

Sommaire

1. Quelques rappels indispensables pour mieux comprendre la mesure des températures	13
1. <i>Un peu d'histoire</i>	13
2. <i>Qu'est-ce que la température.....</i>	15
2.1. <i>Échelles de température.....</i>	16
3. <i>Unification et évolution des échelles de température</i>	16
3.1. <i>Échelles internationales de 1889 à 1968</i>	18
3.2. <i>Échelle internationale de 1968 (E IPT 68)</i>	18
3.2.1. <i>Unité de température.....</i>	19
3.2.2. <i>Échelles usuelles encore utilisées</i>	19
3.2.3. <i>Capteurs d'interpolation</i>	20
3.2.4. <i>Capteurs de température.....</i>	21
4. <i>Le capteur thermoélectrique ou thermocouple</i>	25
4.1. <i>Effet SEEBECK</i>	25
4.1.1. <i>Effet PELTIER</i>	26
4.1.2. <i>Effet THOMSON</i>	26
4.1.3. <i>Effet VOLTA</i>	26
2. Les thermocouples : principe-application-conseils pratiques d'utilisation	27
1. <i>Mesure de la force électromotrice</i>	27
2. <i>Conséquences pratiques des lois thermoélectriques</i>	28
2.1. <i>Loi des conducteurs intermédiaires.....</i>	28
2.2. <i>Loi des métaux homogènes</i>	29
2.3. <i>Compensation de soudure froide</i>	30
2.3.1. <i>Montage fondamental</i>	30
2.3.2. <i>Montage thermocouple seul</i>	31
2.3.3. <i>Montage avec câble de compensation</i>	31
2.3.4. <i>Montage thermocouple avec conducteurs cuivre.....</i>	32
3. <i>Analyse et recherche de la force électromotrice globale engendrée dans un circuit thermoélectrique</i>	33
3.1. <i>La f.e.m. est nulle si toutes les jonctions du circuit sont à la même température</i>	33

Avant-propos

L'accroissement des performances des turbomachines, qui ne se ralentit pas depuis plusieurs décennies, a été obtenu en particulier grâce à une augmentation concomitante des températures en fonctionnement. Ce processus conduit tout naturellement à être de plus en plus exigeant sur la connaissance des températures des pièces constitutives, puisque la précision des mesures est à la base de la fiabilité des calculs thermiques permettant de prédire aussi bien en régime instationnaire qu'en régime permanent les effets du rayonnement et de la conduction dans un ensemble mécanique aussi complexe.

Pour donner une idée de l'importance du champ thermique dans les turbomachines les plus modernes, il suffit de savoir que les aubes de turbine doivent être actuellement plus froides de 400 °C que la veine gazeuse dans laquelle elles baignent ; que les contraintes d'origine thermique dans les mêmes aubes peuvent être localement du même ordre de grandeur que les contraintes centrifuges, qui atteignent 50 000 g.

Ceci explique l'effort d'instrumentation particulièrement important qui a été effectué dans ce domaine. M. Millet porte une responsabilité majeure dans les progrès réalisés sur une longue période de temps au Laboratoire de la SNECMA, et ce livre qu'il a écrit avec le plus grand soin contient le meilleur de son expérience. Nous formons le souhait que cette synthèse, qui nous paraît devoir être un ouvrage de référence dans les laboratoires et les ateliers, profite largement à toutes les branches industrielles confrontées à des mesures de température.

Y. HONNORAT
*Chef du Département
Matériaux et Procédés
à la SNECMA*

3.2. Quelle est la f.é.m. développée dans le même circuit avec des jonctions à des températures différentes	36
3.2.1. Erreur dans le choix de la soudure froide	37
3.2.2. Inversion du câble de compensation	38
3.2.3. Anisothermie des jonctions : couple/câble de compensation	39
4. <i>Thermocouples usuels et tables de référence</i>	40
5. <i>Autres thermocouples</i>	42
6. <i>Réalisation des thermocouples</i>	44
6.1. Soudure chaude du thermocouple	44
6.2. Quelques matériaux de gainage	45
6.3. Avantages et inconvénients des deux principaux types de soudure chaude. Réalisation laboratoire et couples gainés	45
7. <i>Assemblage des thermocouples</i>	48
7.1. Utilisation de plusieurs thermocouples avec un seul appareil de mesure	48
7.2. Thermocouples montés en parallèle	48
7.3. Thermocouples montés en série	49
7.4. Thermocouples montés en opposition	49
8. <i>Quelques règles à observer dans la mesure des températures avec des thermocouples</i>	50
8.1. Mesure de la température de surface d'un solide	50
8.1.1. Quelques exemples	51
8.1.2. Procédé de mesure indirecte	54
8.2. Précaution d'emploi et stabilité des couples platine et chromel alumel	55
8.2.1. Contamination des couples platine	55
8.2.2. Diffusion du rhodium	57
8.2.3. Utilisation sous vide	57
8.2.4. Contamination des couples chromel/alumel	58
8.3. Domaine d'emploi et précision des thermocouples et câbles de compensation	58
8.3.1. Thermocouples	58
8.3.2. Précision	58
8.3.3. Câbles de compensation	59
8.3.4. Précision	62
8.4. Étalonnage des thermocouples	62
9. <i>Appareils utilisés pour la mesure des forces électromotrices délivrées par les thermocouples</i>	64
9.1. L'appareil galvanométrique	64
9.2. L'appareil potentiométrique	64
9.3. L'appareil numérique	65
9.3.1. Langage des « numériques »	65

3. Les capteurs optiques rappels fondamentaux	69
1. <i>Le rayonnement thermique</i>	69
1.1. Le corps noir	71
1.2. Loi de Stefan BOLTZMANN	74
1.3. Loi de PLANCK	74
1.4. Loi de WIEN	75
1.5. Loi de KIRCHHOFF	76
1.6. Loi de LAMBERT	77
1.7. Réflexion, absorption, transmission	78
1.8. Facteur d'émission	78
1.9. Exemple de construction d'un corps noir	80
4. Les pyromètres mesure et choix	83
1. <i>Grandeurs de rayonnement utilisées en pyrométrie optique</i>	83
2. <i>Pyromètre optique monochromatique à disparition de filament</i>	83
2.1. Correction de température	86
2.1.1. Correction due au facteur d'émission	86
2.1.2. Correction due à la présence d'une fenêtre	88
2.1.3. Correction due à la présence d'un miroir	89
3. <i>Pyromètre optique à cellule</i>	91
3.1. Résolution optique	94
4. <i>Pyromètre bichromatique (ou à deux couleurs)</i>	94
5. <i>Pyromètre à radiation totale</i>	96
6. <i>Thermographie infrarouge</i>	96
7. <i>Quel type de pyromètre choisir ?</i>	97
7.1. La surface est grande et la température élevée	97
7.2. La surface est petite et (ou) la température est faible	97
7.3. Le facteur d'émission est connu ou inconnu	99
7.3.1. Cas des pyromètres monochromatiques ou à radiation totale	99
7.3.2. Cas des pyromètres à deux couleurs	100
8. <i>Revêtements de référence</i>	101
5. Quelques réflexions en guise de conclusion	103
<i>Précision de la mesure et calcul d'erreur</i>	103
Annexes	107
— Tables de référence pour les thermocouples usuels	108
— Des données physiques sur les matériaux de gainage	156
— Des données sur les fenêtres optiques et les bandes d'absorption	159
— Des données sur les propriétés radiatives	161
— Des adresses utiles	166
Bibliographie	171