
COMITÉ CONSULTATIF
POUR
LA MASSE
ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

1^{re} SESSION — 1981



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

Dépositaire : OFFILIB, 48, rue Gay-Lussac, F-75005 Paris

ISBN 92-822-2076-1

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) a été créé par la Convention du Mètre signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (¹).

Le Bureau International a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques ; il est chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux ;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux ;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes ;
- d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système International d'Unités (SI), forme moderne du Système Métrique ;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et d'adopter les diverses résolutions scientifiques de portée internationale ;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International ; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 9 570 000 francs-or (en 1982), soit environ 17 400 000 francs français.

(¹) Au 31 décembre 1982, quarante-six États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemagne (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. Pop. Dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de Comités Consultatifs, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs, qui peuvent créer des « Groupes de travail » temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués de chacun des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de huit :

1. Le Comité Consultatif d'Électricité (CCE), créé en 1927.
2. Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité Consultatif de Photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le Comité Consultatif des Unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité Consultatif a remplacé la « Commission du Système d'Unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des Comités Consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (ce Recueil hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Président
J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

Président

A. PERLSTAIN, Membre du Comité International des Poids et Mesures,
Directeur de l'Office Fédéral de Métrologie, Wabern (Suisse).

Membres

- BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers.
- CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.
- CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (Australie).
- INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV [IMM], Leningrad.
- INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.
- ISTITUTO DI METROLOGIA G. COLONNETTI [IMGCI], Turin.
- NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Washington.
- NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington (Grande-Bretagne).
- NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Ibaraki (Japon).
- OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern (Suisse).
- PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.
- VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.
- Le Directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM], Sèvres.

ORDRE DU JOUR
de la 1^{re} Session

1. Ouverture de la Session :

- Désignation d'un rapporteur.
- Approbation de l'Ordre du jour.
- Les Comités Consultatifs dans la Convention du Mètre.
- Historique de ce Comité Consultatif.
- Organisation du travail de ce Comité Consultatif.

2. Travaux à poursuivre ou à entreprendre :

Discussion des différents rapports déjà établis :

- Domaine des masses.
Le rapport sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide doit-il être soumis au CIPM après approbation du CCM ?
- Domaine des forces.
- Domaine des pressions.

3. Questions diverses :

- Travaux du BIPM.
 - Publication des documents.
 - Rapport au CIPM et Recommandations.
 - Réunions ultérieures.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES
(1^{re} Session — 1981)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Par M. KOCHSIEK, Rapporteur

Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) a tenu sa première session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, du mardi 23 juin au jeudi 25 juin 1981.

Étaient présents :

A. PERLSTAIN, membre du CIPM, président du CCM.

Les délégués des laboratoires membres :

Bureau National de Métrologie, Paris : Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers (P. RIÉTY).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (G. CHAPMAN).
CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (D. B. PROWSE).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (SHI Changyan).
Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (Mme M. PLASSA, A. BRAY, G. F. MOLINAR).

National Bureau of Standards [NBS], Washington (D. R. FLYNN, C. R. TILFORD, R. S. DAVIS).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (D. P. THURNELL-READ, P. R. STUART).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki (K. IZUKA).

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (J.-G. ULRICH).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(M. KOCHSIEK).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. MUIJLWIJK).

Le Directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invité :

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava
(R. SPURNY).

Assistaient aussi à la session : T. J. QUINN, sous-directeur du BIPM;
J. TERRIEN, directeur honoraire du BIPM; P. CARRÉ, G. GIRARD,
A. SAKUMA, R. P. HUDSON, J. BONHOURE, Mme M.-J. COARASA,
(BIPM).

Absent :

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev, Leningrad.

1. Ouverture de la Session

Le Président ouvre la séance et souhaite la bienvenue aux participants.
M. Kochsiek est nommé rapporteur et l'Ordre du jour est adopté.

Le Président présente l'histoire des Recommandations du Comité International des Poids et Mesures (CIPM) de 1889 jusqu'à la formation, au cours des dernières années, de Groupes de travail dans les domaines concernant les mesures de masse, de force et de pression. Le Président remercie les membres de ces Groupes de travail dont les rapports seront étudiés au cours de la session. Le directeur du BIPM décrit les tâches d'un Comité Consultatif et souligne quelques détails relatifs à l'organisation. Les documents de travail ont été distribués à l'avance, par courrier; quelques documents de travail supplémentaires sont distribués au début de la session. La liste de ces documents est donnée en Annexe G 1.

Il est décidé que la dénomination de ce Comité Consultatif sera : « Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées » et son abréviation « CCM ».

2. Travaux à poursuivre ou à entreprendre

2.1. Masse

Une réunion concernant les mesures de masse s'est tenue en novembre 1976 au cours de laquelle trois Groupes de travail ont été créés (CCM/81-2).

Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide

La masse volumique de l'air ambiant intervient dans les comparaisons de masse où l'on doit tenir compte de la poussée de l'air. Elle est généralement calculée à partir des conditions ambiantes (pression, température, hygrométrie).

Le rapport du Groupe de travail Masse-1 (GT Masse-1) sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (CCM/81-5) est présenté. Pour le calcul de la masse volumique, diverses formules ont été employées dans le passé; le GT Masse-1 propose un mode de calcul unifié qui devrait permettre à l'avenir d'obtenir un meilleur accord entre les résultats des comparaisons de masse effectuées dans des laboratoires différents. Les incertitudes liées à l'application de cette formule ont été étudiées par le BIPM (CCM/81-6). Mr Riéty précise que des formules plus simples peuvent être données pour un domaine limité de grandeurs d'influence correspondant aux conditions de travail habituelles dans un laboratoire (CCM/81-31). Conformément à une suggestion de Mr Kochsiek (CCM/81-11), la rédaction de l'introduction est retouchée afin de mieux présenter la formule (1). Après une longue discussion, il est convenu de recommander au CIPM d'accepter la formule élaborée et de conseiller aussi son emploi dans d'autres domaines [Recommandation G 1 (1981)] (voir p. G 10).

Mr Quinn signale une difficulté relative à la valeur de la constante universelle des gaz R . Pour calculer la masse volumique de l'air, on a utilisé la valeur recommandée actuellement par CODATA. Étant donné, d'une part, que CODATA est en train d'élaborer une nouvelle valeur de R et, d'autre part, qu'une détermination expérimentale plus précise de la masse volumique de l'air pourrait nécessiter une modification des formules, on décide d'appeler cette formule « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) ».

La Comisión Nacional de Metrología y Metrotecnica (Espagne) a signalé dans une lettre qu'elle avait cru trouver une erreur dans la formule 12, mais après un contrôle, celle-ci s'avère correcte.

Il serait désirable de publier ce document en français et en anglais.

Le CCM remercie les membres du GT Masse-1, MM. Carré, Riéty, Jones et Kochsiek, pour le travail fourni et décide la dissolution de ce Groupe de travail.

Étalons primaires en acier inoxydable

Il y a quelques années (entre 1976 et 1978), le Groupe de travail Masse-3 (GT Masse-3) a élaboré un questionnaire relatif aux étalons de masse (CCM/81-13 A). Un rapport (CCM/81-13 B) et divers documents (CCM/81-13 C à H) ont été diffusés. Une partie de ces informations ainsi rassemblées est relative aux étalons en acier inoxydable. Elle est complétée par les délégués. Les questions suivantes se posent : faut-il que la matière ait une masse volumique proche de la valeur de référence de $8\,000\text{ kg/m}^3$

fixée par la métrologie légale ? — Quel est le matériau le plus approprié ? — Quelles sont les exigences relatives à la surface et à son usinage ?

Il est souvent difficile de se procurer les matériaux nécessaires. La plupart des instituts nationaux mettent à l'épreuve des aciers austénitiques, inoxydables et presque non-magnétiques, présentant des teneurs élevées en Cr (plus de 20 %) et en Ni (plus de 20 %). Les noms commerciaux sont entre autres : Nimonic 105, Immaculate 5 (NPL, IMG), Contraperm (PTB, OFMET), Alacrite (INM); voir aussi le document CCM/81-13 E (ASMW).

Mr Thurnell-Read signale des possibilités de surfaçage évitant l'incrustation d'impuretés :

- a) Surfaçage au tour à l'aide d'outils à pastille de diamant, méthode pratiquée au BIPM pour la finition des étalons en platine iridié (CCM/81-13 H).
- b) « Laser glazing », nouveau procédé mis au point par l'Imperial College de l'Université de Londres.

En raison du lien avec la métrologie légale, une masse volumique de $8\,000\text{ kg/m}^3$ est préférable bien que, dans le domaine scientifique, la valeur de la masse volumique des étalons ne joue qu'un rôle mineur (voir aussi le document CCM/81-25).

Le CCM crée un Groupe de travail « Étalons de masse en acier inoxydable », dont les tâches seront d'analyser les travaux réalisés jusqu'ici, de stimuler des recherches et éventuellement de proposer, à une date ultérieure, un matériau à employer par tous les laboratoires. La présidence en est assurée par Mme Plassa (IMG). (La liste des membres figure à la page G 12, de même que celle des autres Groupes de travail).

Conservation des étalons

Mr Girard présente le rapport sur les activités du Groupe de travail Masse-3 (CCM/81-13 A à H). Le président, de même que Mr Giacomo, précisent qu'au fur et à mesure que l'écart-type des balances diminue, les problèmes du nettoyage et de la conservation des étalons de masse prennent de l'importance.

Mr Quinn résume les travaux effectués au BIPM pour réaliser de nouveaux étalons en platine iridié (CCM/81-13 H) en évitant l'incrustation superficielle d'impuretés grâce à l'utilisation d'outils à pastille de diamant.

Mr Thurnell-Read décrit les expériences faites avec le prototype N° 18 en platine iridié. Il a constaté qu'après nettoyage, la masse de celui-ci présente, par rapport à la moyenne d'un ensemble d'étalons, des variations brusques et pas toujours reproductibles. Mme Plassa attire l'attention sur le fait que des résidus de détergent restent à la surface des étalons (CCM/81-32).

Mr Muijlwijk signale que le VSL effectue actuellement des comparaisons de masse sous vide.

Le CCM décide que le GT Masse-3 continuera ses activités : évaluer les

résultats obtenus jusqu'ici et stimuler de nouvelles recherches. Ce Groupe de travail porte le nom de Groupe de travail « Conservation des étalons de masse »; Mr Girard (BIPM) en assure la présidence (voir page G 12).

Mesure directe de la masse volumique de l'air

MM. Davis, Prowse et Iizuka présentent le rapport du Groupe de travail Masse-2 sur les résultats de mesures directes de la masse volumique de l'air (CCM/81-12). Des effets « superficiels » inconnus jusqu'ici posent des problèmes. Les meilleurs résultats donnent une incertitude (3σ) de $\pm 3,5 \times 10^{-5}\text{ kg/m}^3$ (CCM/81-19).

Le Groupe de travail doit continuer ses travaux, à savoir : susciter des mesures dans des atmosphères définies, évaluer les résultats et comparer la masse volumique de l'air calculée selon la formule recommandée avec les valeurs expérimentales. Ce Groupe est dénommé Groupe de travail « Mesure directe de la masse volumique de l'air »; Mr Prowse (CSIRO) en est le président (voir page G 12).

Terminologie : masse et poids

Le Président constate que le deuxième alinéa de la déclaration de la 3^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1901) *, « Le terme *poids* désigne une grandeur de la même nature qu'une *force*... », donne lieu à des contestations d'ordre terminologique. De l'avis des délégués présents, s'il y a des difficultés concernant le sens des termes « masse », « poids », « poids étalon », etc., ce n'est pas dans le domaine scientifique mais dans le langage courant. Certains pays où l'adoption du système SI est récente, éprouvent des difficultés particulières. Ce problème fait l'objet de deux documents (CCM/81-23 et 29).

Une longue discussion s'ensuit, au cours de laquelle diverses suggestions sont avancées : définir, par exemple, le poids comme l'indication donnée par une balance et la « gravitance » comme la force de pesanteur; se référer à l'OIML et à l'ISO, considérées comme plus compétentes en la matière; savoir si, dans le langage populaire, le mot poids a le sens de force de pesanteur plutôt que celui de masse; créer un nouveau Groupe de travail.

Le Président résume la situation. Il ne faut pas s'attendre à une solution rapide. Il faut connaître le point de vue de l'OIML à cet égard, puisque les problèmes relèvent du domaine de la métrologie légale. Le CCM formule la déclaration suivante :

« Dans la discussion concernant l'usage des mots « masse » et « poids », le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs

* Le texte de cette déclaration figure dans les *Comptes Rendus des séances de la 3^e Conférence Générale des Poids et Mesures, 1901*, p. 70 et est reproduit dans *Le Système International d'Unités (SI)*, 1981, 4^e édition, p. 22.

apparentées (CCM) a exprimé l'opinion qu'aucune difficulté sérieuse n'apparaît en métrologie scientifique.

« Cependant, le CCM a été informé que dans le domaine de la métrologie légale, les difficultés sont sérieuses.

« Le CCM a le sentiment que le Comité International de Métrologie Légale devrait être consulté sur les problèmes posés par les mots « masse » et « poids ». »

Balances

Ces dernières années, quelques balances à bras égaux ont été révisées et améliorées (p. ex. : CCM/81-22). Les écarts-types ont pu être réduits à 1 µg pour 1 kg de charge maximale. A l'avenir, l'entretien des anciennes balances de haute précision deviendra difficile, puisqu'il n'y a plus que deux fabricants de telles balances dans le monde (Chyo Balance Corporation à Kyoto (Japon) et Voland Corporation à New Rochelle (USA)).

Pour l'étude du comportement de la surface des étalons de masse, il serait souhaitable que quelques laboratoires reprennent le problème des pesées sous vide.

Dans l'avenir il semble que les balances seront probablement munies de suspensions flexibles à la place des couteaux, qu'elles opéreront automatiquement dans une enceinte à atmosphère régulée et seront de construction symétrique, en particulier en ce qui concerne le fléau (voir aussi le document CCM/81-21).

Masse volumique de l'eau

La masse volumique de l'eau intervient dans la plupart des mesures de volume et de masse volumique et, en particulier, dans les comparaisons de masses lorsque l'on veut déterminer la correction due à la poussée de l'air.

Des mesures de la masse volumique de l'eau et de différents corps solides sont effectuées dans plusieurs laboratoires. Mr Giacomo mentionne les travaux de détermination de la masse volumique de l'eau et des étalons de masse, (CCM/81-24, 27, 28), travaux importants pour la métrologie des masses.

Le BIPM a surtout étudié les effets de la composition isotopique de l'eau et des gaz atmosphériques dissous sur la masse volumique de l'eau. Le CSIRO et le NRLM ont déterminé la valeur absolue de la masse volumique de l'eau de 0 °C à + 44 °C et, en particulier, sa valeur maximale à $t = 3,989$ °C.

Présentement, l'IMGC et la PTB font des mesures à l'aide de corps en Zerodur.

Une discussion s'engage sur le nettoyage des surfaces des solides. Dans les conditions d'environnement habituelles, des couches minces d'eau sur les surfaces sont inévitables; 2 µg/cm² correspondent à environ 50 couches moléculaires d'eau. Le nettoyage à l'eau, à l'alcool éthylique ou à l'alcool

méthyllique donne de bons résultats soit par lavage suivant le procédé habituel, soit en utilisant un bain à ultrasons et en procédant ensuite à un chauffage sous vide à 150 °C. Mme Plassa signale que si l'on emploie des solvants tels que l'acétone, des traces du solvant absorbées à la surface peuvent être décelées au moyen d'un spectromètre de masse. Mr Stuart mentionne un détergent fabriqué par la Société Shell (Teepol).

2.2. Force

Mr Bray présente un rapport sur les activités du Groupe de travail créé en mars 1980 lors de la réunion concernant les mesures de force (CCM/81-4, 14). Il souligne en particulier que des programmes de comparaison de machines de mesure de force sont entrepris au sein de la Communauté Européenne et qu'il est envisagé d'étendre ces mesures comparatives à tous les laboratoires intéressés.

Le Président explique que la force, qui est une grandeur apparentée, devrait plutôt être traitée par les services d'étalonnage. Une discussion suit pour déterminer dans quelle mesure le CCM doit s'occuper des mesures de force. Les participants constatent que les mesures de force nécessaires pour les besoins industriels incombent aux laboratoires nationaux. Pour diverses raisons (personnel, installations), le BIPM ne peut que coordonner les travaux. En raison de la complexité du problème, le NPL procédera à des comparaisons entre les installations existant en Europe et aux États-Unis, la PTB effectuant des mesures comparatives avec celles d'Europe et d'Asie.

Le Groupe de travail existant continuera ses activités sous la présidence de Mr Bray (IMGC); son nom est Groupe de travail « Force » (voir page G 13).

2.3. Pression

Dans le domaine des mesures de pression, quatre Groupes de travail ont été créés en mars 1979 lors de la réunion concernant les mesures de pression (CCM/81-3). Ils ont déjà préparé des comparaisons. Il est décidé de les maintenir en activité comme Groupes de travail du CCM.

Moyennes pressions

Mr Stuart présente un rapport sur les travaux en cours dans le domaine de 1 kPa à 1 MPa (CCM/81-8, 16, 34). Les membres du Groupe de travail estiment qu'une balance de pression (jauge à piston) sera le meilleur étalon de transfert (voir à ce sujet le document CCM/81-33). L'appareillage est en cours d'assemblage et d'étalonnage. Il comprend deux ensembles piston-cylindre du commerce spécialement choisis et une base construite spécialement pour que les mesures de température et de vide soient plus aisées. Une discussion s'engage : l'appareillage prévu répond-il de façon

optimale aux exigences requises ou la cellule à point triple de l'argon serait-elle un meilleur étalon de transfert ? Il est clair qu'étalon de transfert et étalon de laboratoire sont deux choses différentes. Il faut examiner d'abord la qualité de l'étalon de transfert choisi avant de discuter de l'étalon de transfert optimal.

Ce Groupe de travail continuera ses activités sous la présidence de Mr Stuart (NPL); son nom est Groupe de travail « Moyennes pressions » (voir page G 13).

Hautes pressions

Mr Molinar présente un rapport détaillé sur les travaux en cours dans le domaine des pressions supérieures à 1 MPa (CCM/81-3, 7, 15). Il signale qu'en juin 1981, huit laboratoires commenceront des mesures comparatives, à plusieurs niveaux de pression, entre les étalons nationaux. Le Groupe de travail s'intéresse aussi aux très hautes pressions à partir de 100 MPa.

Ce Groupe de travail est placé sous la présidence de Mr Molinar (IMGC) et dénommé Groupe de travail « Hautes pressions » (voir page G 13).

Basses pressions

Mr Tilford explique le travail et les objectifs du Groupe de travail dans le domaine des pressions de 1 Pa à 1 kPa (CCM/81-9, 17). Les premiers résultats de la comparaison NBS-NPL ont été présentés.

Ce Groupe de travail est présidé par Mr Tilford (NBS) et dénommé Groupe de travail « Basses pressions » (voir page G 14).

Très basses pressions

Mr Kochsiek présente un bref rapport sur le travail et les objectifs du Groupe de travail dans le domaine des pressions de 10^{-4} à 1 Pa (CCM/81-18). Mr Iizuka signale un étalon de mesure du vide de l'Electrotechnical Laboratory au Japon (CCM/81-30).

Ce Groupe de travail est présidé par Mr Messer (PTB) et dénommé Groupe de travail « Très basses pressions » (voir page G 14).

3. Questions diverses

Masse volumique de liquides et de solides

Mr Davis propose que le CCM s'occupe, en plus de la masse volumique de l'eau, de la masse volumique de solides, particulièrement en raison de l'importance actuelle des mesures visant à déterminer la constante d'Avogadro. Mr Prowse demande que l'on effectue aussi des mesures de la

masse volumique du mercure, car des différences inattendues d'environ 10^{-6} ont été décelées récemment en particulier dans le cas du mercure très pur. Il est décidé de créer un Groupe de travail dont la tâche consistera à analyser les travaux effectués jusqu'ici, à coordonner les travaux courants et à encourager des efforts nouveaux dans ce domaine.

Ce Groupe de travail est placé sous la présidence de Mr Iizuka (NRLM) et dénommé Groupe de travail « Masse volumique de liquides et solides » (voir page G 13).

Publications dans Metrologia

Mr Hudson annonce que *Metrologia* continue de paraître sous l'égide du CIPM et que l'on est à la recherche de contributions traitant en particulier de la métrologie des pressions. De même, les résultats de comparaisons seraient appréciés.

Activités du BIPM

Mr Giacomo signale le surcroît de travail du BIPM dans le domaine de la masse où il ne dispose que de deux collaborateurs; il doit donc se borner à poursuivre les travaux déjà engagés (par ex., CCM/81-26) et à préparer la comparaison des prototypes nationaux demandée par la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures.

Publication des documents

Mr Giacomo explique les possibilités de publication dont disposent le CCM et ses Groupes de travail. Les Présidents des Groupes de travail élaborent de brefs rapports annuels ainsi que des rapports plus détaillés pour les séances du CCM après l'achèvement de certains travaux. Ces derniers sont joints au rapport du CCM sous forme d'annexes. Outre la publication dans *Metrologia*, il est possible de publier des contributions en tant que monographies BIPM.

Rapport au CIPM

Le rapport de cette première session du CCM sera présenté au CIPM. Il comportera les deux propositions de Recommandations, l'une G 1 (1981), pour l'adoption de la « Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) », l'autre, G 2 (1981), pour encourager les laboratoires nationaux dans la poursuite et l'intensification de leurs travaux dans les domaines intéressant le CCM. La déclaration relative aux mots « masse » et « poids » sera incluse dans le rapport.

Réunions ultérieures

Mr Tilford propose que toutes les réunions dans le domaine des pressions soient groupées pour réduire les frais de déplacement. Mr Giacomo demande aux Présidents, dans toute la mesure du possible, de travailler par correspondance et de combiner les réunions des Groupes de travail avec d'autres réunions ou conférences. Pour les Groupes de travail une date en 1983 ou juste avant la 2^e session du CCM en 1984 paraît être raisonnable.

*
* *

Le Président lève la séance en remerciant les délégués de leur précieuse collaboration. Aux neuf Groupes de travail, il souhaite la pleine réussite de leurs activités.

Novembre 1981, révisé juillet 1982

Recommandations du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées présentées au Comité International des Poids et Mesures

Calcul de la masse volumique de l'air humide

RECOMMANDATION G 1 (1981)

Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées, *rappelant* les termes de la Résolution 1 de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1979) et en particulier que les laboratoires doivent intensifier les travaux en vue d'une meilleure détermination de la poussée de l'air,

considérant

— que, si l'on calcule la masse volumique de l'air à partir des conditions ambiantes, il y a intérêt à utiliser pour ce calcul une formule unique, bien connue et dont tous les paramètres soient précisés,

— qu'une telle formule a été élaborée par un Groupe de travail international,

— que cette formule peut avoir des applications dans d'autres domaines de la métrologie,

recommande que la formule élaborée par ce Groupe de travail soit adoptée pour le calcul des corrections de poussée de l'air dans les pesées de haute précision et soit portée à la connaissance des utilisateurs éventuels dans d'autres domaines.

Poursuite et intensification des travaux

RECOMMANDATION G 2 (1981)

Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,

considérant

— les Résolutions 3 de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures et 1 de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures,

— les besoins métrologiques exprimés par les représentants de laboratoires nationaux lors de la première réunion du Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,

— l'ampleur des travaux à effectuer dans les différents domaines des mesures de masse, de masse volumique, de force et de pression,

— la difficulté de satisfaire les besoins scientifiques les plus exigeants dans le domaine des mesures de masse volumique et les besoins de la technologie avancée dans le domaine des mesures de force ou de pression,

— le besoin permanent de maintenir la qualité et d'approfondir les connaissances dans le domaine des mesures de masse, en particulier pour fournir les bases des grandeurs précédentes,

recommande que les laboratoires nationaux poursuivent et intensifient leurs travaux métrologiques dans ces différents domaines.

**Composition des Groupes de travail du CCM
(1982)**

(L'astérisque indique le laboratoire qui assure la présidence du Groupe de travail).

Groupe de travail « Mesure directe de la masse volumique de l'air »

- Československý Metrologický Ústav [CSMU], Tchécoslovaquie
- * CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Australie
- Institut National de Métrologie [NIM], Rép. Pop. de Chine
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Japon
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

Groupe de travail « Conservation des étalons de masse »

- * Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]
- Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], U.R.S.S.
- National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Japon
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne
- Van Swinden Laboratorium [VSL], Pays-Bas

Groupe de travail « Étalons de masse en acier inoxydable »

- Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]
- Československý Metrologický Ústav [CSMU], Tchécoslovaquie
- Institut National de Métrologie [INM], France
- * Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Italie
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Japon
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

Groupe de travail « Masse volumique de liquides et solides »

- Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]
- CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Australie
- Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Italie
- National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- * National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Japon
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

Groupe de travail « Force »

- Institut National de Métrologie [NIM], Rép. Pop. de Chine
- * Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Italie
- Laboratoire National d'Essais [LNE], France
- National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- Orszagos Mérésügyi Hivatal [OMH], Hongrie
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

Groupe de travail « Hautes pressions »

- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen [BEV], Autriche
- Československý Metrologický Ústav [CSMU], Tchécoslovaquie
- Comité d'État de l'U.R.S.S. pour les Normes [GOST], U.R.S.S.
- * Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Italie
- Laboratoire National d'Essais [LNE], France
- National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
- National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
- National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Japon
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

Groupe de travail « Moyennes pressions »

- Československý Metrologický Ústav [CSMU], Tchécoslovaquie
- CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Australie
- Institut National de Métrologie [INM], France
- National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
- * National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni

Groupe de travail « Basses pressions »

- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen [BEV], Autriche
Centre d'Essais en Vol [CEV], France
CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Australie
* National Bureau of Standards [NBS], États-Unis d'Amérique
National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni

Groupe de travail « Très basses pressions »

- Československý Metrologický Ústav [CSMU], Tchécoslovaquie
Institut National de Métrologie [NIM], Rép. Pop. de Chine
Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Italie
Laboratoire National d'Essais [LNE], France
National Physical Laboratory [NPL], Royaume-Uni
* Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Rép. Féd. d'Allemagne

ANNEXE G 1

Documents de travail présentés à la 1^{re} Session du CCM

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés dans ce volume, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

- | Document
CCM/ | |
|------------------|---|
| 81-1 | Textes de la Résolution 3 adoptée par la 15 ^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) et de la Résolution 1 adoptée par la 16 ^e CGPM. |
| 81-2 | Rapport sur la réunion concernant les masses (novembre 1976), par T. J. Quinn. Ce texte a été publié dans <i>Procès-Verbaux CIPM</i> , 45 , 1977, pp. A1-A24. |
| 81-3 | Rapport sur la réunion concernant les mesures de pression (mars 1979), par P. R. Stuart. Ce texte a été publié dans <i>Procès-Verbaux CIPM</i> , 48 , 1980, pp. A1-A7. |
| 81-4 | Rapport sur la réunion concernant les mesures de force (mars 1980), par A. Bray. Ce texte a été publié dans <i>Procès-Verbaux CIPM</i> , 48 , 1980, pp. B1-B10. |
| 81-5 | Rapport du Groupe de travail N° 1 - Masse : Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide.
Le texte définitif de ce document, légèrement modifié après discussion par les membres du CCM, figure en Annexe G 2, p. G 19. Une version en anglais de ce texte a paru dans <i>Metrologia</i> , 18 , 1982, pp. 33-40. |
| 81-6 | BIPM. — Note sur l'incertitude de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide, par P. Carré. Ce texte constitue le Rapport BIPM 78/8. |
| 81-7 | 1 ^{er} Rapport du Groupe de travail « Hautes pressions » (réunion de juin 1980), par G. F. Molinar. |

- 81-8 1^{er} Rapport du Groupe de travail « Moyennes pressions » (juillet 1980), par P. R. Stuart.
- 81-9 1^{er} Rapport du Groupe de travail « Basses pressions » (juin 1980), par C. R. Tilford.
- 81-10 Note sur les publications du BIPM.
- 81-11 PTB (République Fédérale d'Allemagne). — Sur la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide.
- 81-12 Rapport du Groupe de travail N° 2 — Masse (Méthodes de mesure directe de la poussée de l'air). Ce texte comporte quatre annexes :
- A. Extrait d'une lettre de Vincent E. Bower (NBS).
 - B. Mesure de la masse volumique de l'air par Y. Kobayashi (NRLM).
 - C. Extrait d'une lettre concernant l'état d'avancement des travaux sur la mesure directe de la masse volumique de l'air, par J. Thomas (Université de Lyngby, Danemark).
 - D. Evaluation of air density for calculating aerostatic force corrections in precise measurements of mass, by S. I. Toropin and V. C. Snegov.
- 81-13 Rapport du Groupe de travail N° 3 - Masse (Conservation, stabilité des étalons de masse). Ce texte comporte huit annexes :
- A. Questionnaire diffusé en novembre 1977.
 - B. Synthèse des réponses reçues au questionnaire.
 - C. Water sorption layers at the surface of mass standards, by M. Kochsiek (PTB).
 - D. Stability of weights influenced by cleaning and handling, by R. Balhorn (PTB).
 - E. Stabilité des étalons de masse en acier inoxydable de masse volumique proche de $8\,000\text{ kg m}^{-3}$ (ASMW).
 - F. Lettre de R. S. Davis (NBS).
 - G. Extrait d'une lettre de Mme Smirnova (IMM). (Le texte d'une publication jointe en langue russe n'a pas été diffusé.)
 - H. The manufacture of Pt - 10 % Ir prototype kilograms at BIPM by T. J. Quinn (textes en anglais et en français).

- 81-14 Rapport du Groupe de travail « Force », par A. Bray.
- 81-15 2^e Rapport du Groupe de travail « Hautes pressions » (mars 1981), par G. F. Molinar.
- 81-16 2^e Rapport du Groupe de travail « Moyennes pressions » (avril 1981), par P. R. Stuart.
- 81-17 2^e Rapport du Groupe de travail « Basses pressions » (mars 1981), par C. R. Tilford.
- 81-18 1^{er} Rapport du Groupe de travail « Très basses pressions » (mars 1981), par G. Messer.
- 81-19 CSIRO (Australie). — Fundamental measurement of air density, by D. B. Prowse.
- 81-20 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Equipment for measuring the air density in relation to standard air, by R. Balhorn.
- 81-21 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Research on measuring methods for the determination of mass differences with uncertainties not exceeding 1 part in 10^9 , by M. Kochsiek.
- 81-22 CSMU (Tchécoslovaquie). — Metrological balance for comparison of primary standards with national standard of mass in CSMU, by R. Spurny.
- 81-23 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Problem « weight », by S. German.

Documents distribués au cours de la session

- 81-24 BIPM. — Influence de la teneur en gaz atmosphérique dissous sur la masse volumique de l'eau, par G. Girard et M.-J. Coarasa.
- 81-25 To allow an adjustment of a weight mass to a certain class of accuracy how accurately should its density be known ?, by J. Thomas.
- 81-26 Projet de rapport sur la comparaison d'étalons de masse entre le BIPM, le NRLM, et le CSIRO, par G. Girard.
- 81-27 NRLM (Japon). — NRLM activities on mass and related quantities, by K. Iizuka. Ce texte comprend 3 annexes :
- A. On the precise correction of the buoyancy and gas adsorption in the mass measurement, by Y. Kobayashi.

- B. A dead weight piston manometer for use up to 2 GPa, by K. Nishibata, S. Yamamoto and R. Kaneda, *Jap. J. Appl. Phys.*, **19**, 1980, pp. 2245-2256.
- C. Calibration of a gas-operated dead-weight piston manometer, by S. Yamamoto.
- 81-28 IMG C (Italie). — Precision measurement on solid artifacts for a redetermination of the density of water, by A. Peuto, A. Sacconi, R. Panciera, W. Pasier and M. Pasetti.
- 81-29 NRLM (Japon). — Comment on the terminology related to « weight », by K. Iizuka.
- 81-30 ETL (Japon). — Comment of Electrotechnical Laboratory on vacuum standards, by M. Ono and M. Hirata.
- 81-31 INM (France). — Calcul simplifié de la masse volumique de l'air humide, par P. Riéty.
- 81-32 IMG C (Italie). — Activité de l'IMG C dans le domaine des masses.
- 81-33 CSMU (Tchécoslovaquie). — Projet et réalisation du nouvel étalon de pression à piston dans le domaine 0,2 MPa à 0,6 MPa, par J. Synáček.
- 81-34 Proposal for international intercomparison of barometric pressure standards, by P. R. Stuart.

Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981)

Avertissement

Le présent document a été préparé par le Groupe de travail 1 constitué au cours de la réunion internationale concernant les masses, tenue au BIPM les 23 et 24 novembre 1976 [1]. Les membres de ce Groupe de travail étaient MM. P. Riéty (Institut National de Métrologie, Paris), F. E. Jones (National Bureau of Standards, Washington), P. Carré (Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres) auxquels a été adjoint Mr M. Kochsiek (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig).

Le Groupe de travail s'est fixé pour objectif d'assurer l'unification des méthodes utilisées par les divers laboratoires pour la détermination de la masse volumique de l'air humide, grandeur qui intervient directement dans la correction dite de « poussée de l'air » lors de la comparaison dans l'air de deux étalons de masse de volumes différents.

Ce document, qui comporte une formule pour le calcul de la masse volumique de l'air humide ainsi que des tableaux et formules auxiliaires pour l'application de cette formule, a été approuvé par le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) (1^{re} session, juin 1981) puis par le Comité International des Poids et Mesures (70^e session, octobre 1981).

Quelques modifications rédactionnelles ont été apportées à la version initiale de ce document (Rapport BIPM-79/10). Elles résultent des commentaires de divers laboratoires et des discussions qui ont eu lieu au CCM. Elles ne modifient en rien les valeurs numériques.

Pour sa part, le BIPM a mis en application dès octobre 1979 la formule proposée.

Introduction

Lors de la comparaison par pesée dans l'air d'une masse m_2 à une masse m_1 , on détermine en fait, en raison de la poussée d'Archimède, la différence Δm entre les grandeurs $m_2 - \rho V_2$ et $m_1 - \rho V_1$, où V_1 et V_2 représentent

* Ce document a été publié dans *Procès-Verbaux CIPM*, **49**, pp. C1-C15.

les volumes des corps de masses m_1 et m_2 , et ρ la masse volumique de l'air dans les conditions de la pesée. L'écart réel Δm entre les masses m_2 et m_1 est donné par

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \Delta' m + \rho(V_2 - V_1). \quad (1)$$

Le terme $\rho(V_2 - V_1)$ est appelé « correction de poussée de l'air ».

Pour les pesées de grande exactitude, il est impératif de déterminer la masse volumique de l'air avec la plus grande exactitude possible, particulièrement si les masses volumiques des corps de masses m_1 et m_2 sont très différentes. C'est ainsi que si l'on compare deux étalons de masse, de valeurs nominales 1 kg, l'un en acier inoxydable, l'autre en platine iridié, une erreur $\delta\rho$ sur ρ entraîne sur la masse m_2 de l'étalon en acier inoxydable une erreur

$$\delta m_2 \approx 0,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times \delta\rho \quad (2)$$

soit une erreur de l'ordre de 10 μg pour une erreur relative sur ρ de 10^{-4} .

Le but de ce document est de fournir les éléments nécessaires au calcul de la masse volumique de l'air, en tenant compte de données récentes concernant ses propriétés thermodynamiques, afin que les différents laboratoires concernés par les pesées de grande précision puissent déterminer de façon uniforme et dans les meilleures conditions possibles la correction de poussée de l'air en fonction des conditions expérimentales de leurs pesées.

Des informations complémentaires pourront être trouvées dans les références [2 à 4] qui ont servi de base à l'élaboration de ce document, ainsi que dans les différents articles cités dans la bibliographie.

1. Principe de base

En général, la masse volumique de l'air ne se détermine pas directement mais se calcule par l'application d'une formule en tenant compte des conditions expérimentales.

Prenons un volume V de gaz, à la pression p et à la température T . Soit n la quantité de matière contenue dans V . Si l'on considère tout d'abord le gaz comme parfait, on a la relation

$$pV = nRT \quad (3)$$

où R est la constante molaire des gaz.

Pour un gaz réel, il faut tenir compte de son facteur de compressibilité Z . On a alors

$$pV = nZRT. \quad (4)$$

Si l'on désigne par m la masse du gaz et par M sa masse molaire, sa masse volumique ρ est donnée par

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{nM}{V} \quad (5)$$

soit

$$\rho = \frac{pM}{ZRT}. \quad (6)$$

On peut appliquer cette relation à l'air humide qui comporte une fraction molaire x_v de vapeur d'eau, de masse molaire M_v , et une fraction molaire $(1 - x_v)$ d'air sec, de masse molaire M_a ; on a dans ces conditions

$$M = (1 - x_v)M_a + x_vM_v = M_a - x_v(M_a - M_v) \quad (7)$$

soit

$$M = M_a \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (8)$$

d'où

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (9)$$

C'est l'expression (9) qui sert de base au calcul de la masse volumique de l'air humide.

2. Spécification des paramètres de la formule (9)

L'expression (9) fait intervenir un certain nombre de paramètres, dont certains sont considérés comme des constantes et peuvent être introduits une fois pour toutes dans la formule, et dont les autres doivent être déterminés lors de chaque pesée en fonction des conditions expérimentales.

2.1. Constante molaire des gaz

R est une constante universelle. Bien que des études soient actuellement en cours pour une nouvelle détermination [7, 8] et dans l'attente d'une confirmation des résultats de ces mesures, on adopte la valeur admise habituellement [9]

$$R = 8,314\,41 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (10)$$

2.2. Masse molaire de l'air sec

La masse molaire de l'air sec est une masse molaire moyenne qui se calcule en tenant compte des masses molaires de ses différents constituants et de leurs fractions molaires respectives (en négligeant toutefois ceux qui n'existent qu'à l'état de traces). L'expérience montre que la composition de l'air sec n'est pas rigoureusement constante [10 à 16]. On peut néanmoins considérer qu'en première approximation cette composition est celle de l'air sec de référence dont les caractéristiques sont données dans le tableau I. Ces caractéristiques sont conformes à celles de la référence [17] sauf en ce qui concerne la fraction molaire de l'argon, qui a été prise égale à 0,009 17 pour tenir compte des mesures plus récentes [18, 19] que celles utilisées dans [17]. De plus, la fraction molaire du dioxyde de carbone (CO_2) a été prise

égale à 4×10^{-4} , pour se rapprocher des valeurs réelles mesurées en laboratoire [2, 3]. On a admis, suivant les hypothèses de Kroch - cité par Paneth [14] - et Glueckauf [15], que cette augmentation locale de concentration en CO₂ était compensée par une diminution corrélative de la concentration en oxygène, la somme des fractions molaires de ces deux gaz restant constante. Par ailleurs, certaines valeurs de la référence [17] ont été arrondies, en ne conservant qu'un nombre de chiffres suffisant pour les besoins du calcul de la masse molaire M_a . Néanmoins, dans les calculs intermédiaires (contribution de chaque constituant) on a conservé certaines décimales non significatives.

On trouve ainsi, avec les données du tableau I

$$M_a = \frac{\sum x_i M_i}{\sum x_i} = 28,963 5 \times 10^{-3} \text{ kg/mol.} \quad (11)$$

TABLEAU I

Composition de l'air sec de référence

Constituant	Masse molaire M_i (en 10^{-3} kg/mol)	Fraction molaire x_i	Contribution $x_i \cdot M_i$ (en 10^{-3} kg/mol)
N ₂	28,013 4	0,781 01	21,878 746
O ₂	31,998 8	0,209 39	6,700 229
Ar	39,948	0,009 17	0,366 323
CO ₂	44,010	0,000 40	0,017 604
Ne	20,18	$18,2 \times 10^{-6}$	0,000 367
He	4,0	$5,2 \times 10^{-6}$	0,000 021
CH ₄	16,0	$1,5 \times 10^{-6}$	0,000 024
Kr	83,8	$1,1 \times 10^{-6}$	0,000 092
H ₂	2	$0,5 \times 10^{-6}$	0,000 001
N ₂ O	44	$0,3 \times 10^{-6}$	0,000 013
CO	28	$0,2 \times 10^{-6}$	0,000 006
Xe	131	$0,1 \times 10^{-6}$	0,000 013

Lorsqu'on a la possibilité de mesurer la concentration en CO₂ de l'air effectivement utilisé lors de la pesée, on peut obtenir une valeur plus exacte de la masse molaire de l'air sec en tenant compte de la fraction molaire x_{CO_2} du dioxyde de carbone, selon la formule

$$M_a = [28,963 5 + 12,011 (x_{\text{CO}_2} - 0,000 4)] \times 10^{-3} \text{ kg/mol.} \quad (12)$$

2.3. Masse molaire de l'eau

Si l'on adopte pour M_a la valeur donnée en (11), et en prenant

$$M_v = 18,015 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \quad (13)$$

on trouve

$$1 - \frac{M_v}{M_a} = 0,378 0. \quad (14)$$

En tenant compte des valeurs de R , de M_a et de $(1 - M_v/M_a)$ indiquées ci-dessus en 2.1, 2.2 et 2.3, on trouve pour la masse volumique ρ de l'air humide les expressions suivantes

$$\rho = 3,483 53 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1} \times \frac{p}{ZT} (1 - 0,378 0 x_v) \quad (15)$$

ou encore, si l'on connaît la fraction molaire x_{CO_2} du dioxyde de carbone

$$\rho = [3,483 53 + 1,44 (x_{\text{CO}_2} - 0,000 4)] \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1} \times \frac{p}{ZT} (1 - 0,378 0 x_v) \quad (16)$$

2.4. Humidité [6]

La fraction molaire x_v ne se mesure pas directement mais se détermine à partir de l'humidité relative h ou de la température t_r du point de rosée.

2.4.1. - L'humidité relative est définie comme le rapport de la fraction molaire x_v de la vapeur d'eau dans l'air humide à la fraction molaire x_{sv} de la vapeur d'eau dans l'air humide saturé à la même température et à la même pression :

$$h = \frac{x_v}{x_{sv}} \quad (17)$$

Par ailleurs, x_{sv} se calcule en fonction de la pression de vapeur saturante $p_{sv}(t)$ correspondant à la même température t . Mais, compte tenu du fait que l'air humide ne se comporte pas comme un gaz parfait, il y a lieu d'introduire un facteur correctif f , appelé « facteur d'augmentation », qui dépend de la température et de la pression; on a alors

$$x_{sv} = f(p, t) \cdot \frac{p_{sv}(t)}{p} \quad (18)$$

ce qui donne

$$x_v = h \cdot f(p, t) \cdot \frac{p_{sv}(t)}{p} \quad (19)$$

2.4.2. - Dans le cas où x_v est déterminée au moyen d'un hygromètre à point de rosée, on a

$$x_v = x_{sv}(p, t_r) \quad (20)$$

c'est-à-dire, d'après (18),

$$x_v = f(p, t_r) \cdot \frac{p_{sv}(t_r)}{p} \quad (21)$$

2.4.3. - On a porté dans le tableau II les valeurs de la pression de vapeur d'eau saturante p_{sv} pour des températures variant entre 0 °C et

$t\text{ (}^{\circ}\text{C)}$,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0	611,2	615,7	620,2	624,7	629,2	633,8	638,4	643,0	647,7	652,4
1	657,1	661,8	666,6	671,4	676,2	681,1	686,0	691,0	695,9	700,9
2	705,9	711,0	716,1	721,2	726,4	731,6	736,8	742,1	747,3	752,7
3	758,0	763,4	768,8	774,3	779,8	785,3	790,9	796,5	802,1	807,8
4	813,5	819,2	825,0	830,8	836,6	842,5	848,4	854,4	860,4	866,4
5	872,5	878,6	884,7	890,9	897,1	903,4	909,7	916,0	922,4	928,8
6	935,2	941,7	948,2	954,8	961,4	968,1	974,8	981,5	988,3	995,1
7	1 001,9	1 008,8	1 015,8	1 022,7	1 029,8	1 036,8	1 043,9	1 051,1	1 058,3	1 065,5
8	1 072,8	1 080,1	1 087,5	1 094,9	1 102,4	1 109,9	1 117,4	1 125,0	1 132,6	1 140,3
9	1 148,1	1 155,8	1 163,7	1 171,5	1 179,4	1 187,4	1 195,4	1 203,5	1 211,6	1 219,7
10	1 227,9	1 236,2	1 244,5	1 252,8	1 261,2	1 269,7	1 278,2	1 286,7	1 295,3	1 304,0
11	1 312,7	1 321,4	1 330,2	1 339,1	1 348,0	1 356,9	1 366,0	1 375,0	1 384,1	1 393,3
12	1 402,5	1 411,8	1 421,1	1 430,5	1 439,9	1 449,4	1 459,0	1 468,6	1 478,2	1 488,0
13	1 497,7	1 507,5	1 517,4	1 527,4	1 537,4	1 547,4	1 557,5	1 567,7	1 577,9	1 588,2
14	1 598,6	1 609,0	1 619,4	1 630,0	1 640,5	1 651,2	1 661,9	1 672,6	1 683,5	1 694,4
15	1 705,3	1 716,3	1 727,4	1 738,5	1 749,8	1 761,0	1 772,3	1 783,7	1 795,2	1 806,7
16	1 818,3	1 829,9	1 841,7	1 853,4	1 865,3	1 877,2	1 889,2	1 901,2	1 913,3	1 925,5
17	1 937,8	1 950,1	1 962,5	1 974,9	1 987,5	2 000,1	2 012,7	2 025,5	2 038,3	2 051,1
18	2 064,1	2 077,1	2 090,2	2 103,4	2 116,6	2 129,9	2 143,3	2 156,8	2 170,3	2 183,9
19	2 197,6	2 211,3	2 225,2	2 239,1	2 253,0	2 267,1	2 281,2	2 295,4	2 309,7	2 324,1
20	2 338,5	2 353,1	2 367,7	2 382,4	2 397,1	2 412,0	2 426,9	2 441,9	2 456,9	2 472,1
21	2 487,4	2 502,7	2 518,1	2 533,6	2 549,2	2 564,8	2 580,6	2 596,4	2 612,3	2 628,3
22	2 644,4	2 660,6	2 676,8	2 693,2	2 709,6	2 726,1	2 742,8	2 759,4	2 776,2	2 793,1
23	2 810,1	2 827,1	2 844,3	2 861,5	2 878,8	2 896,2	2 913,7	2 931,3	2 949,0	2 966,8
24	2 984,7	3 002,7	3 020,7	3 038,9	3 057,2	3 075,5	3 094,0	3 112,5	3 131,2	3 149,9
25	3 168,7	3 187,7	3 206,7	3 225,8	3 245,1	3 264,4	3 283,8	3 303,4	3 323,0	3 342,8
26	3 362,6	3 382,5	3 402,6	3 422,7	3 443,0	3 463,3	3 483,8	3 504,4	3 525,0	3 545,8
27	3 566,7									

+ 27 °C par pas de 0,1 °C. Ces valeurs sont tirées de la référence [20] (elles ont toutefois été arrondies à la première décimale)*.

On peut également calculer p_{sv} exprimée en pascals, en fonction de la température thermodynamique T , exprimée en kelvins, en utilisant la formule approchée suivante, tirée de la même référence et valable dans le même intervalle de température :

$$p_{sv} = 1 \text{ Pa} \times \exp \left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right) \quad (22)$$

avec

$$A = 1,281\,180\,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2} \quad B = -1,950\,987\,4 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$C = 34,049\,260\,34 \quad D = -6,353\,631\,1 \times 10^3 \text{ K}$$

2.4.4. — On a de même porté dans le tableau III les valeurs du facteur d'augmentation f pour des pressions comprises entre 60 000 et 110 000 Pa et pour des températures variant entre 0 °C et + 30 °C par pas de 5 °C. Ces valeurs ont été calculées d'après les données des références [20] et [21].

TABLEAU III

Facteur d'augmentation f

p (Pa)	$t = 0$	5	10	15	20	25	30 °C
60 000	1,002 4	1,002 5	1,002 5	1,002 6	1,002 8	1,002 9	1,003 1
65 000	2 6	2 6	2 7	2 8	2 9	3 1	3 2
70 000	2 8	2 8	2 9	2 9	3 1	3 2	3 4
75 000	2 9	3 0	3 0	3 1	3 2	3 4	3 5
80 000	3 1	3 1	3 2	3 3	3 4	3 5	3 7
85 000	3 3	3 3	3 3	3 4	3 5	3 6	3 8
90 000	3 5	3 5	3 5	3 6	3 7	3 8	3 9
95 000	3 6	3 6	3 7	3 7	3 8	3 9	4 1
100 000	3 8	3 8	3 8	3 9	4 0	4 1	4 2
105 000	4 0	4 0	4 0	4 0	4 1	4 2	4 4
110 000	4 2	4 1	4 1	4 2	4 2	4 4	4 5

On indique également ci-après une formule approchée établie par le Groupe de travail qui permet de calculer f en fonction de la pression p , exprimée en pascals, et de la température t , exprimée en degrés Celsius. L'écart entre la valeur de f donnée par cette formule et la valeur ayant servi à établir la table est toujours inférieur à 1×10^{-4} , dans la limite des valeurs de température et de pression considérées.

* Les cas très rares où t_r est inférieure à 0 °C correspondent à de très faibles teneurs en vapeur d'eau (pression partielle inférieure à 615 Pa). Pour des pesées de grande précision, il convient d'éviter de se placer dans ces conditions.

On a ainsi :

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (23)$$

avec

$$\alpha = 1,000\ 62 \quad \beta = 3,14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \quad \gamma = 5,6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

2.5. Facteur de compressibilité Z

Le facteur de compressibilité de l'air humide Z se calcule en fonction du second et du troisième coefficient du viriel relatifs à l'air sec et à la vapeur d'eau, ainsi qu'en fonction de coefficients supplémentaires qui proviennent de l'interaction entre les molécules d'air sec et les molécules d'eau (on suppose que l'air sec, bien que constitué par un mélange de gaz, se comporte comme une substance homogène).

On a porté dans le tableau IV les valeurs du facteur de compressibilité Z pour des pressions comprises entre 60 000 et 110 000 Pa, pour des températures comprises entre 15 °C et 27 °C et pour des humidités relatives variant entre 0 et 1 par pas de 0,1. Ces valeurs ont été calculées d'après les données de la référence [22]. Bien que la sixième décimale ne soit pas significative, elle est donnée dans le tableau pour faciliter les interpolations.

On indique également ci-après une formule approchée, établie par le Groupe de travail, qui permet de calculer Z en fonction de la pression p, exprimée en pascals, de la température t, exprimée en degrés Celsius, de la température thermodynamique T, exprimée en kelvins, et de la fraction molaire x_v de la vapeur d'eau dans l'air humide.

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + ex_v^2) \quad (24)$$

TABLEAU IV

Facteur de compressibilité Z de l'air humide

p = 60 000 Pa											
t (°C)	h = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 748	745	741	736	731	725	719	712	705	697	689
16	0,999 754	750	746	741	736	730	723	716	708	699	690
17	0,999 760	756	752	746	741	734	727	719	710	701	691
18	0,999 766	762	757	752	745	738	730	721	712	702	691
19	0,999 772	768	763	756	750	742	733	724	713	702	690
20	0,999 778	773	768	761	754	745	736	726	715	702	689
21	0,999 784	779	773	766	758	749	739	727	715	702	688
22	0,999 789	784	778	770	762	752	741	729	715	701	685
23	0,999 795	789	783	774	765	755	743	729	715	699	682
24	0,999 800	795	787	779	769	757	744	730	714	697	678
25	0,999 806	800	792	783	772	759	745	730	713	694	674
26	0,999 811	805	796	786	775	761	746	729	710	690	668
27	0,999 817	810	801	790	777	763	746	728	708	685	661

TABLEAU IV (suite)

p = 70 000 Pa											
t (°C)	h = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 706	703	699	694	690	684	679	672	666	658	651
16	0,999 713	710	706	701	696	690	684	677	670	662	653
17	0,999 720	717	712	707	702	695	689	681	673	665	656
18	0,999 727	723	719	713	707	700	693	685	677	667	657
19	0,999 734	730	725	719	713	705	697	689	679	669	658
20	0,999 741	736	731	725	718	710	702	692	682	671	659
21	0,999 748	743	737	731	723	715	705	695	684	672	659
22	0,999 754	749	743	736	728	719	709	698	686	672	658
23	0,999 761	755	749	741	733	723	712	700	687	672	657
24	0,999 767	762	755	746	737	726	715	702	687	672	655
25	0,999 774	768	760	751	741	730	717	703	687	670	652
26	0,999 780	773	765	756	745	733	719	704	687	668	649
27	0,999 786	779	771	761	749	736	721	704	686	666	644

p = 80 000 Pa											
t (°C)	h = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 664	661	657	653	648	643	638	632	626	619	612
16	0,999 672	669	665	660	655	650	644	638	631	624	616
17	0,999 681	677	672	668	662	656	650	643	636	628	619
18	0,999 689	685	680	675	669	663	656	648	640	632	622
19	0,999 696	692	687	682	676	669	661	653	644	635	625
20	0,999 704	700	694	689	682	675	666	658	648	638	627
21	0,999 712	707	702	695	688	680	671	662	652	640	629
22	0,999 719	714	708	702	694	685	676	666	654	642	630
23	0,999 727	722	715	708	700	690	680	669	657	644	630
24	0,999 734	729	722	714	705	695	684	672	659	645	629
25	0,999 742	735	728	720	710	700	688	675	660	645	628
26	0,999 749	742	735	726	715	704	691	677	661	645	626
27	0,999 756	749	741	731	720	708	694	678	662	643	624

p = 90 000 Pa											
t (°C)	h = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 622	619	615	611	607	602	597	591	585	579	572
16	0,999 632	628	624	620	615	610	604	598	592	585	578
17	0,999 641	637	633	628	623	617	611	605	598	590	582
18	0,999 650	646	641	636	631	625	618	611	604	595	587
19	0,999 659	654	650	644	638	632	625	617	609	600	591
20	0,999 667	663	658	652	646	639	631	623	614	604	594

TABLEAU IV (suite et fin)

$p = 90\,000\text{ Pa}$

$t\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h = 0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
21	0,999 676	671	666	660	653	645	637	628	618	608	597
22	0,999 685	680	674	667	660	652	643	633	623	611	599
23	0,999 693	688	681	674	666	658	648	638	626	614	601
24	0,999 701	696	689	681	673	664	653	642	630	616	602
25	0,999 709	703	696	688	679	669	658	646	632	618	603
26	0,999 717	711	704	695	685	674	662	649	635	619	602
27	0,999 725	719	711	701	691	679	666	652	636	619	601

$p = 100\,000\text{ Pa}$

$t\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h = 0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 581	577	574	570	565	561	556	550	545	539	532
16	0,999 591	587	584	579	575	570	564	558	552	546	539
17	0,999 601	597	593	589	584	578	572	566	560	552	545
18	0,999 611	607	603	598	592	587	580	574	566	559	551
19	0,999 621	617	612	607	601	595	588	581	573	565	556
20	0,999 631	626	621	616	609	603	595	588	579	570	560
21	0,999 640	636	630	624	618	610	602	594	585	575	565
22	0,999 650	645	639	633	626	618	609	600	590	580	568
23	0,999 659	654	648	641	633	625	616	606	595	584	571
24	0,999 668	663	656	649	641	632	622	611	599	587	574
25	0,999 677	671	664	657	648	638	628	616	603	590	575
26	0,999 686	680	673	664	655	644	633	620	607	592	577
27	0,999 695	688	681	672	662	650	638	624	610	594	577

$p = 110\,000\text{ Pa}$

$t\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h = 0$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
15	0,999 539	536	532	528	524	519	515	509	504	498	492
16	0,999 550	547	543	539	534	529	524	519	513	506	500
17	0,999 562	558	554	549	544	539	533	527	521	514	507
18	0,999 573	569	564	559	554	548	542	536	529	522	514
19	0,999 583	579	574	569	564	558	551	544	537	529	520
20	0,999 594	590	585	579	573	567	560	552	544	535	526
21	0,999 605	600	595	589	582	575	568	560	551	542	532
22	0,999 615	610	604	598	591	584	576	567	557	547	536
23	0,999 625	620	614	607	600	592	583	574	563	552	541
24	0,999 635	630	623	616	608	600	590	580	569	557	544
25	0,999 645	639	633	625	616	607	597	586	574	561	548
26	0,993 655	649	642	634	624	614	603	592	579	565	550
27	0,999 665	658	651	642	632	621	610	597	583	568	552

avec

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1,624\,19 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} & a_1 &= -2,896\,9 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\
 a_2 &= 1,088\,0 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \\
 b_0 &= 5,757 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} & b_1 &= -2,589 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\
 c_0 &= 1,929\,7 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} & c_1 &= -2,285 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1} \\
 d &= 1,73 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2} & e &= -1,034 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}
 \end{aligned}$$

L'écart entre la valeur de Z donnée par cette formule et la valeur ayant servi à établir la table est dans le cas le plus défavorable égal à 2×10^{-7} , dans la limite des valeurs considérées pour les paramètres.

3. Application pratique

Pour déterminer dans la pratique la masse volumique de l'air humide, on procède de la façon suivante :

3.1. Mesure de la pression et de la température

On mesure la pression p et la température t de l'air dans l'enceinte de la balance. La pression doit être exprimée en pascals ($1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 10^{-2}\text{ mbar} = 10\text{ dyn/cm}^2$) et la température t en degrés Celsius; on en déduit la température thermodynamique T , exprimée en kelvins, par la formule

$$T = t + 273,15\text{ K.} \quad (25)$$

3.2. Détermination de la fraction molaire de la vapeur d'eau

On détermine la fraction molaire x_v de la vapeur d'eau dans l'air considéré, en procédant comme suit :

3.2.1. — Si l'on possède un hygromètre à point de rosée, on détermine la température t_r du point de rosée en degrés Celsius; on en déduit, à l'aide des tableaux II et III par interpolation linéaire, la pression de vapeur saturante $p_{sv}(t_r)$ et le facteur d'augmentation $f(p, t_r)$. Les valeurs des tableaux sont données avec un nombre suffisant de décimales pour faciliter les interpolations nécessaires. On peut également calculer directement $p_{sv}(t_r)$ et $f(p, t_r)$ en appliquant les formules d'approximation (22) et (23). On détermine alors x_v par application de la formule (21).

3.2.2. — Dans le cas où l'on peut connaître directement l'humidité relative h , la fraction molaire x_v se calcule d'après la formule (19). Il faut donc déterminer d'abord la pression de vapeur saturante $p_{sv}(t)$ et le facteur d'augmentation $f(p, t)$ correspondant à la pression p et à la température t de l'expérience, ce qui se fait comme indiqué précédemment, à l'aide des tableaux II et III, ou par application des formules (22) et (23).

Nota. — L'humidité relative s'exprime habituellement sous forme du taux d'humidité relative U , exprimé en pourcentage; on a, entre l'humidité

relative h et le taux d'humidité relative U , la relation

$$h = \frac{U}{100}. \quad (26)$$

3.3. Détermination du facteur de compressibilité

On détermine le facteur de compressibilité Z de l'air humide considéré en procédant comme suit :

3.3.1. — Le facteur Z peut être calculé à l'aide des données du tableau IV, par interpolation linéaire, en fonction de la pression p , de la température t et de l'humidité relative h . Si l'on ne connaît pas directement h , on la calcule en fonction de x_v ou connaissant la température t_r du point de rosée, en appliquant l'une des formules suivantes

$$h = x_v \frac{p}{f(p, t) \cdot p_{sv}(t)} = \frac{f(p, t_r) \cdot p_{sv}(t_r)}{f(p, t) \cdot p_{sv}(t)}. \quad (27)$$

3.3.2. — On peut également calculer Z par application de la formule (24) en fonction de la pression p , exprimée en Pascals, de la température t , exprimée en degrés Celsius, de la température thermodynamique T , calculée suivant la formule (25) et exprimée en kelvins, et de la fraction molaire x_v , celle-ci ayant été déterminée comme indiqué en 3.2.

3.4. Calcul de la masse volumique de l'air

Les paramètres p , T , x_v et Z étant connus, on en déduit la masse volumique ρ de l'air humide par application de la formule (15) :

$$\rho = 3,483\,53 \times 10^{-3} \text{ kg.K.J}^{-1} \times \frac{p}{ZT} (1 - 0,378\,0 x_v)$$

Si l'on a la possibilité de mesurer la fraction molaire x_{CO_2} du dioxyde de carbone dans l'air du laboratoire (air débarrassé de sa vapeur d'eau), on a une évaluation plus exacte de ρ en appliquant la formule (16) :

$$\rho = [3,483\,53 + 1,44 (x_{\text{CO}_2} - 0,000\,4)] \times 10^{-3} \text{ kg.K.J}^{-1} \times \frac{p}{ZT} (1 - 0,378\,0 x_v)$$

4. Incertitudes

Les formules que l'on donne dans ce document pour le calcul de la masse volumique de l'air ont pour but d'unifier les diverses méthodes utilisées par les laboratoires nationaux. Il faut les considérer, dans une certaine mesure, comme conventionnelles ; elles ne prétendent donc pas à une exactitude absolue. Toutefois, leurs utilisateurs apprécieront sans aucun doute d'avoir une estimation de l'incertitude avec laquelle ces formules donnent la masse volumique de l'air.

Il n'existe malheureusement pas de convention universellement acceptée pour l'estimation et la sommation des incertitudes et par conséquent la valeur finale dépend du choix de la méthode. Pour cette raison, dans le présent document, nous n'entrons pas dans le détail des méthodes de calcul de l'incertitude sur ρ , nous donnons seulement les valeurs que l'on obtient avec plusieurs méthodes. On trouvera le détail des calculs dans les références [2 à 5]. La principale différence entre les méthodes considérées consiste dans la façon dont les diverses incertitudes sont réparties entre celles que l'on considère comme systématiques et celles que l'on considère comme aléatoires. Par exemple, tous les auteurs s'accordent pour dire que l'incertitude relative (1σ) sur la valeur de R utilisée dans la formule est de $3,1 \times 10^{-5}$, mais dans trois cas (réf. [3, 4, 5]) cette incertitude est considérée comme systématique, tandis que dans un cas (réf. [2]) elle est considérée comme aléatoire. Les auteurs ne sont pas d'accord non plus sur la façon dont il convient d'additionner les incertitudes systématiques ; dans les références [3] et [5] on fait une somme quadratique tandis que dans les références [2] et [4] on fait une somme arithmétique. Nous laissons donc à l'utilisateur le choix de la méthode qu'il préfère pour estimer les incertitudes de chaque catégorie et les combiner. Les valeurs suivantes ne sont données que pour indiquer les ordres de grandeur.

Il est important de faire la distinction entre :

- A) l'incertitude due à la formule elle-même,
- B) l'incertitude due aux grandeurs mesurées lors de l'application de la formule.

A. Incertitude sur ρ due à la formule elle-même

L'incertitude sur ρ due à la formule elle-même provient des incertitudes sur les valeurs de R , M_a , M_v et des incertitudes sur les valeurs tabulées de Z , p_{sv} et f , ces deux dernières intervenant par l'intermédiaire de x_v .

Parmi ces incertitudes, la plus difficile à évaluer est celle sur M_a en raison des écarts entre les données disponibles aussi bien pour la composition de l'air que pour les variations de cette composition ; cela contribue aussi à la dispersion des valeurs trouvées par les différents auteurs pour l'incertitude sur ρ .

Si l'on fait la somme quadratique des incertitudes aléatoires dues à chacune de ces grandeurs, on obtient selon les différents auteurs des incertitudes aléatoires relatives (1σ) comprises entre 0 et 5×10^{-5} (moyenne $2,5 \times 10^{-5}$).

Si l'on combine de la même façon les incertitudes systématiques, on obtient des valeurs (1σ) comprises entre 4 et 9×10^{-5} (moyenne 6×10^{-5}).

Si l'on fait la somme arithmétique des incertitudes systématiques, on obtient des valeurs comprises entre 5 et 13×10^{-5} (moyenne 10×10^{-5}).

B. Incertitude sur ρ due aux grandeurs mesurées lors de l'application de la formule

Les incertitudes sur ρ dues aux incertitudes des mesures de p , T , h (ou t_r) et x_{CO_2} , sont données avec une bonne exactitude, dans les conditions habituelles, par :

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(p) \approx +1 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1} \cdot \delta p$$

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(T) \approx -4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \delta T$$

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(h) \approx -9 \times 10^{-3} \delta h$$

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(t_r) \approx -3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \cdot \delta t_r$$

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(x_{\text{CO}_2}) \approx +0,4 \delta x_{\text{CO}_2}$$

Chacune comporte à la fois une composante aléatoire et une composante systématique que chaque utilisateur doit naturellement évaluer. Nous laissons, de plus, à l'utilisateur le soin de choisir de quelle façon elles seront combinées.

Note : Le Comité International des Poids et Mesures recommande [Recommandation 1 (CI-1981)] la mise à l'essai des principes proposés par son Groupe de travail sur l'expression des incertitudes, qui conduisent à estimer et additionner les variances pour toutes les incertitudes.

Bibliographie

I. Documents préparatoires

- [1] Rapport sur la réunion concernant les masses (23 et 24 novembre 1976), par T. J. QUINN, *Procès-Verbaux du CIPM*, **45**, 1977, pp. A1-24.
- [2] JONES (F. E.), The air density equation and the transfer of the mass unit. Publ. NBSIR 77-1278 du NBS, 1977, 28 pages.
JONES (F. E.), The air density equation and the transfer of the mass unit. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **83**, No. 5, Sept.-Oct. 1978, pp. 419-428.
- [3] KOCHSIEK (M.), Über die Luftauftriebskorrektur bei der Weitergabe der Masseneinheit. *PTB-Bericht Me-15*, 1977, 44 pages.
- [4] RIÉTY (P.), La détermination de la masse volumique de l'air humide. Document d'étude du Groupe de travail. Rapport INM 77-1, 1977, 55 pages.
- [5] CARRÉ (P.), Note sur l'incertitude de la formule pour la détermination de la masse volumique de l'air. Rapport BIPM-78/8, décembre 1978-mai 1979, 11 pages.

II. Comportement de l'air humide

- [6] HARRISON (L. P.), Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In *Humidity and Moisture*, Wexler and Wildhack, Reinhold Publ. Corp. N.Y., 1965.

III. Constante molaire des gaz

- [7] QUINN (T. J.), COLCLOUGH (A. R.) and CHANDLER (T. R. D.), A new determination of the gas constant by an acoustical method. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **A 283**, 1976, pp. 367-420.
COLCLOUGH (A. R.), QUINN (T. J.) and CHANDLER (T. R. D.), An acoustic redetermination of the gas constant. *Proc. Roy. Soc. London*, **A 368**, 1979, pp. 125-139.
- [8] GAMMON (B. E.), The velocity of sound with derived state properties in helium at -175 to 150 °C with pressure to 150 atm. *J. Chem. Phys.*, **64**, 1976, N° 6, pp. 2556-2568.
- [9] COHEN (E. R.) and TAYLOR (B. N.), The 1973 least-squares adjustment of the fundamental constants. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **2**, 1973, pp. 663-734.

IV. Composition et masse molaire de l'air sec

- [10] LEDUC (A.), La masse du litre d'air dans les conditions normales. *Travaux et Mémoires du BIPM*, **XVI**, 1917, pp. 7-37.
- [11] TOWER (O. F.), La proportion d'oxygène dans l'air est-elle constante ? *J. Ch. Phys.*, **11**, 1913, pp. 249-259.
- [12] MORLEY (E. W.), On a possible cause of the variations observed in the amount of oxygen in the air. *Amer. Journ. Science*, 3^e série, **22**, 1881, N° 132, pp. 417-438.
- [13] CALLENDAR (G. S.), Variations of the amount of carbon dioxide in different air currents. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **66**, 1940, pp. 395-400.
- [14] PANETH (F. A.), The chemical composition of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **63**, 1937, pp. 433-438.
- [15] GLUECKAUF (E.), The composition of atmospheric air. In : *Compendium of meteorology*, Amer. Meteorol. Soc., Boston, 1951, pp. 3-10.
- [16] MACHTA (L.) and HUGUES (E.), Atmospheric oxygen in 1967 to 1970. *Science*, **168**, June 1970, pp. 1582-1584.
- [17] U.S. Standard Atmosphere 1976. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 1976, p. 3 et p. 33.
- [18] CHACKETT (K. F.), PANETH (F. A.) and WILSON (E. J.), Chemical composition of the stratosphere at 70 km height. *Nature*, **164**, N° 4160, July 1949, pp. 128-129.
- [19] OANA (S.), Bestimmung des Argons im besonderen Hinblick auf gelöste Gase in natürlichen Wässern. *J. Earth Sci. Nayoga Univ.*, 1957, pp. 103-124.

V. Compressibilité et pression de vapeur saturante de l'air humide

- [20] WEXLER (A.), Vapor pressure formulation for water in range 0 to 100 °C. A revision. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **80 A**, Nos 5-6, Sept.-Dec. 1976, pp. 775-785.
- [21] GREENSPAN (L.), Functional equations for the enhancement factors for CO₂-free moist air. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **80 A**, N° 1, Jan.-Feb. 1976, pp. 41-44.
- [22] HYLAND (R. W.), A correlation for the second interaction virial coefficients and enhancement factors for moist air. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **79 A**, N° 4, July-Aug. 1975, pp. 551-560.

Notice for the reader of the English version

In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.

Avertissement au lecteur de la version anglaise

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures.

HISTORICAL NOTE

Organs of the Convention du Mètre BIPM, CIPM, CGPM

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m²) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre. *

The task of BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for :

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes;
- carrying out comparisons of national and international standards;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for :

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), and ionizing radiations (1960). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 and two new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories. Some thirty physicists or technicians work in the laboratories of BIPM. They do metrological research, and also undertake measurement and certification of material standards of the above-mentioned quantities. BIPM's annual appropriation is of the order of 9 570 000 gold francs, approximately 17 400 000 French francs (in 1982).

* As of 31 December 1982 forty-six States were members of this Convention : Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Italy, Japan, Korea (Rep. of), Korea (Dem. People's Rep.), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of *Comités Consultatifs*, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These *Comités Consultatifs*, which may form temporary or permanent « Working Groups » to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning the amendments to be made to the definitions and values of units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the *Comité International* accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the *Conférence Générale*.

The *Comités Consultatifs* have common regulations (*Procès-Verbaux CIPM*, 1963, 31, 97). Each *Comité Consultatif*, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence :

1. The *Comité Consultatif d'Électricité (CCE)*, set up in 1927.
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)*, new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)*, set up in 1937.
4. The *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM)*, set up in 1952.
5. The *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)*, set up in 1956.
6. The *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)*, set up in 1958. In 1969 this committee established four sections : Section I (Measurement of X and γ rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV (α -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The *Comité Consultatif des Unités (CCU)*, set up in 1964 (this committee replaced the « Commission for the System of Units » set up by the CIPM in 1954).
8. The *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)*, set up in 1980.

The proceedings of the *Conférence Générale*, the *Comité International*, the *Comités Consultatifs*, and the *Bureau International* are published under the auspices of the latter in the following series :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Séances des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

From time to time BIPM publishes a report on the development of the Metric System throughout the world, entitled *Les récents progrès du Système Métrique*.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the *Convention du Mètre*.

AGENDA
for the 1st Meeting

1. Opening of the meeting :

- Designation of a Rapporteur.
- Approval of the Agenda.
- The Consultative Committees in the Metre Convention.
- History of this Consultative Committee.
- Organization of the work of this Committee.

2. Work to be continued or started :

Discussion of the various reports already prepared :

- Mass.
Report on the equation for determining the density of moist air; should it be submitted to the CIPM after approval by the CCM ?
- Force.
- Pressure.

3. Miscellaneous :

- Work of the BIPM.
 - Publication of documents.
 - Report to the CIPM and Recommendations.
 - Future meetings.
-

REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF
POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES
(1st Meeting — 1981)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
by M. KOCHSIEK, Rapporteur

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM) held its first meeting at the Bureau International des Poids et Mesures, at Sèvres, on Tuesday 23rd, Wednesday 24th and Thursday 25th of June 1981.

The following were present :

A. PERLSTAIN, member of the CIPM, president of the CCM.

The delegates from member laboratories :

Bureau National de Métrologie, Paris: Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers (P. RIÉTY).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (D. B. PROWSE).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (Mme M. PLASSA, A. BRAY, G. F. MOLINAR).

National Bureau of Standards [NBS], Washington (D. R. FLYNN, C. R. TILFORD, R. DAVIS).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (SHI Changyan).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (D. P. THURNELL-READ, P. R. STUART).

National Research Council [NRC], Ottawa (G. CHAPMAN).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki (K. IZUKA).

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (J.-G. ULRICH).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(M. KOCHSIEK).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (R. MUIJLWIJK).

The Director of the BIPM (P. GIACOMO).

Invited guest :

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava
(R. SPURNÝ).

Also attending the meeting : T. J. QUINN, deputy director of the BIPM;
J. TERRIEN, director emeritus of the BIPM; P. CARRÉ, G. GIRARD,
A. SAKUMA, R. P. HUDSON, J. BONHOURE, Mme M.-J. COARASA
[BIPM].

Absent :

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad.

1. Opening of the Meeting

The President opens the session by welcoming the participants. M. Kochsiek is nominated as rapporteur, and the agenda is approved.

The President summarizes the history of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) Recommendations from 1889 up to the creation of Working Groups for the fields of mass, force and pressure in the last few years. The President thanks the members of these Working Groups whose reports will be presented during the meeting. The director of the BIPM describes the tasks of a Comité Consultatif and points out some organizational details. The documents for the meeting were distributed in advance, by post; some additional documents are distributed at the beginning of the session. A list of these documents is given in Appendix G 1.

It is decided to name the Comité as follows : « Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées » with the abbreviation « CCM ».

2. Work to be undertaken or continued

2.1. Mass

A meeting on the subject of mass-measurement was held in November 1976 during which three Working Groups were established (CCM/81-2).

Formula for the determination of the density of moist air

The density of the ambient air enters into comparison of masses, where one must take into account the air-buoyancy. It is usually calculated from the ambient conditions (pressure, temperature, relative humidity).

The report of the Working Group Mass-1 (WG Mass-1) on the formula for the determination of the density of moist air (CCM/81-5) is presented. Various formulae have been used to calculate the air density in the past; WG Mass-1 proposes a standard mode of calculation, use of which should in the future result in better agreement among the results of mass-comparisons carried out in different laboratories. The uncertainties involved in the application of this formula have been studied by the BIPM (CCM/81-6). Mr. Riéty points out that simpler formulae can be given for a limited range of the influence quantities corresponding to normal laboratory conditions (CCM/81-31). In accord with a suggestion of Mr. Kochsiek (CCM/81-11), the text is modified to give an improved introduction to Eq. (1). After a lengthy discussion it is agreed to recommend that the CIPM accept the established formula and also promote its utilization in other areas of work [Recommendation G 1 (1981)] (*see p. G 50*).

Mr. Quinn points out a difficulty with the value of the universal gas constant R . To calculate the air density, the current value presently recommended by CODATA is used. Given the facts that, on the one hand, CODATA is preparing a new value for R and, on the other hand, that a more precise experimental determination of the air density would necessitate a change in the Equation, it is decided to call the latter : « Equation for the determination of the density of moist air (1981) ».

In a letter, the Comisión Nacional de Metrología y Metrotecnica, Spain, pointed to an apparent mistake in Eq. (12), but, after checking, (12) proves to be correct.

Publication of the formula in both French and English is desirable.

The CCM thanks the members of the WG Mass-1 (MM. Carré, Riéty, Jones, Kochsiek) for their efforts and decides to disband the Working Group.

Primary standards of stainless steel

The WG Mass-3 some years ago (1976 to 1978), prepared a questionnaire on experience with mass standards (CCM/81-13 A). A report (CCM/81-13 B) and various documents (CCM/81-13 C to H) were sent out. A part of the information thus compiled relates to stainless-steel standards. This is completed by the present delegates. The following questions arise : should the material have a density close to the reference value $8\,000\text{ kg/m}^3$ specified by legal metrology ? Which material is the most suitable ? What are the requirements for the surface and its finishing ?

It is often difficult to procure the necessary materials. Most national institutes are testing rust-free, practically non-magnetic austenitic steels with increased proportions of Cr ($\geq 20\%$) and Ni ($\geq 20\%$). A few trade

names are : Nimonic 105, Immaculate 5 (NPL, IMG), Contraperm (PTB, OFMET), Alacrite (INM); see also the document CCM/81-13 E (ASMW).

Mr. Thurnell-Read points out the possibilities of surface finishing without infiltration of foreign bodies :

- a) Surface finishing by diamond precision turning, similar to the finishing of the new Pt-Ir prototype at the BIPM (CCM/81-13 H).
- b) Laser glazing, a new process under test by the Imperial College, University of London.

There is general agreement that, owing to the bond with legal metrology, a density of 8 000 kg/m³ would be preferable, although in the scientific area the density of standards plays only a minor role (see also the document CCM/81-25).

The CCM creates a Working Group whose tasks will be to evaluate the work done so far, to stimulate research and eventually to propose a material suitable for all laboratories. Its designation is Working Group « Stainless-steel mass standards », and its chairman is Mme Plassa (IMG); the members are listed on page G 12, as are the compositions of the other Working Groups.

Maintenance of standards

Mr. Girard presents the report on the activities of the WG Mass-3 (CCM/81-13 A to H). The President and Mr. Giacomo note that, since the standard deviation of balances is becoming smaller and smaller, the problems concerning the cleaning and maintenance of the mass standards are becoming more significant.

Mr. Quinn summarizes the work at the BIPM on the production of new Pt-Ir standards without surface impurities (CCM/81-13 H) by diamond finishing.

Mr. Thurnell-Read describes tests made with the platinum-iridium prototype N° 18. He has shown that, after cleaning, the mass of this prototype, compared to the mean of a group of standards, shows abrupt and not always reproducible changes. Mme Plassa draws attention to the fact that residues of cleansing agents remain on the surface (CCM/81-32).

Mr. Muijlwijk announces that weighing in vacuum is being carried out currently in VSL.

It is agreed that WG Mass-3 shall continue its work : evaluating results obtained so far and promoting new investigations. Its designation is Working Group « Maintenance of mass standards », and the chairman is Mr. Girard (BIPM) (see page G 12).

Direct measurement of air density

MM. Davis, Prowse et Iizuka present a report (CCM/81-12) on the results of direct measurements of air density. Heretofore unrecognized

surface effects present a problem. The best results have a relative uncertainty (3σ) of $\pm 3.5 \times 10^{-5}$ kg/m³ (CCM/81-19).

The Working Group should continue its efforts: supporting measurements in standard gas atmospheres, evaluating results and comparing the air density calculated using the recommended formula with the experimentally determined values. Its designation is Working Group « Direct measurement of air density » and its chairman is Mr. Prowse (CSIRO) (see page G 12).

Terminology : mass and weight

The President states that the second paragraph of the declaration of the 3rd Conférence Générale des Poids et Mesures (1901) *, « Le terme *poids* désigne une grandeur de la même nature qu'une *force*... » (The term *weight* applies to a quantity with the nature of a *force*...) has led to arguments over terminology. In the opinion of the present delegates, if there are difficulties with the meaning of the terms « mass », « weight », « standard weight », etc., they arise not in the scientific area but in the linguistics of everyday life. Particular difficulties face those countries that have just recently changed over to the SI system. This problem is treated in two documents (CCM/81-23 and 29).

A long discussion follows, in the course of which various suggestions are put forward : for example, to define weight as the indication of a balance and « gravitance » as the force of gravity; to refer the question to OIML and to ISO as the competent authorities; to ascertain whether, in lay usage, the word weight has the meaning of force-of-gravity rather than of mass; to create a new Working Group.

The President, summarizing the situation, says that no immediate solution is in view. One must determine the opinion of the OIML since the problem falls in the area of legal metrology. The CCM composes the following declaration :

« In discussing the question of the use of the words « mass » and « weight », the CCM was of the opinion that in scientific metrology no serious difficulties arise.

« The CCM has been advised, however, that in the field of legal metrology there are serious difficulties.

« The CCM feels that the Comité International de Métrologie Légale should be consulted on the problems raised by the words « mass » and « weight ». »

Balances

In recent years, several equal-arm balances have been overhauled and improved (e.g., CCM/81-22). Standard deviations have been lowered to

* The text of this declaration appears in *Comptes Rendus des séances de la 3^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, 1901, p. 70 and is reproduced in *Le Système International d'Unités (SI)*, 1981, 4th edition, p. 22.

1 µg for 1 kg maximum load. A future problem will be the servicing of old high-precision balances since there remain only two manufacturers of such balances in the world (Chyo Balance Corporation of Kyoto, Japan and Voland Corporation of New Rochelle, USA).

To investigate the surface properties of mass standards, it would be desirable for some Institutes to study anew the problem of weighing in vacuum.

The future will probably belong to those balances which have flexible strips instead of knife-edge and pan, which work automatically enclosed in a standard gas atmosphere and which are symmetrically built, especially the weighing arm (*see* also document CCM/81-21).

Density of water

The density of water enters into most measurements of volume and density and, in particular, into comparisons of masses when one wishes to determine the air-buoyancy correction.

Measurements of the density of water and of various solids are currently under way in several laboratories. Mr. Giacomo mentions the work being done on the determination of the density of water and of mass standards, significant to the field of mass metrology (CCM/81-24, 27, 28).

The BIPM has chiefly studied the effects of the isotopic composition of water and of dissolved atmospheric gases on the density of water. The CSIRO and the NRLM have determined the absolute value of the density of water from 0 °C to + 44 °C and, in particular, its maximum value at $t = 3.989$ °C.

In the IMGIC and the PTB density measurements are currently being carried out with the aid of bodies made of Zerodur.

A discussion develops on the cleaning of solid surfaces. Under normal environmental conditions, thin layers of water on surfaces are unavoidable; 2 µg/cm² are equivalent to about 50 molecular layers of water. Good results have been obtained on cleaning with water, ethyl alcohol or methyl alcohol, either by using the customary washing procedure or by cleaning in an ultrasound bath with subsequent heating to 150 °C in vacuum. Mme Plassa points out that when solvents such as acetone are used, traces of the solvent can be shown by mass spectrometry to remain on the surface. Mr. Stuart mentions a solvent with the trade name Teepol produced by Shell.

2.2. Force

Mr. Bray presents a report on the activities of the Working Group set up in March 1980 during the meeting concerning the measurement of force (CCM/81-4, 14). He particularly emphasizes that within the European Community programs for the comparison of force-measuring machines are in progress, and that it is planned to extend such comparison measurements to as many interested institutes as possible outside Europe.

The President explains that force, as a related quantity, should rather be associated with calibration services. A discussion arises on the extent to which the CCM should concern itself with force measurement. The participants conclude that industrial requirements necessitate force measurement in national laboratories. BIPM, for various reasons (personnel, technical equipment), can only coordinate the efforts. As a result of the manifold problems this field presents, initial comparisons of force-measuring machines from Europe with ones from the USA will be started by NPL, and the same between Europe and Asia by PTB.

The existing Working Group shall continue its work under the chairmanship of Mr. Bray (IMGIC); its name is Working Group « Force » (*see* page G 13).

2.3. Pressure

In the field of pressure measurement, four Working Groups have been set up in March 1979 at the time of the meeting concerning pressure measurements (CCM/81-3). These have already coordinated or prepared comparison measurements. It is decided to continue these Working Groups of the CCM.

Medium pressure range

Mr. Stuart reports on work in progress in the range from 1 kPa to 1 MPa (CCM/81-8, 16, 34). The members of the Working Group feel that a pressure balance (piston gauge) will make the best transfer standard (*see* document CCM/81-33). The apparatus is in course of assembly and calibration. It comprises two piston-cylinder assemblies of special manufacture and a base construction so as to facilitate measurements of temperature and degree of vacuum. It is discussed whether the planned apparatus is optimally suited and whether a triple point cell of argon could be a better transfer standard for pressure. It is clear that transfer and laboratory standards are two different things and that one ought first to see how good the planned standard is before discussing the optimal standard.

The Working Group shall continue its work; its designation is Working Group « Medium pressures » and its chairman is Mr. Stuart (NPL) (*see* page G 13).

High pressures

Mr. Molinar presents a detailed report on the work in progress for the pressure range above 1 MPa (CCM/81-3, 7, 15). He reports that in June 1981, eight laboratories will begin comparison at various pressures between the national standards. The Working Group is also interested in very high pressures of 100 MPa and more.

The WG will continue its task; its designation is Working Group « High pressures » and it is chaired by Mr. Molinar (IMGIC) (*see* page G 13).

Low pressures

Mr. Tilford describes the work and aims of this Working Group for the pressure range 1 Pa to 1 kPa (CCM/81-9, 17). First results have been presented for the comparison NBS-NPL.

The WG will continue its works; its designation is Working Group « Low pressures », and it is chaired by Mr. Tilford (NBS) (see page G 14).

Very low pressures

Mr. Kochsiek presents a short report on the work and aims of the Working Group for the pressure range 10^{-4} to 1 Pa (CCM/81-18). Mr. Iizuka mentions a vacuum standard of the Electrotechnical Laboratory of Japan (ETL) (CCM/81-30).

The WG will continue work; its designation is Working Group « Very low pressures »; the chairman is Mr. Messer (PTB) (see page G 14).

3. Miscellaneous

Density of liquids and solids

Mr. Davis proposes that CCM should, besides the density of water, concern itself with the density of solids, particularly in view of the importance of present measurements to determine the Avogadro constant. Mr. Prowse follows this up by proposing a density measurement of mercury, since unexplained differences of some 10^{-6} have recently occurred, in particular for extremely pure mercury. The decision is made to set up a Working Group to evaluate the work already done, to coordinate current efforts and to promote new work in this field.

Its designation is Working Group « Density of liquids and solids », and its chairman is Mr. Iizuka (NRLM) (see page G 13).

Publications in Metrologia

Mr. Hudson announces that the journal *Metrologia* will continue publication under the auspices of the CIPM and that one is seeking contributions particularly on pressure metrology. Completed comparison measurements are also of interest.

Work of the BIPM

Mr. Giacomo reports on the increased work on mass at the BIPM. Since there are only two co-workers available, the most that can be done is to pursue the work already in progress (e.g., CCM/81-26) and to prepare the comparisons of the national prototypes requested by the 15th Conférence Générale des Poids et Mesures.

Publication of documents

Mr. Giacomo explains the publication channels open to the CCM and its Working Groups. The chairmen of the WG's prepare short reports annually and longer ones for the CCM meetings after completion of certain work. The latter are added as appendices to the CCM report. Besides publication in *Metrologia*, work may also be published as BIPM monographs.

Report to the CIPM

The report of this first session of the CCM will be presented to the CIPM. It will comprise the two proposed Recommendations, G 1 (1981) for the adoption of the « Equation for the determination of the density of moist air (1981) » and G 2 (1981) encouraging the national laboratories to continue and to intensify their efforts in the areas of interest to the CCM. The declaration concerning the words « mass » and « weight » will be included in the report.

Future meetings

Mr. Tilford proposes that future pressure reunions be arranged for the same time and place, to save travelling expenses. Mr. Giacomo asks the chairmen to work as much as possible by mail and to combine meetings of Working Groups with other sessions or conferences as often as it is practicable. A date in the year 1983 or just before the planned 2nd meeting of the CCM in 1984 appears to be a reasonable one for the Working Groups.

* * *

In closing the session, the President thanks the delegates for their valuable support and wishes the collaborators in the nine Working Groups every success in their future work.

November 1981, revised July 1982

**Recommendations
of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées
submitted
to the Comité International des Poids et Mesures**

Calculation of the density of moist air

RECOMMENDATION G 1 (1981)

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,
recalling the terms of Resolution 1 of the 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (1979) and in particular that the laboratories should intensify their efforts aimed at a better determination of air buoyancy,

considering

— that, if one calculates the density of air starting from the ambient conditions, one is interested in using for this calculation a unique equation, well known and for which the parameters are specified,

— that such an equation has been developed by an international Working Group,

— that this equation may have applications in other areas of metrology,

recommends that the equation developed by this Working Group be adopted for the calculation of the corrections for the buoyancy of the air in weighings of high precision and be brought to the attention of eventual users in other areas.

Continuation and intensifying of the work

RECOMMENDATION G 2 (1981)

The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,
considering

— Resolution 3 of the 15th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) and Resolution 1 of the 16th CGPM,

— the metrological needs outlined by the representatives of national laboratories at the first meeting of the Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées,

— the plethora of tasks to be completed in the different areas of measurement of mass, density, force and pressure,

— the difficulty of meeting the most demanding scientific needs in the domain of density measurement and the needs of advanced technology in the realm of force and pressure measurement,

— the permanent need to maintain quality and to deepen understanding in the area of mass measurements, and in particular to furnish the bases of the aforementioned quantities,

recommends that the national laboratories continue and intensify their metrological efforts in these different domains.

List of the members of the Working Groups

(For the complete list see page G 12)

- Working Group « Direct measurement of air density »
- Working Group « Maintenance of mass standards »
- Working Group « Stainless-steel mass standards »
- Working Group « Density of liquids and solids »
- Working Group « Force »
- Working Group « High pressures »
- Working Group « Medium pressures »
- Working Group « Low pressures »
- Working Group « Very low pressures »

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF POUR LA MASSE ET LES GRANDEURS APPARENTÉES

1^{re} Session (1981)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour.....	viii
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Kochsiek	G 1
Introduction	1
Ouverture de la Session.....	2
Travaux à poursuivre ou à entreprendre. Discussion des différents rapports déjà établis	2
Masse	2
Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (Recommandation de cette formule. Dissolution du GT Masse - 1)	3
Étalons primaires en acier inoxydable (Création d'un Groupe de travail) ...	3
Conservation des étalons (Création d'un Groupe de travail)	4
Mesure directe de la masse volumique de l'air (Création d'un Groupe de travail)	5
Terminologie : masse et poids (Déclaration)	5
Balances.....	6
Masse volumique de l'eau	6
Force (Maintien du Groupe de travail existant).....	7
Pression (Maintien des quatre Groupes de travail existants).....	7
Questions diverses (Masse volumique de liquides et de solides, création d'un Groupe de travail. Publications dans <i>Metrologia</i> . Activités du BIPM. Publication des documents. Rapport au CIPM. Réunions ultérieures)	8
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures ...	10
Recommandation G 1 (1981) (Calcul de la masse volumique de l'air humide) ...	10
Recommandation G 2 (1981) (Poursuite et intensification des travaux)	11
Composition des Groupes de travail	12

Annexes

G 1 : Documents de travail présentés à la 1 ^{re} Session du CCM	15
G 2 : Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981)	19
Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise	35
Historical Note	37
Agenda	40
Report to the Comité International des Poids et Mesures	41
Introduction	41
Opening of the meeting	42
Work to be undertaken or continued. Discussion of the various reports already prepared	42
Mass	42
Report on the equation for determining the density of moist air (Recommendation of the equation. Disbanding of the Working Group Mass-1)	43
Primary standards of stainless steel (Working Group)	43
Maintenance of standards (Working Group)	44
Direct measurement of air density (Working Group)	44
Terminology: mass and weight (Declaration)	45
Balances	45
Density of water	46
Force (The existing Working Group is maintained)	46
Pressure (The four existing Working Groups are maintained)	47
Miscellaneous (Density of liquids and solids, Working Group. Publications in <i>Metrologia</i> . Work of the BIPM. Publication of documents. Report to the CIPM. Future meetings)	48
Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures .	50
Recommendation G 1 (1981) (Calculation of the density of moist air)	50
Recommendation G 2 (1981) (Continuation and intensifying of the work)	51
List of the members of the Working Groups (<i>see</i> page G 12)	52

Appendices

- G 1 : Working documents (*see* page G 15).
- G 2 : Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981) (*see* page G 19). An English version has been published under the title « Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981) », *Metrologia*, **18**, 1982, pp. 33-40.

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1983, n° 4396
ISBN 92-822-2076-1

ACHEVÉ D'IMPRIMER : FÉVRIER 1983

Imprimé en France