Rapport BIPM-84/2

Version corrigée février 1985

COMPARAISON INTERNATIONALE

DANS LE DOMAINE DE PRESSION

20 à 100 MPa

## (l<sup>ère</sup> phase)

organisée par le Groupe de travail "Hautes pressions"

du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées

J.C. LEGRAS, V. BEAN, J. JÄGER S.L. LEWIS, G.F. MOLINAR

Une communication rapide sur la première phase de la comparaison sera faite en langue anglaise dans Journal of Physics E - Scientific Instruments.

### COMPARAISON INTERNATIONALE DANS LE DOMAINE DE PRESSION 20 A 100 MPa

organisée par le Groupe de travail "Hautes Pressions" du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées

J.C. Legras<sup>1</sup>, V. Bean<sup>2</sup>, J. Jäger<sup>3</sup>, S.L. Lewis<sup>4</sup> et G.F. Molinar<sup>5</sup>

#### RESUME

Le Groupe de travail "Hautes pressions" du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), a organisé une comparaison internationale dans le domaine de pression de 20 à 100 MPa.

Les laboratoires de 13 pays se sont engagés à participer à cette comparaison. Sur cette base, la comparaison a été divisée en 3 phases. Le présent article décrit les modalités de la comparaison et donne les résultats comparatifs de la première phase.

L'étalon de transfert est une balance de pression à huile. Chaque laboratoire participant à la comparaison a déterminé la section effective de l'ensemble piston-cylindre de cette balance dans le domaine de pression 20 à 100 MPa.

Les résultats de la première phase montrent, entre les cinq laboratoires participants, un accord à l'intérieur d'une fourchette de  $64 \times 10^{-6}$  à pression nulle et de  $80 \times 10^{-6}$  à 100 MPa sur la détermination de la section effective. Ces résultats sont à l'intérieur des incertitudes estimées.

- <sup>1</sup> Laboratoire National d'Essais, Paris, France.
- 2 National Bureau of Standards, Washington DC, USA.
- 3 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, RFA.
- 4 National Physical Laboratory, Teddington, Grande-Bretagne.
- <sup>5</sup> Istituto di Metrologia "G. Colonnetti", Torino, Italie.

#### INTRODUCTION

Lors de sa réunion tenue en juin 1980 au BIPM, le Groupe de travail du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées a décidé d'organiser une comparaison internationale dans le domaine de pression de 20 à 100 MPa. En raison du nombre important de participants, la comparaison a été divisée en 3 phases. Le présent article décrit les modalités de la comparaison et donne les résultats des laboratoires ayant participé à la première phase.

Pour la mesure des pressions supérieures à la pression atmosphérique, l'étalon primaire généralement utilisé est une balance de pression, dans laquelle la pression est déterminée à partir de l'équilibre d'une force de gravitation connue et de la force dirigée vers le haut due à l'action de la pression sur une section connue. Cette section est définie par un ensemble piston-cylindre réalisé avec le plus grand soin ; elle est généralement appelée section effective de l'ensemble.

La détermination de la section effective, et en particulier sa variation avec la pression, due à la déformation élastique de ses composants, constitue la principale limite pour la précision des étalons haute pression. La propagation des mesures de pression dans ce domaine est également assurée à l'aide de balances de pression. Il était donc naturel d'utiliser une balance de pression comme étalon de transfert pour cette intercomparaison, le paramètre mesuré étant la section effective de son ensemble piston-cylindre.

Le Laboratoire National d'Essais (LNE), Paris, a participé en tant que laboratoire pilote à la comparaison.

La forme définitive de cet article a été arrêtée lors de la réunion des membres participants à la première phase, tenue les 22 et 23 février 1983 ; elle est basée sur un rapport préparé par le laboratoire pilote.

La comparaison est organisée de manière aveugle. C'est pour cette raison que la valeur de la section effective n'est pas divulguée ; cet article ne fournit donc que des résultats comparatifs.

#### 1. ORGANISATION DE LA COMPARAISON

Les modalités de la comparaison ont été définies lors de la réunion du Groupe de travail, en juin 1980. A la suite de la réunion, un "Document Final" a été préparé par Mrs S. LEWIS (NPL) en tant que Rapporteur du Groupe, Monsieur G.F. MOLINAR (IMGC) en tant que Président du Groupe et Monsieur J.C. LEGRAS (LNE) en tant que responsable technique du laboratoire pilote. Ce document définit avec précision les modalités à utiliser pour la mesure et la manière de présenter les résultats.

L'étalon de transfert est une balance à piston tournant mise à la disposition du Groupe de travail par la Société DESGRANGES ET HUOT. Un "Manuel Technique", préparé par le laboratoire pilote, définit tous les paramètres de l'étalon de transfert, excepté la section effective de son ensemble piston-cylindre. Les deux documents présentés ci-dessus, rédigés en langue française et en langue anglaise, circulent avec l'étalon de transfert.

La première phase de la comparaison, réunissant les cinq laboratoires énumérés ci-dessus, s'est déroulée sur une période d'environ l an, selon le calendrier suivant :

-	Mai 1981	:	LNE (laboratoire pilote)	
-	Juin 1981	:	IMGC	
-	Août 1981	:	PTB	
	Décembre 1981	:	NPL	
-	Mai 1982	:	NBS	
-	Août 1982	:	LNE.	

Conformément à la procédure établie, chaque laboratoire a déterminé la section effective de l'ensemble piston-cylindre de la balance de transfert à certains points de pression définis. Ces résultats ont été envoyés au laboratoire pilote suivant une forme établie, pour leur analyse finale. Quelques informations supplémentaires ont également été envoyées au laboratoire pilote, telles que les conditions ambiantes, les caractéristiques de l'étalon du laboratoire, etc.

#### 2. DESCRIPTION DES ETALONS UTILISES PAR CHAQUE LABORATOIRE

Tous les étalons utilisés par les laboratoires sont des balances à piston tournant. Les différences essentielles résident dans le choix du matériau des ensembles piston-cylindre et dans leur conception.

Les principaux paramètres des étalons des laboratoires sont portés dans le tableau I. Une grande diversité dans les méthodes de détermination des coefficients de déformation des ensembles pistoncylindre apparaît dans ce tableau.

#### 3. L'ETALON DE TRANSFERT

3.1. Description

L'étalon de tranfert fourni par la Société DESGRANGES et HUOT est une balance à piston tournant de type 5300 S.

Il est équipé de l'ensemble piston-cylindre n° 986 A d'étendue de mesure 2 à 100 MPa et d'un jeu de masses de 50 kg en acier inoxydable. Le matériau du cylindre est du carbure de tungstène, celui du piston est de l'acier rapide.

Un second ensemble piston-cylindre (n° 1218) de même fabrication, et sur lequel sont effectuées les mêmes mesures que sur le premier, est conservé par le laboratoire pilote.

#### 3.2 Détermination du coefficient de température

Le coefficient de température  $(\underline{\alpha'}_p + \underline{\alpha'}_c)$  a été déterminé globalement par le laboratoire pilote à partir d'une méthode

#### TABLEAU I

#### Caractéristiques des étalons des laboratoires

0

.

Laboratoire Caractéristique	LNE (F) Laboratoire Pilote	IMGC (I)	PTB (RFA)	NPL (GB)	NBS (USA)
Etendue de mesure (MPa)	5 - 200	10 - 100	10 - 100	10 - 80	30 - 140
Matériau du piston et du cylindre	Carbure de tungstène	Carbure de tungstène	Carbure de tungstène	Acier au carbone	Acier
Section effective à pression nulle et à la température de référence $\underline{A}_{o}$ (mm <sup>2</sup> )	50,2732	10,02419	9,80488	30,82795	32,18914
Incertitude sur $\underline{A}_{o}$ $\Delta \underline{A}_{o}$ $/\underline{A}_{o}$	$27 \times 10^{-6}$	40 × 10 <sup>-6</sup>	$29 \times 10^{-6}$	$20 \times 10^{-6}$	48 × 10 <sup>-6</sup>
Montage du cylindre	Jeu contrôlé	Libre déformation	Libre déformation	Libre déformation	Jeu contrôlé
Coefficient de déformation $\lambda$ (MPa <sup>-1</sup> )	- 0,02 × 10 <sup>-6</sup>	+ 0,81 × $10^{-6}$	+ 1,01 × 10 <sup>-6</sup>	+ 3,2 × 10 <sup>-6</sup>	- 0,72 × 10 <sup>-6</sup>
Méthode de détermination de $\underline{\lambda}$	Débit de fuite + variation de contrepression	Comparaison avec des balances basse pression	Comparaison avec un étalon de 50 MPa dont le $\lambda$ est déterminé par calcul	Comparaison avec des étalons dont le $\lambda$ est dérivé de la méthode de similitude	Variation de contrepression à partir d'un jeu nul
Incertitude sur $\lambda$ (MPa <sup>-1</sup> )	$0,1 \times 10^{-6}$	0,3 × 10 <sup>-6</sup>	$0,3 \times 10^{-6}$	$0,2 \times 10^{-6}$	$0,3 \times 10^{-6}$
Coefficient de température 2 $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	0,84 × 10 <sup>-5</sup>	1,1 × 10 <sup>-5</sup>	1,1 × 10 <sup>-5</sup>	$2,34 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-5}$
Bibliographie	[1]	[2]	[3]	[4]	

- 4

П

expérimentale : l'étalon de transfert est placé dans une enceinte climatique et sa section effective est déterminée entre 10 et 40 °C par comparaison directe avec une balance maintenue à température constante.

La valeur mesurée, et utilisée pour la comparaison, est :

$$\underline{\alpha'}_{p} + \underline{\alpha'}_{c} = (14, 7 \pm 0, 7) \times 10^{-6} \, {}^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$$

Afin de confirmer ce résultat, le NPL a mesuré le coefficient de dilatation des matériaux constituant le piston et le cylindre. Le résultat établi pour des échantillons fournis par le constructeur est le suivant :

$$\underline{\alpha'}_{p} + \underline{\alpha'}_{c} = (14,65 \pm 0,04) \times 10^{-6} \ ^{\circ}C^{-1}$$

#### 3.3. Comportement de l'étalon de transfert durant la première phase

Aucun problème particulier n'est apparu lors de l'utilisation de l'étalon de transfert par chacun des laboratoires. La balance était en parfait état de fonctionnement lors de son retour au laboratoire pilote.

Quelques paramètres ont été vérifiés afin de détecter une dérive éventuelle :

a) Section effective

La section effective à pression nulle <u>A'</u><sub>o</sub> et le coefficient de déformation  $\underline{\lambda}$ ' sont déterminés par le laboratoire pilote avant la première phase (résultats repérés LNE Al) et après la première phase (résultats LNE A2). Les 2 déterminations sont effectuées dans un intervalle de temps de l'ordre de 15 mois.

Les résultats montrent un accroissement de la section effective égal, en valeur relative, à 24,6 ×  $10^{-6}$ . Etant donné le diamètre très petit du piston (2,5 mm), cette dérive représente une variation, sur le rayon moyen, de l'ordre de 0,015 µm.

b) Masse des disques

Une nouvelle détermination de la masse des disques a permis de détecter de faibles variations comprises, en valeur relative, entre 0 et  $-5 \times 10^{-6}$ . Les nouvelles valeurs seront utilisées pour la seconde phase.

c) Vitesse de descente du piston

Les nouvelles valeurs mesurées ne présentent pas d'écart significatif avec les valeurs initiales.

d) Sonde de température

Les coefficients <u>R</u> (0 °C), <u>A</u> et <u>B</u> de la sonde présentent une bonne stabilité. Les écarts mesurés au voisinage de 20 °C sont à l'intérieur des incertitudes de mesure.

#### 4. METHODES DE MESURE ET DE TRAITEMENT

4.1. Modalités de mesure

Tous les laboratoires participants utilisent des échantillons de la même huile comme fluide de travail. Les mesures ont été effectuées par comparaison directe entre l'étalon du laboratoire et l'étalon de transfert, en cinq cycles de pression. Chaque cycle comprend 17 paliers de pression, entre 20 et 100 MPa (9 paliers à la montée et 8 à la descente, tous les 10 MPa).

A chaque point de pression, pour lequel l'ensemble piston-cylindre est chargé d'un groupe de disques bien spécifié, le laboratoire pilote participant doit mesurer la pression appliquée au niveau de référence de l'étalon de transfert et la température de l'ensemble piston-cylindre, afin de ramener tous les résultats à la température de référence commune de 20 °C. Ces informations, ainsi que l'accélération locale due à la pesanteur et la masse volumique de l'air ambiant, sont fournies au laboratoire pilote.

Les grandeurs mesurées sont :

- <u>m</u> et <u>m</u>' les masses des disques appliqués sur l'étalon du laboratoire et sur l'étalon de transfert (les valeurs de <u>m</u>' étant celles fournies par le laboratoire pilote).

- t et t' les températures respectives de chacun.

Chaque laboratoire fournit au laboratoire pilote, et pour chaque point de pression :

- la force F appliquée sur l'étalon de transfert :

$$\underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{m}}' \cdot \underline{\mathbf{g}} \left(1 - \underline{\rho}_a / \underline{\rho}_m\right) + \underline{\Gamma} \cdot \underline{\mathbf{C}}$$
(1)

où : <u>g</u> est l'accélération due à la pesanteur, au laboratoire  $\underline{\rho}_a$  est la masse volumique de l'air  $\underline{\rho}_m$  est la masse volumique des disques  $\underline{\Gamma}$  est la tension superficielle de l'huile

 $\overline{C}$  est la circonférence du piston

- la pression <u>p</u>' mesurée par l'étalon du laboratoire au niveau de référence de l'étalon de transfert, ainsi que l'incertitude  $\delta \underline{p}'/\underline{p}'$  sur cette pression ( $\delta \underline{p}'/\underline{p}'$  prend en compte l'incertitude sur l'étalon du laboratoire et une estimation des erreurs liées à la méthode de mesure et aux conditions d'environnement)

- la section <u>A'</u> de l'étalon de transfert, en fonction de la pression nominale :

$$\underline{A'}_{p} = \underline{F}/\underline{p'} \left[ 1 + (\underline{\alpha'}_{p} + \underline{\alpha'}_{c}) (\underline{t'} - 20 \ ^{\circ}C) \right]$$
(2)

Le laboratoire fournit également quelques informations d'ordre général, telles que les caractéristiques de l'étalon du laboratoire ou la résolution de l'équilibre. 4.2. Traitement effectué par le laboratoire pilote

Le laboratoire pilote a developpé un programme de calcul pour traiter les résultats de tous les laboratoires suivant le même schéma.

Ce programme permet :

- de stocker les données de tous les laboratoires pour des traitements ultérieurs éventuels,

- de calculer les caractéristiques <u>A'</u><sub>o</sub> (section effective) et  $\underline{\lambda}$ ' (coefficient de déformation) de l'ensemble piston-cylindre de l'étalon de transfert à partir des données <u>A'</u><sub>p</sub> = f (<u>p</u>) fournies par chaque laboratoire,

- d'évaluer les incertitudes sur <u>A'</u> et  $\underline{\lambda}$ ' déterminés par chaque laboratoire.

4.2.1. Détermination de A' o et 
$$\lambda$$
'

 $\underline{A'}_{O}$  et  $\underline{\lambda'}$  sont calculés à partir de la droite des moindres carrés :

$$\underline{A'}_{\underline{p}} = \underline{a} + \underline{b} \cdot \underline{p} \tag{3}$$

Dans un premier temps, le calcul est appliqué à chaque cycle de pression, et pour les valeurs montantes et descendantes. Aucun écart significatif n'est apparu entre les résultats à la montée et les résultats à la descente.

On calcule alors la droite des moindres carrés pour les valeurs moyennes de <u>A'p</u>, calculées pour chaque pression à partir des 10 déterminations effectuées indépendamment à la montée et à la descente :

$$\underline{\underline{A}'}_{\underline{P_{i}}} = (\Sigma \underline{\underline{A}'}_{\underline{P_{i}}})/\underline{\underline{n}}$$
(4)

où n est le nombre total de mesures.

On détermine <u>A</u>'<sub>o</sub> et  $\underline{\lambda}$ ' par analogie à partir de la droite des moindres carrés (3)

$$\underline{\underline{A}'}_{\underline{\underline{P}_{\underline{i}}}} = \underline{\underline{A}'}_{0} (1 + \underline{\underline{\lambda}'} \cdot \underline{\underline{P}_{\underline{i}}})$$
(5)

Soit, d'après les expressions utilisées en analyse statistique :

$$\underline{\mathbf{A}'}_{o} = \left[ \Sigma \left( \underline{\mathbf{A}'}_{\underline{\mathbf{P}}_{\underline{\mathbf{i}}}} \right) - \underline{\mathbf{A}} \cdot \Sigma(\underline{\mathbf{P}}_{\underline{\mathbf{i}}}) / \underline{\mathbf{B}} \right] / \underline{\mathbf{n}}$$
(6)

et 
$$\underline{\lambda}' = \underline{A}/(\underline{B} \cdot \underline{A}'_{O})$$
 (7)

où 
$$\underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{n}}\Sigma \left(\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}} \cdot \underline{\mathbf{A}'}_{\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}}\right) - \Sigma \left(\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}\right) \cdot \Sigma \left(\underline{\mathbf{A}'}_{\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}}\right)$$
(8)

et 
$$\underline{\mathbf{B}} = \underline{\mathbf{n}} \Sigma (\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}})^2 - (\Sigma (\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}))^2$$
 (9)

Pour chaque laboratoire, les écarts relatifs  $\Delta \underline{L}/\underline{L}$ , entre la valeur moyenne de <u>A'</u><u>p</u><sub>i</sub> et la droite des moindres carrés sont reportés sur la figure l en fonction de la pression. On a superposé les droites des moindres carrés déterminées à partir des résultats de chaque laboratoire, afin de comparer les écarts de linéarité. Les écarts relatifs entre la droite des moindres carrés et les valeurs déterminées sont à l'intérieur de  $\pm$  5 × 10<sup>-6</sup> pour tous les laboratoires.

4.2.2. Incertitudes sur A' o et  $\lambda$ '

L'incertitude relative sur <u>A</u>'<sub>o</sub> est évaluée à partir d'une combinaison quadratique de toutes les incertitudes sur les paramètres intervenant dans sa détermination.

$$\delta \underline{A'}_{o} / \underline{A'}_{o} = 3 \left[ \left( \underline{\sigma}_{\underline{A'}_{o}} / \underline{A'}_{o} \right)^{2} + \left( \delta \underline{p'} / 3 \underline{p'} \right)^{2} + \left( \delta \underline{m'} / 3 \underline{m'} \right)^{2} + \left( \delta \underline{t'} / 3 \underline{t'} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} (10)$$

où

a)  $\underline{\sigma}^2_{A'_{O}}$  est une évaluation de la variance de l'ordonnée à l'origine de la droite des moindres carrés utilisée pour la détermination de  $\underline{A'}_{O}$ .

La variance  $\sigma^2_{\underline{A'}o}$  est évaluée par calcul statistique à partir du test de la droite des moindres carrés :

$$\underline{\sigma}^{2}\underline{A'}_{o} = \Sigma (\underline{p}_{\underline{i}})^{2} \cdot \underline{D/B}$$
(11)

où

$$\underline{\mathbf{D}} = (\underline{\mathbf{C}} - \underline{\mathbf{A}}^2 / \underline{\mathbf{B}}) / \underline{\mathbf{n}} (\underline{\mathbf{n}} - 2)$$
(12)

$$\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{n}} \Sigma \left(\underline{\mathbf{A'}}_{\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}}\right)^2 - \left(\Sigma \underline{\mathbf{A'}}_{\underline{\mathbf{p}}_{\underline{\mathbf{i}}}}\right)^2$$
(13)

A et B sont définis en (8) et (9).

b)  $\delta \underline{p}$ ' est une extrapolation à pression nulle de l'incertitude sur la pression mesurée par l'étalon du laboratoire ; elle est fournie par chaque laboratoire au laboratoire pilote.

L'incertitude sur la section effective de l'étalon du laboratoire représente la plus grande part de cette incertitude.

c)  $\delta\underline{m}'$  et  $\delta\underline{t}'$  sont les incertitudes liées à l'étalon de transfert (masse, température).

L'utilisation du terme  $\delta \underline{p'/p'}$  dans l'équation (10) pour prendre en compte la contribution de l'étalon du laboratoire à l'incertitude sur <u>A'</u>o n'est pas rigoureusement correcte ; en effet ce terme englobe une faible composante due à  $\delta \underline{\lambda}/\underline{\lambda}$ . Il a uniquement été choisi pour des raisons de commodités de calcul. L'incertitude sur le coefficient de déformation  $\underline{\lambda}'$  est estimée à partir de l'expression suivante :

$$\delta \underline{\lambda}' = 3 \left[ \underline{\sigma}^2 \underline{\lambda}' + (\delta \underline{\lambda}/3)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(14)

où  $\underline{\sigma}^2_{\lambda}$ , est calculé à partir de la variance estimée de la pente de la droite des moindres carrés :

$$\underline{\sigma}^{2}\underline{\lambda}' = \underline{n} \underline{D} / (\underline{B} \cdot \underline{A}' _{o}^{2})$$
(15)

D et B sont définis plus haut.

 $\delta\underline{\lambda}$  est l'incertitude sur le coefficient de déformation de l'étalon du laboratoire.

#### 5. RESULTATS COMPARATIFS DE TOUS LES LABORATOIRES

Afin d'établir une base de comparaison pour les résultats de tous les laboratoires, des valeurs de référence arbitraires ont été adoptées pour la section effective de l'étalon de transfert à pression nulle,  $\underline{A'}_{OREF}$  et pour son coefficient de déformation,  $\underline{\lambda'}_{REF}$ . Ces valeurs,  $\underline{A'}_{O}$ et  $\underline{\lambda'}$ , ayant évolué entre le début et la fin de la première phase de l'intercomparaison, les valeurs de référence ont été calculées comme la moyenne arithmétique des résultats du laboratoire pilote, LNE Al et LNE A2. Ces valeurs figées permettront de comparer les résultats des phases suivantes à ceux de la première si de nouvelles dérives sont constatées. Un traitement prenant en compte la dérive dans le temps sera effectué à la fin de la comparaison.

#### 5.1. Section effective à pression nulle

Les valeurs de la section effective à pression nulle et du coefficient de déformation de l'étalon de transfert déterminés par chaque laboratoire sont notées  $\underline{A'}_{oLAB}$  et  $\underline{\lambda'}_{LAB}$ .

Les écarts relatifs pour <u>A</u>'<sub>o</sub> entre <u>A</u>'<sub>oLAB</sub> et la valeur de référence définie ci-dessus sont reportés dans le tableau II :

$$\Delta \underline{A'}_{o} / \underline{A'}_{o} = (\underline{A'}_{oLAB} - \underline{A'}_{oREF}) / \underline{A'}_{oREF}$$
(16)

#### TABLEAU II

Ecarts relatifs mesures sur <u>A'</u> (unité :  $10^{-6}$ )

		Ecart relatif	Ecart-type relatif	Incertitude relative
Laboratoire	Date	$\Delta \underline{A'}_{o} / \underline{A'}_{o}$	<u> </u>	δ <u>Α</u> 'ο / <u>Α</u> 'ο
LNE A1	05 - 81	- 12,3	2,6	31
IMGC	06 - 81	- 23,3	4,7	56
PTB	08 - 81	- 9,8	1,9	44
NPL	12 - 81	+ 40,8	2,4	29
NBS	05 - 82	+ 37,0	2,5	50
LNE A2	08 - 82	+ 12,3	2,1	31

Sont également reportés dans le tableau II :

- l'écart-type estimé sur la moyenne des 10 déterminations successives de <u>A'pi</u> (calculé comme la moyenne des écarts-types évalués pour chaque pression) ;

- l'incertitude relative sur  $\underline{A'}_0$  estimée à partir de l'expression (10).

La figure 2 représente les écarts observés sur <u>A</u>'<sub>o</sub> entre tous les laboratoires. La dérive de l'étalon est représentée par la bande hachurée repérée "bande de transfert".

Le tableau III donne la décomposition de l'incertitude sur  $\underline{A'}_{o}$  en incertitudes élémentaires, conformément à l'expression (10), pour chaque laboratoire.

On a également reporté dans ce tableau, à titre purement informatif, la résolution de l'équilibre entre les 2 étalons. Ce terme est défini comme la plus petite masse  $\Delta m$  mise sur l'étalon du laboratoire, et qui entraîne une évolution de l'équilibre. Il n'est pas pris en compte dans le calcul de l'incertitude globale sur <u>A'</u>.

#### TABLEAU III

Composantes de l'incertitude sur <u>A'</u><sub>o</sub> (unité :  $10^{-6}$ )

Laboratoire	δ <u>p'</u> <u>p</u> '	δ <u>m</u> ' <u>m</u> '	δ <u>t</u> ' <u>t</u> '	$\frac{\sigma_{\underline{A}'o}}{\underline{A'o}}$	$\frac{\Delta \underline{A'_{o}}}{\underline{A'_{o}}}$	<u>∆m</u> <u>m</u>
LNE A1	30	1	1	1,8	31	0,2
IMGC	55	1	1	2,1	56	2,4
PTB	42	1	1	3,6	44	1,0
NPL	28	1	1	2,4	29	0,5
NBS	48	1	1	4,0	50	1,1
LNE A2	30	1	1	0,7	31	0,2

#### 5.2. Coefficient de déformation $\lambda$ '

Un calcul identique est effectué pour le coefficient de déformation  $\lambda$ '. Les écarts observés, reportés dans le tableau IV, sont calculés à partir de l'expression suivante :

$$\Delta \underline{\lambda}' = \underline{\lambda}'_{\text{LAB}} - \underline{\lambda}'_{\text{REF}}$$
(17)

Le tableau IV donne également l'écart-type sur  $\underline{\lambda}'$  ( $\underline{\sigma}_{\underline{\lambda}}$ ) défini par l'expression (15) et l'incertitude sur  $\underline{\lambda}'$  ( $\underline{\delta}\underline{\lambda}'$ ) définie par l'expression (14).

La figure 3 représente les écarts observés sur  $\underline{\lambda}^{\text{!}}$  .

## TABLEAU IV

Laboratoire	Ecart observé $\Delta \lambda'$	Ecart-type <u>σ</u> λ'	Incertitude $\delta \lambda'$
LNE A1	+ 0,02	0,028	0,14
IMGC	- 0,42	0,032	0,32
PTB	- 0,20	0,055	0,35
NPL	- 0,54	0,037	0,23
NBS	- 0,25	0,057	0,35
LNE A2	- 0,02	0,010	0,11

# Ecarts observés sur $\underline{\lambda}$ ' (unité : $10^{-6}$ /MPa)

## 5.3. Comparaison des résulats à 50 et 100 MPa

Le tableau V permet de comparer les écarts relatifs des différents laboratoires à 50 et 100 MPa.

A'p est calculé à partir de l'expression A'p = A'o 
$$(1 + \underline{\lambda}'\underline{p})$$
.

L'incertitude relative sur  $\underline{A'}_{\underline{p}}$  est calculée à partir de l'expression :

$$\delta \underline{\mathbf{A}'}_{\underline{p}} / \underline{\mathbf{A}'}_{\underline{p}} = \delta \underline{\mathbf{A}'}_{\mathbf{o}} / \underline{\mathbf{A}'}_{\mathbf{o}} + \delta \underline{\lambda'} \cdot \underline{p}$$
(18)

## TABLEAU V

Ecarts observés sur  $\underline{A'}_{p}$  (unité :  $10^{-6}$ )

Laboratoire	$\frac{\Delta \underline{A'}_{o}}{\underline{A'}_{o}}$	$\frac{\delta \underline{A'_{o}}}{\underline{A'_{o}}}$	<u>∆A'50</u> <u>A</u> '50	<u>δΑ' 50</u> <u>Α</u> ' 50	<u>ΔΑ'100</u> <u>Α'</u> 100	<u>δΑ'100</u> <u>Α</u> '100
LNE A1	- 12,3	31	- 10,8	38	- 9,5	45
IMGC	- 23,3	56	- 42,8	72	- 62,5	88
PTB	- 9,8	44	- 18,3	62	- 27,1	79
NPL	+40,8	29	+ 15,4	41	- 10,3	52
NB S	+ 37,0	50	+ 26,1	68	+ 14,8	85
LNE A2	+ 12,3	31	+ 11,4	37	+ 10,1	42

6. CONCLUSION

Les résultats de la première phase montrent un accord entre les cinq laboratoires à l'intérieur d'une fourchette de  $64 \times 10^{-6}$  pour la mesure de la section effective <u>A'</u><sub>o</sub>. Les écarts relatifs sont à l'intérieur des incertitudes évaluées par chaque laboratoire. Les incertitudes globales sur la mesure de <u>A'</u><sub>o</sub> liées à la comparaison varient de ± 31 à ± 56 × 10<sup>-6</sup>.

En ce qui concerne les résultats sur le coefficient de déformation, les écarts sont plus importants. Les valeurs mesurées de  $\lambda$ ' montrent une dispersion largement supérieure aux incertitudes sur  $\lambda$ '. L'influence de ce paramètre sur la mesure des pressions est représentée dans le tableau V par l'intermédiaire des sections effectives calculées à 50 et à 100 MPa.

A 50 MPa, les écarts relatifs observés sont à l'intérieur d'une fourchette de 70 ×  $10^{-6}$ , alors que les incertitudes globales liées à la comparaison varient de ± 37 à ± 72 ×  $10^{-6}$ .

A 100 MPa, les écarts observés sont à l'intérieur d'une fourchette de 80  $\times$  10<sup>-6</sup>, alors que les incertitudes globales varient de ± 42 à ± 88  $\times$  10<sup>-6</sup>.

Aucun ajustement prenant en compte la dérive de  $+ 25 \times 10^{-6}$  de la section effective à pression nulle de l'étalon de transfert n'a été effectué pour l'établissement de ces résultats.

La figure 4 permet de comparer l'évolution de la section effective de l'étalon de transfert mesurée par chaque laboratoire. Cette figure traduit directement l'influence sur la mesure des pressions, puisque la section effective est le paramètre qui intervient pour la plus grande part dans l'évaluation des incertitudes. Les points expérimentaux à 50 et 100 MPa sont légèrement différents des écarts donnés dans le tableau V, qui sont calculés à partir de <u>A'</u><sub>0</sub> et de  $\underline{\lambda}'$ .

Tous ces résultats montrent un bon accord pour la mesure des pressions relatives dans le domaine de 0 à 100 MPa. La comparaison a surtout mis en évidence les difficultés liées à la détermination du coefficient de déformation, paramètre qu'il convient de bien connaître pour améliorer l'incertitude des mesures de pressions supérieures à 100 MPa. Bibliographie

- LEGRAS J.C., HUOT A., DELAJOUD P. La référence nationale de pression du BNM dans le domaine de 5 à 200 MPa. <u>Bulletin du BNM</u>, n° <u>48</u>, Avril 1982, pp. 9-33.
- BLANCHI L., MAGHENZANI R., MOLINAR G.F. Banchi manometrici a pesi diretti per la misura delle pressioni fino a 100 MPa. <u>Fluid</u>, n° <u>167</u>, Mars 1978, pp. 35-40.
- JÄGER J., KLINGENBERG G., SHOPPA G. The PTB standard pressure balance for the 100 MPa range of measurement. <u>PTB-Mitteilungen</u>, <u>92</u>, 1982, pp. 321-327.
- 4. PEGGS G.N., LEWIS S.L. J. Phys. E, 10, 1977, pp. 1028-1034. et DADSON R.S., GREIG R.G.P., HORNER A. <u>Metrologia</u>, 1, 1965, pp. 55-67.

#### REMERCIEMENTS

Les travaux relatifs à la comparaison ont été réalisés, pour chacun des laboratoires participant à la première phase, par :

- Laboratoire National d'Essais (LNE), laboratoire agréé du Bureau National de Métrologie ; L. IRENEE, J.C. LEGRAS, V. MONNET, S. SALCEDO.

- Istituto di Metrologia "G. Colonnetti" (IMGC) ; L. BIANCHI, G. CERUTTI, R. MAGHENZANI, G.F. MOLINAR.

- National Bureau of Standards (NBS) ; V. BEAN, W. MARCUS, B. WALCH.

- National Physical Laboratory (NPL) ; P.J. ASHFORD, S.L. LEWIS, W.F. WALL, M.R. WHITE.

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ; J. JÄGER, G. KLINGENBERG.

Dr. MOLINAR, en tant que Président du Groupe de travail, est responsable, en collaboration avec le laboratoire pilote, du bon déroulement de la comparaison. Monsieur LEGRAS assure la centralisation des résultats. Les auteurs de l'article remercient leurs collègues pour leur contribution au travail de comparaison.



Fig. I.- Ecarts de linéarité pour chaque laboratoire.



Fig. 2.- Ecarts relatifs observés sur la section effective à pression nulle. La bande de transfert représente la dérive de l'étalon de transfert pendant l'intercomparaison.



Fig. 3.- Ecarts observés sur le coefficient de déformation.



Fig. 4.- Ecarts relatifs observés sur la section effective en fonction de la pression.