

DILATATION THERMIQUE DU CUIVRE, DE L'OR
DE L'ARGENT, ET DE L'ALUMINIUM ENTRE
2 K ET 15 K

Par
MICHEL DROLET

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade
de Maître ès Sciences Physiques.

Département de Physique,
Faculté des Sciences et de Génie.
University d'Ottawa
Ottawa, Canada

1972.

© Michel Drolet, Ottawa 1972.

SOMMAIRE

Le dilatomètre de haute précision qui avait été construit et utilisé par Kos (Thèse, Université d'Ottawa, 1967) a été amélioré afin de rendre son utilisation plus simple. L'enceinte à vide qui abrite le dilatomètre a été refait pour en diminuer le risque de fuites, un nouvel oscillateur pour les mesures de dilatation a été construit, et la thermométrie a été améliorée. Le dilatomètre modifié n'a rien perdu de sa haute précision mais son emploi est moins aléatoire et libre des contraintes trop strictes qui affectaient son fonctionnement. De plus, la précision accrue, qui approche 10^{-11} cm/cm, permet d'étendre les mesures jusqu'à 2 K.

Enfin une méthode originale pour analyser les données, obviant à la nécessité de connaître l'allongement des échantillons entre 0 K et la température initiale de mesure, a été développée et utilisée.

Avec cet appareil nous avons pu séparer la contribution électronique de la contribution du réseau non seulement pour le cuivre et l'aluminium mais également pour l'or et l'argent. Sous 15 K, les données expérimentales obtenues sont correctement représentées par les équations suivantes:

$$10^{10}\alpha = 18.5 T + .348 T^3 \quad (\text{cuivre})$$

$$10^{10}\alpha = 24.6 T + 1.24 T^3 \quad (\text{argent})$$

$$10^{10}\alpha = 9.5 T + 2.20 T^3 \quad (\text{or})$$

$$10^{10}\alpha = 16.2 T + .337 T^3 \quad (\text{aluminium})$$

où α est le coefficient de dilatation thermique, et où le terme linéaire en T est dû aux électrons et celui en T^3 au réseau.

Nos valeurs sont en bon accord avec les valeurs publiées dans le cas de l'or, mais se révèlent un peu élevées pour l'argent. L'écart qui sépare nos résultats dans le cas du cuivre et de l'aluminium est plus considérable. Il semble que le décalage observé soit dû à la pauvre qualité de nos échantillons et peut-être principalement au manque d'un traitement thermique adéquat qui aurait une importance insoupçonnée sur cette propriété des métaux.

HOMMAGE DE PROFONDE GRATITUDE

à mes parents.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur G. Lamarche de m'avoir proposé ce sujet de recherche et de m'avoir patiemment secondé dans mon travail.

Merçi également à Diane Perron qui a gentiment accepté de dactylographier ce texte. Je voudrais exprimer ma reconnaissance à ma famille dont l'appui financier m'a aidé à poursuivre mes études universitaires.

Enfin toute ma gratitude s'adresse à ma femme qui à toujours su m'encourager et me soutenir dans ce travail.

Michel Drolet

TABLE DES MATIERES

	Page
Sommaire	iii
Dédicace	v
Remerciements	vi
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
CHAPITRE I. INTRODUCTION	1
CHAPITRE II. DESCRIPTION DE L'APPAREIL	4
Dilatомètre	5
Système à vide	8
Système de refroidissement	12
Système mécanique	12
Système électrique	14
- l'oscillateur	14
- multiplicateur et compteur de fréquence	19
CHAPITRE III. MESURE DE LA TEMPERATURE	20
Mesure de la résistance	20
Interpolation du thermomètre	21
CHAPITRE IV. ANALYSE DES DONNEES EXPERIMENTALES	32

	page
CHAPITRE V. MESURES EXPERIMENTALES	37
Introduction	37
Section A: Mesure sur l'or	38
- introduction	38
- résultats expérimentaux	38
- discussion	45
Section B: Mesures sur le cuivre, l'argent et l'aluminium.	46
- introduction	46
- cuivre	46
- aluminium	55
- argent	61
DISCUSSION	67
CONCLUSION	75
APPENDICE A-1	77
APPENDICE A-2	82
APPENDICE A-3	94
APPENDICE A-4	101
APPENDICE A-5	109
BIBLIOGRAPHIE	115

LISTE DES FIGURES

		Page
Fig. 1.	Le dilatomètre	6
Fig. 2.	Le système à vide de Kos	9
Fig. 3.	Notre système à vide	11
Fig. 4.	L'oscillateur	15
Fig. 5.	Capacité du système	16
Fig. 6.	Circuit oscillant équivalent	17
Fig. 7.	Le coefficient d'expansion thermique de l'or	44
Fig. 8.	Le coefficient d'expansion thermique du cuivre	54
Fig. 9.	Le coefficient d'expansion thermique de l'aluminium	60
Fig. 10.	Le coefficient d'expansion thermique de l'argent	66
Fig. 11.	α pour l'or, le cuivre, l'argent et l'aluminium	68
Fig. 12.	Conductivité thermique de l'or, du cuivre, de l'argent et de l'aluminium.	72

LISTE DES TABLEAUX

	page
I. Calibration du thermomètre à Ge données par Cryocal, Inc.	24
II. Comparaison entre la température calibrée et la température calculée à l'aide des équations (2.7).	25
III. Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'or.	40
IV. Résumé des valeurs des coefficients pour l'or.	41
V. Coefficient de dilatation thermique de l'or évalué au cours de ce travail.	42
VI. Coefficient de dilatation thermique de l'or évalué par différents auteurs.	43
VII. Analyse spectroscopique pour le Cu, l'Ag et l'Al.	47
VIII. Conditions expérimentales des séries de mesures sur le cuivre.	48
IX. Résumé des valeurs des coefficients pour le cuivre.	49
X. Coefficient de dilatation thermique du Cu évalué au cours de ce présent travail.	50
XI. Coefficient de dilatation thermique du Cu évalué a,b,c, par différents auteurs.	51
XII. Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'Al.	56

	Page
XIII. Résumé des valeurs des coefficients pour l'aluminium	57
XIV. Coefficient de dilatation thermique de l'Al évalué au cours de ce présent travail.	58
XV. Coefficient de dilatation thermique de l'Al évalué par différents auteurs.	59
XVI. Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'argent	62
XVII. Résumé des valeurs des coefficients pour l'argent.	63
XVIII. Coefficient de dilatation thermique de l'Ag évalué au cours de ce présent travail.	64
XIX. Coefficient de dilatation thermique de l'Ag évalué par différents auteurs.	65
A-2 Données expérimentales pour les séries de mesures sur l'or	82
A-3 Données expérimentales pour les séries de mesures sur le cuivre	94
A-4 Données expérimentales pour les séries de mesures sur l'aluminium	101
A-5 Données expérimentales pour les séries de mesures sur l'argent	109

INTRODUCTION

Depuis plus d'une décennie la dilatation des solides à basses températures a fait l'objet d'études expérimentales importantes. C'est ainsi que plusieurs éléments métalliques ont été soumis à des mesures répétées par différentes techniques dans différents laboratoires. Et malgré ces efforts il faut reconnaître que l'accord entre les différentes mesures sur un même métal n'a pas toujours atteint le degré souhaitable. Cet état de chose s'explique en grande partie par le fait que des mesures précises de dilatation sont difficiles à obtenir puisque le coefficient de dilatation $\alpha = \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \frac{1}{\Delta T}$ est très petit sous 15 K. Par exemple, pour un barreau en cuivre pur de 10 cm de long, la longueur ne changera que de 10 μ par degré à 15 K et d'à peine quelques Å par degré à 2 K. Si l'on ajoute à cela que l'état de pureté des échantillons et leur préparation (présence ou absence de dislocations, de lacunes, etc) a une très grande influence, on comprendra qu'il est encore utile d'essayer d'affiner les techniques et de répéter les mesures avant que l'on puisse espérer que des comparaisons détaillées avec les différents modèles théoriques s'avèrent vraiment fructueuses.

Le coefficient de dilatation thermique α est directement proportionnel à l'expression de la chaleur spécifique et donc varie semblablement avec la température: le facteur de proportionnalité contient également le paramètre de Gruneissen γ qui est une mesure

indirecte de l'anharmonicité du potentiel des atomes dans le réseau cristallin, d'où, en grande partie, l'intérêt de ces mesures.

Pour un métal pur, il y a deux contributions distinctes à la dilatation: celle du réseau, qui à très basses températures suit une loi en T^3 et celle des électrons qui est linéaire en T . Ces deux contributions sont susceptibles d'être séparées expérimentalement si les mesures sont suffisamment précises.

Au moment où débutait ce travail la contribution électronique avait été mesurée sur le cuivre et l'aluminium, mais non encore sur l'or et l'argent. Les mesures de dilatation de Kos et al (1968) sur l'or et de White et Collins (1962) et de Kos et Lamarche (1969) sur l'argent ne permettaient pas une évaluation de la contribution électronique dans ces métaux parce que les mesures n'avaient pas été effectuées à une température assez basse.

Le travail décrit dans cette thèse fait suite au travail de Kos (1967) auquel nous référons le lecteur pour une vue d'ensemble plus complète du problème de la dilatation thermique des métaux à basses températures. Pour affiner les techniques de mesures nous avons cherché à améliorer le dilatomètre de notre prédécesseur. Ensuite nous avons repris les mesures sur le cuivre, l'argent et l'or en les poussant jusqu'à 2 K. Nous avons également fait des mesures préliminaires sur l'aluminium. Dans chacun des cas nos mesures ont permis une évaluation de la contribution électronique au coefficient de dilatation. Nous nous sommes également penchés sur l'important problème du traitement des données expérimentales, ce qui nous a permis de découvrir une nouvelle méthode d'analyse qui pourrait s'avérer des plus utiles.

La description d'une nouvelle configuration de la chambre du dilatomètre et d'une nouvelle disposition de la bobine du circuit oscillant, la construction d'un nouvel oscillateur ainsi que les autres modifications font l'objet du chapitre II de cette thèse. Dans le chapitre III nous discutons des mesures de la température et de l'utilisation et de l'étalonnage d'un thermomètre à Ge qui a remplacé le thermomètre à Pt utilisé précédemment. Nous exposons dans le chapitre suivant, les deux méthodes généralement utilisées pour analyser les résultats expérimentaux en mentionnant leur défaut respectif. Notre nouvelle méthode, résolvant ces difficultés y est exposée. Le chapitre V contient nos résultats sur les échantillons de cuivre, d'or, d'argent et d'aluminium et une comparaison avec des résultats publiés. Une discussion de ces résultats y est également incluse. La conclusion de notre travail fait suite à cette discussion.

CHAPITRE II

Bijl et Pullan (1955) furent les premiers à utiliser un oscillateur à capacité variable pour mesurer l'expansion thermique des solides. Dans cette méthode, le condensateur comprend deux plaques parallèles dont l'une est fixe et l'autre, assujettie à une des extrémités d'un échantillon lequel est soumis à une variation contrôlée de température. Le changement de longueur de l'échantillon modifie la capacité de ce condensateur qui forme l'une des composantes d'un circuit oscillant $L-C$; tout changement de capacité engendre une variation de fréquence correspondant au changement de longueur de l'échantillon. Avec cet appareil ils obtenaient une limite de détection de 1.5×10^{-6} cm/cm. Cette précision étant inadéquate, (pour les mesures du coefficient d'expansion α à la température de l'Hélium) ils abandonnèrent ce projet.

Trois ans plus tard, Dheer et Surange (1958) reprirent cette méthode en apportant plusieurs modifications au système précédent. Ils réussirent alors à détecter un changement de longueur de 7×10^{-8} cm/cm. L'utilisation d'un compteur de fréquence adéquat leur aurait permis de mesurer un changement de longueur de 7×10^{-9} cm/cm; soit, dix fois plus grand. Cette augmentation considérable de précision demeurerait néanmoins insuffisante.

De nouvelles modifications apportées à cette méthode expérimentale permirent à Kos et al (1968), Kos et Lamarche (1969) d'observer des changements de l'ordre de 10^{-10} cm/cm. Cette précision

remarquable valut à ce système une place d'honneur parmi les systèmes d'expansion thermique des solides à basses températures. Mais si la précision était adéquate pour la plupart des solides, l'opération de l'appareil de Kos (1967) demeurerait trop aléatoire. En particulier le fonctionnement de l'oscillateur et le montage du système à vide offraient trop de difficultés, ce qui rendait l'utilisation du dilatomètre très incertaine. Certains changements apportés à cet appareil dans ce présent travail le rendirent plus efficace tout en augmentant considérablement sa stabilité. Sa précision, de ce fait, fut accrue.

L'appareil utilisé pour nos mesures d'expansion est donc essentiellement celui de Kos, que nous avons modifié. Nous nous limiterons en ce qui concerne l'appareil, à rappeler quelques points importants et à décrire les modifications apportées.

DILATOMETRE

La figure (1) montre un schéma du dilatomètre. L'échantillon, la chaufferette, le thermomètre, la plaque inférieure, l'écran de radiation et la base B-3 sont les seuls éléments du dilatomètre qui subissent un changement de température lors d'une série de mesures. Tous les autres composants du dilatomètre doivent demeurer à une température fixe, la température du bain d'Hélium (2 K ou 4.2 K). Cette exigence constitue la condition primordiale et essentielle de notre système de mesure, car le changement de longueur mesuré doit

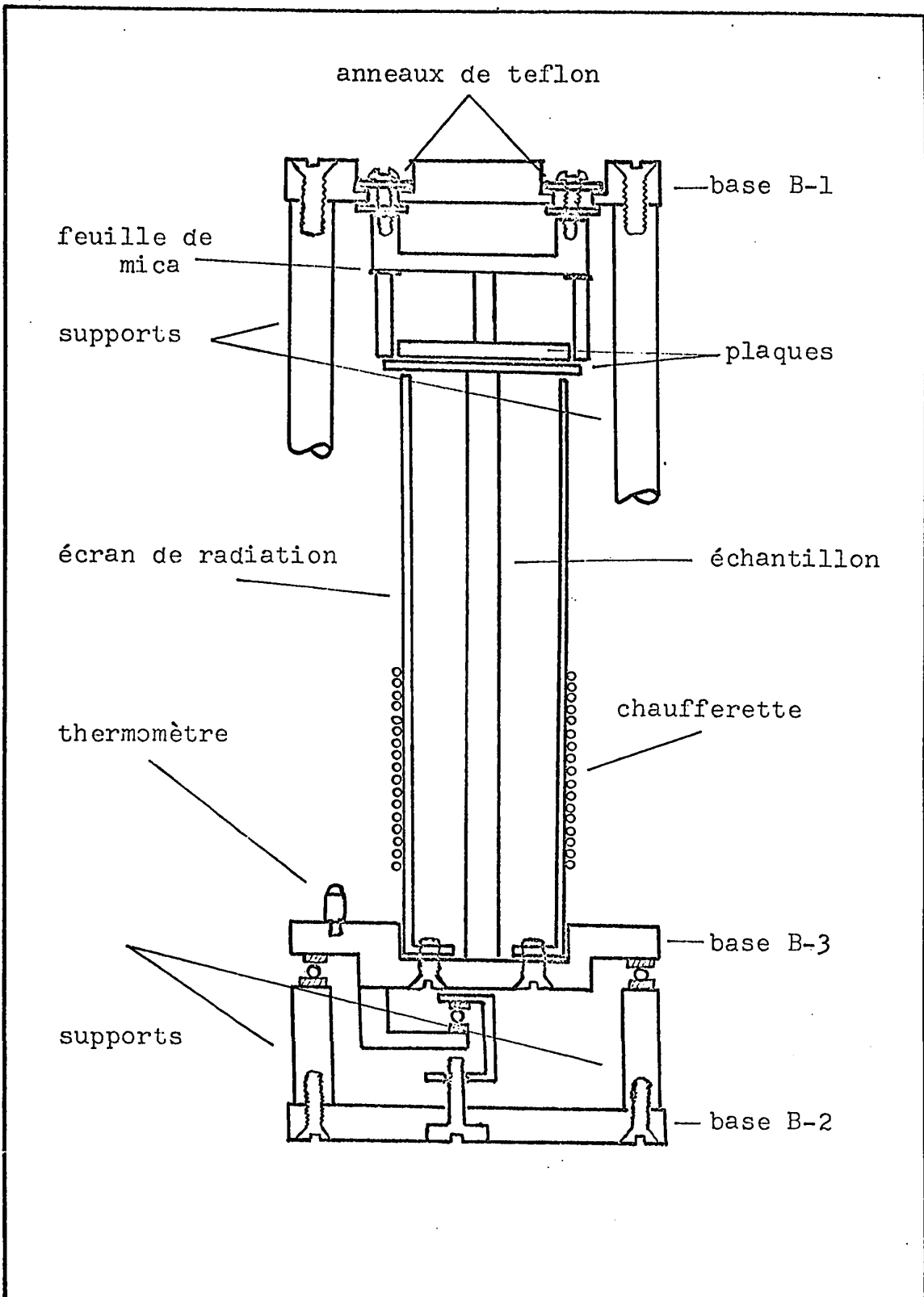


FIGURE 1 : LE DILATOMETRE

provenir exclusivement du changement de longueur de l'échantillon.

Il est donc capital de traiter les contacts et l'isolement thermiques du dilatomètre avec une attention très spéciale. Voici les détails concernant tout d'abord l'isolement thermique. Afin d'isoler thermiquement les deux groupes de composants du système, dont la température de l'un doit être fixe et celle de l'autre doit être variée à volonté, les raccords mécaniques de l'un à l'autre se font en intercalant une bille d'acier entre deux surfaces planes en agate. Cette méthode, utilisée par Kos, permet à la fois une bonne tenue mécanique et un excellent isolement thermique. D'autre part, certains éléments nécessitent un très bon contact thermique entre eux. C'est le cas de l'échantillon, du thermomètre, de l'écran de radiation et des supports, tous en contact avec la base B-1 et la base B-2, ou avec la base B-3. Le problème posé par ces contacts fut solutionné de la façon suivante: l'échantillon est soudé à la base B-3, ce qui permet d'obtenir un très bon contact. Quant aux autres composants, ils sont vissés solidement à leur base respective, en prenant soin préalablement d'introduire une feuille d'indium d'environ .05 mm entre chacune de ces pièces et leur base. Enfin la chaufferette, qui dans le système de Kos était enroulée sur un barreau de cuivre et vissée à la base B-3, n'était pas, à notre avis, adéquate; la chaleur diffusée à travers la base et l'échantillon risquait d'être asymétrique et pouvait, de ce fait, procurer une mesure incorrecte de la température de l'échantillon.

Notre solution a consisté à enrouler le fil de haute résistance (constituant la chaufferette) autour de l'écran de radiation, permettant ainsi une diffusion plus symétrique de l'influx de chaleur. Cet arrangement assure également à l'échantillon une température plus uniforme.

Quant aux mesures de température, elles furent grandement améliorées par l'utilisation d'un thermomètre à germanium. Les détails concernant ce thermomètre ainsi que les mesures de température, seront discutés au chapitre III.

LE SYSTEME A VIDE

Contrôler avec précision la température de l'échantillon tout en gardant les supports du dilatomètre à une température fixe, voilà le but premier du système à vide.

Là, le système de notre prédécesseur, illustré sur la figure 2, possédait des lacunes sérieuses. Voici comment se présentait le montage de ce système. Tout d'abord les quatre dispositifs d'étanchéité (stupakoff seals) pour le passage des fils devaient être soudés en place de façon permanente. Le dilatomètre était ensuite fixé solidement au couvercle supérieur avant de souder le cylindre C (le mur de la chambre). Pour compléter le montage du système à vide, le couvercle inférieur était soudé au cylindre. Cette opération provoquait de sérieux problèmes de fuites, car un joint déjà complété risquait de s'endommager en soudant le suivant. Egalement, lorsque le système était finalement fermé et le vide vérifié à la température de la chambre, tout risquait d'être à recommencer, lors du refroidissement

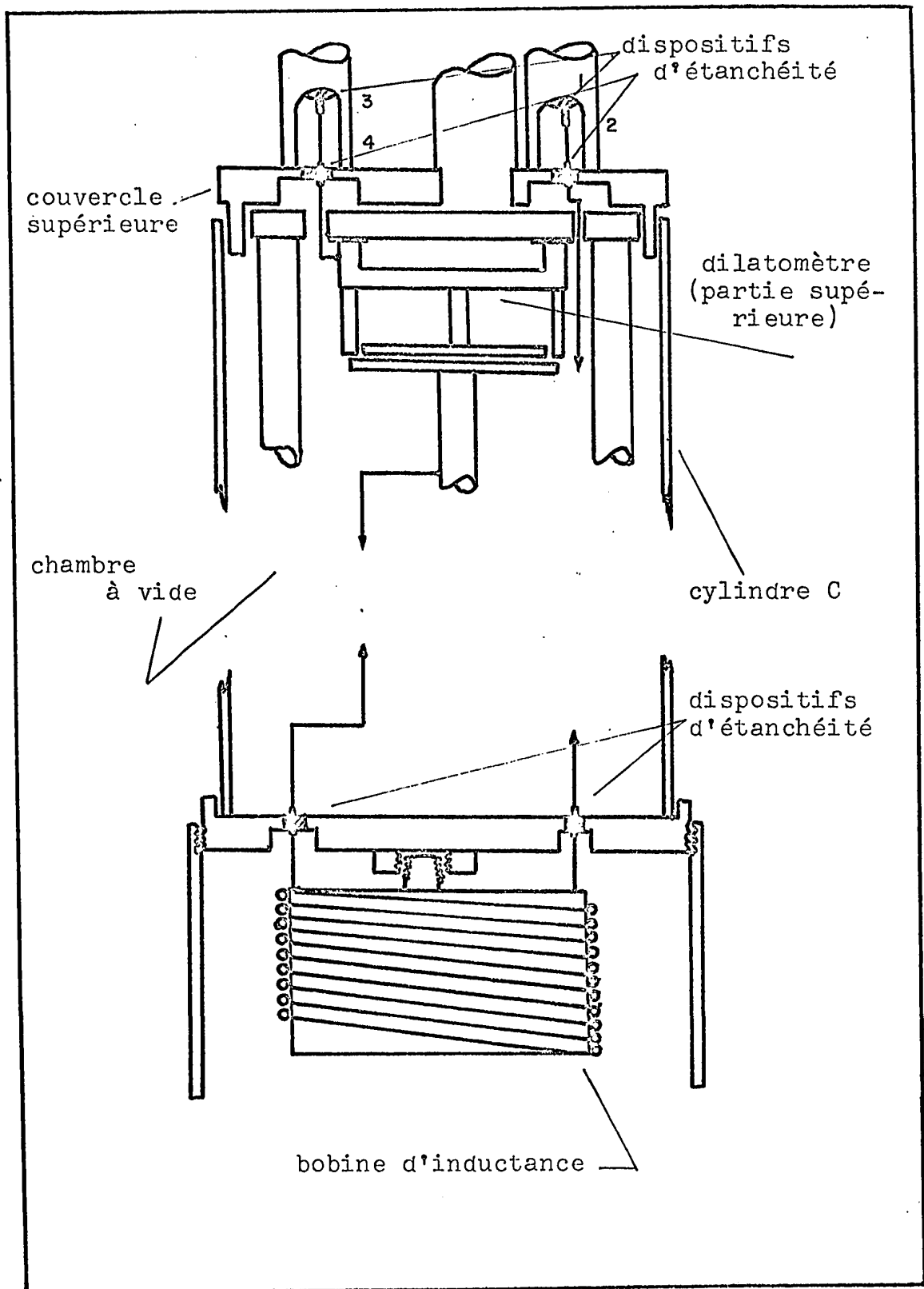


FIGURE 2 : SYSTEME A VIDE DE KOS

du système, si un joint n'était pas parfait. Le refroidissement devant se faire très lentement (environ 24 heures); un temps considérable et beaucoup d'efforts étaient inutilement perdus à chaque manipulation. Notons finalement que les soudures réussies ne résistaient que pour très peu de cycles de refroidissement augmentant de ce fait l'inefficacité du système.

Notre système à vide fut complètement repensé. (Fig. 3.) Tout d'abord, les dispositifs d'étanchéité # 2 et # 4 furent soudés (à l'argent) à une plaque de cuivre elle-même soudée au couvercle supérieur. Quant aux deux autres dispositifs, #1 et # 3, ils furent soudés (à l'étain), par la suite, à la pièce de cuivre reliant les tuyaux d'acier inoxydable au couvercle supérieur. Chacune des pièces soudées l'est en permanence. Pour ce qui est des pièces mobiles (le cylindre et la chambre B), elles sont reliées hermétiquement au système par des joints toriques en indium. Ainsi pour atteindre le dilatomètre, la chambre B peut être enlevée en quelques secondes. Ces joints d'utilisation très simple, demeurent étanches même à basses températures.

L'évacuation de la chambre expérimentale est effectuée à l'aide d'une pompe rotative et d'une pompe à diffusion. Ces pompes nous permettent d'atteindre régulièrement une pression de 5×10^{-6} mm de Hg.

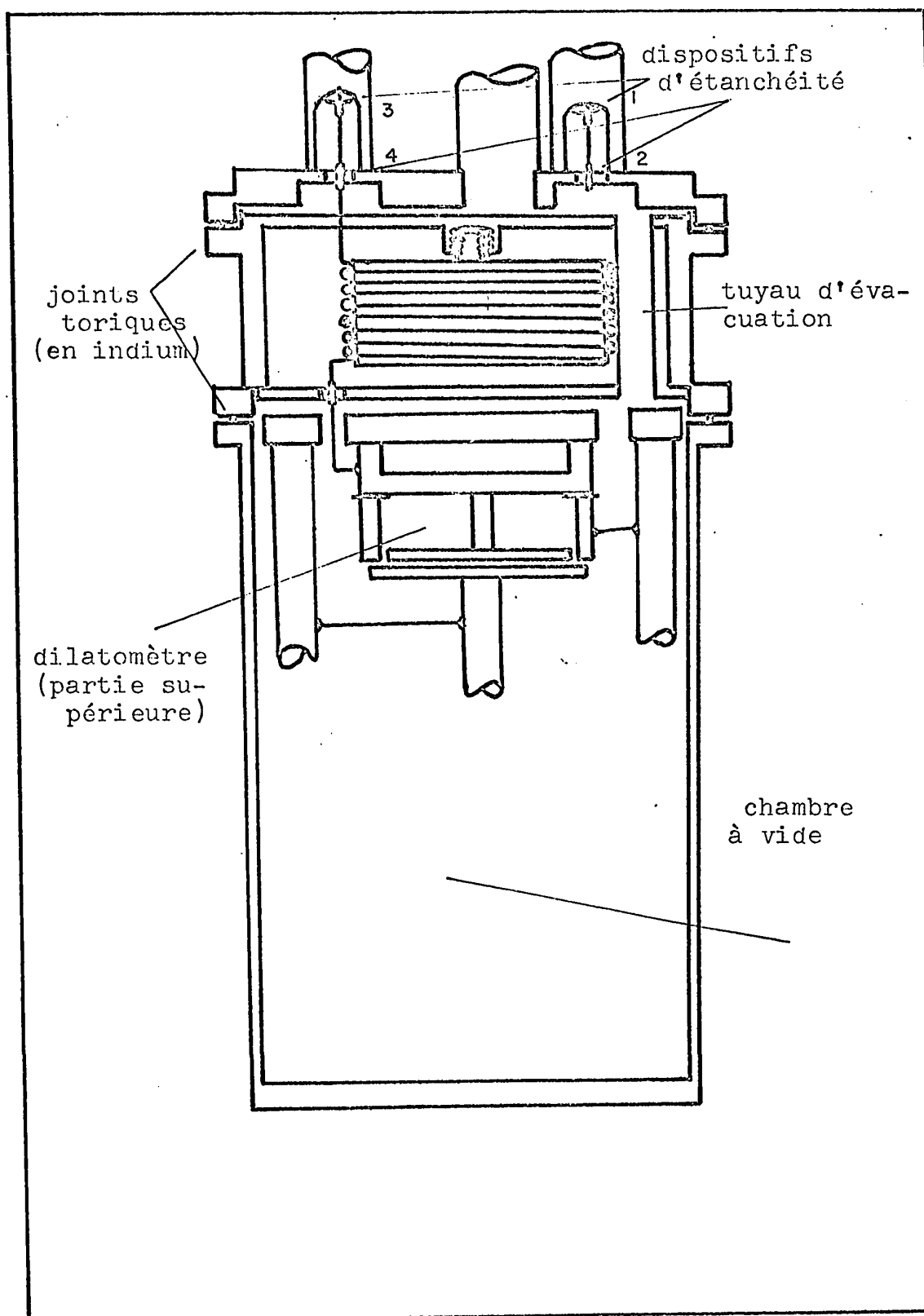


FIGURE 3 : NOTRE SYSTEME A VIDE

SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

Les températures désirées s'obtiennent en siphonnant de l'hélium liquide dans un dewar entourant la chambre expérimentale. Ceci permet une température d'environ 4.2 K. La température peut être abaissée jusqu'à environ 2 K à l'aide d'une pompe rotative de grande vitesse de pompage. A cette température, la pression de vapeur de l'hélium est stabilisée à l'aide d'un manostat. La déviation maximum de la pression du bain, maintenue par le manostat est environ ± 4.0 mm d'huile pendant toute la durée d'une manipulation. Ce changement de pression correspond à un changement de température de $\pm .05$ K.

SYSTEME MECANIQUE

Assise sur l'échantillon, la plaque inférieure du condensateur à plaques parallèles, subit un déplacement égal au changement de longueur de l'échantillon étudié. Le déplacement de la plaque inférieure produit un changement de capacité. Cette dernière, faisant partie du circuit résonnant d'un oscillateur, engendre un changement de fréquence. La mesure de ce changement de fréquence nous permet donc d'évaluer le changement de longueur de l'échantillon.

Voyons maintenant la relation entre le changement de fréquence et le changement de longueur de l'échantillon. La relation reliant la distance entre les plaques d'un condensateur et sa capacité est la suivante:

$$C = \frac{A}{4\pi\epsilon_0 D} \quad 2.1$$

ϵ_0 étant la permittivité du vide, A, la surface d'une des plaques et D, la distance entre les plaques. Il s'ensuit que

$$\Delta C = - \frac{A \Delta D}{4\pi \epsilon_0 D^2} \quad 2.2$$

et

$$\frac{\Delta C}{C} = - \frac{\Delta D}{D} \quad 2.3$$

Ce condensateur faisant partie du circuit résonnant de l'oscillateur, il est donc possible de relier le changement de distance entre les plaques, ΔD au changement de fréquence qu'il produit.

Pour un oscillateur simple dont la fréquence est:

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{LC} \right)^{1/2} \quad 2.4$$

L étant l'inductance en série du circuit résonnant, on peut montrer (Kos 1968) que la relation entre le changement de longueur ΔL , d'un spécimen et le changement de fréquence ΔF , est:

$$\Delta L = \frac{2D}{F} \Delta F \quad 2.5$$

Par cette technique, de minimes changements de longueur peuvent être mesurés. L'équation (2.5) nous montre que la limite de détection peut être améliorée soit en augmentant la fréquence ou en diminuant D ou ΔF .

Voyons maintenant en détail le système électrique que nous avons utilisé.

SYSTEME ELECTRIQUE

Le système électrique comprend l'oscillateur, le multiplificateur de fréquence et le compteur de fréquence.

L'OSCILLATEUR

Les critères qui déterminèrent le choix de l'oscillateur (dont le circuit résonnant est situé à environ un mètre de la lampe amplificatrice) sont les suivants: il doit être très sensible au changement de la capacité des plaques et insensible aux variations des autres capacités inhérentes au système, posséder une très grande stabilité et avoir un domaine de fréquence étendu de sorte que l'ajustement des plaques ne soit pas trop critique.

Lee et al. (1961) décrivent un oscillateur correspondant à de telles exigences. Après quelques modifications secondaires cet oscillateur fut adapté à notre système.

La figure (4) représente le circuit de l'oscillateur tel qu'utilisé par Lee et al. Le "circuit oscillant", étant à environ un mètre de la lampe amplificatrice, et la capacité des plaques parallèles étant très spéciale à cause de sa forme, ceci entraîne plusieurs capacités parasites dont les variations ne doivent pas influencer la stabilité de l'oscillation.

La figure (5) représentant le système mécanique, nous permet de localiser toutes les capacités du système et ainsi d'établir le circuit équivalent (Fig. 6).

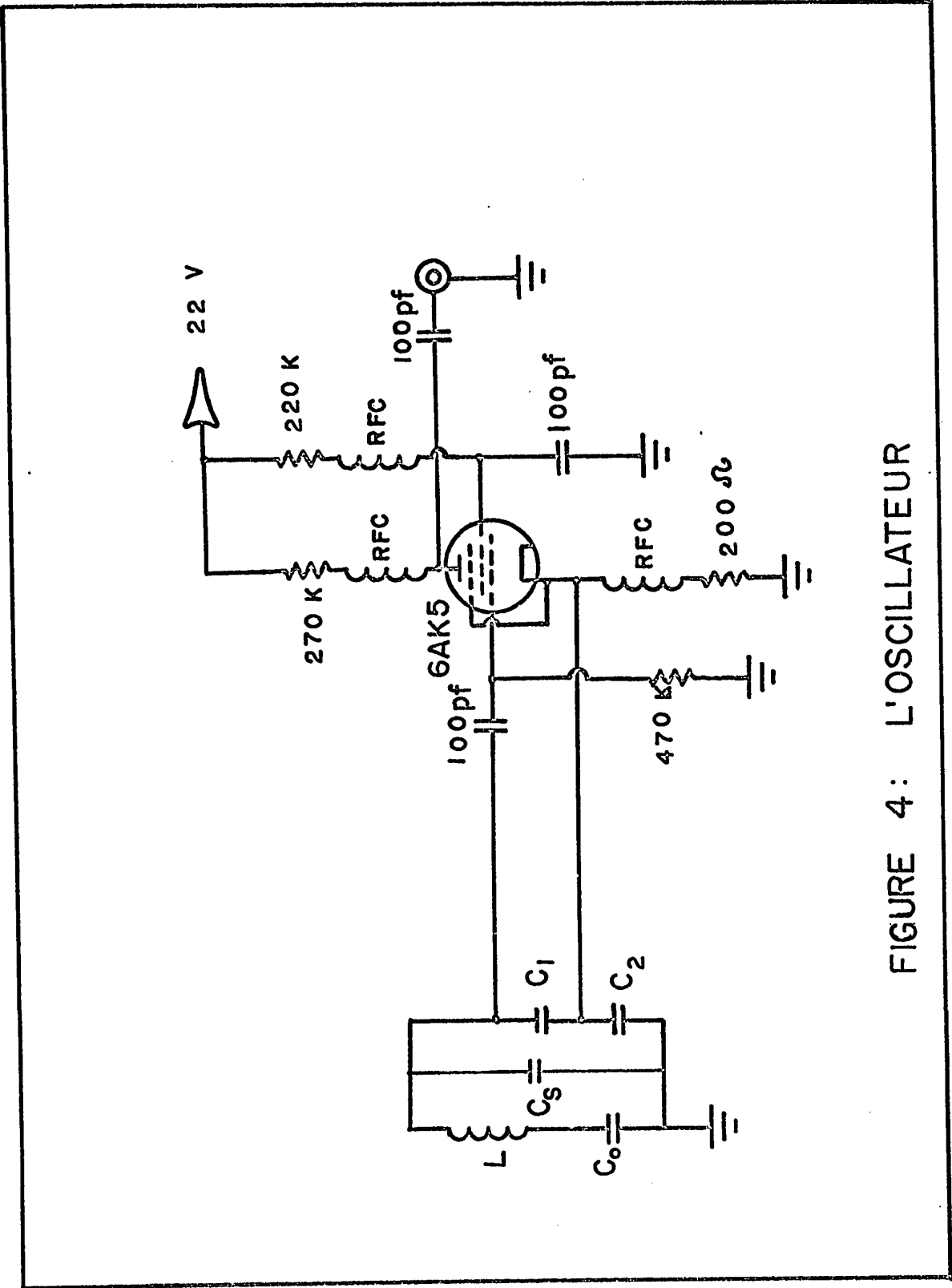


FIGURE 4: L'OSCILLATEUR

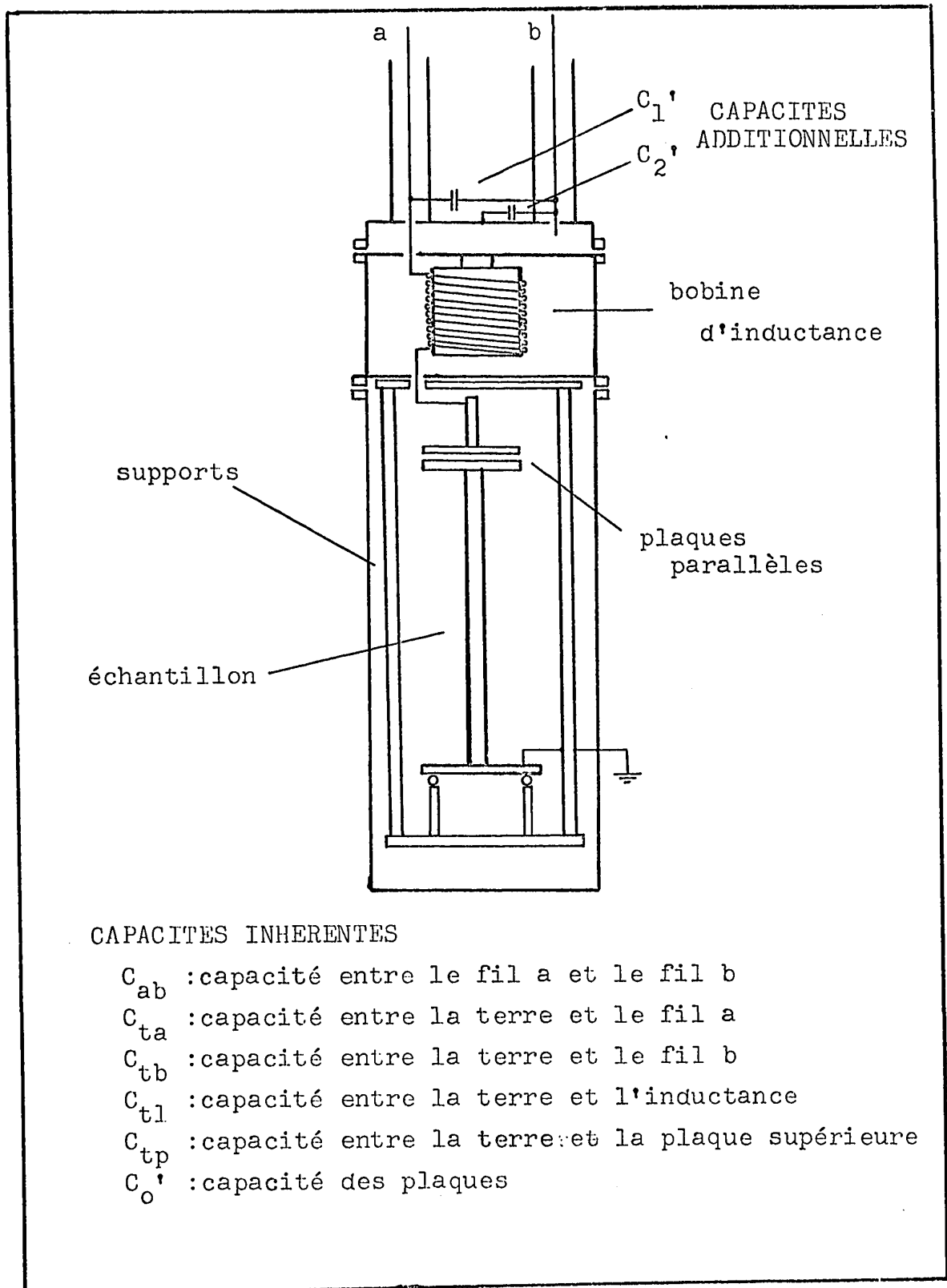
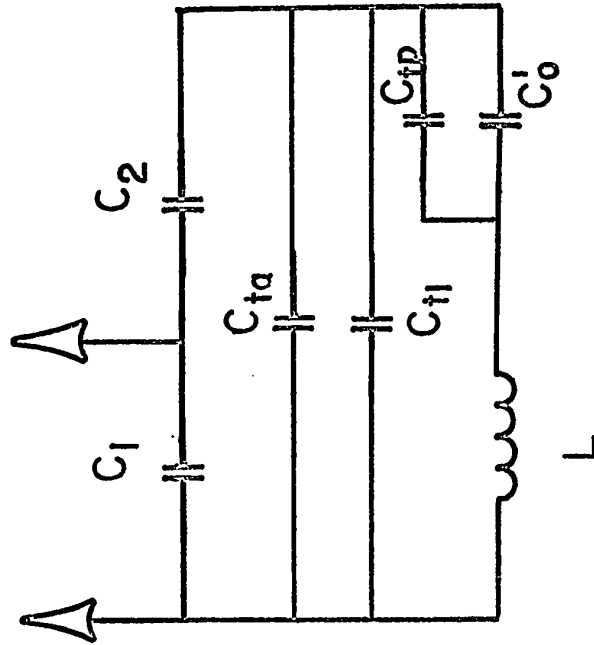


FIGURE 5 : CAPACITES DU SYSTEME

à la lampe électronique



$$C_1 = C_1' + C_{ab}$$

$$C_2 = C_2' + C_{tb}$$

FIGURE 6: CIRCUIT EQUIVALENT

A partir du circuit équivalent, la relation entre la fréquence de l'oscillation et chacun de ses composants est la suivante:

$$4\pi^2 F^2 L = \frac{C_o C_1 + C_o C_2 + C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s}{C_o C_1 C_2 + C_o C_1 C_s + C_o C_2 C_s} \quad 2.6$$

L'équation (2.6) représentant cette relation est dérivée dans l'appendice A-1. L'équation précédente nous dévoile que la fréquence est dépendante de L , C_1 , C_2 , C_o et C_s . En ce qui nous concerne, cette dépendance n'est d'aucune façon un "problème" en autant que le changement de fréquence dépende exclusivement du changement de C_o (la capacité entre les plaques). Cette condition est obtenue lorsque L , C_1 , C_2 et C_s demeurent constants.

Cette exigence fut satisfaite de la façon suivante:

la bobine d'inductance fut solidement fixée au système et placée dans l'hélium liquide. Ceci a pour effet de garder fixe la valeur de L et de C_s en stabilisant la température de la bobine. Pour éviter que les variations incontrôlable de C_{ab} et C_{tb} (capacités inhérentes à l'oscillateur) n'entraînaient des variations considérables de la fréquence, on a placé des condensateurs C_1' , C_2' de capacité importante (~ 1000 pf) en parallèle avec celles-ci. Ces condensateurs placés dans le bain d'hélium sont stables et n'altèrent pas la sensibilité de l'oscillateur. Toutes les capacités du système sont mesurées avant et après chaque série de mesures par un pont de capacitance, type 1615A, de General Radio. L'incertitude des mesures du pont est d'environ 0.002 pf pour les valeurs mesurées et représente .001% d'incertitude.

L'inductance est mesurée avec le pont 'Q Meter' type 260A de Boonton Radio Co. La précision de cet appareil peut être augmentée en mesurant extérieurement la fréquence avec un bon fréquencemètre. La valeur expérimentale, de l'inductance L , n'est utilisée que pour vérifier la validité de la valeur calculée à plusieurs températures (entre 2 K et 15 K) à l'aide de l'équation 2.6.

MULTIPLICATEUR ET COMPTEUR DE FREQUENCE

Le signal d'environ 2 MHz produit par l'oscillateur est ensuite multiplié par un facteur approprié, normalement six, à l'aide du multiplicateur de fréquence. Le facteur de multiplication est trouvé en mesurant le signal de sortie à l'aide du compteur de fréquence (Hewlett Packard, model 5245L). La stabilité de ce fréquencemètre telle qu'établie par le manufacturier est définie comme suit:

- stabilité en fonction du temps: moins de 3 parties dans 10^9
- stabilité en fonction de la température: moins de ± 2 parties dans 10^{10} par degré.
- stabilité en fonction du voltage du réseau: moins de ± 5 parties dans 10^{10} pour un changement de 10% dans ce voltage.

La précision des mesures de la fréquence est donc égale ou supérieure à une partie dans 10^7 . La limite de détection d'un changement de longueur peut être calculée à l'aide de l'équation 2.5. Dans le cas où la stabilité de l'oscillateur est de 1 Hz, $L = 10$ cm. et $D = 0.003$ cm., cette limite de détection est environ $\Delta\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \pm 5 \times 10^{-11}$ cm/cm.

La stabilité de l'oscillateur était vérifiée avant et après chaque série de mesures. Dans les meilleurs cas, on enregistrait une variation de ± 1 c.p.s. pour une fréquence de 12 MHz et une dérive d'environ 10 c.p.s. pour une période de 1/2 heures. Généralement, l'écart moyen était inférieur à 2 c.p.s. et la dérive, d'environ 20 c.p.s. pour une période de 1/2 heure. Lorsque l'instabilité était supérieure à 2 c.p.s., la série de mesures était annulée.

Le gain en stabilité d'un facteur 3 comparé au système précédent de Kos permet en principe des mesures de dilatation trois fois plus précises.

CHAPITRE III

MESURE DE LA TEMPERATURE

L'incertitude dans les mesures d'expansion provient de l'incertitude dans les mesures de changements de longueur, ΔL , et de celle dans les mesures de la température, ΔT . Il est donc impératif qu'une attention toute particulière soit consacrée aux mesures de température.

Le thermomètre à platine, utilisé par Kos ne se prête pas bien aux mesures d'expansion. L'un de ses désavantages est son manque de sensibilité à basses températures.

Un thermomètre à germanium fut donc choisi pour faciliter les mesures de température, tout en augmentant la précision de celles-ci. Le changement de résistance de ce thermomètre, de 2 K à 4 K est de 2867 ohms tandis que celui du thermomètre à platine pour le même intervalle n'est que de 0.3 ohm. Ce thermomètre à germanium, calibré par Cryocal, Inc., possède d'après le manufacturier une précision de .005 K de 2 K à 5K et de .01 K de 5 K à 20 K et ceci pour chaque valeur calibrée par rapport à l'échelle de calibration du N.B.S.

MESURE DE LA RESISTANCE

Notre dilatomètre fut modifié pour s'adapter à ce nouveau thermomètre. La résistance fut mesurée par le même système à quatre fils utilisé pour le thermomètre à platine. Pour détecter la balance du potentiomètre (Guildline, type 9174) un amplificateur galvanométrique Guildline de type 9460 Y fut utilisé. Ce potentiomètre donne une précision de quelques parties dans 100,000. D'autre part, le courant

est mesuré à travers une résistance standard (Leads & Northrup Co # 1335610) de 100.000 ± 0.005 ohms. Ce système nous permet donc de mesurer la résistance du thermomètre de germanium avec une précision plus que suffisante pour tirer le profit maximum de sa calibration.

INTERPOLATION DU THERMOMETRE

Le tableau (1) représente les paires de valeurs, Résistance-Température, de notre thermomètre telles qu'établies par Cryocal, Inc. L'utilisation de ce tableau nécessite une interpolation de la température en fonction de la résistance, de sorte qu'il soit possible de déterminer la température correspondante à une valeur quelconque de la résistance. Une telle interpolation correspond à établir la relation mathématique reliant T et R. La méthode des moindres carrés fut utilisée à cet effet.

Le nombre de données du tableau 1 étant insuffisant pour l'utilisation de cette méthode, il fut nécessaire, en premier lieu, de représenter graphiquement ces données et d'en interpoler par la suite une plus grande quantité. L'incertitude maximum de ces données est environ $\Delta T_{\max} \approx .005$ K pour les valeurs de température inférieures à 6 K et augmentent progressivement jusqu'à $\Delta T_{\max} \approx .02$ K pour une température de 20 K. Ces nouvelles valeurs permirent alors une analyse mathématique adéquate pour établir des équations de la forme

$$T = A + B X + C X^2 + \dots$$

où $X = \log R$ et A, B, C, \dots sont les coefficients. Six équations couvrent les températures comprises entre 2 K et 20 K.

	Températures comprises	
$T = a_1 + b_1 X + c_1 X^2$	(2.00 K à 4.00 K)	
$T = a_2 + b_2 X + c_2 X^2 + d_2 X^3$	(4.00 K à 4.97 K)	
$T = a_3 + b_3 X + c_3 X^2 + d_3 X^3$	(4.97 K à 6.00 K)	
$T = a_4 + b_4 X + c_4 X^2 + d_4 X^3$	(6.00 K à 7.10 K)	2.7
$T = a_5 + b_5 X + c_5 X^2 + d_5 X^3 + e_5 X^4$	(7.10 K à 9.20 K)	
$T = a_6 + b_6 X + c_6 X^2 + d_6 X^3 + e_6 X^4$	(8.20 K à 20.00K)	

Les coefficients de ces équations sont groupés ci-dessous.

$a_1 = + 7.3370084$	$a_3 = + 131.63206$	$a_5 = + 314.38189$
$b_1 = - 1.1964965$	$b_3 = - 61.856766$	$b_5 = - 224.80509$
$c_1 = + 0.04731946$	$c_3 = + 9.8985838$	$c_5 = + 60.90968$
	$d_3 = - 0.53248201$	$d_5 = - 7.3463779$
		$e_5 = + 0.33206195$
$a_2 = 32.749259$	$a_4 = + 24.008643$	$a_6 = + 5.4151798$
$b_2 = - 13.241497$	$b_4 = - 10.091879$	$b_6 = + 0.35051438$
$c_2 = 1.9429548$	$c_4 = + 1.6009412$	$c_6 = - 0.61633595$
$d_2 = - 0.099101160$	$d_4 = - 0.809214117$	$d_6 = + 0.12561143$
		$e_6 = - 0.00821996$

Les premières colonnes du tableau (II) contiennent ces valeurs interpolées ainsi que celles du manufacturier représentées par un astérisque. La colonne suivante représente les valeurs de la température calculées à l'aide des équations (2.7) établies par la méthode des moindres carrés. La différence entre les températures calibrées et calculées est exposée dans la dernière colonne.

Ce tableau illustre bien la précision de l'interpolation mathématique utilisée. On peut remarquer que l'écart maximum entre les valeurs calibrées et les valeurs calculées est inférieur à .006 K pour les températures comprises entre 2 K et 16 K et à .014 K pour les températures comprises entre 16 K et 20 K. Quant au thermomètre à platine (utilisé par Kos), sa précision est d'environ .01 K dans les conditions idéales d'opération à ces températures. L'emploi de ce thermomètre à Ge est pleinement justifié pour les mesures d'expansion à basses températures si l'on considère sa précision remarquable et sa sensibilité exceptionnelle (en comparaison du thermomètre à platine).

TABLEAU I

Calibration du thermomètre à Ge donnée par Cryocal, Inc.

TEMPERATURE en K	RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE en K	RESISTANCE Ohms
2.00	3,769	7.00	317.5
2.25	2,863	7.50	276.8
2.50	2,270	8.00	242.9
2.75	1,858	8.50	214.8
3.00	1,554	9.00	191.3
3.25	1,334	9.50	171.5
3.50	1,155	10.00	154.7
3.75	1,014	11.00	128.15
4.00	902.0	12.00	108.53
4.25	807.7	13.00	93.66
4.50	727.4	14.00	82.14
4.75	659.4	15.00	73.07
5.00	600.4	16.00	65.74
5.50	503.3	17.00	59.71
6.00	427.5	18.00	54.66
6.50	317.5	19.00	50.38
		20.00	46.72

TABLEAU II

Comparaison entre la température calibrée et la température calculée
à l'aide des équations (2.7)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (calibrée)	TEMPERATURE K (calculée)	DELTA T $\times 10^{-2}$
3755*	2.00*	2.0028	.28
3557	2.05	2.0489	-.10
3371	2.10	2.0963	-.37
3190	2.15	2.1467	-.33
3020	2.20	2.1985	-.15
2863*	2.25*	2.2508	.08
2722	2.30	2.3021	.20
2594	2.35	2.3525	.25
2474	2.40	2.4038	.38
2268*	2.50*	2.5021	.21
2179	2.55	2.5490	-.07
2094	2.60	2.5975	-.25
2011	2.65	2.6479	-.21
1933	2.70	2.6985	-.15
1858*	2.75*	2.7505	.05
1787	2.80	2.8031	.30
1723	2.85	2.8535	.35
1664	2.90	2.9030	.30
1607	2.95	2.9536	.36
1554*	3.00*	3.0035	.35
1506	3.05	3.0512	.12
1460	3.10	3.0995	-.05

TABLEAU II
(suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
1417	3.15	3.1469	-.31
1376	3.20	3.1945	-.55
1335*	3.25*	3.2445	-.54
1295.5	3.30	3.2953	-.47
1258.8	3.35	3.3449	-.51
1222.5	3.40	3.3964	-.36
1188.0	3.45	3.4478	-.22
1155.0*	3.50*	3.4995	-.05
1122.0	3.55	3.5537	.37
1092.1	3.60	3.6053	.53
1064.2	3.65	3.6556	.56
1038.6	3.70	3.7038	.38
1014.0*	3.75*	3.7521	.21
991.6	3.80	3.7978	-.22
969.0	3.85	3.8458	-.42
946.7	3.90	3.8951	-.49
924.1	3.95	3.9471	-.29
902.0*	4.000*	3.9992	-.08
891.5	4.025	4.0257	.07
881.9	4.050	4.0503	.03
872.5	4.075	4.0749	-.01
863.0	4.100	4.0999	-.01
853.7	4.125	4.1247	-.03
844.3	4.150	4.1504	.04
835.5	4.175	4.1745	-.05
826.3	4.200	4.1996	-.04
817.5*	4.225*	4.2249	-.01

TABLEAU II
(suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
807.7	4.250	4.2524	.24
800.2	4.275	4.2753	-.03
791.8	4.300	4.3002	.02
784.0	4.325	4.3232	.07
775.5	4.350	4.3495	-.05
767.5	4.375	4.3743	-.07
759.3	4.400	4.4000	.00
751.6	4.425	4.4247	-.03
743.7	4.450	4.4502	.02
735.8	4.475	4.4762	.12
727.4*	4.500*	4.5033	.33
721.0	4.525	4.5260	.10
714.0	4.550	4.5501	.01
707.0	4.575	4.5746	-.04
699.5	4.600	4.6012	.12
693.5	4.625	4.6228	.22
686.0	4.650	4.6502	.02
679.0	4.675	4.6763	.13
672.5	4.700	4.7006	.06
666.0	4.725	4.7256	.06
659.4*	4.750*	4.7514	.14
653.5	4.775	4.7746	-.04
647.5	4.800	4.7987	-.13
641.3	4.825	4.8239	-.11
635.2	4.850	4.8491	-.09

TABLEAU II
(suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
629.4	4.875	4.8734	-.16
623.4	4.900	4.8991	-.09
617.2	4.925	4.9259	.09
611.7	4.950	4.9502	.02
606.1	4.975	4.9752	.02
600.4*	5.000*	5.0010	.10
589.8	5.050	5.0506	.06
579.5	5.100	5.1015	.15
559.9	5.200	5.1999	-.01
550.2	5.250	5.2496	-.04
540.5	5.300	5.3001	.01
531.2	5.350	5.3493	-.07
522.0	5.400	5.3989	-.11
513.0	5.450	5.4483	-.17
503.3*	5.500*	5.5029	.29
455.0	5.800	5.8008	.08
441.0	5.900	5.8984	-.16
427.3*	6.000*	6.0006	.06
427.3	6.000	5.9974	-.26
414.0	6.100	6.0962	-.38
401.0	6.200	6.1973	-.27
388.7	6.300	6.2977	-.23
376.3	6.400	6.4039	.39
363.7*	6.500*	6.5046	.46
353.8	6.600	6.6052	.52
344.4	6.700	6.7047	.47
335.2	6.800	6.8002	.02
326.3	6.900	6.8968	-.32
317.5*	7.000*	6.9969	-.31

TABLEAU II
(suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
308.6	7.10	7.0978	-.21
299.8	7.20	7.2019	.19
291.8	7.30	7.3007	.07
283.7	7.40	7.4051	.51
276.8*	7.50*	7.4975	-.25
269.5	7.60	7.5989	.11
262.8	7.70	7.6950	.46
256.0	7.80	7.7968	.32
249.25	7.90	7.9011	.11
242.90*	8.00*	7.9993	-.07
236.70	8.10	8.1031	.31
231.25	8.20	8.1976	-.24
225.60	8.30	8.2988	-.12
220.25	8.40	8.3980	-.20
214.80*	8.50*	8.5026	.26
209.80	8.60	8.6020	.20
204.90	8.70	8.7028	.28
200.25	8.80	8.8018	.18
196.00	8.90	8.8952	-.47
191.30*	9.00*	9.0022	-.22
187.25	9.10	9.0975	-.25
183.10	9.20	9.1985	-.15
179.20	9.30	9.2966	-.34
175.20	9.40	9.4008	.08
171.50*	9.50*	9.5005	.05
167.10	9.625	9.6234	-.16
162.75	9.750	9.7502	.02

TABLEAU II
 (suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
154.70 *	10.000 *	9.9995	-.05
150.90	10.125	10.1247	-.03
147.25	10.250	10.2498	-.02
143.68	10.375	10.3772	.22
140.27	10.500	10.5039	.39
137.02	10.625	10.6296	.46
133.90	10.750	10.7550	.50
128.15 *	11.000 *	10.999	-.03
125.38	11.125	11.124	-.06
122.77	11.250	11.246	-.38
120.20	11.375	11.371	-.43
117.68	11.500	11.497	-.27
115.27	11.625	11.623	-.20
112.90	11.750	11.751	.11
108.53 *	12.000 *	12.000	.03
106.43	12.125	12.126	.15
104.42	12.250	12.256	.16
102.52	12.375	12.374	-.12
100.66	12.500	12.497	-.24
98.84	12.625	12.623	-.23
97.06	12.750	12.749	-.08
93.66 *	13.000 *	13.003	.29
90.57	13.250	13.249	-.13
84.85	13.750	13.747	-.28
82.14 *	14.000 *	14.006	.59
79.70	14.250	14.253	.29

TABLEAU II
 (suite)

RESISTANCE Ohms	TEMPERATURE K (cal.)	TEMPERATURE K (calc.)	DELTA T $\times 10^{-2}$
77.40	14.50	14.499	-.09
75.19	14.750	14.749	-.09
73.07*	15.000*	15.002	.24
71.10	15.250	15.251	.07
69.23	15.500	15.499	-.10
67.40	15.750	15.754	.46
65.74*	16.000*	15.998	-.16
64.10	16.250	16.251	.12
62.60	16.500	16.494	-.64
61.10	16.750	16.748	-.24
59.71*	17.000*	16.994	-.60
58.30	17.250	17.256	.57
57.04	17.500	17.500	.03
55.80	17.750	17.751	.15
54.66*	18.000*	17.992	-.77
53.49	18.250	18.250	-.00
52.40	18.500	18.500	.01
51.30	18.750	18.763	1.33
50.38*	19.000*	18.992	-.79
49.37	19.250	19.253	.30
48.42	19.500	19.508	.82
47.55	19.750	19.751	.08
46.72*	20.000*	19.991	-.93

CHAPITRE IV

ANALYSE DES DONNEES EXPERIMENTALES

Les paires de données "Potentiel-Fréquence" (P-F) obtenues pour chaque série de mesures sont transformées en paires "Température-changement de longueur par unité de longueur" ($T - \Delta L/L$). Cette transformation se fait de la façon suivante: D'une part, la connaissance de la tension, P, à travers le thermomètre et celle du courant traversant ce dernier, nous permet, par l'application de la loi d'ohm, de calculer sa résistance. La température est ensuite déterminée en utilisant la calibration du thermomètre. D'autre part, la mesure de la fréquence nous permet de calculer précisément la capacité des plaques à l'aide de l'équation 2.6. La valeur ainsi obtenue, rend possible l'évaluation de la distance entre les deux plaques. Connaissant D_i et D, la distance entre les plaques à la température initiale, et à la température T, on en déduit l'élongation par unité de longueur $\Delta L/L$. Le coefficient de dilatation thermique α peut alors être calculé directement de ces paires de données, $T - \Delta L/L$, à l'aide de l'équation suivante:

$$\alpha = \frac{\delta L}{L} \frac{1}{\delta T} \quad 4.1$$

où $\delta L = (\Delta L_{n+1} - \Delta L_n)$ et $\delta T = (T_{n+1} - T_n)$ où $n = 1, 2, \dots$, représente la suite des mesures pour une température croissante ou décroissante. Cette équation établit la valeur moyenne de α entre deux températures.

A basses températures, la dilatation thermique totale des métaux, est due aux électrons et au réseau. Nous avons la relation suivante:

$$\alpha = aT + bT^3 + \dots \quad 4.2$$

Le terme aT représente la contribution électronique et le terme bT^3 celle du réseau. Les autres termes sont négligeables pour une température inférieure à 15 K. La forme de cette équation a suggéré aux auteurs deux méthodes d'analyse des données expérimentales. La première, consiste à déterminer les valeurs de a et b en solutionnant l'équation $\alpha/T = a + bT^2$.* La deuxième, utilise la dilatation totale de l'échantillon par unité de longueur, de 0 K à une température T , est donné par l'équation

$$\Delta L/L = \int_0^T \alpha dT = \int_0^T (aT + bT^3) dT = AT^2 + BT^4 \quad 4.3$$

où $A = a/2$ et $B = b/4$. Ces coefficients peuvent être déterminés en solutionnant l'équation

$$\frac{\Delta L/L}{T^2} = A + BT^2 \quad 4.4$$

* Le désavantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle utilise la valeur moyenne du coefficient de dilatation thermique.

Cette méthode, préférée habituellement à la précédente, possède un défaut évident. Les mesures étant prises à une température initiale de 4.2 K et quelquefois de 2 K, il est donc nécessaire de trouver, par extrapolation, la contribution de $\Delta L/L$ de 0 K à 2 ou 4.2 K. Cette contribution, quoique petite, apporte une erreur systématique dans le calcul du coefficient A.

Nous suggérons une nouvelle méthode qui possède les qualités de la deuxième mais non sa lacune. L'équation (4.3) représente le changement total de la longueur de l'échantillon. Il s'ensuit que le changement par unité de longueur, $\frac{\Delta L}{L}$, entre 0 K, et une température finale T est égale à la somme des $\Delta L/L$ entre 0 K et T_i et entre T_i et T, T_i étant la température initiale pour la série de mesures utilisée;

donc

$$\frac{\Delta L}{L}(T_0, T) = \frac{\Delta L}{L}(T_0, T_i) + \frac{\Delta L}{L}(T_i, T) \quad 4.5$$

D'après l'équation 4.3 l'on peut écrire

$$\frac{\Delta L}{L}(T_0, T_i) = AT_i^2 + BT_i^4 \quad 4.6$$

et

$$\frac{\Delta L}{L}(T_0, T) = AT^2 + BT^4 \quad 4.7$$

des équations (4.5), (4.6) et (4.7) nous obtenons

$$\frac{\Delta L}{L}(T_i, T) = A(T^2 - T_i^2) + B(T^4 - T_i^4) \quad 4.8$$

L'évaluation de A et B est possible en transformant l'équation (4.8) de la façon suivante

$$\frac{\Delta L (T_i, T)}{L (T^2 - T_i^2)} = A + B \frac{(T^4 - T_i^4)}{(T^2 - T_i^2)}$$

L'utilisation de cette méthode évite la nécessité d'une extrapolation entre T_i et 0 K. Les coefficients, A et B obtenus de cette façon nous permettent d'évaluer le coefficient de dilatation thermique total et aussi de séparer la dilatation électronique, α_e , de celle du réseau, α_L .

Les coefficients de gruneisen γ_e , γ_L et γ_0 , peuvent alors être calculés à l'aide des équations suivantes:

$$\gamma_e = \frac{3 \alpha_e V}{\chi_T C_e} \quad 4.9$$

$$\gamma_L = \frac{3 \alpha_L V}{\chi_T C_L} \quad 4.10$$

$$\gamma_0 = \frac{3 \alpha V}{\chi_T C} \quad 4.11$$

où C, C_e et C_L représentent la chaleur spécifique totale, celle due aux électrons et, celle du réseau. V est le volume molaire et χ_T , la compressibilité isotherme.

Les valeurs de la chaleur spécifique utilisées pour le calcul des γ sont de Phillips (1959) pour l'aluminium et de Martin (1966) pour le cuivre, l'or et l'argent

Les valeurs du volume molaire et de la compressibilité isotherme pour chacun de ces quatres échantillons sont représentés ci-dessous.

	Cu	Au	Ag	Al
$V \text{ (cm}^3\text{) à 4 K}$	7.04	10.21	10.15	9.869
$\chi_T (10^{+11} \text{ dyne}^{-1} \text{ cm}^{+2})$	7.0409 ^a	5.55 ^b	9.20 ^b	13.3 ^c

a) Overton, Gaffney, (1955)

b) Neighbours et Alers (1958)

c) Sutton (1953)

CHAPITRE V

MESURES EXPERIMENTALESINTRODUCTION

L'acharnement soutenu dans l'obtention de mesures expérimentales de plus en plus précises à basses températures a comme objectif premier la connaissance de l'apport électronique à l'expansion thermique des solides. Cette contribution électronique ne se manifeste qu'à très basses températures.

En fait, la limite supérieure de température pour laquelle cet effet peut être estimé se situe aux environs de 5 K pour le cuivre et l'aluminium et de 2 K pour l'argent et l'or. Conséquemment, la valeur du coefficient électronique "a" de l'équation $\alpha = aT + bT^3$ fut évaluée pour le cuivre et l'aluminium par plusieurs auteurs, mais ce n'est que lorsque le présent travail était très avancé que les valeurs pour l'Ag et l'Au furent publiées (White et Collins, 1972; McLean, et al. 1972). De plus, les valeurs obtenues pour le cuivre varient considérablement d'un auteur à l'autre. Au cours des années, les valeurs données par White diffèrent jusqu'à 35%.

Ces raisons nous incitèrent à étudier ces quatre métaux.

SECTION A Mesures sur l'or.INTRODUCTION

Les mesures précises sur les métaux à très basses températures sont relativement récentes et nous ne discuterons que de ces dernières. A cause de l'imprécision de sa technique, Fraser (1965) limita ses mesures à une température supérieure à 10 K (avec une incertitude de 20% à cette température), tandis que Kos, et al. (1968) et Kos et Lamarche (1969) mesurèrent jusqu'à 5 K. Dans les deux cas, les auteurs ne purent séparer adéquatement l'expansion due au réseau de l'expansion électronique. Par contre, les mesures les plus récentes de White et Collins (1972) et de McLean, et al. (1972) s'étendent jusqu'à environ 2 K et permettent l'évaluation du coefficient électronique.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'échantillon d'or mesuré est le même que celui utilisé par Kos. D'une pureté de 99.997%, l'on retrouva dans cet échantillon (d'après le fournisseur) 300 p.p.m. de cuivre et d'argent et quelques traces de sélénium et de tellurium.

L'incertitude des mesures d'expansion à une température inférieure à 4 K s'avère importante même pour un appareil ayant une limite de détection de 5×10^{-11} cm/cm. Il est donc essentiel d'exécuter plusieurs séries de mesures dans des conditions expérimentales variées.

De cette façon, nous obtenons des résultats beaucoup plus conformes à la réalité qu'ils ne le seraient avec une seule série de mesures. Ainsi, pour notre échantillon d'or nous avons exécuté plusieurs séries de mesures dont nous ne conservâmes que les cinq plus complètes. Le tableau III indique le nombre de données expérimentales, les intervalles de température et la pression du gaz d'échange (hélium) dans la chambre expérimentale, pour chacune des séries de mesures.

Les données expérimentales servirent à déterminer les coefficients A et B de l'équation (4.3) par la méthode décrite au chapitre IV. A l'aide de ces coefficients A et B, la valeur de $\Delta L/L$ entre la température initiale T_i et la température finale T est calculée et apparaît à la colonne 3 des tableaux A.2 a, b, c, d, en l'appendice. Dans la 2ième colonne de ces tableaux apparaissent les valeurs obtenues directement et que nous appellerons les valeurs expérimentales. Dans chaque cas T_i apparaît à la première ligne de la 1 ière colonne. Enfin, la quatrième colonne de ces tables représente le pourcentage de déviation entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

La valeur des coefficients, a et b, de l'équation (4.2) est donnée au tableau IV qui contient également les valeurs déjà publiées. Le tableau V donne les valeurs du coefficient d'expansion α à tous les degrés de 2 à 15 K, évaluées dans ce présent travail et le tableau VI celles évalués par les autres auteurs. Toutes ces valeurs sont présentées sur la figure 7 ce qui facilite leur comparaison.

TABLEAU III

Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'or

SERIES	NOMBRE DE DONNEES EXPERIMENTALES	INTERVALLES DE TEMPERATURE	PRESSION DANS LA CHAMBRE
Au(1)	23	2.2 K à 5.5 K	.200 mm de Hg
Au(2)	76	2.2 K à 7.5 K	10^{-5} "
Au(3)	77	2.2 K à 7.3 K	.100 "
Au(4)	28	4.2 K à 14. K	10^{-5} "
Au(5)	21	2.2 K à 5.5 K	.100 "

TABLEAU IV

Résumé des valeurs des coefficients pour l'or

AUTEURS	a x 10 ⁹	b x 10 ¹⁰	γ_e	γ_o	COMMENTAIRES
Kos, Lamarche (1968, 1969)	-	-	-	2.62	γ_o calculé en utilisant $\gamma_e = .66$
White, Collins (1972)	.1	2.45	.7	2.94	T < 4 K
White, Collins (1972)	.4	2.2	2.8	2.64	4 K < T < 7 K
McLean et al (1972)	.2	2.37	1.6	2.96	4 K < T < 15 K
White, Pawlovicz (1970)	-	-	1	2.85	
Présent travail					
Au(1)	1.12	2.04	8.85	2.45	
Au(2)	0.64	2.28	5.06	2.74	
Au(3)	1.12	2.24	8.85	2.69	
Au(4)	1.20	2.24	9.48	2.69	
Au(5)	0.68	2.20	5.37	2.64	
Moyenne	0.95	2.20	7.50	2.64	

TABLEAU V

Coefficient de dilatation thermique de l'or évalué au cours de ce présent travail.

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{K}^{-1}$
	Au(1)	Au(2)	Au(3)	Au(4)	Au(5)
2.00	.387	.310	.403	.419	.312
3.00	.886	.808	.941	.965	.798
4.00	1.754	1.715	1.882	1.914	1.680
5.00	3.110	3.170	3.360	3.400	3.090
6.00	5.078	5.309	5.510	5.558	5.160
7.00	7.781	8.286	8.467	8.523	8.022
8.00	11.34	12.18	12.37	12.43	11.80
9.00	15.88	17.20	17.34	17.41	16.65
10.00	21.52	23.44	23.52	23.60	22.68
11.00	28.34	31.05	31.05	31.13	30.03
12.00	36.60	40.17	40.05	40.15	38.83
13.00	46.27	50.92	50.67	50.77	49.22
14.00	57.55	63.46	63.03	63.15	60.51
15.00	70.53	77.91	77.28	77.40	75.27

TABLEAU VI

Coefficient de dilatation thermique de l'or évalué par différents auteurs

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	White et Collins (1972)	McLean et al., (1972)	Kos et Lamarche #1	Kos et Lamarche (1969) #2
2.00	.21	.239	-	-
3.00	.68	.694	-	-
4.00	1.55	1.58	-	-
5.00	2.94	3.00	2.55	2.64
6.00	4.94	5.09	4.62	4.66
7.00	7.8	7.95	7.53	7.48
8.00	11.6	11.76	11.42	11.83
9.00	16.6	16.8	16.5	17.1
10.00	22.8	23.1	22.8	23.3
11.00	-	-	30.6	31.1
12.00	40.1	40.4	39.7	40.2
13.00	-	-	50.0	50.7
14.00	64.2	64.3	61.8	62.6
15.00	78.5	78.8	76.5	76.8

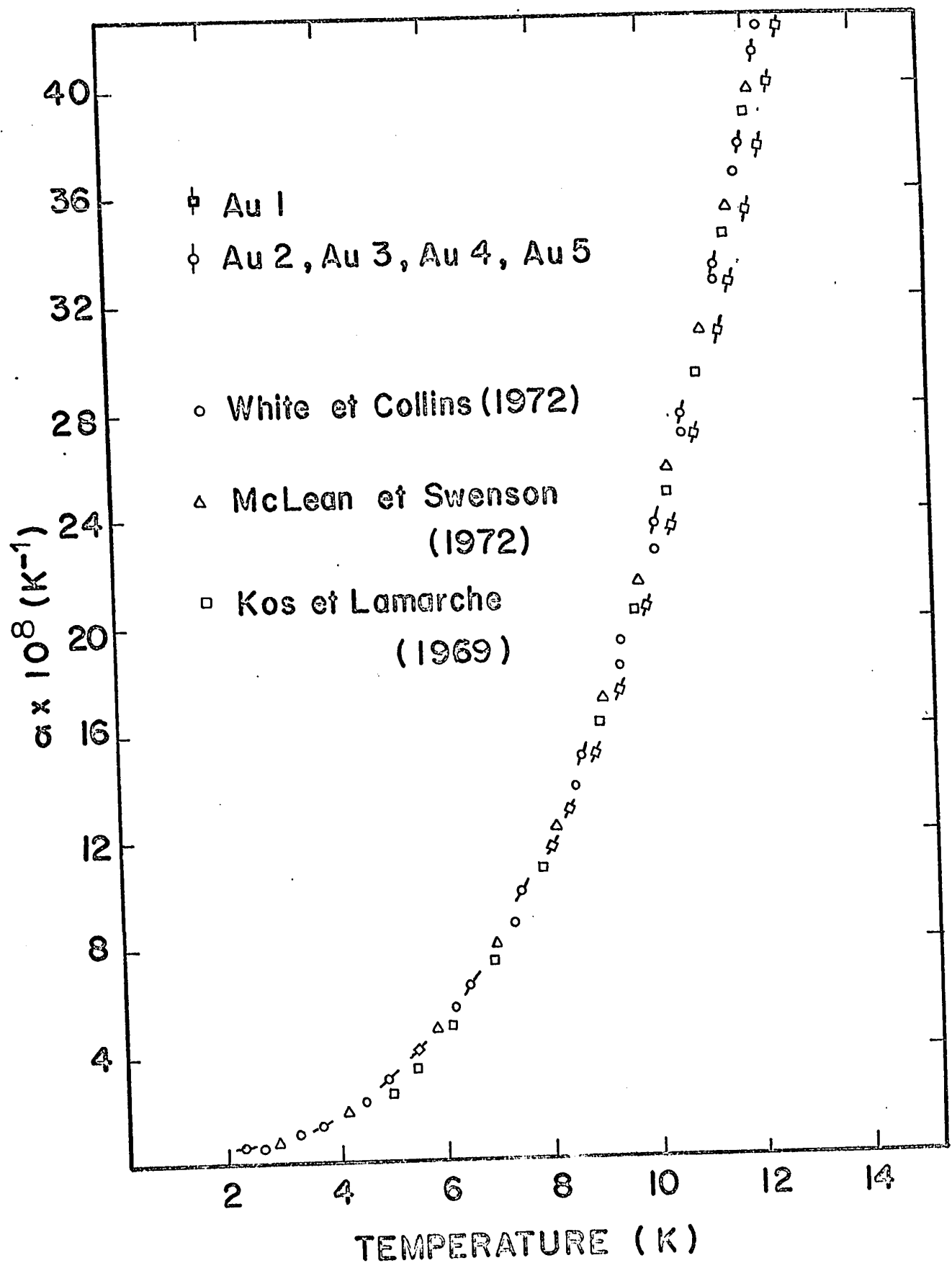


FIGURE 7 : α pour l'or

DISCUSSION

On notera immédiatement au tableau IV la grande différence entre nos valeurs du coefficient "a" et celles des autres auteurs d'une part, et d'autre part, le bon accord des points expérimentaux figurant sur la figure 7. Bien que α_e ne soit pas en accord avec les résultats des plus récentes publications, il ne faudrait pas s'en étonner puisque même à une température de 2 K, ce facteur est très difficile à estimer d'une façon non équivoque. L'estimation de ce coefficient par White et Collins (1972) entre 4 et 7 K est 4 fois supérieure à ce qu'elle est pour des températures entre 2 et 4 K. Il s'ensuit qu'une évaluation précise et fiable du coefficient "a" demeure très difficile.

SECTION B Mesures sur le cuivre, l'argent et l'aluminium

INTRODUCTION

Cette section comporte une étude détaillée de nos mesures exécutées sur les échantillons de cuivre, d'aluminium et d'argent et une comparaison entre ces dernières et celles de différents auteurs.

Les échantillons utilisés pour nos mesures ont une pureté nominale de 99.999%. Les résultats des analyses spectroscopiques donnés par le fournisseur, sont représentés dans le tableau VII.

Les résultats expérimentaux présentés plus bas furent analysés de la même façon que ceux de l'or.

CUIVRE

Les tableaux VIII, A.3 a, b, c et X représentent respectivement les caractéristiques de chacune des trois séries de mesures, les valeurs expérimentales et les valeurs de α pour chacune des séries de mesures du cuivre. Le tableau XI a, b, c contient les valeurs du coefficient d'expansion thermique, α , estimées par différents auteurs. Toutes ces valeurs de α sont présentées sur la figure 8 ce qui facilite leurs comparaisons. Les valeurs des coefficients a et b de l'équation (1), ainsi que ceux des paramètres de gruneisen, γ_e et γ_o pour chacun de ces auteurs sont données dans le tableau IX.

TABEAU VII.

Analyse spectroscopique pour le Cu, l'Ag et l'Al

ECHANTILLONS	IMPURETEES (en p.p.m.)									
	Ag	Fe	Si	Cd	Pb	Mg	Cu	Ca	Sn	Zn
CUIVRE	4	2	1	1	1	1	1			
ALUMINIUM	1	3	2	2		20	1			8
ARGENT		5		1		1	2	1	1	1

TABLEAU VIII

Conditions expérimentales des séries de mesures sur le Cu

SERIES	NOMBRE DE DONNEES EXPERIMENTALES	INTERVALLES DE TEMPERATURE	PRESSION DANS LA CHAMBRE
Cu(1)	29	3.0 K à 13 K	.100 mm de Hg
Cu(2)	39	2.0 K à 14 K	.100 mm de Hg
Cu(3)	32	4.0 K à 13 K	.100 mm de Hg

TABLEAU IX
Résumé des valeurs des coefficients pour le cuivre

AUTEURS	$a \times 10^9$	$a \times 10^{10}$	γ_e	γ_o	COMMENTAIRES
White (1962)	.16	.292	.7	1.93	
Carr et al., (1964)	.145	.28	.63	1.72	$\Delta\gamma_e = .03$
Shapiro et al., (1964)	.278	.310	1.21	1.95	$\Delta\gamma_e = .13$
Carr, Swenson, (1964)	.17	.29	.74	1.78	
Kos, Lamarche (1969)	.155	.275	.67	1.74	$\Delta\gamma_e = .03$
Pereira, et al., (1964)	.13	.27	.57	1.70	Incertitude de 20% par T<5 K
White, Collins (1972)	.215	.284	.93	1.78	
McLean, et al. (1972) Case(1972)	.21	.261	.91	1.67	Cu3
McLean, et al. (1972) Case (1972)	.28	.291	1.23	1.86	Cu1
Présent travail					
Cu(1)	1.86	.352	8.07	2.25	
Cu(2)	1.86	.332	8.07	2.25	
Cu(3)	1.84	.360	7.98	2.30	
Moyenne	1.853	.348	8.04	2.27	

TABLEAU X

Coefficient de dilatation thermique du Cu évalué au cours de ce présent travail

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	Cu(1)	Cu(2)	Cu(3)
2.00	.400	.398	.397
3.00	.653	.649	.649
4.00	.969	.956	.966
5.00	1.370	1.345	1.370
6.00	1.876	1.833	1.882
7.00	2.509	2.441	2.523
8.00	3.290	3.188	3.315
9.00	4.240	4.094	4.280
10.00	5.380	5.180	5.440
11.00	6.731	6.465	6.815
12.00	8.314	7.969	8.429
13.00	10.15	9.712	10.30
14.00	12.26	11.71	12.54
15.00	14.67	13.99	14.91

TABLEAU XIa

Coefficient de dilatation thermique du Cu évalué par différents auteurs

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	White (1961)	Carr et al. (1964)	White et Collins (1972)	Kos et Lamarche (1969)
2.00	.055	.051	.066	-
3.00	.127	.119	.14	-
4.00	.251	.237	.27	-
5.00	.445	.422	.46	.424
6.00	.727	.692	.75	.688
7.00	1.11	1.062	1.13	1.062
8.00	1.62	1.55	1.64	1.549
9.00	2.27	2.171	2.29	2.169
10.00	3.08	2.945	3.10	2.940
11.00	4.06	3.886	4.13	3.878
12.00	5.24	5.01	5.30	5.000
13.00	6.62	6.34	6.82	6.322
14.00	8.236	7.886	8.65	7.864
15.00	10.095	9.667	10.70	9.637

TABLEAU XI. b

(suite)

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	Graham (1972)*	Pereira et al. (1970)	Shapiro et al., (1964)
2.00	.072	.048	.080
3.00	.157	.112	.167
4.00	.301	.225	.310
5.00	.522	.403	.526
6.00	.841	.661	.836
7.00	1.277	1.017	1.258
8.00	1.850	1.486	1.810
9.00	2.578	2.085	2.510
10.00	3.482	2.83	3.378
11.00	4.581	3.74	4.432
12.00	5.894	4.821	5.690
13.00	7.442	6.101	7.172
14.00	9.243	7.591	8.896
15.00	11.317	9.308	10.879

* publié dans White, Collins (1972).

TABLEAU XI c

(suite)

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	Carr et Swenson (1964)	McLean, et al., (1972)	Cu-3
2.00	.057	.08	.063
3.00	.129	.165	.133
4.00	.253	.304	.252
5.00	.475	.517	.436
6.00	.728	.820	.701
7.00	1.114	1.235	1.066
8.00	1.621	1.783	1.551
9.00	2.267	2.49	2.175
10.00	3.07	2.352	2.96
11.00	4.047	-	-
12.00	5.215	5.75	5.115
13.00	6.592	-	-
14.00	8.196	9.01	8.22
15.00	10.04	11.17	10.20

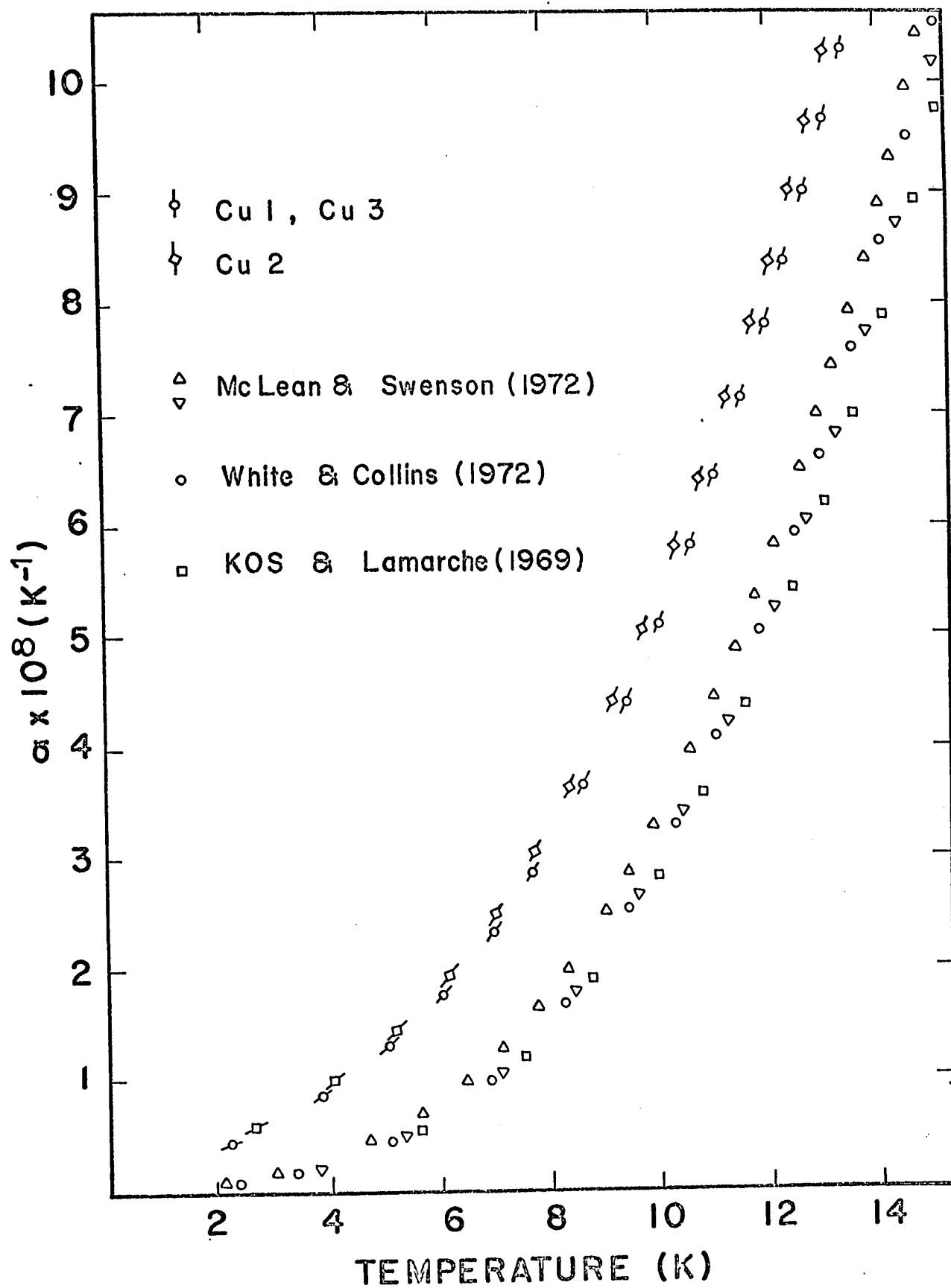


FIGURE 8 : α pour le cuivre

ALUMINIUM

Les caractéristiques de chacune des quatre séries de mesures, et les valeurs de α pour chacune de ces séries de mesures de l'aluminium sont représentées respectivement dans les tableaux XII, et XIV. Le tableau XV contient les valeurs du coefficient d'expansion thermique, α , estimées par différents auteurs. Toutes ces valeurs de α sont présentées sur la figure 9. Les valeurs des coefficients a et b de l'équation (1), ainsi que ceux des paramètres de gruneisen, γ_e et γ_o pour chacun de ces auteurs sont données dans le tableau XIII. Les valeurs expérimentales $\Delta L/L$ apparaissent en appendice au tableau A.4 a, b, c.

TABLEAU XII

Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'Al.

SERIES	NOMBRE DE DONNEES EXPERIMENTALES	INTERVALLES DE TEMPERATURE	PRESSION DANS LA CHAMBRE
Al(1)	26	2.1 K à 14 K	.100 mm de Hg
Al(2)	25	2.2 K à 14 K	.200 mm de Hg
Al(3)	23	2.0 K à 14 K	.150 mm de Hg
Al(4)	29	2.0 K à 14.8 K	.100 mm de Hg

TABLEAU XIII

Résumé des valeurs des coefficients pour l'aluminium

AUTEURS	$a \times 10^9$	$a \times 10^{10}$	γ_e	γ_o	COMMENTAIRES
Andres (1961)	1.1	.22	1.7	2.3*	* D'après nos calculs
White (1964)	.9	.25	1.8	2.6	
Carr, Swenson (1964)	.81	.30	1.6*	3.1*	* D'après nos calculs
Présent travail					
AL(1)	1.44	.376	2.37	3.66	
AL(2)	1.66	.320	2.74	3.11	
AL(3)	1.70	.324	2.80	3.16	
AL(4)	1.68	.330	2.76	3.23	
Moyenne	1.62	.337	2.66	3.29	

TABLEAU XIV

Coefficient de dilatation thermique de l'Al évalué au cours de ce présent travail

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Al(1)	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Al(2)	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Al(3)	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Al(4)
2.00	.318	.359	.366	.362
3.00	.534	.586	.597	.594
4.00	.817	.871	.887	.884
5.00	1.190	1.233	1.255	1.225
6.00	1.678	1.691	1.720	1.725
7.00	2.298	2.264	2.301	2.315
8.00	3.077	2.971	3.019	3.044
9.00	4.037	3.832	3.892	3.932
10.00	5.200	4.866	4.940	5.000
11.00	6.588	6.092	6.182	6.267
12.00	8.224	7.529	7.639	7.753
13.00	10.133	9.196	9.328	9.478
14.00	12.333	11.113	11.270	11.462
15.00	14.850	13.300	13.485	13.725

TABLEAU XV

Coefficient de dilatation thermique de l'Al évalué par différents auteurs

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	Andres (1961)	White (1961)	Carr et Swenson (1964)
2.00	.238	.20	.19
3.00	.389	.338	.324
4.00	.581	.520	.516
5.00	.825	.763	.780
6.00	1.135	1.080	1.134
7.00	1.525	1.488	1.596
8.00	2.006	2.000	2.184
9.00	2.594	2.633	2.916
10.00	3.300	3.400	3.810
11.00	4.138	4.318	4.884
12.00	5.122	5.400	6.166
13.00	6.263	6.663	7.654
14.00	7.577	8.120	9.366
15.00	9.075	9.788	11.34

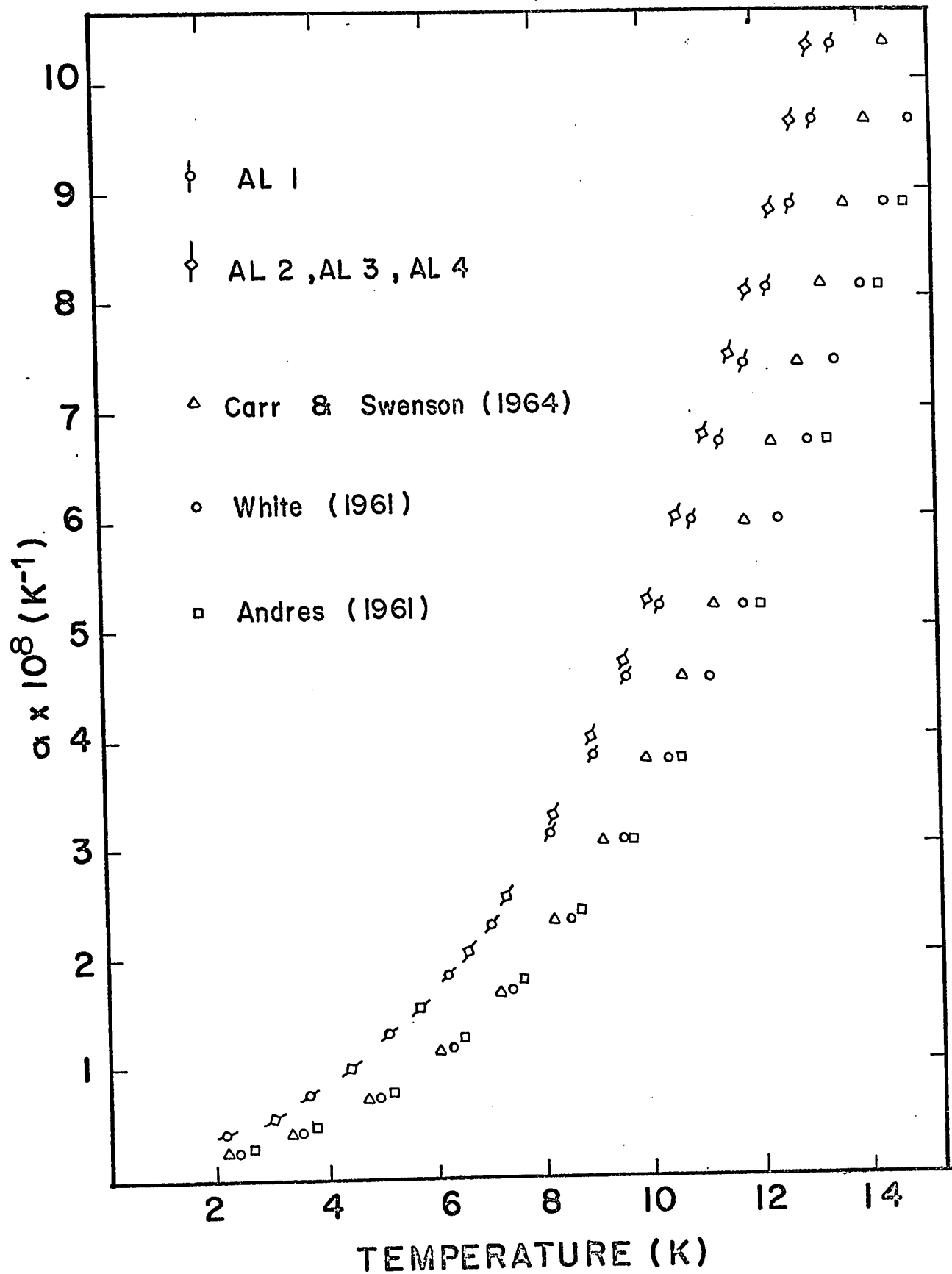


FIGURE 9 : α pour l'aluminium

ARGENT

Les caractéristiques concernant les trois séries de mesures de l'argent sont présentées dans le tableau XVI. Le tableau XVII présente les valeurs des coefficients a , b , γ_e et γ_o . Les coefficients d'expansion thermique, α , estimés par nous et par les autres auteurs sont compris dans les tableaux XVIII et XIX. et la figure 10. Les valeurs expérimentales $\Delta L/L$ apparaissent en appendice au tableau A.5 a, b, c.

TABLEAU XVI

Conditions expérimentales des séries de mesures sur l'Ag

SERIES	NOMBRE DE DONNEES EXPERIMENTALES	INTERVALLES DE TEMPERATURE	PRESSION DANS LA CHAMBRE
Ag(1)	26	2.2 K à 13 K	.150 mm de Hg
Ag(2)	36	3.7 K à 13 K	.100 mm de Hg
Ag(3)	37	3.3 K à 13 K	.200 mm de Hg

TABLEAU XVII

Résumé des valeurs des coefficients pour l'argent

AUTEURS	$a \times 10^9$	$a \times 10^{10}$	γ_e	γ_o	COMMENTAIRES
Collins et White (1964)	-	-	-	2.2	
Kos, Lamarche (1969)	-	-	-	2.72	γ_o calculé en utilisant $\gamma_e = .66$
White, Pawlovick (1970)	-	-	1	2.15	
White, Collins (1972)	.19	1.14	.97	2.23	
White, Collins (1972)	.7	1.19	3.57	2.34	échantillon NON RECUIT
McLean, et al., (1972)	.23	1.15	1.18	2.29	
Présent travail					
Ag(1)	2.30	1.34	11.65	2.67	
Ag(2)	2.70	1.24	13.94	2.47	
Ag(3)	2.40	1.14	12.39	2.28	
Moyenne	2.46	1.24	12.66	2.47	

TABLEAU XVIII

Coefficient de dilatation thermique de l'Ag évalué au cours de ce présent travail

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Ag(1)	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Ag(2)	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$ Ag(3)
2.00	.567	.639	.571
3.00	1.052	1.145	1.028,
4.00	1.777	1.874	1.690
5.00	2.825	2.900	2.625
6.00	4.274	4.298	3.902
7.00	6.207	6.143	5.590
8.00	8.701	8.509	7.757
9.00	11.839	11.469	10.471
10.00	15.700	15.100	13.800
11.00	20.365	19.474	17.813
12.00	25.915	24.667	22.579
13.00	34.430	30.753	28.166
14.00	39.990	37.806	34.614
15.00	48.675	45.900	42.075

TABLEAU XIX

Coefficient de dilatation thermique de l'Ag évalué par différents auteurs

TEMPERATURE en K	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$	$\alpha \times 10^8 \text{ K}^{-1}$
	Kos et Lamarche (1969)	White et Collins (1972)	McLean et al., (1972)
2.00	-	.13	.138
3.00	-	.37	.380
4.00	-	.81	.831
5.00	1.77	1.53	1.560
6.00	2.50	2.59	2.64
7.00	3.86	4.08	4.15
8.00	5.81	6.1	6.16
9.00	8.22	8.7	8.80
10.00	11.27	12.0	12.16
11.00	15.08	-	-
12.00	19.88	21.5	21.5
13.00	25.75	-	-
14.00	32.60	36.0	35.12
15.00	40.84	44.8	44.1

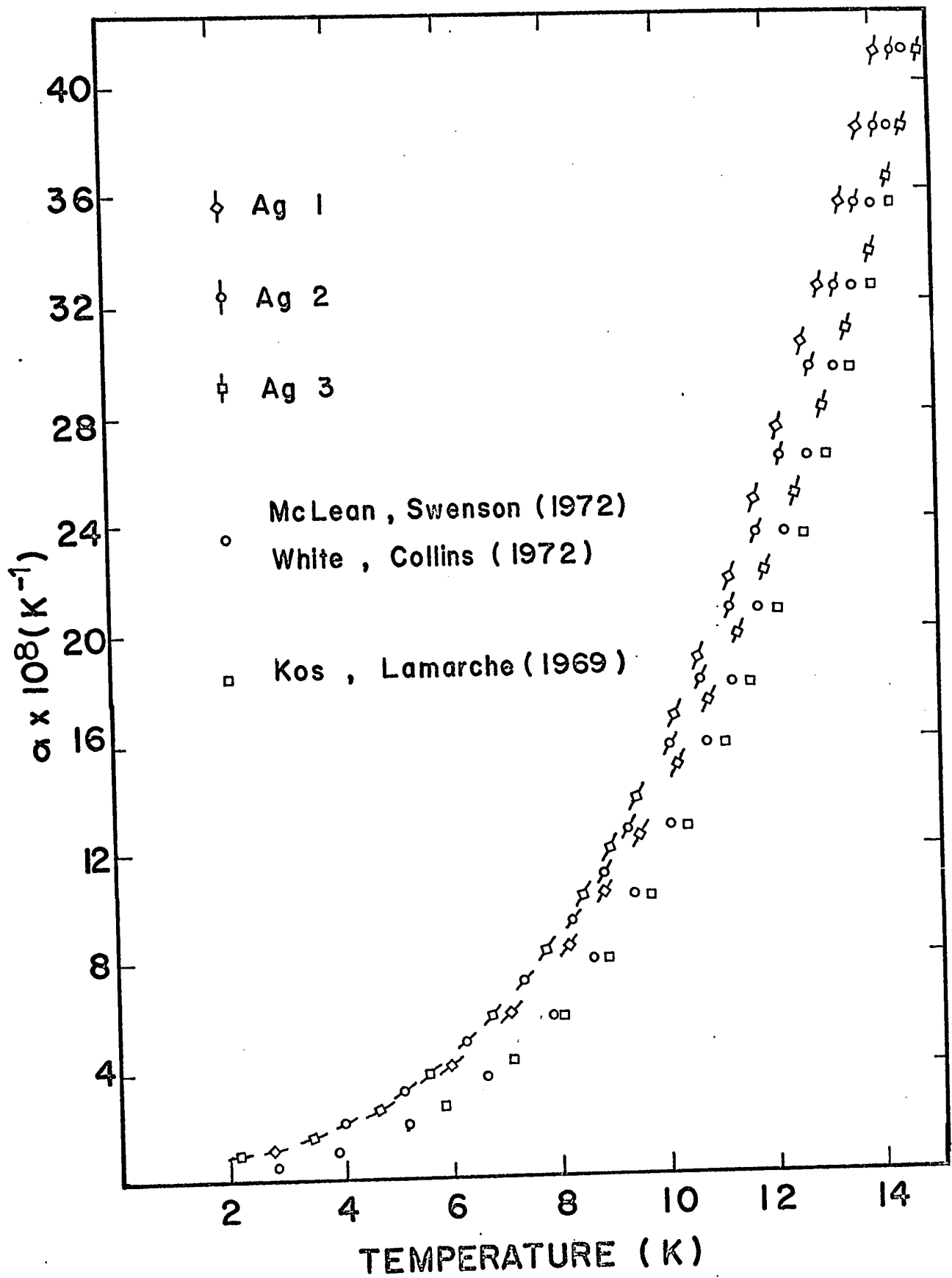


FIGURE 10 : α pour l'argent

DISCUSSION

Les graphiques des figures 8, 9 et 10 représentant les valeurs expérimentales obtenues pour les échantillons de cuivre, d'aluminium et d'argent illustrent un décalage entre nos valeurs expérimentales et celles de différents auteurs. On remarquera toutefois la précision de nos mesures et leur reproductibilité. De plus, l'allure des courbes représentant nos mesures est semblable à celle des différents auteurs.

Nous avons reproduit sur un graphique unique l'ensemble de tous les résultats présentés précédemment (figure 11).

On notera que:

- a) nos mesures expérimentales révèlent une expansion plus grande que celles des autres chercheurs pour le Cu, l'Ag et l'Al,
- b) le décalage est différent pour chacun de ces trois métaux,
- c) la valeur du décalage n'est pas proportionnelle à la grandeur du coefficient d'expansion α .
- d) les mesures sur l'or concordent très bien avec celles des autres auteurs.

Peut-on expliquer ce décalage à partir d'erreurs qui se seraient glissées dans nos mesures? Ceci ne semble pas être le cas. Passons en revue les différentes causes possibles d'erreurs, soit, une erreur dans la mesure de la température, une erreur systématique dans les valeurs de C_1 , C_2 et C_3 , une variation de ces mêmes valeurs durant une expérience, un gradient de température dans l'échantillon, une variation de la constante diélectrique produit par le gaz d'échange,

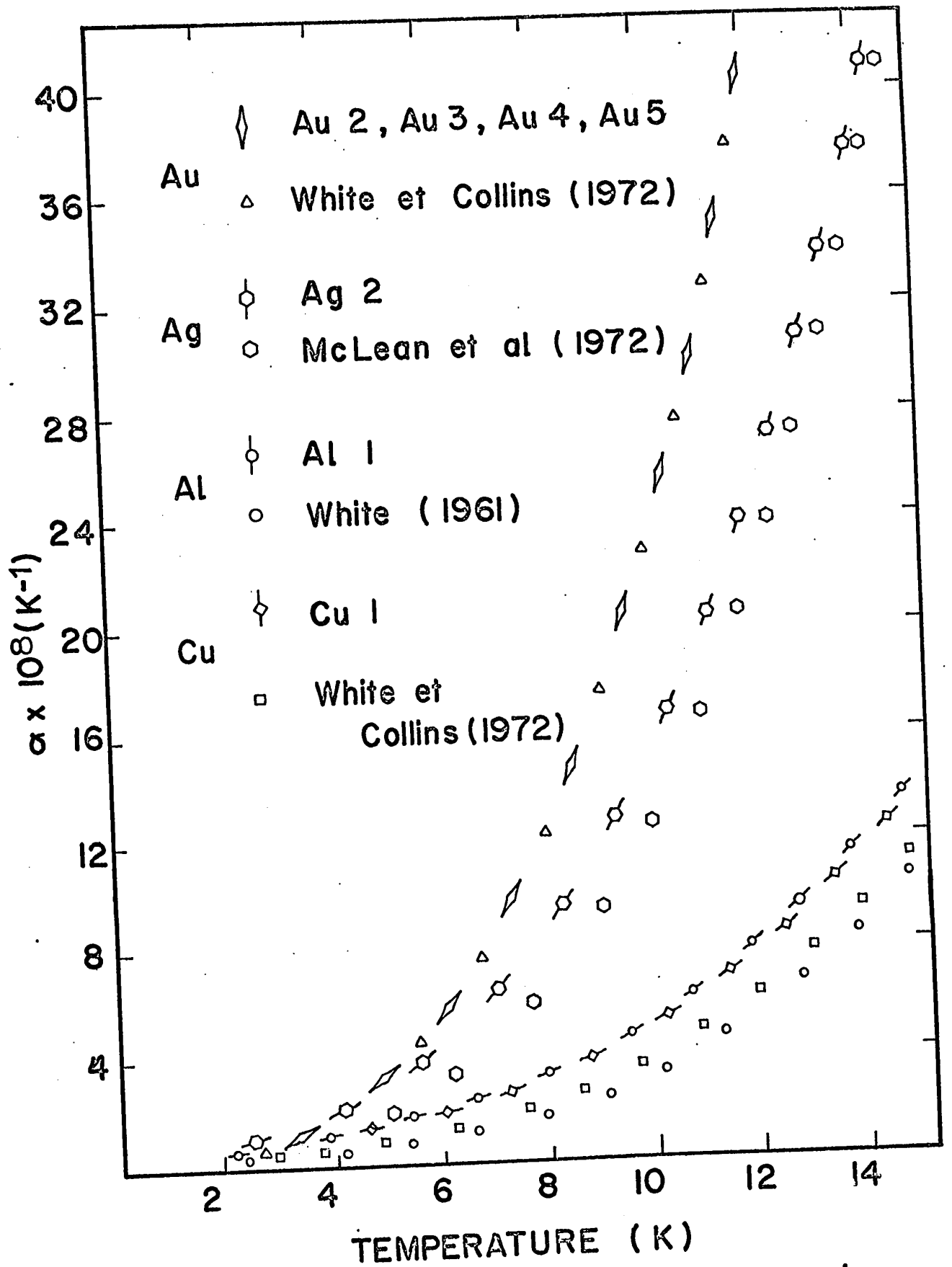


FIGURE II : α pour le Cu, l'Au, l'Ag, et l'Al.

l'expansion des supports du dilatomètre et une erreur dans les mesures des longueurs des échantillons.

A) TEMPERATURE

Une erreur dans la mesure de la température pourrait sans doute causer un décalage dans α . Cette possibilité doit être rejetée car la température de l'échantillon était vérifiée soit à 2.0 K soit à 4.2 K et la valeur donnée par le thermomètre correspondait bien à celle du bain d'hélium. De plus, pour expliquer le décalage de cette façon, l'erreur en température devrait être énorme comme on peut le constater dans le tableau ci-dessous. Il représente la température observée dans le présent travail et celle qui aurait dû être observée pour amener nos mesures à coïncider avec celles des autres auteurs. L'exemple cité ci-dessous correspond aux valeurs obtenues pour le cuivre Cu(1).

<u>TEMPERATURE</u> <u>Observée</u>	<u>TEMPERATURE</u> <u>Corrigée</u>
2.00 K	2.00 K
2.5	4.80
3.0	5.76
4.0	7.00
5.00	8.00

Serait-ce alors un mauvais contact thermique ? Nous ne le croyons pas puisque d'une part, les contacts thermiques furent traités

avec grand soin. Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre II, l'échantillon était soudé à la base B-3 assurant ainsi un excellent contact thermique. Quant au thermomètre, il était solidement vissé à cette même base en prenant soin d'introduire préalablement une feuille d'indium entre ces deux pièces. D'autre part, un mauvais contact thermique influencerait le résultat de chaque échantillon, ce qui n'est pas le cas: nos valeurs d' α pour l'or coïncident très bien avec celles de différents auteurs. De plus, pour ce qui est de nos mesures sur l'argent, elles concordent entre 12 K et 15 K avec celles des différents auteurs. Enfin nos résultats sont reproductibles même pour des séries de mesures exécutées à plusieurs mois d'intervalle. Le cuivre par exemple fut mesuré à plusieurs reprises avant et après les mesures exécutées sur l'échantillon d'or.

B) ERREUR SYSTEMATIQUE.

Puisque nous sommes intéressés à un changement de fréquence, une erreur systématique dans C_1 , C_2 ou C_s n'affecte que très peu la valeur de α . Par exemple une erreur de 20% dans chacune de ces valeurs, produit une erreur de .01% dans α .

C) VARIATION DE C_1 , C_2 , C_s OU L DURANT UNE EXPERIENCE

Il fut observé expérimentalement que les variations de C_1 , C_2 et de C_s (entre 2 K et 15 K) étaient toujours inférieures à 0.002 pf (0.002 pf représente la limite de mesure) du pont de capacitance. Cette cause doit donc être rejetée puisqu'une variation de 0.10 pf

dans l'une ou l'autre de ces capacitances entraînerait une erreur de moins de 1% dans α .

D) GRADIENT DE TEMPÉRATURE DANS L'ÉCHANTILLON

La chaleur donnée à l'échantillon pour augmenter sa température est essentiellement due à la conduction de la chaleur de la chaufferette à la base B-3 et de la base à l'échantillon, lorsque le système est sous vide. Il s'en suit que la température de l'échantillon serait inférieure à la température de la base dans le cas où la mesure expérimentale serait prise avant l'obtention de la stabilité thermique. Si tel était le cas, les mesures de l'expansion thermique seraient inférieures à ce qu'elles devraient être, ce qui n'est pas le cas. Et si tel était le cas, le décalage devrait être beaucoup plus grand pour l'or et l'aluminium qu'il ne l'est pour l'argent et le cuivre, puisque la conductivité de ces derniers est grandement supérieure à ce qu'elle est pour les deux autres. (voir le graphique de la figure 12)

E) VARIATION DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE

L'introduction de l'hélium gazeux dans la chambre expérimentale augmente la capacité des plaques parallèles. Cette augmentation est proportionnelle à la constante diélectrique, ϵ , de l'hélium gazeux. Cette dernière fut mesurée par Watson et al(1931) à 82 K et ils obtinrent $\epsilon = 1.0000713$. L'augmentation de la capacité des plaques, due à ϵ , est donc négligeable à basses températures lorsque ϵ est constant.

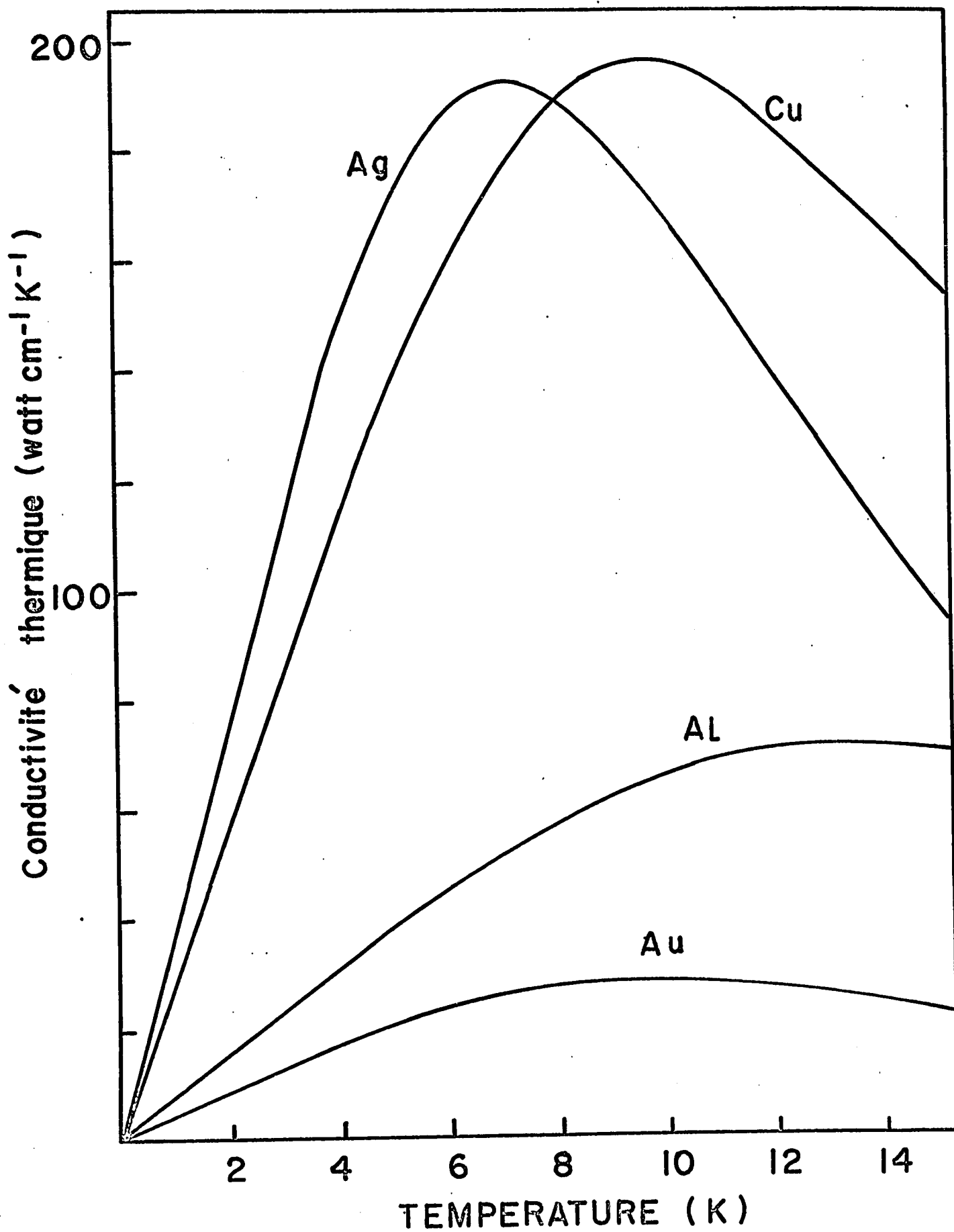


FIGURE 12: Conductivité thermique

Le vrai problème est de savoir si ϵ varie entre 2 K et 15 K. Une variation de ϵ entraînerait une différence entre les valeurs d' α exécutées sous vide et celles, en présence de ce gaz. Mais comme nous l'avons mentionné précédemment, les séries de mesures sous vides[?] (pression 10^{-5} mm de Hg) et à différente pression variant de .100 à .200 mm de Hg, donnèrent des résultats identiques. De plus il ne faudrait pas oublier que l'influence qu'aurait le gaz d'échange sur les mesures d'expansion se révélerait également dans les mesures de l'échantillon d'or.

F) EXPANSION DES SUPPORTS DU DILATOMETRE

Il est essentiel que les supports ne subissent aucune variations de température. En supposant le cas contraire, la mesure de l'expansion serait inférieure et non supérieure à sa valeur réelle.

G) LONGUEUR DE L'ECHANTILLON.

Mesurés, à l'aide d'un microscope comparateur, la longueur de l'échantillon et le diamètre des plaques sont connus précisément ($\pm 0.05\%$). En fait, même une incertitude de 0.10 mm dans la mesure de la longueur de l'échantillon, entraînerait une erreur relative de 0.1% dans $\Delta L/L$. Il est donc évident que d'aucune façon une erreur dans ces mesures pourrait expliquer le décalage observé.

Comme ce décalage est beaucoup plus grand que la somme des incertitudes expérimentales et qu'il ne peut pas être attribué à une erreur systématique, ce décalage semble provenir de la qualité des échantillons. D'une part la dilatation thermique est très sensible à la pureté des échantillons comme le montrent McLean et al., (1972). Ces derniers ont observé un décalage de 35% dans α_e pour deux échantillons de cuivre de pureté comparable.

L'analyse de la pureté de leurs échantillons, qu'ils ont obtenue par deux méthodes différentes, révéla que la concentration de chacune des impuretés était supérieure à la valeur donnée par le fournisseur. D'autre part, le traitement thermique des échantillons semble jouer un rôle encore plus important comme l'ont observé White et Collins (1972). Mesurant un échantillon d'argent non recuit et un échantillon recuit, ils estimèrent que la valeur de α_e pour le premier était quatre fois supérieure à celle du second. A cet égard, il est important de noter que d'une part l'échantillon d'or que nous avons utilisé est le même que celui de Kos (1967), et que d'autre part pour les autres éléments, les échantillons étaient nouveaux. Nos résultats sur l'or concordent avec les siens dans la limite des incertitudes. Mais pour les autres métaux, il n'y a pas cette concordance. Ceci semble confirmer nos conclusions sur l'importance de l'état des échantillons.

CONCLUSION

Le travail, exposé dans cette thèse, s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherches sur la dilatation des métaux et alliages aux basses température initié par Kos (1967). Notre principale préoccupation a été de rendre l'utilisation du dilatomètre plus efficace sans pour autant en sacrifier la haute précision. Nous croyons que ce but a été atteint, voire même dépassé.

Les améliorations que nous avons apportées au cryostat et en particulier à la configuration de la chambre à vide qui loge le dilatomètre permettent maintenant de changer l'échantillon et de sceller rapidement le système en réduisant considérablement le danger de fuites qui autrefois entraînaient des pertes considérables de temps et d'efforts.

Le nouvel oscillateur fonctionne régulièrement sur une gamme plus étendue en fréquence avec moins de restrictions sur les valeurs de l'inductance et des capacités. Il est très stable et suit fidèlement la variation de capacité qu'entraîne la variation de longueur de l'échantillon. Par contre l'influence dans la variation des capacités C_1 et C_2 et des capacités parasites a été minimisée.

L'adoption d'un thermomètre à Ge en remplacement du thermomètre à Pt, s'est révélé une amélioration importante du système de mesures: il en résulte une plus grande sensibilité aux basses températures et une plus grande facilité d'opération.

La méthode d'analyse des résultats que nous avons développée au cours de ce travail, en obviant à la nécessité de trouver par extrapolation la valeur de l'allongement de l'échantillon entre 0K et la température la plus basse de mesure (2 ou 4 K) présente un grand avantage sur les autres méthodes.

Enfin l'extension des domaine des températures de mesures jusqu'à 2 K est très importante pour une meilleure évaluation de la contribution électronique à la dilatation et est pleinement justifiée, compte tenu de la haute résolution du dilatomètre qui approche 10^{-11} cm/cm.

L'autre but de ce travail a été de répéter les mesures de Kos sur le CU, l'Ag et l'Au et de les pousser jusqu'à 2 K ainsi que de faire une série de mesures préliminaires sur l'Al. Les résultats obtenus ont été quelque peu décevants. D'une part s'il y a un bon accord avec les valeurs publiées et qui semblent se confirmer de plus en plus dans le cas de l'or, il y a d'autre part un écart beaucoup trop considérable dans les cas du cuivre, de l'argent et de l'aluminium. Nous croyons avoir montré toutefois qu'on peut difficilement attribuer ces écarts à une erreur systématique de mesure ou de procédure. Au contraire nos résultats sont précis et consistants. Il semble donc probable que les échantillons soient en cause.

Nous aimerions suggérer à nos successeurs d'étudier systématiquement les effets d'impuretés et dislocations sur le coefficient de dilatation; cela pourra clairement infirmer ou confirmer nos conclusions.

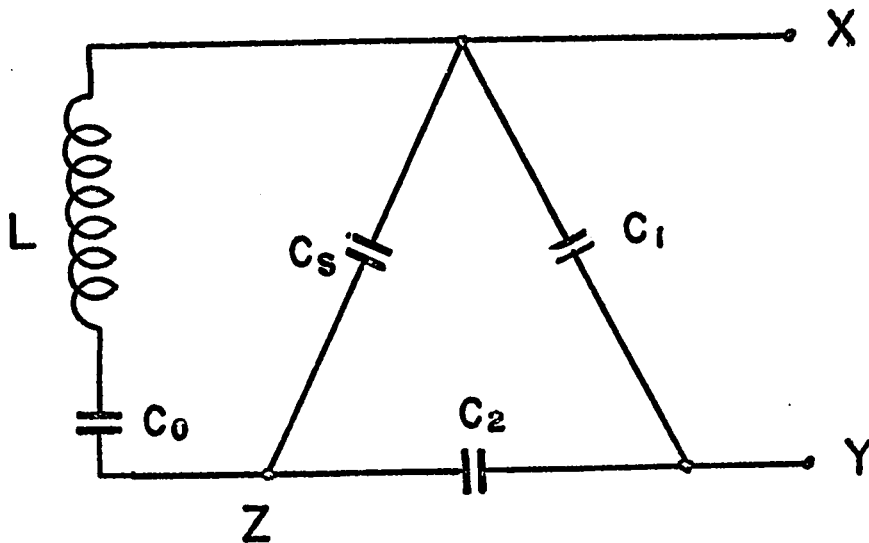
APPENDICE A-1

L'équation de l'oscillateur

APPENDICE A-1

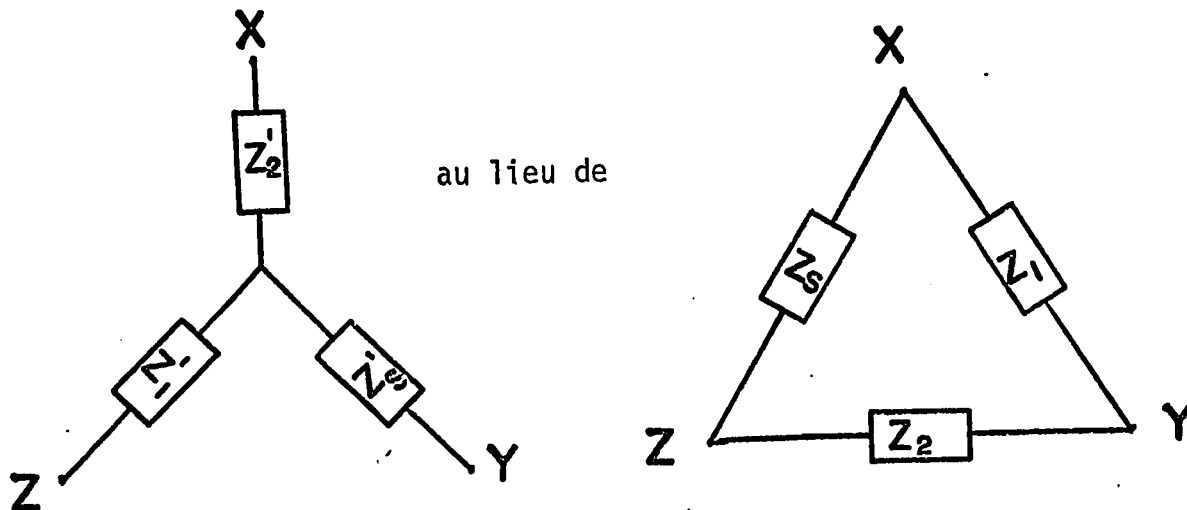
L'équation de l'oscillateur

Le circuit résonnant équivalent de l'oscillateur est donné à la fig 6. Nous pouvons arranger ce circuit de la façon suivante:



$$\text{où } C_s = C_{ta} + C_{t\ell} \quad C_o = C'_o + C_{tp}$$

Utilisant la transformation de Δ en Y nous obtenons



s₁ l'on considère maintenant le circuit oscillant à l'exclusion de C'_s nous avons

$$Z_{\text{parallèle}} = \frac{(j\omega L - \frac{j}{\omega C}) (\frac{-j}{\omega C_2})}{(j\omega L - \frac{j}{\omega C} - \frac{j}{\omega C_2})}$$

$$= \frac{(\omega CL - \frac{1}{\omega})}{j(C C_2 \omega^2 L - C - C_2')}$$

Incluant maintenant C'_s nous obtenons

$$Z_{\text{Total}} = Z_{\text{parallèle}} + - \frac{j}{\omega C'_s}$$

$$= \frac{(\omega CL - \frac{1}{\omega})}{j(C C_2 \omega^2 L - C - C_2')} - \frac{j}{\omega C'_s}$$

donc

$$Z_T = \frac{-j(\omega^2 C C'_s L - C'_s + C C_2 \omega^2 L - C - C_2')}{\omega C'_s (C C_2 \omega^2 L - C - C_2')}$$

La condition d'oscillation d'un circuit parallèle étant $Z_T = \infty$, nous avons donc:

$$0 = \omega C'_s (C C_2 \omega^2 L - C - C_2')$$

où

$$\begin{aligned} Z_1 &= -j/\omega C_1 \\ Z_2 &= -j/\omega C_2 \\ Z_s &= -j/\omega C_s \end{aligned}$$

et où

$$Z'_1 = \frac{Z_2 Z_s}{Z_1 + Z_2 + Z_s} = \frac{(-j/\omega C_2)(-j/\omega C_s)}{(-j/\omega C_1) + (-j/\omega C_2) + (-j/\omega C_s)} = \frac{-j C_1}{\omega(C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s)}$$

$$Z'_1 = -\frac{j}{\omega C'_1}$$

où

$$C'_1 = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s}{C_1} = \{ \}$$

où

$$\{ \} = C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s$$

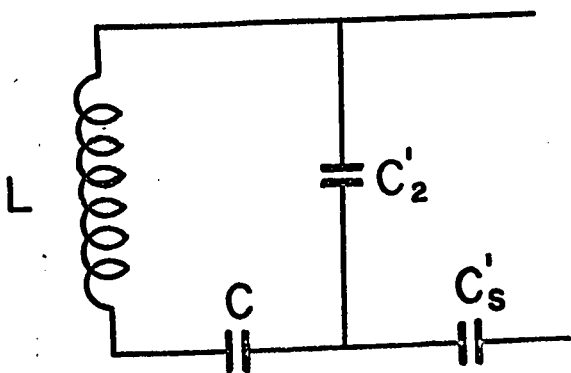
Par le même procédé, nous obtenons

$$Z'_2 = -\frac{j}{\omega C'_2} \quad \text{et} \quad Z'_s = \frac{j}{\omega C'_s}$$

où

$$C'_2 = \frac{\{ \}}{C_1} \quad \text{et} \quad C'_s = \frac{\{ \}}{C_s}$$

Le circuit équivalent devient:



où $C = \frac{C_o C'_1}{C_o + C'_1}$

Le premier terme de l'équation, $\omega C'_s$ ne pouvant pas être 0, le deuxième doit l'être. Nous avons donc:

$$CC'_2 \omega^2 L = C + C'_2$$

en substituant $C = \frac{C_0 C'_1}{C_0 + C'_1}$ et en transformant, nous obtenons,

$$C_0 C'_1 C'_2 \omega^2 L = C_0 C'_1 + C_0 C'_2 + C'_1 C'_2$$

en remplaçant C'_1 et C'_2 et en transformant l'équation nous obtenons

$$\omega^2 L = \frac{C_0 C_1 + C_0 C_2 + C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 S_s}{C_0 (C_1 C_2 + C_1 C_s + C_2 C_s)}$$

qui est l'équation 2.6

APPENDICE A.2

Données expérimentales pour les séries de
mesures sur l'or.

TABLEAU A.2a

Au(1)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T) / L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T) / L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.343	.000	.000	0.00
2.909	.380	.378	0.43
3.098	.498	.545	-9.45
3.264	.759	.714	5.93
3.752	1.329	1.338	-0.67
3.904	1.613	1.577	2.29
4.030	1.851	1.793	3.11
4.158	2.088	2.031	2.75
4.279	2.325	2.273	2.23
4.393	2.563	2.518	1.72
4.517	2.800	2.804	-0.15
4.623	3.037	3.064	-0.89
4.719	3.274	3.317	-1.28
4.810	3.512	3.564	-1.50
4.892	3.749	3.801	-1.38
4.949	3.986	3.969	0.42
5.044	4.223	4.264	-0.96
5.116	4.461	4.497	-0.81
5.184	4.698	4.725	-0.58
5.245	4.935	4.937	-0.37
5.304	5.173	5.150	0.43
5.362	5.410	5.364	0.85
5.418	5.647	5.578	1.23
5.473	5.885	5.792	1.58

TABLEAU A.2b

Au(2)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.418	.000	.000	0.00
3.276	.595	.618	-3.81
3.375	.714	.722	-1.05
3.468	.834	.827	0.78
3.555	.953	.933	2.06
3.638	1.072	1.040	2.96
3.739	1.191	1.179	1.02
3.900	1.429	1.424	0.37
4.033	1.667	1.646	1.29
4.155	1.905	1.869	1.91
4.268	2.144	2.092	2.38
4.377	2.382	2.322	2.50
4.475	2.620	2.545	2.86
4.571	2.858	2.774	2.92
4.661	3.096	3.003	3.07
4.748	3.334	3.236	2.96
4.833	3.573	3.477	2.69
4.915	3.811	3.717	2.46
5.000	4.049	3.982	1.67
5.075	4.287	4.221	1.53
5.149	4.525	4.474	1.12

TABLEAU A.2b

Au(2)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_1, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_1, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
5.226	4.763	4.743	0.43
5.296	5.001	4.999	0.05
5.364	5.240	5.260	-0.39
5.427	5.478	5.505	-0.49
5.484	5.716	5.739	-0.39
5.541	5.954	5.974	-0.34
5.595	6.192	6.204	-0.19
5.647	6.430	6.433	-0.04
5.698	6.668	6.664	0.06
5.748	6.907	6.897	0.14
5.797	7.145	7.129	0.22
5.846	7.383	7.368	0.21
5.894	7.621	7.609	0.15
5.942	7.859	7.862	-0.03
5.991	8.097	8.108	-0.11
6.033	8.336	8.333	0.03
6.076	8.574	8.569	0.06
6.120	8.812	8.815	-0.04
6.163	9.050	9.058	-0.08
6.205	9.288	9.301	-0.13
6.246	9.526	9.543	-0.18

TABLEAU A.2b

Au(2)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
6.286	9.765	9.780	-0.16
6.365	10.003	10.023	-0.20
6.365	10.241	10.268	-0.27
6.401	10.479	10.501	-0.21
6.439	10.718	10.741	-0.22
6.475	10.955	10.977	-0.20
6.509	11.193	11.202	-0.07
6.543	11.432	11.434	-0.02
6.576	11.670	11.663	0.06
6.611	11.908	11.903	0.06
6.643	12.146	12.128	0.14
6.673	12.384	12.346	0.31
6.704	12.622	12.573	0.39
6.736	12.860	12.807	0.41
6.767	13.099	13.036	0.48
6.796	13.337	13.259	0.59
6.828	13.575	13.496	0.58
6.857	13.813	13.722	0.65
6.886	14.051	13.950	0.72
6.916	14.289	14.189	0.70
6.945	14.574	14.425	0.69

TABLEAU A.2b

Au(2)

(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
6.974	14.766	14.662	0.70
7.004	15.004	14.905	0.66
7.034	15.242	15.15	0.58
7.064	15.480	15.46	0.47
7.093	15.718	15.65	0.42
7.112	15.956	15.82	0.85
7.140	16.194	16.06	0.81
7.169	16.433	16.31	0.72
7.197	16.671	16.56	0.64
7.224	16.901	16.81	0.56
7.254	17.147	17.01	0.38
7.282	17.385	17.35	0.23
7.311	17.623	17.61	0.05
7.340	17.861	17.89	-0.16

TABLEAU A.2c
Au(3)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
3.646	0.000	0.000	0.00
3.724	0.118	0.120	-2.11
3.797	0.236	0.239	-1.18
3.869	0.354	0.359	-1.48
3.933	0.472	0.474	-0.33
3.998	0.590	0.592	-0.36
4.061	0.708	0.712	-0.57
4.121	0.826	0.832	-0.75
4.178	0.944	0.950	-0.57
4.232	1.063	1.066	-0.30
4.286	1.181	1.186	-0.46
4.387	1.417	1.417	-0.01
4.484	1.653	1.656	-0.17
4.576	1.889	1.895	-0.34
4.667	2.125	2.142	-0.79
4.750	2.361	2.380	-0.82
4.829	2.597	2.618	-0.80
4.906	2.833	2.858	-0.87
4.979	3.069	3.097	-0.89
5.046	3.305	3.324	-0.56
5.116	3.542	3.567	-0.73
5.181	3.778	3.804	-0.70
5.244	4.014	4.043	-0.73
5.307	4.250	4.284	-0.81
5.362	4.486	4.505	-0.42
5.418	4.722	4.737	-0.31

TABLEAU A.2c

Au(3)
(suite)

TEMPERATURE	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$	% de DEVIATION
en K	$\times 10^8$	$\times 10^8$	
5.526	5.194	5.199	-0.09
5.577	5.430	5.426	-0.08
5.626	5.667	5.649	0.30
5.676	5.903	5.881	0.37
5.722	6.139	6.105	0.55
5.769	6.375	6.333	0.65
5.814	6.611	6.560	0.77
5.857	6.847	6.780	0.98
5.902	7.083	7.011	1.02
5.947	7.319	7.252	0.92
5.992	7.555	7.495	0.79
6.031	7.791	7.709	1.05
6.073	8.027	7.950	0.97
6.115	8.264	8.190	0.89
6.155	8.500	8.426	0.87
6.195	8.736	9.663	0.84
6.234	8.972	8.898	0.82
6.272	9.208	9.134	0.80
6.310	9.444	9.374	0.75
6.347	9.680	9.610	0.73
6.384	9.916	9.849	0.68
6.420	10.152	10.089	0.62
6.456	10.388	10.332	0.55
6.493	10.625	10.582	0.40
6.529	10.861	10.827	0.30
6.566	11.097	11.089	0.07

TABLEAU A.2c

Au(3)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
6.600	11.333	11.333	-0.00 ²
6.636	11.569	11.593	-0.21
6.667	11.805	11.838	-0.28
6.705	12.041	12.102	-0.51
6.737	12.277	12.347	-0.57
6.770	12.513	12.599	-0.68
6.803	12.749	12.850	-0.79
6.835	12.985	13.103	-0.91
6.859	13.221	13.296	-0.56
6.897	13.458	13.600	-1.06
6.927	13.694	13.848	-1.12
6.956	13.929	14.086	-1.12
6.986	14.166	14.336	-1.20
7.015	14.402	14.583	-1.26
7.044	14.638	14.836	-1.35
7.073	14.874	15.085	-1.41
7.102	15.110	15.339	-1.57
7.121	15.346	15.502	-1.02
7.148	15.582	15.748	-1.06
7.176	15.818	15.999	-1.14
7.203	16.054	16.251	-1.22
7.230	16.290	16.496	-1.26
7.258	16.527	16.760	-1.41
7.286	16.763	17.022	-1.55
7.314	17.000	17.291	-1.72
7.342	17.235	17.560	-1.88

TABLEAU A.2d

Au(4)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
4.227	0.000	0.000	0.00%
4.823	1.594	1.564	1.92
5.711	5.070	5.051	0.36
6.330	8.259	8.536	-3.36
6.705	11.366	11.157	1.83
6.981	13.532	13.365	1.24
7.262	15.904	15.880	0.15
7.653	19.787	19.866	-0.40
7.976	23.875	23.617	1.08
8.223	26.737	26.886	-0.56
8.536	30.784	31.249	1.51
8.893	36.997	36.915	0.22
9.118	40.635	40.830	-0.48
9.517	46.031	48.508	-5.38
9.710	52.856	52.577	0.53
9.931	58.006	57.526	0.83
10.227	65.036	64.689	0.53
10.477	71.330	71.194	0.19
10.745	79.054	78.720	0.42
11.001	86.328	86.426	-0.11

TABLEAU A.2d

Au(4)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
11.318	97.361	96.731	0.14
11.533	104.88	104.18	0.66
11.781	114.77	113.34	0.12
12.076	126.82	124.98	1.45
12.525	145.16	144.36	0.55
12.881	159.79	161.27	-0.93
13.320	179.80	184.10	-2.39

TABLEAU A.2e

Au(5)

TEMPERATURE	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
en K	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
2.283	.0000	.0000	0.00
2.904	.3333	.3516	- 3.51
3.789	1.262	1.295	- 2.46
3.875	1.405	1.424	- 1.34
4.013	1.643	1.649	- 0.36
4.152	1.881	1.894	- 0.69
4.268	2.119	2.118	+ 0.05
4.375	2.357	2.339	+ 0.77
4.489	2.595	2.592	+ 0.12
4.591	2.833	2.690	+ .004
4.686	3.072	3.072	+ 0.02
4.779	3.310	3.320	- 0.31
4.864	3.548	3.557	- 0.25
4.949	3.786	3.806	- 0.53
5.026	4.024	4.042	- 0.43
5.108	4.262	4.305	- 1.00
5.176	4.500	4.530	- 0.66
5.226	4.738	4.705	+ 0.70
5.299	4.976	4.963	+ 0.26
5.354	5.214	5.166	+ 0.93
5.404	5.453	5.357	+ 1.79

APPENDICE A.3

Données expérimentales pour les séries de
mesures sur le cuivre

TABLEAU A.3a

Cu(1)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
1.983	.0000	.0000	00.00
3.006	.4676	.5326	-13.9%
3.457	.7836	.8576	- 9.4
4.022	1.226	1.356	-10.6
4.090	1.415	1.422	- 0.5
4.307	1.605	1.449	- 2.7
4.562	1.895	1.907	- 2.1
4.859	2.275	2.307	- 1.4
5.239	2.730	2.830	- 3.6
5.670	3.387	3.517	- 3.8
6.213	4.474	4.521	- 1.0
6.536	5.131	5.201	- 1.3
6.916	5.991	6.082	- 1.5
7.338	7.014	7.178	- 2.2
7.835	8.518	8.657	- 1.6
8.398	10.427	10.557	- 1.2
8.703	11.627	12.477	- 7.3
9.083	13.296	13.285	+ 0.1
9.318	14.324	14.275	+ 0.3
9.602	15.823	15.673	+ 0.9
9.875	17.239	17.059	+ 1.0

TABLEAU A.3a
Cu(1)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
10.135	18.515	17.457	+0.3
10.390	19.994	19.916	+0.4
10.635	21.459	21.395	+0.3
10.917	23.279	23.205	+0.3
11.202	25.175	25.150	+0.1
11.537	27.601	27.504	+0.2
11.721	28.890	29.010	-0.4
12.267	33.237	33.547	-0.9
12.589	36.055	36.455	-1.1

TABLEAU A.3b

Cu(2)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
1.998	.0000	.0000	00.0
2.465	.2544	.2274	+14.6
2.788	.4453	.4003	+10.
2.951	.5598	.5028	+10.1
3.166	.6421	.7061	- 9.0
3.465	.9543	.8767	+ 8.2
3.906	1.1881	1.2621	- 5.5
4.310	1.7433	1.6743	+ 4.0
4.565	2.0359	1.9659	+ 3.4
4.861	2.4050	2.3270	+ 2.8
5.236	2.9776	2.8676	+ 3.7
5.670	3.6265	3.5475	+ 2.2
6.211	4.5936	4.5436	+ 1.0
6.532	5.3189	5.2189	+ 1.9
6.913	6.1714	6.0084	+ 1.3
7.105	6.6550	6.5650	+ 1.3
7.344	7.2912	7.1982	+ 1.3
7.569	7.8892	7.8292	+ 0.7
7.838	8.6781	8.6381	+ 0.4
8.074	9.3780	9.3900	- 0.1
8.420	10.5613	10.582	- 0.2
8.734	11.7319	11.7569	- 0.2
8.887	12.3554	12.3654	- 0.08
9.100	13.2333	13.2473	- 0.1

TABLEAU A.3b

Cu(2)
(suite)

TEMPERATURE en K.	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
9.268	13.9840	13.9740	+ 0.07
9.462	14.8620	14.8530	+ 0.06
9.675	15.8671	15.8664	+ 0.004
9.917	17.0504	17.0720	- 0.1
10.131	18.1955	18.2025	- 0.04
10.369	19.5442	19.5222	+ 0.1
10.620	21.0328	20.9918	+ 0.2
10.915	22.8268	22.8228	+ 0.01
11.199	24.7861	24.7051	+ 0.3
11.492	26.7581	26.7611	- 0.01
11.894	29.7479	29.7949	- 0.15
12.293	32.9030	33.0960	- 0.5
12.610	35.5747	35.8547	- 0.78
12.998	38.9586	39.5197	- 1.4
13.519	43.8436	44.8736	- 2.3

TABLEAU A.3c

Cu(3)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
4.077	.0000	.0000	0.0
4.541	.4961	.5019	- 1.2
4.830	.8522	.8579	- 0.6
5.199	1.3483	1.3668	- 1.4
5.623	2.0225	2.0318	- 0.4
6.143	2.9765	2.9765	- 0.0
6.457	3.6633	3.6234	1.1
6.630	4.0704	4.0044	1.6
6.8227	4.5665	4.4550	2.4
7.0128	5.0117	4.9237	1.8
7.2367	5.5713	5.5088	1.1
7.4588	6.1692	6.1266	0.6
7.715	6.882	6.874	- 0.1
7.9704	7.6828	7.490	- 0.2
8.2428	8.5859	8.6281	- 0.5
8.5221	9.7306	9.6651	+ 0.8
8.9025	11.1425	11.1671	- 0.2
9.0993	11.9438	12.0098	- 0.5
9.268	12.732	12.766	- 0.3
9.434	13.521	13.542	- 0.1
9.685	14.792	14.770	0.2

TABLEAU A.3c

Cu(3)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
9.866	15.734	15.703	0.2
10.110	17.069	17.033	0.2
10.377	18.634	18.564	0.4
10.588	19.918	19.849	0.3
10.873	21.635	21.679	-0.2
11.183	23.833	23.803	0.1
11.556	26.583	26.560	0.1
11.847	28.846	28.864	-0.1
12.209	31.924	31.931	- 0
12.606	35.409	35.574	-0.5
12.943	38.575	38.897	-0.8
13.417	43.166	43.947	-1.8

APPENDICE A.4

Données expérimentales pour les séries de
mesures sur l'aluminium

TABLEAU A.4a

AL(1)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.127	.000	.000	0.00
2.912	.326	.333	- 2.15
3.823	.909	.908	+ 0.11
4.649	1.596	1.641	- 3.44
5.311	2.334	2.434	- 4.28
6.289	3.844	3.873	- 3.35
6.973	5.276	5.377	- 1.91
7.395	6.535	6.404	+ 2.12
7.859	7.601	7.687	- 1.13
8.436	9.446	9.540	- 0.99
8.746	10.621	10.664	- 0.40
9.088	11.976	12.015	- 0.33
9.407	13.409	13.375	+ 0.18
9.846	15.562	15.470	+ 0.59
10.264	18.659	17.671	+ 0.68
10.424	18.659	19.579	+ 0.43
10.818	22.733	20.955	+ 0.30
11.090	22.733	22.732	+ 0.01
11.370	24.680	24.673	+ 0.03
11.600	26.421	26.356	+ 0.25

TABLEAU A.4a

AL(1)
(suite)

TEMPERATURE	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
en K	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
11.990	29.397	29.431	- 0.12
12.365	32.373	32.633	- 0.80
12.597	34.449	34.752	- 0.88
12.907	37.219	37.736	- 1.39
13.476	42.845	43.735	- 2.08
13.810	46.206	47.579	- 2.97
14.313	51.909	53.852	- 3.74

TABLEAU A.4b
AL(2)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.216	.000	.000	0.00
2.992	.382	.383	-0.26
3.928	1.079	1.051	+2.59
4.300	1.382	1.389	-0.51
4.778	1.895	1.895	-0.02
5.091	2.250	2.274	-1.07
5.457	2.737	2.769	-1.17
5.916	3.435	3.477	-1.22
6.481	4.592	4.494	+2.23
7.200	5.962	6.055	-1.58
7.640	7.106	7.175	-0.97
8.122	8.514	8.567	-0.62
8.343	9.238	9.265	-0.29
8.730	10.594	10.590	+0.04
9.031	11.738	11.711	+0.23
9.432	11.367	11.351	+0.14
9.794	15.002	14.949	+0.35
10.264	17.357	17.255	+0.59
10.718	19.633	19.733	-0.51
11.311	23.252	23.360	-0.47

TABLEAU A.4b

AL(2)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
11.882	27.186	27.316	-0.48
12.607	32.777	33.064	-0.87
12.046	35.606	35.158	+1.26
13.352	39.276	39.903	-1.60
13.746	42.894	43.927	-2.41
14.269	48.247	49.757	-3.13

TABLEAU A.4c

AL(3)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.074	.000	.000	0.00
2.468	.171	.167	+2.35
2.832	.342	.353	-3.24
3.750	.960	.974	-1.46
4.112	1.263	1.288	-1.98
4.581	1.697	1.759	-3.65
4.880	2.000	2.103	-5.15
5.277	2.794	2.614	+7.39
5.677	3.053	3.100	-4.9
6.218	3.934	4.116	-4.67
6.909	5.342	5.522	-3.39
7.326	6.355	6.515	-2.52
7.814	7.710	7.829	-1.55
8.365	9.460	9.533	-0.77
9.005	11.789	11.837	-0.41
9.800	15.380	15.248	+0.86
10.384	18.498	18.200	+1.6
11.039	22.405	22.005	+1.78
11.481	25.365	24.896	+1.85
11.550	25.904	25.374	+2.05
12.398	32.284	31.828	+1.41
12.904	36.585	36.235	+0.96
13.467	41.859	41.681	+0.425
13.959	46.712	46.935	-0.48

TABLEAU A.4d

AL(4)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
2.082	.0000	.000	00.00
2.465	.1316	.162	-23.07
2.818	.2763	.339	-22.83
3.717	.8684	.797	+ 8.17
4.074	1.1447	1.243	- 8.56
4.538	1.1579	1.282	-10.71
5.193	2.680	2.491	+ 8.13
5.630	2.895	3.217	- 7.67
6.163	3.750	4.008	- 6.88
6.847	5.131	5.383	- 4.91
7.261	6.118	5.880	+ 3.90
7.730	7.368	7.604	- 3.20
8.290	9.118	9.315	- 2.16
8.589	10.184	10.333	- 1.46
8.942	11.565	11.644	- 0.68
9.232	12.815	12.809	+ 0.05
9.704	14.960	14.893	+ 0.45
10.136	17.156	17.014	+ 0.83
10.670	20.247	19.941	+ 1.51
10.978	22.155	21.698	+ 1.60

TABLEAU A.4d

AL(4)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
11.351	24.667	24.224	+ 1.80
11.830	28.074	27.637	+ 1.56
12.137	30.455	30.903	- 1.47
12.484	33.230	33.590	- 1.08
12.871	36.611	36.311	+ 0.82
13.370	41.175	41.157	+ 0.04
13.787	45.265	45.582	+ 0.70
14.208	49.644	50.404	- 1.53
14.855	56.890	58.570	- 2.95

APPENDICE A.5

Données expérimentales pour les séries de
mesures sur l'argent

TABLEAU A.5a

AG(1)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
2.259	.0000	0.000	-0.00
2.431	.1236	0.127	-3.10
2.637	.3091	0.288	+7.00
3.037	.6430	0.671	-4.40
3.318	1.001	0.998	+0.30
3.620	1.409	1.408	+0.11
3.886	1.855	1.827	+0.15
4.455	2.807	2.928	-4.30
4.967	4.228	4.203	+0.60
5.304	5.205	5.212	-0.02
5.690	6.850	6.560	+4.40
6.185	8.216	8.627	-4.40
6.784	12.141	11.721	+3.50
7.548	17.247	16.755	+2.90
7.972	20.795	20.165	+3.10
8.201	21.490	22.218	-3.10
8.503	26.024	25.158	+3.30
8.815	29.424	28.494	+3.10
9.117	32.873	32.033	+2.50
9.429	36.730	36.024	+1.90
9.865	42.836	42.250	+1.4
10.300	49.671	49.121	+0.90
10.688	55.480	56.175	-1.30
11.083	63.340	63.988	-1.00
11.615	74.957	75.823	-1.10
12.193	89.637	90.457	-0.90
13.028	115.348	115.365	-0.01

TABLEAU A.5b
AG(2)

TEMPERATURE	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$	% de DEVIATION
en K	$\times 10^8$	$\times 10^8$	
3.276	0.000	0.000	0.00
3.990	1.162	1.130	+2.76
5.584	5.390	5.419	-0.54
6.063	7.405	7.344	+0.82
6.645	10.075	10.199	-1.24
7.381	14.277	14.748	-3.29
7.586	15.860	16.235	-2.36
7.758	17.207	17.549	-1.99
8.037	19.493	19.853	-1.85
8.179	20.816	21.096	-1.35
8.339	22.851	22.575	+1.21
8.432	23.214	23.464	-1.08
8.600	24.907	25.137	-0.93
8.709	26.056	26.266	-0.81
8.925	28.975	28.615	+1.27
9.010	29.916	29.587	+1.13
9.193	31.420	31.750	-1.05
9.263	32.273	32.603	-1.02
9.465	34.819	35.174	-1.03
9.629	36.982	37.362	-1.03

TABLEAU A.5b

AG(2)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULÉ) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
9.737	38.341	38.851	-1.33
9.865	40.331	40.701	-0.92
10.062	43.235	43.635	-0.93
10.225	46.570	46.194	+0.83
10.464	49.390	50.140	-1.50
10.772	56.190	55.601	+1.07
11.018	59.893	60.253	-0.60
11.173	62.958	63.358	-0.63
11.481	69.667	69.847	-0.26
11.733	75.375	75.515	-0.19
11.905	79.774	79.604	+0.21
12.122	85.469	84.979	+0.57
12.360	91.930	91.170	+0.83
12.732	103.023	101.553	+1.43
12.946	109.670	107.900	+1.62
13.300	121.749	119.089	+2.20

TABLEAU A.5c

AG (3)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL)	(CALCULE)	% de DEVIATION
	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	$\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	
3.295	0.000	0.000	0.00
4.023	1.085	1.049	+ 3.30
4.926	3.479	2.951	+15.10
5.640	5.329	5.063	+ 5.00
6.128	6.909	6.886	+ 0.03
6.724	9.401	9.610	- 2.20
7.473	13.373	13.908	- 4.30
7.666	14.694	15.258	- 3.80
7.918	17.720	17.089	+ 3.80
8.056	18.653	18.153	+ 3.30
8.108	17.975	18.569	- 3.30
8.266	19.221	19.814	- 3.10
8.355	19.961	20.622	- 3.30
8.546	21.503	22.324	- 3.80
8.683	24.531	23.603	+ 4.10
8.798	25.595	24.727	+ 3.60
8.902	24.858	25.771	- 3.70
9.045	26.326	27.254	- 3.50
9.164	27.473	28.532	- 3.90
9.191	27.930	28.832	- 3.30
9.438	30.779	31.662	- 2.90

TABLEAU A.5c

AG(3)
(suite)

TEMPERATURE en K	(EXPERIMENTAL) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	(CALCULE) $\Delta L(T_i, T)/L$ $\times 10^8$	% de DEVIATION
9.569	32.506	33.251	- 2.30
9.696	34.023	34.833	- 2.40
9.881	37.850	37.250	+ 1.60
10.07	39.093	39.829	- 1.90
10.19	40.931	41.556	- 1.50
10.33	43.101	43.672	- 1.30
10.57	47.061	47.421	- 0.80
10.71	49.391	49.651	- 0.50
10.92	53.436	53.256	+ 0.30
11.15	58.099	57.429	+ 1.10
11.31	61.120	60.390	+ 1.20
11.495	65.017	66.057	- 1.6
11.730	70.184	68.854	+ 1.9
12.045	77.743	75.763	+ 2.5
12.311	84.747	82.017	+ 3.2
12.468	88.754	85.874	+ 3.2
12.893	100.923	97.083	+ 3.8

BIBLIOGRAPHIE

- Andres, K., 1961, *Cryogenics* 1, 93.
- Bijl, D. et Pullan, H., 1955. *Physica* 21, 285.
- Carr, R.H., McCammon, R.D. et White, G.K., 1964.
Proc. Roy. Soc., (London), A280, 72.
- Carr, R.H. et Swenson, C.A., 1964, *Cryogenics* 4, 76.
- Dheer, P.N. et Surange, S.L., 1958, *Phil. Mag.* 3, 665.
- Kos, J.F., Lamarche, J.L.G., et Savary, L., (1968), *Phys. Lett.*
A28, 219.
- Kos, J.F. et Lamarche, J.L.G., 1969 *Can. J. Phys.* 47, 2509.
- Lee, D.M., Fairband, A. et Walker, J., 1961. *Phys. Rev.*
121, 1258.
- Martin, L., 1966, *Phys. Rev.* 141, 576.
- McLean, K.O., Swenson, C.A., et Case, C.R., 1972.
J. Low Temp. Phys. 7, 77.
- Neighbours, J.R. et Alers, G.A., 1958, *Phys. Rev.* 111, 707.
- Overton, W.C., Jr. et Gaffney, L. 1955, *Phys. Rev.* 98, 969.
- Perreira, F.N.D.D., Barner, C.H. et Graham, G.M., 1970,
J. Appl. Phys., 41, 5050.
- Shapiro, J.M., Taylor, D.R. et Graham, G.M. 1964, *Can. J.*
Phys., 47, 835.
- Sutton, M., 1953, *Phys. Rev.* 91, 816.
- White, G.K., 1961, *Phil. Mag.* 6, 815.
- White, G.K. et Pawlowicz, A.T., 1970, *J. Low Temp. Phys.* 2, 631.
- White, G.K. et Collins, J.G. 1972, *J. Low Temp. Phys.* 7, 43.
- Phillips, N.E., 1959, *Phys. Rev.*, 114, 676.