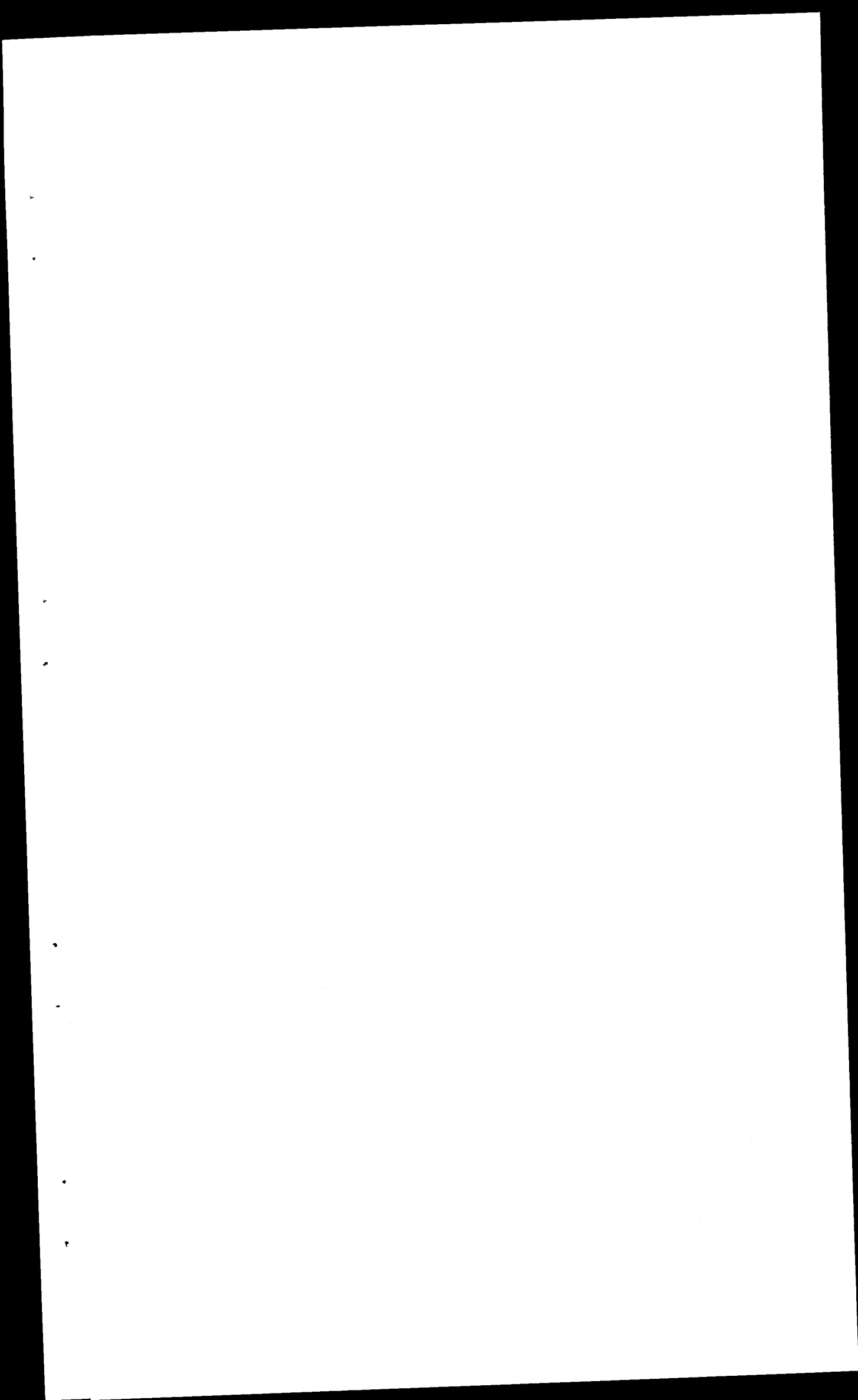
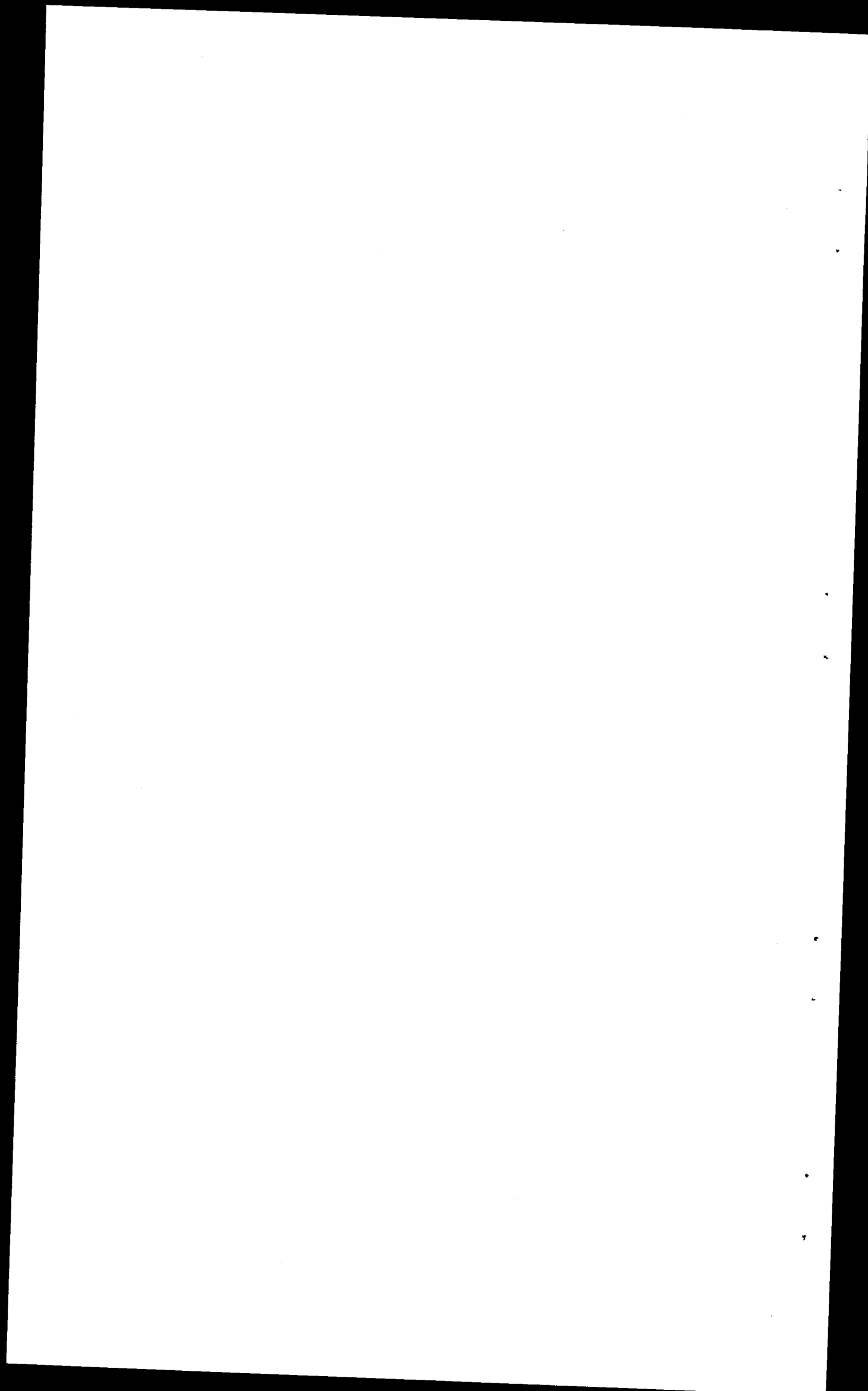


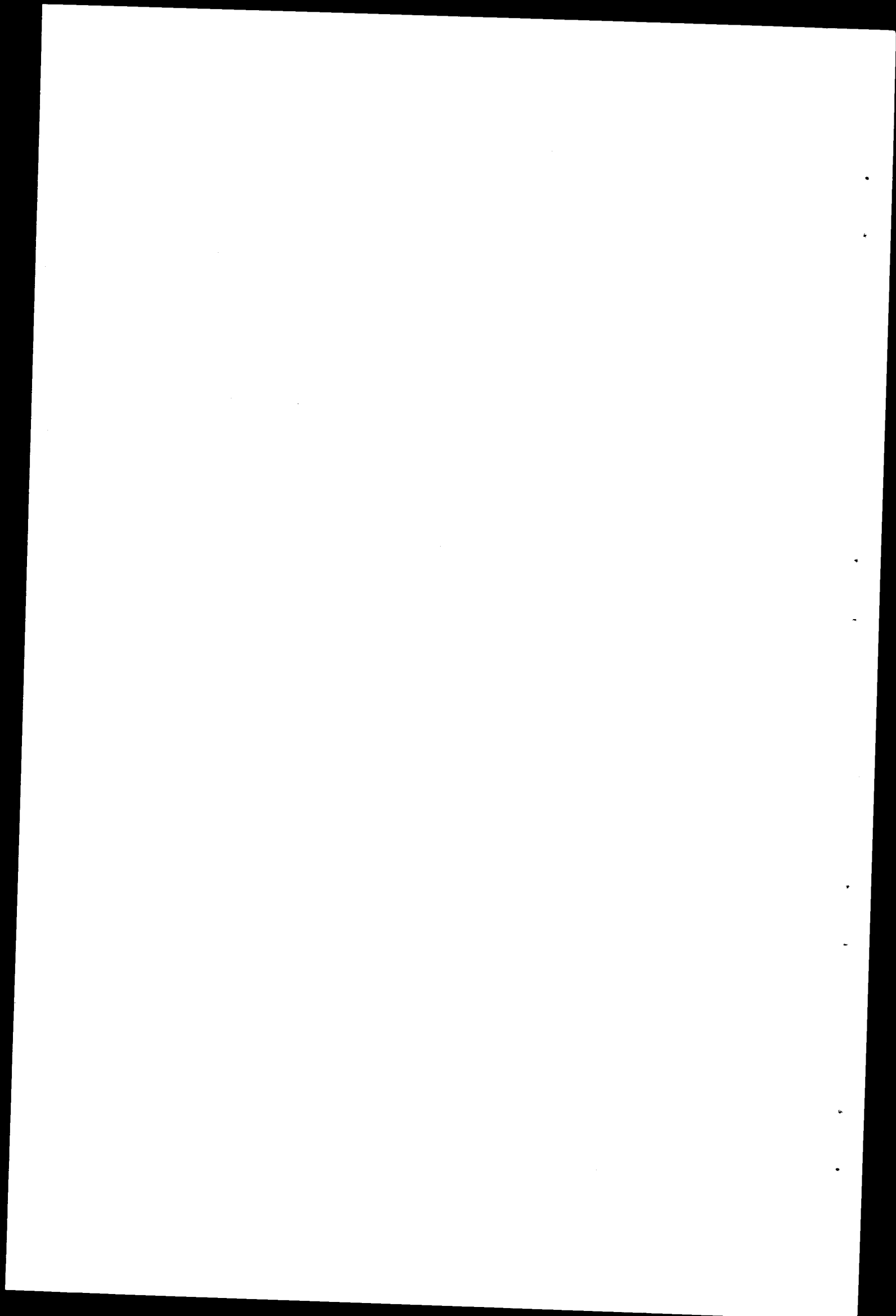
Fig. 6-6 — Déplacements au sommet (Z_2)

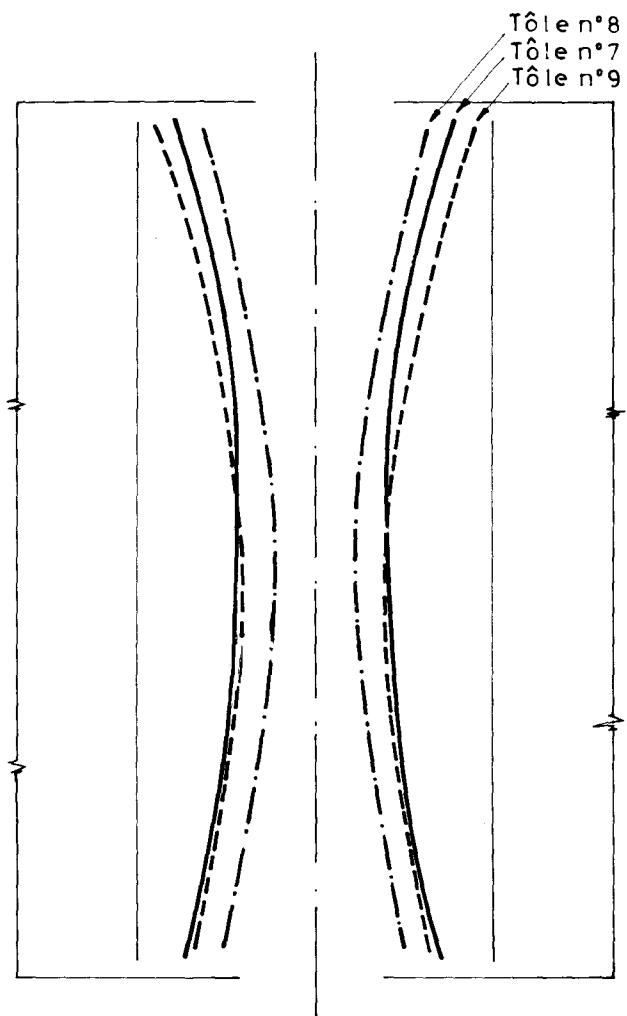












1cm → = déplacements de 1mm

Fig. 6-10 — Mesure des déplacements
Eprouvettes n°s 7, 8 et 9

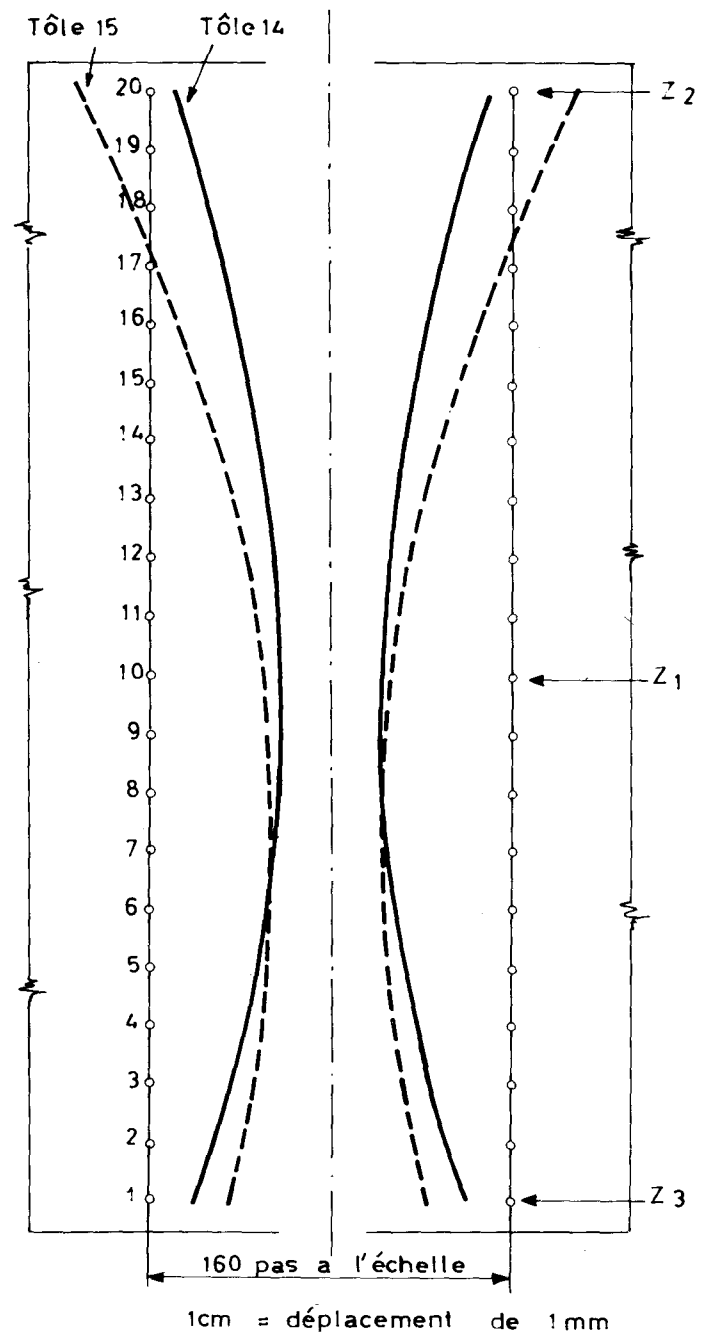


Fig. 6-11 — Mesure des déplacements
Eprouvettes n°s 14 et 15

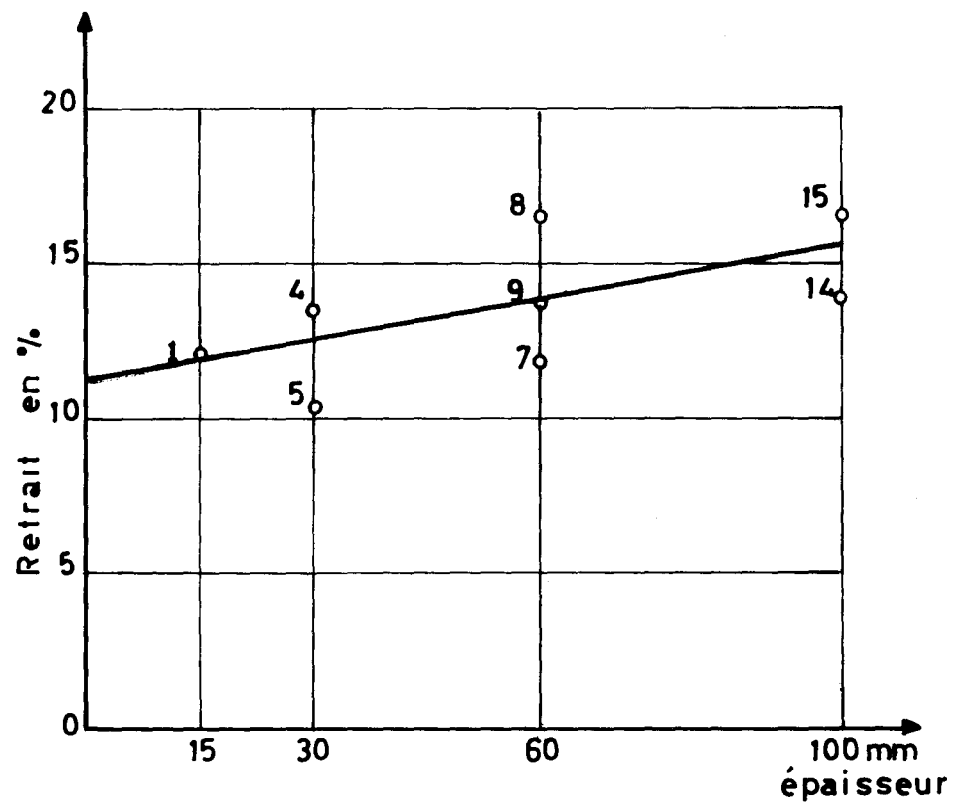


Fig. 6-12 — Retrait en % de l'ouverture du joint pour diverses épaisseurs

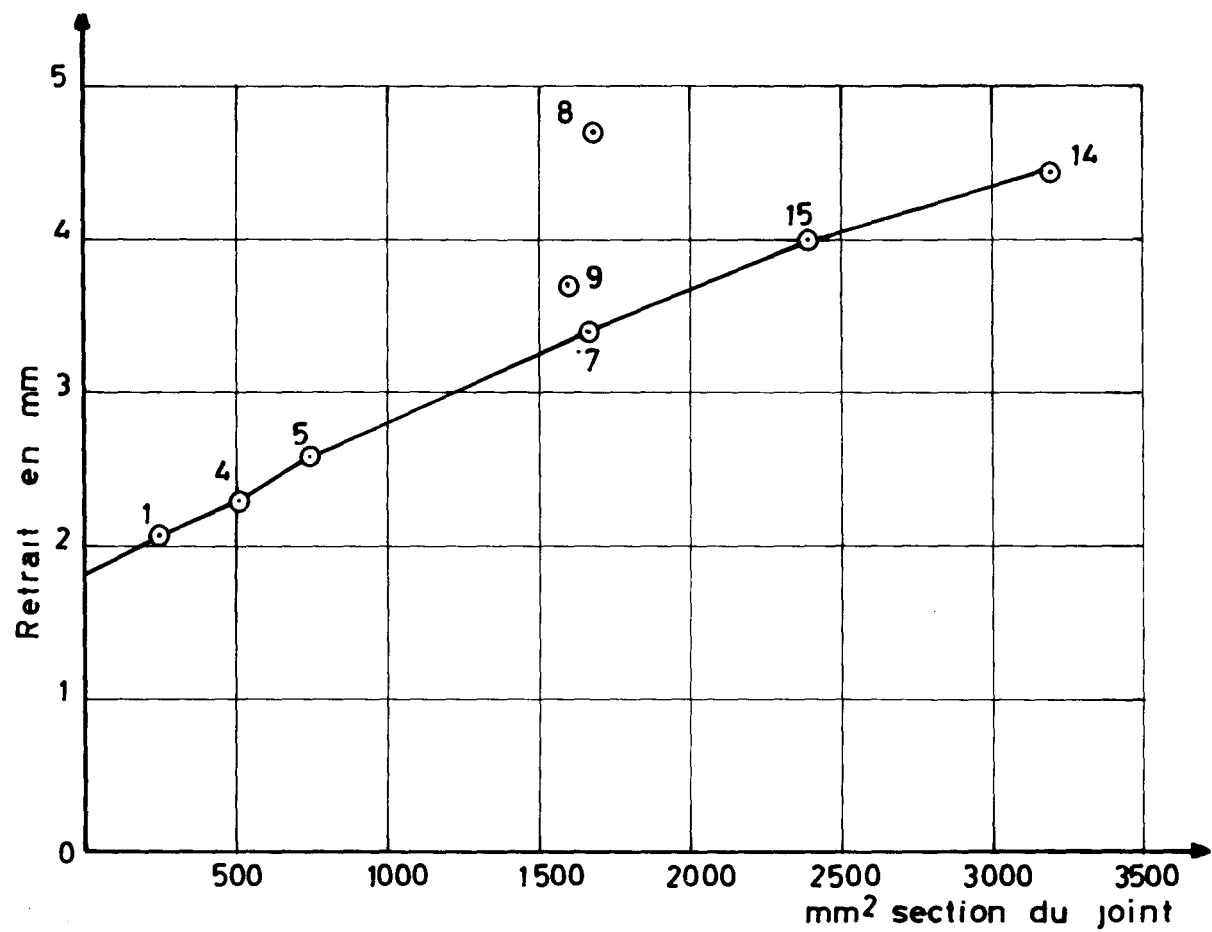


Fig. 6-13 — Retrait en mm de l'ouverture du joint en fonction de la section nette du joint

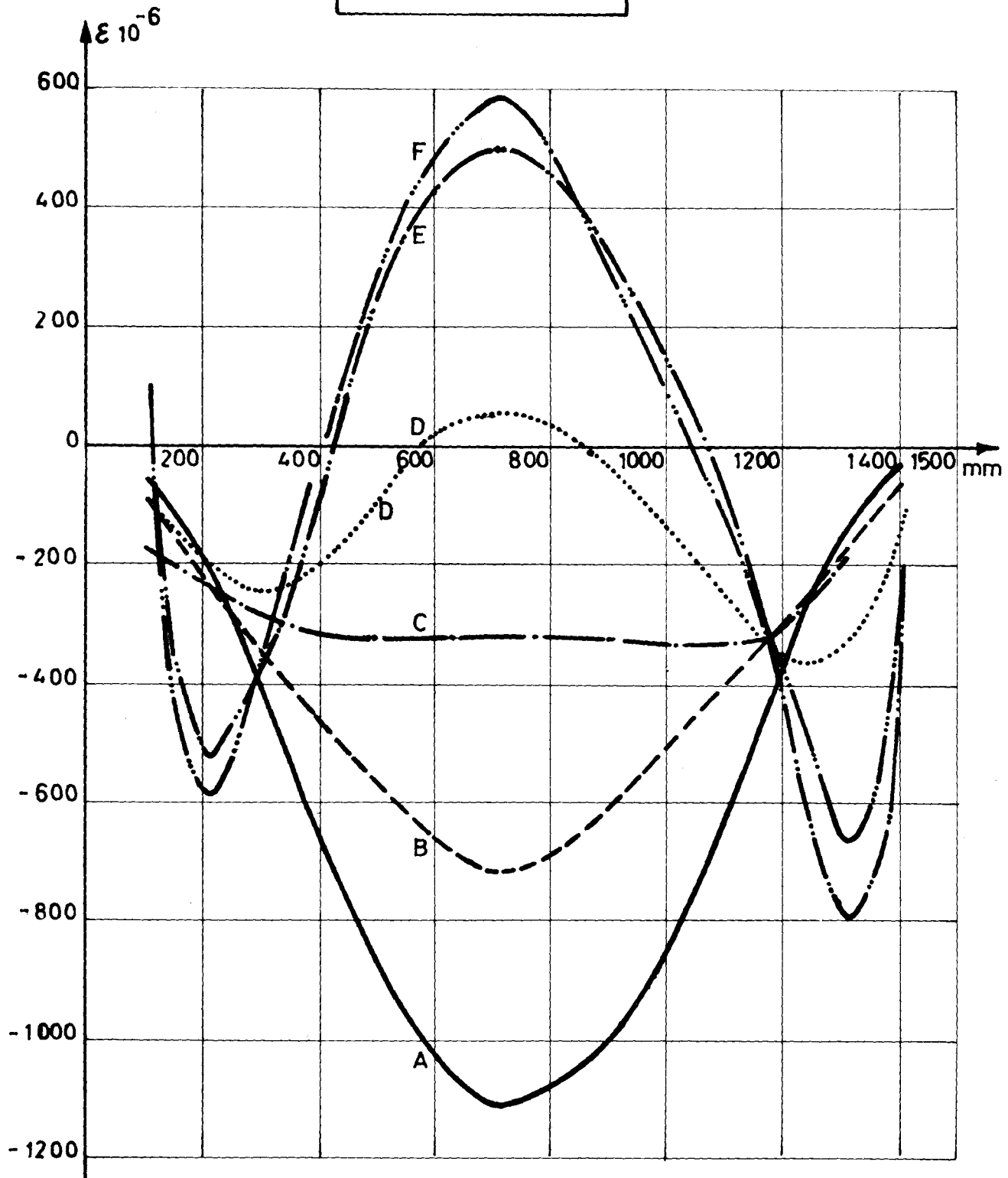
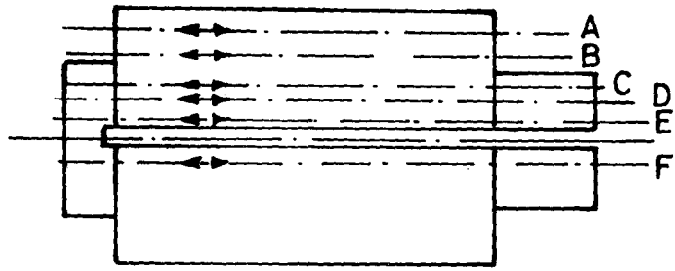


Fig. 6-14 — Déformations longitudinales parallèlement au joint
 Pfender bases de mesure 100 mm
 Eprouvette n° 9

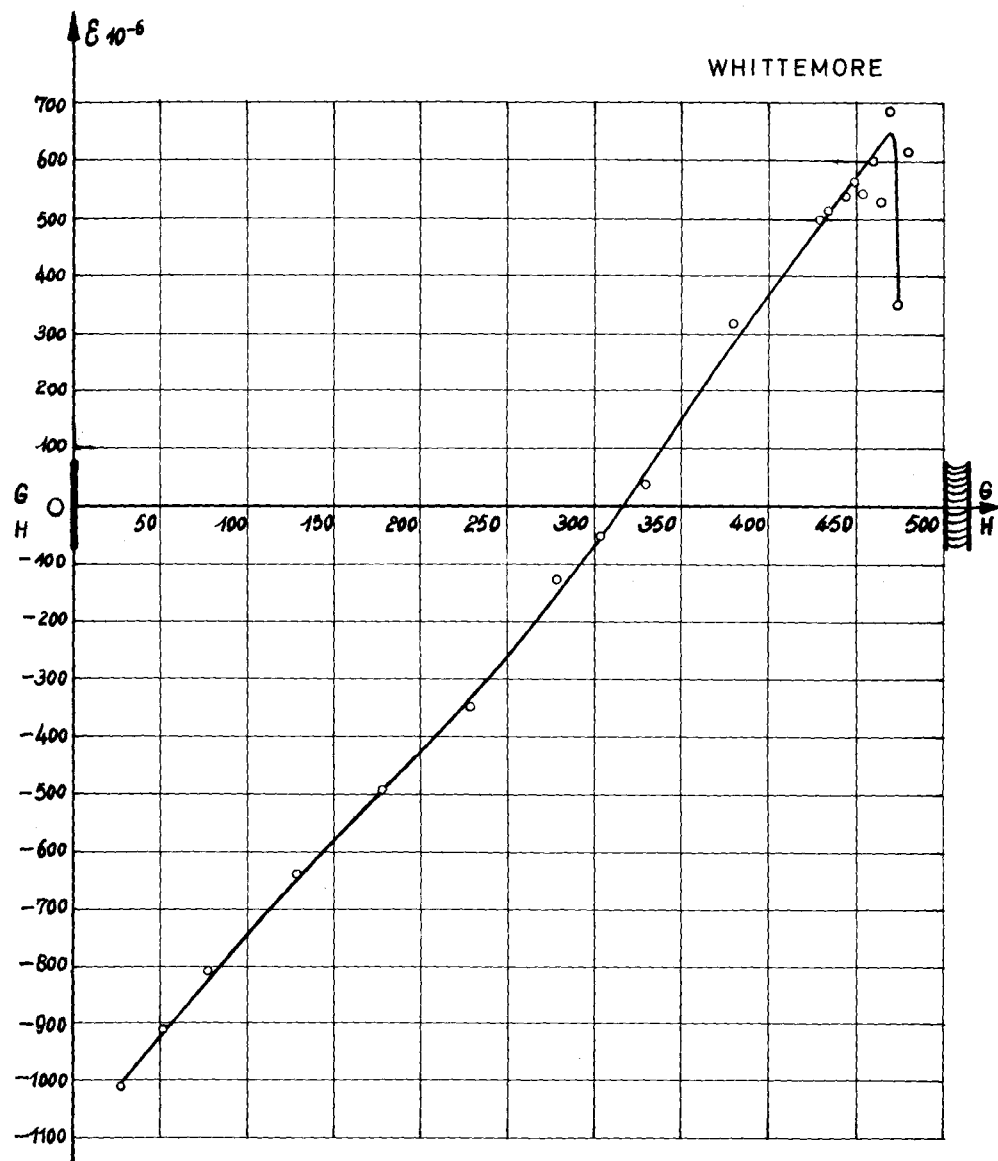


Fig. 6-15 — Déformations longitudinales perpendiculairement au joint
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

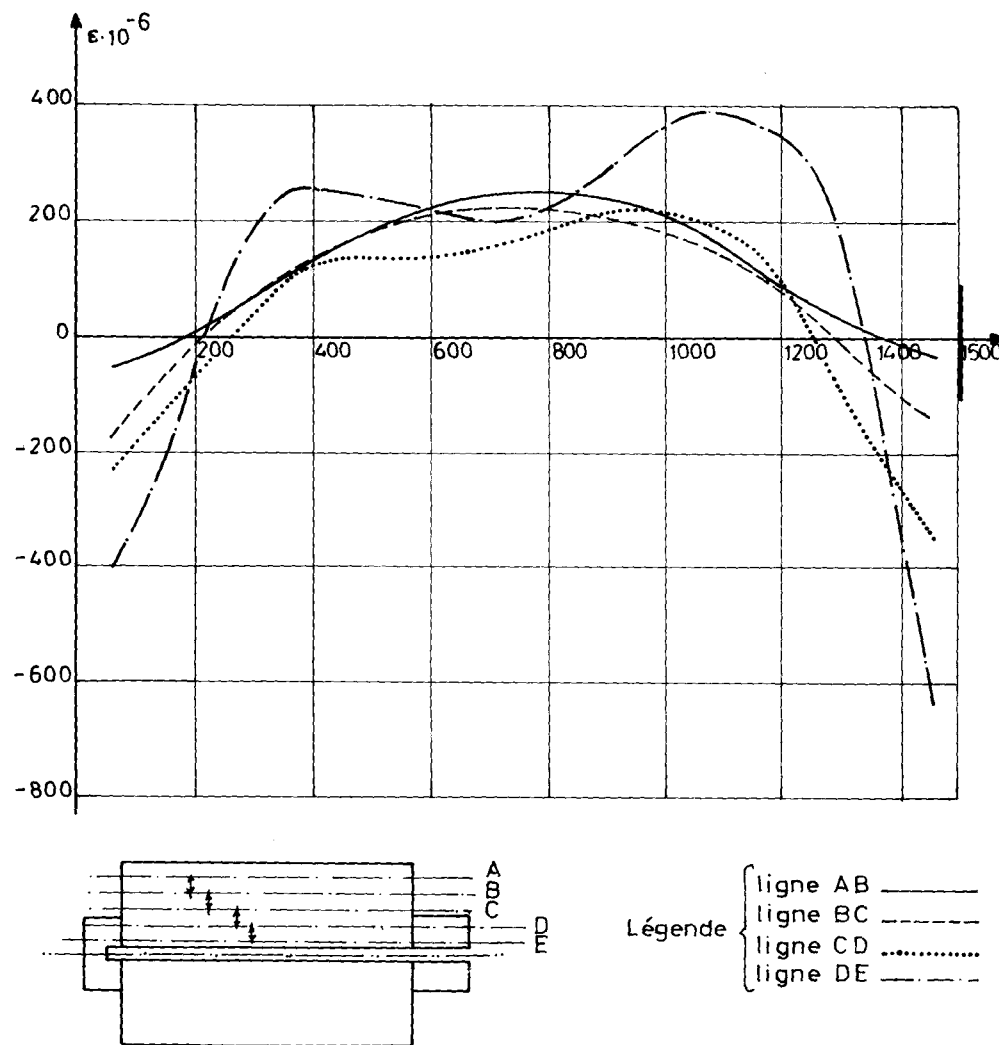
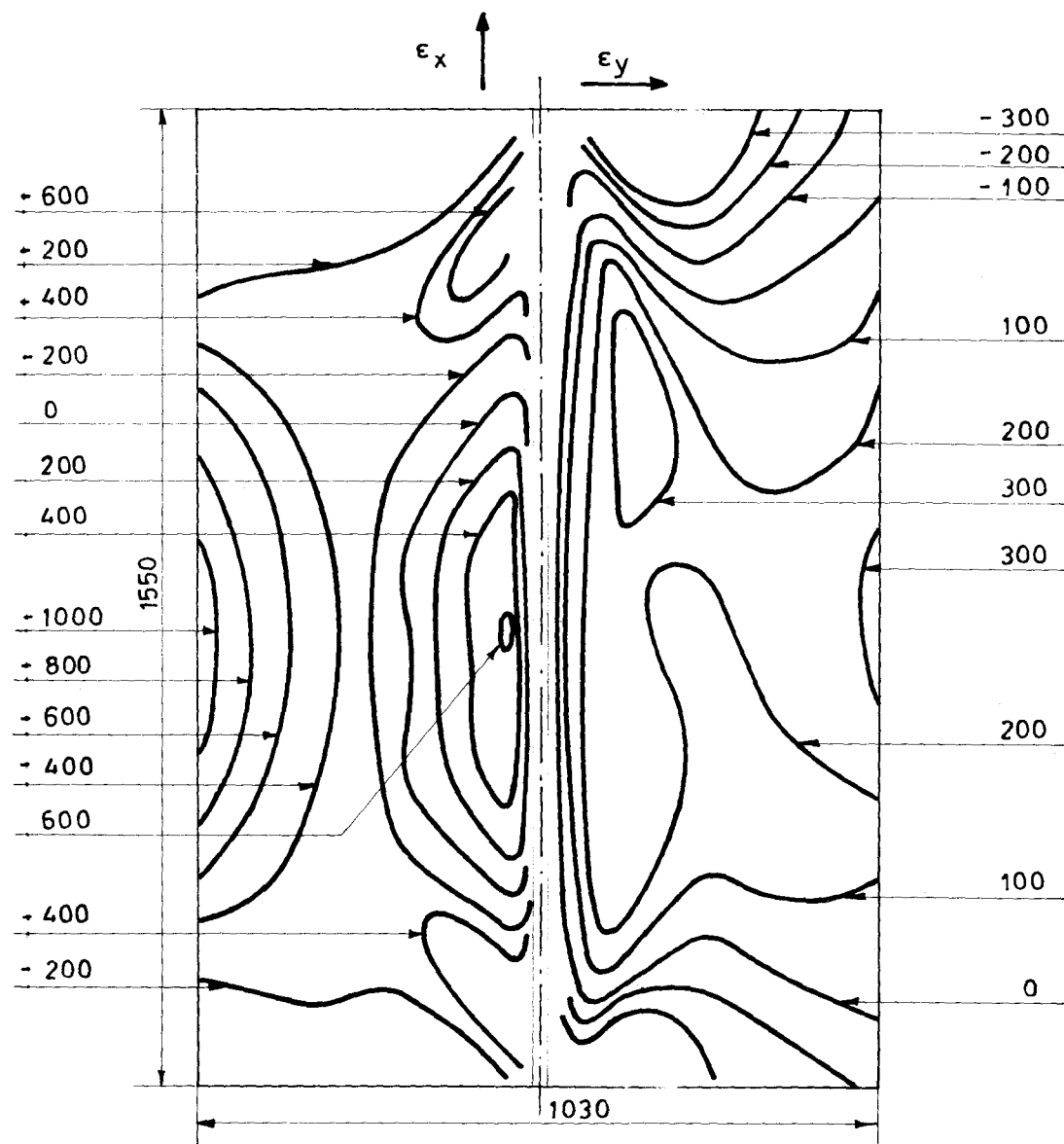
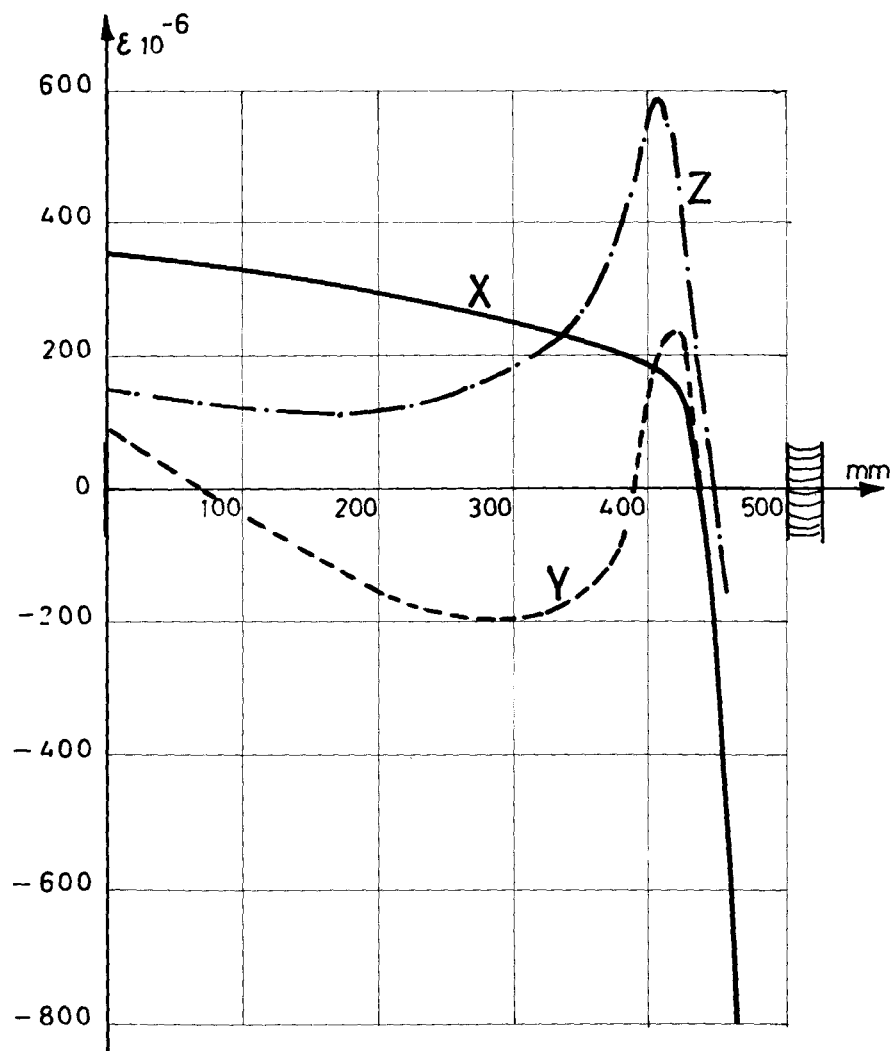


Fig. 6-16 — Déformations transversales parallèlement au joint
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm



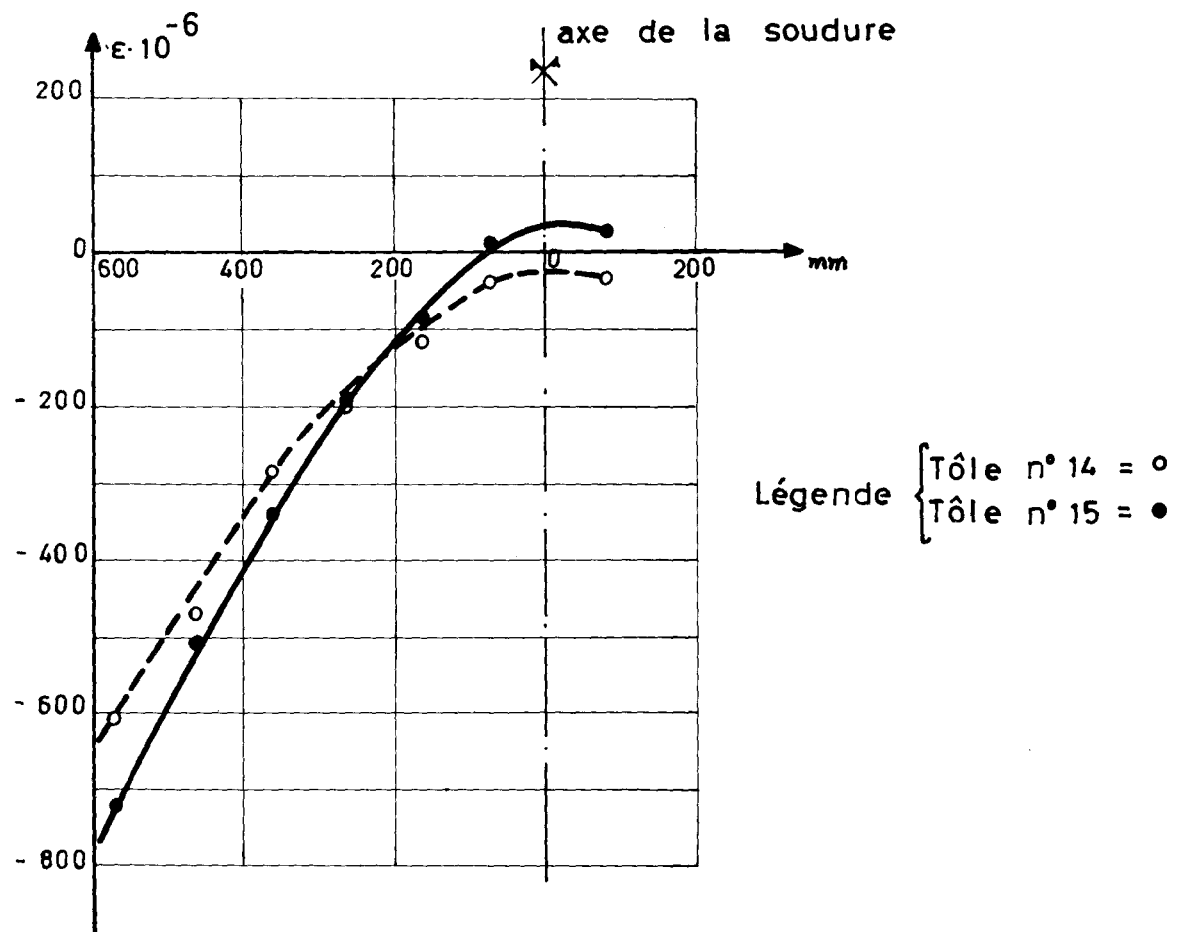
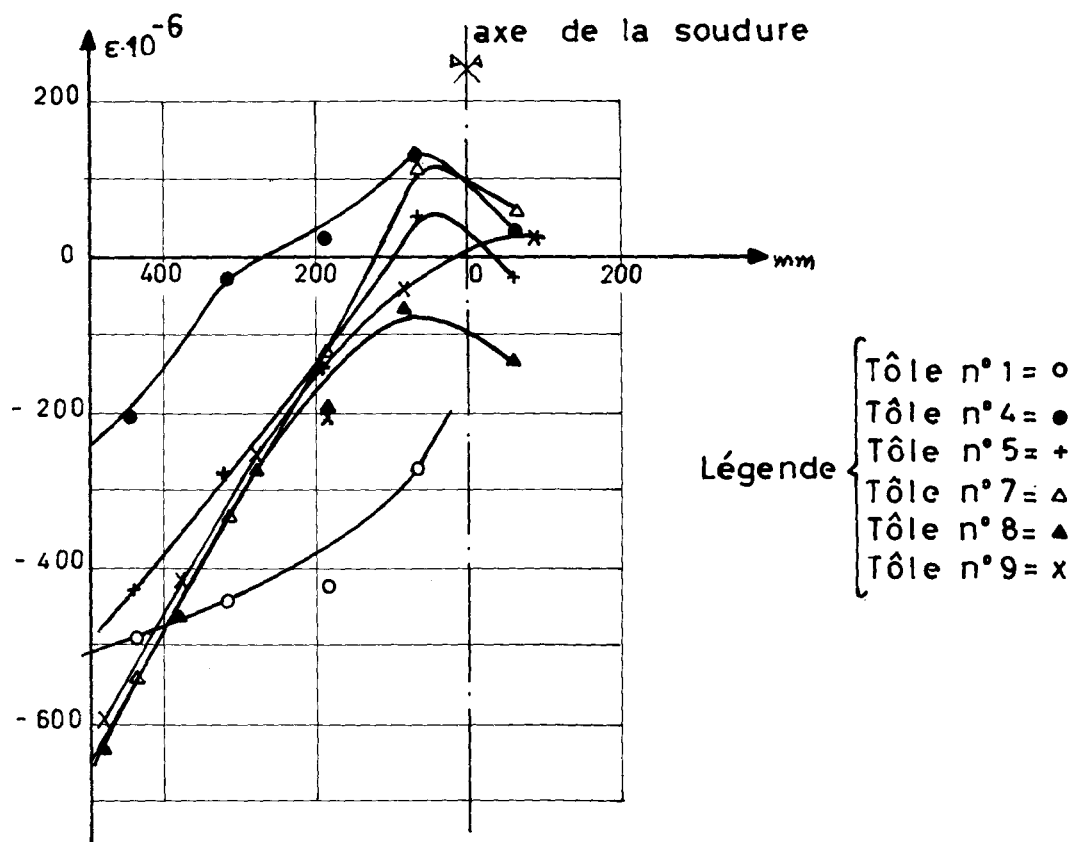


Fig. 6-19 — Déformations longitudinales moyennes

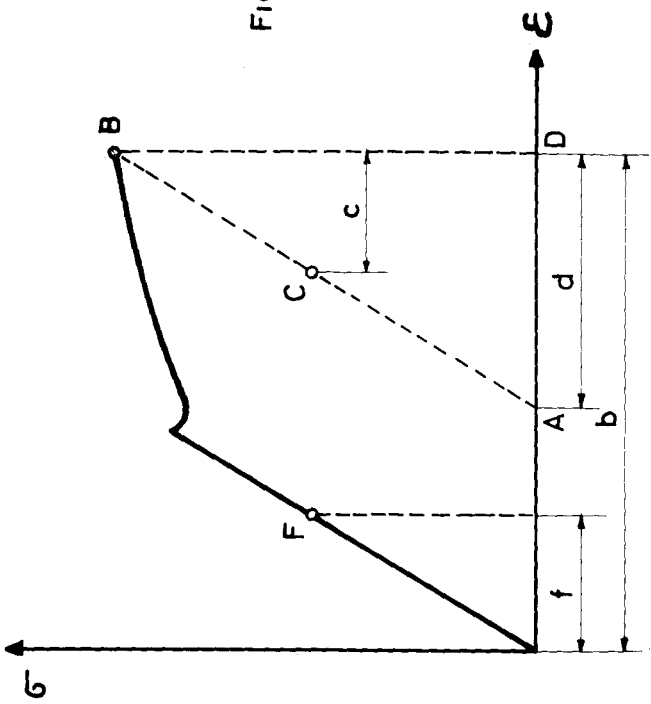


Fig: 7-1

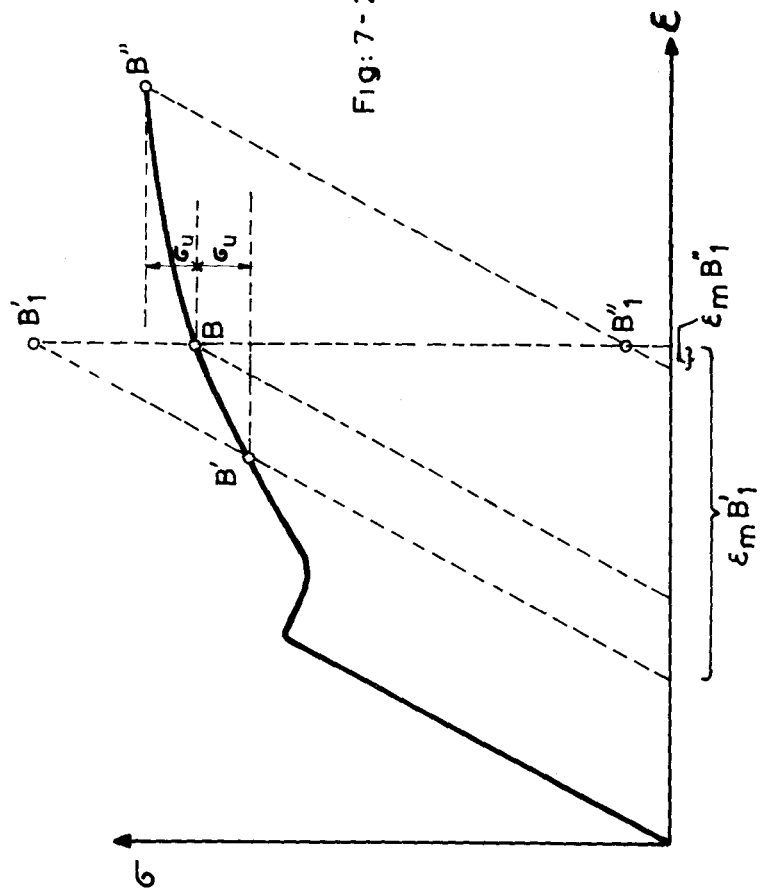


Fig: 7-2

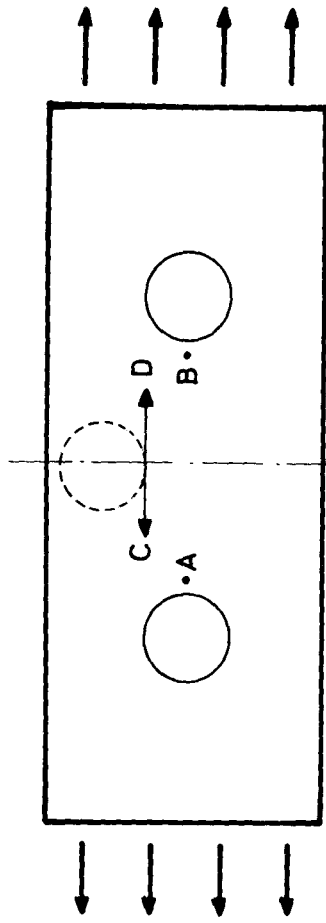


Fig 7-3

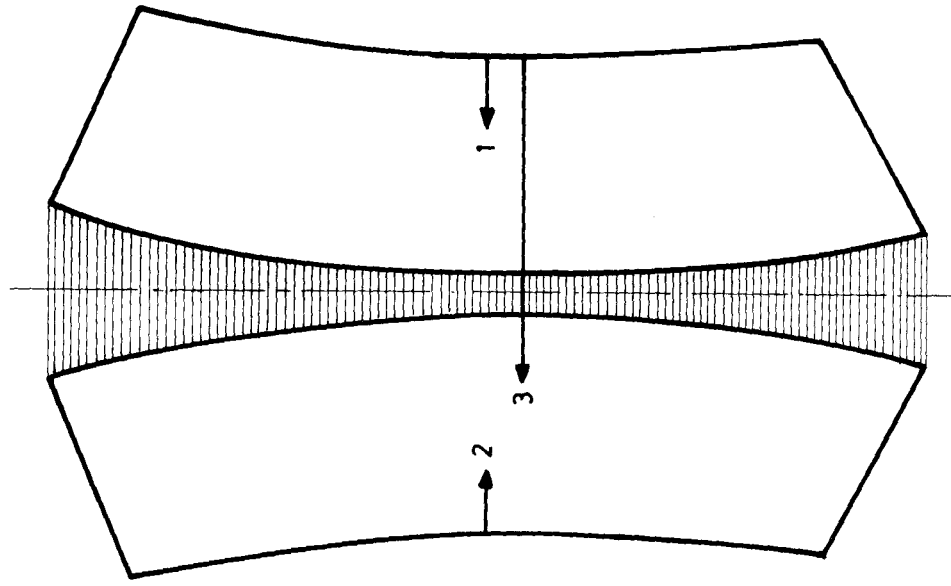


Fig 7-4



FIG. 7-5

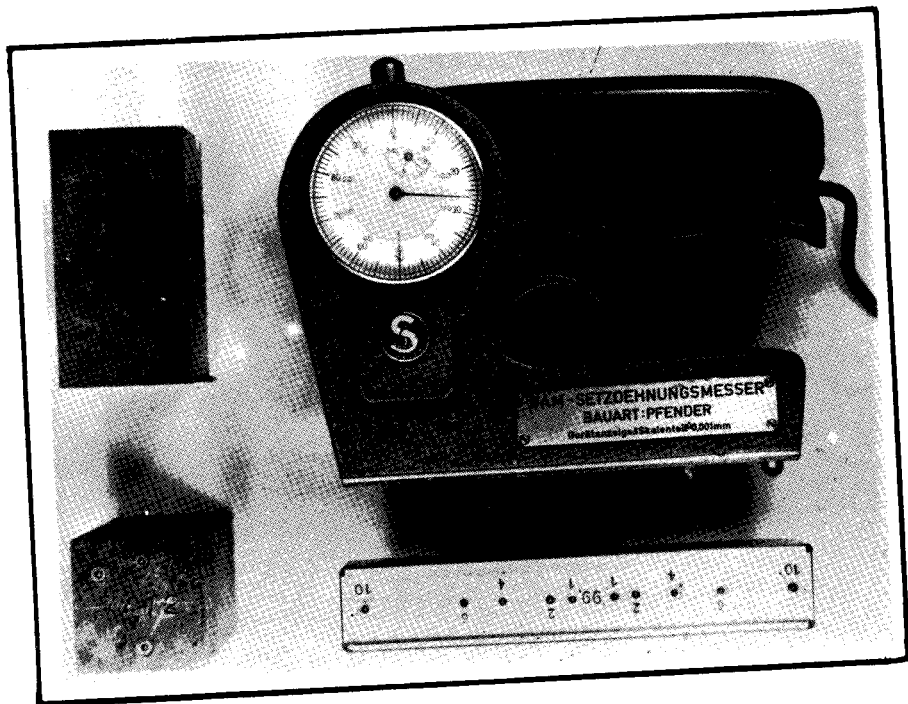


FIG. 7-6

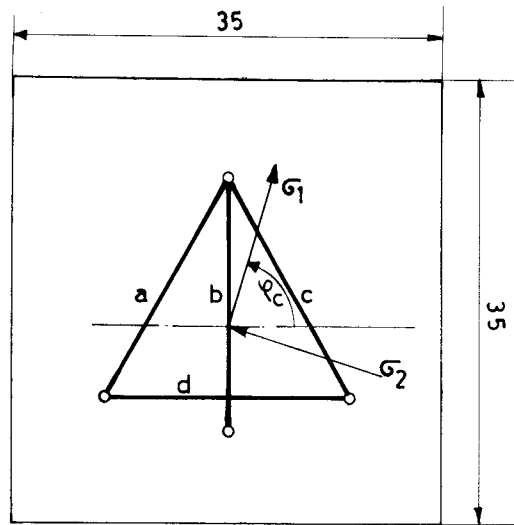
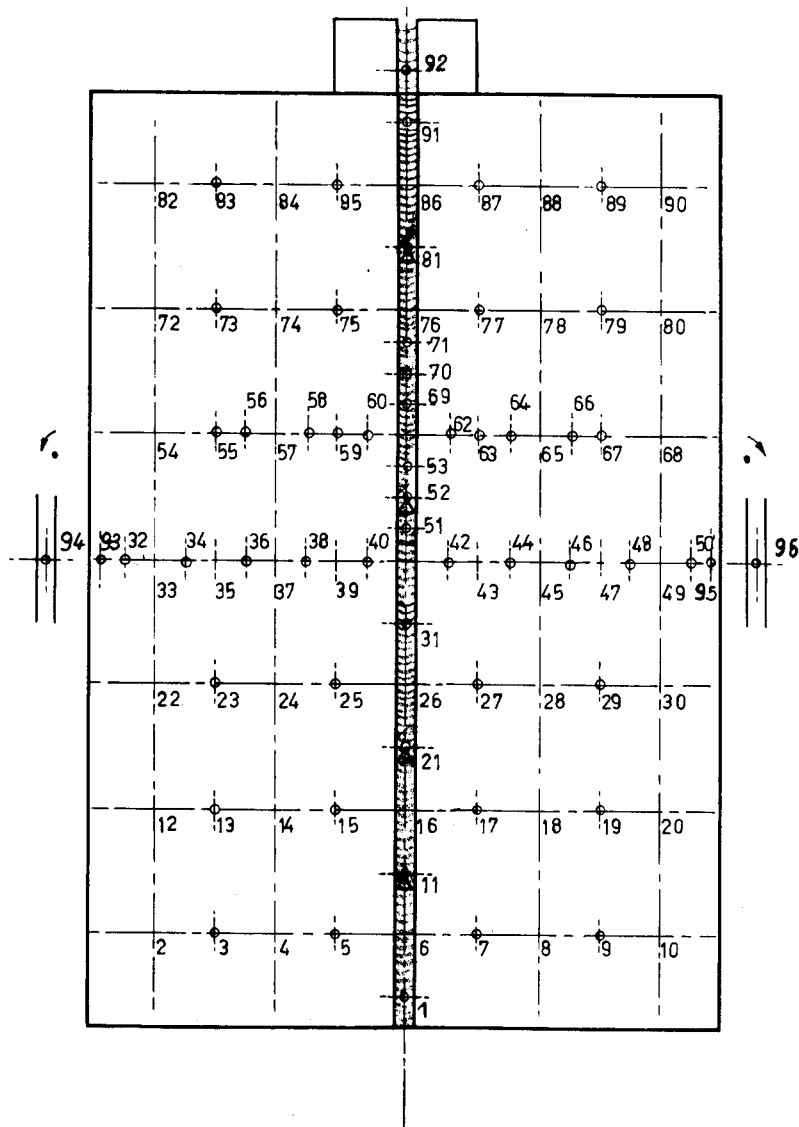


Fig. 7-7



Legende:

- + Base de mesures $T\Delta$ sur deux faces.
- o Base de mesures $T\Delta$ sur une face.
- Δ Mesures de la dilatation moyenne suivant l'épaisseur

Fig. 7-8 — Mesure des contraintes en surface et en profondeur
 Placement des bases T - Δ
 Epruvette n° 5, épais. 30

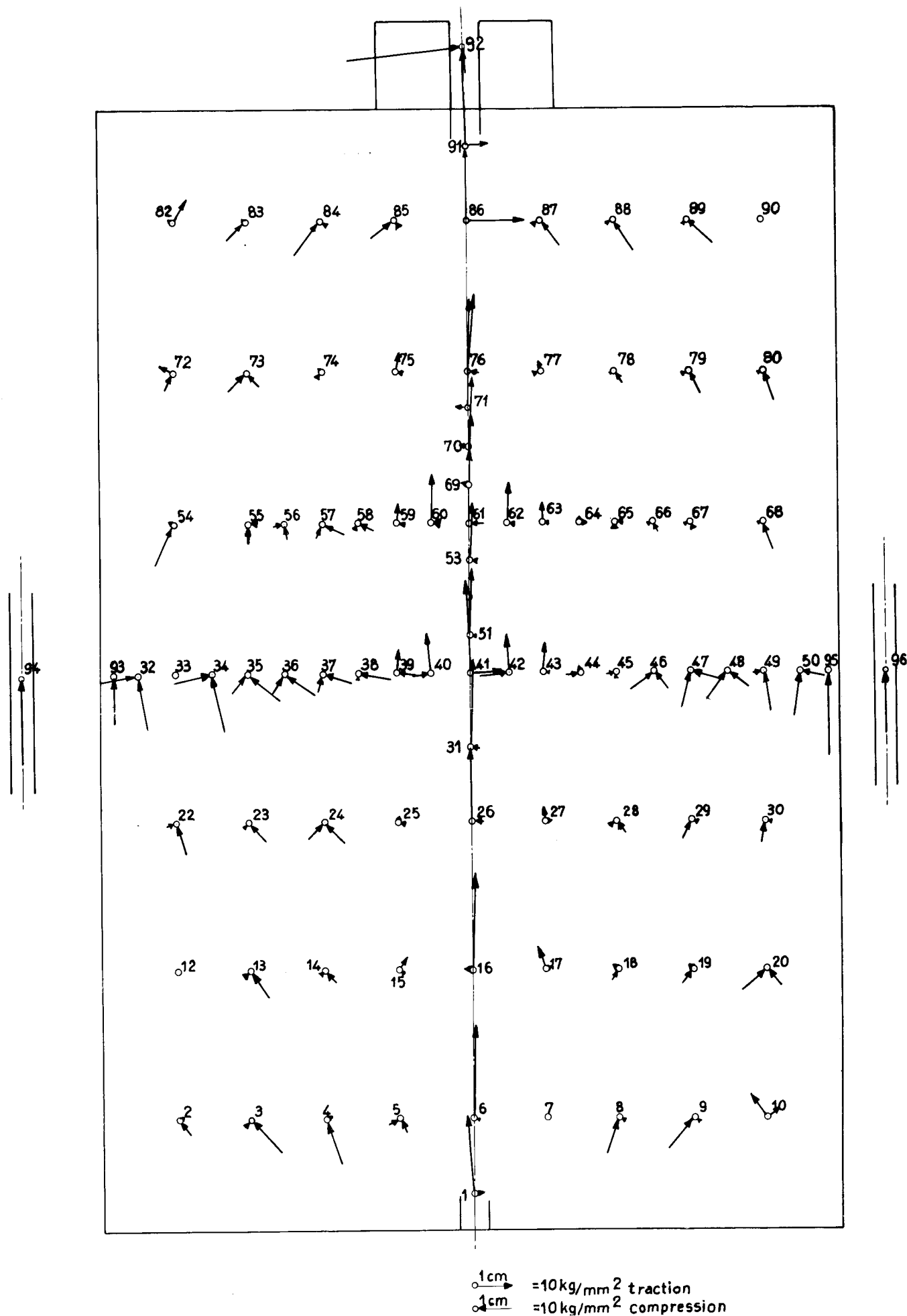


Fig. 7-9 — Mesure des contraintes en surface (face avant)
Epruvette n° 5, épais. 30 mm

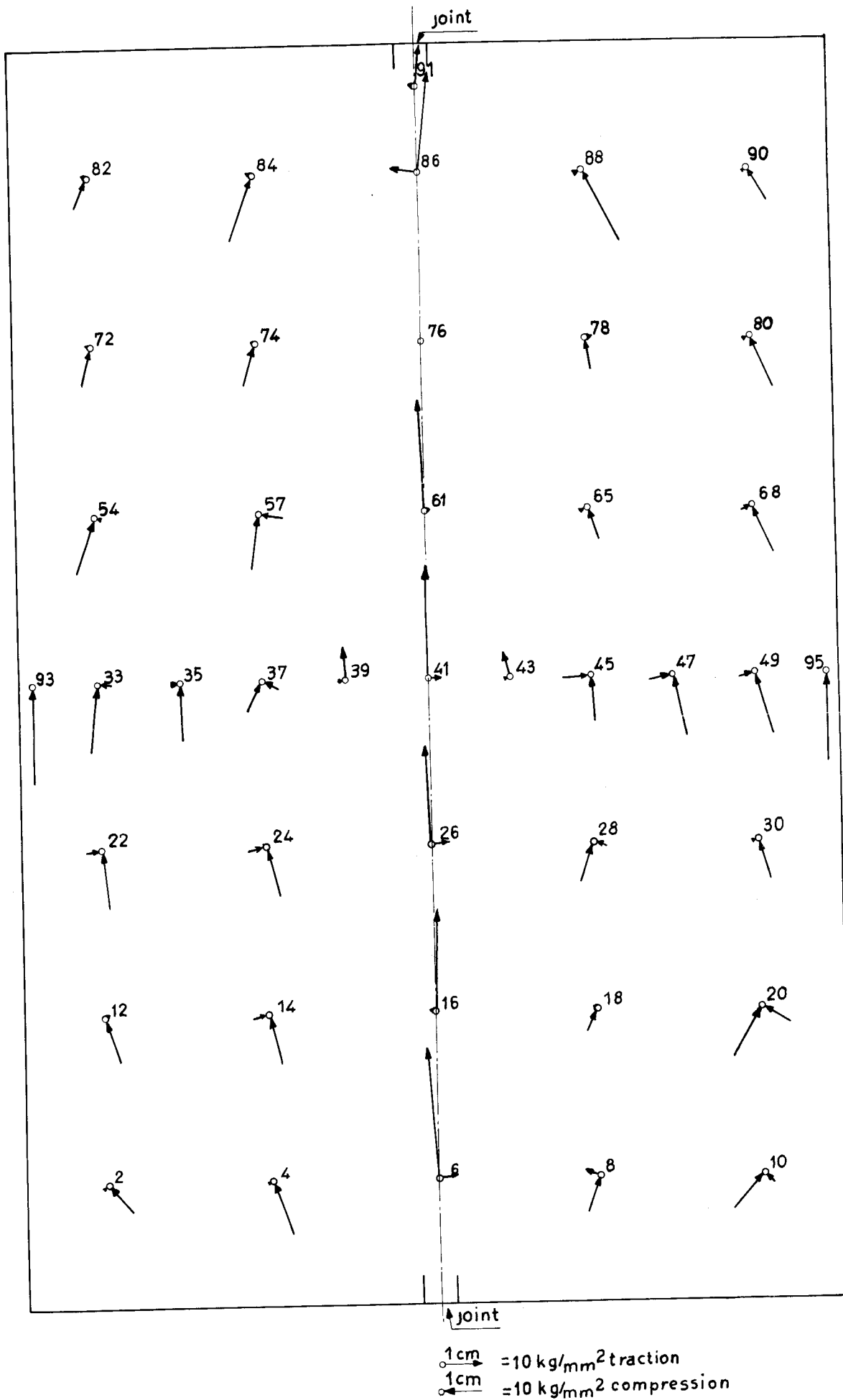


Fig. 7-10 — Mesure des contraintes en surface (face arrière)
Eprouvette n° 5, épais. 30 mm

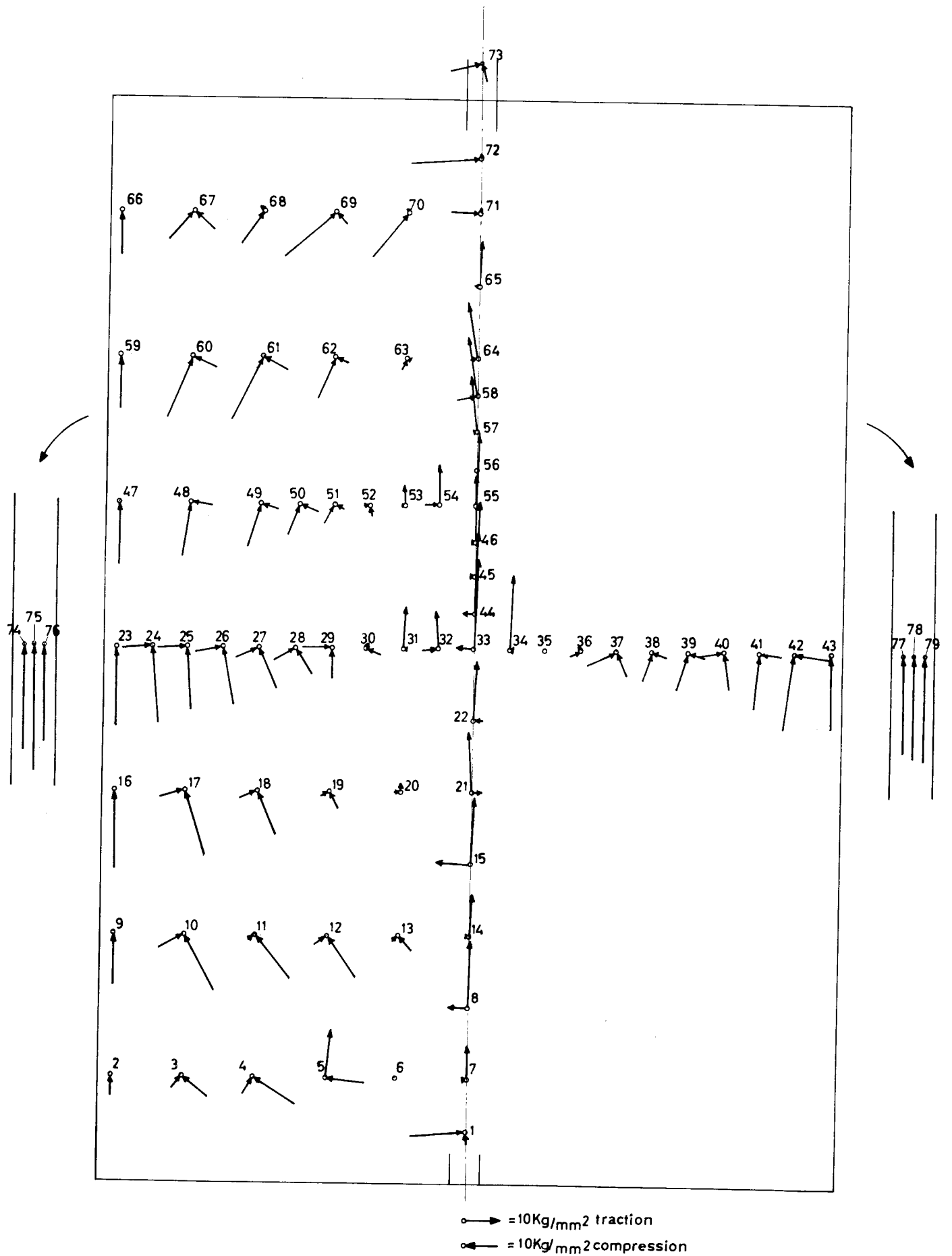


Fig. 7-11 — Mesure des contraintes en surface (face avant)
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

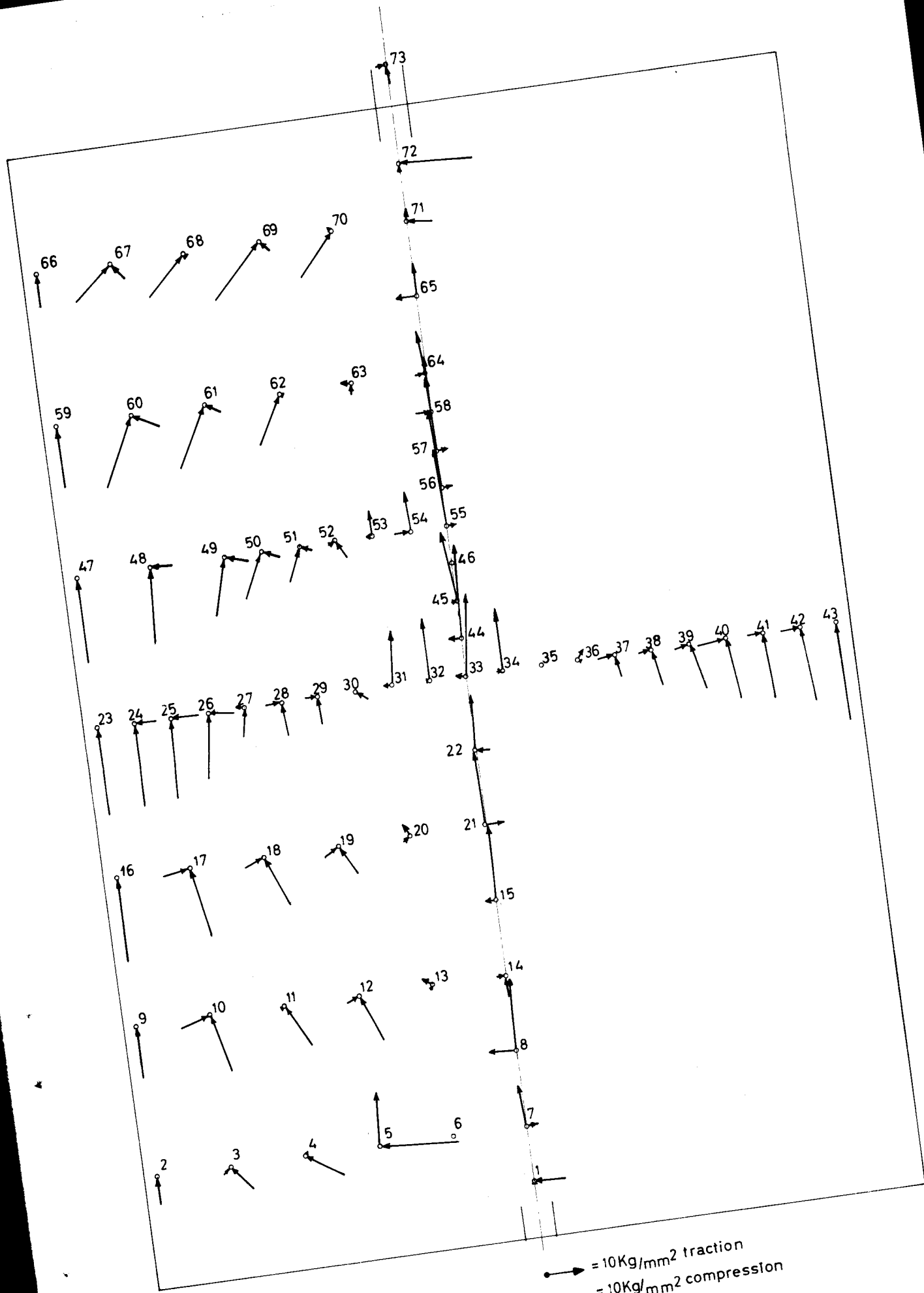


Fig. 7-12 — Mesure des contraintes en surface (face arrière)
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

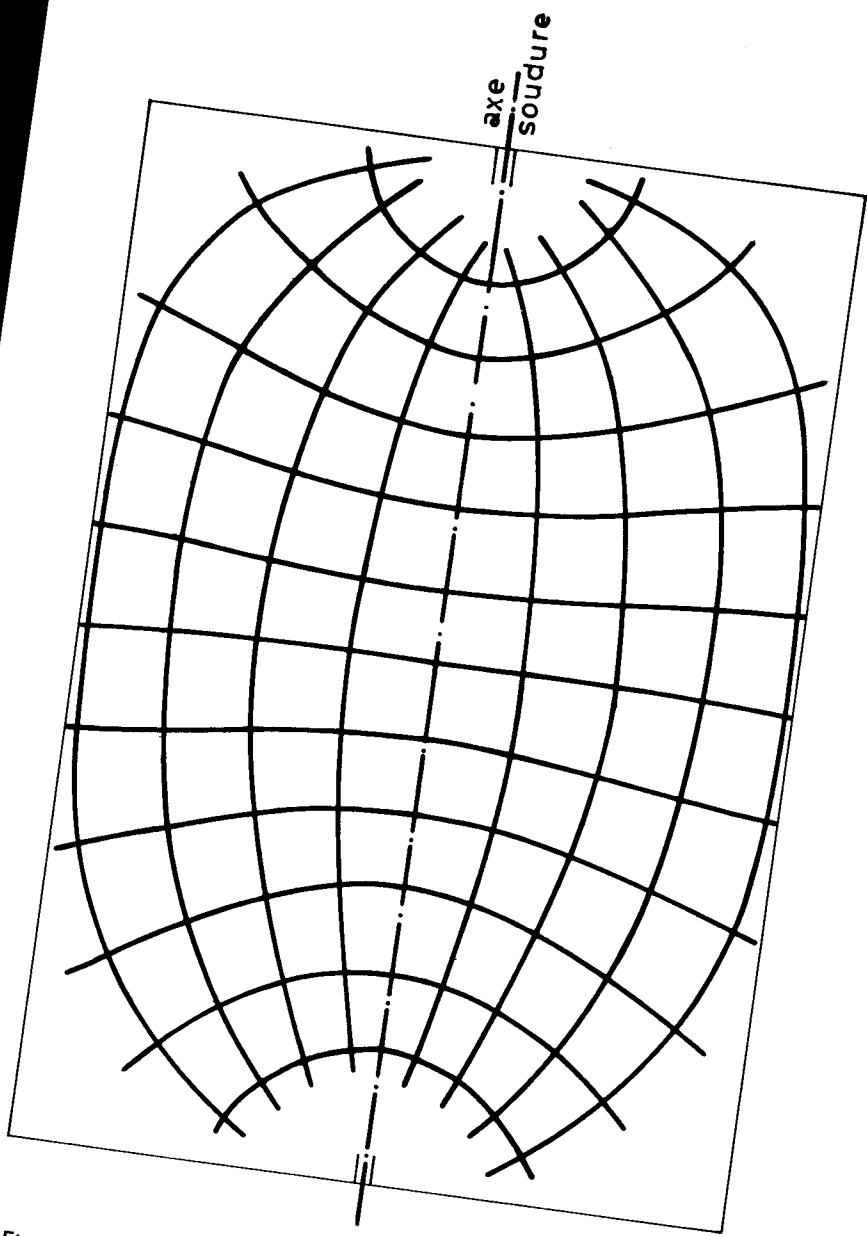


Fig. 7-13 — Lignes isostatiques des contraintes résiduelles
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

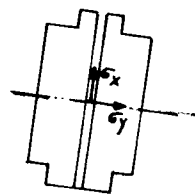
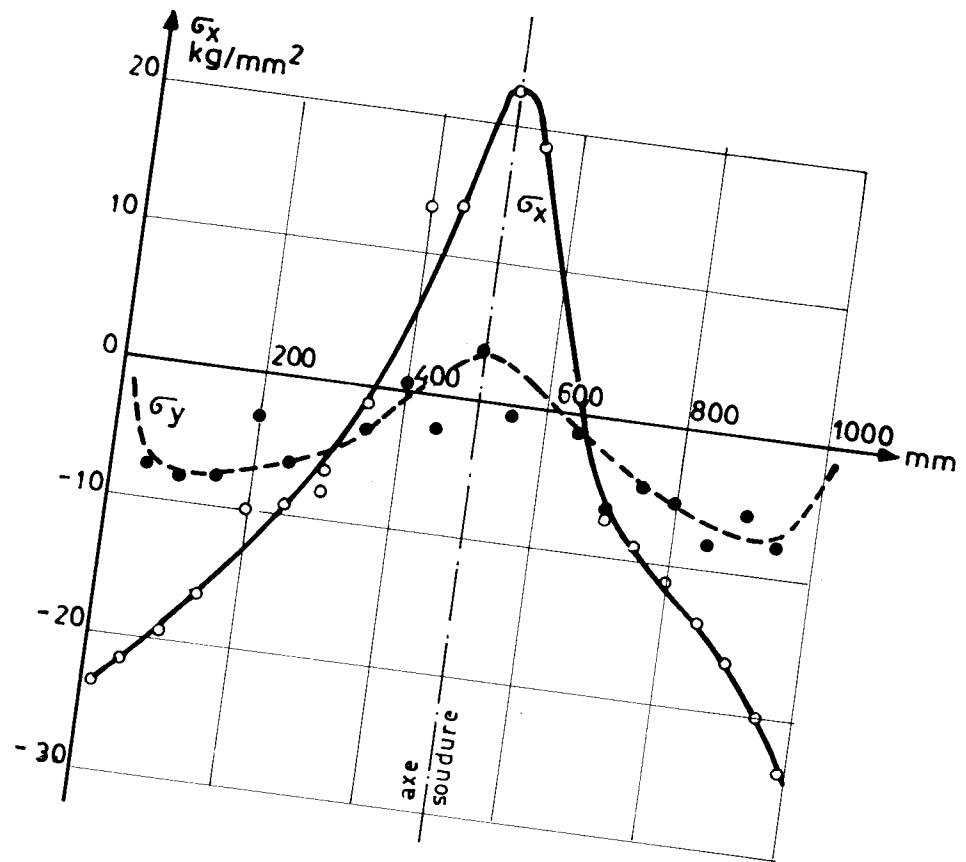


Fig. 7-14 — Contraintes longitudinales et transversales
(axe transversal)
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

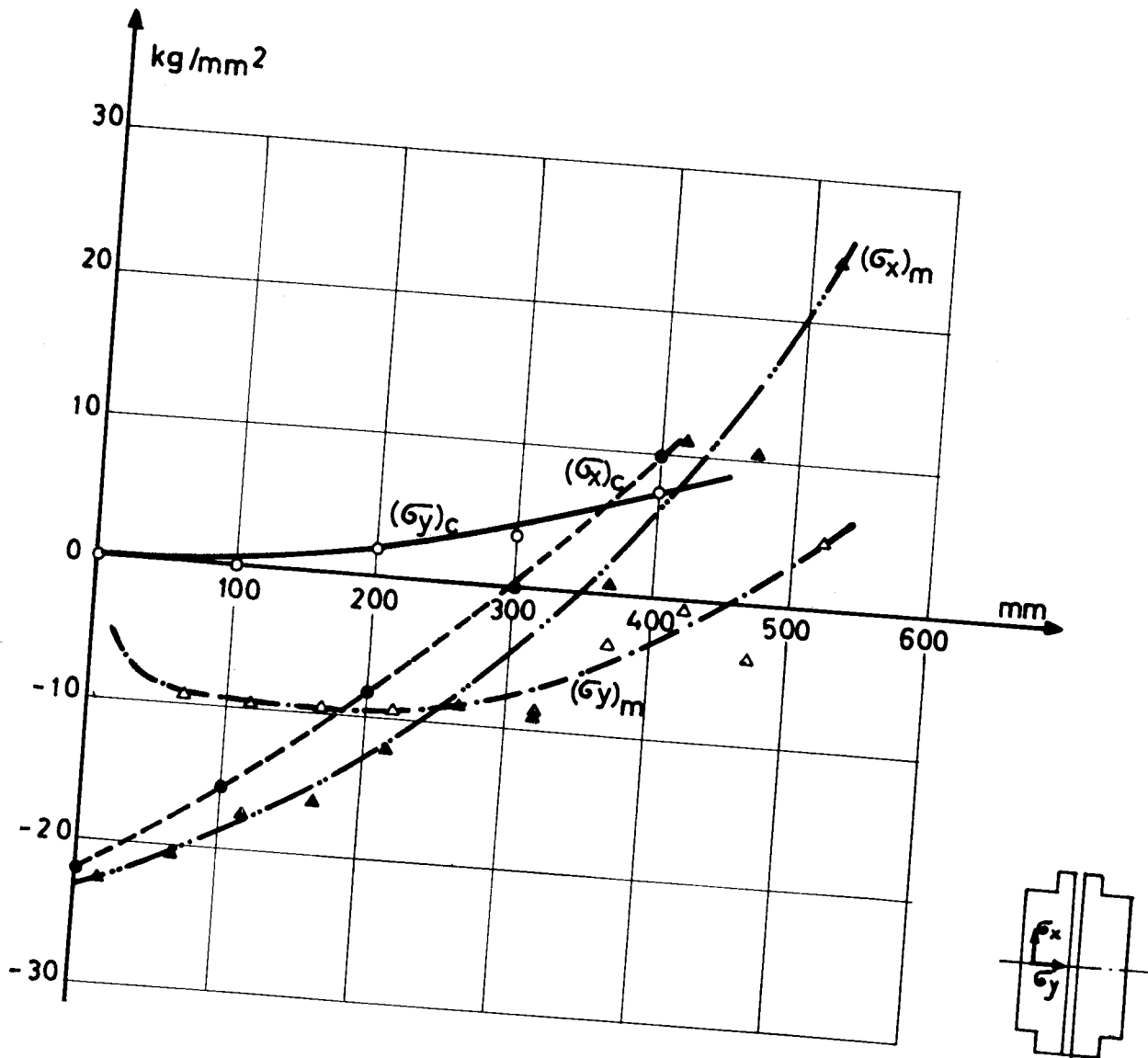


Fig. 7-15 — Contraintes mesurées (σ_{xm} et σ_{ym}) et calculées (σ_{xc} et σ_{yc})
(axe transversal)
Eprouvette n° 9, épais. 60 mm

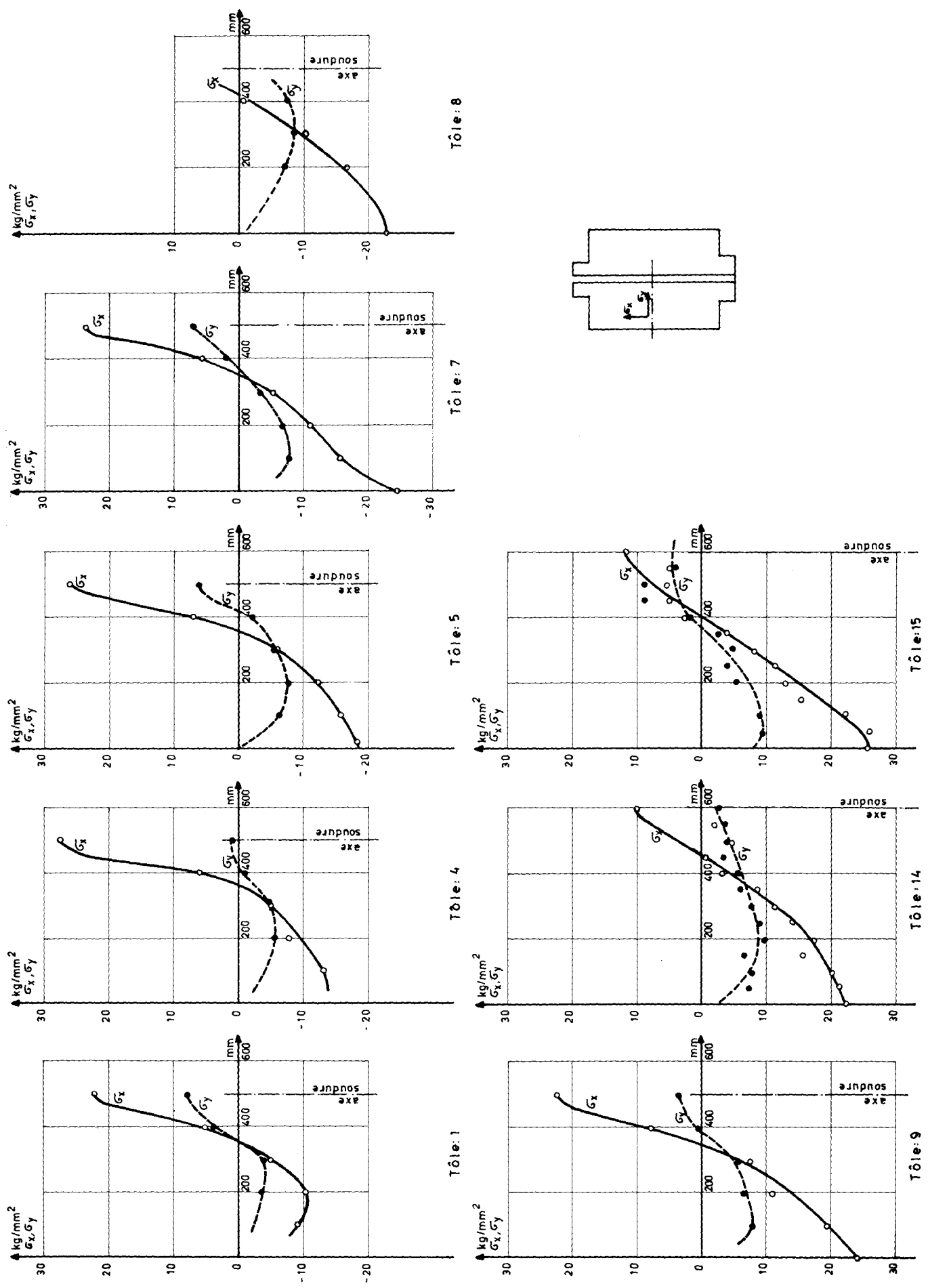


Fig. 7-16 — Contraintes longitudinales et transversales
(axe transversal)
Eprouvettes nos 1 à 15

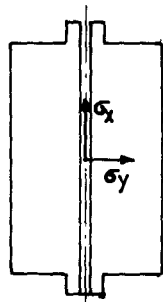
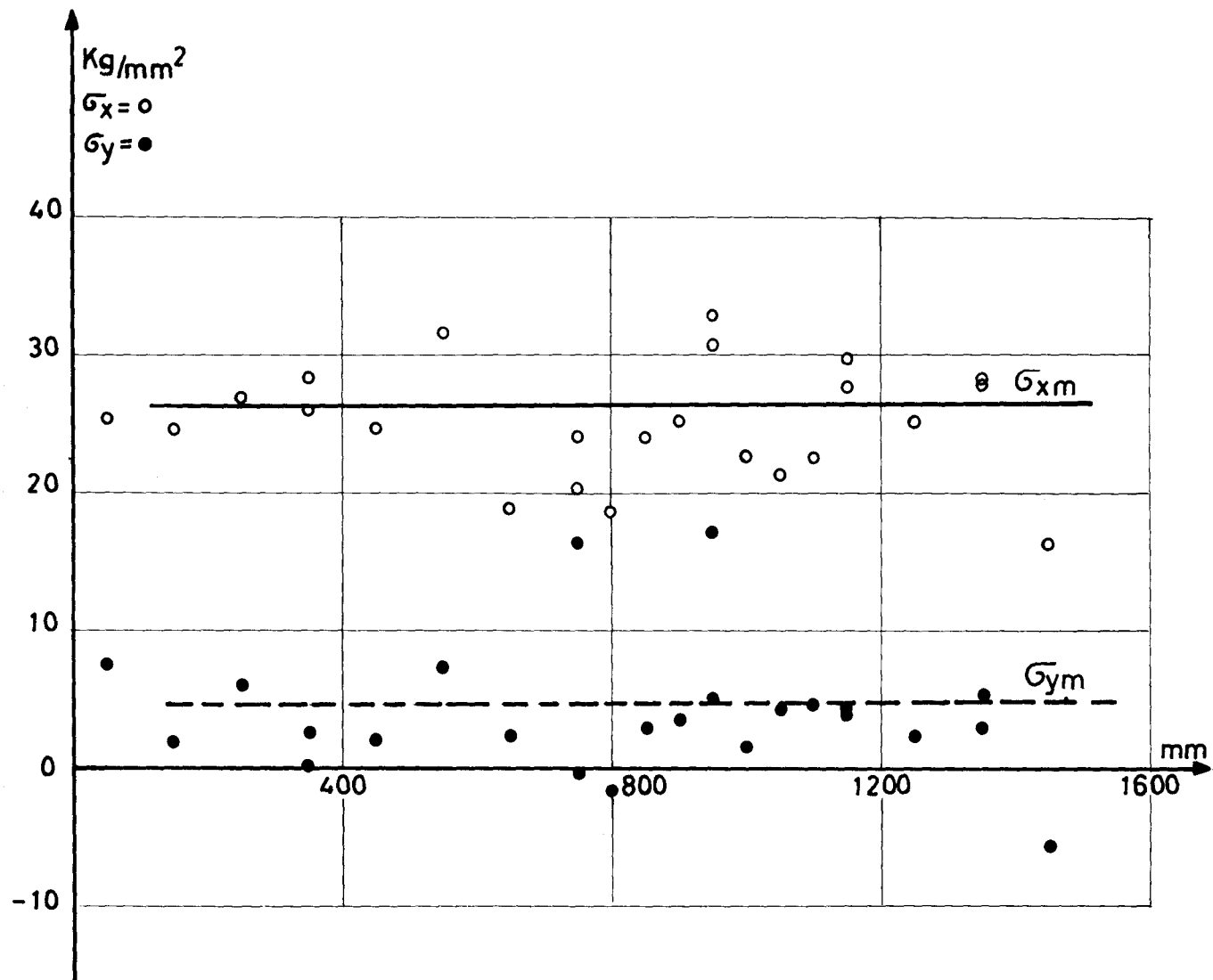


Fig. 7-17 — Contraintes longitudinales et transversales
 dans le cordon de soudure
 Eprouvette n° 1, épais. 15 mm

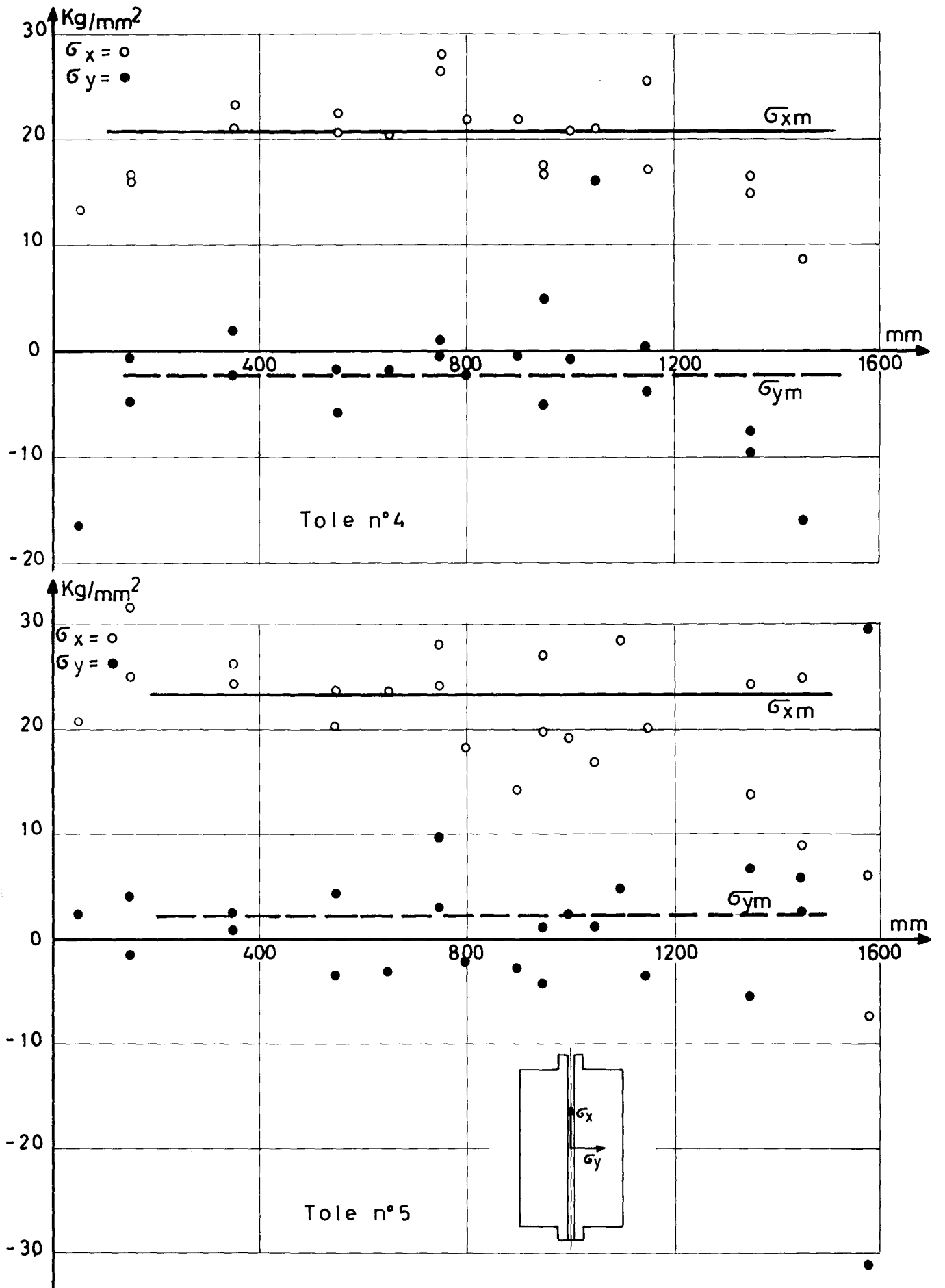


Fig. 7-18 — Contraintes longitudinales et transversales
dans le cordon de soudure
Eprouvettes n°s 4 et 5, épais. 30 mm

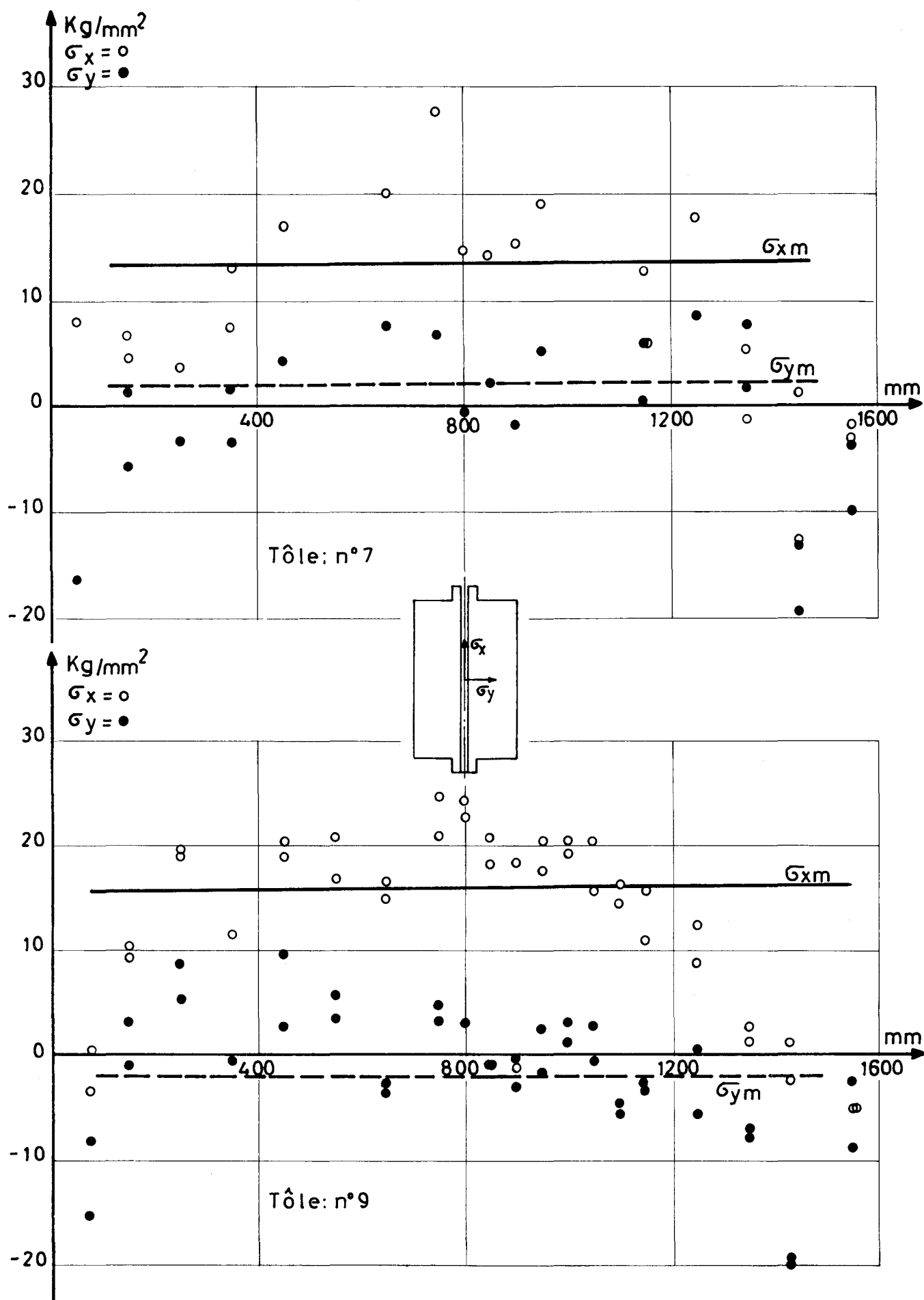
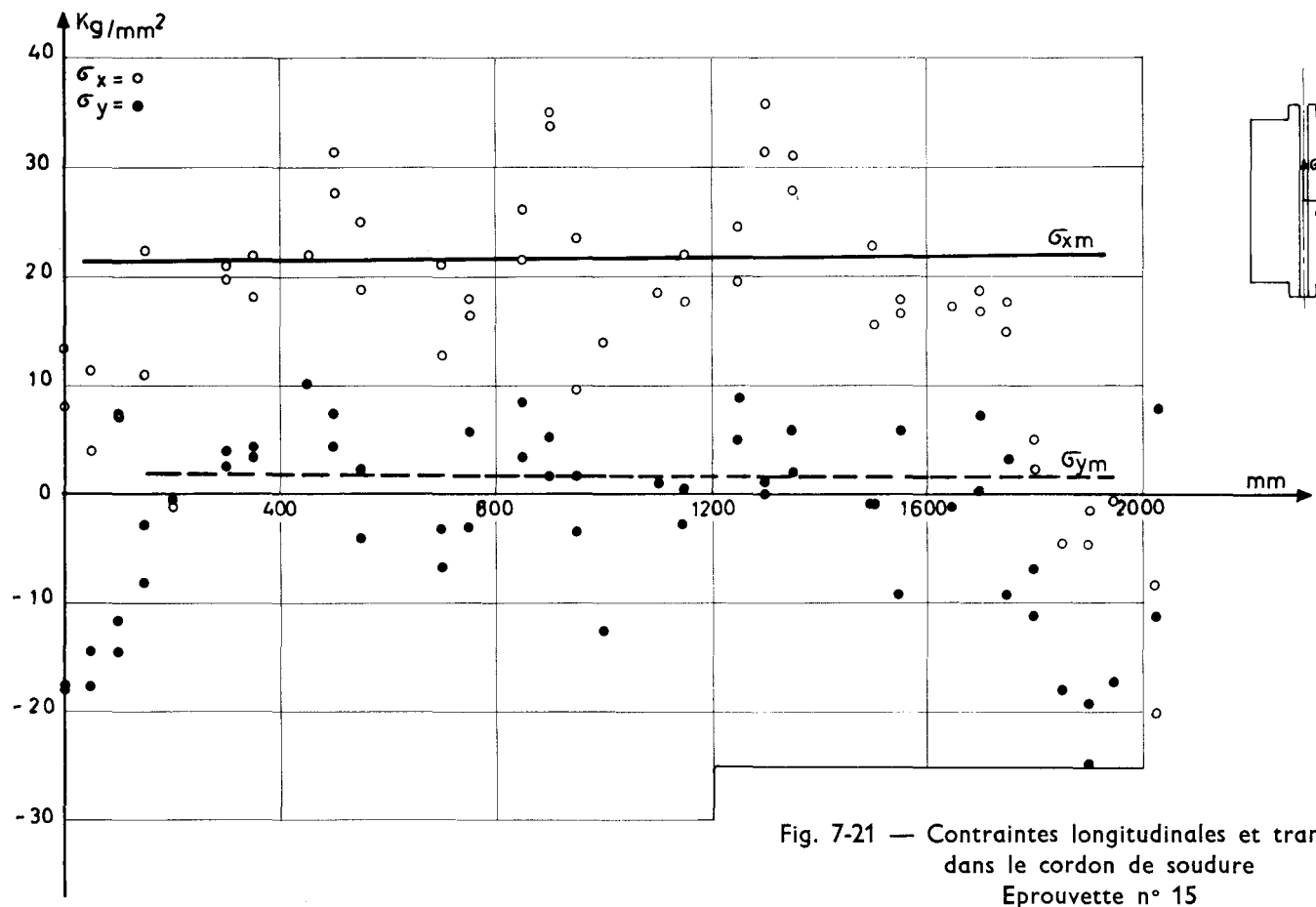
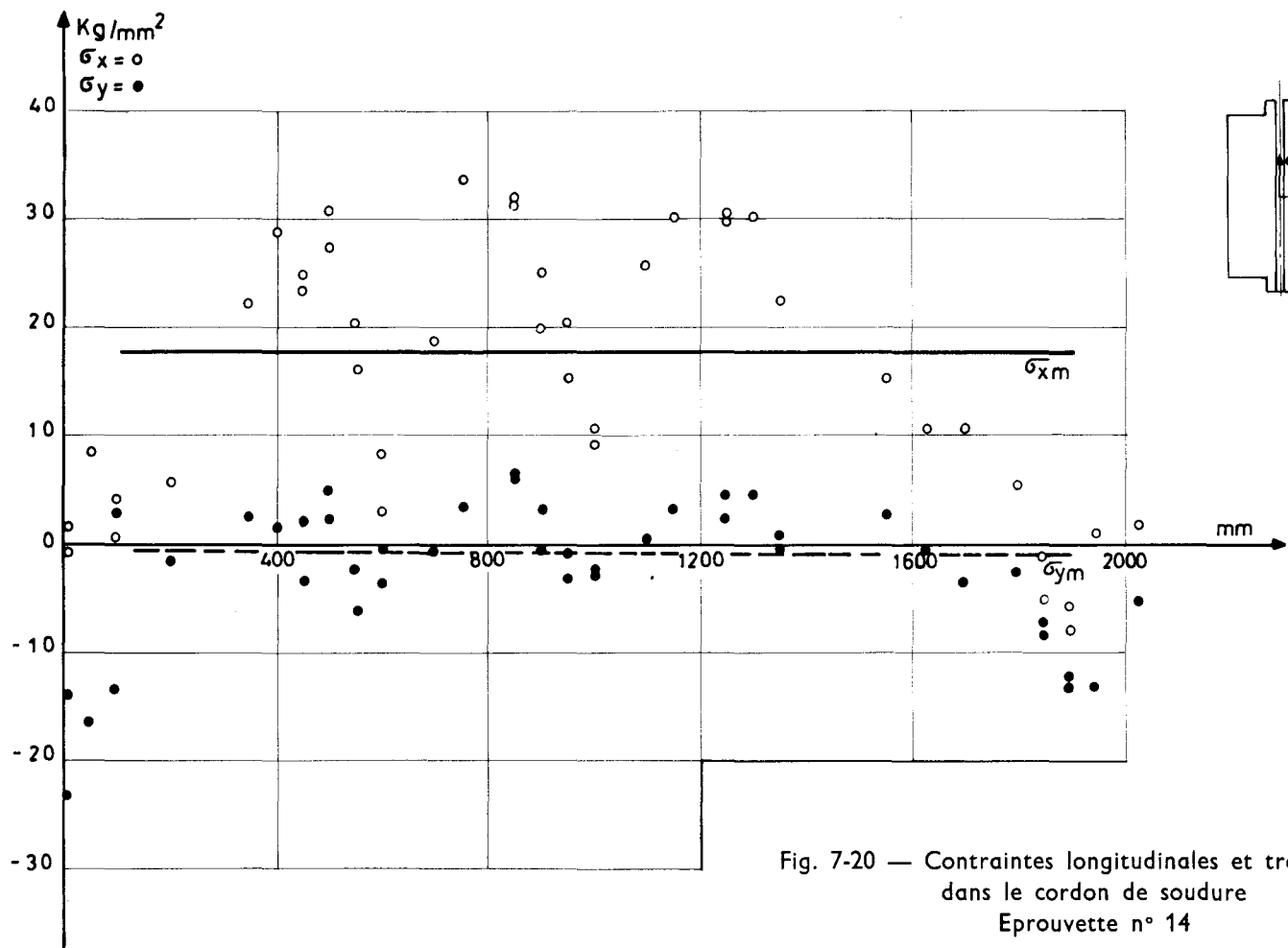


Fig. 7-19 — Contraintes longitudinales et transversales
 dans le cordon de soudure
 Epruvettes n°s 7 et 9, épais. 60 mm



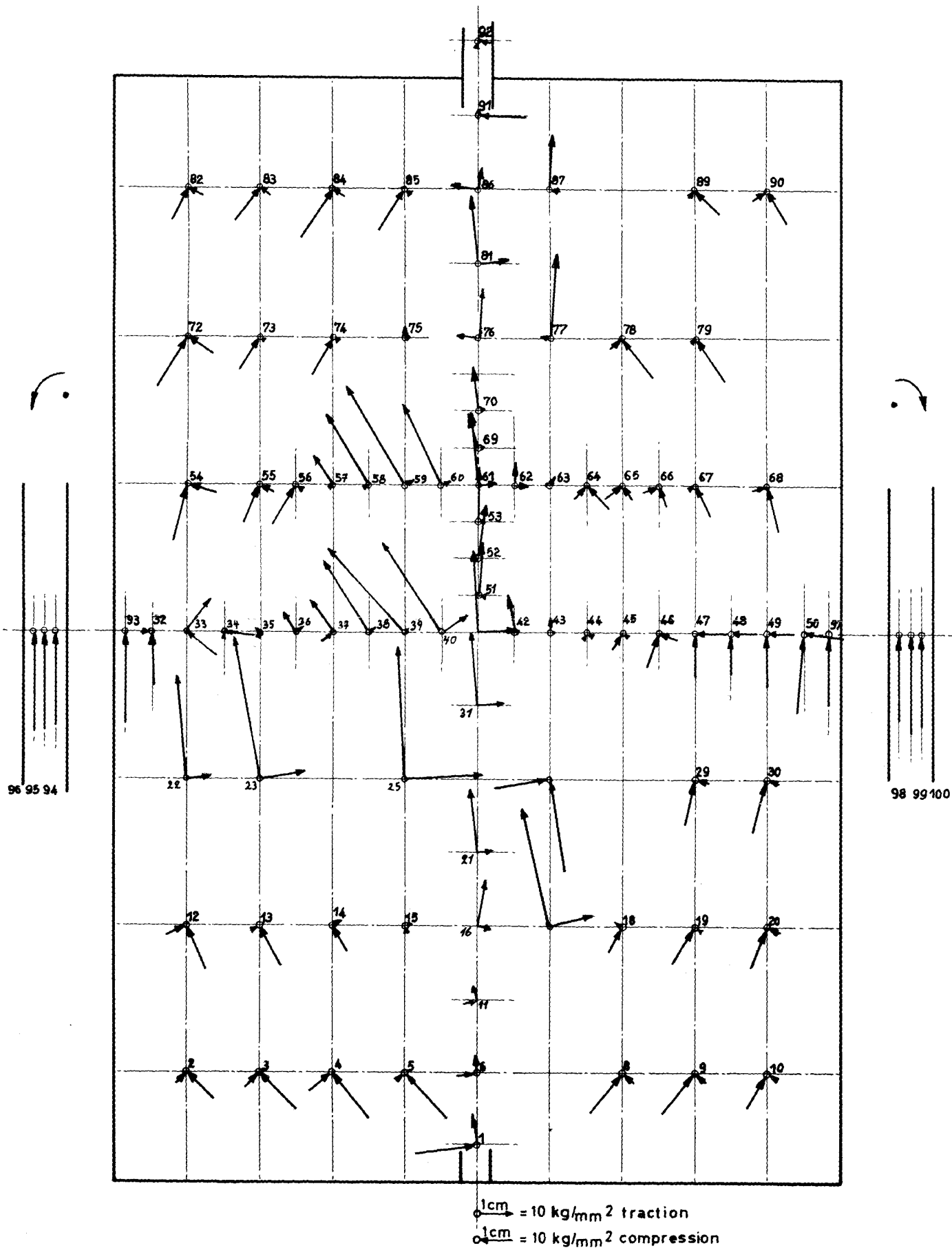


Fig. 7-22 — Mesure des contraintes en surface
 (face avant)
 Epruvette n° 7, épais. 60 mm

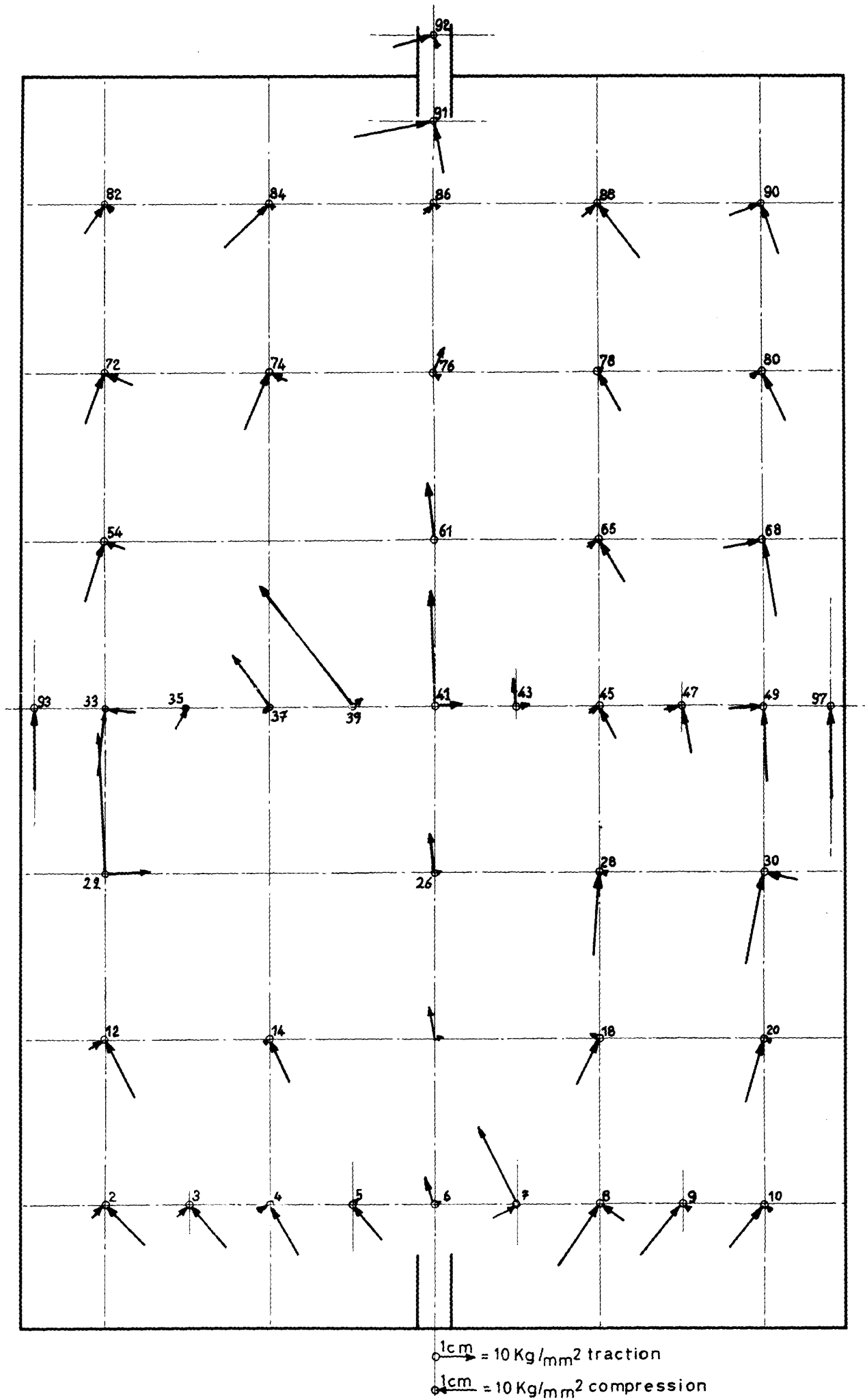


Fig. 7-23 — Mesure des contraintes en surface
 (face arrière)
 Eprouvette n° 7, épais. 60 mm

62 / 112

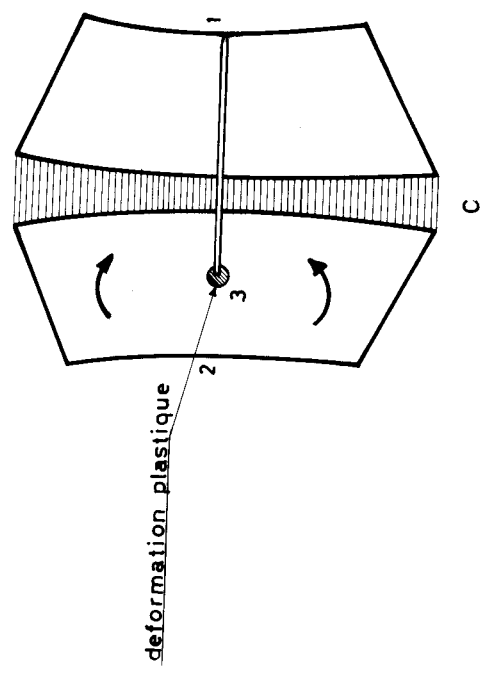
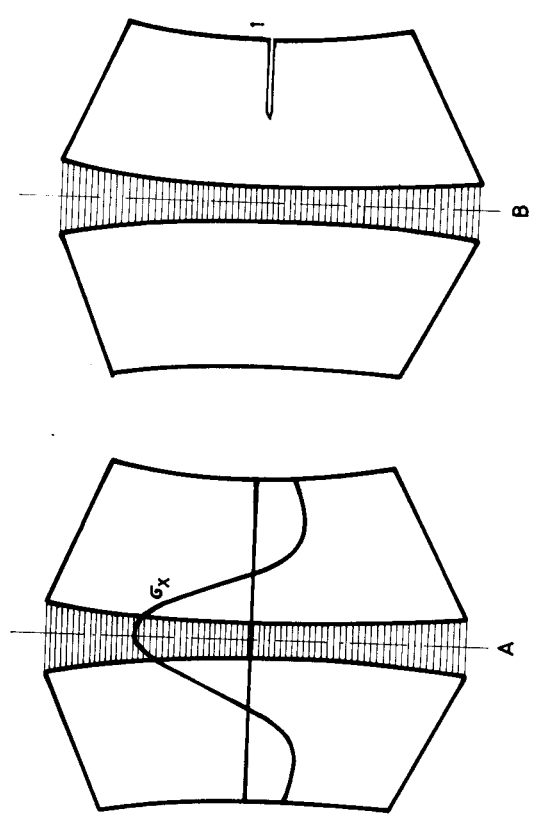
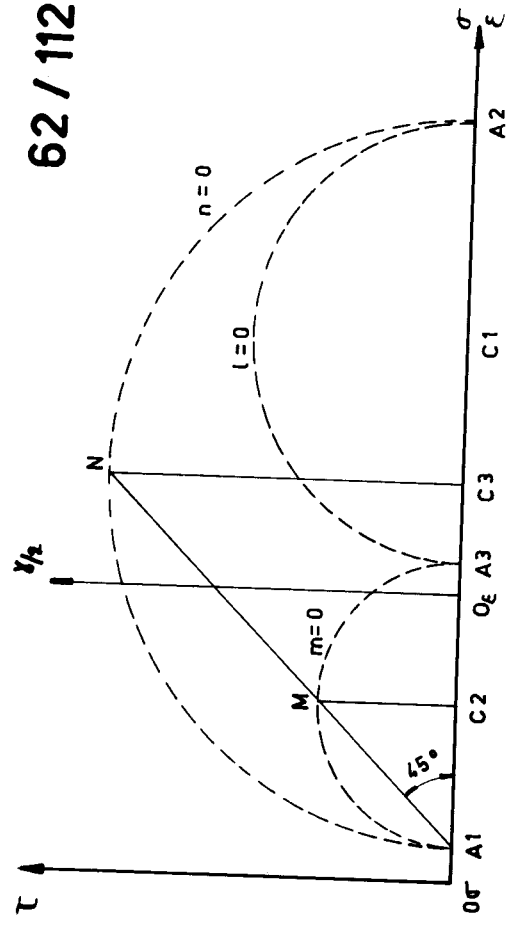


Fig. 7-24

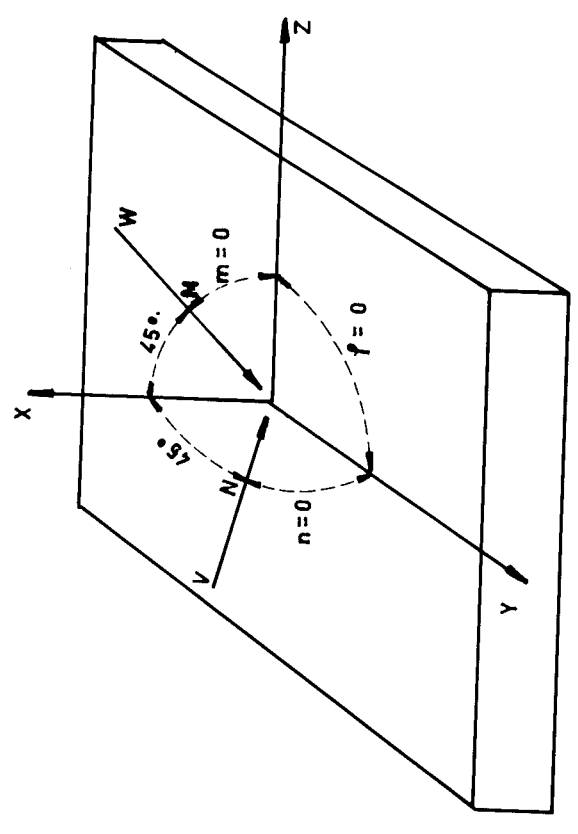


Fig. 8-1

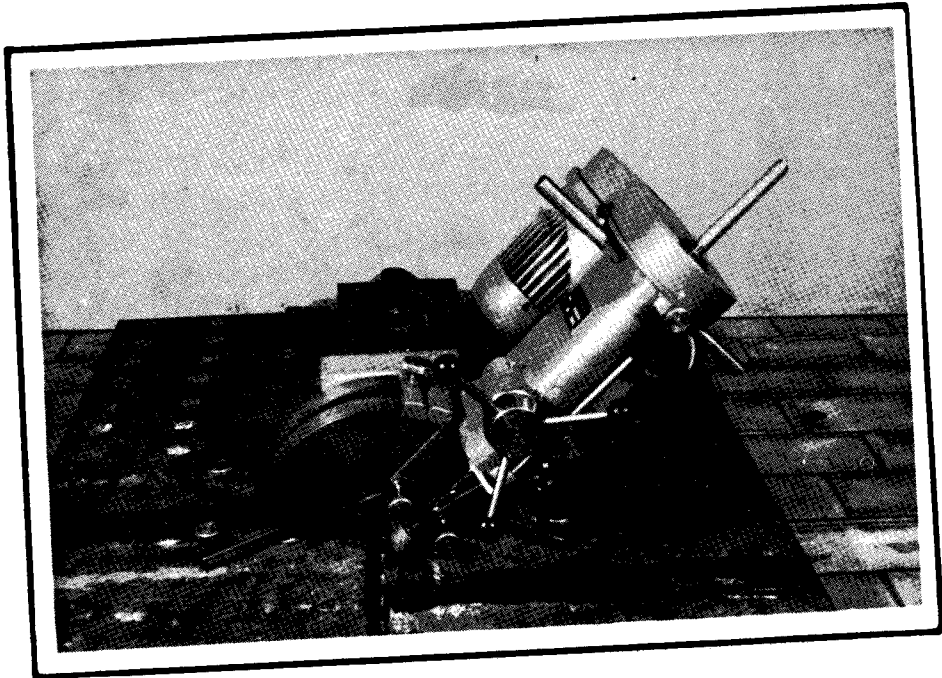


Fig. 8-4

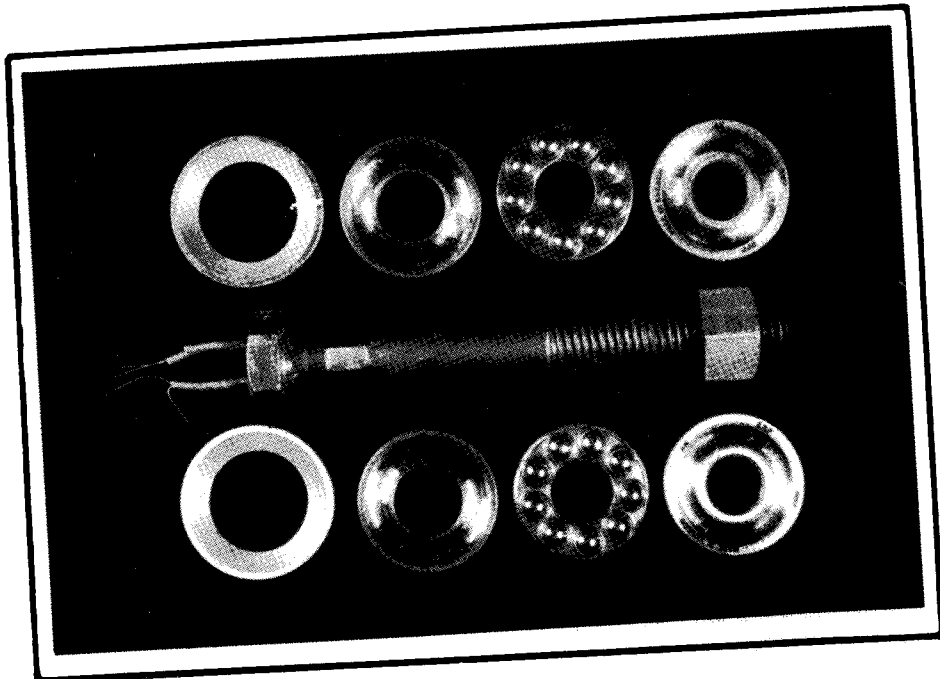
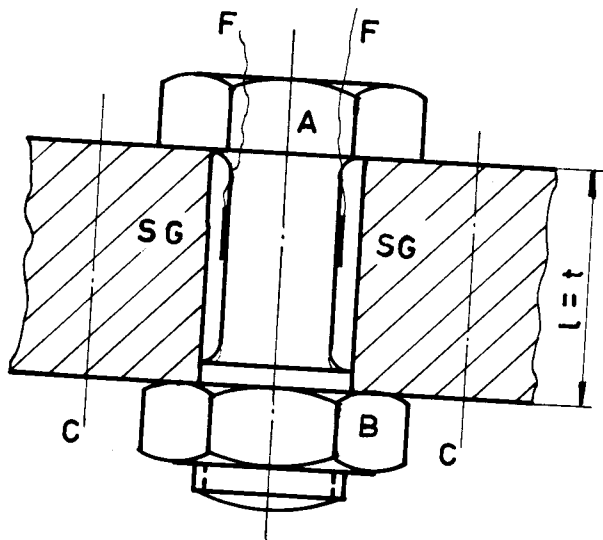


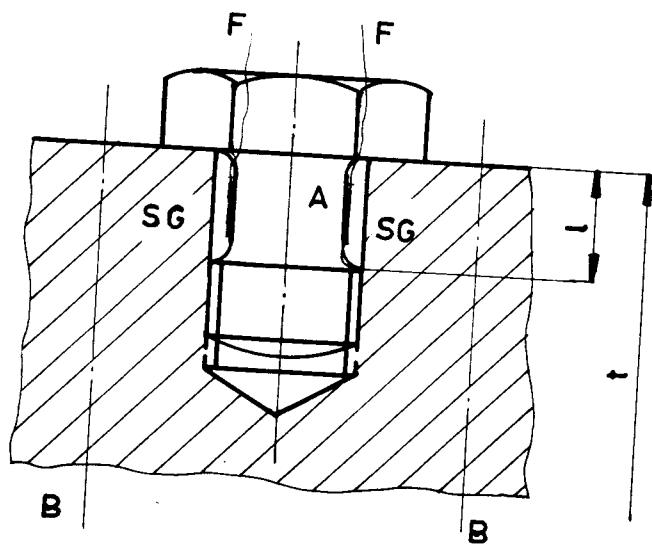
Fig. 8-6

62/114



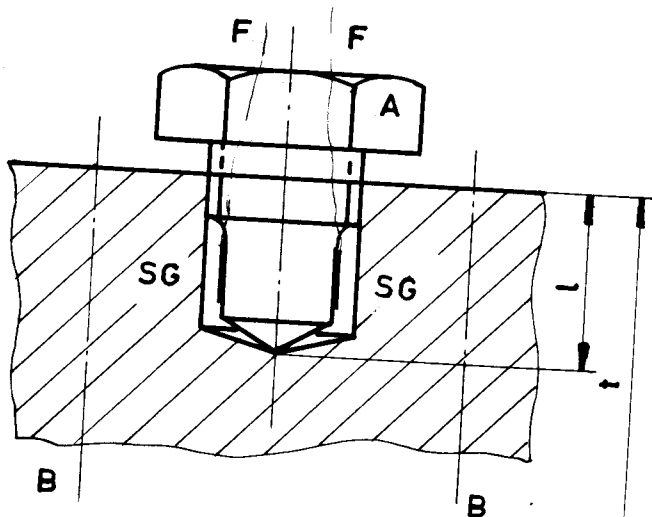
- A = boulon
- B = écrou
- C = coupe de relaxation
- l = base de mesure
- t = épaisseur
- SG = strain gage
- F = fils de strain gage

Fig. 8-5



- A = boulon
- l = base de mesure
- B = coupe de relaxation
- SG = strain gage
- F = fils de strain gage

Fig. 8-7a



- A = boulon de serrage
- B = coupe de relaxation
- l = base de mesure
- t = épaisseur
- SG = strain gage

Fig. 8-7b

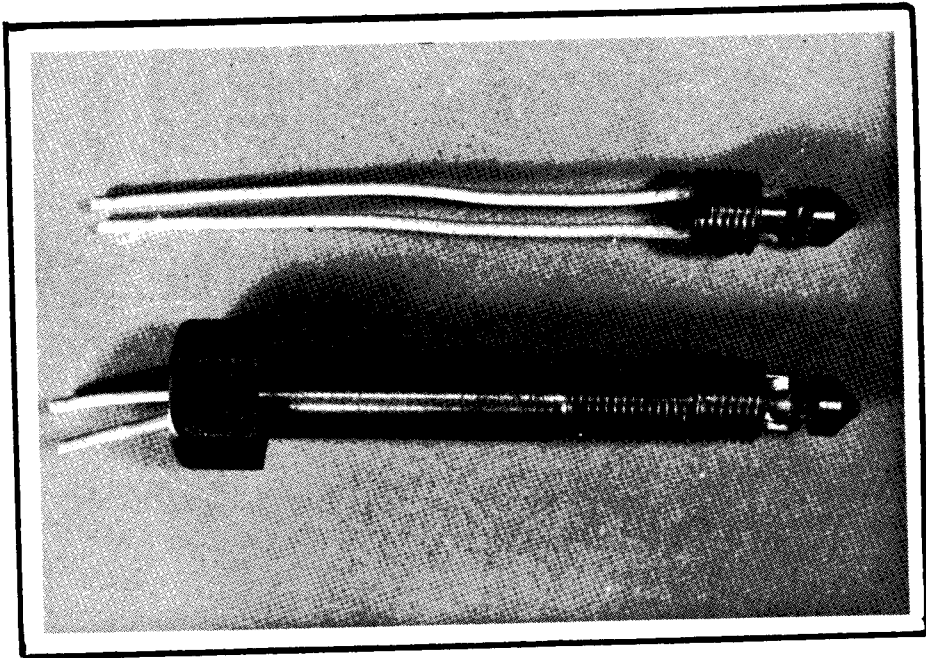


Fig. 8-8

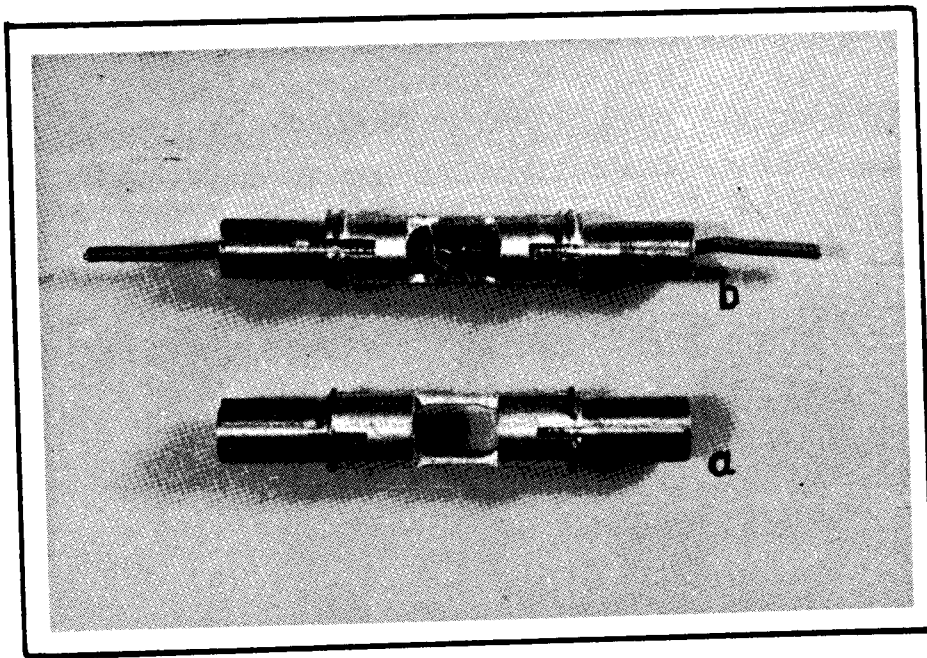


Fig. 8-9

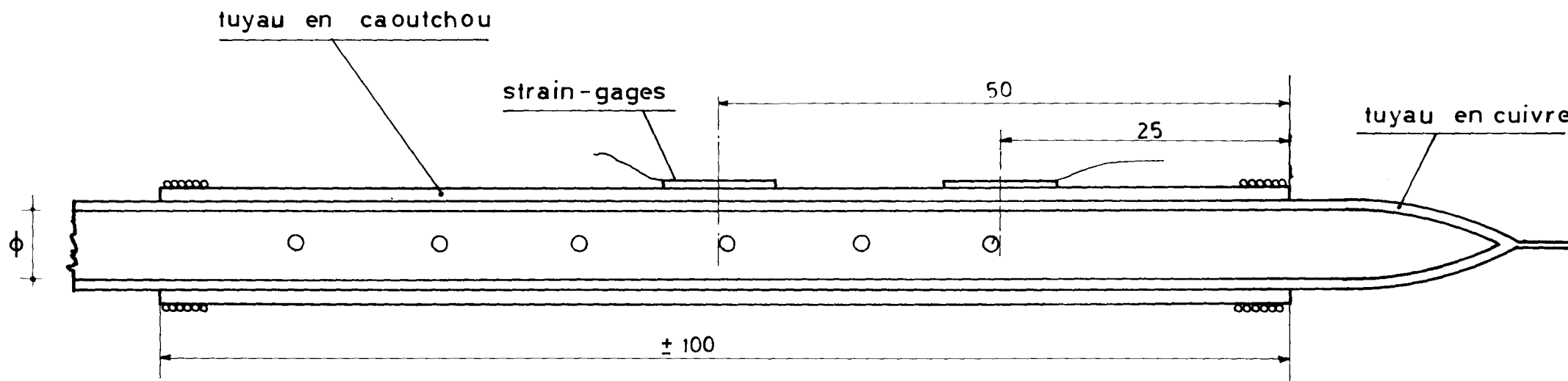


Fig. 8-10

COUPE : A-B

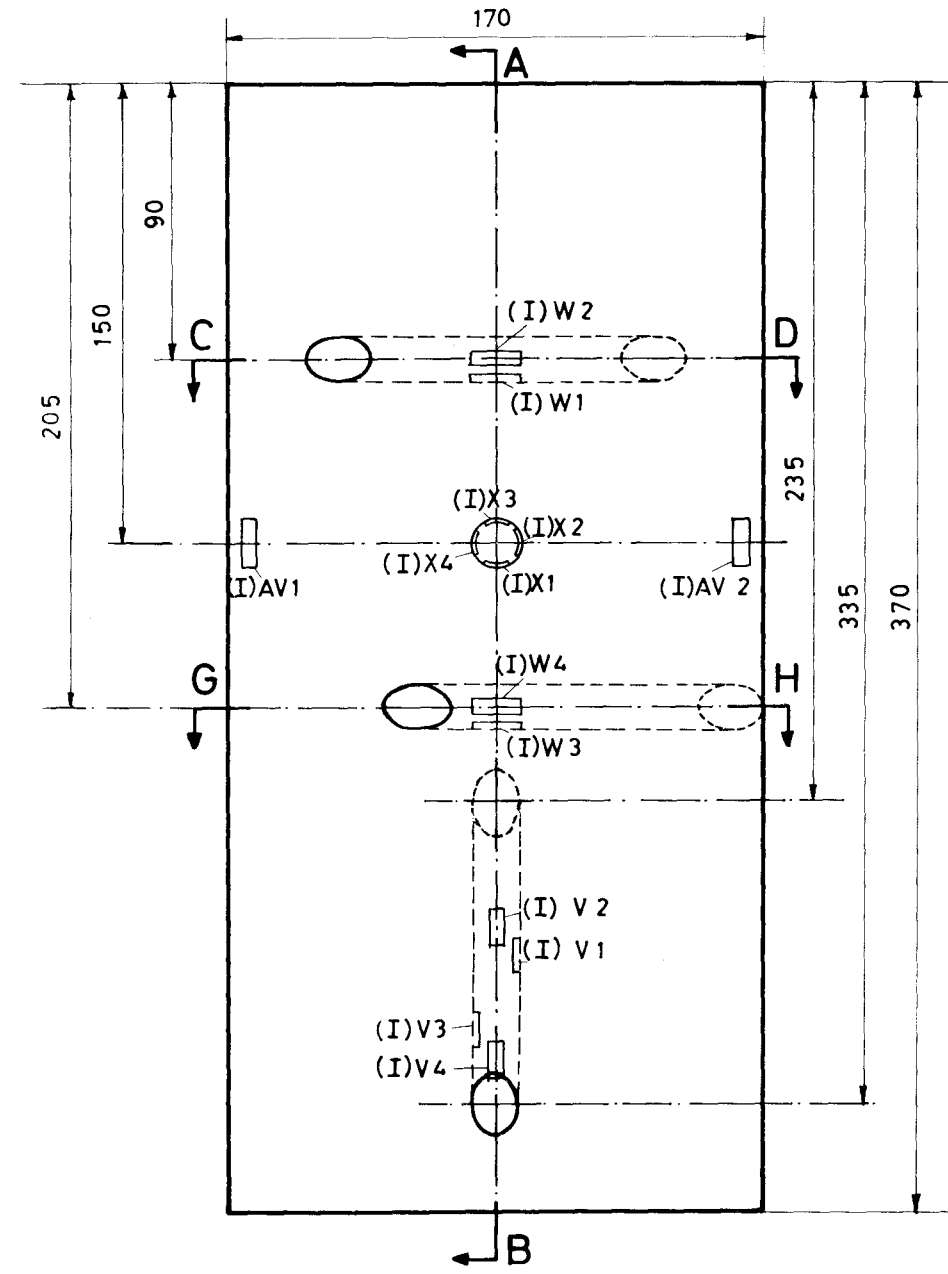
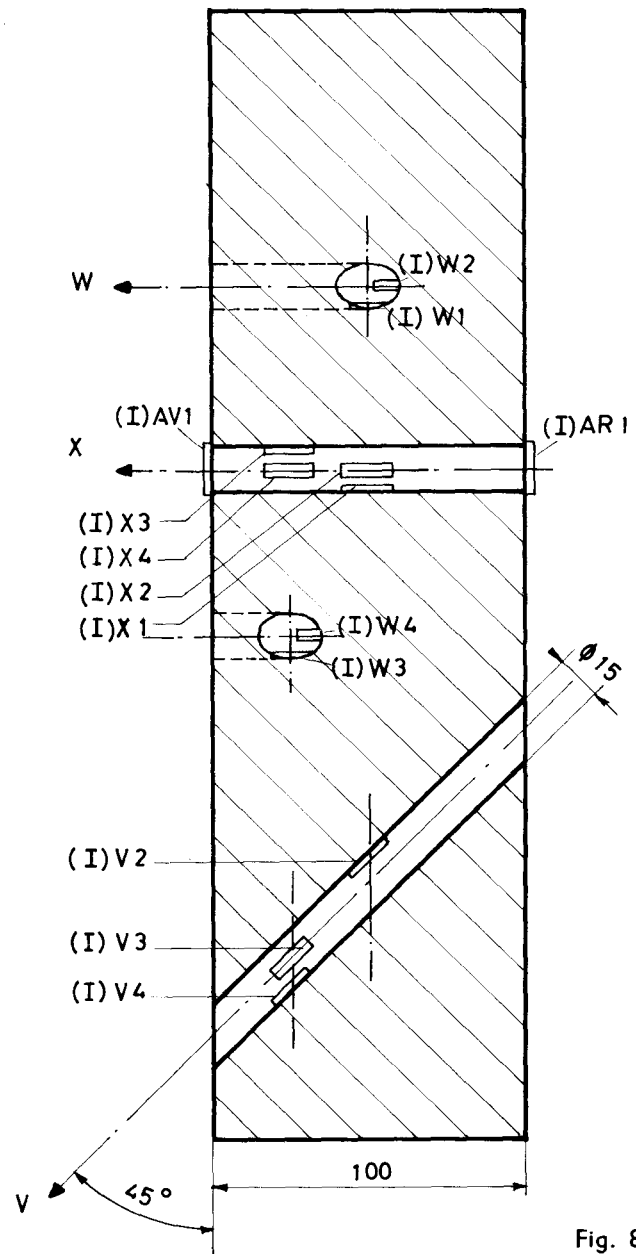


Fig. 8-11 — Bloc d'étalonnage
Dimensions et placement des «strain gages»
Epruvette n° 15

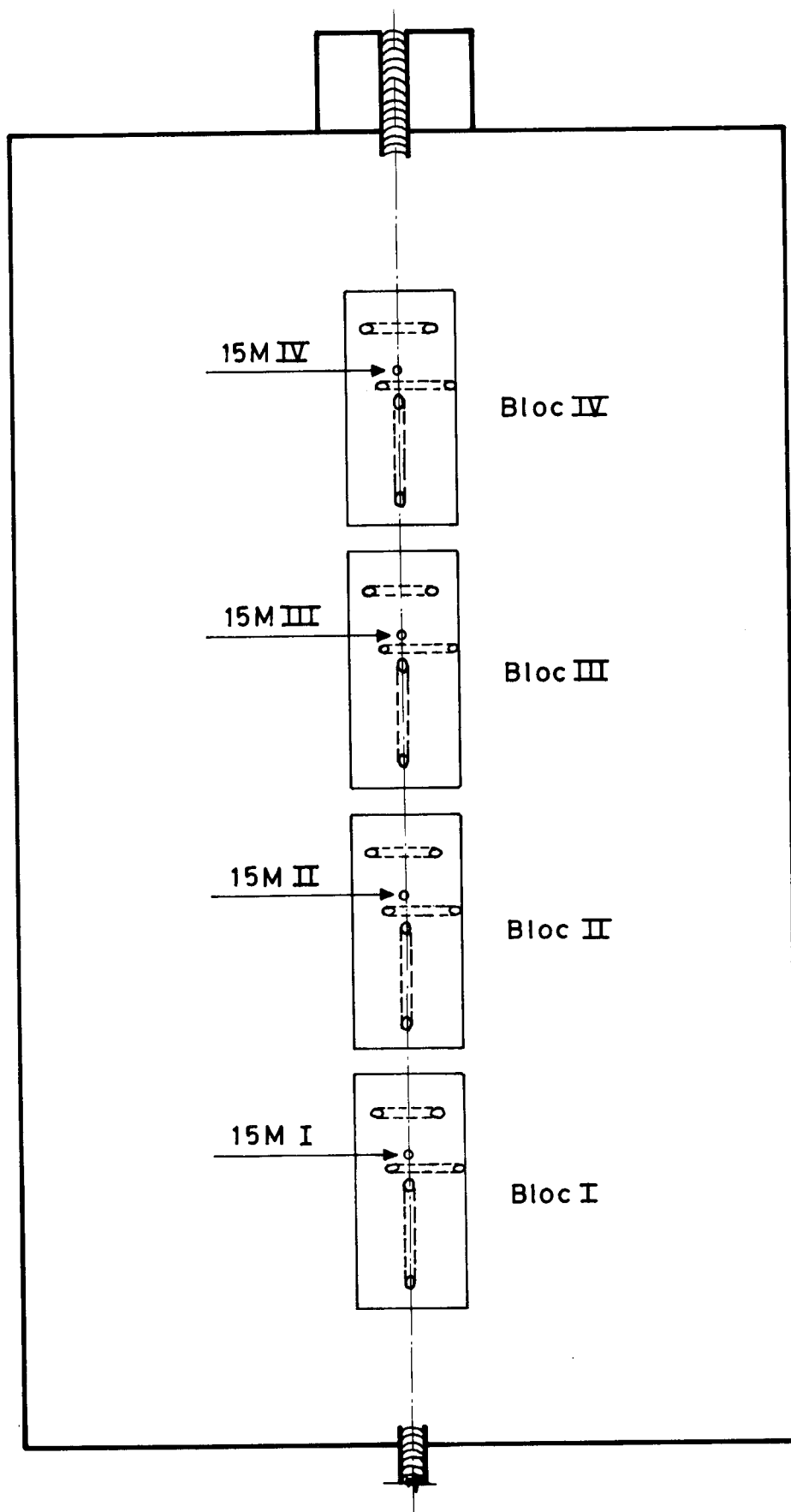


Fig. 8-12 — Mesure des contraintes en profondeur (face avant)
 (Placement des bases)
 Epruvette n° 15, épais. 100 mm

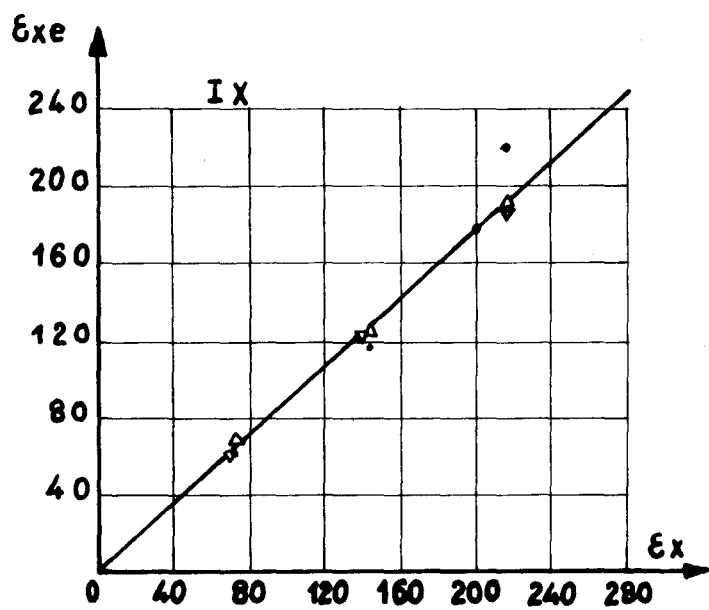
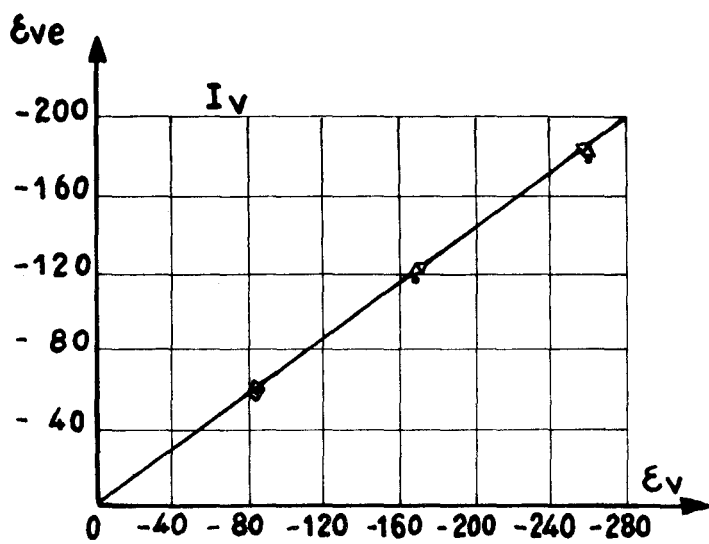
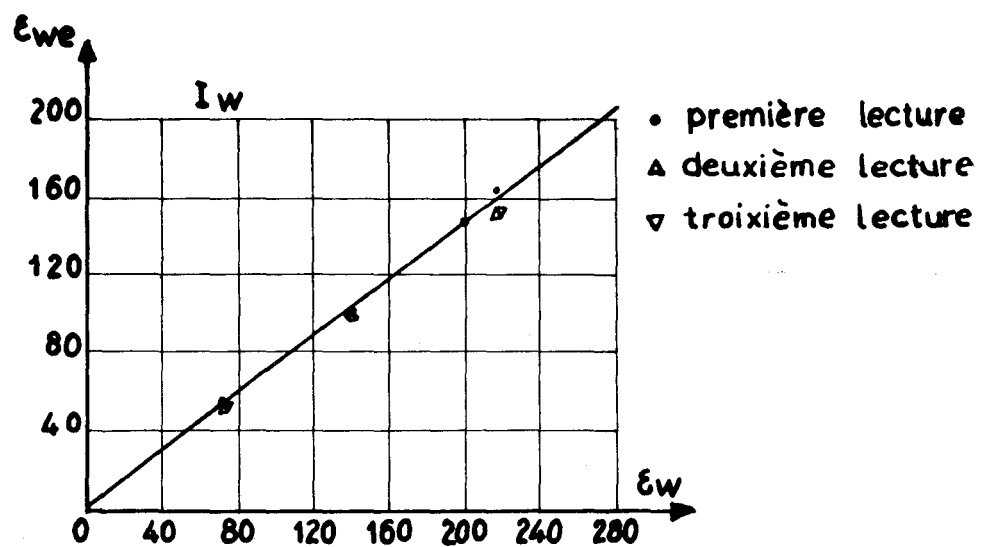
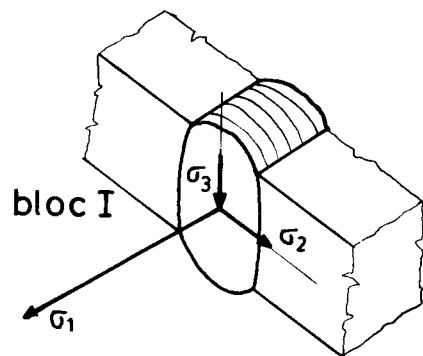
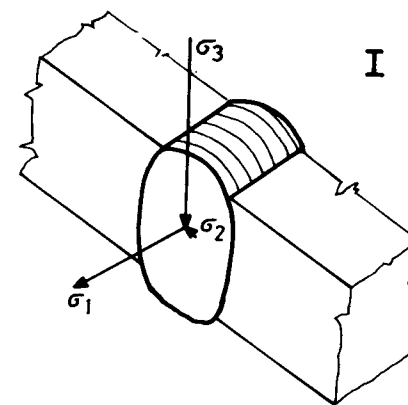
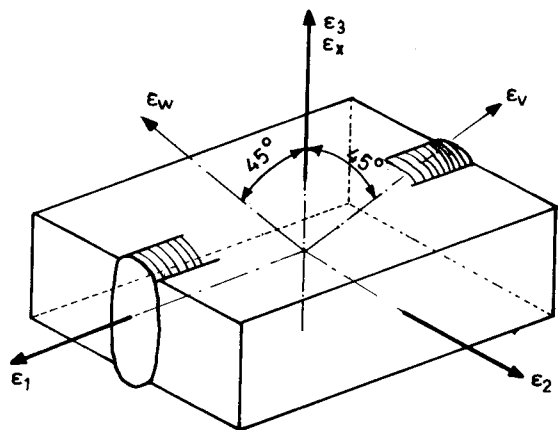
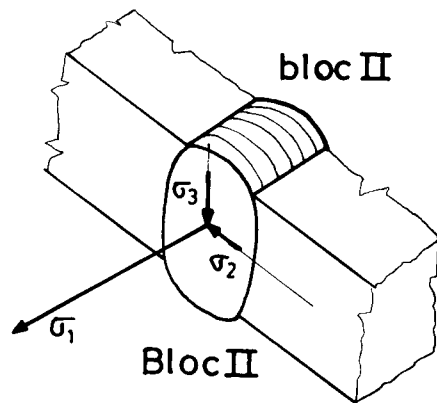


Fig. 8-13 — Etalonnage du bloc I en compression
Epruvette n° 8



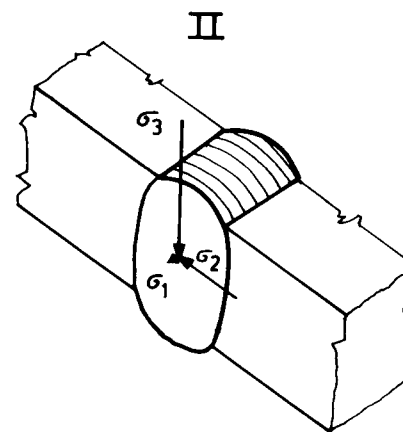
Bloc I

$\sigma_1 = +21,2 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_2 = +4,3 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_3 = -3,0 \text{ Kg/mm}^2$



Bloc II

$\sigma_1 = +19,3 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_2 = -1,6 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_3 = -5,4 \text{ Kg/mm}^2$

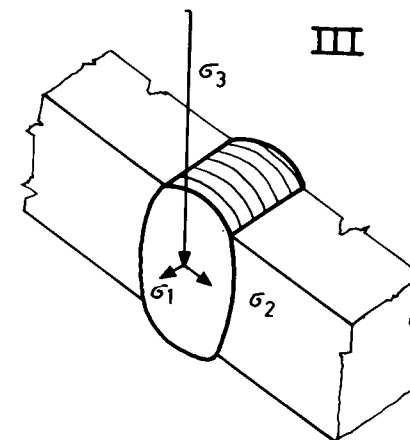


Bloc I

$\sigma_1 = 46 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_2 = -0,5 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_3 = -7,0 \text{ Kg/mm}^2$

Bloc II

$\sigma_1 = 0,4 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_2 = -2,8 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_3 = -5,2 \text{ Kg/mm}^2$



Bloc III

$\sigma_1 = 1,0 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_2 = 1,1 \text{ Kg/mm}^2$
 $\sigma_3 = -9,4 \text{ Kg/mm}^2$

Fig. 8-14 — Contraintes triaxiales à mi-épaisseur de la soudure
 Epruvette n° 14, épais. 60 mm

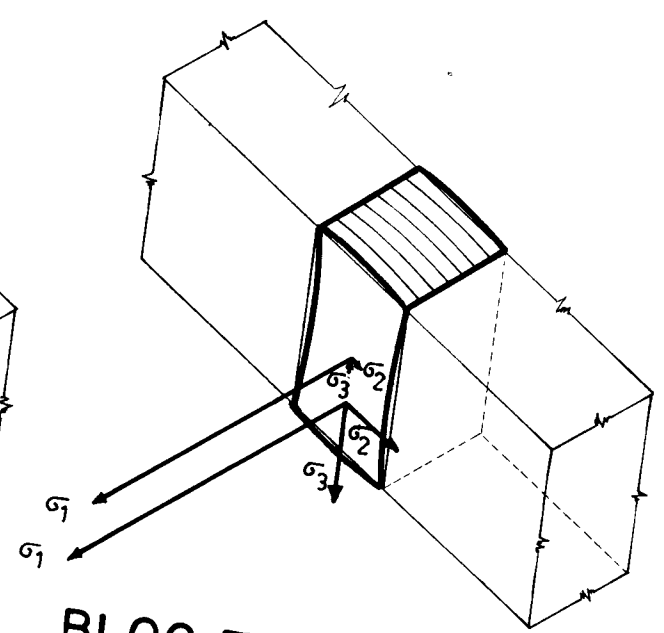
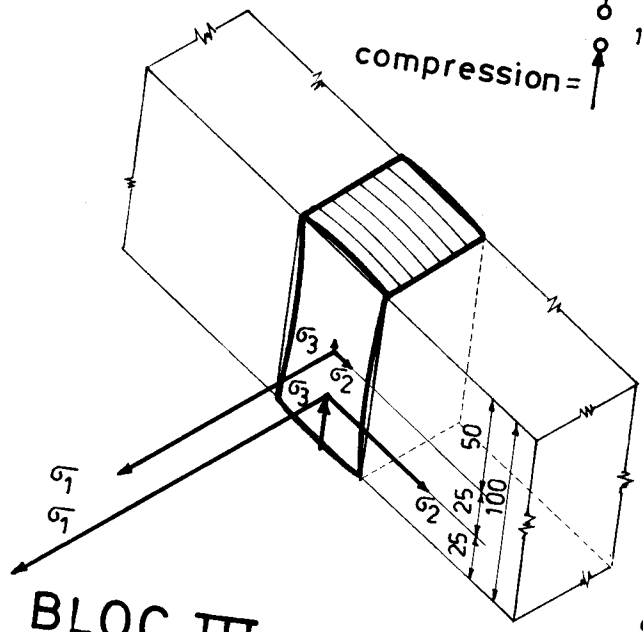
Fig. 8-15 — Contraintes triaxiales à mi-épaisseur de la soudure
 Epruvette n° 14, épais. 100 mm

BLOC I

traction = \uparrow
 compression = \downarrow

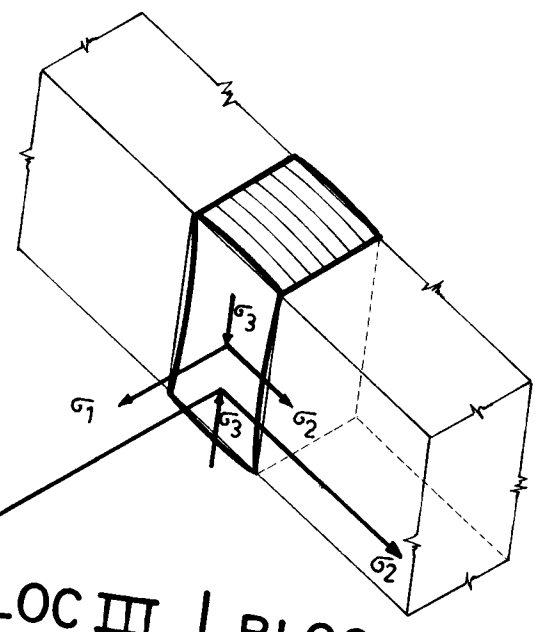
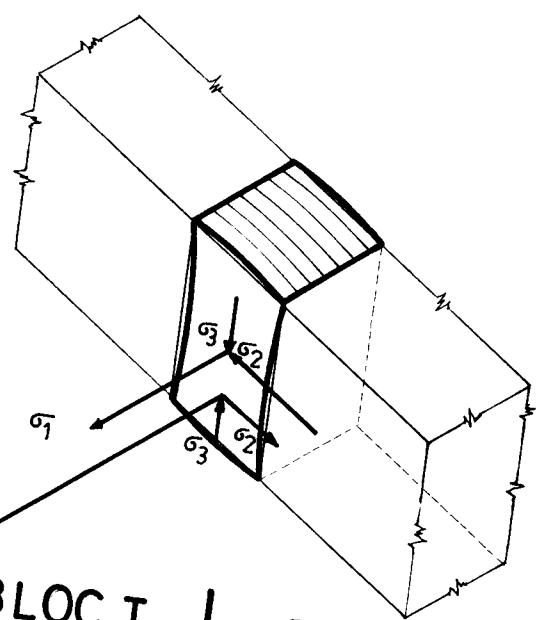
BLOC II

1mm = 2 kg/mm²



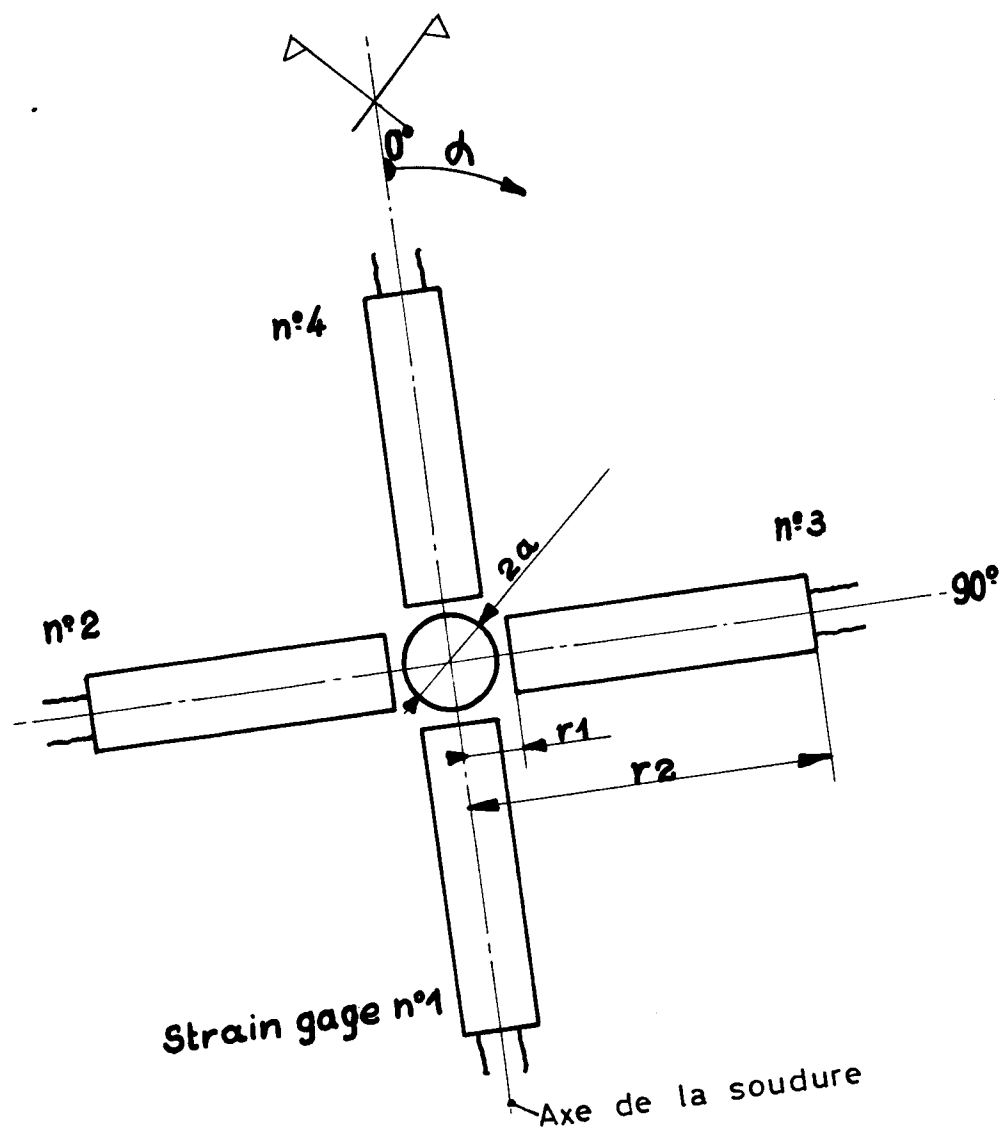
BLOC III

BLOC IV



	BLOC I		BLOC II		BLOC III		BLOC IV	
	à mi- épaisseur kg/mm ²	à un quart épaisseur kg/mm ²	à mi- épaisseur kg/mm ²	à un quart épaisseur kg/mm ²	à mi- épaisseur kg/mm ²	à un quart épaisseur kg/mm ²	à mi- épaisseur kg/mm ²	à un quart épaisseur kg/mm ²
σ_1	16,0	23,9	17,1	28,4	9,5	20,2	8,3	22,7
σ_2	0,8	12,7	2,7	4,7	-7,8	5,0	5,6	16,4
σ_3	0,3	3,6	1,1	6,7	-3,6	2,5	-3,4	-5,3

Fig. 8-16 — Contraintes triaxiales dans la soudure
 Epruvette n° 15, épais. 100 mm



$2a = 6\text{mm}$
 $r1 = 4\text{mm}$
 $r2 = 24\text{mm}$

Fig. 8-17 — Méthode Mathar-Soete
 Epruvette n° 15

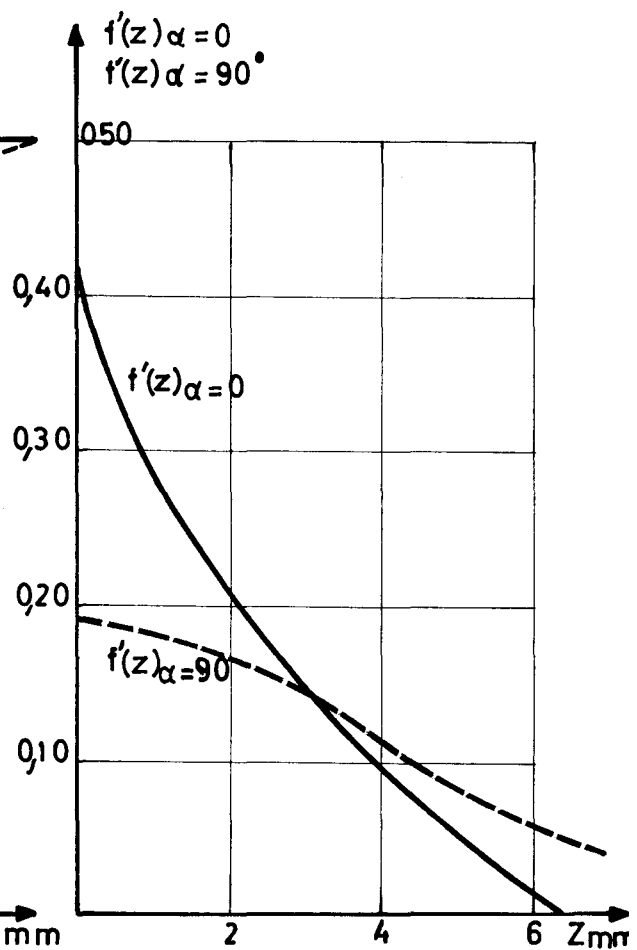
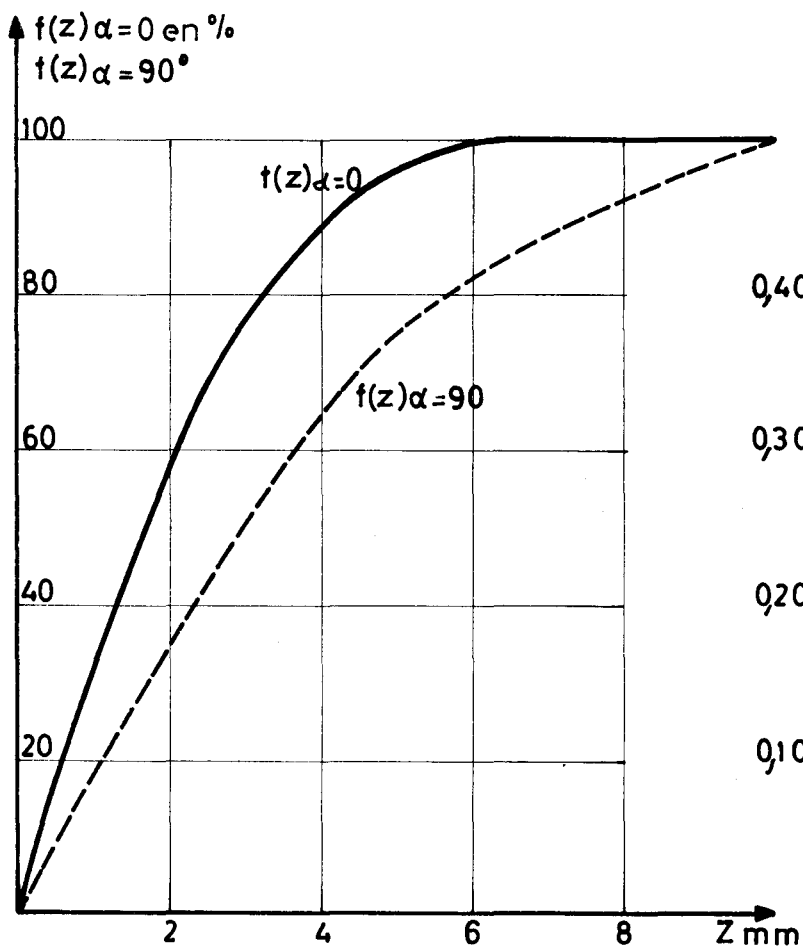
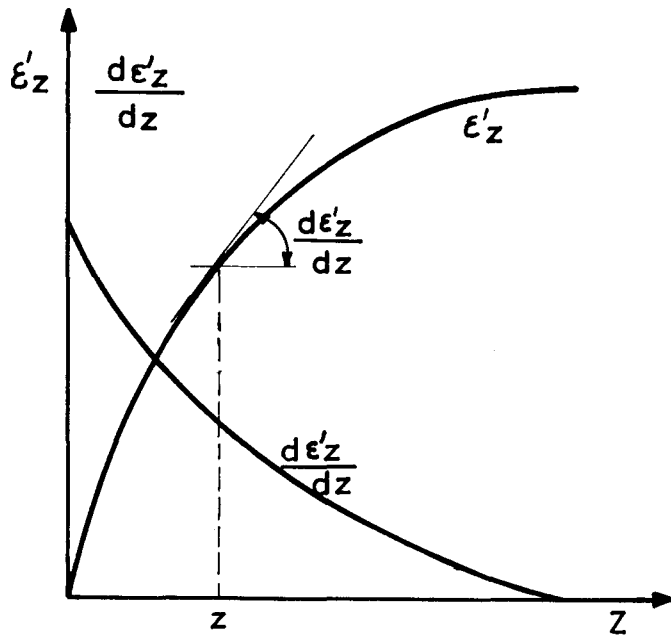


Fig. 8-18a, 8-18b, 8-18c

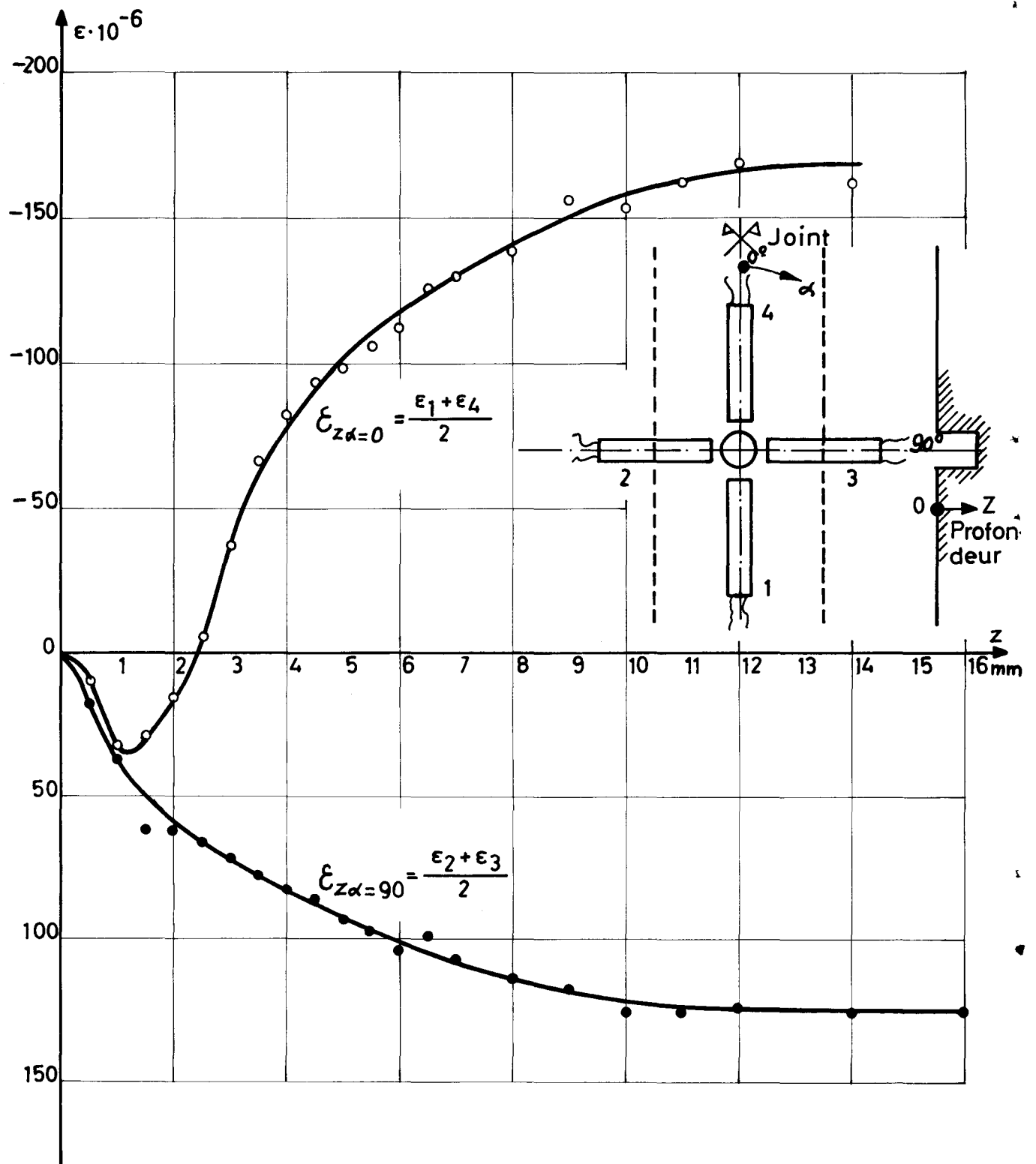


Fig. 8-19 — Mesure en l'état plan des contraintes résiduelles en profondeur
Méthode Soete Van Crombrugge
Eprouvette n° 14M1

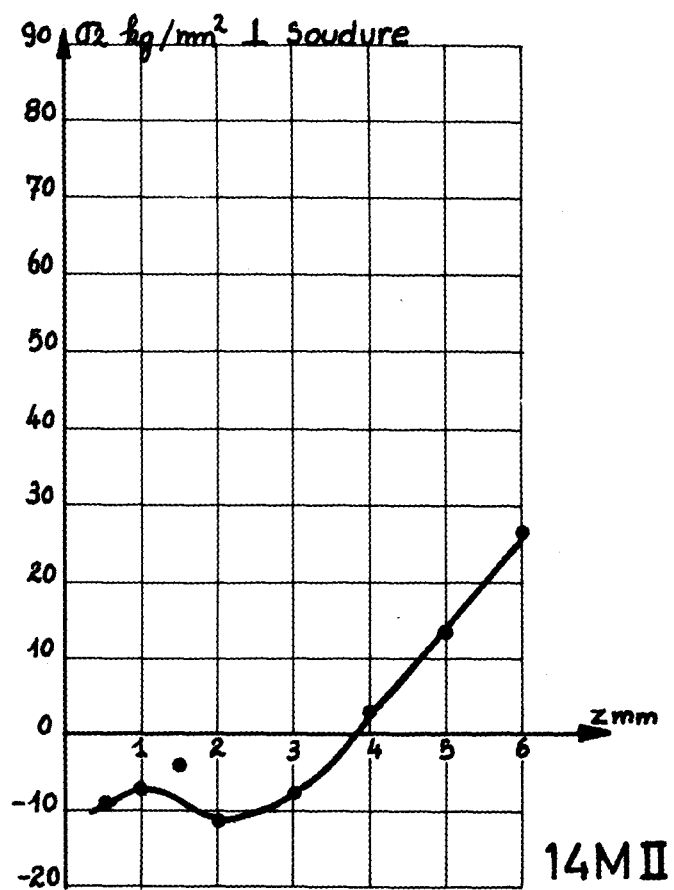
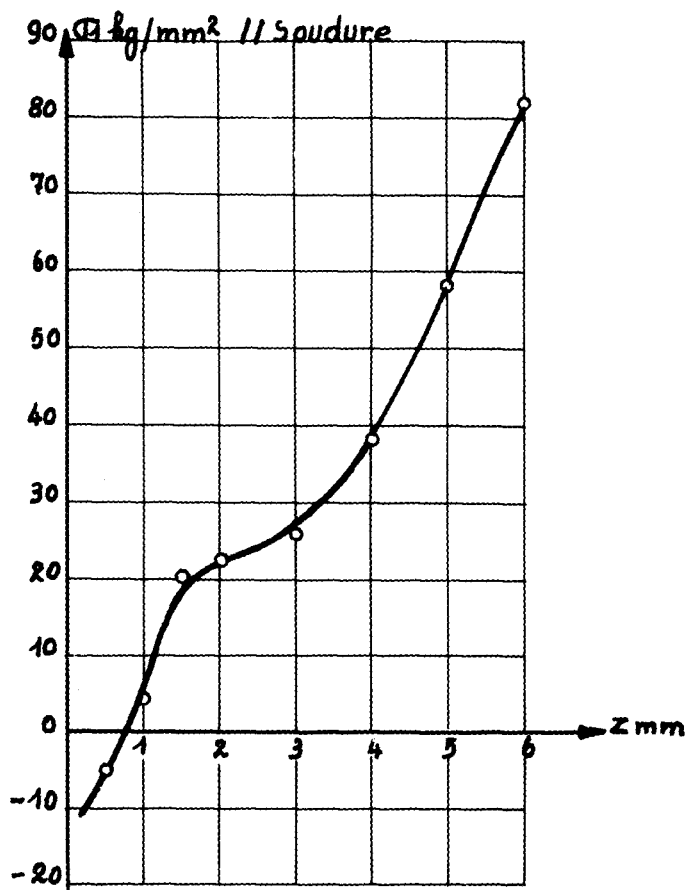
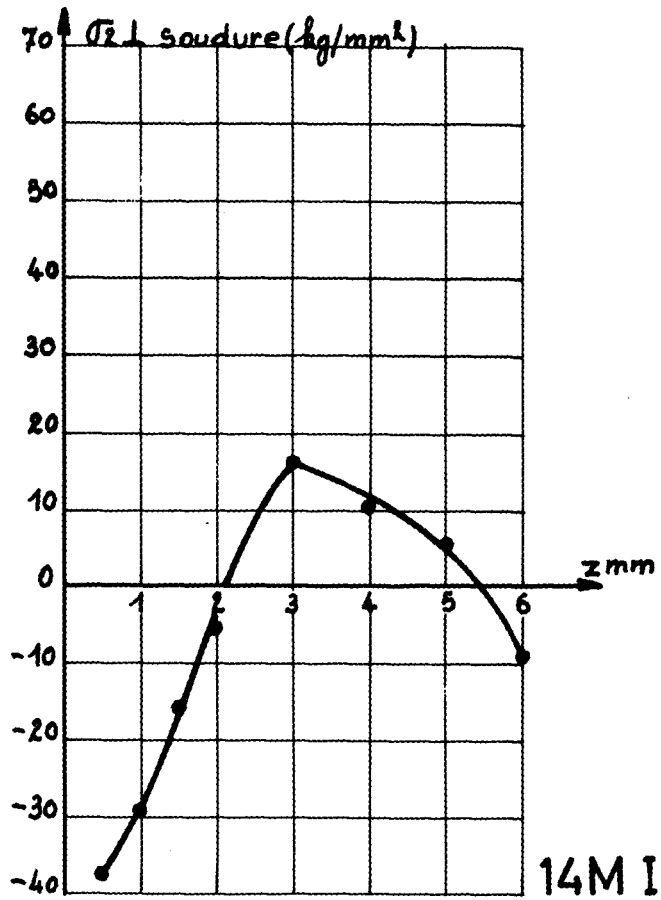
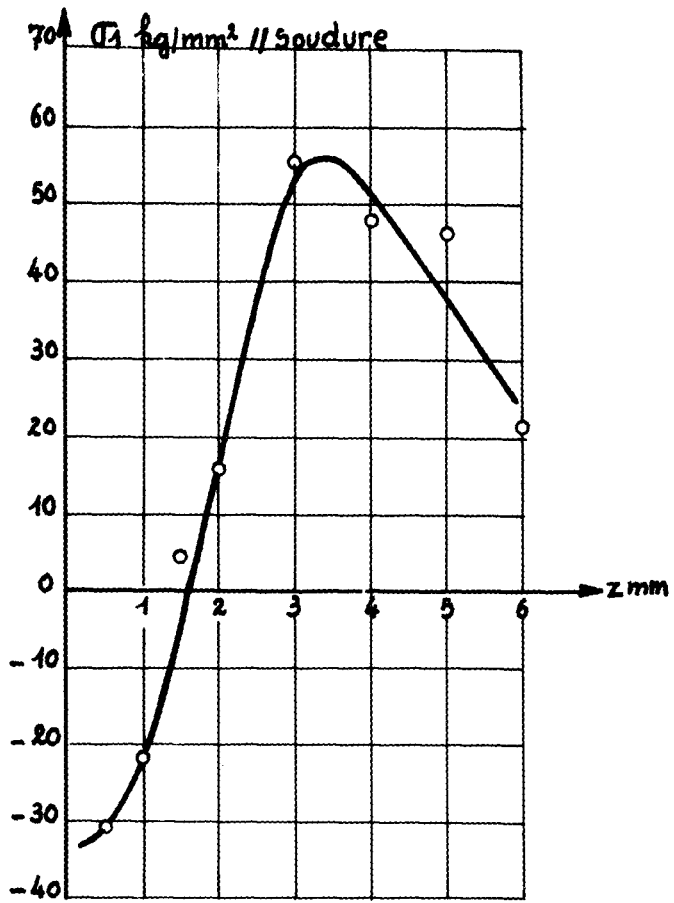


Fig. 8-20 — Mesure en l'état plan des contraintes résiduelles en profondeur
Méthode Soete Van Crombrugge
Eprouvette n° 14

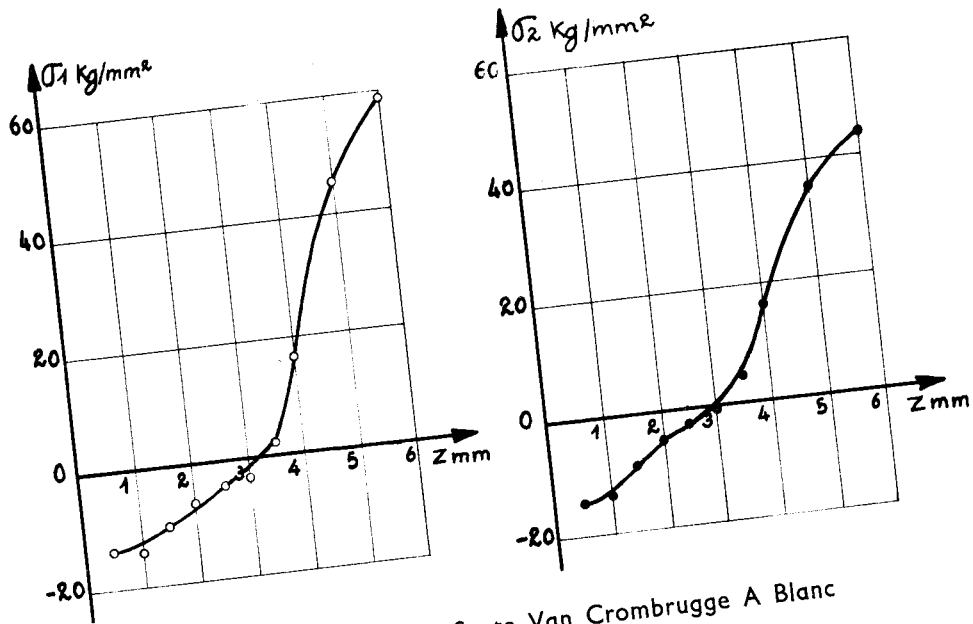


Fig. 8-21 — Methode Soete Van Crombrugge A Blanc

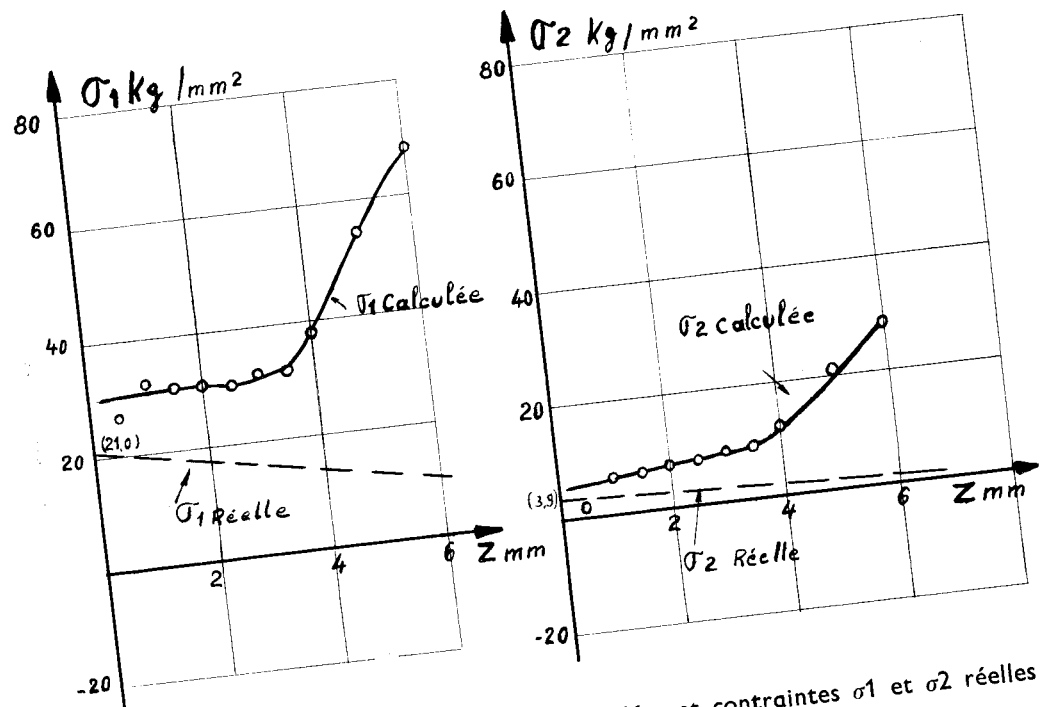
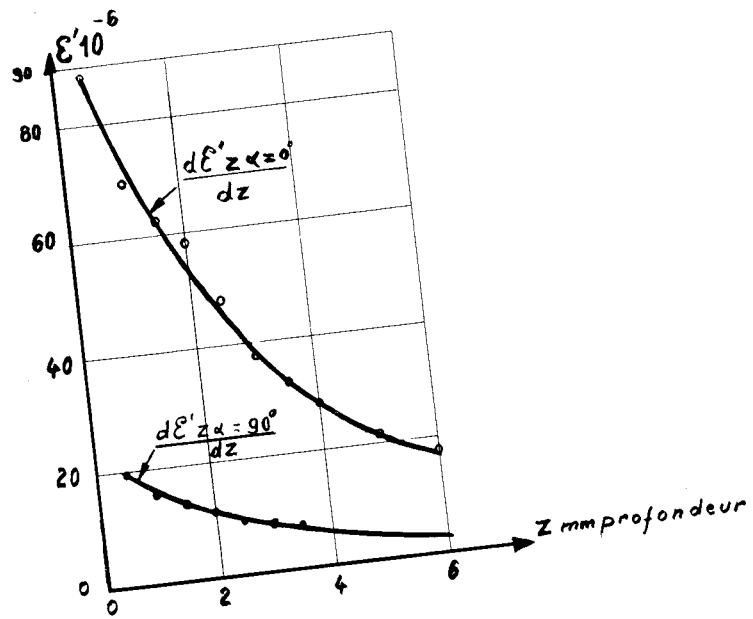


Fig. 8-22 — Contraintes σ_1 et σ_2 calculées et contraintes σ_1 et σ_2 réelles dans une éprouvette sollicitée en flexion

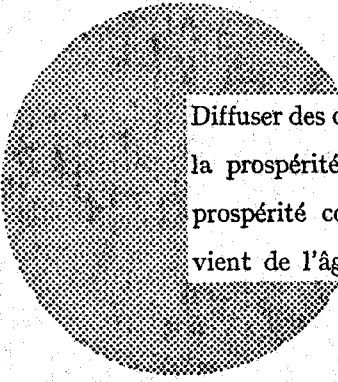
AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports Euratom sont signalés, au fur et à mesure de leur publication, dans le périodique mensuel **EURATOM INFORMATION**, édité par le Centre d'information et de documentation (CID). Pour souscrire un abonnement (1 an : FF 75, FB 750) ou recevoir un numéro spécimen, prière d'écrire à :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Allemagne)

ou à

Office de vente des publications
des Communautés européennes
2, Place de Metz
Luxembourg



Diffuser des connaissances c'est distribuer de la prospérité — j'entends la prospérité collective et non la richesse individuelle — et cette prospérité contribue largement à la disparition du mal qui nous vient de l'âge des ténèbres.

Alfred Nobel

BUREAUX DE VENTE

Tous les rapports Euratom sont vendus dans les bureaux suivants, aux prix indiqués au verso de la première page de couverture (lors de la commande, bien indiquer le numéro EUR et le titre du rapport, qui figurent sur la première page de couverture).

PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles
compte N° 964.558,

Banque Belgo Congolaise - Bruxelles
compte N° 2444.141,

Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,

Belgian American Bank and Trust Company - New York
compte No. 22.186,

Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,
Postcheckkonto - Köln - Nr. 160.861.

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBAD
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONARY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)