

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par :

HAMMOU Naima & SALAMI Chawki

Thème

**Contribution à la réparation du dilatomètre du
type « DILATOMETRE L75 LINSISE »
du laboratoire de génie mécanique.**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZEGGANE HOUARI	MCB	Président
FARSI CHOUKI	MCA	Encadreur
LATRACHE MOHAMED.	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020



الإهداء

إلى روح أبي الطاهرة "الطيب" رحمه الله وأسكنه فسيح جناته

أهدي ثمرة جهدي هذا إلى أعز و أغلى إنسانة في حياتي , التي انارت
دربي بنصائحها , وكانت بحرا صافيا يجري بفيض الحب والبسمة إلى
من زينت حياتي بضياء البدر وشموع الفرح إلى من منحتني القوة و
العزيمة لمواصلة الدرب وكانت سببا في مواصلة دراستي إلى من
علمتني الصبر والاجتهاد إلى الغالية على قلبي أُمي "خيرة" .

إلى من هم سندي وقوتي وملاذي إلى من أثروني على أنفسهم إخوتي
الأعزاء. " بين الوتين والوتين ساكنون أنتم كنبرض دائم لامخرج له
إلا النفس الأخير" .

إلى أصدقائي الذين تقاسموا معي عبء الحياة, إلى من سرنا سويا
ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح .

كما اهدي ثمرة جهدي إلى أستاذي الكريم فارسي شوقي .



Remerciements



J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les enseignants du département de génie mécanique.

Avec une profonde gratitude, Je remercie mon encadreur qui était le lien et le fondement de l'achèvement de ce travail par ses précieuses instructions.

Mr FARSI CHOUKI

Il est avec plaisir que je remercie le responsable du hall technologique et des laboratoires de la faculté de technologie de M'sila et les responsable du laboratoire de l'RDM, qui m'ont aidé suivant toute la partie pratique et m'ont conseillés selon leur expérience dans le domaine de dilation des matériaux.

Je tiens à exprimer mes remerciements à ma mère et mes frères ceux qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs aides précieuses tout au long de mes recherches.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance et mes remerciements aux personnes qui m'ont soutenu à la réalisation de ce travail, les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter ce travail.

Si ce n'était pour vous, notre institution n'aurait pas atteint les meilleurs rangs, et sans vos efforts, le succès n'aurait eu aucune portée. .

Enfin merci, à tous mes camarades de promotion et amis.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralité sur les dilatomètres

Introduction.....	2
I.1. Types et caractéristique des dilatomètres	2
I.1.1. Dilatomètre du type L74.....	2
I.1.1.a. Les caractéristiques techniques.....	3
I.1.1.b. Les caractéristiques principales du système chauffant	4
I.1.1.c. Propriétés du dilatomètre	4
I.1.2. Dilatomètre L75 horizontal.....	4
I.1.2.a. Les caractéristiques	6
I.1.2.b. Les différents fours.....	7
I.1.2.c. Accessoires	7
I.1.2.d. Les propriétés physiques	7
I.1.2.e. Propriétés du dilatomètre.....	7
I.1.2.f. Application.....	8
I.1.3. Dilatomètre L75 vertical.....	9
I.1.3.a. Les caractéristiques.....	11
I.1.3.b. Les différents fours.....	12
I.1.3.c. Accessoires.....	12
I.1.2.d. Les propriétés physiques	12
I.1.2.e. Propriétés du dilatomètre.....	12
I.1.2.f. Application.....	13
I.2.1. Principe.....	15.16

CHAPITRE II : Dilatation thermique dans les solides

Introduction.....	17
II.1. Problèmes dus à la dilatation.....	17
II.2. Echelles de température.....	17
II.3. Le principe zéro et les thermomètres	17

II .3.1 Echelle Celsius (Centigrade).....	18
II .3.2 Echelle Fahrenheit.....	18
II .3.3 Échelle absolue (Kelvin, thermodynamique).....	18
II.4 Les types de la dilatation	19
II.4 .1 Dilatation linéaire	19
II.4.1.1 Coefficient de dilatation linéaire.....	23
II.4.1.2 Dilatation cubique.....	24
II.4.1. 3. Relation entre le coefficient de dilatation cubique K et le coefficient de dilatation linéaire λ	24
II.4.2 Dilatation volumique.....	25
II .4.3. Variation de la masse volumique.....	26
II.5. La conduction de la chaleur.....	27
II.6. La capacité thermique.....	28
II.7. La conductibilité thermique.....	31
II.8.1. Comportement général.....	35
II.8.2. Comportements particuliers.....	37
II.9. Contraintes thermiques.....	37
II.9.1. Bilames thermostatiques.....	41
II.9.2 Bilames à déflexion lente.....	42
II.9.3. Bilames à retournement brusque.....	43
II.9.4 Exemples d'applications.....	45
II.10 Avantage et inconvénients de la dilatation.....	46
II.10.1 Avantage du phénomène de dilatation.....	46
II.10.2 Inconvénients de la dilatation	46.47

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Partie A : Description et fonctionnement de l'appareil dilatomètre L75.

III .A.1 : Description.....	48
-----------------------------	----

III .A.1.1 : Fonctionnement du Mesure absolue.....	48
III .A.1.2 : Fonctionnement du mesure différentielle.....	49
III .A.2 : Domaine d'application.....	49
III .A.3 : Configuration et mise en service.....	50
III .A.4 : Effet Seebeck.....	50
III .A.5 : Thermocouples.....	51
III .A.6 : Vérifiez les connexions des thermocouples.....	52
III .A.7: La préparation des échantillons.....	52
III .A.8: instruction de travail pour la mesure absolue.....	53
 Partie B : Maintenance du dilatomètre L75	
III.B.1. Introduction à la maintenance.....	58
III.B.2. Définition de la maintenance.....	58
III.B.3. De l'entretien à la maintenance.....	58
III.B.4. Types de la maintenance.....	60
III.B.4.1. Maintenance préventive.....	60
III.B.4.1.1. Maintenance systématique.....	60
III.B.4.1.2. Maintenance conditionnelle.....	60
III.B.4.1.3. Maintenance prévisionnelle.....	60
III.B.4.1.4. Objectives visés par la maintenance préventive.....	60
III.B.4.2. Maintenance corrective.....	60
III.B.4.2.1. Maintenance palliative.....	61
III.B.4.2.2. Maintenance curative.....	61
III.B.5. Opération démontage du DIL75.....	62
III.B.6 Etapes de vérification	65
CONCLUSION GENERALE.....	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	
Résumé.....	

Liste des figures

Figure I.1.: Le dilatomètre L74.....	03
Figure I.2: dilatomètre L75 horizontal.....	05
Figure I.3 : Exemple de La dilatation thermique du cristal de roche évaluée avec le dilatomètre L75Avec l' ATD.....	08
Figure I.4 : Exemple d'évaluation de la dilatation thermique linéaire (ΔL) et le CTE de l'échantillon en fer sous atmosphère d'argon.....	09
Figure I.5: dilatomètre L75 vertical.....	10
Figure .I.6 : l'exemple d'application: Céramique / métallurgie des poudres.....	14
Figure. I.7 : l'exemple d'application du procédé de frittage de ZrO_2	15
Figure II.8 : Exemple de dilatation linéaire.....	19
Figure II.9: Dilatation linéaire.....	21
Figure II.10: Coefficient de dilatation linéique de quelques matériaux en fonction de la température.....	22
Figure II.11 : Direction de conduction de chaleur.....	27
Figure II.12: La capacité thermique.....	29
Figure II.13: La conductibilité thermique de quelques matériaux.....	32
Figure II.14 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température de quelques types de matériaux.....	34
Figure II.15 : Coefficient de dilatation linéaire-Module d'Young pour les solides à la température ambiante.....	36
Figure II .16 : Contraintes thermiques longitudinales dans une tige.....	37
Figure II.17: Exemple de flambage d'une tige élancée soumise à une force de compression.....	39
Figure II.18: Partie d'un joint de dilatation entre deux portions d'une route (sa longueur totale qui est la largeur de la route est 10,5 m).....	40

Figure II. 19: Rouleaux de bilames après laminage.....	41
Figure II .20: Coupe d'un micro-disjoncteur de tableau électrique domestique.....	42
Figure II .21: Ensemble de bilames à déflexion lente.....	43
Figure II .22 : Exemples de bilames à déflexion brusque ou cloquant.....	43
Figure II .23 : Exemples de bilames à déflexion brusque ou cloquant.....	44
Figure II. 24 : Deux exemples d'application des bilames à retournement brusque (<i>Documents internet</i>).....	45
Figures III.A.25 : (1,2) Illustration d'une chambre froide.	54
Figure III.A.26 : Clé de contrôle dilatomètre.....	56
Figure III.A.27: Schéma électrique pour la dilatomètre	57
Figure III.B.28 : Maintenance / Entretien.....	59
Figure III.B.29 : Plan d'entretien.....	59
Figure. III.B.30 : Photo avant le démontage du dilatomètre.....	62
Figure. III.B.31: Photo du démontage de la chambre d'échauffement.....	62
Figure.III.B.32 : Photo des composants du dilatomètre.....	62
Figure.III.B.33 : Vues de la Chambre d'échauffement cylindrique.....	63
Figure. III.B.34 : Cylindre de refroidissement.....	63
Figure.III.B.35 : Le cylindre en verre pour le maintien de la température de l'échantillon.....	63
Figure III.B.36 : Tige de fixation.....	64
Figure. III.B.37: Le chariot mécanique mobile.....	64
Figure.III.B.38:1 ;2 ;3 Conduite et coude pour le refroidissement et réglage de température de l'échantillon.....	64
Figure. III.B.39 : Raccordement du filament de résistance chauffante.....	65
Figure. III.B.40 : Thermocouple court pour la chambre noir ($l=12\text{ cm}$).....	65
Figure . III.B.41: Thermocouple long pour la chambre de l'échantillon	66
Figure. III.B.42: Vérification de l'état du cylindre blanc.....	66

Figure. III.B.43 : Vérification le chariot mobile mécanique.....	67
Figure. III.B.44 : Vérification la grande cuvette cylindrique en verre pour introduire l'échantillon	67
Figure. III.B.45 : Tige en verre cylindrique.....	67
Figure. III.B.46: Vérification cotent isolant entre le cylindre noir et la résistance est en bon état.....	68
Figure. III.B.47 : Vérification le coude et flexible pour l'alimentation de refroidissement du cylindre noir.....	68
Figure. III.B.48 : Vérification Les fiches de connexion entre la chambre d'échauffement et le stand de commande.....	69
Figure. III.B.49 : Vérification raccordement des flexibles du fluide de refroidissement.....	69
Figure. III.B.50: Le stand d'indication des mesures	70

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Caractéristique du dilatomètre.....	06
Tableau I. 2 : Caractéristique de dilatomètre L75.....	11
Tableau II .3 : Désignation des températures en fonction des longueurs de dilatation.....	20
Tableau II .4 : coefficient de dilatation linéique de quelques solides.....	21
Tableau II .5: Coefficients de dilatation de quelques corps.....	23
Tableau II.6 : Constante conductivité thermique.....	28
Tableau II.7 : Les valeurs de C_p et T_D à 25°C pour quelques éléments.....	30

Introduction générale

La dilatation c'est un phénomène observé dans la plupart des matériaux suite à une élévation de température. Notre travail traite l'étude constructive et la réparation du dilatomètre de type "dilatomètre L75", ainsi que la contribution pratique au laboratoire de génie mécanique. La dilatation s'observe au niveau microscopique, lorsqu'on chauffe une substance, on provoque l'augmentation de l'énergie cinétique des atomes et des molécules, ce qui accroît la violence des chocs entre les molécules.

Les molécules ont par conséquent tendance à se repousser davantage l'une de l'autre et le matériau se dilate. Les atomes qui constituent la matière s'écartent lorsque la température augmente. Le coefficient de dilatation thermique linéaire exprime l'allongement d'un solide dans une seule dimension, les effets de l'exposition au soleil pouvant générer des variations dimensionnelles de quelques centimètres pour un matériau long de plusieurs dixièmes de mètres.

Ce phénomène est utilisé dans des applications très courantes, comme les thermomètres à dilatation de liquide. Cependant, même si la dilatation thermique est parfois mise à profit, les contraintes internes générées sont la plupart du temps néfastes, des solutions sont alors recherchées pour compenser ses effets. C'est le cas pour les structures mixtes avec des joints de dilatation prévus dès la conception afin d'absorber les déformations des différents éléments lors des variations importantes de la température, voire d'hygrométrie en présence de bois.

Ce travail est divisé en trois chapitres:

- Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur le dilatomètre, ses types et caractéristiques technique.
- Le second chapitre traite des problèmes de dilatation, des applications les plus importantes et de ses types.
- Quant au troisième chapitre, nous avons traité deux parties (A, B):
 - **Partie A** : Description et fonctionnement de l'appareil Dilatomètre L75
 - **Partie B** : Analyse et démontage du Dilatomètre à réparer

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale sur l'état actuel de toutes les pièces qui constituent le dilatomètre donné avec quelques propositions pour son démarrage et son bon fonctionnement

Chapitre I

***« Généralité sur
les dilatomètres »***

Introduction

Le dilatomètre (DIL) possède une technique dans laquelle une dimension d'une substance (telle que: la céramique, verres, métaux, composites, polymères et autres) sous une charge nulle ou négligeable est mesurée (par ex : mesure d'expansion ou mesure de retrait) en fonction de la température alors que la substance est soumise à une température contrôlée programme dans une atmosphère déterminée.

LINSEIS produit une large gamme de Single, Double, différentiel, QUATTRO, trempe, laser dilatomètres optiques à une température plage de -263 ° C à 2800 ° C et une résolution jusqu'à 0,03 nm. Grâce à nos années d'expérience (est. 1957), LINSEIS propose des dilatomètres sans égal variabilité et performance de précision.

Les dilatomètres sont fréquemment utilisés pour la recherche et développement et contrôle de la qualité des solides, liquides, poudres et pâtes pour déterminer leur :

- détermination de la dilatation thermique coefficient (CTE)
- dilatation thermique linéaire (ΔL)
- températures de frittage et étapes de frittage
- détermination de la transition vitreuse (T_g)
- changements de phase
- optimisation des processus de gravure
- changements de volume
- Frittage à débit contrôlé (RCS)
- décomposition
- changement de densité

I.1. Les différents types et caractéristiques techniques des dilatomètres

Il existe différents types et caractéristiques techniques des dilatomètres [1] :

I.1.1. Dilatomètre L74

Le dilatomètre optique L74 de Linseis a été développé pour répondre aux applications les plus exigeantes de l'industrie du verre, de la céramique, du métal et de l'énergie. Une caméra CCD haute résolution permet une analyse visuelle en temps réel de l'expansion de l'échantillon, en une seule image ou sous forme de séquences vidéo. L'avantage de cette

procédure est que l'échantillon n'est pas chargé et déformé par la force d'appui. Pour les échantillons mous ou des échantillons qui fondent pendant la mesure, le résultat ne sera pas influencé par la pression contrairement à un dilatomètre classique. Plusieurs fonctions de correction et d'analyse sont intégrées dans le logiciel d'évaluation Linseis. La conception horizontale unique permet d'effectuer même les applications les plus exigeantes. Notre adaptateur solide-liquide permet de faire des mesures d'expansion : du volume des solides, des liquides et des transitions de phase solide-liquide. En outre, vous pouvez bénéficier d'un porte-échantillons spécialement adapté à la mesure feuilles rigides, ce qui évite les erreurs de mesure dues aux forces du piston que l'on peut trouver dans un dilatomètre classique [1].



Figure I.1.: Le dilatomètre L74.

I.1.1.a. Caractéristiques [1]

- mesure d'expansion sans contact
- caméra CCD haute résolution
- microscope chauffant
- fluxmètre optique
- goutte posée
- angle de contact

- expansion solide-liquide (adaptateur optionnel)

I.1.1.b. Les caractéristiques principales de notre système chauffant :

- Analyse sans contact
- Mesure des coefficients d'expansion thermique (CTE) des solides et les changements volumiques des liquides
- Analyse sous divers atmosphères
- Large plage de températures de -150 à 2000°C
- Evaluation automatique des températures caractéristiques (point de ramollissement, point de fusion, etc.)
- Modules d'optimisations optiques pour CTE et pour la microscopie optique
- Optical optimization packages available for CTE and optical microscope (separate or combined) [1].

I.1.1.c. Propriétés du dilatomètre :

- Evaluation de la température de transition vitreuse et du point de ramollissement.
- Détection du point de ramollissement avec arrêt automatique de l'appareil (protection du système).
- Affichage du rétrécissement ou de la dilatation absolue ou relative.
- Représentation et calcul des coefficients de dilatation techniques / physiques.
- Taux de frittage contrôlé (option logiciel).
- Analyse du processus de vitrification.
- Détermination de la densité.
- Routines d'analyse automatiques.
- Correction du système (température, courbe zéro, etc.) [1].

I.1.2. Dilatomètre L75 horizontal

Le dilatomètre horizontal double et différentiel (DIL) de la série L75H a été développé pour répondre aux exigences de la communauté universitaire et les laboratoires de recherche du monde entier. Avec ce système, le comportement de dilatation thermique des solides, des liquides, des poudres et des pâtes pour une variété d'applications peut

être déterminé avec précision. La conception unique de ce système garantit la plus haute reproductibilité et la plus grande précision. Cette ligne de dilatomètres est capable d'effectuer des mesures sous vide, ainsi que sous atmosphères oxydantes et réductrices. Ce système peut être commandé dans une version simple, double ou différentielle pour encore plus de précision ou un débit d'échantillons plus élevé. Si nécessaire, les composants mécaniques et électroniques du dilatomètre peuvent être séparés pour permettre des mesures dans une boîte à gants. Avec notre système de contrôle automatique de la pression, la pression de contact peut être réglée de façon continue entre 10 et 1000 mN, en fonction de l'application. Cette fonction contrôle en continue la pression de contact prédéfinie lors de l'expansion et / ou le retrait de l'échantillon [1].



Figure I.2: dilatomètre L75 horizontal.

I.1.2.a. Les caractéristiques [1]:

MODÈLE	DIL L75 HORIZONTAL
Plage de température	-180 à 2800°C
LVDT	
Résolution Delta L	0.03 μm
Plage de mesure	+/- 2500 μm
Force d'appui	10 mN à 1 N
Encodeur optique	
Résolution Delta L	0.1 nm
Plage de mesure	+/- 25000 μm
Détection automatique de la longueur de l'éprouvette	oui
Modulation de la force	oui
Force d'appui	10 mN à 5 N
Configuration à plusieurs fours	maximum 2 fours

Tableau I. 1 : Caractéristique du dilatomètre.

I.1.2.b. Les différents types de fours [1]:

- L75/H 500LT -180°C jusqu'à +500°C
- L75/H 700LT -180°C jusqu'à +700°C
- L75/H 1000 RT jusqu'à 1000°C
- L75/H 1400 RT jusqu'à 1400°C
- L75/H 1550 RT jusqu'à 1600°C
- L75/H 2000 RT jusqu'à 2000°C

I.1.2.c. Accessoires [1]:

- Différents types (dessins / matériaux) de porte-échantillons
- Des pieds à coulisse pour la saisie en ligne de la longueur de l'échantillon
- Sélection des manuels, semi-automatiques et automatiques (MFC), boîtes de gaz jusqu'à 4 gaz
- Instruments pour la préparation de l'échantillon
- Logiciel option pour frittage à vitesse contrôlée (RCS)
- Diverses pompes à palettes et turbo-moléculaire
- Possibilité de fonctionner sous H₂

I.1.2.d. Les propriétés physiques:

CTE, dilatation thermique linéaire, α physique, la température de frittage, transformations de phase, des points de ramollissement, températures de décomposition, températures de transition vitreuse [1].

I.1.2.e. Propriétés du dilatomètre [1]

- Evaluation de la température de transition vitreuse et du point de ramollissement.
- Détection du point de ramollissement avec arrêt automatique de l'appareil (protection du système)
- Affichage du rétrécissement ou de la dilatation absolue ou relative.
- Représentation et calcul des coefficients de dilatation techniques / physiques.
- Taux de frittage contrôlé (option logiciel).
- Analyse du processus de vitrification.

- Détermination de la densité.
- Routines d'analyse automatiques.
- Correction du système (température, courbe zéro, etc.).
- Ajustement automatique du zéro.
- Régulation automatique de la force d'appui du piston.

I.1.2.f. Application

1.1'exemple d'application: Cristal de roche (ATD calculé)

La dilatation thermique du cristal de roche peut être facilement évaluée avec le dilatomètre L75. La fonctionnalité supplémentaire ATD (analyse thermique différentielle) permet une vue en profondeur du comportement thermique du matériau. La mesure ATD est une routine mathématique basée sur la température de l'échantillon. Des effets exo/endothermiques influencent le changement de la température de l'échantillon au cours du chauffage dynamique ou d'un cycle de refroidissement. A environ 575 °C une transition de phase a lieu. La déviation de la température mesurée de la température de littérature (574 °C) peut être utilisée pour un étalonnage de température [1].

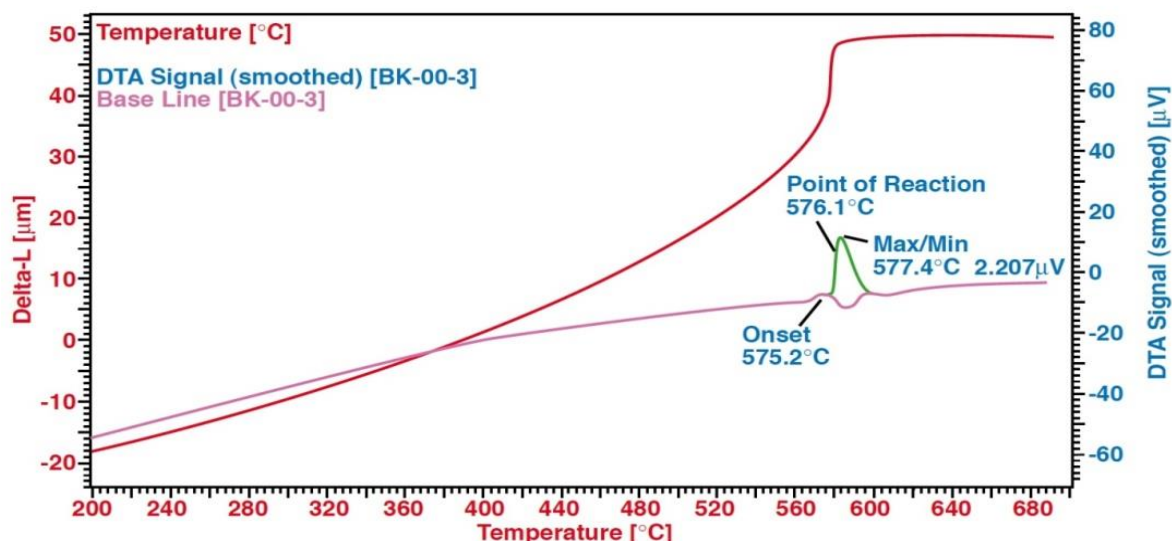


Figure I.3 : Exemple de la dilatation thermique du cristal de roche évaluée avec le dilatomètre L75. Avec l'ATD.

2.l'exemple d'application: Fer

La dilatation thermique linéaire (delta L) et le CTE de l'échantillon en fer sous atmosphère d'argon, sont évaluées. La vitesse de chauffage était 5K/min. Au delà de 736,3°C (température du maximum de CTE) un retrait a été détecté, cela est dû à une modification de la structure atomique, connue comme point de Curie. La différence de résultat mesuré et de la littérature peut être attribuée à une contamination de l'échantillon [1].

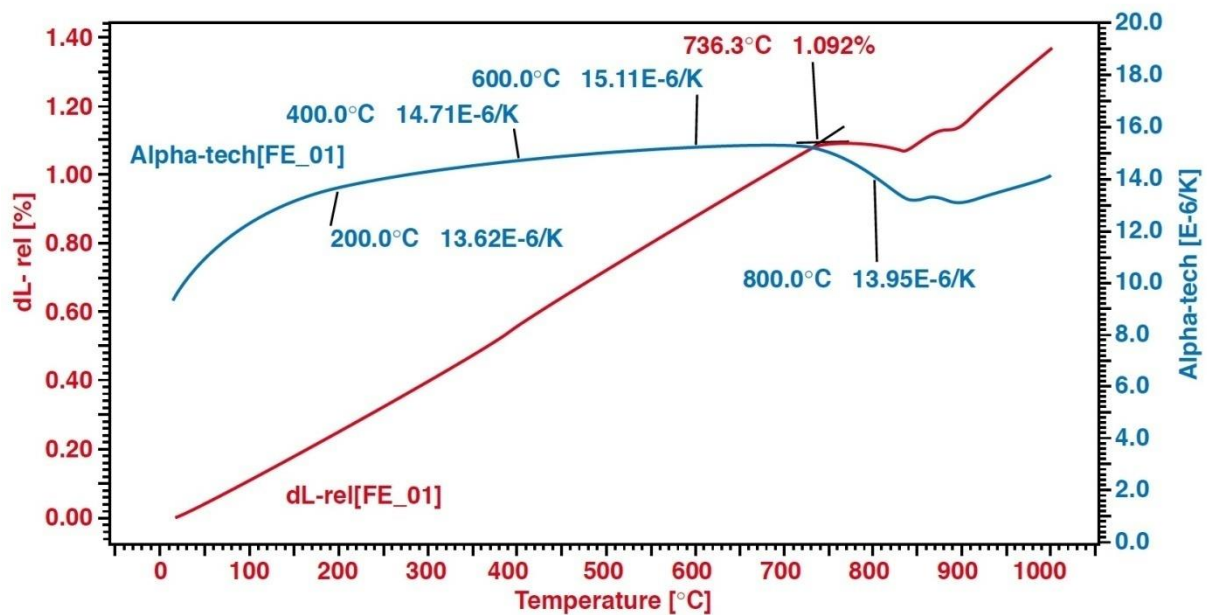


Figure I.4 : Exemple d'évaluation de la dilatation thermique linéaire (delta L) et le CTE de l'échantillon en fer sous atmosphère d'argon.

I.1.3. Dilatomètre L75 verticale

Le dilatomètre vertical de recherche de la série de recherche L75V a été développé pour répondre aux exigences de la communauté universitaire et les laboratoires de recherche du monde entier. Le comportement de dilatation thermique des solides, des liquides, des poudres et des pâtes pour une large variété d'applications, peuvent être déterminée avec précision grâce à ces appareils. Le design vertical unique de ce système est parfait pour des matériaux à faible ou ultra faible Extension. La conception verticale sans friction (Zéro-Friction), garantit des résultats de mesure de qualité supérieure. Cette série de dilatomètres est capable d'effectuer des mesures sous vide et sous atmosphère oxydante et réductrice. Ce système peut

être commandé en version simple ou différentiel avec une précision encore plus élevée ou pour des débits d'échantillons plus grands. Si nécessaire, les composants mécaniques et électroniques du dilatomètre peuvent être séparés pour permettre des mesures dans une boîte à gants [1].

Avec la «Option-Cryostatique» des températures inférieures à 10 K sont maintenant disponibles! Plage de mesure -260°C à +220°C!

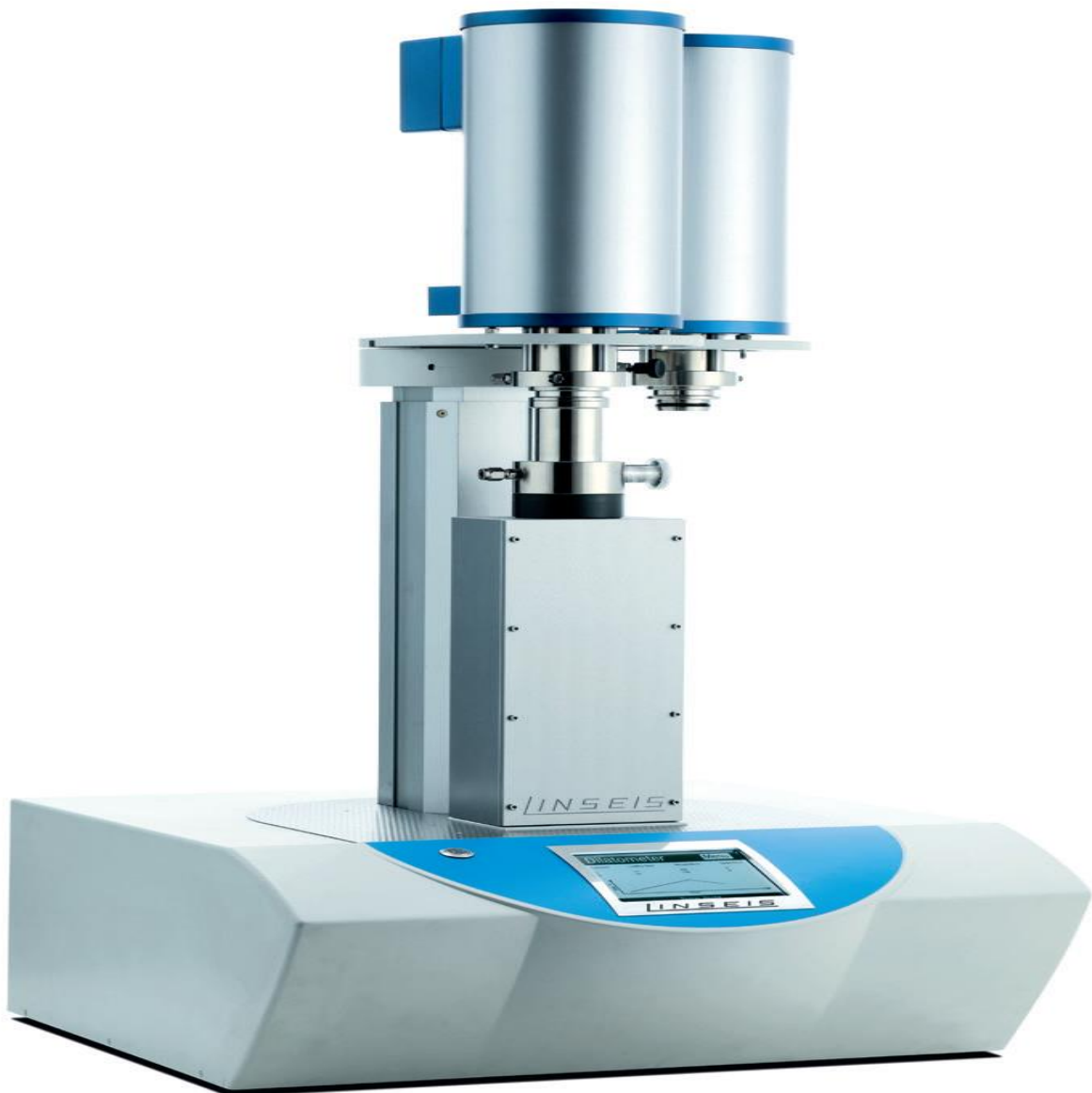


Figure I.5: dilatomètre L75 vertical.

I.1.3.a. Les caractéristiques

MODÈLE	DIL L75 HORIZONTAL
Plage de température	-263à 2800°C
LVDT	
Résolution Delta L	0.03 <i>nm</i>
Plage de mesure	+/- 2500 <i>µm</i>
Force d'appui	10 mN à 1 N
Encodeur optique	
Résolution Delta L	0.1 nm
Plage de mesure	+/- 25000 µm
Détection automatique de la longueur de l'éprouvette	oui
Modulation de la force	oui
Force d'appui	10 mN à 5 N
Multiple ofenkonfiguration	bis zu 3ofen
Configuration à plusieurs fours	Maximum 3 fours
Fonctionnement avec four motorisé	inclus

Tableau I.2 : Caractéristique de dilatomètre L75 V

I.1.2.b. Les différents de fours [1]

- L75V Cryo -260°C jusqu'à +220°C
- L75V 500LT -180°C jusqu'à +500°C
- L75V 700LT -180°C jusqu'à +700°C
- L75V 1000LT -180°C jusqu'à +1000°C
- L75V 1000 RT jusqu'à 1000°C
- L75V 1400 RT jusqu'à 1400°C
- L75V 1550 RT jusqu'à 1600°C
- L75V 1750 RT jusqu'à 1750°C
- L75V 2000 RT jusqu'à 2000°C
- L75V 2400 RT jusqu'à 2400°C
- L75V 2800 RT jusqu'à 2800°C

I.1.2.c. Accessoires [1]

- Différents types de porte-échantillons
- Des pieds à coulisse pour la saisie en ligne de la longueur de l'échantillon
- Sélection des manuels, semi-automatiques et automatiques (MFC), boîtes de gaz jusqu'à 4 gaz
- Instruments pour la préparation de l'échantillon
- Logiciel option pour frittage à vitesse contrôlée (RCS)
- Diverses pompes à palettes et turbo-moléculaire
- Possibilité de fonctionner sous H₂

I.1.2.d. Les propriétés physiques suivantes peuvent être mesurées

CTE, dilatation thermique linéaire, alpha physique, la température de frittage, transformations de phase, des points de ramollissement, des températures de décomposition, des températures de transition vitreuse.

I.1.2.e. Propriétés du dilatomètre

- Evaluation de la température de transition vitreuse et du point de ramollissement
- Détection du point de ramollissement avec arrêt automatique de l'appareil(protection du système)
- Affichage du rétrécissement ou de la dilatation absolue ou relative.
- Représentation et calcul des coefficients de dilatation techniques / physiques
- Taux de frittage contrôlé (option logiciel)
- Analyse du processus de vitrification
- Détermination de la densité
- Routines d'analyse automatiques
- Correction du système (température, courbe zéro, etc.)
- Ajustement automatique du zéro
- Régulation automatique de la force d'appui du piston

I.1.2.f. Application

1.1'exemple d'application: La vitrocéramique :

L'analyse dilatométrique est la meilleur méthode pour déterminer la dilatation thermique (CTE) et le point de ramollissement des matériaux en vitrocéramique. Outre l'expansion absolue et le coefficient de dilatation (CTE), vous pouvez trouver la première dérivée de l'expansion absolue, mais aussi la première dérivée qui passe par zéro, vous permettant ainsi de déterminer le maximum de la dilatation thermique et donc le point de ramollissement de la matière.

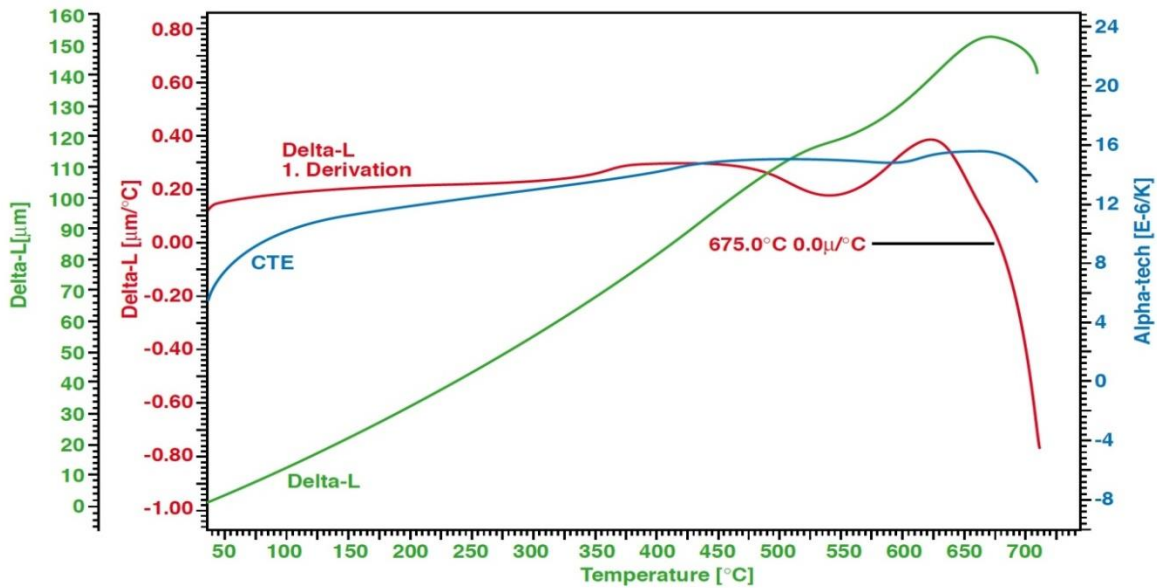


Figure I.6 : l'exemple d'application: Céramique / métallurgie des poudres.

Dans les procédés de fabrication haute technologie de la céramique, la possibilité d'obtenir une simulation des processus de frittage est d'un grand intérêt. Lorsque vous utilisez le logiciel optionnel RCS (vitesse de frittage contrôlée), il est possible de programmer un frittage contrôlé selon la théorie de Palmour III. L'application suivante est un procédé de frittage de ZrO_2 . Ici, on obtient une densité finale de 100%. La vitesse de chauffage initial diminue à mesure que la densité finale soit atteinte [1].

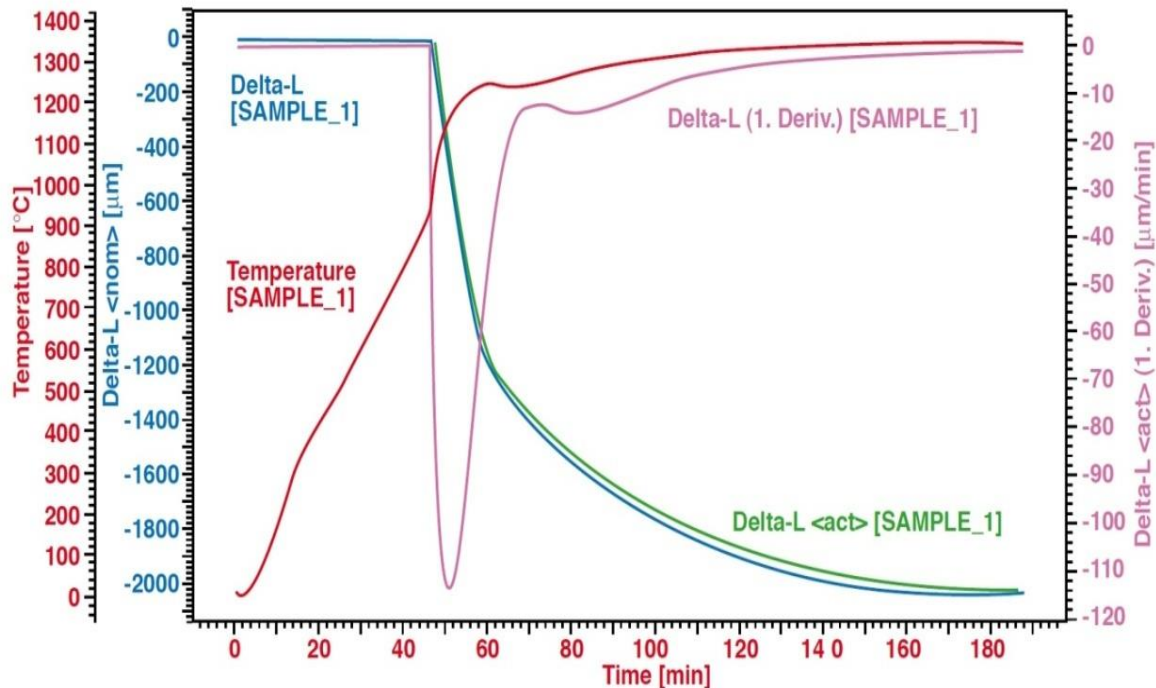


Figure. I.7 : l'exemple d'application du procédé de frittage de ZrO_2 .

I.2.1. Principe

Lorsqu'on recuit un échantillon de céramique en augmentant progressivement sa température, cet échantillon se dilate comme le fait n'importe quel solide. La dilatation se poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne une température proche de la température à laquelle cette céramique avait été cuite initialement. Si on poursuit cette recuisson, la température continuant à augmenter, la céramique se contracte car il y a reprise de la cuisson de la céramique. L'échantillon amorcé donc un retrait qui se poursuit tant que la température de la recuisson continue d'augmenter.

La courbe de la variation de la longueur d'un échantillon de céramique en fonction de la température de recuisson à laquelle on le soumet, présente un maximum qui représente la température de cuisson apparente de la céramique.

Cette température apparente est en général assez peu différente de la température de cuisson effective à laquelle avait été cuite la céramique initialement qui est celle du palier de température par lequel s'était terminée la cuisson avant refroidissement.

En réalité, la température de cuisson d'une céramique est une grandeur assez mal définie puisque le degré de cuisson d'une céramique dépend aussi du temps pendant lequel la température maximale a été maintenue dans le four.

Si la méthode paraît simple en théorie, il faut être prudent quant à l'interprétation des résultats et prendre en considération un certain nombre de facteurs tels que durée du palier, la vitesse de la montée en température du four, le type d'argile... [2].

Chapitre II

***« Dilatation
thermique dans
les solides »***

Introduction

La dilatation thermique s'explique par l'augmentation de l'énergie cinétique des atomes et des molécules lorsqu'on chauffe une substance, ce qui accroît la violence des chocs entre les molécules. Les molécules ont par conséquent tendance à **se repousser d'avantage** l'une de l'autre et le matériau se dilate.

II.1. Problèmes dus à la dilatation

La dilatation des solides est compensée sur certaines structures par des joints de dilatation. Par exemple dans le cas des ponts, des « rainures » appelées joints de chaussée (joints de dilatation) permettent de compenser les effets dus aux différences d'exposition au soleil et d'échauffement de l'atmosphère allongement de peut arriver à quelques centimètres d'un solide long de plusieurs dizaines de mètres. Sans l'espace laissé par ces joints de dilatation, le pont subirait des contraintes internes supplémentaires [2].

II.2. Echelles de température

On distingue trois formes d'échanges thermiques :

- La **conduction** : la chaleur se propage à travers les corps, principalement les solides, Sans mouvement de matière ;
- La **convection** : sous l'effet des différences de température, des masses de matières liquides ou gazeuses se mettent en mouvement et propagent ainsi la chaleur.
- Le **rayonnement** : tout corps chauffé émet spontanément de l'énergie sous forme de Radiations électromagnétiques. Inversement, ces radiations peuvent être absorbées et Contribuer à chauffer un corps récepteur [2].

II.3. Le principe zéro et les thermomètres

Ce principe formalise la constatation expérimentale que dans les échanges thermiques la chaleur passe spontanément du corps chaud au corps froid jusqu'à l'équilibre thermique.

« Si deux systèmes A et B sont en équilibre thermique avec un troisième, C, alors ils sont en équilibre entre eux ».

Cela conduit tout naturellement à l'emploi de thermomètres. Il suffit de choisir comme système C un système dont l'une des observables varie de manière simple et univoque avec la température. Tout le monde connaît les thermomètres à mercure dont le principe repose sur la mesure de la dilatation au moyen de graduations. La température d'un système est mesurée

La dilatation thermique dans les solides

lorsqu'il est en équilibre thermique avec le thermomètre. Le principe zéro affirme alors que si les systèmes **A** et **B** ont la même température, ils n'échangeront pas de chaleur une fois mis en contact. par exemple, ou carrément d'autres propriétés physiques de la matière. Citons :

- Dilatation différentielle de deux métaux (thermomètres bilames) .
- Variation de la résistivité électrique (sondes PT100) .
- Mesure d'un potentiel électrique entre deux métaux différents (thermocouples) [2].

II .3.1 Echelle Celsius (Centigrade):

Par définition le degré Celsius correspond à la température en 0°C par exemple de la glace fondante mais celle de l'eau bouillante est de 100°C , à la pression atmosphérique normale [3] . Entre ces deux limites, les températures sont mesurées par interpolation au moyen des graduations du thermomètre. La désignation de la température en degré Celsius est $^{\circ}\text{C}$. (Nous réservons **T** à la température absolue, que nous verrons plus loin, et nous gardons t pour le temps.)

$$[\theta] = ^{\circ}\text{C} \text{ (degré Celsius, ou centigrade) [4].}$$

II .3.2 Echelle Fahrenheit:

Cette échelle est utilisée dans les pays anglo-saxons. La température de la glace fondante correspond à 32°F et celle de l'eau bouillante à 212°F .

$$[\Theta_f] = ^{\circ}\text{F} \text{ (degré Fahrenheit [5]) .}$$

$$\text{Relation avec les degrés Celsius : } \theta = (\Theta_f - 32)/1,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{II.1})$$

II .3.3 Échelle absolue (Kelvin, thermodynamique):

Cette échelle est basée sur la dilatation des gaz parfaits. Elle commence du zéro absolu. Un intervalle de température de 1°K , ou simplement 1 K est égal à 1°C .

$$[T] = \text{K (kelvin) [6].}$$

$$\text{Relation avec les degrés Celsius : } \theta = T - 273,15 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{II.2})$$

L'existence du zéro absolu ne peut être comprise que sur la base de l'agitation moléculaire. Si la température absolue est proportionnelle à l'agitation des molécules, ou en utilisant un terme de physique, à leur énergie cinétique, elle doit être nulle lorsque cette énergie est nulle.

II.4 Les types de la dilatation :

II.4 .1 Dilatation linéaire :

L'expérience montre que si un objet, de longueur initiale l , est chauffé il se produit une petite augmentation de longueur Δl sous l'effet d'une légère augmentation de température ΔT , [7].

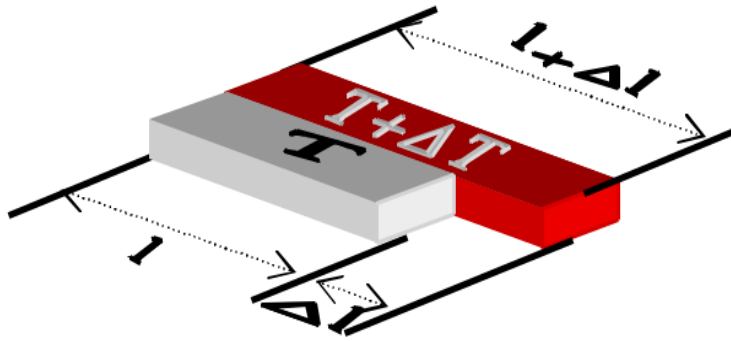


Figure II.8 : Exemple de dilatation linéaire.

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

α : est le coefficient de dilation linéaire du matériau.

α : a les dimensions de l'inverse d'une température.

α : en K^{-1}

Exemple1 :

La longueur du pont de la Golden Gate à San Francisco est de 1280 m. Certaines années, la température varie entre $-12^{\circ}C$ et $38^{\circ}C$. Calculer la variation de longueur correspondant à cette différence de température, sachant que la chaussée est supportée par des poutres en acier.

$$\alpha_{\text{acier}} = 1.27 \cdot 10^{-5} K^{-1}$$

$$\Delta T = 50 \text{ deg } (^{\circ}C \text{ ou } K)$$

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T = (1.27 \cdot 10^{-5}) 1280 \times 50$$

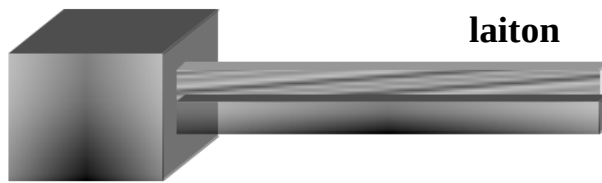
$$\Delta l = 0.81 \text{ m}$$

Dans la structure du pont, il a fallu tenir compte du changement de l pour éviter le développement de forces capables de dégâts .

La dilatation thermique dans les solides

Application : le thermostat

Un thermostat est un dispositif constitué de deux rubans métalliques collés l'un à l'autre.



le thermostat laiton

$\alpha_{\text{laiton}} \neq \alpha_{\text{acier}}$

Sous l'effet de la chaleur, la dilatation inégale du laiton et de l'acier provoque la flexion des rubans.



le thermostat acier

Lorsque la flexion est suffisamment grande, le thermostat **ouvre** ou **ferme** un interrupteur. Le thermostat est utilisé pour le contrôle du système de chauffage central ou d'air conditionné, ou pour contrôler la température du réfrigérateur.

Exemple2 :

Température	longueur
t_0	l_0
$t_0 + \Delta t$	$l_0 + \Delta l_0$
$t_0 + 2\Delta t$	$l_0 + 2 \Delta l_0$

Tableau II .3 : Désignation des températures en fonction des longueurs de dilatation .

La dilatation thermique dans les solides

Cette exemple 02 montre que l'allongement est proportionnel à l'élévation de la température.

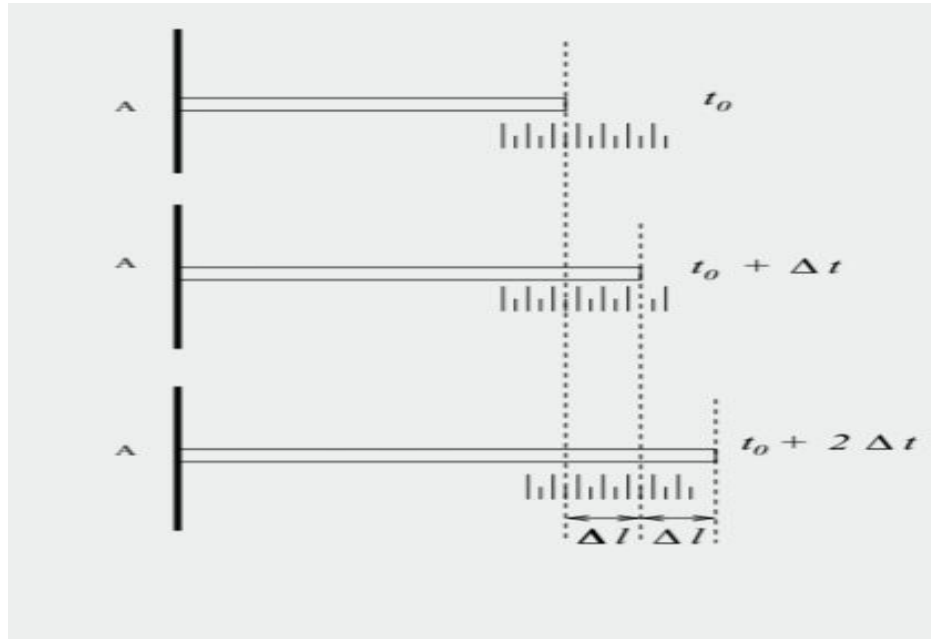


Figure II.9: Dilatation linéaire.

Allongement spécifique :

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 = \alpha_1 (\theta - \theta_0) \quad (\text{II.3})$$

ou :

α_1 : coefficient de proportionnalité, appelé **coefficient de dilatation linéaire**, dépend du matériau considéré .Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs [9].

Matériaux à 25°	α_1 [°C ⁻¹]	Matériaux à 25°	α_1 [°C ⁻¹]
Aluminim	$23,1 \cdot 10^{-6}$	Verre	$68 \cdot 10^{-6}$
Cuivre	$16,5 \cdot 10^{-6}$	Verre pyrex	$2 \cdot 10^{-6}$
Fer	$11,8 \cdot 10^{-6}$	Téflon(PTFE)	$195 \cdot 10^{-6}$

Tableau II .4 :coefficient de dilatation linéique de quelques solides.

Pour des variations de température importantes, la formule (I.3) n'est pas précise ; il faut tenir compte de la variation de α_1 avec la température. La figure2 montre graphiquement

La dilatation thermique dans les solides

l'évolution de α_1 pour quelques matériaux. L'explication de la dilatation thermique au niveau microscopique est indiquée en détail en physique du solide. Elle fait intervenir la structure du réseau cristallin, les distances moyennes entre atomes (ions), qui sont fonctions des forces d'attraction et de répulsion, et bien sûr de leur énergie cinétique moyenne (température). Pour compliquer les choses, la structure cristalline peut changer à certaines températures, et dans le cas des alliages (par ex. acier, bronze) avec les proportions des constituants, ce qui influe naturellement sur la valeur de α_1 .

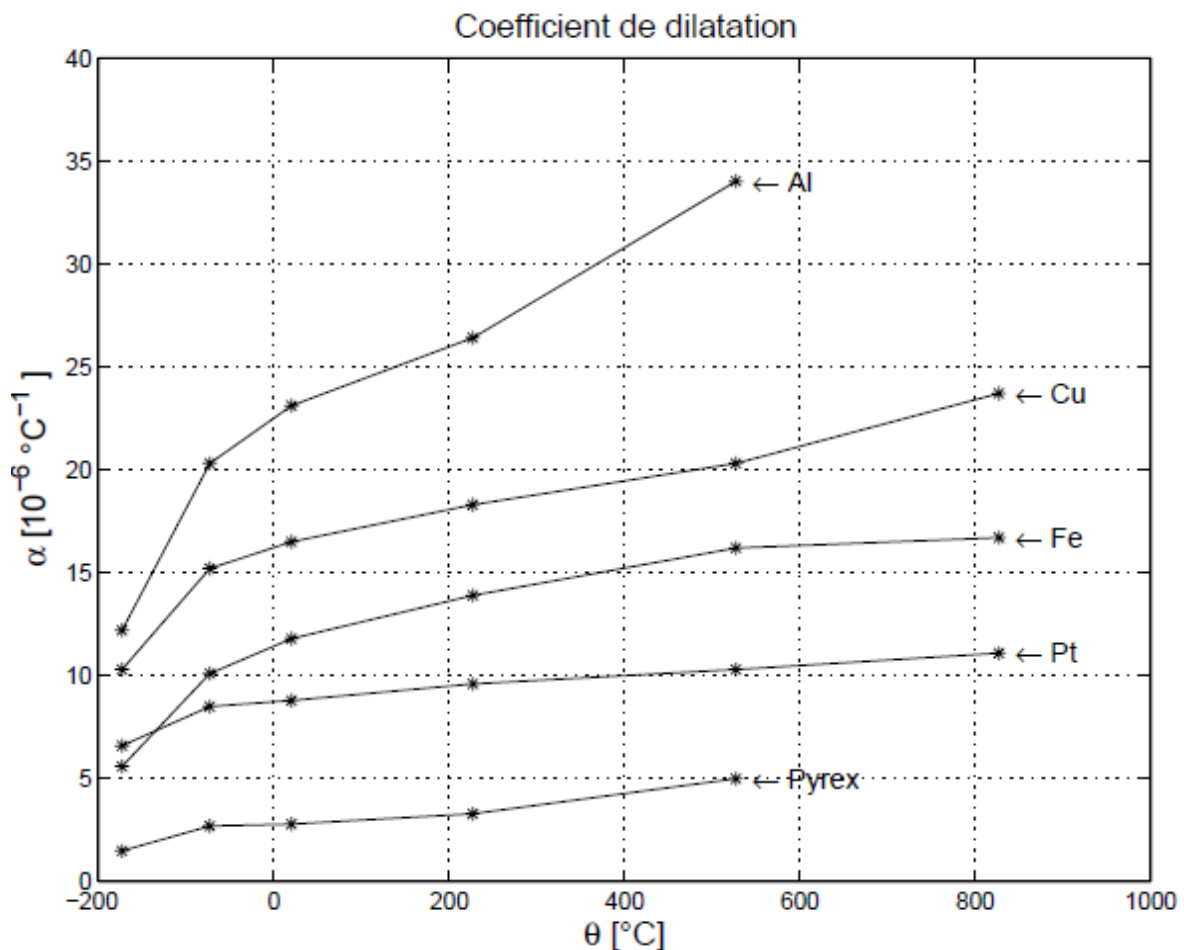


Figure II.10: Coefficient de dilatation linéique de quelques matériaux en fonction de la température.

En ingénierie, la connaissance du comportement thermique des solides est d'une première importance pour la construction des machines ou dispositifs qui doivent fonctionner dans une large gamme de température. Par exemple, dans une turbine, il faut tenir compte de la dilatation différentielle entre les ailettes du rotor et les parties fixes (stator) afin d'éviter des contacts potentiellement destructeurs [2].

La dilatation thermique dans les solides

II.4.1.1 Coefficient de dilatation linéaire :

La dilatation linéaire $l - l_0$ d'un matériau entre les températures t_0 et $t_0 + \Delta t$ est proportionnelle à sa longueur initiale l_0 et à l'élévation de température Δt :

$$l - l_0 = \lambda l_0 \Delta t$$

λ : Coefficient de dilatation linéaire on peut également écrire :

$$l = l_0 (1 + \lambda \Delta t)$$

La quantité $1 + \lambda \Delta t$ s'appelle binôme de dilatation linéaire.

- Le tableau correspondant nous montre les coefficients de dilatation de certains corps [8]

Corps	λ (1) $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Corps	λ (1) $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Aluminium	22.38	Laiton (2)	18.5
Cuivre	16.70	Invar (3)	1
Fer	11.70	Verre ordinaire	7
Plomb	27.26	Verre pyrex	3
Tantale	6.46	Quartz	0.55
Tungstène	4.28	Porcelaine	3
Zinc	35.40		

Tableau II .5: Coefficients de dilatation de quelques corps .

- (1) Coefficient de dilatation moyen entre les températures $t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $t = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ [8].
- (2) Laiton : alliage comprenant 65% de cuivre et 35% de zinc [8].
- (3) Invar : acier au nickel contenant 35% de nickel [8].

Remarques :

- Pour les alliages, le coefficient de dilatation linéaire dépend de la composition chimique de celui-ci. En particulier, pour les alliages de fer et de nickel, il varie de façon remarquable. Dans le cas de l'invar (acier au nickel) cette courbe présente un minimum très marqué pour 35.6 % de nickel.

La dilatation thermique dans les solides

Les corps anisotropes n'ayant pas les mêmes propriétés dans toutes les directions, ont également des coefficients de dilatation linéaires variables suivant les directions. Par exemple, le bois : parallèlement aux fibres $\lambda = 3 \text{ à } 6 \cdot 10^{-6}$, tandis que perpendiculairement aux fibres $\lambda = 30 \text{ à } 60 \cdot 10^{-6}$ [8]

II.4.1.2 Dilatation cubique :

Expérience : dilatation d'une sphère

On considère une sphère de cuivre pouvant passer exactement à travers un anneau de cuivre.

- Si on chauffe la sphère, elle ne passe plus à travers l'anneau. Son volume a augmenté. Le volume de la sphère a donc augmenté dans toutes les dimensions.
- Si on chauffe simultanément la sphère et l'anneau, le passage de la sphère s'effectue comme à froid [8]

II.4.1. 3. Relation entre le coefficient de dilatation cubique K et le coefficient de dilatation linéaire λ :

Considérons un parallélépipède de volume $a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$ d'un corps isotrope (le coefficient λ est le même dans toutes les directions).

Élevons la température de ce corps de Δt , la longueur de chaque arête devient respectivement :

$$a_0 \rightarrow a_0 (1 + \lambda \Delta t)$$

$$b_0 \rightarrow b_0 (1 + \lambda \Delta t)$$

$$c_0 \rightarrow c_0 (1 + \lambda \Delta t)$$

Relation entre K et λ

Le volume final vaut donc :

$$V = a_0 b_0 c_0 (1 + \lambda \Delta t)^3$$

$$= V_0 (1 + K \Delta t)$$

Soit :

$$(1 + K\Delta t) = (1 + \lambda\Delta t)^3$$

$$= (1 + 3\lambda\Delta t + 3(\lambda\Delta t)^2 + (\lambda\Delta t)^3)$$

➤ Cas d'une faible variation de température :

Pour une faible variation de la température $\lambda\Delta t \ll 10^{-3}$ et donc en conséquence $(\lambda\Delta t)^2 \ll 10^{-6}$ et $(\lambda\Delta t)^3 \ll 10^{-9}$ et l'on pourra dans ces conditions négliger $(\lambda\Delta t)^2$ et $(\lambda\Delta t)^3$ devant $(\lambda\Delta t)$

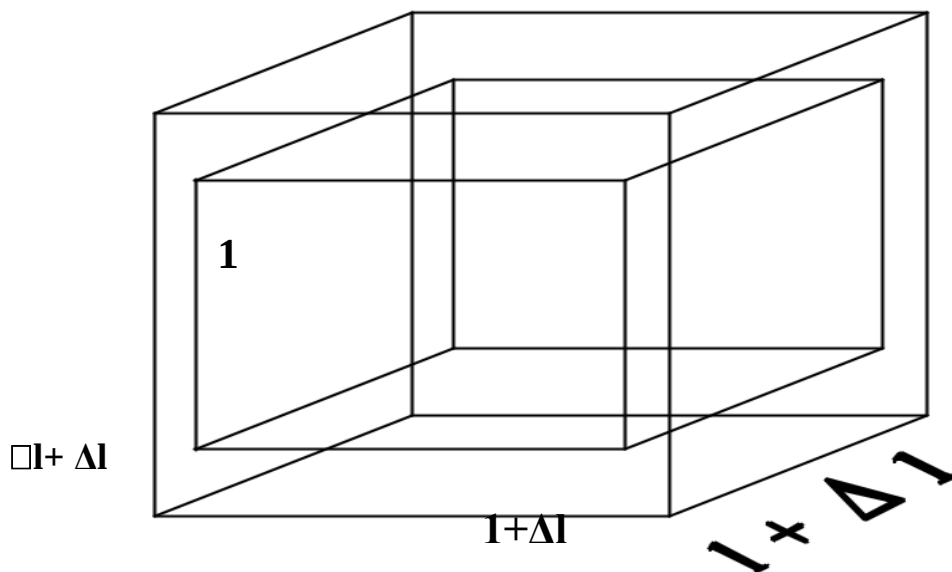
Pour une faible variation de la température on aura donc [8]:

$$K = 3\lambda$$

II.4.2 Dilatation volumique :

Quand on chauffe un objet, toutes ses dimensions augmentent :

La longueur des côtés, l'aire des surfaces ainsi que le volume.



Exemple de dilatation en volume et en surface :

Lorsque la température augmente de ΔT [7] :

- la longueur de chaque côté augmente et devient $l + \Delta l$
- l'aire $A = l^2$ de la face augmente et devient $A + \Delta A = (l + \Delta l)^2$

$$A + \Delta A = l^2 + 2l\Delta l + (\Delta l)^2$$

L'augmentation de la surface :

$$\Delta A = (l + \Delta l)^2 - l^2 = 2l\Delta l + (\Delta l)^2$$

La dilatation thermique dans les solides

Δl est très petit $\Rightarrow$ on néglige $(\Delta l)^2$

$$\Delta A = 2\alpha A \Delta T$$

Les aires augmentent 2 fois plus vite que les longueurs.

➤ La dilatation en volume d'un solide s'appelle dilatation cubique :

L'augmentation de volume $V - V_0$ d'un solide porté de la température t_0 (volume V_0) à la température t (volume V) est proportionnelle au volume initial V_0 et la température t (volume V) est proportionnelle au volume initial V_0 et à l'élévation de température $\Delta t = t - t_0$

$$V = V_0(1 + k\Delta t) = V_0(1 + k(t - t_0)) \quad [7]$$

II.4.3 Variation de la masse volumique

Considérons un corps quelconque :

A t_0 : masse m , volume V_0 , masse volumique ρ_0

A t : masse m , volume V , masse volumique ρ

➤ Seul la masse est invariable avec la température :

$$\text{à } t_0 \quad \rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

$$\text{à } t \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0(1 + k(t - t_0))}$$

Il vient donc :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + k(t - t_0)}$$

II.5. La conduction de la chaleur

Les échanges de chaleur se font toujours des régions à haute température vers les régions à basse température

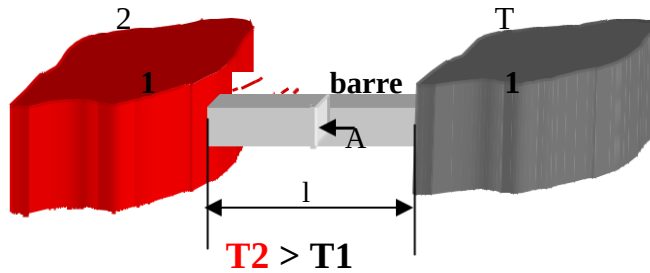


Figure II.11 : Direction de conduction de chaleur.

Deux objets à des températures T_1 et T_2 , reliés l'un à l'autre au moyen d'une barre, verront leur différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$ diminuer progressivement.

L'expérience montre que **la vitesse** à laquelle la chaleur est transportée de l'objet le plus

chaud à l'objet le plus froid est proportionnelle à la section A et à

$$\frac{-T}{l}$$

gradient de température.

Le flux de chaleur :

$$H = \frac{-Q}{-t} = K.A \frac{-T}{l}$$

K une constante appelée conductivité thermique.

Nous supposons K constant dans le domaine de température considéré dans ce cours.

K est en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

La dilatation thermique dans les solides

Exemples de K :

Substance	K : conductivité thermique	Substance	K : conductivité thermique
Argent	420	Eau	0.59
Cuivre	400	Muscle animal, graisse	0.2
Aluminium	240	Bois, Amiante	0.08
Acier	79	Feutre, laine de verre	0.04
Glace	1.7	Air	0.024
Verre , béton	0.8	Duvet	0.019

Tableau II.6 : Constante conductivité thermique.

Les métaux sont d'excellents conducteurs de la chaleur. K des métaux est 10^3 à 10^4 fois supérieure à K des isolants thermiques (ex : amiante, laine de verre). L'air est l'un des meilleurs **isolants**.

On utilise l'air dans plusieurs applications de **l'isolation thermique**.

- **Dans les vêtements chauds :**

Les fibres des matériaux utilisés piègent de l'air qui agit comme isolant.

- **Dans l'isolation des maisons :**

Dans les doubles vitrages, l'air enfermé entre les deux panneaux permet de réduire les pertes de chaleur par conduction.

II.6. La capacité thermique :

Sous l'effet d'un apport de chaleur dH , la température d'une mole de matériau augmente de dT . Pour les solides, on définit le plus souvent ce phénomène à pression constante par une grandeur caractéristique, appelée capacité calorifique ou capacité calorifique C_p

[10] :

$$C_p = \frac{dH}{dT_p}$$

Cette grandeur est nulle à $T = 0$ Kelvin.

A haute température, la loi de Dulong et Petit, provenant de la théorie de l'agitation thermique, montre que tous les solides doivent acquérir une capacité calorifique égale à $C_p = 3R$ par mole (R : constante des gaz parfaits), soit 25 J/mole/K . Mais cette loi est une approximation et la capacité C_p évolue de 0 à $3R$ selon la courbe suivante :

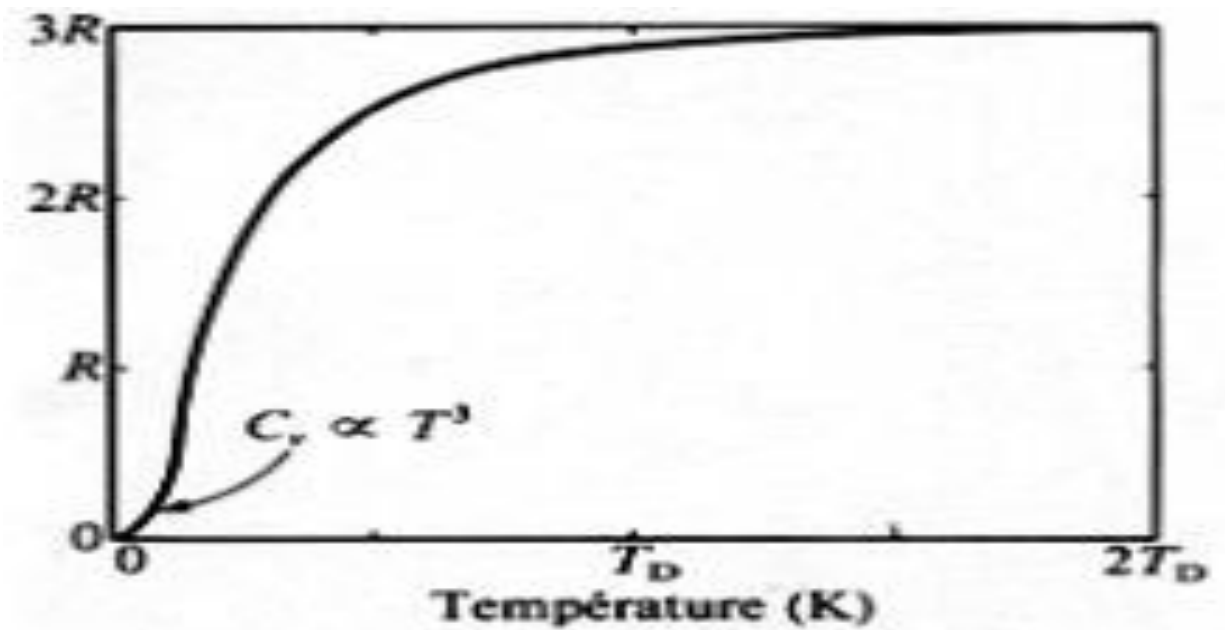


Figure II 12 : La capacité thermique.

On définit également une seconde caractéristique, T_D température de Debye, au-delà de laquelle on admet que l'approximation de Dulong et Petit devient applicable.

La température T_D est d'autant plus élevée que la température de fusion du solide est haute. Ainsi, pour les matériaux réfractaires fondant à très haute température, C_p est inférieure à $3R$. Voici les valeurs de C_p et T_D à 25°C pour quelques éléments [10].

La dilatation thermique dans les solides

Elément	T_D	C_p	Elément	T_D	C_p
Li	400	20.7	Zn	234	25.4
Be	1000	21.8	Ge	360	26.0
B	1250	19.3	Zr	250	28.9
C (diam)	1860	13.3	Mo	380	23.7
Na	150	28	Ag	215	23.8
Mg	318	24.6	Cd	120	25.9
Al	394	24.3	W	310	25.0
Si	625	24.7	Pt	230	25.9
Ti	400	25.1	Au	170	25.2
Cr	460	23.7	Hg	100	27.2
Fe	420	22.2	Pb	88	25.6
Ni	375	25.7	Bi	120	25.5
Cu	315	24.5	Th	100	26.3

Tableau II.7 : Les valeurs de C_p et T_D à 25°C pour quelques éléments.

Attention : de nombreux résultats techniques sont exprimés en J/kg/K.

En effet, il est fréquent d'apprécier le stockage d'énergie pour un volume ou une masse fixés. Les résultats sont alors quelque peu différents...

II.7. La conductibilité thermique :

Il s'agit ici de l'un des trois modes de transmission de la chaleur, le plus important dans les solides : la conduction (les autres sont la convection et le rayonnement).

La perception sensitive de cette propriété peut se faire en touchant à température ambiante un morceau de cuivre puis une pièce de bois. Le premier procure une impression de froid car la très grande conductibilité thermique du cuivre abaisse la température de la peau. Quant au bois, beaucoup plus « isolant », sa température superficielle s'adapte très vite à celle de la peau et l'échange de chaleur se fait à travers un gradient thermique notable.

Les applications de cette propriété sont industriellement très importantes. Elles permettent de définir, par exemple, des matériaux isolants pour réaliser des bâtiments dont les pertes d'énergie sont minimales ou bien encore ceux qui serviront à construire des échangeurs de chaleur efficaces.

Aspects macroscopiques de la conduction thermique.

S'il existe une différence de température aux extrémités d'un conducteur, il s'établit un flux de chaleur Q , analogue à un courant électrique sous l'effet d'une différence de potentiel.

La première loi de Fourier décrit ce phénomène (elle ne s'applique qu'aux matériaux isotropes).

Elle permet de définir K , le coefficient de conductibilité thermique du matériau, qui relie le flux de chaleur Q , en W/m^2 , au gradient de température :

$$Q = -K \frac{dT}{dx}$$

Le coefficient K est exprimé en $W/m.K$.

Cette première loi, dite « en condition stationnaire », est complétée par une seconde pour des conditions dynamiques (où la température varie). Il s'agit d'une équation aux dérivées partielles dont l'interprétation et la mise en œuvre sortent du cadre de cet exposé [10].

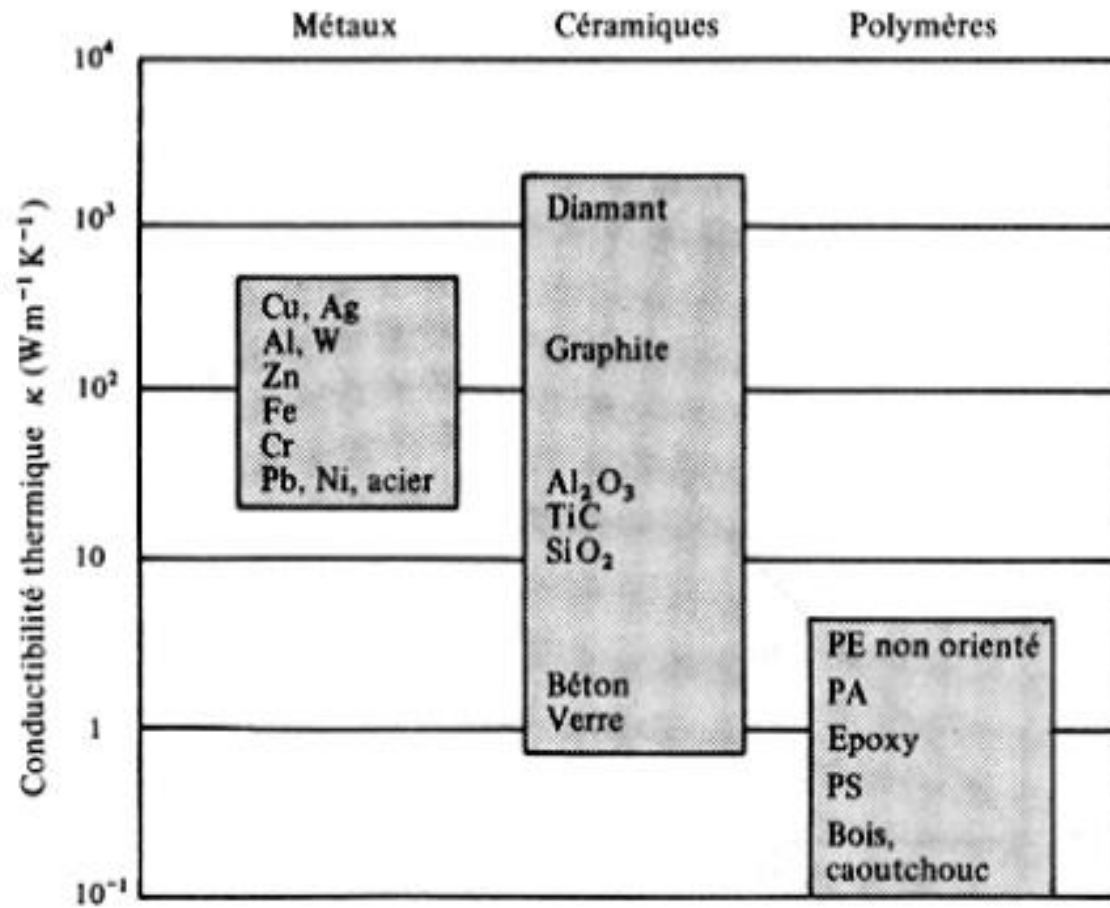


Figure II.13: La conductibilité thermique de quelques matériaux.

On voit ci-dessus comment varie la conductibilité thermique à température ambiante, selon les trois classes de matériaux.

On peut observer de grandes analogies entre la conduction thermique et électrique : la plupart des métaux qui sont de très bons conducteurs électriques sont simultanément d'excellents conducteurs thermiques. Mais il existe quelques belles exceptions. Ainsi, l'isolant électrique idéal qu'est le diamant est meilleur conducteur thermique que l'argent !

Remarquons aussi que K varie seulement sur 4 ordres de grandeur selon les différents matériaux à l'état massif (infiniment moins que dans le cas de la conduction électrique). On gagne trois ordres de grandeur si on introduit les matériaux allégés (fibres, mousse, poudres).

Les mécanismes de la conduction thermique.

La dilatation thermique dans les solides

La chaleur se propage dans un solide par l'agitation thermique qui affecte :

- les électrons libres. On parle alors de conductibilité thermique électronique, caractérisée par un coefficient K_e .
- le réseau cristallin sous l'effet des « phonons » qui sont des ondes de propagation de l'agitation thermique d'un atome à l'autre par l'intermédiaire des liaisons. Il s'agit dans ce cas de la conductibilité thermique de réseau, avec la constante K_r .

Les deux phénomènes s'ajoutent et on peut donc écrire : $K = K_e + K_r$

En général, pour un matériau donné, l'un des deux termes est prépondérant et l'on peut classer les matériaux en conducteurs thermiques « par les électrons », comme c'est le cas des métaux et en conducteurs thermiques « par les liaisons (le réseau) » qui est plutôt le cas des céramiques et des polymères qui possèdent peu ou pas d'électrons libres. Cette conduction peut s'avérer très efficace puisque le carbone graphite est presque aussi bon conducteur thermique que l'aluminium.

Le meilleur cas pour la diffusion rapide de l'agitation thermique (conduction thermique élevée) est celui des matériaux cristallins qui possèdent un ordre parfait à très grande distance.

La conduction thermique sera donc diminuée dans les alliages. Les éléments d'addition, situés de place en place dans les sites du réseau cristallin, se comportent comme des centres de diffusion qui freinent les électrons libres aussi bien que les phonons en introduisant des discontinuités dans l'assemblage atomique.

De même, les matériaux cristallisés à grain très fin sont moins bons conducteurs qu'une version monocristalline.

Enfin, les matériaux amorphes sont de moins bons conducteurs que les matériaux cristallisés car ils ne possèdent pas d'ordre à grande distance.

L'effet de la température sur la conduction thermique.

En partant des basses températures, la conduction thermique de tous les matériaux augmente avec la température du fait de l'augmentation de l'amplitude de l'agitation thermique, aussi bien celle des électrons que celle des atomes du réseau.

Au-delà d'une température critique, la conduction tend ensuite à décroître car le libre parcours moyen des électrons (et des phonons) diminue [10].

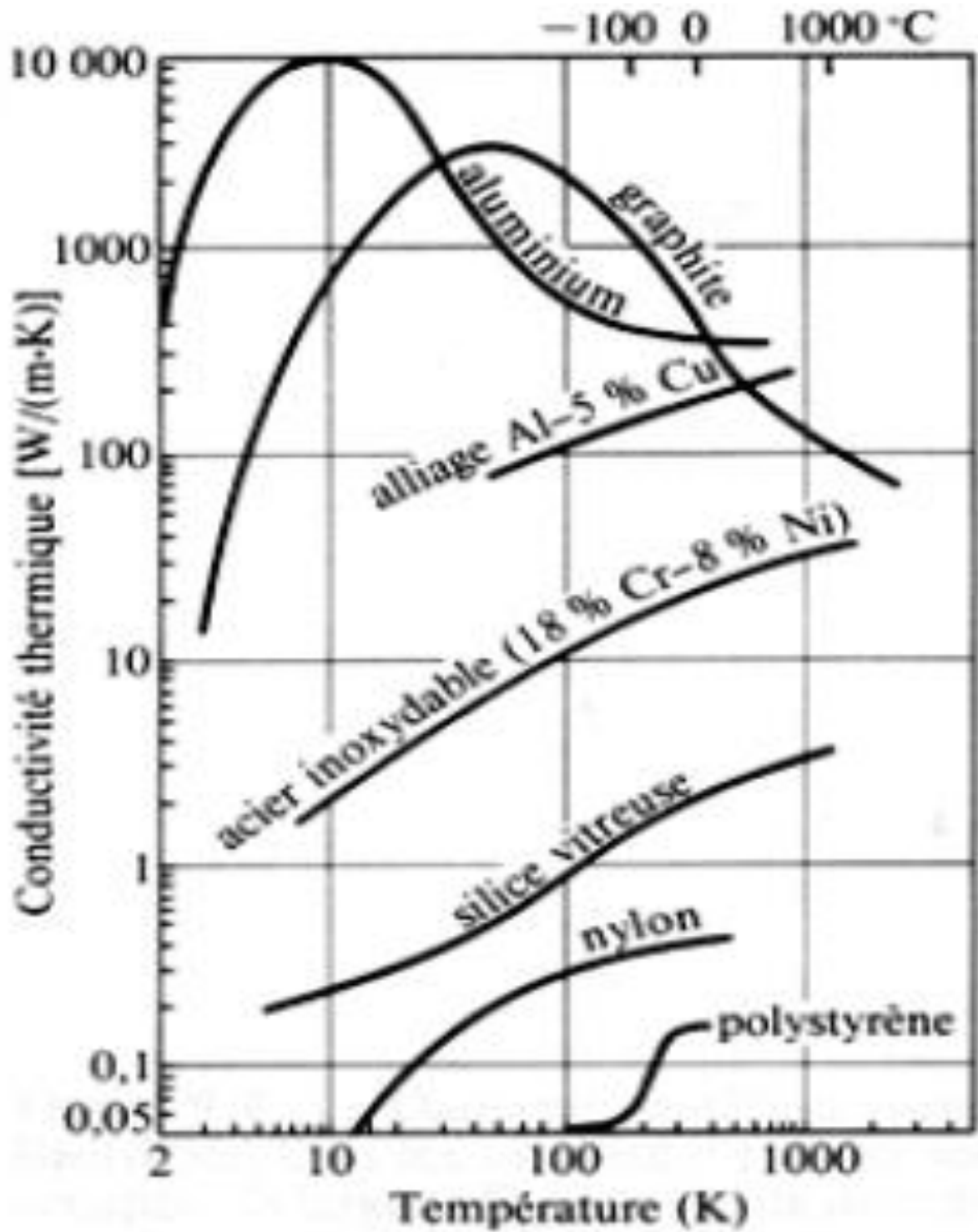


Figure II.14 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la température de quelques types de matériaux.

II.8.1 Comportement général :

Les solides se dilatent au chauffage et se contractent de façon inverse au cours de leur refroidissement. Considérons la dimension l_0 d'un objet à la température t_0 ; augmentons sa température de dT , l_0 s'accroît de dL tel que :

$$dL/L = \alpha dt \quad (\text{II.4})$$

où : α - est le coefficient de dilatation linéaire du matériau à T_0 . Il est normalement positif et s'exprime en K^{-1} . Il dépend faiblement de la température si bien que pour des calculs d'ordre de grandeur, dans un domaine allant de la température ambiante à quelques centaines de degrés, on peut utiliser une valeur constante moyenne. Ainsi de 20 à 400 °C, α de l'alumine passe de $5,4$ à $8,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ puis croît lentement jusqu'à la valeur $11,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ à 1 600 °C [11]. De 20 à 400 °C, celui de l'acier passe de $(11,2 \text{ à } 15,8) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ et reste ensuite pratiquement constant jusqu'au changement de phase à 912 °C (2a, 3).

α est une caractéristique du matériau considéré. À l'intérieur d'une même classe, par exemple les métaux, il varie peu, mais lors du passage à une autre classe, céramiques ou polymères, sa valeur change de plusieurs ordres de grandeur.

D'une façon générale α varie en sens inverse de la température absolue de fusion T_F (en K) :

$$\alpha = \gamma_G / 100 T_F \quad (\text{II.5})$$

Où : γ_G - est la constante de Grüneisen qui varie entre 0,4 et 4 mais elle est souvent comprise entre (II.4) et (II.5) pour la plupart des solides.

La physique du solide fournit une autre relation :

$$\alpha = \gamma_G \rho c / 3 E \quad (\text{II.6})$$

Où :

ρ - est la masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$) ;

C - est la chaleur massique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) ;

E - le module d'Young (Pa).

Le produit $\rho \cdot c = c_v$ est la chaleur massique par unité de volume ; elle varie peu

Pour l'ensemble des solides dont la variation est en sens inverse de α et E .

Sur la carte de la **Figure II.15** sont portés les couples (E, α) des solides à la température ambiante. Pour des raisons de lisibilité, les points ne sont pas représentés, mais seulement leurs enveloppes sont de deux types :

La dilatation thermique dans les solides

- des bulles en trait fin qui contiennent les points d'une catégorie. Ainsi la bulle « Al » est l'enveloppe schématisée des points représentatifs de l'aluminium et de ses alliages usuels ;
- des bulles en trait gras qui sont les enveloppes des classes de matériaux, par exemple les polymères techniques [11].

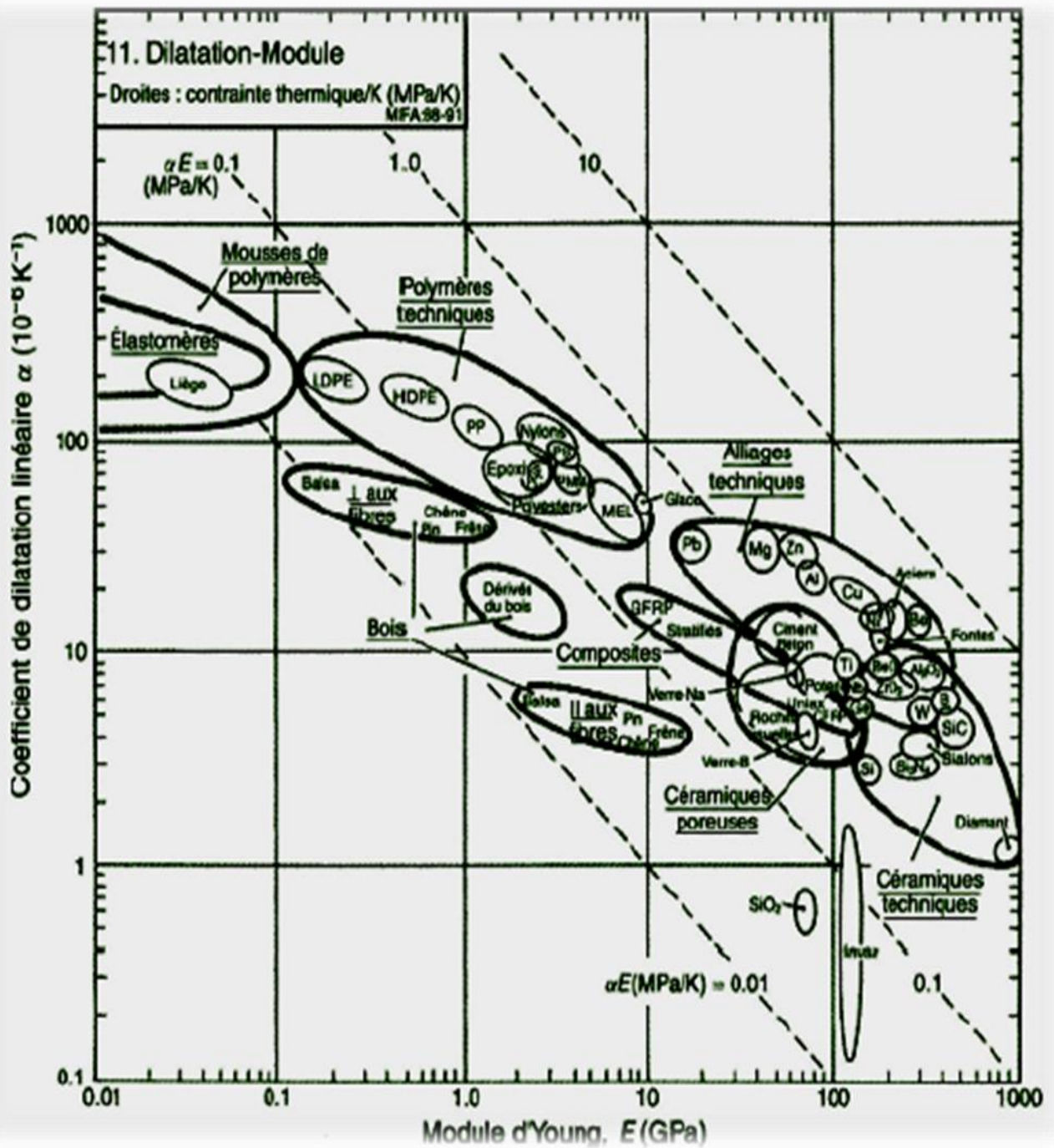


Figure II.15 : Coefficient de dilatation linéaire-Module d'Young pour les solides à la température ambiante. E est exprimé en GPa (10^9 Pa).

La dilatation thermique dans les solides

Les échelles sont logarithmiques. Les droites en pointillé pour lesquelles le produit $\alpha \cdot E$ est constant seront discutées à la partie 2.

En accord avec (II.6) , les corps les plus rigides (fort E) tels que les céramiques sont ceux qui se dilatent le moins. À l'opposé, les plus flexibles (faible E), les élastomères ont le plus fort α . On observe que la silice vitreuse ou amorphe se dilate anormalement peu, de même que les Invars dont le cas sera discuté ultérieurement.

La dilatation thermique est un phénomène peu visible directement (par exemple entre un hiver à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un été à $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la tour Eiffel ne s'allonge que de 17 cm). En revanche, si l'on empêche cette expansion, il en résulte des contraintes mécaniques importantes pouvant conduire à la ruine du matériau ; ce point sera développé dans la deuxième partie [11].

II.8.2. Comportements particuliers :

Nous ne nous intéresserons qu'aux températures supérieures à l'ambiante. Considérons trois cas typiques : les cristaux, les matériaux présentant un changement de phases et les Invars.

II.9. Contraintes thermiques :

Pour évaluer au mieux les effets mécaniques créés ou subis par les matériaux, on utilise la notion de contrainte qui est la force par unité de surface, elle est homogène à une pression. On l'exprime généralement en MPa (10^6 Pa) pour des raisons de commodité [11].

Intéressons-nous aux contraintes générées dans une tige cylindrique de longueur L_0 et de section S_0 (**Figure II .16**) en butée à ses deux extrémités. Appliquons le principe de superposition : supposons d'abord que l'on augmente sa température d'un degré et qu'elle s'allonge librement

:

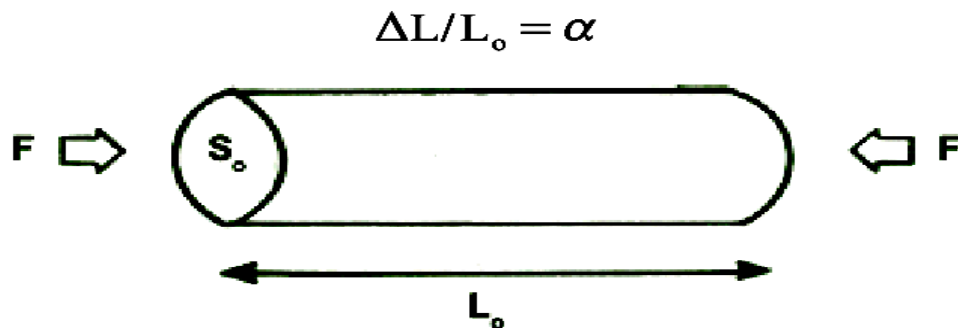


Figure II .16 : Contraintes thermiques longitudinales dans une tige.

La dilatation thermique dans les solides

La tige s'allonge d'abord librement sous l'effet d'une augmentation de température d'un degré puis on applique une force de compression F pour la ramener à sa longueur initiale L_0 [11].

Appliquons maintenant une force de compression axiale pour ramener la longueur à L_0 .

D'après la loi de Hooke de l'élasticité on a:

$$\sigma = F/S_0$$

(on néglige la variation de la section) :

$$\sigma = E \Delta L/L_0$$

$$\sigma = \alpha E$$

La contrainte créée par degré d'élévation de température est ainsi proportionnelle au produit du coefficient de dilatation par le module de Young. On a pu remarquer sur la **Figure II .15** les lignes-guides en pointillés qui sont des droites d'égale contrainte $\alpha \cdot E$.

donc , d'égale sensibilité aux contraintes thermiques.

Dans le cas d'un acier ordinaire ($\alpha \cdot E = 2 \text{ MPa K}^{-1}$) .

Sachant que sa limite d'élasticité σ_e est de l'ordre de 200 MPa, il faudrait une variation de 100 °C pour atteindre la plasticité et déformer la tige de façon irréversible

Remarques :

- De 20 à 100 °C, α augmente un peu et E diminue de 210 à 200 GPa [2b] ; l'élévation de température calculée garde donc son ordre de grandeur.

- Dès l'apparition de la plasticité, la loi de Hooke ne s'applique plus.

Pour un objet élancé, tel qu'une tige, en compression, la plasticité n'est pas la première cause de ruine. C'est le flambage qui n'existe que pour ce type de sollicitation et, en particulier, jamais en traction. D'après la théorie d'Euler [12], la contrainte de ruine est :

$$\sigma_f = \pi^2 E S_0 / (L_0)^2$$

$$= \pi^2 E / \lambda^2$$



Figure II.17: Exemple de flambage d'une tige élancée soumise à une force de compression :

- a) la force F est faible, on a juste une compression élastique invisible ;
- b) la force atteint la valeur critique $F_f = S_0 \sigma_f$, la ruine de la tige par flambage se produit. il n'est plus seulement fonction du matériau, mais aussi de sa forme, par son élancement

$$\lambda = L_0 / R_0$$

$$\lambda = L_0 / R_0$$

où :

R_0 est son rayon ($\pi = 3,14$).

Ainsi une tige d'acier de $R_0 = 1\text{m}$ et $R_0 = 3\text{mm}$ est détruite par flambage pour un Δt de 34°C .

Pendant la canicule d'août 2003, dans les Vosges en France , des rails du TERRE se sont tordus par flambage sur une centaine de mètres sous une exposition en plein soleil.

D'après le cahier des charges, ce type de matériel devait supporter une

Δt de 60°C . Il est donc nécessaire de prévoir des joints de dilatation suffisants pour les ouvrages d'art (**cf. Figure II.18, page ci-contre**), ou, si possible, diminuer L_0 .

Considérons maintenant une plaque rectangulaire dont on augmente la température de un degré en bloquant ses quatre faces latérales. La loi de Hooke appliquée suivant les trois directions de l'espace donne une contrainte suivant les deux directions bridées:

$$\sigma = \alpha E / (1 - \nu) \quad (\text{II.7})$$

où est le coefficient de Poisson qui vaut 0,3 pour la plupart des matériaux (suivant les deux surfaces libres, la contrainte est, bien sûr, nulle).

- De la même façon, pour un parallélépipède bloqué suivant ses six faces :

$$\sigma = \alpha E / (1 - 2 \nu) \quad [11].$$

On vérifie sur les trois cas ci-dessus que moins le matériau a de degrés de liberté

pour son expansion, plus les contraintes thermiques pour la même élévation de température sont élevées.

Pour les matériaux fragiles (céramiques, verres, aciers durs), les contraintes thermiques peuvent conduire à de la fissuration ou directement



Figure II.18: Partie d'un joint de dilatation entre deux portions d'une route (sa longueur totale qui est la largeur de la route est 10,5 m) [11].

La partie gauche est l'extrémité d'un pont en béton et celle de droite correspond à la terre ferme. Il y a un joint identique à l'autre bout du pont de longueur 621 m. Ce pont traverse la vallée de la Moselle à Fontenoy-sur-Moselle (Meurthe-et-Moselle). Comme le tablier est situé dans l'air il subit des variations de température plus importantes que la route située sur le sol d'où la nécessité des joints. *Photographie des auteurs.*

à la rupture. C'est ce qui se produit particulièrement pour les matériaux isolants thermiques.

Ainsi un verre de qualité ordinaire à 0 °C dans lequel on verse de l'eau à 100 °C voit sa couche interne atteindre rapidement une température élevée alors que la couche externe reste à sa température initiale. Schématisons le verre par deux couches :

- la couche interne qui tend à se dilater, mais qui, contrariée par la couche externe, est dans un état de compression biaxiale du type de celui décrit par la relation (II.7) ;
- la couche externe qui est dans un état de traction biaxiale.

Les verres, comme toutes les céramiques sont beaucoup plus résistants en compression qu'en traction, c'est donc dans la partie extérieure du verre que se développeront les fissures conduisant à la rupture. La même expérience réalisée avec un verre pyrex est sans conséquence. La résistance à la propagation des fissures (ou ténacité) et le module

d'Young sont les mêmes (respectivement 0,75 MPa $\sqrt{m}$ [13] et 70 GPa [14]) pour ces deux qualités de verre). Seul le coefficient de dilatation diffère : 9 à $9,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ pour le verre et 3,3 à $4,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ pour le pyrex. C'est donc lui le responsable de la différence de résistance aux chocs thermiques.

II.9.1. Bilames thermostatiques

Un bilame est constitué de deux bandes de métaux différents, liées sur toute leur surface par calaminage (zincage) à la température ambiante ou à chaud (**Figure 19**).

Les coefficients de dilatation sont différents. Sous l'effet d'une variation de température, la différence des allongements entre les deux faces induit une courbure du bilame.



Figure II. 19: Rouleaux de bilames après laminage [11].

Les largeurs sont variables entre 5 et 50 mm, l'épaisseur entre 0,1 et 1 mm ; les longueurs varient selon les équipements industriels de déroulement des bobines (diamètre extérieur standard : entre 500 et 700 mm).

Les changements de température sont soit extérieurs : ambiance environnante ou effet Joule d'un fil enroulé autour de lui, soit internes, le bilame étant en série dans un circuit électrique, et c'est l'effet Joule du bilame, lui-même conducteur électrique, qui produit l'échauffement. On se limite aux métaux comme matériaux des bilames à cause de leur facilité d'assemblage, de leurs bonnes conductivités électrique et thermique permettant le passage du courant et une rapide homogénéisation thermique. Les alliages les moins dilatables ou constituants passifs sont les Invars et les plus dilatables, constituants actifs, des alliages

Fe-Ni-Mn et Fe-Ni-Cr ($\alpha=20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) suivant leur mode de fonctionnement, on distingue les bilames à déflexion lente et les bilames à retournement brusque.

II.9.2 Bilames à déflexion lente

Leur élévation de température produit une déformation lente et monotone. Ils sont très souvent rectangulaires, lorsqu'ils sont utilisés dans les thermostats de régulation ou dans les micro-disjoncteurs tels que ceux du tableau électrique de notre habitation (**Figure20**).

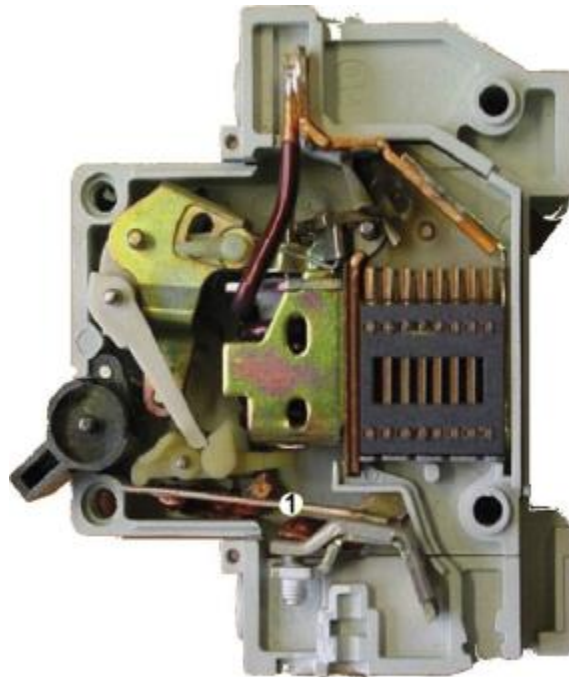


Figure II .20: Coupe d'un micro-disjoncteur de tableau électrique domestique.

Le bilame est repéré par 1(le schéma de principe et la description du fonctionnement sont décrits à la référence [15]).

Dans ce cas, une extrémité est fixe, et c'est l'autre extrémité, mobile, qui est actionneur d'un contact électrique ou interrupteur elle-même. Ils sont également enroulés en spirale, lorsqu'ils sont utilisés en thermomètres à aiguille. Ils peuvent être en forme de disque et utilisés comme actionneurs de coulisseau dans un tube de régulation de débit de fluide (*cf. Figure 21, page ci-après*).

Leurs formes et leur comportement simples permettent le calcul de leur déflexion et de la force qu'ils peuvent exercer en fonction de l'écart de température.

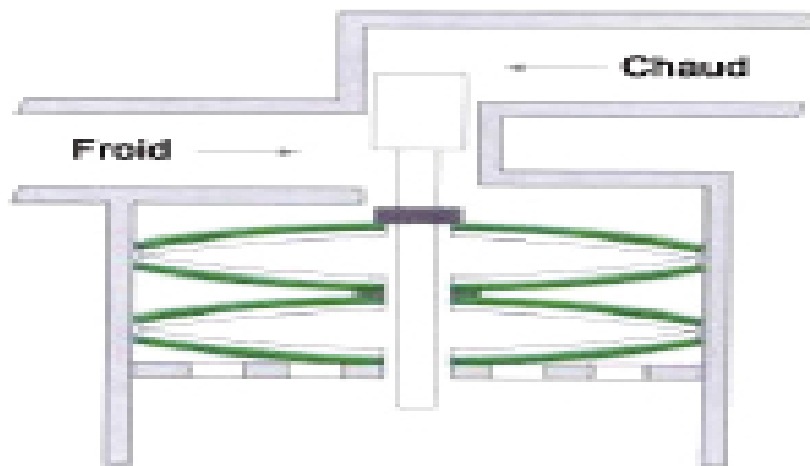


Figure II .21: Ensemble de bilames à déflexion lente.

(le métal le plus dilatable est représenté en vert) actionnant. un coulisseau régulant le débit de fluides froid et chaud. Dans ce cas, c'est le centre des disques qui est actionneur ; dans d'autres cas, ça peut être la périphérie. Pour cette application, quatre disques sont empilés tête-bêche afin d'augmenter la course de déplacement linéaire.

II.9.3. Bilames à retournement brusque

(Également appelés « bilames cloquants »)

À un moment de leur changement de température, ils ont un comportement brusque semblable à une catastrophe au sens mathématique. Ils sont souvent circulaires et emboutis en forme de calotte sphérique ou d'assiette à fond plat et utilisés dans les thermostats de sécurité thermique, comme actionneurs d'interrupteurs électriques. Ils peuvent aussi être rectangulaires ou de forme quelconque (*cf.* **Figure 22**).



Figure II .22 : Exemples de bilames à déflexion brusque ou cloquant.

Un emboutissage par poinçon sphérique ou plat, judicieusement dimensionné et positionné sur le bilame, permet de lui donner sa forme et de le rendre « cloquant », avec une hystérésis définie. Le comportement d'un bilame cloquant au cours d'un cycle thermique est décrit à la (Figure II. 23).

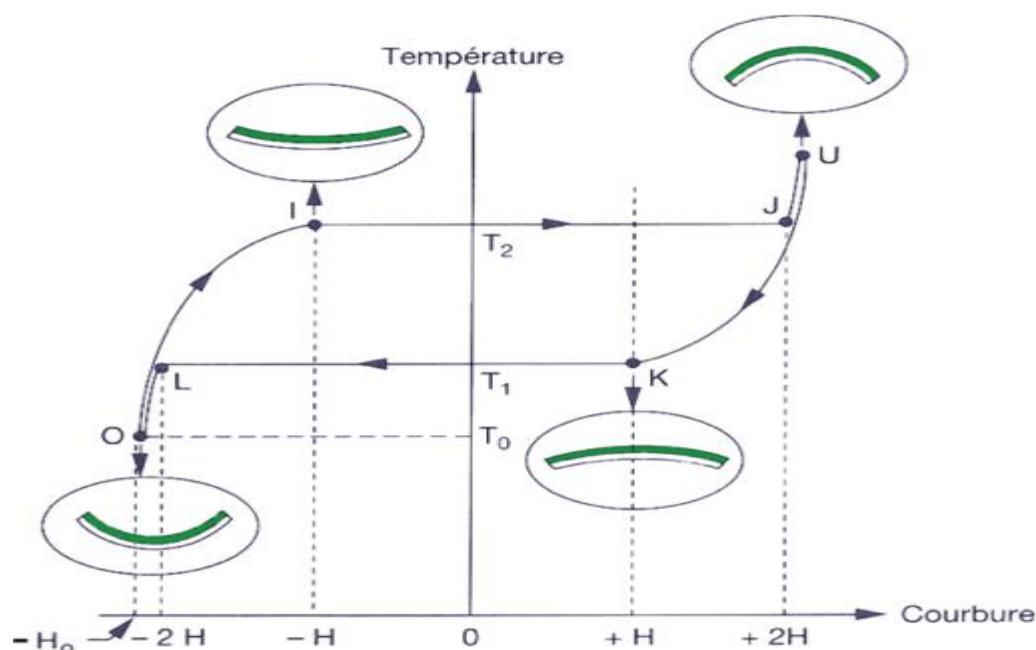


Figure II .23 : Cycle de fonctionnement d'un disque à retournement brusque [16].

Les parties active et passive du bilame sont représentées respectivement en vert et blanc. À la température ambiante T_0 , la courbure est vers le haut, notée négativement $-H_0$. Le constituant actif constitue la couche supérieure. Au chauffage, le rayon de courbure augmente (de O à I) et à la température T_2 on observe un retournement brusque (de I à J), la courbure devenant positive. Ensuite, le comportement est normal jusqu'à U. Au refroidissement, le phénomène inverse se produit avec une hystérésis et un retournement brusque entre K et L, à la température T_1 .

Ces disques se prêtent mal aux calculs. Dans la pratique, le rapport du diamètre D sur l'épaisseur s varie entre 60 et 150 et H_0/s de 1,4 à 4.

Les caractéristiques techniques générales de ces bilames cloquant sont les suivantes (Données fournies par Delta Concept) :

- Toutes formes géométriques de 5 à 50 mm de largeur ou de diamètre.
- Températures de fonctionnement de 0 à 200 °C, tolérance ± 5 °C.
- Hystérésis de largeur 15 à 20 °C (ce qui constitue l'écart entre le déclenchement et le réarmement automatique).

Durée de vie : plusieurs centaines de milliers de cycles Pour satisfaire des exigences plus spécialisées, l'industrie sait fabriquer des bilames

aux caractéristiques suivantes:

- Températures de fonctionnement de -45 °C à 450 °C (voire 700 °C avec des alliages très spéciaux).
- Hystérésis étroite (5 à 6 °C) (réarmement automatique) ou très large : température de déclenchement positive, et température de retour de l'ordre de -40 °C , ce qui oblige à réarmer manuellement (dans la mesure où la température ambiante est toujours supérieure à -40 °C).

II.9.4 Exemples d'applications :

On retrouve des boîtiers contenant un bilame cloquant, entre autres, sous le capot des voitures et dans les appareils électroménagers (**cf. figure 24**).

Ils sont commercialisés sous le nom d'interrupteurs thermiques ou de commutateurs thermostatiques (quatre euros environ). On peut aussi facilement en récupérer un dans une cafetière électrique usagée dont on extrait le bilame en forme de calotte sphérique sans trou. Il permet de réaliser une expérience amusante (**cf. figure 23, page ci-contre**).

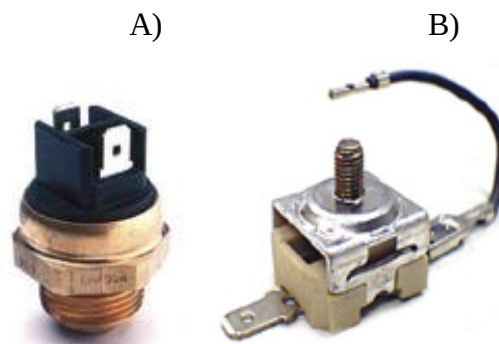


Figure II. 24 : Deux exemples d'application des bilames à retournement brusque (*Documents internet*)[11] :

- a) Thermo contact de ventilateur de moteur automobile
- b) Thermostat de cafetière électrique.

II.10 Avantage et inconvénients de la dilatation

II.10.1 Avantage du phénomène de dilatation

La dilatation possède plusieurs avantages parmi eux : elle se réalise par l'utilisation .

Des métaux de construction comme la fonte et l'acier, puisqu'ils présentent les avantages suivants : haute résistance, plasticité, conductibilité thermique élevée, assemblage par soudage et le coefficient thermique de dilatation. En revanche, ces matériaux présentent aussi des inconvénients à savoir : corrosion en présence d'eau et déformation sensible avec l'augmentation de la température. Propriétés des métaux : la densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m^3 , celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m^3 .

II.10.2 Inconvénients de la dilatation

L'inconvénient est que, si la dilatation à une petite amplitude (un barre de fer de 1 m de longueur se dilate de 1,2 mm si on la chauffe de 0°C à 100°C), elle a une très grande force (pour obtenir le même allongement de la barre, il faudrait exercer une traction de $25\,000 \text{ N.cm}^{-2}$). il faudra donc lutter souvent contre la dilatation :

- les rails ne sont pas soudés les uns contre les autres ou alors ils sont taillés à leurs extrémités en biais.
- les deux extrémités d'un pont ne sont pas scellées dans la maçonnerie mais reposent sur des galets de roulement.
- entre les bâtiments existent des joints de dilatation.- lorsque des conduites sont soumises à des échauffements importants, il faut prévoir des raccords souples en forme de U (col de cygne).
- dans une installation de chauffage central ou dans le circuit de refroidissement du moteur d'une voiture, il faut prévoir un vase d'expansion.

On peut aussi mettre à profit cette dilatation, le meilleur exemple étant le thermomètre.

- On rivette deux plaques à chaud, on cercle ou on met en place l'axe des roues à chaud.

La dilatation thermique dans les solides

- les thermostats, les vannes ou robinets thermostatiques.
- Dans les thermostats d'ambiance, de fer à repasser, dans des disjoncteurs électriques, on utilise ce qu'on appelle un bilame : ce sont deux lames métalliques de natures différentes soudées l'une à l'autre. Quand il est froid, elles sont rectilignes mais quand on le chauffe, une lame se dilate plus que l'autre et le bilame se courbe entraînant, en général, un contact électrique ce qui interrompt le passage du courant dans le radiateur, le fer, le circuit

Chapitre III

Partie A

PARTIE EXPERIMENTALE

Partie A

**« Description et
fonctionnement de
l'appareil
Dilatomètre L75 »**

III .A.1 : Description

- ✓ **Fonctionnement de la Mesure absolue**
- ✓ **Applications de la mesure différentielle**

III .A.1.1 Fonctionnement de Mesure absolue

Le dilatomètre LINSEIS est utilisé pour mesurer et réguler le changement de la longueur des solides. La longueur change non seulement si la température change, elle change également à température constante par transition de cristaux, rétrécissement de matériau fritté et de matériau synthétique (polymères).

Le principe de construction est d'éviter le déplacement d'éléments qui ne sont pas autorisés à avoir des tolérances axiales. Ils ont une plaine de référence commune. Le porte-échantillon est fixé sur la bride de montage au même niveau que le capteur de déplacement inductif est fixé. La tête de mesure inductive est fixée avec ses tiges au même niveau que les porte-verres en quartz du transformateur différentiel sont fixes.

Pour atteindre une grande précision, un thermostat peut être monté sur les tubes de la bride de montage. Une grande précision est atteinte, car le porte-échantillon, le piston et les supports de la tête de mesure sont tous fabriqués dans la même série. Ainsi, l'expansion du piston est compensée par l'expansion du porte-échantillon.

Moyens de mesure absolus, l'expansion est mesurée en relation directe de la température. La mesure absolue n'est possible que si les conditions énumérées sont remplies: l'échantillon est inséré dans le tube qui est fermé à une extrémité et maintenu par un piston.

En bon état, le tube et le piston se dilatent également car ils sont faits du même matériau et aucune erreur de mesure ne se produit. L'expansion du tube dans la zone chaude influence toujours la mesure.

Normalement, jusqu'à 1000 ° C de tube et de pistons en verre de quartz sont utilisés car le verre de quartz a un coefficient de dilatation relativement faible d'env. $0,5-0,6 \times 10^{-6} \text{ } 1 / \text{K}$, donc l'erreur de mesure peut être ignorée s'il s'agit d'une mesure de levé approximative.

Pour des températures supérieures à 1100 ° C, d'autres tubes et pistons sont utilisés. Pour des températures allant jusqu'à 1550 ° C, de l'alumine frittée est utilisée. L'alumine frittée a un max. coefficient de dilatation de $9 \times 10^{-6} \text{ } 1 / \text{K}$. Ainsi, une erreur de mesure se produit allant

de la taille de la valeur mesurée. Le coefficient d'expansion d'un tel système de mesure doit être pris en compte pour calculer le résultat [17].

III .A.1.2 Fonctionnement de la mesure différentielle

Le dilatomètre LINSEIS est utilisé pour mesurer et enregistrer le changement de la longueur du solide. Les facteurs déterminants sont la température et le trésor mécanique. Le dilatomètre différentiel compare les valeurs d'un échantillon avec les données d'un matériau bien connu. Il est nécessaire d'avoir des conditions physiques égales aux deux échantillons et aux systèmes de mesure totalement identiques.

Le système de mesure est un tube commun ou deux tubes parallèles ayant exactement le même coefficient de dilatation. À une extrémité, les échantillons sont basés sur le tube, à l'autre extrémité les pistons sont pressés par un ressort à force réglable. Surtout pour mesurer des matériaux sensibles, cette force est un paramètre essentiel. Les pistons doivent être manipulés mécaniquement avec une force de ressort moins élevée que le frottement. Dans les guides de piston se trouvent des capteurs de déplacement inductifs, qui envoient des signaux à un amplificateur de mesure pour évaluation. Un enregistreur connecté enregistre la température et l'expansion.

Le dilatomètre différentiel permet de mesurer en continu la variation relative de la longueur de l'échantillon par rapport à la référence sur toute la plage de température.

Pour obtenir l'expansion réelle de l'échantillon, ajoutez le résultat mesuré et l'expansion de la référence, ainsi le coefficient d'expansion absolu de l'échantillon est calculé.

Le dilatomètre différentiel peut être utilisé comme un double dilatomètre qui permet de mesurer deux échantillons dans des conditions identiques absolues. L'amplificateur de dilatomètre est équipé d'une sortie différentielle et de deux autres sorties pour les deux micros inductifs à déplacement [17].

III .A.2 : Domaine d'application

Avec ce dilatomètre, il est non seulement possible de mesurer des dilatations linéaires simples comme l'or ou le platine, il est également possible de mesurer l'expansion de matériaux qui changent leur structure. Le point de cristallisation, la vaporisation partielle et la transition de phase ont une influence sur le coefficient de dilatation. Généralement, tous les processus à l'intérieur d'un cristal agissent sur l'expansion du matériau. Si un matériau rétrécit

ou se dilate, des changements à l'intérieur du cristal sont supposés. D'autres applications analysent le matériau liant et la laque.

Certains échantillons de poly cristaux se dilatent s'ils sont testés à température constante, causée par la croissance des grains ou le frittage. Les échantillons synthétiques prélevés sur différents moulages sont directement comparés.

A température constante, la pression des pistons est variée et mesurée pour vérifier la stabilité des matériaux. La mesure avec des dilatomètres favorise souvent le gaz ou le vide au niveau de l'échantillon ou pour mesurer le gaz quittant l'échantillon.

Les dilatomètres LINSEIS sont généralement équipés pour fonctionner avec un vide de 10^{-3} à 10^{-5} selon la plage de température ou pour travailler avec un gaz protecteur. Le dilatomètre haute température ne fonctionne que sous gaz protecteur ou sous vide.

Les pièces de serrage du dilatomètre sont livrées avec chacune [17].

III .A.3 : Configuration et mise en service

Assurez-vous que le dilatomètre est réglé pour fonctionner sur la tension disponible dans votre laboratoire. Si aucune instruction spéciale n'est donnée, l'enregistreur a été réglé pour fonctionner

220 V 50/60 cycles

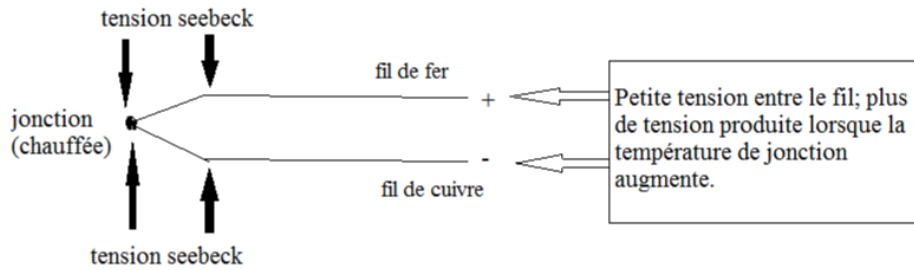
240 V 50/60 cycles (UK)

110 V 50/60 cycles (USA) [17]

III .A.4 : Effet Seebeck

Un phénomène intéressant appliqué dans le domaine de l'instrumentation est l'effet Seebeck, qui est la production d'une petite tension sur la longueur d'un fil en raison d'une différence de température le long de ce fil.

Cet effet est le plus facile à utiliser et appliqué avec une jonction de deux métaux différents en contact, chaque métal produisant une tension Seeb différent sur sa longueur, ce qui se traduit par une tension entre les deux extrémités de fil (non jointes). La plupart des paires de métaux différents produiront une tension mesurable lorsque leur jonction est chauffée, certaines combinaisons de métaux produisant plus de tension par degré de température que d'autres:

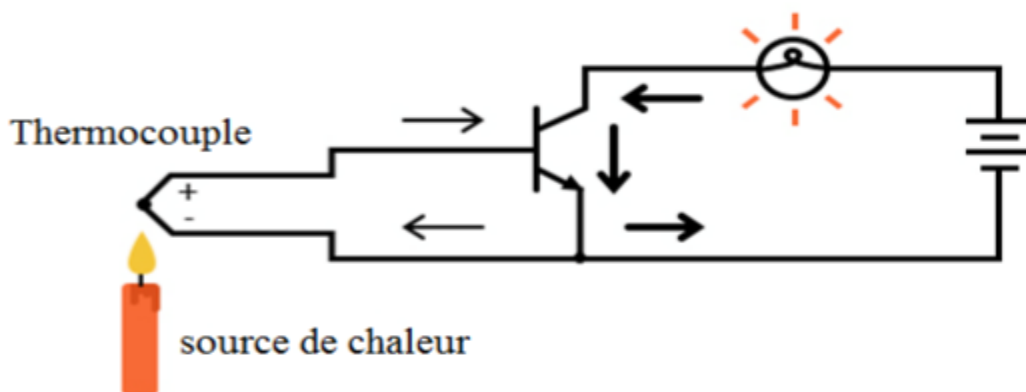


L'effet Seebeck est assez linéaire; c'est-à-dire que la tension produite par une jonction chauffée de deux fils est directement proportionnelle à la température. Cela signifie que la température de la jonction du fil métallique peut être déterminée en mesurant la tension produite. Ainsi, l'effet Seebeck nous fournit une méthode électrique de mesure de température [19].

III .A.5 : Thermocouples

Lorsqu'une paire de métaux différents sont réunis dans le but de mesurer la température, le dispositif formé est appelé un thermocouple. Les thermocouples conçus pour l'instrumentation utilisent des métaux de haute pureté pour une relation température / tension précise (aussi linéaire et prévisible que possible) [19].

Les tensions Seebeck sont assez faibles, de l'ordre de dizaines de millivolts pour la plupart des plages de température. Cela les rend quelque peu difficiles à mesurer avec précision. De plus, le fait que toute jonction entre des métaux différents produise une tension dépendante de la température crée un problème lorsque nous essayons de connecter le thermocouple à un voltmètre, complétant un circuit:



III .A.6 : Vérifiez les connexions des thermocouples

- thermocouple simple:

le stylo enregistreur du canal concerné devrait bouger si le TC est chauffé [17].

-polarité du thermocouple du four:

Allumez le contrôleur. Après un court instant, la température réelle devrait augmenter; pour le temps de séjour, il doit rester constant [17].

III .A.7: La préparation des échantillons

Le dilatomètre convient aux échantillons solides. L'échantillon peut avoir n'importe quelle forme. L'échantillon doit s'insérer dans le porte-échantillon. Pour obtenir les meilleurs résultats, les extrémités de l'échantillon doivent être aussi égales et parallèles que possible.

La longueur de l'échantillon doit être limitée à 20 mm. La température de l'échantillon est difficile à maintenir constante et homogène si l'échantillon est plus long.

Si l'échantillon est plus court, l'expansion absolue est plus faible et le résultat est, en particulier la mesure de matériau à faible coefficient d'expansion, pas 100% précis.

Définissez le diamètre de l'échantillon à insérer dans le système de mesure sans coincement ni battement.

Ensemble, la capacité thermique, la conductivité thermique, le diamètre et la longueur influencent la meilleure vitesse de chauffage.

La forme d'échantillon optimale est un bâton rond.

Si le matériau le permet, le bâtonnet doit être creusé pour obtenir une meilleure compensation thermique dans l'échantillon.

Si le matériau le permet, le bâton doit être percé radialement (1,8 mm de diamètre) au milieu pour insérer le thermocouple.

Lors de la mesure sous écoulement de gaz, il est recommandé de forer l'échantillon une fois axialement et plusieurs fois radialement.

Le gaz s'écoule ensuite dans une direction axiale à travers l'échantillon et s'échappe par les trous radiaux.

On obtient ainsi une atmosphère homogène autour de l'échantillon [17].

III .A.8: instruction de travail pour la mesure absolue

Mettre l'eau de refroidissement en marche (pas pour L76 / 10)

1- avec la vis de réglage {14} le piston peut être déplacé de + -15mm.

2- Insérez l'échantillon

Pour insérer l'échantillon, ramenez le piston avec la vis de réglage {14} pour pouvoir insérer l'échantillon.

3- Le réglage du point zéro du système de mesure avec la vis de réglage {14} amène le piston vers l'échantillon afin que le stylo enregistreur concerné se déplace à l'intérieur de la zone de dessin. Déplacez délicatement la vis de réglage pour amener le stylo en position zéro de l'enregistreur. puis verrouillez la vis de réglage avec la vis de sécurité {16}.

Utilisez le potentiomètre du point zéro sur l'amplificateur pour régler finement le point zéro.

4- Réglage de la force

Pour ajuster la force sur l'échantillon, utilisez la vis {13}. Utilisez une balance à ressort pour mesurer la force exercée sur l'échantillon.

5- Réglez le thermocouple au centre de l'échantillon.

6- Montez le tube de protection sous vide.

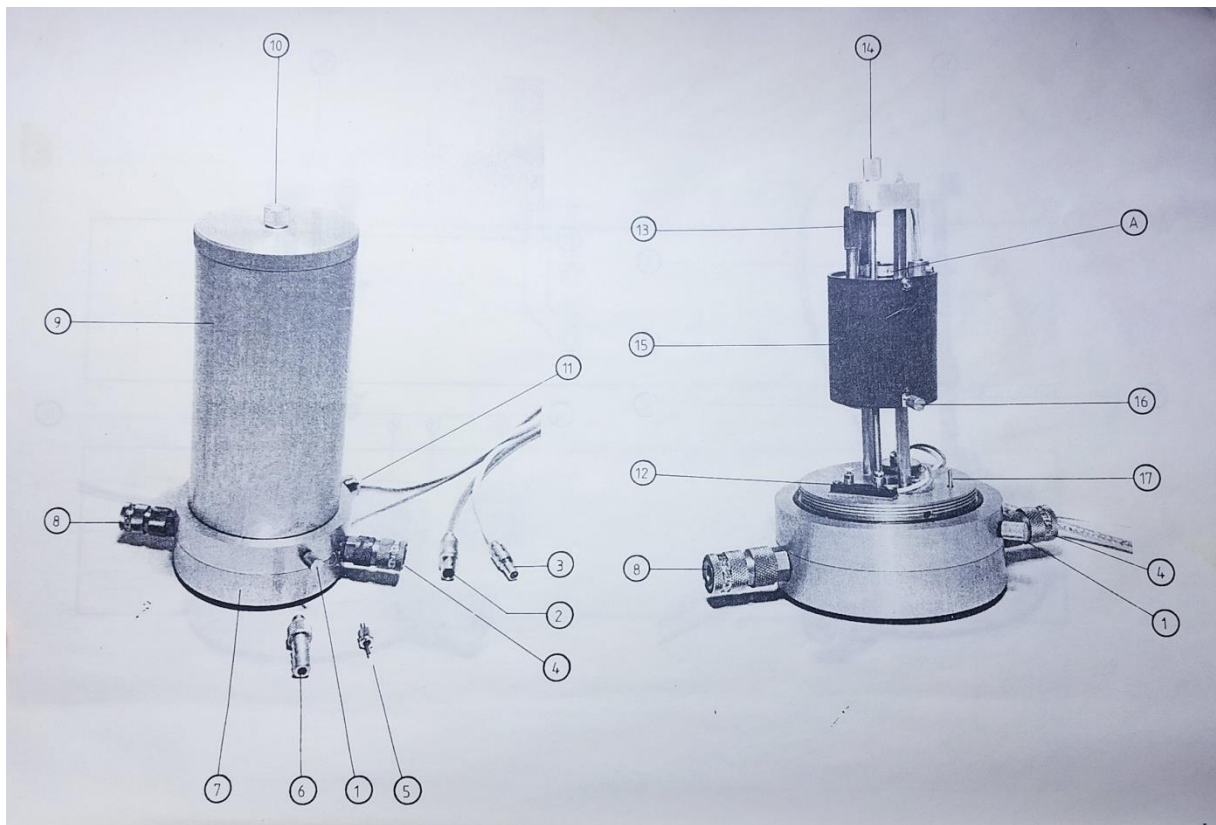
7- Visser dans le sens des aiguilles d'une montre le boîtier du dilatomètre {9} à l'unité de base {7}.

8- Déplacer le four dans le tube de protection jusqu'à ce que la zone chaude du four se trouve au milieu de l'échantillon. L'intérieur du four ne doit pas toucher le tube de protection !!!

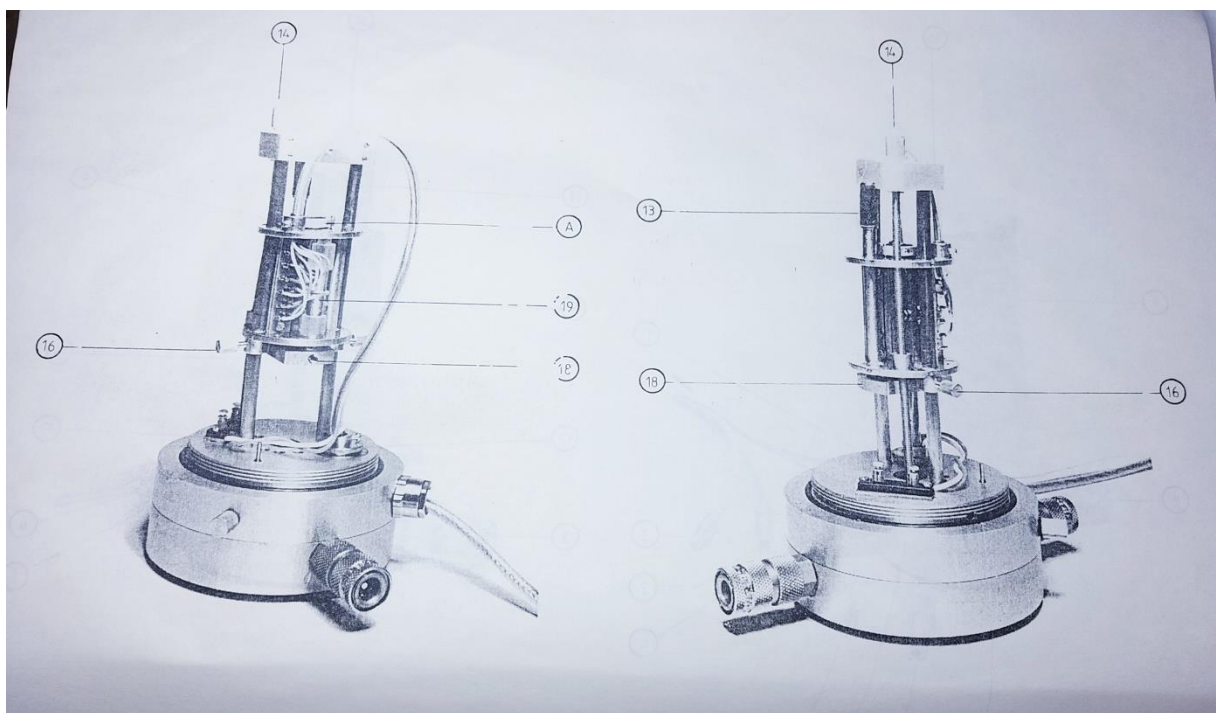
Nous recommandons d'attendre 15 minutes avant la mesure pour permettre au système d'égaliser.

Ouvrez le refroidissement à l'eau 30 min avant de commencer la mesure [17].

1 :



2 :



Figures III.A.25 : Illustration d'une chambre froide

Figure III.A.25 :

- {1} Joint factice pour l'entrée de gaz agressifs
- {2} Prise pour amplificateur ΔL
- {3} Fiche pour thermocouple échantillon (broche 1 = +, broche 2 = -)
- {4} Entrée de refroidissement par eau
- {5} Joint pour l'entrée de gaz agressifs remplaçant le mannequin {1}
- {6} Entrée pour le vide ou les gaz inertes à la place d'un joint factice {10}
- {7} Unité de base
- {8} Sortie de refroidissement par eau
- {9} Boîtier de la tête de mesure
- {10} Joint factice pour le vide ou les gaz inertes
- {11} Alimentation électrique
- {12} bornes de connexion pour le thermocouple d'échantillon
- {13} Vis de réglage de la pression du piston
- {14} Vis de réglage du piston
- {15} Ramasser la couverture
- {16} Vis de verrouillage
- {17} Entrée de gaz
- {19} Bobine de ramassage

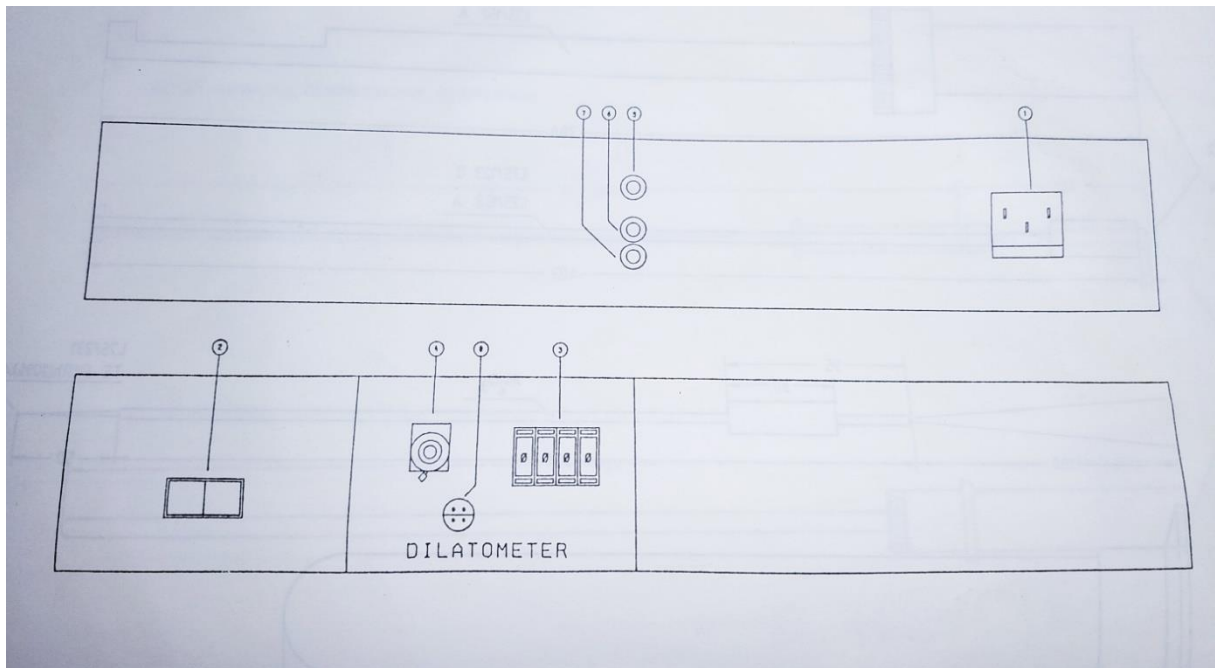


Figure III.A.26 : Clé de contrôle dilatomètre

Amplificateur de figure

- {1} Connecteur secteur avec fusible intégré (0,5 A)
- {2} Interrupteur d'alimentation
- {3} potentiomètres numériques pour facteur d'amplification
- {4} Réglage du point zéro
- {5/6} Sortie (+ - 1v)
- {7} Terrain
- {8} Connecteur pour bobine de prise de dilatomètre



Partie B

Expérimentale

***« Analyse des pannes et démontage du
dilatometre du type DIL75 »***

III.B.1. Introduction à la maintenance du dilatomètre :

Quels que soient les efforts dépensés au stade de la conception et la fabrication des machines afin d'assurer leur sûreté de fonctionnement, il y a toujours des défaillances apparaissant au cours de leur exploitation, les causes d'apparition de ces défaillances des dilatomètres sont variables. Elles vont du coût de simple remplacement d'une pièce détériorée à d'importants frais d'immobilisation, elles peuvent aussi provoquer de graves accidents corporels.

C'est pourquoi on fait appel à la maintenance et réparation à fin de maintenir en état les machines et rétablir leur performance après défaillance.

La maintenance implique un certains nombres de mesures organisationnelles, techniques et économiques.

Après avoir démontré sa rentabilité la maintenance représente une fonction principale dans Beaucoup d'entreprises industrielles et de services.

III.B.2. Définition de la maintenance

L'entretien ou la maintenance est défini comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé » (norme AFNOR X 60-010). Entretenir, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration, vérification, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production ainsi que la sécurité d'opération.

III.B.3. De l'entretien à la maintenance

Cette différence de vocabulaire n'est pas une question de mode, mais marque une évolution de concept. Le terme maintenance est apparu dans les années 1950 aux États-Unis. En France, on parlait encore à cette époque d'entretien. Il faut tirer une leçon de l'apparition d'une panne pour mieux réagir face aux aléas de fonctionnement (**figure III. 28**).

Le terme « maintenance » se substituer à celui d'entretien qui signifie alors maintenance corrective. Entretien, c'est dépanner, réparer pour assurer le fonctionnement de l'outil de production.

Entretenir, c'est subir le matériel

Le schéma suivant présente la relation entre la maintenance et l'entretien par d'autre exemple de la vie.

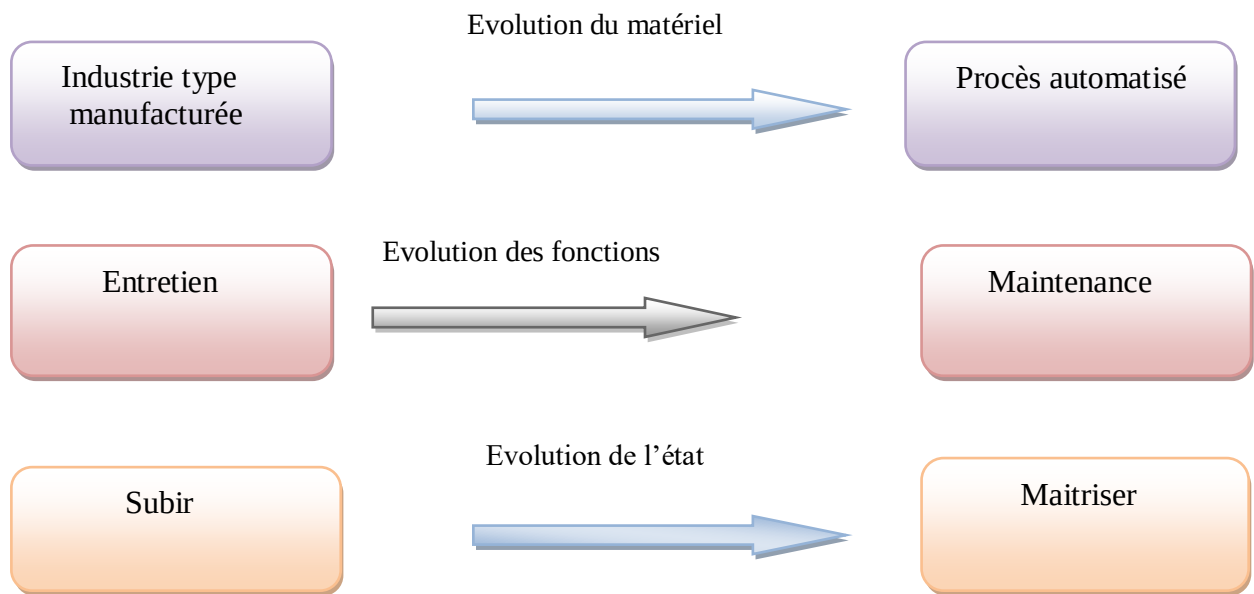


Figure III.B.28 : Maintenance / Entretien.

La figure ci-dessous est une présentation globale de différents types d'entretien

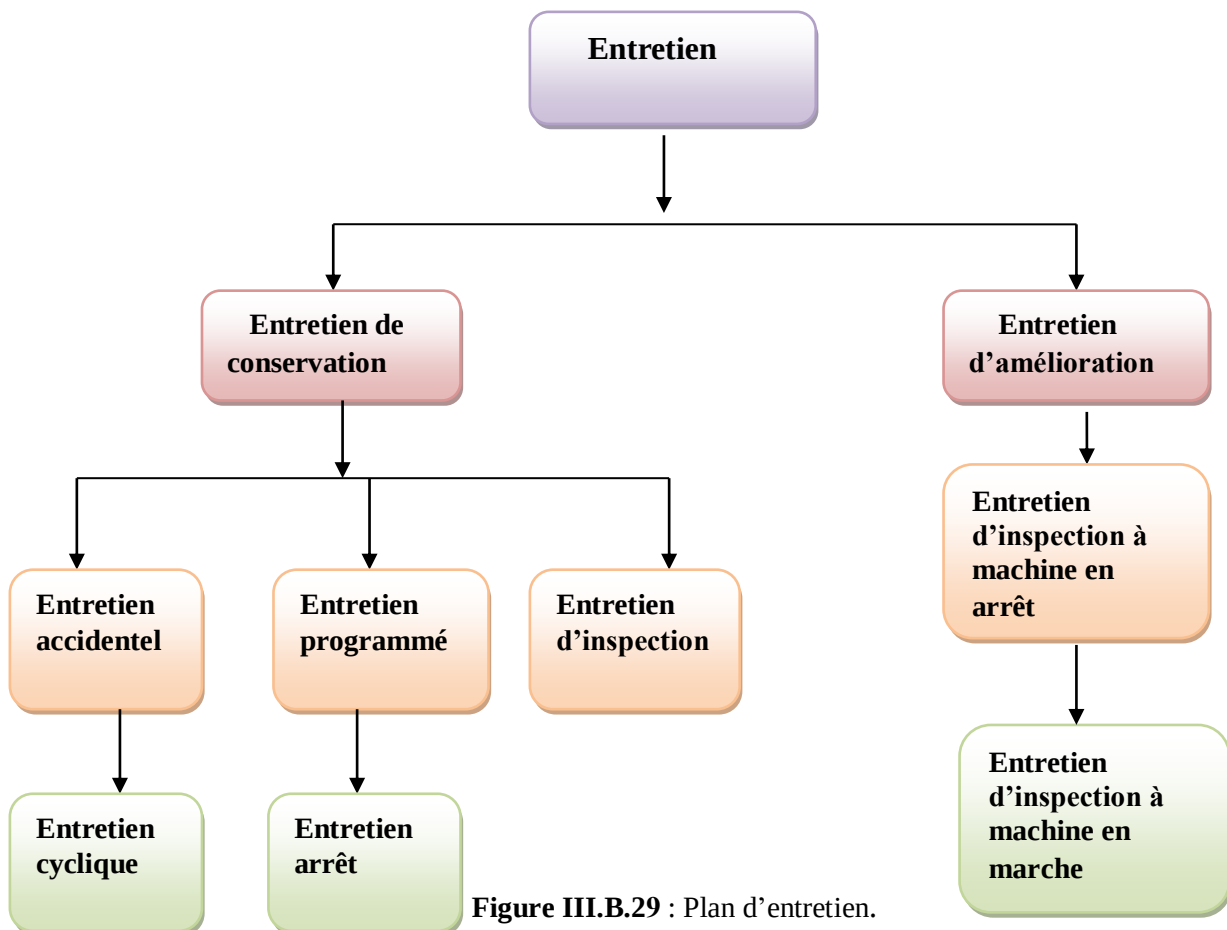


Figure III.B.29 : Plan d'entretien.

III.B.4. Types de la maintenance

III.B.4.1. Maintenance préventive

La maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de la défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu.

Autrement dit, La maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilité de dysfonctionnement des systèmes de production.

La maintenance préventive peut être :

- Systématique.
- Conditionnelle.
- Prévisionnelle.

III.B.4.1.1. Maintenance systématique

Lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminées, on parle de la maintenance systématique, l'opération de maintenance est effectué conformément à un calendrier.

III.B.4.1.2. Maintenance conditionnelle

Lorsque l'opération de maintenance préventive est subordonnée à l'analyse de l'évolution de paramètres significatifs (température, pression,...etc.) de la dégradation ,c'est la maintenance conditionnelle

III.B.4.1.3. Maintenance prévisionnelle

Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct avant l'observation de l'évènement redouté on parle de maintenance prévisionnelle.

III.B.4.1.4. Objectives visés par la maintenance préventive

- Améliorer la fiabilité du matériel.
- Garantir la qualité des produits.
- Assurer la sécurité humaine.
- Améliorer la gestion du stock
- Diminuer les travaux urgents.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

III.B.4.2. Maintenance corrective

La maintenance corrective regroupe l'ensemble des activités réalisées après la défaillance (totale ou partielle) d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

La maintenance corrective peut être :

- Palliative.
- Curative.

III.B.4.2.1. Maintenance palliative

La maintenance palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Ces activités du type dépannage qui présentent un caractère provisoire devront être suivies d'activités curatives.

III.B.4.2.2. Maintenance curative

La maintenance curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent.

PARTIE EXPERIMENTALE

III.B.5. Opération démontage du dilatomètre DIL75 du laboratoire de génie mécanique (Hall technologique)

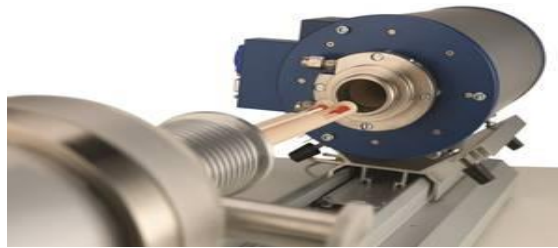


Figure. III.B.30: Photo avant le démontage du dilatomètre.

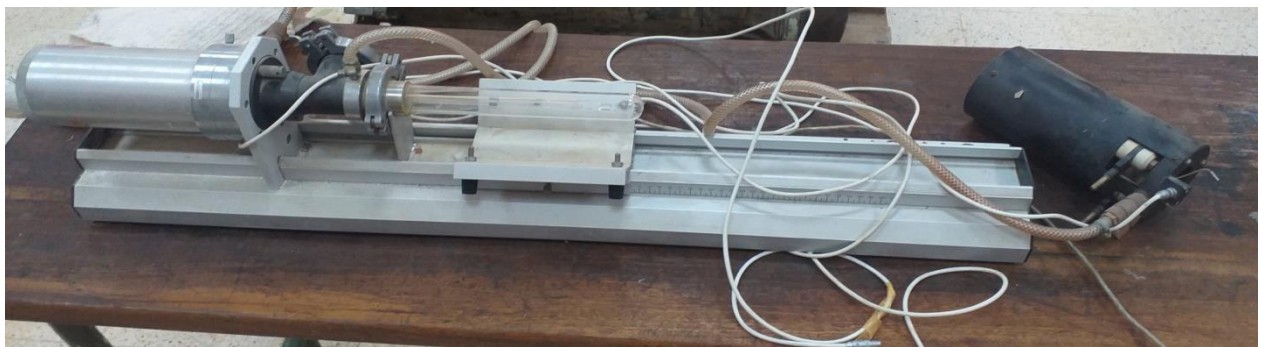


Figure. III.B.31 : Photo du démontage de la chambre d'échauffement.

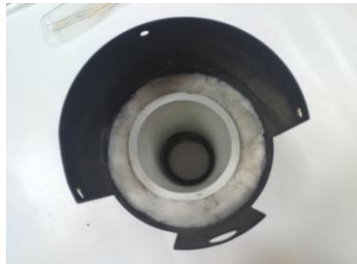


Figure.III.B.32 : Photo des composants du dilatomètre.

a) :



1



2



3

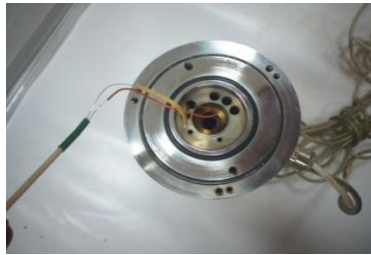
Figure.III.B.33 : Chambre cylindrique d'échauffement

1. Vue en perspective
2. Vue de face de la chambre
3. Spirale d'échauffement

b)



1



2



3

Figure.III.B.34: Cylindre de refroidissement

- 1 : Vue en perspective
- 2 : Vue de face de la chambre
- 3 : Vue de gauche

c)



Figure.III.B.35 : Cylindre en verre isolant

d)



Figure.III. B.36 : Tige pour fixer l'échantillon.

e)



Figure.III.B.37 : Le chariot mécanique mobile

f)



1.

2.

3.

Figure.III.B.38 : Conduites et coudes pour le fluide de refroidissement

1 ; 2; 3 Conduite et coude pour l'opération de refroidissement et réglage de température de l'échantillon.

III.B.6. Etapes de vérification

A : La vérification de la chambre cylindrique noire a montrée qu'il n'y a aucun défaut et son raccordement est parfait. Et nous avons trouvé la valeur de résistance $\rightarrow R = 30[k\Omega]$

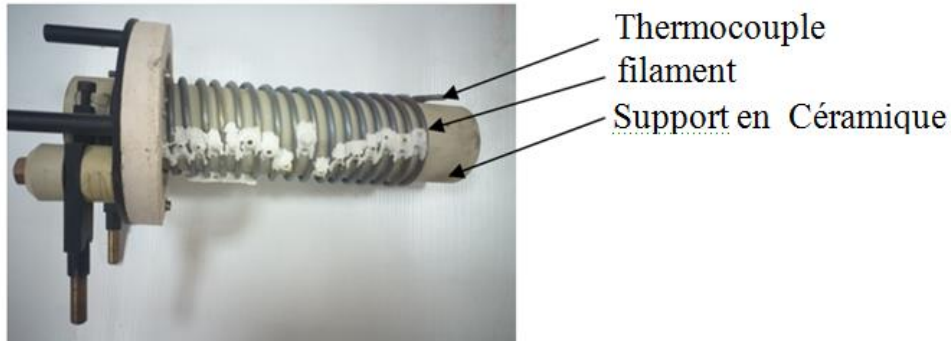


Figure.III.B.39 : Raccordement du filament de résistance chauffante.

B : Thermocouple court (longueur $l=12\text{ cm}$) :

Comme le principe de travail l'indique :

- A l'état initial le thermocouple court est conducteur
- Après l'échauffement le thermocouple doit couper le courant électrique

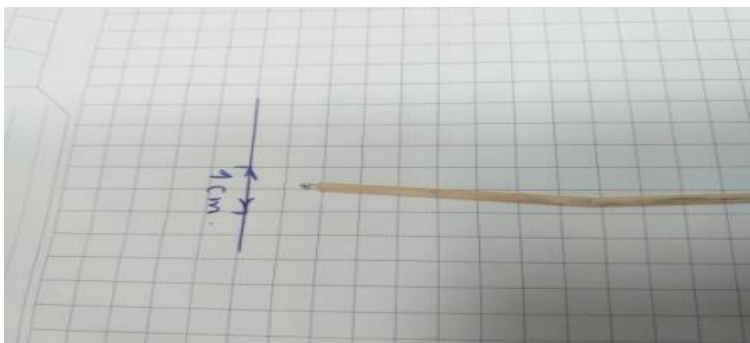


Figure.III.B.40 : Thermocouple de filament courts pour la chambre noir ($l=12\text{ cm}$) :

Après la vérification, de ce thermocouple on a conclu qu'il est endommagé à la tête l'organe sensible avec un filament microscopique dessoudé impossible de le réparer, et cela à cause de ses petites dimensions.

C:

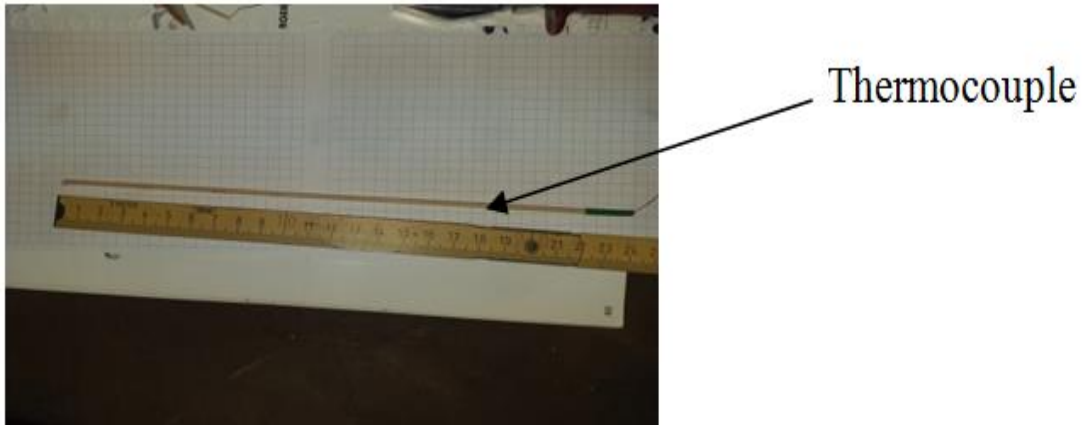


Figure.III.B.41 : long (longueur $l=22$ cm) : pour le cylindre blanc (chambre d'échantillon).

- ✓ Après sa vérification : Ce thermocouple est d'effectuer (endommagé à la tête l'organe sensible impossible de le réparer).

D :

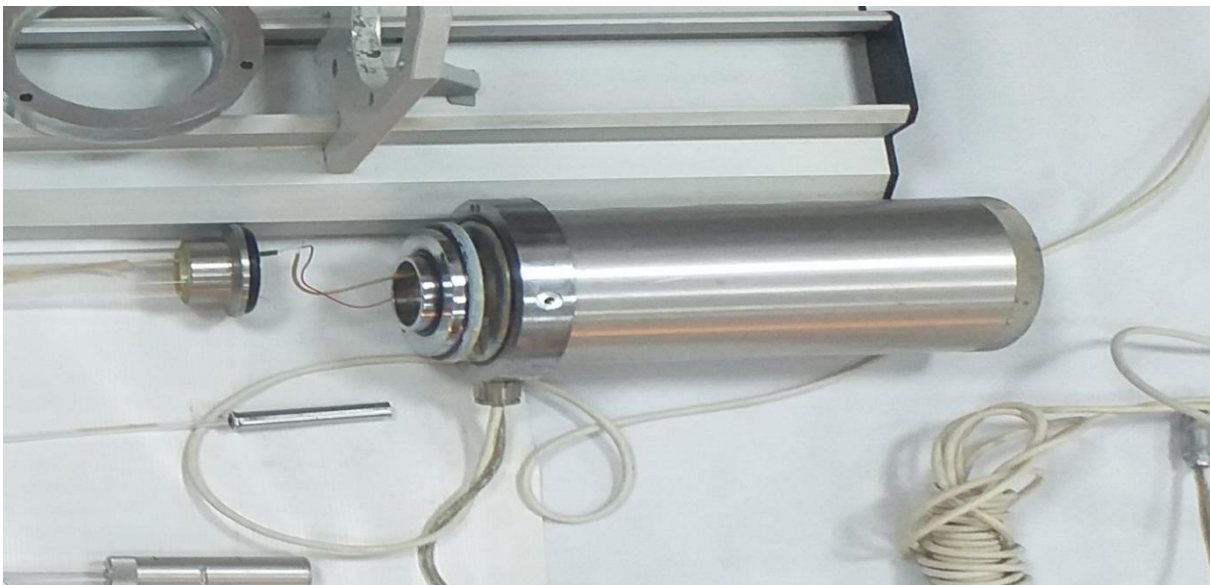


Figure.III.B.42: Vérification de l'état du cylindre blanc.

- ✓ C'est un cylindre blanc pour le réglage de la température de l'échantillon : Son état est bon et peut fonctionner normalement à l'aide de son thermocouple

E :



Figure.III.B.43: Le chariot mobile mécanique.

- ✓ Après sa vérification : Le chariot mobile mécanique est en bon état le déplacement est facile pour chambre cylindrique noir

F :

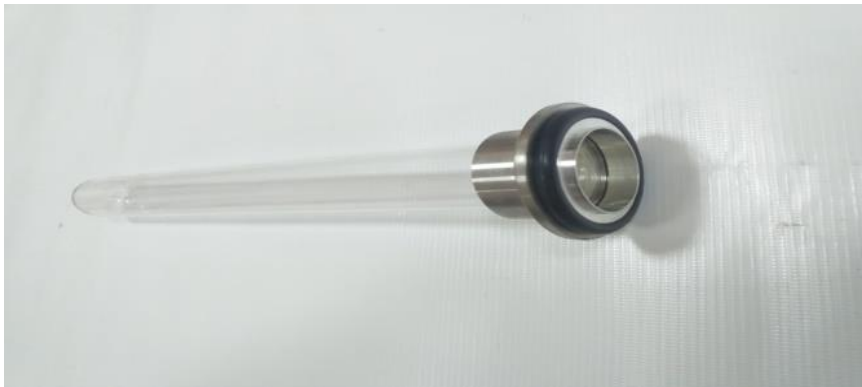


Figure.III.B.44 : La grande cuvette cylindrique en verre

- ✓ Après sa vérification : Cette cuvette cylindrique en verre en bon état.

G :



Figure.III.B.45 : La tige en verre cylindrique porte échantillon

- ✓ Après la vérification : Cette tige est en bon état.

H :

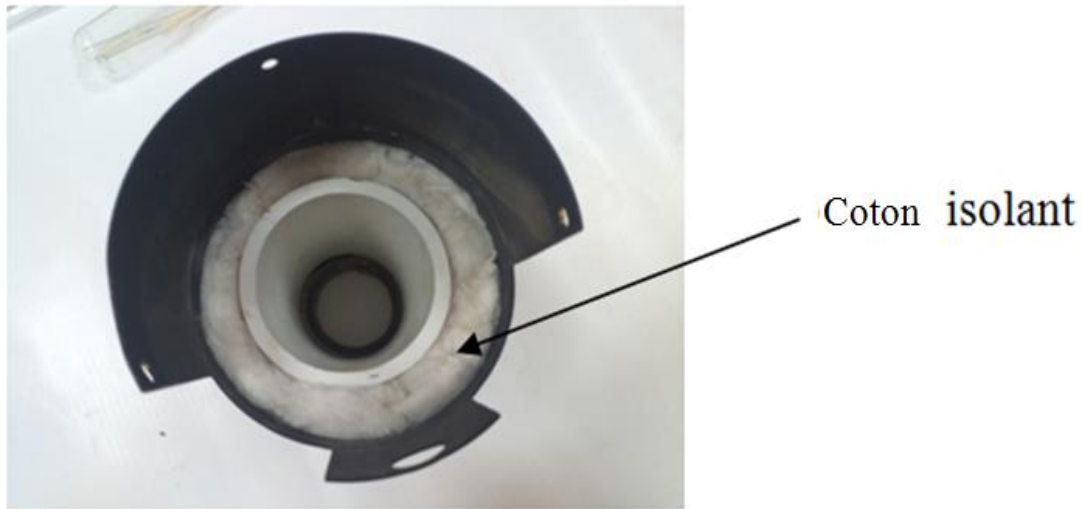


Figure.III.B.46: Coton isolant entre le cylindre noir et la résistance.

✓ Après la vérification : Ce coton isolant est en bon état.

I :



Figure.III.B.47 : Le coude et flexible pour l'alimentation de refroidissement du cylindre noir.

✓ Après la vérification, ils sont en bon état.

J :

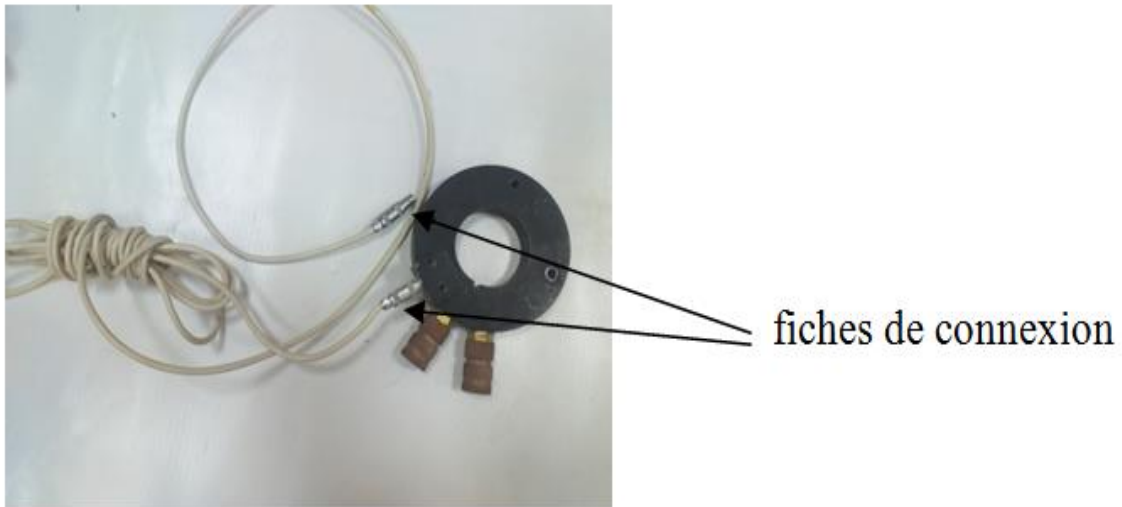


Figure.III.B.48: Les fiches de connexion entre la chambre d'échauffement et le stand de commande

✓ Après la vérification, ils sont en bon état.

L :



Figure.III.B.49 : Raccordement des flexible du fluide de refroidissement.

✓ Après la vérification, il est en bon état.



Figure.III.B. 50: Le stand d'indication des mesures

- ✓ C'est un le stand d'indication des mesures, il est en bon état et peut fonctionner normalement lorsqu'il est connecté au dilatomètre.

Conclusion général

Après avoir démonté et analysé du dilatomètre et la reconnaissance des pannes, nous avons conclu que la maintenance, n'est pas que la réparation, mais toute une fonction compliquées qui nécessite une organisation parfaite et une connaissance profonde des appareils.

Nos analyses des pannes nous ont conduits vers les points suivant :

1-Le stand de commande qui indique les résultats de dilatation des différents échantillons est en bon état avec ses flexibles de connexion.

2-restent les deux capteurs de températures (thermocouple de filament courts et Thermocouple de filament longs) pour les limites de la haute et la basse température qui sont défectueux et qu'on peu les changer.

3-Le montage est effectuée de la même précaution que le démontage.

4-Reste les expériences programmées pour les échantillons préparés n'ont pas été réalisés à cause de la pandémie.

Référence bibliographique

- [1] Claus LINSEIS, DILATOMETRE : (DIL76, DIL75 Horizontal, DIL75 Vertical). GERMANY(2004).
- [2] BOUAFIA Hichem et HADJI Hicham, Effet de la température sur la dilatation de quelques types de matériaux. Université M'sila (2017-2018).
- [3] Pression atmosphérique normale : 101 325 Pa.
- [4] Anders Celsius, physicien suédois (Uppsala, 1701 – 1744).
- [5] Daniel Gabriel Fahrenheit (Dantzig, 1686 – La Haye, 1736).
- [6] William Thomson (1824 – 1907), anobli sous le nom de Lord Kelvin par la Reine Victoria en 1892.
- [7] Chapitre II. Propriétés thermique de la matière (cours).
- [8] Dilatation des solides, des liquides et gaz.
- [9] Dans les tables CRM, ce coefficient est noté α . Nous mettons l'indice 1 pour signifier (à une dimension).
- [10] Identification des matériaux- Les propriétés thermiques des solides- Eco PEM / Boite A/co /A-4-c-1-1.html. 26-04-2020 , 23:30
- [11] Article, Dilatation et contraintes thermiques dans les solides : application aux bilames présentation d'une expérience.
- [12] ASHBY M.F. *Choix des matériaux en conception mécanique*. Paris : L'Usine Nouvelle, Dunod , 2004.
- [13] KINGERY W.D. *Introduction to Ceramics*. New York : John Wiley, 1967.
- [12] BARTON J. et GUILLEMET C. *Le verre : science et technologie*. Les Ulis : EDP Sciences, 2005.
- [14] BÉRANGER G., TIERS J.-F. et DUFFAUT F. « Invar : Famille d'alliages fonctionnels ». *Les techniques de l'ingénieur*, N 2 750, 2009.

[15] BARTON J. et GUILLEMET C. *Le verre : science et technologie*. Les Ulis : EDP Sciences, 2005.

[16] BÉRANGER G., DUFFAUT F., MORLET J. et TIERS J.-F. (édit.) *Les alliages de fer et de nickel - Cent ans après la découverte de l'Invar®*. Paris : Lavoisier - Technique et Documentation, 1996.

[17] Instruction Manual (Absolute Dilatometer). Linseis GmbH, Vielitzer Str.43, D-8672 SELb/Bayern, February 1990.

[18] Taleb Naima. RÉHABILITATION D'UNE ENROBEUSE À CHAUD « PRESTOPRESS-3 ». Chapitre 3 (pages 29-33), Université M'sila (2015).

[19] Consiglio Nazionale delle Ricerche (2015) La 'termopotenza' degli ossidi [archive],27/03/2015

Résumé

Dans ce travail , nous avons contribué à la réparation du dilatomètre du type L75 LINSISE du laboratoire de génie mécanique, destiné pour les mesures de dilatation de différents matériaux .Après le démontage du dilatomètre au laboratoire , nous avons commencé a analyser les composants les plus délicats et de valeurs comme les capteurs de température ou thermocouples et les essais de leur remise en état de fonctionnement d'origine. Après une recherche bibliographique et une analyse fine, nous étions arrivés à découvrir les types des défauts présents à chaque niveau. Le reste des expériences programmées pour quelques échantillons préparés au laboratoire sont achevés a cause de la pandémie.

Mots clés : DILATOMETRE, L75 LINSISE, Réparation, Thermocouple

ملخص

في هذا العمل ، ساهمنا في إصلاح جهاز التوسيع من النوع L75 LINSISE من مختبر الهندسة الميكانيكية ، والمخصص لقياسات التمدد للمواد المختلفة. وبعد تفكيك مقياس التمدد في المختبر ، بدأنا في تحليل المكونات الأكثر شيوعًا. حساسة وقيم مثل أجهزة استشعار درجة الحرارة أو المزدوجات الحرارية واختبار حالة التشغيل الأصلية. بعد بحث ببيوغرافي وتحليل مفصل ، تمكنا من اكتشاف أنواع العيوب الموجودة في كل مستوى. وقد تم الانتهاء من باقي التجارب المجدولة لبعض العينات التي تم تحضيرها في المختبر بسبب الوباء.

الكلمات الرئيسية: مقياس المسافات ، لينسيس ، إصلاح ، المزدوجات الحرارية

Abstract

In this work, we have contributed to the repair of the L75 LINSISE type dilatometer from the mechanical engineering laboratory, intended for the expansion measurements of different materials. After dismantling the dilatometer in the laboratory, we started to analyze the most common components. delicate and values such as temperature sensors or thermocouples and testing of its original operating condition. After a bibliographical research and a detailed analysis, we had managed to discover the types of defects present at each level. The rest of the experiments scheduled for some samples prepared in the laboratory have been completed due to the pandemic.

Keywords: DILATOMETER, LINSISE, Repair, Thermocouple