

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**

**PAR
JEAN CARIGNAN**

**ÉTUDE DE FAISABILITÉ D'UN CAPTEUR INDUCTIF POUR LA MESURE
DE TEMPÉRATURE DE SURFACE DES OBJETS MÉTALLIQUES**

FÉVRIER 1998

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

La principale méthode de thermométrie sans contact est la pyrométrie monochromatique. Cette méthode, basée sur le flux émis par un corps chaud, permet de mesurer la température de surface d'un objet sans même qu'il y ait de contact physique. Cette méthode est relativement fiable pour la majorité des objets non métalliques puisque les émissivités sont relativement constantes en fonction de la température de l'objet de mesure.

Cependant, lorsque l'on doit mesurer la température de surface d'un objet métallique, on doit généralement composer avec une émissivité relativement faible et variable en fonction de la température de l'objet de mesure. Ceci a pour effet d'augmenter significativement l'erreur de mesure du pyromètre par rapport à la vraie valeur.

Ce mémoire traite de la possibilité d'utiliser un capteur inductif pour faire la mesure de température de surface des objets métalliques. Cette mesure est basée sur la variation d'impédance du capteur en fonction de la température de l'objet de mesure. Le principal avantage de cette méthode est le fait que la mesure n'est pas influencée par l'émissivité de l'objet de mesure et par la distance qui le sépare du capteur.

Des résultats d'essais ont même démontré que sous certaines conditions, la mesure de température prise à l'aide d'un capteur inductif comporte une plus faible erreur absolue que celle prise avec un pyromètre optique.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a demandé beaucoup d'énergie et de travail. Cependant, elle a été allégée par le concours de divers intervenants. Je tiens donc à remercier les personnes suivantes pour leur appui technique et moral.

M. Jean Luc Dion, directeur de recherche et M. Ahmed Laksasi, co-directeur de recherche, pour le temps qu'ils ont su me consacrer, pour leurs idées et pour leurs remarques enrichissantes et constructives. Je tiens aussi à remercier M. Antoine Duchesne, ex-chef du Service des électrotechnologies industrielles ainsi que M. Roger Bellemare chef du LTEE, qui m'ont permis d'utiliser le matériel du LTEE pour mes essais.

Je voudrais aussi remercier M. Sylvain Chénard, technicien au LTEE , pour les conseils qu'il m'a donné quant aux méthodes à utiliser pour la réalisation du capteur et M. Jocelyn Millette, chercheur au LTEE, pour les notions qu'il m'a apprises quant au fonctionnement de Matlab.

Je ne saurais passer sous silence, l'appui constant de mon épouse et de mes deux filles sans lequel ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. PRINCIPES DE LA PYROMÉTRIE OPTIQUE	4
2.1. Principes du rayonnement infrarouge	5
2.2. Lois régissant le rayonnement infrarouge	7
2.2.1. Loi de Planck	7
2.2.2. Loi de Wien	8
2.2.3. Loi de Stefan-Boltzmann	10
2.3. Rayonnement thermique d'un corps réel	11
2.4. Pyrométrie optique	13
2.4.1. Pyromètre à radiation totale	17
2.4.2. Pyromètre à bande étroite (monochromatique) [16]	17
2.4.3. Pyrométrie à disparition de filament	22
2.4.4. Pyrométrie polychromatique (n=2 bichromatique)	22
2.5. Erreurs sur l'évaluation de la température en pyrométrie optique	24
2.5.1. Méconnaissance de l'émissivité exacte	24
2.5.2. Environnement de mesure	25
2.6. Caractéristiques et performances des pyromètres optiques	26
2.6.1. Étendue de mesure	26
2.6.2. Émissivité et réponse spectrale	27
2.6.3. Temps de réponse	28
2.6.4. Erreur et répétabilité des mesures	29
2.6.5. Prix des pyromètres	30
3. THERMOMÉTRIE PAR CAPTEUR INDUCTIF	31
3.1. Principe de la mesure par capteur inductif	31

3.2. Résultats des travaux de Yamada et Al.	39
3.3. Objectifs du projet	42
4. MONTAGE EXPÉRIMENTAL	44
4.1. Capteur inductif	45
4.1.1. Capteurs inductifs industriels	45
4.1.2. Conception préliminaire et simulations sur Flux2DMC	46
4.1.3. Critères de conception du capteur	49
4.1.4. Conception du capteur	51
4.1.5. Caractérisation du capteur	55
4.2. Objet de mesure	57
4.3. Système de chauffage et de contrôle de la température	58
4.4. Systèmes de mesures	61
4.5. Ajustement de la distance entre le capteur et l'objet de mesure	66
4.6. Fonctionnement de l'ensemble du système de mesure	67
5. ESSAIS ET ANALYSES	69
5.1. Caractérisation de l'ensemble capteur et objet de mesure	70
5.2. Impédance du capteur en fonction de la température de l'objet de mesure	73
5.3. Méthode d'analyse et résultats	81
5.4. Fidélité des mesures	91
5.5. Essais comparatifs avec pyromètre optique	95
6. CONCLUSIONS ET ORIENTATIONS	100
7. BIBLIOGRAPHIE	103

L I S T E D E S A N N E X E S

ANNEXE A	Données Techniques des pyromètres monochromatiques et bichromatique	107
ANNEXE B	Données techniques de quelques détecteurs de proximité	140
ANNEXE C	Résultats des simulations sur Flux2DMC	153
ANNEXE D	Données techniques des conducteurs haute température	161
ANNEXE E	Caractéristiques de la céramique de la compagnie Cotronix	163
ANNEXE F	Description de l'analyseur d'impédance 4194 A de la compagnie Hewlett Packard	168
ANNEXE G	Description du système d'acquisition 3852A de la compagnie Hewlett	171
ANNEXE H	Diagramme bloc du programme de contrôle et d'acquisition de données	177
ANNEXE I	Liste complète des commandes de l'analyseur d'impédance HP4194A	184
ANNEXE J	Résultats des essais à 50 khz	191
ANNEXE K	Résultats des essais à 100 khz	195
ANNEXE L	Résultats des essais à 150 khz	199

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Spectre Infrarouge	6
Figure 2.2 Loi de Planck	8
Figure 2.3 Loi de Wien	9
Figure 2.4 Émittance totale en fonction de la température d'un corps noir	10
Figure 2.5 Chaîne pyrométrique	14
Figure 2.6 Cas de rayonnement multiple [13]	16
Figure 2.7 Variation de la résistivité d'une photorésistance	19
Figure 2.8 Mode Photoconducteur	20
Figure 3.1 Principe de la mesure par capteur inductif	31
Figure 3.2 Répartition du courant dans l'objet de mesure	32
Figure 3.3 Profondeur de pénétration des courants induits	34
Figure 3.4 Circuit équivalent	34
Figure 3.5 Chemin magnétique	37
Figure 3.6 Composantes du système de mesure proposé dans le brevet 4,095,469	40
Figure 3.7 Représentation simplifiée de la Figure 3.6 [27] plage de mesure de 50°C à 400°C.	40
Figure 4.1 Diagramme bloc du montage expérimental	45
Figure 4.2 Vue de coupe du capteur à structure de cuivre	46
Figure 4.3 Vue d'ensemble des composantes de la simulation	47
Figure 4.4 Inductance du capteur en fonction de la température de la plaque d'acier standard	49
Figure 4.5 Vue de profil du capteur	51
Figure 4.6 Position des thermocouples T1 et T2	53
Figure 4.7 Vue de profil du capteur	54
Figure 4.8 Vue en plongée du capteur	54
Figure 4.9 Résistance et réactance inductive du capteur en fonction de la fréquence	56
Figure 4.10 Module de l'impédance et facteur de qualité du capteur en fonction de la fréquence	56
Figure 4.11 Système de chauffage et de contrôle de température de l'objet de mesure	59
Figure 4.12 Source infrarouge	60
Figure 4.13 Évolution de la température de la plaque d'acier inoxydable	61
Figure 4.14 Organigramme du programme de contrôle et d'acquisitions	64
Figure 4.15 Installation des équipements sur la fraiseuse numérique	66
Figure 4.16 Fonctionnement global et séquentiel du système de mesure et de contrôle	68

Figure 5.1 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la fréquence et de la distance	70
Figure 5.2 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la fréquence et de la distance	71
Figure 5.3 Température de l'eau en fonction de la distance et de la température de l'objet de mesure	74
Figure 5.4 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la température et de la distance à 50 kHz	75
Figure 5.5 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 50 kHz	76
Figure 5.6 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la température et de la distance à 100 kHz	77
Figure 5.7 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 100 kHz	78
Figure 5.8 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la température et de la distance à 150 kHz	79
Figure 5.9 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 150 kHz	80
Figure 5.10 Organigramme du traitement des données sur Matlab	85
Figure 5.11 Température estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) à 50 kHz	87
Figure 5.12 Température estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) à 100 kHz	87
Figure 5.13 Température estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) à 150 kHz	88
Figure 5.14 Erreur absolue moyenne en fonction de la distance	90
Figure 5.15 Variations des paramètres influençant le facteur k en fonction de la distance	91
Figure 5.16 Organigramme des essais de répétabilité	93
Figure 5.17 Montage pour les essais comparatifs	96
Figure 5.18 Comparaison des mesures avec cible à émissivité constante (0.99)	98
Figure 5.19 Comparaison des mesures avec cible à émissivité variable (0.36 à 20 °C)	98
Figure J.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 50 kHz.	192
Figure J.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 50 kHz.	192
Figure J.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 50 kHz.	194
Figure K.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 100 kHz.	196
Figure K.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 100 kHz.	196
Figure K.3 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 3.048 mm à une fréquence de 100 kHz.	197
Figure K.4 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 5.080 mm à une fréquence de 100 kHz.	197

Figure K.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 100 kHz.	198
Figure L.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 150 kHz.	200
Figure L.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 150 kHz.	200
Figure L.3 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 3.048 mm à une fréquence de 150 kHz.	201
Figure L.4 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 5.080 mm à une fréquence de 150 kHz.	201
Figure L.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 150 kHz.	202

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 apparition chronologique des détecteurs	4
Tableau 2.2 Émissivité totale de différents métaux	12
Tableau 2.3 Réponse spectrale	28
Tableau 4.1 Paramètres de simulation	47
Tableau 4.2 Caractéristiques physiques du capteur	55
Tableau 4.3 Caractéristique de l'objet de mesure	58
Tableau 4.4 Caractéristiques de la source infrarouge	60
Tableau 4.5 Paramètres d'opération de l'analyseur d'impédance	63
Tableau 4.6 Commande pour la mesure des températures (T, T1 et T2)	65
Tableau 5.1 Valeurs de "a" et "b" (50 kHz)	77
Tableau 5.2 Valeurs de "a" et "b" (100 kHz)	78
Tableau 5.3 Valeurs de "a" et "b" (150 kHz)	81
Tableau 5.4 Valeurs des coefficients constants	86
Tableau 5.5 Erreurs absolues	89
Tableau 5.6 Essais de fidélité	94
Tableau 5.7 Résultats des essais de fidélité ($d = 3$ mm)	95

LISTE DES SYMBOLES

Liste des symboles par ordre d'apparition dans le texte.

E	:	champ électrique [V/m] ;
q	:	charge [coulomb] ;
H	:	champ magnétique [A/m] ;
Φ_m	:	flux magnétique [Weber]
δ	:	pénétration des courants induits [m] ;
ϵ_0	:	permittivité d'un vide [F/m] ;
W	:	énergie [Joule] ;
h	:	constante de Planck / $6.63 \cdot 10^{-34}$ [J.s] ;
c	:	vitesse de la lumière / $3 \cdot 10^8$ [m/s] ;
E_λ	:	émittance spectrale [$W \text{ cm}^{-2} / \mu\text{m}$] ;
Ta	:	température absolue [K] ;
λ	:	longueur d'onde [μm] ;
λ_m	:	longueur d'onde au maximum d'émittance [μm] ;
E_n	:	émittance totale du corps noir [$W \text{ cm}^{-2} / \mu\text{m}$] ;
ϵ	:	émissivité ;
$E_{\lambda r}$	:	émittance spectrale d'un corps réel [$W \text{ cm}^{-2} / \mu\text{m}$] ;
$E_{\lambda n}$	:	émittance spectrale d'un corps noir [$W \text{ cm}^{-2} / \mu\text{m}$] ;
E_r	:	émittance totale d'un corps réel [$W \text{ cm}^{-2} / \mu\text{m}$] ;
σ	:	constante de Stefan Boltzmann / $5.67 \cdot 10^{-12} [W \text{ cm}^{-2} K^{-4}]$;
Φ	:	flux radiatif élémentaire [W/m^2] ;

$K(\lambda)$	fraction du flux émis par le cible et reçu par le détecteur ;
$S_a(\lambda)$	sensibilité spectrale du détecteur ;
S_{el}	signal électrique fourni par le détecteur [V] ;
λ_0	longueur d'onde centrale [μm] ;
$\Delta\lambda$	largeur spectrale [μm] ;
R_{co}	valeur résistive d'une photorésistance à l'obscurité [Ω] ;
R_{cp}	valeur résistive d'une photorésistance à l'éclairement [Ω] ;
I_f	courant de chauffage du filament d'un pyromètre à disparition de filament [A] ;
T_n	température du corps noir [K] ;
Φ	position relative ;
f	fréquence [Hz] ;
R_c	résistance totale du capteur inductif [Ω] ;
L_c	inductance du capteur inductif [H] ;
R_i	résistance interne du capteur [Ω] ;
R_o	résistance réfléchie [Ω] ;
Z_c	impédance du capteur [Ω] ;
T	température mesurée de l'objet de mesure [$^{\circ}\text{C}$] ;
k	facteur de forme ;
ρ	résistivité [$\Omega \cdot \text{m}$] ;
μ_r	perméabilité magnétique ;
N	nombre de tours de l'inductance ;
J	densité de courant [A/m^2]
\mathcal{R}	réluctance [H^{-1}] ;

-
- d : distance [mm] ;
- T_1 : Température du conduit du capteur [$^{\circ}\text{C}$] ;
- T_2 : température d'un concentrateur de champ [$^{\circ}\text{C}$] ;
- $R_{\text{c}_{\text{HF}}}$: résistance du capteur en très haute fréquence [Ω] ;
- S_c : rapport L_c/R_c ;
- χ : susceptibilité magnétique ;
- K : conductivité thermique [W/ m $^{\circ}\text{C}$] ;
- T_{cons} : température de consigne [$^{\circ}\text{C}$] ;
- T_c : température de l'eau de refroidissement du capteur [$^{\circ}\text{C}$] ;
- T' : température estimée de l'objet de mesure [$^{\circ}\text{C}$].

1. INTRODUCTION

De toutes les grandeurs physiques, la température de surface est certainement l'une des mesures industrielles les plus fréquentes. La mesure de cette grandeur physique permet de déterminer certaines propriétés physiques de la matière et de contrôler plusieurs procédés industriels. Il est donc important que cette mesure soit précise.

Le corps à la surface duquel on veut mesurer la température est en général soumis à différentes interactions avec son environnement. Ces interactions peuvent être de diverses natures : thermique, hydrique (présence de transfert massique d'eau en vapeur) [2], chimique (corrosion), électrique, magnétique, etc. Cependant, peu importe la nature des interactions, l'utilisation d'un capteur de température ne doit pas modifier l'environnement de mesure. De plus, ces mêmes interactions ne doivent pas affecter les résultats des mesures ni diminuer la durée de vie du capteur.

Il arrive que l'utilisation de capteurs, en contact avec le corps dont on veut mesurer la température, soit problématique ou industriellement impossible. C'est le cas lorsque l'on doit mesurer la température de surface de produits en défilement ou que l'on doit analyser les phénomènes de transfert par convection. Dans ce dernier cas, la présence d'un capteur de température pourrait affecter l'échange thermique entre le fluide caloporteur (généralement un gaz) et le produit à chauffer et ainsi modifier les interactions entre le produit à chauffer et son environnement. C'est aussi le cas lorsqu'il est requis de faire une mesure de température dite non-destructive afin d'évaluer le comportement thermique d'un

objet. Il est alors impensable de perforez la surface de l'objet de mesure afin d'y insérer un thermocouple, une thermistance ou encore d'y fixer tout autre élément thermométrique.

L'utilisation de techniques de mesures par rayonnement permet de pallier aux principaux inconvénients reliés aux méthodes de mesure par contact direct. Les principales techniques de mesures par rayonnement sont : la pyrométrie optique (pyrométrie monochromatique, polychromatique et à disparition de filament) et la thermographie infrarouge. Quoique ce document ne traite pas de la thermographie infrarouge, notons que cette technique permet d'obtenir une image "thermique" de l'objet de mesure sans toutefois donner une valeur ponctuelle comme dans le cas de la pyrométrie optique.

Quoique l'utilisation des techniques de pyrométrie optique ne perturbe pas l'environnement de mesure, elles sont tout de même soumises à des grandeurs d'influence qui limitent ou affectent leur opération. Ces grandeurs d'influence sont : la position relative de l'appareil de mesure par rapport à l'objet de mesure, l'absorption du rayonnement thermique dans l'espace entre la cible et l'appareil de mesure et l'incertitude associée à la valeur de l'émissivité (ϵ) de l'objet de mesure. C'est principalement cette méconnaissance qui est à la base de l'apparition des pyromètres bichromatiques. Les résultats de mesures des pyromètres bichromatiques sont indépendants de l'émissivité de l'objet de mesure. Par contre, la température minimale détectable est rarement inférieure à 450 °C. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la température minimale détectable est l'ordre de 300 °C, la gamme de mesure est très limitée et le coût de l'appareil très élevé. *Il demeure donc un vide métrologique pour la mesure de température des corps métalliques dont l'émissivité est faible, variable ou inconnue et dont la température varie entre 20 °C et 450 °C.*

Le présent mémoire vise à démontrer la faisabilité d'utiliser un capteur inductif pour la mesure de température de surface des objets métalliques. La mesure repose sur la variation d'impédance du capteur en fonction de la température de surface de l'objet de mesure. Le capteur, lorsqu'il est excité par une source sinusoïdale, produit un champ magnétique qui pénètre plus ou moins l'objet de mesure et ce selon la fréquence d'opération du capteur et les propriétés électriques et magnétiques de l'objet de mesure. Ces dernières sont directement reliées à la température de l'objet de mesure. L'originalité de cette approche réside dans le fait que ce type de capteur est insensible aux variations d'émissivité de l'objet de mesure et aux variations de distance dans un certain intervalle.

Ce mémoire est divisé en trois parties. La première partie (chapitre 2) fait une rétrospective des principes utilisés en pyrométrie optique. Cette première partie permet de se familiariser avec l'opération des pyromètres et met en lumière les principales limitations des pyromètres à bande étroite (monochromatique), à disparition de filament et des pyromètres bichromatiques. La seconde partie de ce mémoire (chapitre 3), fait un résumé des principes de la mesure de température de surface des objets métalliques à l'aide d'un capteur inductif. Elle traite aussi des travaux qui ont été réalisés dans ce domaine au cours des dernières années et des orientations du présent projet. La dernière partie de ce mémoire est constituée des chapitres 4 5 et 6 et traite plus spécifiquement du montage expérimental, des essais et de leurs analyses et des orientations de la démarche qu'il reste à faire.

Les résultats présentés dans cette dernière section montrent que l'utilisation d'un capteur inductif et d'une méthode d'analyse appropriée permettent de mesurer la température de surface d'un objet métallique. En effet, sous certaines conditions d'opération (fréquence et distance) l'erreur absolue moyenne est inférieure à 4°C.

2. PRINCIPES DE LA PYROMÉTRIE OPTIQUE

Les prémisses de la mesure de température de surface par pyrométrie optique ont eu lieu vers les années 1830. À ce moment, il était possible de mesurer le flux émis par un corps chaud, à l'aide de détecteurs de type thermopiles [3].

Il a fallu attendre jusqu'au début du 20^e siècle pour voir l'apparition des détecteurs quantiques permettant une mesure directe du flux. Par la suite, des détecteurs de plus en plus sensibles aux grandes longueurs d'ondes ont été développés. Le tableau 2.1 liste par ordre chronologique, l'apparition de ces détecteurs. C'est l'apparition de ces capteurs qui a donné naissance à la pyrométrie optique et à la thermographie infrarouge.

TABLEAU 2.1 APPARITION CHRONOLOGIQUE DES DÉTECTEURS

Année	Type de détecteurs	Longueur d'onde sensible
1930-1944	sulfure de plomb (PbS)	1 à 3 μm
1940-1950	antimoniure d'indium (InSb)	3 à 5 μm
1960	tellure de cadmium (HgTeCd)	8 à 12 μm

Les sections qui suivent font un rappel des principales lois associées au rayonnement infrarouge et font un survol des principes de la mesure pyrométrique infrarouge.

2.1. Principes du rayonnement infrarouge

Tout corps émet, sans source externe et de façon continue, une certaine quantité de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement a pour origine l'agitation moléculaire interne du corps. Plus la température du corps est élevée, plus la longueur d'onde émise par ce corps est faible. Il est important de noter que dans le domaine infrarouge, les longueurs d'ondes sont grandes et que l'énergie rayonnante est faible. Ceci laisse déjà entrevoir certains problèmes de mesures.

Les lois fondamentales de la théorie électromagnétique classique montrent que le champ électrique (E) créé par une charge (q) animée d'un mouvement de translation uniforme est très peu différent du champ statiques donné par¹ [4]:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (2.1)$$

Par contre, si la charge électrique subit une accélération, la relation de Maxwell s'applique et montre qu'il apparaît une énergie libérée sous forme de rayonnement électromagnétique. [5]

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

où \vec{H} désigne le champ magnétique, ϵ_0 est la permittivité du vide et \vec{J} la densité de courant.

Une élévation de température accroît l'agitation moléculaire au sein de la matière et favorise l'accélération des particules porteuses de charges électriques, génératrice du

• ¹ Cette équation est valide si et seulement si la distance d'observation r est beaucoup plus grande que le déplacement de la charge

rayonnement. L'énergie ainsi libérée (W), sous forme radiative conditionne la longueur d'onde d'émission (λ) et est donnée par [6] :

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

où "c" est la vitesse de la lumière et "h" est la constante de Planck.

Le phénomène d'absorption du rayonnement par la matière résulte du processus inverse. Il est important de noter que l'absorption associée à un corps donné est plus ou moins importante et ce selon la composition dudit corps.

Le spectre infrarouge correspond au domaine d'émission de la matière dont les températures sont celles trouvées généralement à la surface de la terre. À ces températures, dites "ordinaires" tous les corps rayonnent d'une manière appréciable. Un objet ne peut être transparent à l'infrarouge que si il est refroidi. C'est ainsi que dans le domaine spectral situé autour de 4 microns, pour réduire au centième de sa valeur le rayonnement d'un corps à 20°C, il faudrait abaisser sa température d'une centaine de degrés Celsius.

Comme montré à la figure 2.1, le spectre infrarouge est divisé en trois grandes régions. L'infrarouge court est décelé par les émulsions photographiques spécialisées, par des cellules photoémissives, par des détecteurs photoconducteurs et photovoltaïques. Pour sa part, la détection du rayonnement infrarouge moyen est possible à conditions d'employer des détecteurs thermiques, des détecteurs photoconducteurs et photovoltaïques. Finalement la détection de l'infrarouge long relève du domaine des détecteurs thermiques.

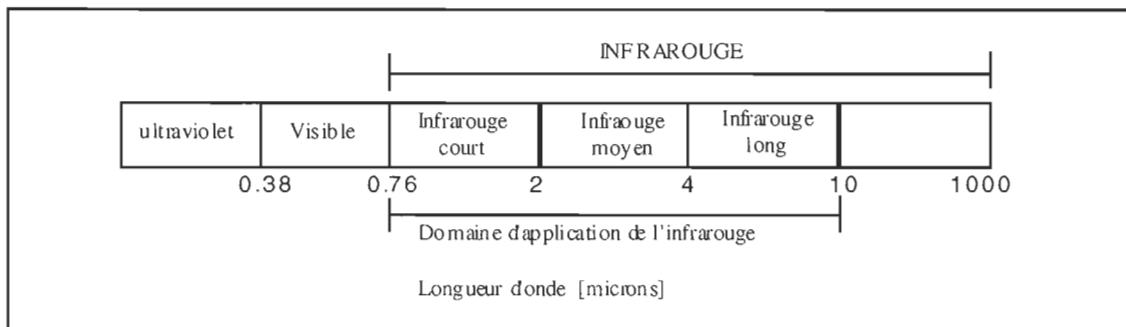


Figure 2.1 Spectre Infrarouge

2.2. Lois régissant le rayonnement infrarouge

Les lois qui régissent le rayonnement infrarouge sont d'abord établies pour un corps idéal, soit le corps noir. Le corps noir est un objet capable d'absorber totalement tout rayonnement incident quelque soit sa longueur d'onde. Le rayonnement thermique d'un corps réel se rapproche plus ou moins de celui du corps noir.

2.2.1. Loi de Planck

La loi de Planck est une des lois fondamentales de l'émission thermique. Elle donne la relation existante entre l'émittance spectrale² (E_{λ}) d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde et sa température absolue (T_a). Cette relation est donnée par l'équation suivante [7] :

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \left(\frac{C_2}{\lambda T_a} \right) - 1 \right)} \quad (2.4)$$

où $C_1 = 3.7413 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^{-2}$ et $C_2 = 1.4338 \cdot 10^2 \text{ m K}$

Comme l'émittance spectrale du corps noir dépend de la longueur d'onde et de sa température, il est utile de représenter la loi de Planck sous forme d'un réseau de courbes comme illustré à la figure suivante. La figure 2.2 présente l'évolution de l'émittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures.

• ² L'émittance spectrale est la puissance rayonnée dans un hémisphère par unité de surface du corps rayonnant et par unité de longueur d'onde.

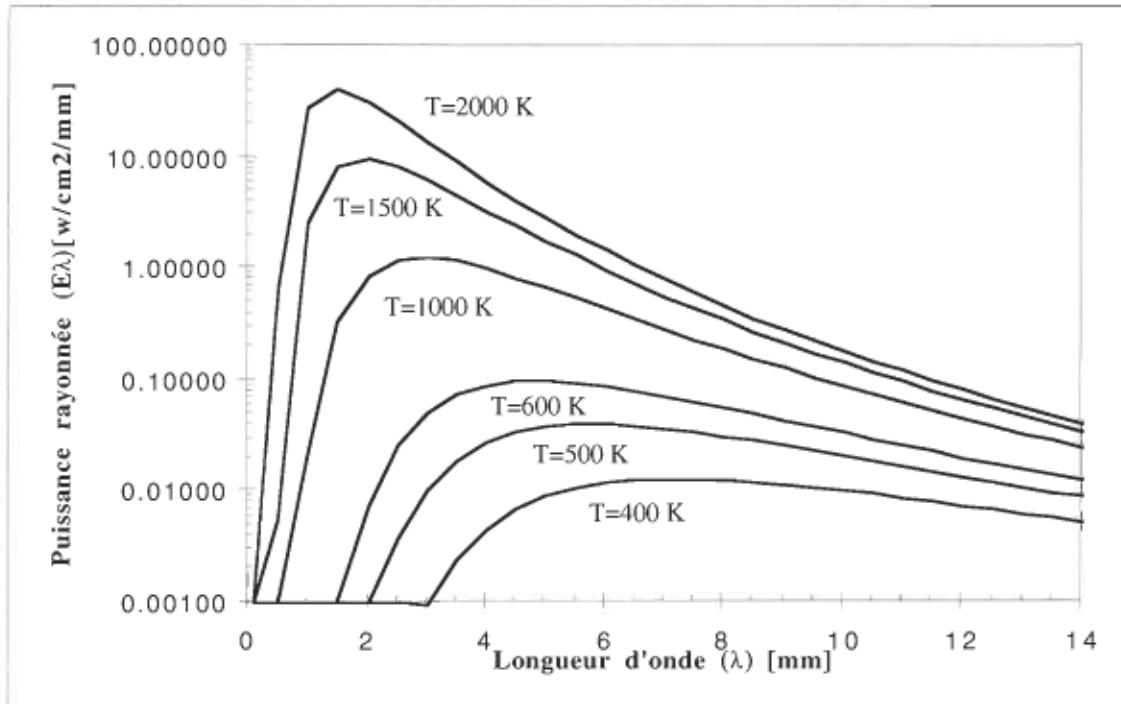


Figure 2.2 Loi de Planck

Cette représentation graphique de la loi de Planck met en évidence le fait qu'à de grandes longueurs d'ondes, l'émittance spectrale (E_λ) pour une température donnée n'est pas à sa valeur maximale. Dans ce cas, il est donc plus difficile de détecter le flux émis par un corps et de le soustraire aux bruits électriques et thermiques ambients.

2.2.2. Loi de Wien

La loi de Wien est obtenue en dérivant la loi de Planck. Cette loi donne la longueur d'onde (λ_m) au maximum d'émittance spectrale en fonction de la température (T_a). L'utilisation de la loi de Wien nous permet de déterminer, pour une température donnée d'un corps noir, la longueur d'onde à laquelle l'émittance spectrale est maximale. L'expression mathématique de la loi de Wien est donnée par [8]:

$$\lambda_m T_a = 2898 \quad (2.5)$$

La figure 2.3 donne une représentation graphique de la loi de Wien ou de la relation qui existe entre $\lambda_m [\mu\text{m}]$ et $T_a [\text{K}]$ pour un corps noir.

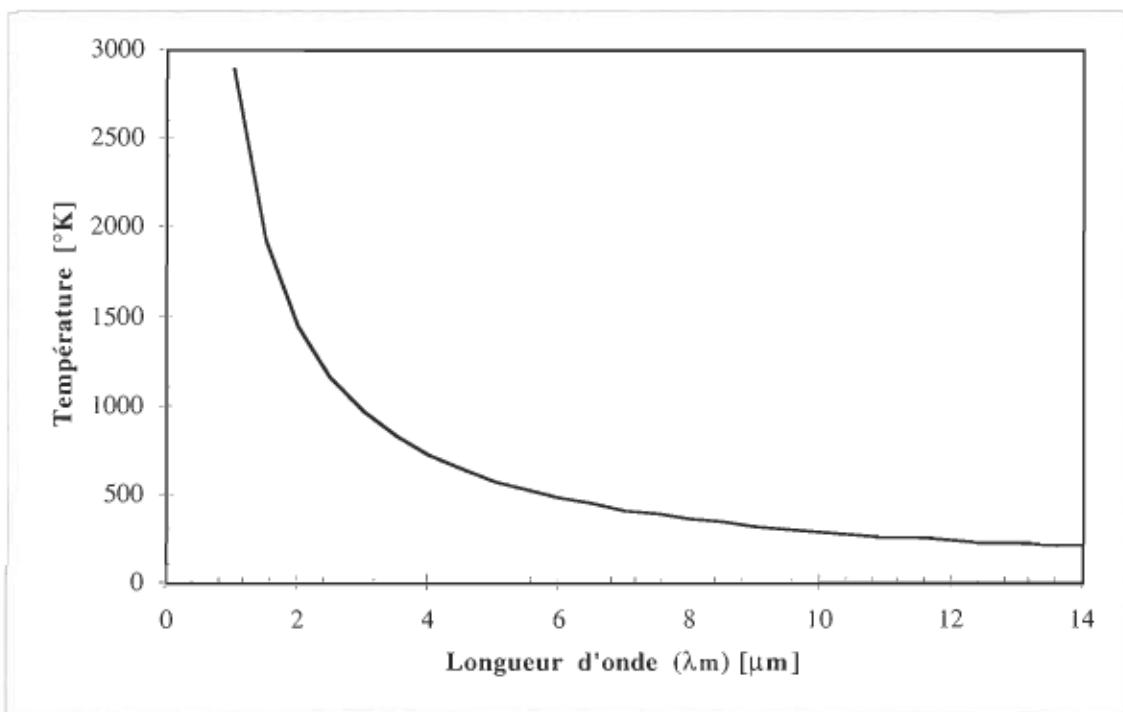


Figure 2.3 Loi de Wien

Cette loi met en évidence le fait que plus un corps est chaud plus, il rayonne dans des longueurs d'onde qui sont courtes. À titre d'exemple citons le soleil, dont la température apparente est de 6000 K, qui rayonne aux alentours de 0.5 microns. Par contre un objet à température ambiante ($T=290$ K) à une émittance maximale autour de 10 microns.

2.2.3. Loi de Stefan-Boltzmann

Cette loi, obtenue par intégration de la loi de Planck depuis $\lambda = 0$ jusqu'à l'infini donne l'émittance totale d'un corps noir (E_n) pour une température donnée. Le résultat de l'intégration de la loi de Planck est donné par [9] :

$$E_n = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_\lambda d\lambda = \sigma T a^4 \quad (2.6)$$

$$\text{où } \sigma \text{ (Constante de Stefan)} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \circ \text{K}}$$

La figure 2.4 montre l'évolution de l'émittance totale (E_n) et sa localisation spectrale en fonction de la température d'un corps noir.

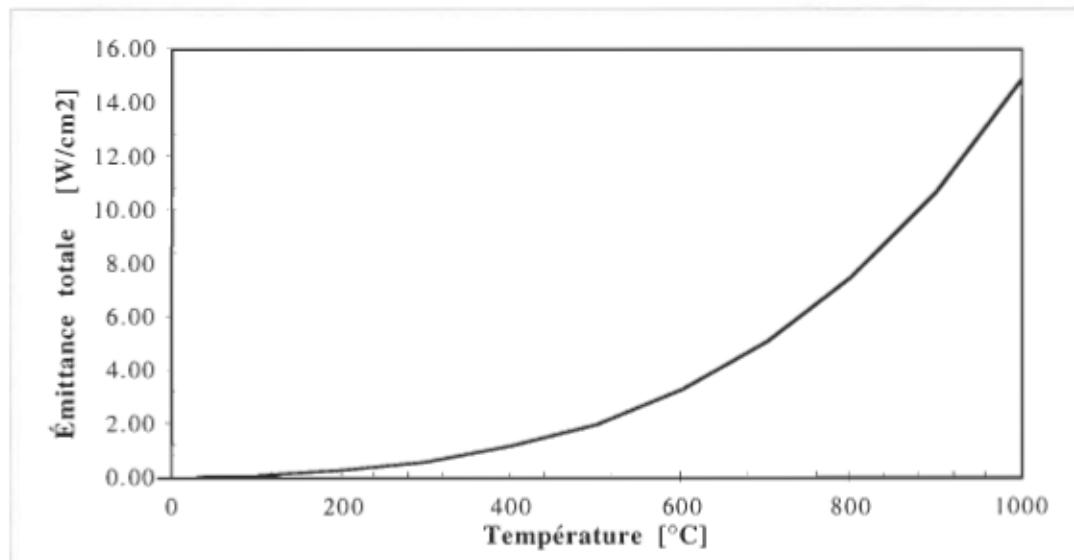


Figure 2.4 Émittance totale en fonction de la température d'un corps noir

2.3. Rayonnement thermique d'un corps réel

L'émissivité (ε) d'une surface est définie comme étant le rapport entre l'émittance de cette surface et l'émittance du corps noir à la même température et la même longueur d'onde.

L'émissivité (ε) d'un corps réel est toujours inférieur à l'unité. Elle varie avec la longueur d'onde, la température, les caractéristiques du corps émetteur et la direction d'émission. Dans la pratique, on utilise souvent des hypothèses simplificatrices nous permettant de négliger l'influence de certaines grandeurs physiques. C'est le cas de l'émission grise, de l'émission isotrope et du corps gris à émission isotrope. Cependant ces hypothèses simplificatrices sont souvent sources d'erreurs importantes.

L'émittance spectrale d'un corps réel ($E_{\lambda,r}$), est liée à l'émittance spectrale du corps noir ($E_{\lambda,n}$) par la relation suivante:

$$E_{\lambda,r} = \varepsilon(\lambda, T_a) E_{\lambda,n}(\lambda, T_a) \quad (2.7)$$

où $\varepsilon(\lambda, T_a)$ est l'émissivité à la longueur d'onde et à la température des composantes constituant la cible. Il en est de même pour ce qui est du calcul de l'émittance d'un corps réel. La relation de Stefan Boltzmann (2.6) est modifiée et devient :

$$E_r = \varepsilon(\lambda, T_a) \sigma T_a^4 \quad (2.8)$$

En faisant l'hypothèse que le corps se comporte comme un corps gris (émissivité indépendante de la longueur d'onde), il est possible d'écrire la dernière équation comme suit :

$$E_r = \varepsilon(T_a) \sigma T_a^4 \quad (2.9)$$

Comme mentionné précédemment, l'émissivité d'un corps réel est fonction de différents paramètres. Les paramètres les plus importants sont la température du corps et son état de surface. Le tableau 2.2 donne la valeur de l'émissivité pour différents métaux avec différents états de surface [10].

Dans la pratique, on utilise souvent des hypothèses simplificatrices nous permettant de négliger l'influence de certaines grandeurs physiques. C'est le cas de l'émission grise et de l'émission isotrope et du corps gris à émission isotrope.

TABLEAU 2.2 ÉMISSIVITÉ TOTALE DE DIFFÉRENTS MÉTAUX

Métaux	Température [°C]	Émissivité	Métaux	Température [°C]	Émissivité
Acier			Cuivre		
chromé	20	0.06	légèrement poli	50 à 300	0.15
rouillé	20	0.68	brut ou oxydé	100	0.75
Aluminium			Fonte		
poli	200	0.04	non oxydée	200	0.40
oxydé	200 à 600	0.11 à 0.19	oxydée	200	0.64
Laiton			rugueuse	200	0.85
poli	300	0.03	Mercure	100	0.15
mat	50 à 350	0.2	Étain	30	0.12

Dans le cas de l'émission grise, l'émissivité est supposée indépendante de la longueur d'onde. L'émission isotrope rend l'émissivité indépendante de la direction du rayonnement. Dans les calculs, pour une zone de température et un état de surface donné, on fait souvent l'hypothèse du corps gris à émission isotrope où la connaissance d'un seul paramètre (émissivité) suffit pour caractériser les propriétés rayonnantes de la surface du corps. Cependant, ces simplifications, en plus de l'incertitude sur les valeurs exactes de l'émissivité (ϵ) sont des sources d'erreurs importantes en pyrométrie optique.

Dans la pratique, on utilise souvent des hypothèses simplificatrices nous permettant de négliger l'influence de certaines grandeurs physiques. C'est le cas de l'émission grise et de l'émission isotrope et du corps gris à émission isotrope.

Dans le cas de l'émission grise, l'émissivité est supposée indépendante de la longueur d'onde. L'émission isotrope rend l'émissivité indépendante de la direction du rayonnement. Dans les calculs, pour une zone de température et un état de surface donné, on fait souvent l'hypothèse du corps gris à émission isotrope où la connaissance d'un seul paramètre (émissivité) suffit pour caractériser les propriétés rayonnantes de la surface du corps. Cependant, ces simplifications, en plus de l'incertitude sur les valeurs exactes de l'émissivité (ϵ) sont des sources d'erreurs importantes en pyrométrie optique.

2.4. Pyrométrie optique

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de température basée sur la relation qui existe entre la température d'un corps et le rayonnement optique qu'il émet. Les capteurs utilisés sont de type photoélectriques ou thermiques.

Dans le cas des capteurs photoélectriques, c'est l'action de l'énergie lumineuse incidente qui est responsable des variations des propriétés électriques du capteur. Pour ce qui est des capteurs thermiques, le phénomène primaire est la conversion de l'énergie lumineuse absorbée en énergie d'agitation thermique du capteur.

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions d'opération d'un équipement ne permettent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques. En général l'utilisation des pyromètres optiques est destinée à :

1. la mesure de température d'objets en mouvement ;
2. la mesure de température supérieure à 2000°C à grande distance ;
3. la mesure de température dans un environnement agressif ;
4. la mesure de température d'objet mauvais conducteur de chaleur.

En général, la chaîne de pyrométrie optique est composée d'une optique, d'un filtre spectral, d'un détecteur ou capteur, d'un conditionneur de signal et d'une interface servant à transmettre le résultat de mesure. La figure 2.5 montre ces différentes composantes.

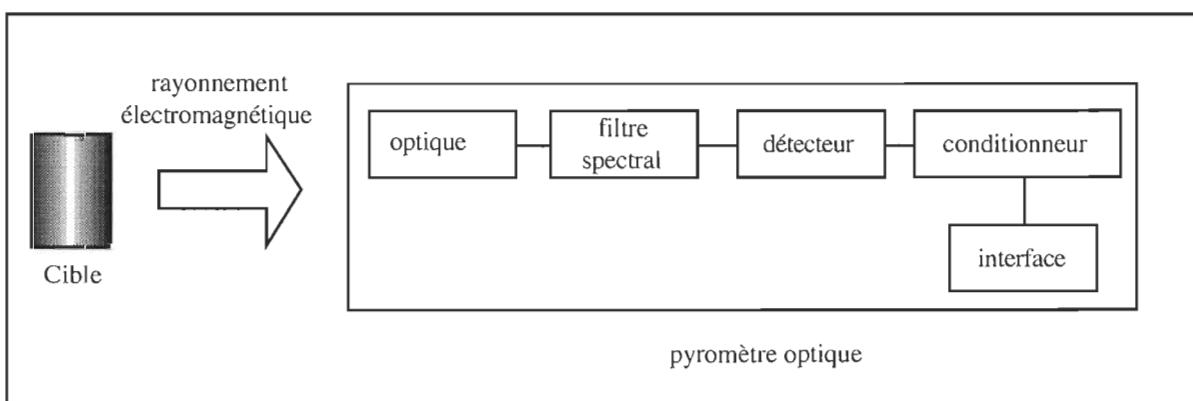


Figure 2.5 Chaîne pyrométrique

La cible dont on veut mesurer la température émet, dans un hémisphère, par unité de surface et dans une plage spectrale de largeur $d\lambda$ autour d'une longueur d'onde λ , un flux élémentaire $d\Phi$ [11]:

$$d\Phi = \varepsilon(\lambda, Ta) E_{\lambda,n}(Ta) d\lambda \quad (2.10)$$

Le détecteur de rayonnement utilisé dans la chaîne pyrométrique reçoit le flux élémentaire $d\Phi_d$ qui est une fraction $K(\lambda)$ du flux émis par l'ensemble de la source:

$$d\Phi_d = K(\lambda) \varepsilon(\lambda, Ta) E_{\lambda,n}(Ta) d\lambda \quad (2.11)$$

où $K(\lambda)$ est fonction du système optique associé au détecteur, au filtre spectral, à la géométrie de l'ensemble cible détecteur (distances, dimensions) et de l'absorption des milieux de propagation. Ainsi le détecteur qui a une sensibilité donnée $S_a(\lambda)$, convertit le flux reçu en un signal électrique S_{el} . Ce signal est décrit par [12]:

$$dS_{el} = S_a(\lambda) K(\lambda) \varepsilon(\lambda, Ta) E_{\lambda,n}(Ta) d\lambda \quad (2.12)$$

Cette dernière expression, compte tenu de la loi de Planck, établi la relation entre la température de l'objet de mesure et le signal électrique élémentaire fourni par le détecteur. Si dans la dernière équation on remplace le symbole de l'émission spectrale par sa valeur (2.4) où:

$$E_\lambda(\lambda, Ta) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda Ta} - 1 \right)} \text{ alors}$$

$$dS_{el} = S_a(\lambda) K(\lambda) \varepsilon(\lambda, T_a) \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T_a} - 1 \right)} d\lambda \quad (2.13)$$

Cette dernière relation met en évidence les difficultés de ce type de mesure qui, en principe exige de connaître:

1. la valeur exacte de l'émissivité de l'objet de mesure ;
2. l'atténuation apportée par les milieux traversés ;
3. l'atténuation apportée par l'appareil de mesure.

De plus il y a lieu de s'assurer que le rayonnement reçu par le détecteur est le seul rayonnement thermique de la cible et qu'il ne s'y ajoute pas le rayonnement thermique provenant d'autres corps de températures différentes. Comme montré à la figure 2.6, il arrive que le rayonnement parvenant au détecteur soit la somme de l'énergie émise par la source dont on veut évaluer la température et de l'énergie émise par une autre source.

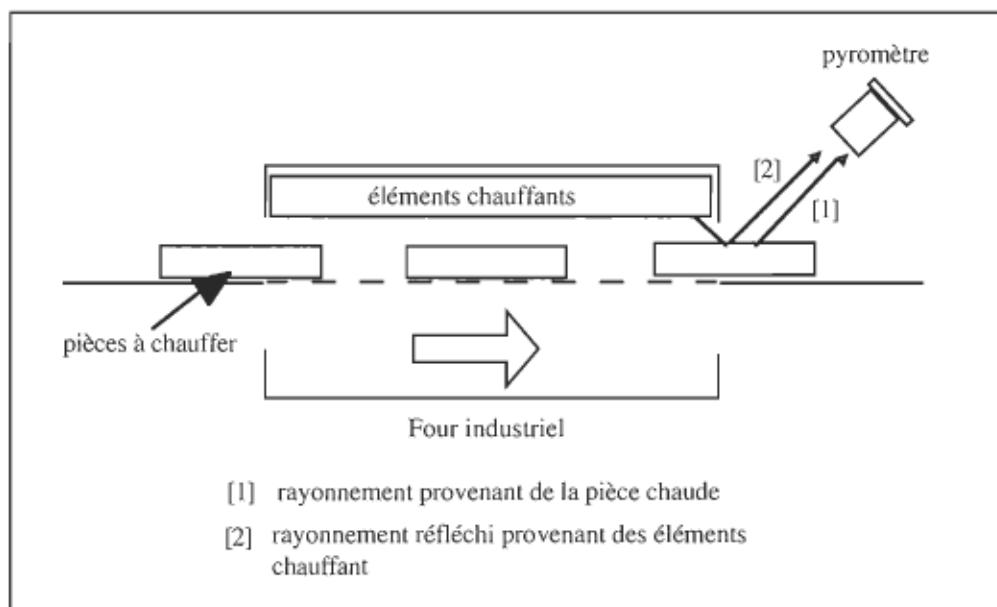


Figure 2. 6 Cas de rayonnement multiple [13]

Pour minimiser les effets du rayonnement multiples il faut soit utiliser un filtre spectral correspondant à la longueur d'onde émise par la source à la température mesurée ou encore faire une analyse de l'environnement de mesure afin d'identifier et atténuer les sources externes qui pourraient rayonner sur l'objet de mesure et ainsi fausser la mesure [14].

2.4.1. Pyromètre à radiation totale

L'ensemble du spectre de rayonnement thermique de la cible ou de l'objet de mesure est reçu par un détecteur à large bande, de type thermique. Ces capteurs convertissent l'énergie lumineuse absorbée en énergie d'agitation thermique. L'augmentation de température produite entraîne une modification des propriétés électriques du capteur et par le fait même une variation de la tension ou du courant. Ces variations sont par la suite converties, à l'aide de fonction de transfert, afin d'obtenir les grandeurs physiques désirées. Les grandeurs électriques dont la variation thermique est mise à profit pour la mesure du flux incident sont les suivantes:

1. la résistivité des éléments métalliques ou semi-conducteurs (bolomètres)
2. la f.é.m. de Seebeck de couples de conducteurs de nature différente
3. la polarisation électrique de substances pyroélectriques

2.4.2. Pyromètre à bande étroite (monochromatique) [16]

Contrairement au pyromètre à radiation totale, le pyromètre à bande étroite est sélectif quant à la longueur d'onde à laquelle il est sensible. En effet, une fraction ($K\lambda$) limitée du spectre de rayonnement thermique de l'objet de mesure, centrée autour d'une longueur d'onde λ_0 et de largeur $\Delta\lambda$, est sélectionnée au moyen d'un filtre optique et

reçue par un capteur photoélectrique de sensibilité spectrale ($S_a(\lambda)$) adaptée à la longueur d'onde λ_0 . Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés à cette fin. Ces capteurs sont les photorésistances, les photodiodes et les photomultiplicateurs. Cependant de façon générale, on a recours à la photorésistance ou à la photodiode.

2.4.2. 1. Photorésistance

La photorésistance est un capteur qui voit sa résistance varier en fonction du niveau d'éclairement auquel elle est soumise. Sa résistance varie aussi en fonction de ses propres dimensions, de sa géométrie, de sa température et de la nature physico-chimique du dépôt photoconducteur . En général, un recouvrement ou dépôt de PbS ou de Cds ou CdSe procure une résistance élevée à la température de la pièce (10^4 à $10^9 \Omega$). Par contre la résistance (25°C) des recouvrements de SbIn, de SbAs et de CdHgTe est relativement faible soit entre 10 et 1000 Ω . La figure 2.7 donne un exemple de la variation de la résistivité d'un capteur en fonction de l'éclairement.

Les propriétés de la cellule peuvent être convenablement traduites par un schéma électrique équivalent où la résistance d'obscurité R_{co} est placée en parallèle avec une résistance R_{cp} qui est déterminée par l'effet photoélectrique du flux incident. La valeur de la résistance peut présenter une dérive lente dans des conditions d'emplois extrêmes comme des expositions à des flux importants ou des tensions appliquées élevées. On constate que ce vieillissement est plus marqué pour les matériaux à coefficient de température élevé.

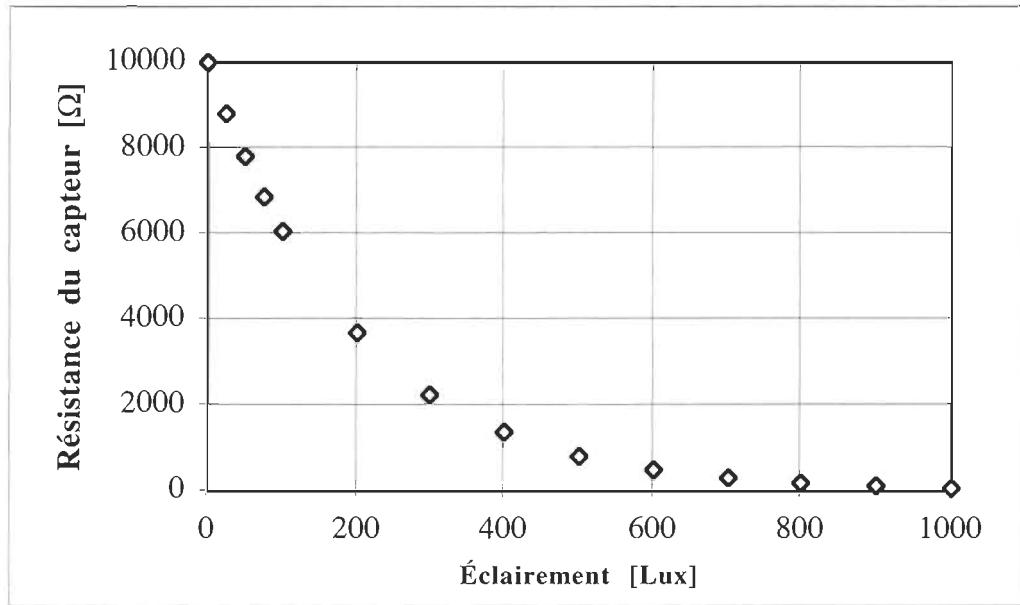


Figure 2.7 Variation de la résistivité d'une photorésistance

En général, l'intérêt des photorésistances réside dans leur simplicité de fonctionnement et leur sensibilité élevée. Ceci conduit à des montages simples et efficaces. Les principaux inconvénients sont les suivants :

1. non linéarité de la réponse en fonction du flux incident ;
2. temps de réponse élevé et faible bande passante ;
3. instabilité des caractéristiques en fonction du vieillissement ;
4. sensibilité thermique importante ;
5. nécessité de refroidissement pour certains types.

2.4.2.2. Photodiode [15]

La photodiode est une cellule photoconductrice à jonction, qui est apparue sur le marché au cours des années 1950. Elle est, comme une diode normale, constituée de deux semi-conducteurs (type P et N). Dans le semi-conducteur de type N, les électrons

excédentaires sont les porteurs majoritaires et les trous sont les porteurs minoritaires. Pour ce qui est du semi-conducteur du type P c'est le contraire. Les trous excédentaires sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. La particularité de la photodiode réside dans le fait qu'il existe sur son boîtier une ouverture transparente qui laisse passer la lumière jusqu'à la jonction. Lorsque la jonction est éclairée par une radiation lumineuse d'une longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons incidents brise les liaisons covalentes et crée des paires électrons-trous. Les électrons libres ainsi créés dans la zone de déplétion sont attirés par la région N. Pour leur part les trous sont attirés par la région P. La résistance inverse de la photodiode décroît et un courant inverse appelé *photocourant* circule. La valeur de ce courant est proportionnelle à l'intensité de l'éclairement. La figure 2.8 montre le montage de la photodiode en mode photoconducteur.

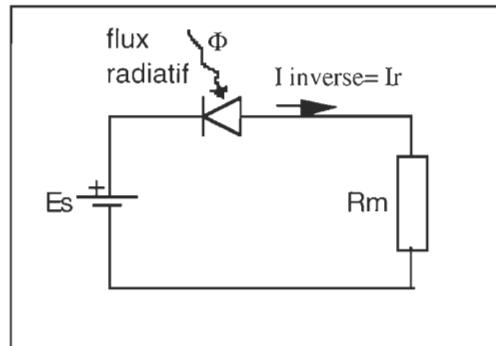


Figure 2.8 Mode Photoconducteur

Comme mentionné antérieurement, il est très important que le rayonnement puisse atteindre la zone de déplétion en traversant, sans atténuation notable, l'élément semi-conducteur éclairé. En effet le flux transmis décroît avec l'épaisseur de la couche de semi-conducteur. Il faut donc, lors de la conception du capteur:

1. minimiser l'épaisseur de la couche de semi-conducteur éclairé afin de transmettre la majeure partie de l'énergie incidente à la zone de déplétion ;
2. maximiser l'épaisseur de la zone de déplétion afin que l'absorption du rayonnement soit maximal.

2.4.2.3. Signal de sortie du détecteur

Peu importe le type de détecteur utilisé (photorésistance ou photodiode) il est contraint dans son opération par la fraction du spectre qu'il reçoit et sa sensibilité spectrale. Il est donc possible de déterminer une forme d'équation pouvant satisfaire les deux types de détecteurs. Cette expression peut être présentée sous la forme suivante :

$$S_{el} = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} S_a(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot E_{\lambda_r} d\lambda \quad (2.14)$$

Cependant comme le spectre est très étroit, il est permis de poser que :

$$S_a(\lambda) = S_a(\lambda_o); K(\lambda) = K(\lambda_o); \epsilon(\lambda, Ta) = \epsilon(\lambda_o, Ta)$$

L'équation (2.14) peut donc être sous la forme finale suivante :

$$S_{el} = S_a(\lambda_o) \times K(\lambda_o) \times \epsilon(\lambda_o, Ta) \times \frac{C_1}{\lambda_o^s \left(\exp \cdot \frac{C_2}{\lambda_o Ta} - 1 \right)} \Delta\lambda \quad (2.15)$$

2.4.3. Pyrométrie à disparition de filament

Il s'agit d'un pyromètre monochromatique ($\lambda_0 = 0.65$ micron) qui superpose deux images dont celle de la cible et de la référence. Dans les faits l'image de référence est celle du filament de tungstène d'une lampe incandescente. Le courant qui chauffe le filament (I_f) est ajusté de façon à ce que sa brillance soit la même que celle de la cible; à ce moment les deux images devraient se confondre.

Un étalonnage préalable au moyen d'un corps noir ($I_f = F(T_n)$) permet connaissant l'émissivité (ϵ) de la cible d'en déduire la température T par calcul. Il est important de noter que cette méthode de mesure comporte une erreur de beaucoup supérieure à celle des autres pyromètres puisqu'elle fait intervenir le jugement de l'opérateur.

2.4.4. Pyrométrie polychromatique (n=2 bichromatique)

Le cas le plus simple de la pyrométrie polychromatique est la pyrométrie bichromatique qui consiste à mesurer le rapport entre les énergies émises par la surface étudiée à deux longueurs d'onde voisines avec la même largeur de bande $\Delta\lambda$. Dans les faits, il est possible de considérer ce type de pyromètre comme étant deux pyromètres prenant la température du même objet mais à des longueurs d'onde différentes.

Les signaux fournis par chaque appareil de mesure sont donnés par la relation (2.15) où:

$$S_{el1} = S_a(\lambda_1) \times K(\lambda_1) \times \epsilon(\lambda_1, Ta) \times \frac{C_1}{\lambda_1^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_1 Ta} - 1 \right)} \Delta \lambda \quad (2.16)$$

$$S_{el2} = S_a(\lambda_2) \times K(\lambda_2) \times \epsilon(\lambda_2, Ta) \times \frac{C_1}{\lambda_2^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_2 Ta} - 1 \right)} \Delta \lambda \quad (2.17)$$

Comme les deux longueurs d'onde sont voisines, il est permis de poser en première approximation que [17] :

$$S_a(\lambda_1) = S_a(\lambda_2) \quad (2.18)$$

$$K(\lambda_1) = K(\lambda_2) \quad (2.19)$$

$$\epsilon(\lambda_1, Ta) = \epsilon(\lambda_2, Ta) \quad (2.20)$$

Le rapport de ces deux équations (2.16 et 2.17) donne la valeur R (2.21) qui n'est fonction que de la température de la pièce.

$$R = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \left(\frac{C_2}{Ta} \times \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right) \quad (2.21)$$

Par la suite, un algorithme de calcul est utilisé pour évaluer la température de la source à partir de la valeur de R. L'expression (2.21) est indépendante de l'émissivité de la source : c'est le principal intérêt de cette méthode de mesure.

2.5. Erreurs sur l'évaluation de la température en pyrométrie optique

Il existe principalement deux types de grandeurs d'influence qui affectent directement l'erreur de température par pyrométrie optique. La première est associée à la méconnaissance de l'émissivité du corps dont on mesure la température. La seconde regroupe les grandeurs d'influences que l'on retrouve dans l'environnement de mesure.

2.5.1. Méconnaissance de l'émissivité exacte

Le flux optique, seule grandeur mesurable par un détecteur infrarouge (photorésistance ou photodiode), est indissociable de l'émissivité (ϵ) d'un corps et de sa température. Il faut donc pour déterminer la température avec exactitude avoir a priori une bonne connaissance de l'émissivité (ϵ).

Par contre, l'émissivité (ϵ) d'un corps réel est fonction de plusieurs paramètres.

Ces principaux paramètres sont :

1. la température du corps ;
2. l'état de surface du corps ;
3. la longueur d'onde du flux émis ;
4. la position à partir de laquelle le corps est observé (ϕ) .

Certaines approximations permettent de simplifier l'évaluation de la valeur de l'émissivité (ϵ). C'est le cas du corps gris où on pose l'hypothèse que l'émissivité est (ϵ) est indépendante de la longueur d'onde ou encore de l'émission isotrope qui fait

l'hypothèse que l'émissivité (ϵ) est constante peut importe la position de l'observateur (ϕ)

. Ces deux hypothèses peuvent même être jumelées afin de considérer que l'émissivité (ϵ) est indépendante de la longueur d'onde et de la position de l'observateur. Dans ce cas on fait l'hypothèse du corps gris à émission isotrope.

Cependant, même en faisant ces hypothèses, il n'en demeure pas moins que l'émissivité est fortement fonction de la température du corps dont on veut mesurer la température et de son état de surface. C'est le cas de la majorité des métaux qui ont, à température ambiante, une émissivité (ϵ) relativement faible et qui à plus haute température s'oxydent et voient leur émissivité augmenter de façon significative. Dans ce cas, si les mesures sont effectuées avec un pyromètre monochromatique, il est possible d'observer une dérive de la température fournie par l'appareil comparativement à la température réelle du corps.

2.5.2. Environnement de mesure

L'environnement de mesure joue aussi un rôle important dans l'exactitude de la prise de mesure. Dans certains cas, il faut tenir compte de l'atténuation du flux optique entre l'objet de mesure et le détecteur. C'est le cas pour la prise de mesure lorsque le rayonnement incident traverse un milieu où il y a des particules en suspension ou encore de la fumée. C'est aussi le cas lorsque la mesure est prise au travers d'une fenêtre ou à proximité d'objet solide qui pourrait bloquer une partie du rayonnement. L'atmosphère est aussi une source d'atténuation. En effet, la présence de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'azote dans l'atmosphère contribue à atténuer le rayonnement infrarouge.

Parmi les grandeurs d'influence qui affectent la mesure de température et qui sont associées à l'environnement de mesure, il y a le rayonnement multiple (voir section 2.4). L'erreur de mesure associée à cette grandeur d'influence est causée par une source externe qui rayonne directement ou indirectement sur le détecteur du pyromètre.

2.6. Caractéristiques et performances des pyromètres optiques

Quoique très différents, les pyromètres disponibles sur les marchés commercial et industriel ont des caractéristiques communes qui permettent de les comparer entre eux et de définir une tendance ou orientation pour chacune de ces caractéristiques.

L'analyse des performances a porté sur 11 modèles de pyromètres provenant de trois grands manufacturiers soit : OMÉGA technologies company, IRCON et AGEMA Infrared Systems. L'annexe A présente les données techniques de cinq des modèles qui ont servis à faire l'analyse comparative. Les résultats de l'analyse sont présentés dans les paragraphes suivants.

2.6.1. Étendue de mesure

L'étendue de mesure est définie comme étant la différence des valeurs extrêmes de la plage du mesurande dans lequel le fonctionnement du capteur correspond à des spécifications préétablies. Les comparaisons au niveau de ce paramètre pour les pyromètres monochromatique et bichromatique a permis de mettre en évidence les points suivants :

1. l'étendue de mesure est, de façon générale, à peu de chose près la même pour les pyromètres à bande étroite (monochromatique) que pour les pyromètres bichromatique (500°C à 2500°C) ;

2. la température minimale ainsi que l'étendue de mesure sont fonction du type de détecteur utilisé ;
3. certains pyromètres monochromatiques permettent la lecture de température inférieure à 0°C, alors que la technologie utilisée pour la conception des pyromètres bichromatiques ne le permet pas ;
4. parmi les 4 types de pyromètres bichromatique repertoriés, la température minimale pouvant être lue est de 250°C³.

2.6.2. Émissivité et réponse spectrale

Les pyromètres à bande étroite offrent généralement la possibilité d'ajuster manuellement l'émissivité servant au calcul de la température de l'objet de mesure. Cette ajustement varie de 0.1 à 1 par pas de 0.01. Par contre certains pyromètres monochromatiques de piètre qualité n'offre pas cette possibilité d'ajustement. Dans ce cas, l'émissivité est souvent préajusté autour de 0.9.

La réponse spectrale des pyromètres est fonction de la gamme de température couverte par l'appareil de mesure. Le tableau 2.3 donne la gamme de lecture des pyromètres en fonction de leur réponse spectrale. Il est important de remarquer que pour des températures élevées, la réponse spectrale est étroite et qu'elle se situe dans le domaine de l'infrarouge court.

• ³ Le prix de cet équipement est légèrement supérieur à 13 500 \$ DCN

TABLEAU 2.3 RÉPONSE SPECTRALE

Compagnie	Modèle	Type	Gamme de température	Réponse spectrale
OMÉGA	OS3701	monochromatique	-50°C à 1000°C	8 à 14 µm
	OS3703	monochromatique	50°C à 600°C	7.9 µm
	OS3706	monochromatique	500°C à 1500°C	3.86 µm
	OS3709	monochromatique	900°C à 3000°C	0.65 µm
	OS1542 / DP1541	bichromatique	900°C à 1800°C	0.9 à 1.06 µm
IRCON	Mirage	bichromatique	550°C à 1000°C	1.55 à 168 µm

2.6.3. Temps de réponse

Le temps de réponse est la spécification qui permet d'apprécier de quelle façon le signal de sortie suit les variations du mesurande. En d'autres termes le temps de réponse peut être défini comme étant le temps qui s'écoule après une variation brusque du mesurande (échelon) jusqu'à ce que le signal de sortie de l'appareil de mesure ne diffère plus de sa valeur finale que d'un certain écart (% de la valeur finale)préétabli.

L'analyse des divers paramètres des pyromètres optiques a permis de constater que ce temps de réponse était de l'ordre de 100 ms à 3 secondes (95% de la valeur finale). L'analyse a aussi permis de constater que le temps de réponse à une incidence importante sur le prix de l'appareil de mesures.

2.6.4. Erreur et répétabilité des mesures

Dans le cadre de ce document, l'erreur⁴ associée à l'appareil de mesure est définie comme étant une erreur systématique [18] et regroupe les erreurs reliées aux grandeurs de référence et aux caractéristiques des composantes de l'équipements de mesures (capteur, conditionneur, interfaces). Cette erreur est définie en fonction de l'unité de meures ou en pourcentage de la lecture de la grandeur mesurée. Pour sa part, la répétabilité est définie comme étant la capacité d'un appareil de mesure à donner le même signal de sortie pour plusieurs mesures effectuées sous les mêmes conditions (même mesurande et même condition de mesure). L'unité de mesure de la répétabilité est un certain pourcentage de la lecture originale ou un pourcentage de la pleine échelle.

L'erreur de mesure des pyromètres optiques est, comme pour tous les appareils métrologiques, soit constante sur la plage de mesure ou fonction de la position de la mesure sur son étendue. L'analyse des paramètres des différents pyromètres montre les deux tendances suivantes:

1. erreur constante de l'ordre de $\pm 2^{\circ}\text{C}$;
2. erreur en fonction de la position de la mesure sur l'étendue ;
 - $\pm 5^{\circ}\text{C}$ de -50°C à 0°C ;
 - $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de 0°C à 200°C ;
 - $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de 200°C et plus.

• ⁴ L'erreur est définie comme étant l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie.

Les données techniques concernant la répétabilité de mesure montre que cette dernière se situe entre $\pm 0.3\%$ à $\pm 1\%$ de la lecture originale ou bien à l'intérieur de $\pm 0.2\%$ de la pleine échelle.

2.6.5. Prix des pyromètres

Le prix unitaire des pyromètres optiques varie de 400 \$ à 15000 \$.⁵ Notre analyse, non exhaustive⁶, montre que certains paramètres ont beaucoup plus d'influences que d'autres sur le prix des pyromètres. Ces paramètres (5) par ordre d'importance sont :

1. type de pyromètre (radiation totale, mono ou bichromatique) ;
 2. le temps de réponse ;
 3. l'erreur de mesure ;
 4. la répétabilité ;
 5. les options ;
- le rapport distance de mesure / dimension du point de mesure ;
 - les interfaces de communication ;
 - la mire de l'appareil (mire / lunette / laser) ;
 - déclenchement d'actions sur point de consigne ;
 - circuit de refroidissement ;
 - portabilité ;
 - émissivité variable ou fixe.

• ⁵ Le prix est en devise canadienne (DCN).

• ⁶ L'analyse est considérée comme étant non exhaustive puisqu'elle n'a porté que sur 11 modèles de pyromètres. Cependant, elle permet tout de même de dégager des orientation.

3. THERMOMÉTRIE PAR CAPTEUR INDUCTIF

3.1. Principe de la mesure par capteur inductif

Le principe sur lequel repose la mesure de température de surface des objets métalliques à l'aide d'un capteur inductif est illustré à la figure 3.1

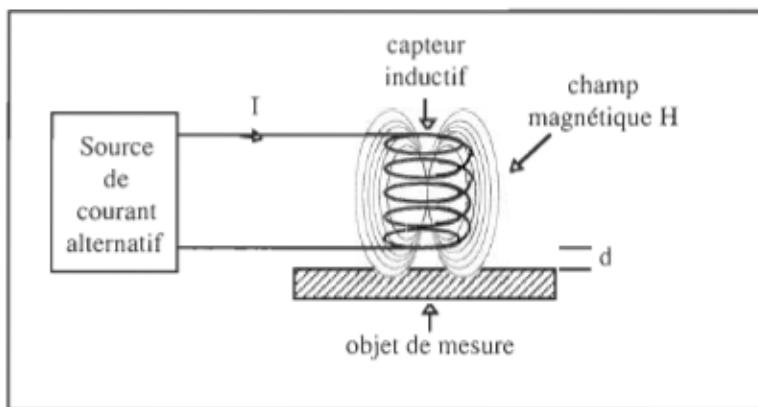


Figure 3.1 Principe de la mesure par capteur inductif

Ce principe de mesure est régit par les mêmes lois que celles qui régissent le chauffage par induction électromagnétique. C'est la raison pour laquelle, tout au long du texte portant sur les principes d'opération du capteur, plusieurs analogies entre les deux procédés seront faites

Un courant I , généré par la source de courant alternatif de fréquence f , circule au travers du capteur inductif et produit un champ magnétique H ou encore un flux

magnétique Φ_m , tous deux proportionnels à la valeur du courant. L'amplitude de ce flux magnétique Φ_m est fonction de la valeur du courant et de la valeur de l'inductance (Lc) dans laquelle il circule. L'expression mathématique du flux magnétique est donnée par la relation suivante [19]:

$$\Phi_m = LI \quad (3.1)$$

où Φ_m est le flux magnétique [wb], L l'inductance [H] et I le courant [A]

Lorsque ce flux Φ_m magnétique entre en contact avec un conducteur métallique, en occurrence l'objet métallique dont on veut mesurer la température, il s'induit à l'intérieur de ce conducteur, des courants appelés courants de Foucault⁷. Ces courants sont en sens inverses de ceux qu'ils les génèrent (loi de Lenz). Plus la fréquence du courant dans le l'inductance augmente, plus le courant parcourant l'objet de mesure a tendance à se concentrer à sa surface. La répartition du courant est montré à la figure 3.2.

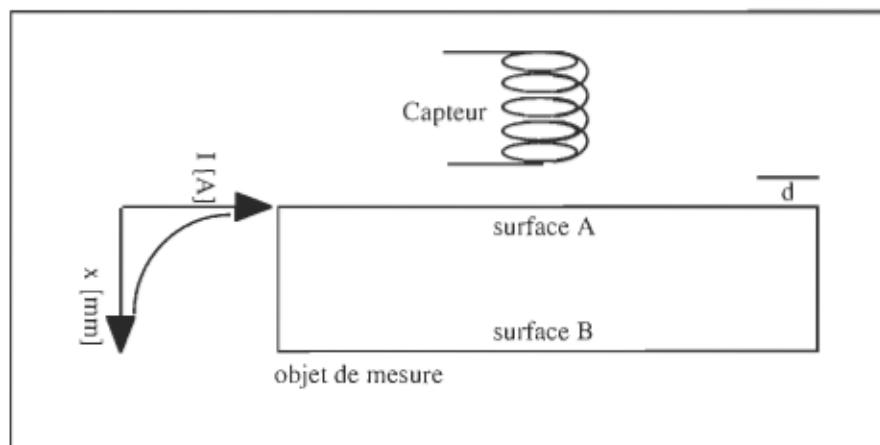


Figure 3.2 Répartition du courant dans l'objet de mesure

• ⁷ L. Foucault : physicien français (1819-1868).

Cette figure montre que le courant décroît de la surface A de l'objet de mesure vers la surface B. On peut montrer qu'en première approximation, en simplifiant les équation de Maxwell, le courant ou la densité de courant décroît de façon exponentielle. Cette décroissance du courant (I) ou de la densité de courant (J) peut donc s'exprimer sous la forme suivante [20]:

$$I_x = I e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (3.2)$$

où I_x est la valeur du courant à la distance x de la surface A et δ une constante appellée profondeur de pénétration qui est entre autre fonction de la fréquence du courant dans le capteur et dans l'objet de mesure. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de peau. La profondeur de pénétration (δ) varie avec la fréquence (f) du courant qui les génère, la résistivité électrique ($\rho(T)$) et la perméabilité magnétique relative ($\mu_r(T)$) du conducteur. Cette pénétration des courants s'exprime en mètre et est définie par l'équation suivante [21]:

$$\delta = 503.3 \sqrt{\frac{\rho(T)}{\mu_r(T) f}} \quad (3.3)$$

Comme mentionné précédemment, lorsque le flux magnétique (Φ_m) produit par le courant circulant dans la bobine, entre en contact avec un conducteur métallique, il s'induit à l'intérieur de ce conducteur, des courants appelés courants induits ou courant de Foucault. La fréquence de ces courants est la même que celle des courants circulant dans la bobine. Lorsque cette fréquence augmente, la valeur des courants induits augmente. Cette dernière augmentation se traduit par une augmentation du champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique produit par la bobine. Cette opposition entraîne une plus ou moins

grande répulsion des lignes de champ magnétique de la bobine. La figure 3.3 illustre ce phénomène [22]

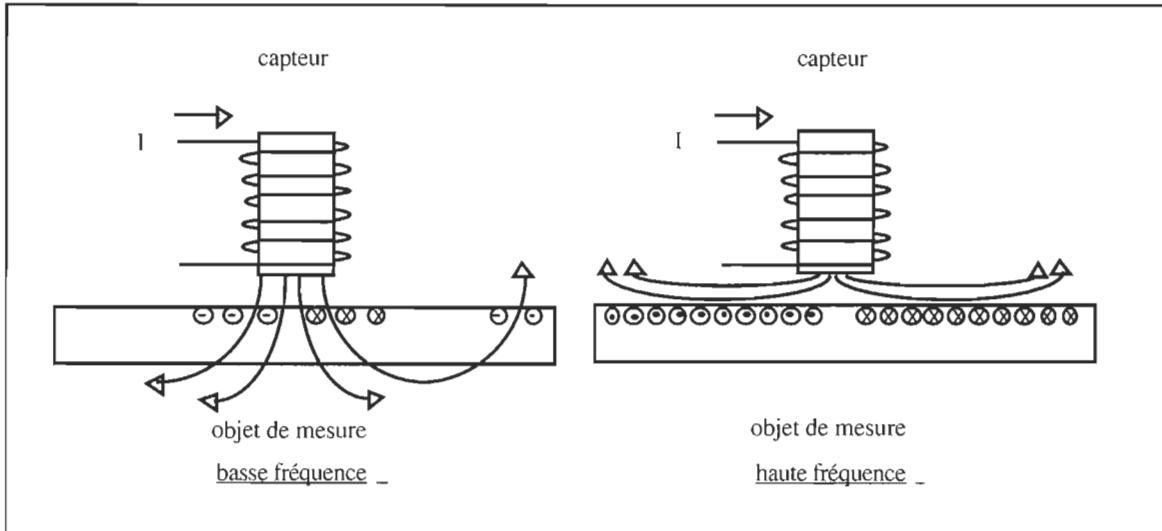


Figure 3.3 Profondeur de pénétration des courants induits

Puisqu'à haute fréquence le champ magnétique pénètre moins profondément dans le conducteur, il s'en suit que la densité de courant en surface (J) croît avec la fréquence.

Le circuit équivalent du schéma présenté à la figure 3.1 est le même que celui qui est utilisé en chauffage par induction électromagnétique [23]. Comme montré à la figure 3.4, ce circuit est composé de la résistance interne du capteur (R_i), de la résistance réfléchie de l'objet de mesure (R_o) et de l'inductance du capteur (L_c)

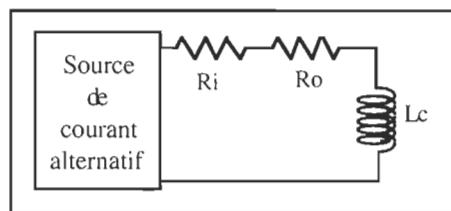


Figure 3.4 Circuit équivalent

L'impédance du capteur (Z_c) vue par la source est donnée par la relation 3.3.

$$Z_c = \sqrt[2]{(Rc)^2 + (\omega Lc)^2} \quad (3.4)$$

où $Rc = Ri + Ro$ (3.5)

La valeur de la résistance interne (Ri) dépend essentiellement de la géométrie du capteur, du matériel utilisé pour sa construction, de sa température et de sa fréquence d'opération. En effet, plus la fréquence d'opération (f) est élevée, plus le courant (I) circule en périphérie du conducteur constituant le capteur ; ce phénomène est appelé effet pelliculaire (skin effect) [24]. Ceci a pour effet d'augmenter la résistance interne (Ri) du capteur. Cependant, dans la mesure où la température du capteur et ses conditions d'opération sont stables, la résistance interne (Ri) du capteur demeure constante.

La valeur de la résistance réfléchie (Ro) dépend, comme dans le cas du capteur, de sa géométrie, de sa composition et de sa température. Elle dépend aussi de la fréquence d'opération du capteur qui a une influence directe sur la profondeur de pénétration (δ) des courants induits. Plus la fréquence d'opération (f) du capteur est élevée, plus les courants induits circulent en surface (voir équation 3.2) de l'objet de mesure et plus la valeur de sa résistance (Ro) est élevée. Comme dans le cas du chauffage par induction électromagnétique [25], la valeur de la résistance réfléchie (Ro) dépend aussi d'un facteur k . Ce facteur est propre à un ensemble géométrique donné, composé du capteur et de l'objet de mesure. Ce facteur k augmente avec la valeur de l'inductance du capteur (Lc) et diminue avec l'augmentation de la distance (d) qui le sépare de l'objet de mesure. Le facteur k est adimensionnel et sa valeur est comprise entre 0 et 1. Il est important de mentionner que dans le cadre de ce mémoire, l'évaluation quantitative de la valeur du

facteur k n'est pas utile. Cependant, la connaissance de son impact sur la valeur de la résistance réfléchie (R_o) est essentielle.

Considérant que les paramètres d'opération du capteur sont fixes et que ce dernier est refroidi de façon à ce que sa température soit stable, il est permis de conclure que la valeur de sa résistance interne est à peu de chose près constante. Il est donc possible d'écrire les relations suivantes:

$$R_c = R_i + R_o (\delta, k) \quad (3.6)$$

$$\text{ou encore} \quad R_c = R_i + R_o (, f, (\rho(T), \mu_r(T), \text{objet de mesure}), k) \quad (3.7)$$

La valeur de l'inductance du capteur (L_c) est décrite par l'équation 3.1. Cette équation met en relation la valeur du flux magnétique (Φ_m) généré par un courant (I) qui circule à travers une inductance (L_c). Par contre, le flux magnétique peut aussi être exprimé par l'équation suivante [26]:

$$\Phi_m = \frac{NI}{\mathcal{R}} \quad (3.8)$$

où N représente le nombre de tours de l'inductance, I , le courant qui y circule et \mathcal{R} , la réluctance. La réluctance (\mathcal{R}) représente l'opposition au passage des lignes de force et est proportionnelle à la longueur du chemin magnétique. Comme montré à la figure 3.5, le chemin magnétique peut être divisé en trois zones. La longueur de la zone 1 est fonction de la hauteur du capteur et de l'amplitude des courants qui y circulent. La longueur de la deuxième zone est fonction de la distance (d) qui sépare le capteur de l'objet de mesure alors que la troisième est fonction de la profondeur (δ) des courants induits.

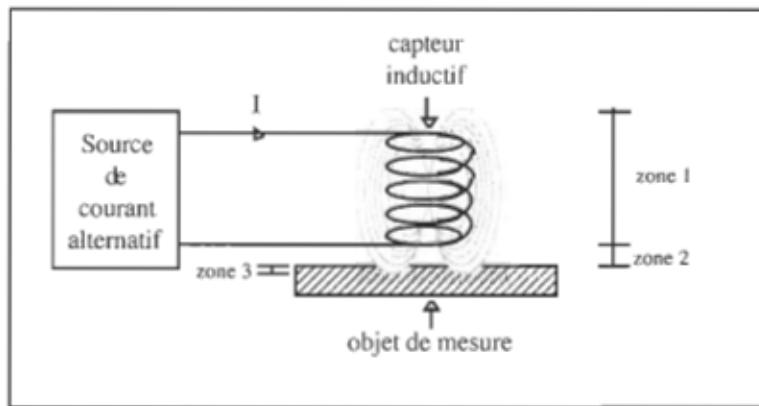


Figure 3.5 Chemin magnétique

Pour un capteur, dans lequel circule un courant d'amplitude donné, la hauteur de la zone 1 est constante. Cependant, les hauteurs des zones 2 et 3 sont fonction des paramètres d'opération. En effet, la longueur totale du chemin magnétique des zones 2 et 3 est fonction de la distance (d) qui sépare le capteur de l'objet de mesure et de la pénétration (δ) des courants induits. Ces constatations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\mathcal{R} = \text{constante} + F(d, \delta) \quad (3.9)$$

En remplaçant la valeur du flux magnétique (Φ_m) dans l'équation 3.6 par sa valeur exprimée à l'équation 3.1 on retrouve :

$$L_c = \frac{N}{R} \quad (3.10)$$

On peut donc, à partir de l'équation précédente, affirmer que la valeur de l'inductance du capteur (L_c) dépend du nombre de tours (N) dont elle est constituée et de la réductance (\mathcal{R}) du chemin magnétique. Excluant les facteurs d'ordre géométriques de l'inductance du capteur comme sa longueur, son rayon, son nombre de tours, on peut écrire que :

$$Lc = g(\mu(T)_{capteur}, d, \delta_{objet de mesure}) \quad (3.11)$$

ou encore $Lc = g(\mu(T)_{capteur}, d, f, (\rho(T), \mu_r(T))_{objet de mesure}) \quad (3.12)$

la valeur de la perméabilité du capteur (μ) étant défini comme étant :

$$\mu = \mu_0 \mu_r_{capteur} \quad (3.13)$$

En substituant les valeurs de Rc (eq.3.5) de Lc (eq.3.10) dans l'équation 3.3 on retrouve les expression suivantes :

$$Z_c = \sqrt[2]{(R_i + R_o(\delta, k)_{objet de mesure})^2 + (\omega Lc(\mu(T)_{capteur}, d, \delta_{objet de mesure}))^2} \quad (3.14)$$

$$Z_c = \sqrt[2]{(R_i + R_o(f, k(\rho(T), \mu_r(T))_{objet de mesure}))^2 + (\omega Lc(\mu(T)_{capteur}, f, d, (\rho(T), \mu_r(T))_{objet de mesure}))^2} \quad (3.15)$$

Considérant que:

1. la mesure de température se fait à fréquence (f) constante;
2. la mesure se fait à distance (d) constante entre le capteur et l'objet de mesure ;
3. la valeur du facteur k est constante pour une installation donnée dont la distance (d) entre le capteur et l'objet de mesure est fixe;

Il est permis de conclure que les variations d'impédance du capteur (Z_c) sont fonction des variations des paramètres suivants :

1. la résistivité électrique de l'objet de mesure ($\rho(T)$) ;

2. la perméabilité magnétique relative de l'objet de mesure ($\mu_r(T)$) ;
3. la perméabilité magnétique du capteur ($\mu(T)$) .

L'ensemble des trois dernières constatations peut s'écrire de la façon suivante :

$$Z_c = P(\mu(T)_{\text{capteur}}, \rho(T)_{\text{obj. mes.}}, \mu_r(T)_{\text{obj. mes.}}) \quad (3.16)$$

Considérant que la perméabilité magnétique du capteur ($\mu(T)$) résulte du produit de la perméabilité magnétique du vide (μ_0), qui est constante en fonction de la température, et de la perméabilité magnétique relative de la cible, qui varie en fonction de la température, il est permis d'écrire de nouveau l'équation 3.15 comme suit :

$$Z_c = M(\rho(T)_{\text{obj. mes.}}, \mu_r(T)_{\text{obj. mes.}}) \quad (3.17)$$

Cette dernière équation laisse entrevoir que l'impédance du capteur est fonction de la température de l'objet de mesure. C'est cette hypothèse que la présente démarche tente de valider.

3.2. Résultats des travaux de Yamada et Al.

La recherche bibliographique a permis de trouver un brevet américain portant le numéro 4,095,469 de 1978 qui décrit l'opération d'un capteur de température sans contact. Le système proposé dans ce brevet est composé d'un oscillateur, d'un capteur inductif (Z), d'une inductance ($Z1$), d'un amplificateur opérationnel et d'un circuit de détection synchrone (détection synchrone et circuit de contrôle de phase). La Figure 3.6 montre les principales composantes du système présenté dans le brevet américain.

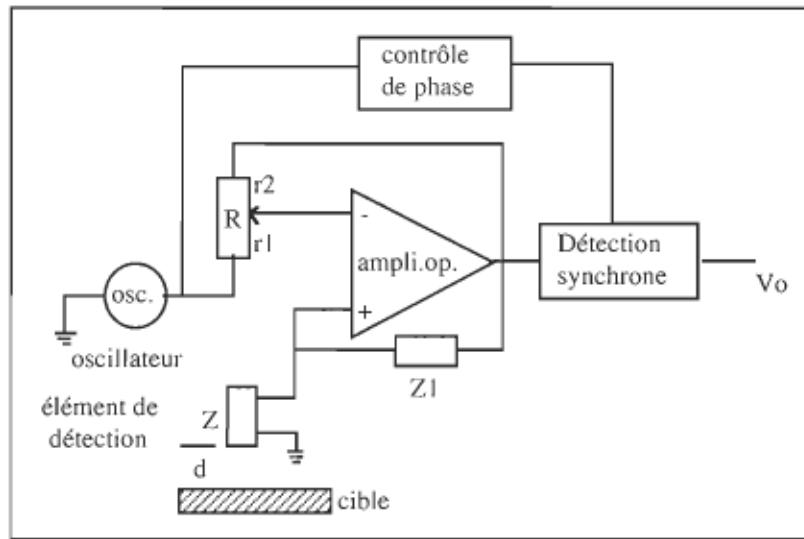


Figure 3.6 Composantes du système de mesure proposé dans le brevet 4,095,469

Ce schéma électrique peut de nouveau être présenté comme indiqué à la figure 3.7.

Le capteur (Z) composé d'une inductance voit son impédance ($R+j\omega L$) changer en fonction de la température (T) de la cible et de la distance (d) qui les séparent. En fonction de ces deux paramètres, le gain (A) de l'amplificateur opérationnel, varie comme suit :

$$A = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\beta_n}{1 - \frac{Z(T,d)}{Z_1} \times (1 - \beta_n)} \quad (3.18)$$

où β_n est le gain en boucle ouverte de l'amplificateur (r_2/r_1)

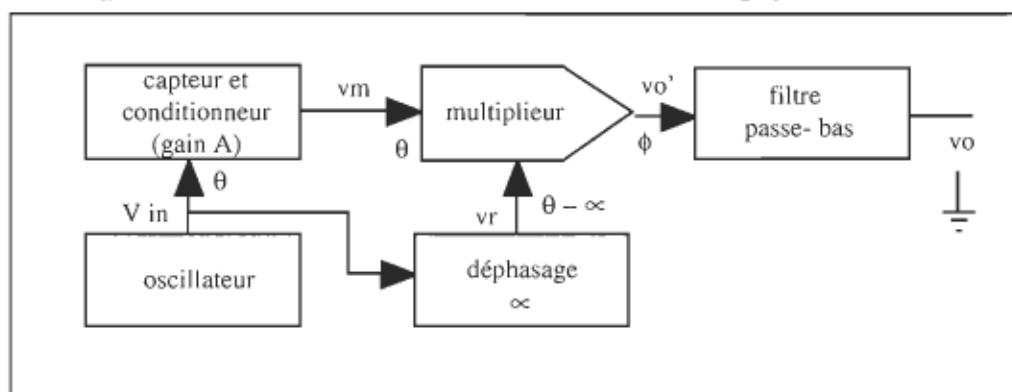


Figure 3.7 Représentation simplifiée de la Figure 3.6 [27]

Par la suite, le signal à la sortie du conditionneur est multiplié par un signal de même fréquence avec un certain déphasage. Ce second signal est obtenu en faisant passer le signal de l'oscillateur à travers un réseau de déphasage. En plus de créer un certain retard, ce réseau a aussi pour fonction d'écrêter le signal.

Le résultat de la multiplication est un signal modulé en amplitude avec une porteuse dont la fréquence est égale à celle de l'oscillateur. Pour sa part le signal modulant (enveloppe) contient l'information recherché soit un signal électrique représentant la variation du mesurande. Pour démoduler ce signal il suffit d'utiliser un filtre passe bas qui coupe les hautes fréquences et qui laisse passer l'information

Ainsi la fonction de transfert totale de l'appareil de mesure est

$$V_0 = \frac{\beta_n}{1 - \frac{Z(T,d)}{Z_i - Z(T,d)} \times (1 - \beta_n)} \times \cos(\phi) \times V_{in} \quad (3.19)$$

ou encore

$$V_0 = A \times \cos(\phi) \times V_{in} \quad (3.20)$$

où : $\phi = \theta - \alpha$

Comme mentionné dans le brevet, la mesure de température est basée sur une variation d'impédance. Cependant, le brevet ne mentionne pas comment l'appareil de mesure peut discriminer une variation de distance d'une variation de température alors que tous les deux ont une influence très importante sur l'impédance du capteur. De plus, le brevet présente des résultats d'essais alors que la température maximale de la cible n'est que de 150 °C. À cette température, le rayonnement imposé au capteur est faible et n'occasionne pas de surchauffe du capteur. Finalement, le système de mesure requiert une

seconde inductance qui n'est pas soumis la variation de température. La réelle utilité de cette seconde inductance n'est pas clairement indiquée dans le brevet.

3.3. Objectifs du projet

Les travaux qui ont été entrepris dans le cadre de ce mémoire, avaient pour but d'étudier la faisabilité d'utiliser un capteur inductif afin de faire la mesure de température de surface des objets métalliques. L'utilisation de ce type de capteur devrait permettre de rencontrer les caractéristiques thermométriques suivantes :

1. mesure sans contact avec l'objet de mesure ;
2. mesure indépendante de l'émissivité de l'objet de mesure ;
3. mesure indépendante de la distance entre le capteur et l'objet de mesure (1 à 5 mm) ;
4. plage de mesure de 50°C à 400°C.

De plus, pour que la faisabilité soit démontrée, certains critères de performances ont été établis. Ces critères touchent l'erreur et la répétabilité de mesure. Compte tenu du fait que dans le cadre de ce mémoire aucun traitement des données (filtrage) n'est effectué avant leur utilisation, la répétabilité de mesure est fixée à ± 2 fois la valeur de l'écart type par rapport à la moyenne. Pour sa part, l'erreur absolue maximale a été établie à $\pm 10^\circ\text{C}$ et l'erreur absolue moyenne à $\pm 5^\circ\text{C}$.

Les principaux avantages de la méthode de mesure proposée dans le cadre de ce mémoire par rapport à celle proposée dans le brevet américain 4,095,469 sont les suivants. La méthode de mesure proposée dans ce mémoire ne requiert qu'une seule inductance alors que la méthode proposée dans le brevet américain en requiert deux : une

inductance pour la mesure de température et une seconde non exposée au mesurande et servant de référence. De plus, le conditionneur utilisé dans le brevet américain est purement analogique, alors que celui proposé dans ce mémoire est de type numérique. Les résultats provenant des conditionneurs numériques sont en général moins affectés par le vieillissement des composantes et le temps de mise en marche.

La méthode de mesure proposée dans ce mémoire est particulièrement bien adaptée à la mesure de température de surface des objets métalliques en défilement , en rotation, en translation. À titre d'exemples citons les chaînes de production de barres métalliques (objet métalliques en défilement) où l'on doit mesurer leur température avant chaque étape de laminage ou encore le contrôle de température des calandres des machines à papier (cylindre métallique en rotation).

C'est aussi le cas lorsque l'on fabrique des cylindres de diverses dimensions à partir d'une plaque d'acier donnée. Dans ce cas, il faut joindre deux côtés parallèles d'une même plaque à l'aide d'un joint de soudure. À la fin de cette opération, le cylindre ainsi formé doit passer une ou plusieurs étapes de revenus. Pour s'assurer que l'étape de revenu a été correctement effectuée à l'intérieur du four, il faut mesurer la température du cylindre et ce en même temps qu'il se déplace sur un convoyeur (objet métallique en translation).

4. MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le but du montage expérimental est de permettre de valider la faisabilité d'utiliser un capteur inductif pour la mesure de température de surface des objets métalliques. Plus précisément, il doit permettre de :

1. chauffer une plaque métallique (objet de mesure) selon des critères préétablis ;
2. mesurer, de façon discrète, la résistance (R_c), l'inductance (L_c) et les températures du capteur (T_1 et T_2) à différentes fréquences (50 kHz, 100 kHz et 150 kHz) ;
3. mesurer, de façon discrète, la température de la plaque métallique (T);
4. d'enregistrer les paramètres mesurés (T , R_c , L_c , T_1 , T_2) selon une période d'échantillonnage prédéterminée ;
5. ajuster précisément la distance (d) entre le capteur et l'objet de mesure (plaque métallique en acier inoxydable 340L).

La figure 4.1 illustre les principales fonctions du montage expérimental et montre les liens qui existent entre chacune de ces fonctions. Les paragraphes qui suivent la figure 4.1 décrivent les divers composantes du schéma blocs.

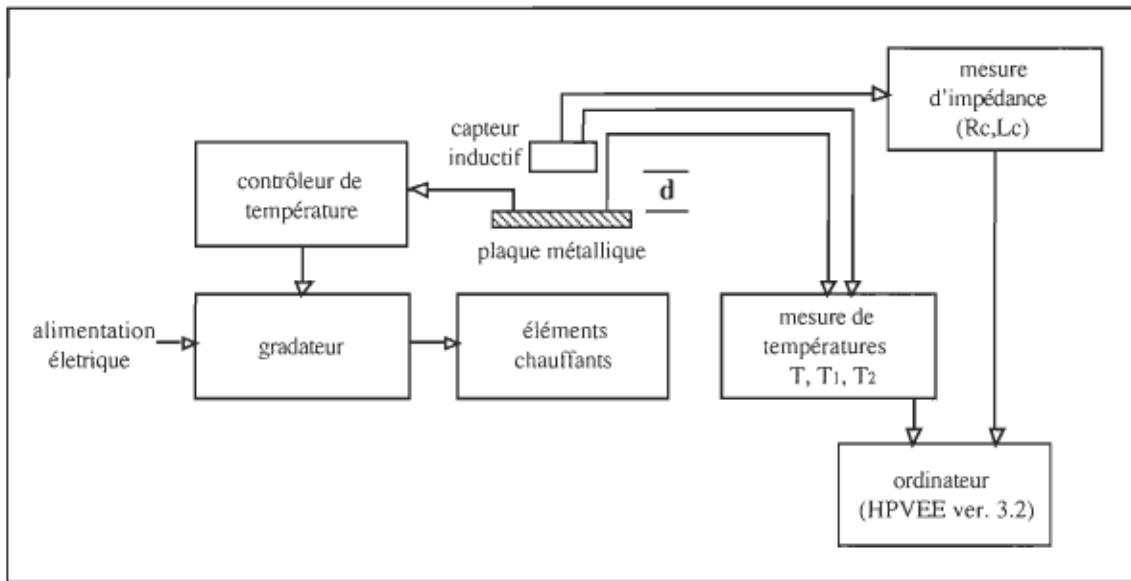


Figure 4.1 Diagramme bloc du montage expérimental

4.1. Capteur inductif

4.1.1. Capteurs inductifs industriels

Les capteurs inductifs que l'on retrouve sur le marché industriel (voir caractéristiques à l'annexe B) sont généralement destinés à la mesure de déplacement ou la détection de proximité d'objet métallique. Ces capteurs ont, sauf quelques exceptions, une valeur inductive relativement élevée et un facteur de qualité de l'ordre de 10 à une fréquence de 50 kHz. Ils sont robustes et peuvent donner une sortie analogique de type voltage (0-10 Vdc) ou encore de type courant (4 à 20 mAcc) ou bien une sortie munie d'un contact (normalement ouvert ou normalement fermé). Cependant, ce type de capteur possède une plage de température d'opération relativement restreinte. En général, la température maximale est de l'ordre de 75°C : donc bien en deçà des limites d'opération fixées à la section 3.3.

4.1.2. Conception préliminaire et simulations sur Flux2D^{MC}

À la suite de cette constatation sur la contrainte de température, une conception préliminaire d'un capteur répondant aux besoins de l'expérimentation a été entreprise. Une vue de coupe de cette conception préliminaire est présentée à la figure 4.2.

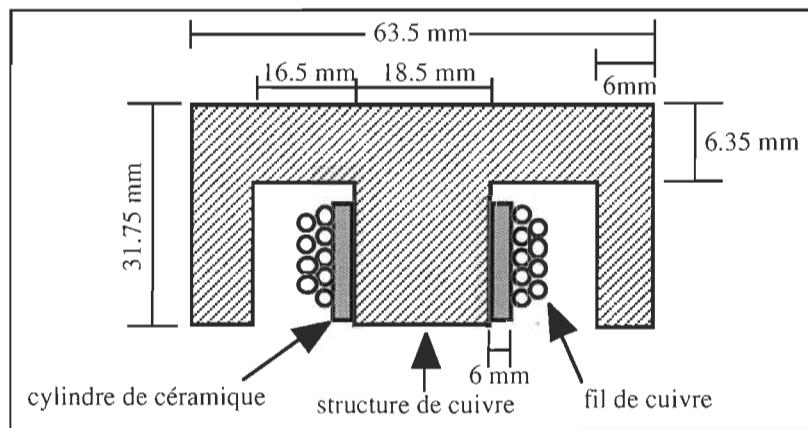


Figure 4.2 Vue de coupe du capteur à structure de cuivre

Cette figure montre une inductance composée de plusieurs tours de fil de cuivre et montée sur un mandrin de céramique, le tout installé à l'intérieur d'une structure de cuivre. Les propriétés électriques et magnétiques du cuivre, permettent d'orienter les lignes de champ magnétique vers la plaque d'acier standard 1008 servant d'objet de mesure. En effet, comme la résistivité du cuivre (ρ) et sa perméabilité magnétique relative (μ_r) sont faibles, la profondeur de pénétration des courants induits (δ) est faible d'où une augmentation de la densité de courant en surface de la structure de cuivre et une répulsion des lignes de champ magnétique (voir section 3.1). Comme les lignes de champ magnétique se voient repousser par la structure de cuivre, elles se voient diriger vers la plaque d'acier qui sert d'objet de mesure (voir résultats des simulations à l'annexe C).

Avant de réaliser physiquement ce capteur des simulations sur Flux2D^{MC} ont été entreprises afin de valider le concept de mesure de température. Ces simulations ont été réalisées avec les spécifications présentées dans le tableau 4.1. La figure 4.3 montre une vue d'ensemble des composantes qui ont été intégrées dans les simulations.

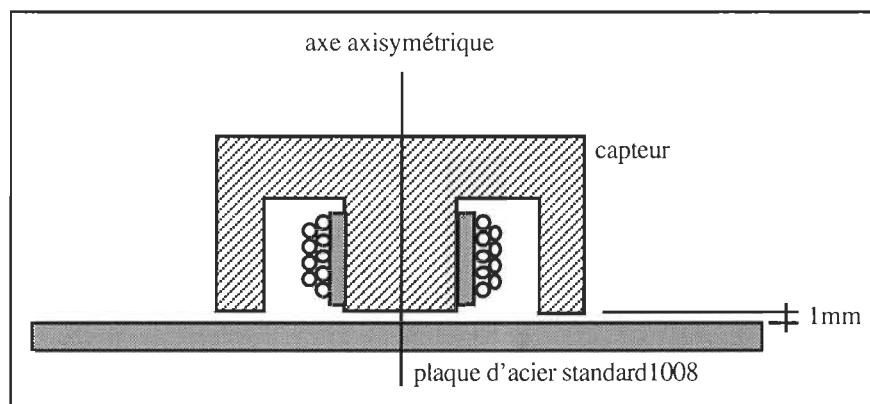


Figure 4.3 Vue d'ensemble des composantes de la simulation

TABLEAU 4.1 PARAMÈTRES DE SIMULATION

Type de simulation	magnétique, axisymétrique
Nombre de tours composant l'inductance	100 tours
Courant circulant dans l'inductance	0.1 ampère à 100 kHz
Température de l'objet de mesure	50 à 500°C
Température de la structure en cuivre	50 °C
Distance entre le capteur et l'objet de mesure	1 mm

Il est très important de noter que ces simulations ne tenaient pas compte des échanges thermiques par conduction entre la structure du capteur et l'inductance et des échanges radiatifs entre l'objet de mesure et le capteur (structure et inductance). Ces simulations n'avaient pour but que de valider qualitativement les variations d'inductance en fonction de la température de l'objet de mesure à une distance fixe de 1 mm. De plus, le logiciel de simulation ne permettait pas d'estimer les variations de résistance du capteur en fonction de la température de l'objet de mesure.

Les résultats des simulations ont montré que la valeur de l'inductance augmentait en fonction de la température de l'objet de mesure. Dans les faits, comme montré à la figure 4.4, la valeur de l'inductance est passée de 126 μH à 131 μH alors que la température de la plaque d'acier inoxydable est passée de 50 à 500°C.

Ces simulations ont aussi permis de visualiser l'évolution de la pénétration (δ) du champ magnétique à l'intérieur même de l'objet de mesure en fonction de sa température. Au fur et à mesure que la température de l'objet de mesure augmente, la pénétration du champ magnétique augmente. Les résultats de ces simulations sont présentés à l'annexe C.

Après une brève analyse des résultats, le capteur présenté à la figure 4.2 a été fabriqué et des essais préliminaires ont été menés. Quoique d'un point de vue purement magnétique, le capteur fonctionnait bien (simulations avec Flux2D), des essais préliminaires ont démontré que les échanges thermiques par conduction et radiation , entre la structure du capteur et l'inductance, et par radiation, entre le capteur et l'objet de mesure, jouaient un rôle important dans la mesure de température de l'objet de mesure et la

rendait difficile. Il en aurait été tout autrement si la structure du capteur et le conducteur formant l'inductance avaient été refroidis.

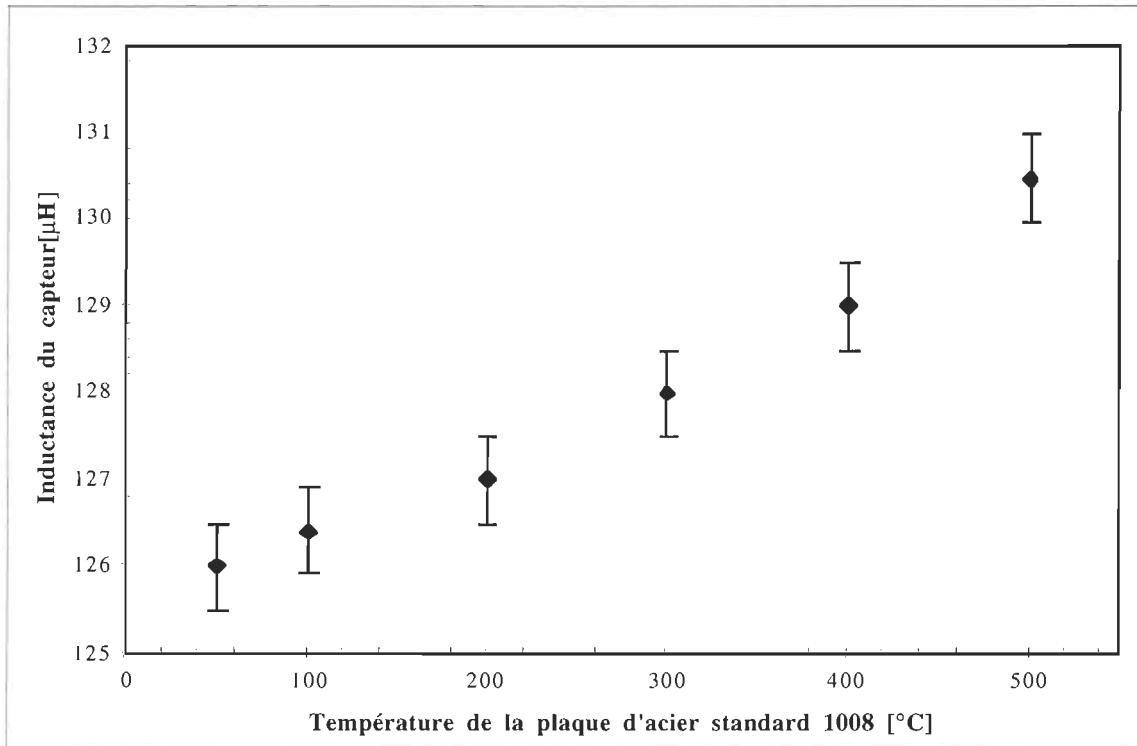


Figure 4.4 Inductance du capteur en fonction de la température de la plaque d'acier standard

4.1.3. Critères de conception du capteur

Il a donc fallu, dans le cadre de ce mémoire, concevoir un deuxième capteur de petites dimensions et répondant aux exigences suivantes :

1. une inductance élevée pour favoriser une valeur élevée du facteur k ;
2. une faible valeur de la résistance interne (R_i) pour que les variations de résistance réfléchie (R_o) dues aux changements de température de l'objet de mesure soient significatives ;

-
3. une bonne tenue en température pour répondre aux exigences de la section 3.3 ;
 4. une faible inertie thermique pour favoriser un faible temps de réponse et contrer les effets constatés lors des essais avec le premier capteur (section 4.1.2) ;
 5. une bonne robustesse mécanique.

La valeur de l'inductance recherchée doit, comme mentionné précédemment, être la plus élevée possible afin d'augmenter la valeur du facteur k. Pour sa part, la valeur de la résistance interne du capteur (R_i) doit être la plus faible possible afin de faciliter la lecture des variations de résistance vue par le capteur (R_o) causées par les variations de température de l'objet de mesure.

La température maximale que peut supporter le capteur en opération représente aussi un aspect important à considérer. Pour les essais, cette température maximale a été fixée à 500°C. Il a donc fallu trouver un revêtement pouvant supporter cette température et étant capable de créer, sur une faible épaisseur (1à 3 mm), une certaine isolation thermique afin d'éviter un surchauffe du capteur. L'inertie thermique du capteur revêt aussi un aspect important. Elle affecte directement son temps de réponse : plus l'inertie thermique est grande plus le temps de réponse est long. Pour diminuer l'inertie thermique du capteur, il faut utiliser des composantes de petites dimensions et possédant, à l'exclusion du revêtement, une conductivité thermique élevée afin de dissiper rapidement l'énergie qui pourrait s'y être accumulée.

Pour ce qui est de la robustesse mécanique, aucun critère (vibration, compression, torsion, etc.) n'a été imposé lors de la construction du capteur. Cependant, le revêtement entourant le capteur doit offrir une assez grande rigidité mécanique pour permettre son déplacement lors des essais de laboratoire.

4.1.4. Conception du capteur

Le capteur fabriqué pour les essais de faisabilité est composé d'un tuyau de cuivre de 3.175 mm de diamètre et disposé en spirale sur un même plan. Cette configuration est mieux connue sous le nom de " Tapis de chat ". Une vue de profil du capteur est présentée à la figure 4.5.

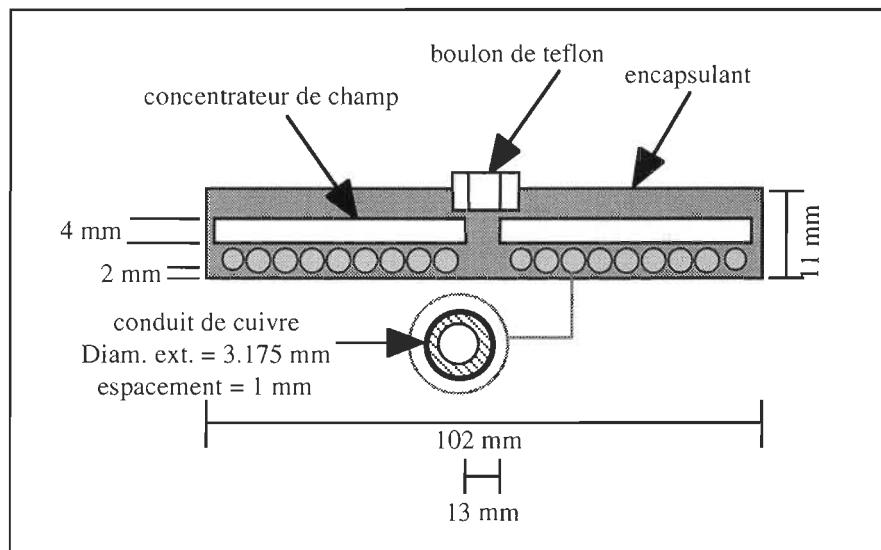


Figure 4.5 Vue de profil du capteur

L'utilisation d'un tuyau de cuivre comme conducteur, permet de refroidir le capteur lorsque ce dernier est exposé à la source de chaleur constituée par l'objet de mesure. Ce refroidissement améliore la tenue en température du capteur ainsi que son temps de réponse. Le fait d'utiliser un tuyau de cuivre n'a pratiquement pas d'influence sur la résistance haute fréquence ($R_{C_{HF}}$) [28] du capteur par rapport à ce qu'elle aurait été si le capteur avait été composé d'un conducteur plein. À haute fréquence, le courant, dans le capteur, circule principalement en périphérie du conducteur qui le transporte. Ce phénomène, appelé *effet pelliculaire*, augmente avec la fréquence du courant [29]. Ainsi à

50 kHz, la pénétration du courant dans le conducteur de cuivre plein aurait été de 0.29 mm ce qui est largement inférieur à l'épaisseur de la paroi du conduit utilisé qui est de 0.587 mm.

Notons de plus, que l'utilisation d'un conducteur composé d'un ou plusieurs brins n'aurait pas permis (pour un même volume) d'augmenter le nombre de tours constituant l'inductance et ainsi permis d'augmenter sa valeur. En effet, pour obtenir la même tenue en température, il aurait fallu utiliser un conducteur électrique de type haute température servant au bobinage des moteurs. Ces conducteurs fournis par la compagnie MGS ont un diamètre externe minimal (voir annexe E) de 4.6 mm alors que le diamètre externe du conduit est de 3.17 mm.

La valeur de l'inductance formée de 10 tours de conduit de cuivre était de 0.78 μH . Pour augmenter cette valeur et ainsi rencontrer les critères de conception décrits à la section 4.1.1, des concentrateurs de champs (nickel zinc) fournis par la compagnie Fluxtrol, ont été installés à une distance de 1.5 mm au dessus de la surface du capteur. L'ajout de ces concentrateurs (5) de champ a permis d'augmenter la valeur de l'inductance de façon appréciable pour atteindre 3.4 μH à 1 kHz.

Deux thermocouples ont été installés sur le capteur avant que ce dernier soit recouvert du revêtement. La figure 4.6 montre la position de ces thermocouples. L'utilisation des thermocouples de type K permet de suivre, lors des différents essais, l'évolution en température du conduit de cuivre et d'un des concentrateurs de champ.

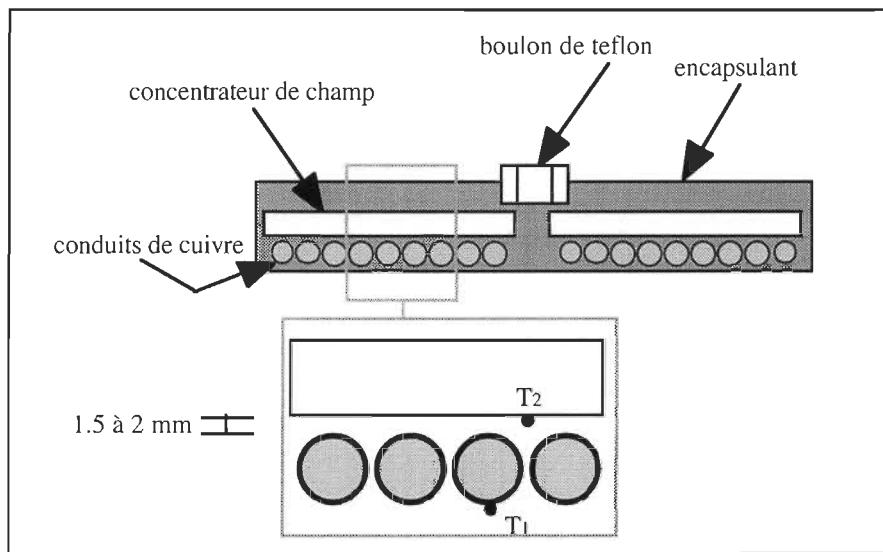


Figure 4.6 Position des thermocouples T_1 et T_2

Le revêtement qui a servi à recouvrir le capteur, les concentrateurs de champ ainsi que les thermocouples est une céramique en poudre fournie par la compagnie Cotronix. Cette poudre, dont les caractéristiques sont présentées à l'annexe E, permet d'atteindre une bonne rigidité mécanique et peut être exposé à une source de chaleur de plus de 1600°C sans que ses propriétés soient modifiées. Les figures 4.7 et 4.8 montrent des photos du capteur conçu pour les essais alors que la tableau 4.2 donnent les principales caractéristiques physiques du capteur.

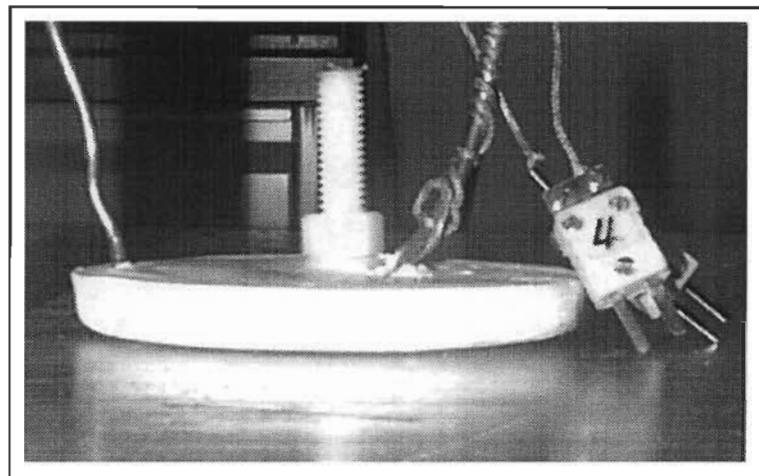


Figure 4.7 Vue de profil du capteur

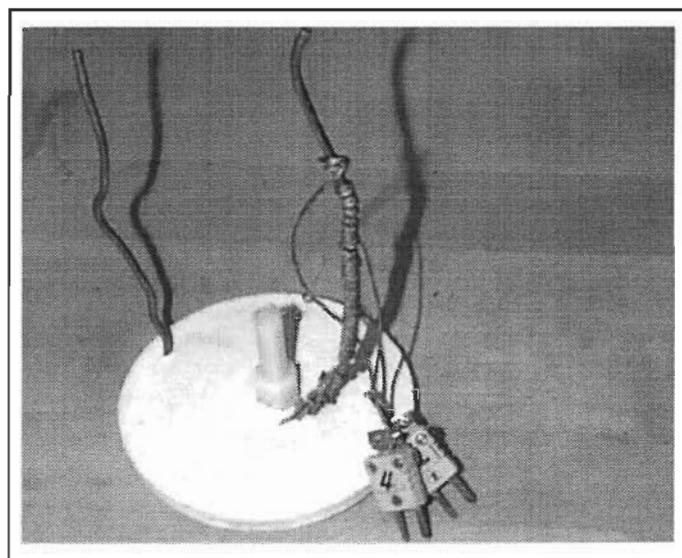


Figure 4.8 Vue en plongée du capteur

TABLEAU 4.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU CAPTEUR

Forme du capteur	spirale (tapis de chat)
Diamètre externe [mm]	102 mm
Épaisseur [mm]	11 mm
Masse [kg]	0.168 kg

4.1.5. Caractérisation du capteur

Avant même de penser à utiliser ce capteur à des fins d'essais, il est important de bien le caractériser. Pour ce faire, le capteur a été placé sur une plaque de polypropylène (15.5 cm (H) x 60 cm (L) x 60 cm (P)) et a été éloigné de toute surface métallique qui aurait pu modifier son comportement. Par la suite, le capteur a été relié à un appareil permettant de mesurer son impédance en fonction de la fréquence. Les mesures d'impédance ont été effectuées à température ambiante (22°C). Les résultats de cette analyse sont présentés sous forme de graphiques aux figures 4.9 et 4.10.

La figure 4.9 permet de voir l'effet de la fréquence sur la valeur de la résistance du capteur. L'augmentation de résistance est due au fait qu'à plus haute fréquence, la majorité du courant ne circule que dans une certaine épaisseur du conduit à partir de la surface de ce dernier. Dans les faits, près de 90% du courant ne circule que dans une épaisseur égale à deux fois la profondeur de pénétration (δ). Cette profondeur de pénétration (δ) est définie comme :

$$\delta = 503.3 \sqrt{\frac{\rho(T)}{\mu_r(T) f}} \quad (4.1)$$

où μ_r est la perméabilité magnétique relative du conducteur et ρ , la résistivité du conducteur [$\Omega \cdot m$]. Dans le cas du cuivre, la valeur de la perméabilité magnétique relative est égale à l'unité [30] alors que sa résistivité à 20°C est de $17.2 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ [31]

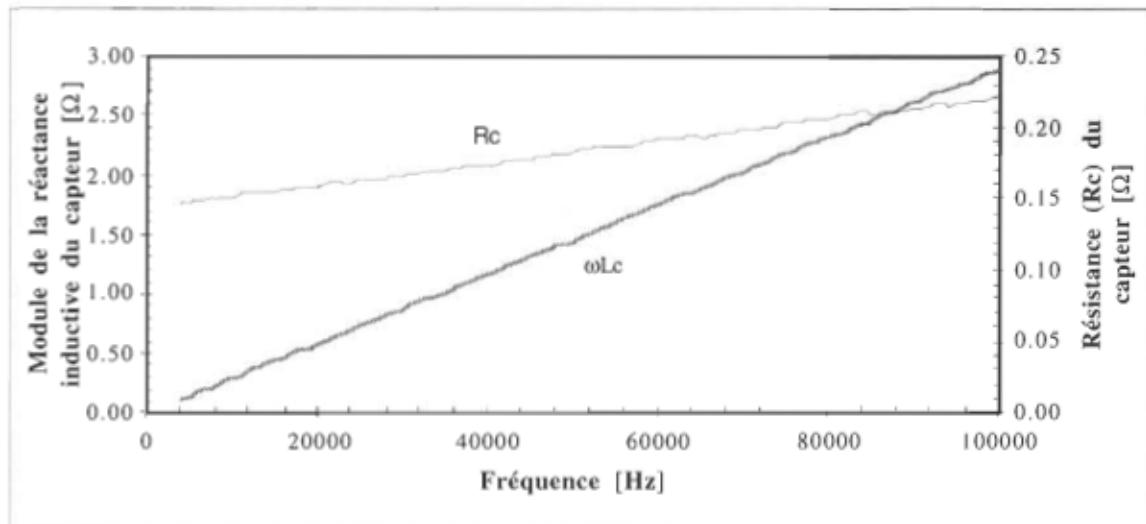


Figure 4.9 Résistance et réactance inductive du capteur en fonction de la fréquence

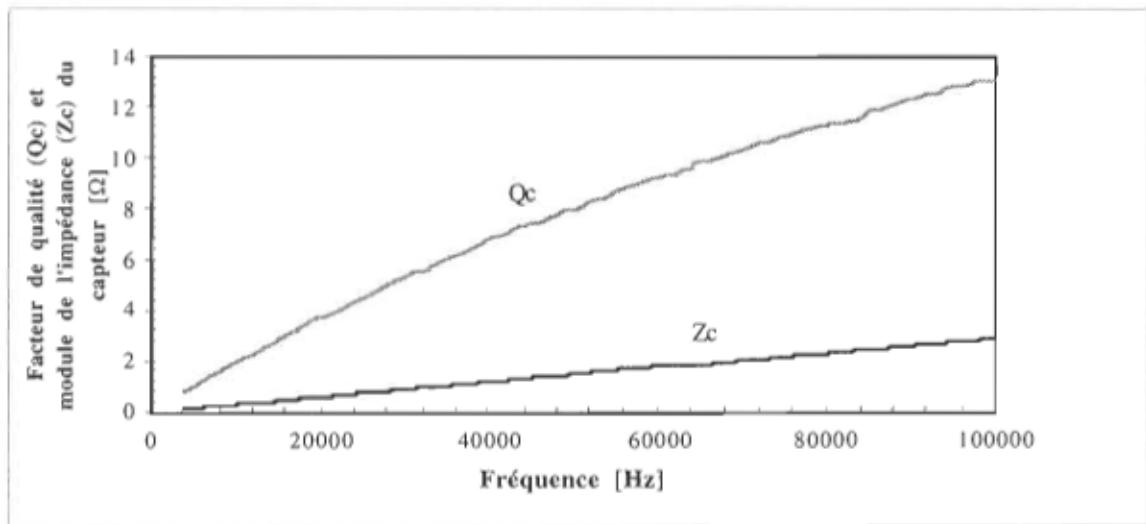


Figure 4.10 Module de l'impédance et facteur de qualité du capteur en fonction de la fréquence

4.2. Objet de mesure

Quatre métaux ont été retenus lors de la première phase de recherche visant à trouver un matériel pour l'objet de mesure. Ces métaux étaient l'aluminium (série 600), l'acier standard (acier 1008), la fonte grise et l'acier inoxydable (304L). Le principal critère qui a servi à la sélection du matériel constituant l'objet de mesure était la connaissance exacte de ses propriétés électriques (résistivité) et magnétiques (perméabilité magnétique relative) en fonction de sa température. Après analyse des données alors disponibles, l'acier inoxydable 304 L a été sélectionné.

L'acier inoxydable 304 L est un acier austénitique [32] composé de 0.08% de carbone, de 19% de chrome et de 9% de nickel. L'une des particularités de ce type d'acier qui a favorisé sa sélection est le fait qu'il soit considéré comme étant un acier diamagnétique. Sa perméabilité magnétique relative est donnée par la relation suivante [33] :

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (4.2)$$

où χ est la susceptibilité magnétique de l'acier. Cette susceptibilité magnétique est indépendante de la température et est, pour l'acier inoxydable 304L, faible et négative. La valeur de la susceptibilité magnétique pour l'acier inoxydable de 304 L est [34] :

$$\chi_{304L} = -1.36 \cdot 10^{-5}$$

Comme la susceptibilité de l'acier inoxydable 304L est indépendante de la température, on peut conclure que la perméabilité magnétique est aussi constante. De plus, tenant compte du fait que la valeur de la susceptibilité est très inférieure à l'unité, on peut considérer que la valeur de la perméabilité magnétique de l'acier inoxydable (μ_r 304L) est

unitaire. Cette dernière particularité a comme principal avantage de ne faire dépendre l'impédance du capteur que de la résistivité de l'objet de mesure (voir section 3.1 équations 3.6 à 3.14).

La conductivité thermique (K_{304L}) et la résistivité électrique (ρ_{304L}) de l'acier inoxydable 304L varient linéairement avec sa température. Les expressions suivantes donnent les relations qui existent entre ces paramètres et la température (T) de l'acier inoxydable. Les caractéristiques physiques de l'objet de mesure constitué par la plaque d'acier inoxydable 304L sont présentées dans le tableau 4.3.

$$\rho_{304L} = 1.10^{-8} (70.2 + (6.69 \cdot 10^{-2} T)) \quad (4.3)$$

$$K_{304L} = 14.5 + (1.40 \cdot 10^{-2} T) \quad (4.4)$$

TABLEAU 4.3 CARACTÉRISTIQUE DE L'OBJET DE MESURE

Type d'acier	Acier inoxydable 304L
Largeur [mm]	305 mm
Profondeur [mm]	305 mm
Épaisseur [mm]	7 mm
Masse [kg]	5.818 kg

4.3. Système de chauffage et de contrôle de la température

Le système de chauffage et de contrôle de la température de l'objet de mesure doit permettre de faire une montée en température linéaire de 20°C à 400°C en un maximum de

trois minutes. Le système de chauffage et de contrôle conçu pour les essais est illustré à la figure 4.11.

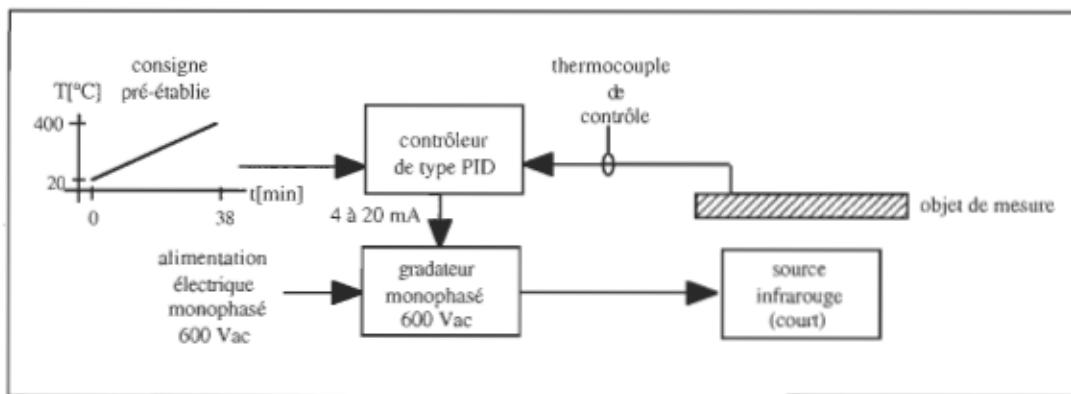


Figure 4.11 Système de chauffage et de contrôle de température de l'objet de mesure

Le contrôle requis pour la régulation de température de surface de la plaque d'acier inoxydable (T_{cons}) est effectué à l'aide d'un contrôleur de la compagnie Eurotherm (Série 900). Ce contrôleur possède deux entrées de type thermocouples ainsi que deux sorties. La configuration de ces dernières est fait en usine et peut prendre différentes formes (contact sec, 0-10 Vcc, 4 à 20 mAcc). Ce contrôleur possède aussi un espace mémoire afin de programmer différents types de consignes. Dans le cadre des essais de laboratoire, la consigne programmée était de type rampe (voir figure 4.8) et avait une pente de $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$.

Le thermocouple de contrôle fixé à la plaque d'acier (fusion par point) et branché à une des entrées du contrôleur permet à ce dernier d'évaluer la température de l'objet de mesure, de la comparer avec la valeur de la consigne et de fournir un signal de rétroaction proportionnel à l'écart entre ces deux valeurs. Le signal, sous forme d'un courant de 4 à 20 mAcc, alimente un gradateur monophasé de 600 Vca et d'une capacité nominale de 50 ampères. Ce gradateur de la compagnie *Phasetronics* possède une entrée de contrôle de type courant (4 à 20 mAcc) et joue sur la phase (angle d'amorçage des thyristors) du

signal d'entrée (600 Vca) afin de moduler la puissance de la source infrarouge reliée à sa sortie. Les caractéristiques de la source infrarouge, montrée à la figure 4.12 et utilisée lors des essai, sont données dans le tableau 4.4.

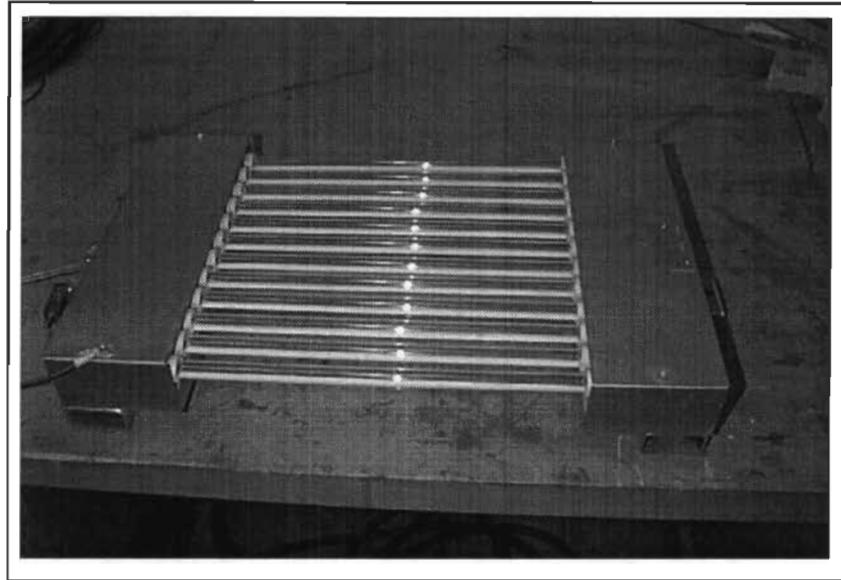


Figure 4.12 Source infrarouge

TABLEAU 4.4 CARACTÉRISTIQUES DE LA SOURCE INFRAROUGE

Alimentation	600 Vac 1φ
Puissance électrique [W]	8840 Watts
Nombre d'éléments tubulaire	12
Dimensions [cm] / surface [m ²]	31.75 cm x 31.75 cm / 0.1 m ²

Des essais ont démontré que pour que la température de la plaque d'acier soit uniforme sur la plus grande partie de sa surface, la distance la séparant de la source infrarouge devait être d'au minimum de 8.5 cm. Sous cette condition la température de la plaque d'acier était uniforme et avait le profil montré à la figure 4.13.

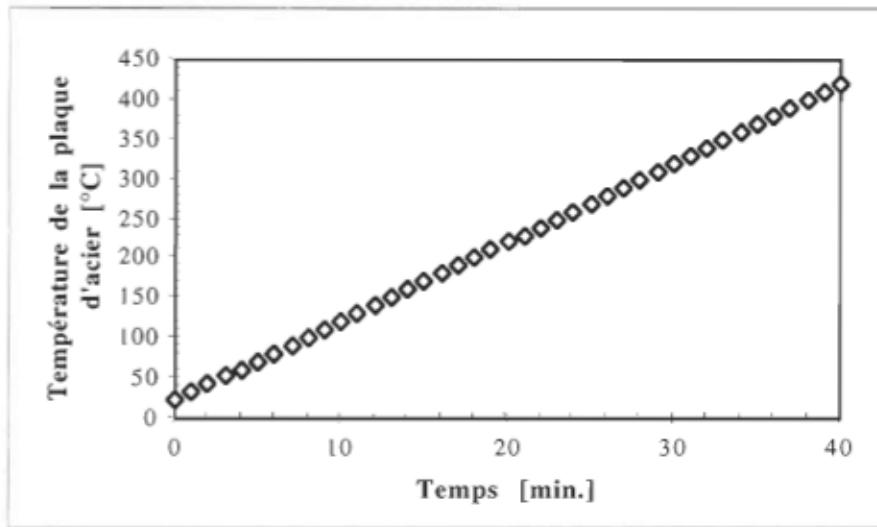


Figure 4.13 Évolution de la température de la plaque d'acier inoxydable

L'examen de la figure précédente permet de constater qu'il existe une certaine non-linéarité au début de la courbe. Cette erreur, par rapport à la valeur de la consigne, s'explique par le fait que le contrôleur a une valeur constante proportionnelle élevée et que la plaque d'acier a une certaine inertie thermique en début de chauffage.

4.4. Systèmes de mesures

Comme mentionné au début du quatrième chapitre, le système de mesure a principalement pour fonction de :

1. mesurer de façon discrète la résistance (R_c), l'inductance (L_c) et les températures du capteur (T_1 et T_2) à différentes fréquences (50 kHz, 100 kHz et 150 kHz) ;
2. mesurer de façon discrète la température (T , T_1 et T_2) de la plaque métallique ou de l'objet de mesure ;

-
3. d'enregistrer les paramètres mesurés (R_c , L_c , T , T_1 , T_2) selon une période d'échantillonnage prédéterminée .

Les mesures de résistance et d'inductance du capteur, en fonction de la température de la plaque d'acier inoxydable 304L, ont été prises à l'aide de l'analyseur d'impédance de la compagnie Hewlett Packard modèle 4194A. Une brève description de l'appareil de mesure, tirée des caractéristiques du manufacturier [35], est présentée à l'annexe F. Cet analyseur était branché à l'interface HPIB (IEEE 488) de l'ordinateur via un câble HPIB. Pour leur part, les mesures de températures (T , T_1 et T_2) ont été prises à l'aide de thermocouples de type K reliés à une carte de lecture de thermocouples multiplexée (HP44708A). Cette dernière était localisé à l'intérieur même du système d'acquisition de données (HP3852A). Une description du système d'acquisition est présentée à l'annexe G [36]. Comme l'analyseur d'impédance, le système d'acquisition de données était relié à l'interface HPIB de l'ordinateur via un câble HPIB.

La gestion des données ainsi que leur affichage en mode graphique était assuré par un programme développé sur HPVEE (*Hewlett Packard's Visual Engineering Environment*) version 3.2. Ce programme permet d'élaborer des stratégies de gestion de données à partir de fonctions élémentaires et des commandes propres à chacun des appareils avec qui il communique. L'organigramme du programme, créé à partir de HPVEE, est montré à la figure 4.14. Le diagramme bloc complet fourni par HPVEE est présenté à l'annexe H.

Ce programme peut être divisé en quatre sections. La première section du programme définit les variables qui y sont utilisées et met en forme l'entête du fichier qui sera généré tout au long de l'exécution du programme. Cette section comprend aussi l'ajustement des différents paramètres d'opération de l'analyseur d'impédance

(HP4194A). Ces paramètres et leur ajustement sont énumérés dans le tableau 4.5. Une liste complète des commandes possibles est présentée à l'annexe I.

La seconde partie du programme consiste simplement à générer un délai entre les séries de mesure. La troisième section débute par un ajustement de la fréquence de mesure à 50 kHz. Par la suite, une série de mesures de températures (T , T_1 et T_2) est effectuée. Ces mesures sont prises à l'aide du système d'acquisition HP3852A. Les commandes propres au système d'acquisition et générées par le logiciel développé sur HPVEE sont présentées dans le tableau 4.6.

TABLEAU 4.5 PARAMÈTRES D'OPÉRATION DE L'ANALYSEUR
D'IMPÉDANCE

Paramètres d'opération	Fonction utilisée	ajustement
Freq. min / Freq. max	START / STOP	10 kHz / 200 kHz
Pas de fréquence	STEP	10 khz
Fréquence de mesure	MKR	10 kHz
Type de mesure	FNC1	mesure d'impédance
Type de mesure d'impédance	IMP3	Lc [H]-Rc [Ω]
Temps d'intégration	ITM2	5 ms

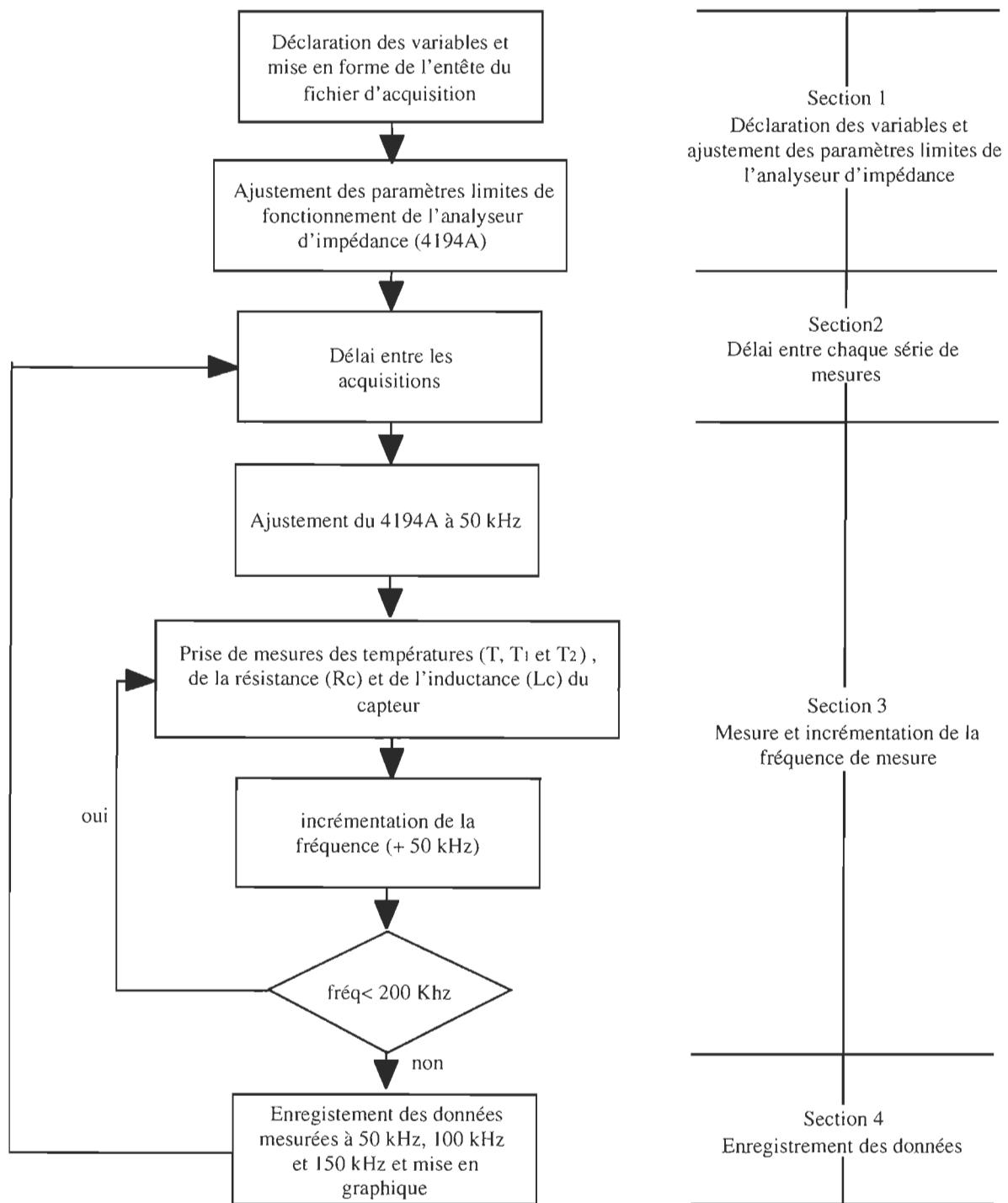


Figure 4.14 Organigramme du programme de contrôle et d'acquisitions

TABLEAU 4.6 COMMANDE POUR LA MESURE DES TEMPÉRATURES (T, T₁ ET T₂)

Mesure / localisation	canal utilisé (HP44708A)	Fonction utilisée (3852A)
Mesure de température de la cible (T)	canal 100	confmeas Tempk 0100
Mesure de température du capteur / conduit (T ₁)	canal 101	confmeas Tempk 0101
Mesure de température du capteur / concentrateur (T ₂)	canal 102	confmeas Tempk 0102

À la fin des mesures de températures, le logiciel envoie une commande à l'analyseur d'impédance pour que ce dernier mesure la valeur résistive (Rc) et inductive (Lc) du capteur. Une fois que ces mesures ont été prises, la fréquence de mesure de l'analyseur d'impédance est incrémentée et est comparée à une valeur limite (200 kHz). Dans le cas où la fréquence de mesure est inférieure à la limite, les mesures de températures (T, T₁, T₂), de résistance (Rc) et d'inductance (Lc) sont reprises à nouveaux. Dans le cas contraire et après un certain délai, la fréquence de mesure de l'analyseur d'impédance est remise à 50 kHz et de nouvelles mesures sont prises. Cette série de mesures prend fin lorsque la température maximale fixée par l'opérateur est atteinte par l'objet de mesure (plaque en acier inoxydable 304L) .

4.5. Ajustement de la distance entre le capteur et l'objet de mesure

Un des paramètres les plus importants qui influe sur la prise de mesure de température à l'aide d'un capteur inductif est la distance qui le sépare de l'objet de mesure. En effet, en augmentant cette distance, le facteur k décroît et diminue par le fait même la sensibilité du capteur. Il faut donc être en mesure de caractériser le changement de comportement du capteur en fonction de la distance qui le sépare de l'objet de mesure. Il est donc essentiel de pouvoir ajuster cette distance avec précision et ainsi évaluer la réponse du capteur en fonction de ce paramètre.

Pour ce faire, le capteur a été monté sur le mandrin d'une fraiseuse numérique alors que la plaque d'acier et l'émetteur infrarouge ont été déposés sur la table de travail. La figure 4.15 montre l'installation du capteur, de la source infrarouge et de la plaque d'acier sur la fraiseuse.

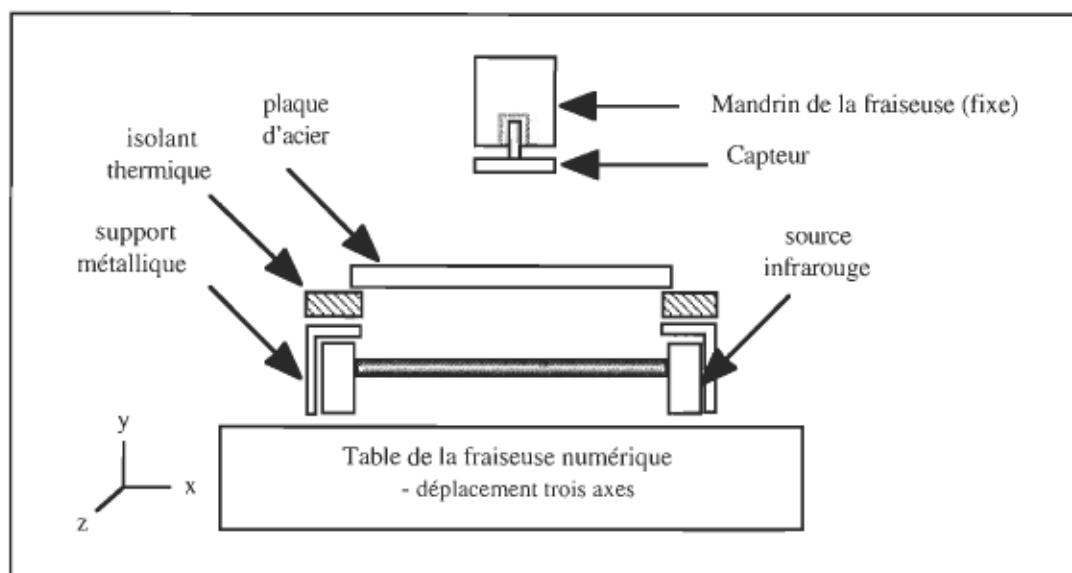


Figure 4.15 Installation des équipements sur la fraiseuse numérique

Lors de l'installation, la distance entre le dessus des lampes infrarouges et le dessous de la plaque d'acier a été ajustée à 10 cm à l'aide des isolants thermiques posés entre la plaque et les supports métallique de la source. Cette distance assurait, comme mentionné à la section 4.3, un chauffage uniforme de la plaque d'acier.

L'ajustement de la distance séparant le dessus de la plaque d'acier et le dessous du capteur a été fait manuellement. Lors des essais, la distance minimale entre le capteur et la plaque métallique a été de $1.016 \text{ mm} \pm 0.0127 \text{ mm}$. Par la suite, cette distance a été incrémentée par pas de 1.016 mm pour atteindre, lors des derniers essais, $6.096 \text{ mm} \pm 0.0127 \text{ mm}$.

4.6. Fonctionnement de l'ensemble du système de mesure

Les dernières sections ont défini le fonctionnement de chacune des parties du système de mesures et de contrôles utilisé lors des essais. La dernière section de ce chapitre vise plutôt à donner une vue d'ensemble du fonctionnement du système et à en définir les extrants. La figure 4.16 montre, de façon séquentielle et globale, le fonctionnement du système de mesure et ce pour une distance donnée séparant le capteur de la plaque en acier inoxydable 304L. Il va sans dire que l'ensemble des actions, qui sont montrées à la figure 4.16, sont répétées pour chacune des distances variant de 1.016 mm à 6.096 mm par pas de 1.016 mm. Ainsi, six fichiers de mesures seront générés. Chaque fichier contiendra:

1. mesures à 50 kHz (T, T_1, T_2, Lc, Rc) ;
2. mesures à 100 kHz (T, T_1, T_2, Lc, Rc) ;
3. mesures à 150 kHz (T, T_1, T_2, Lc, Rc).

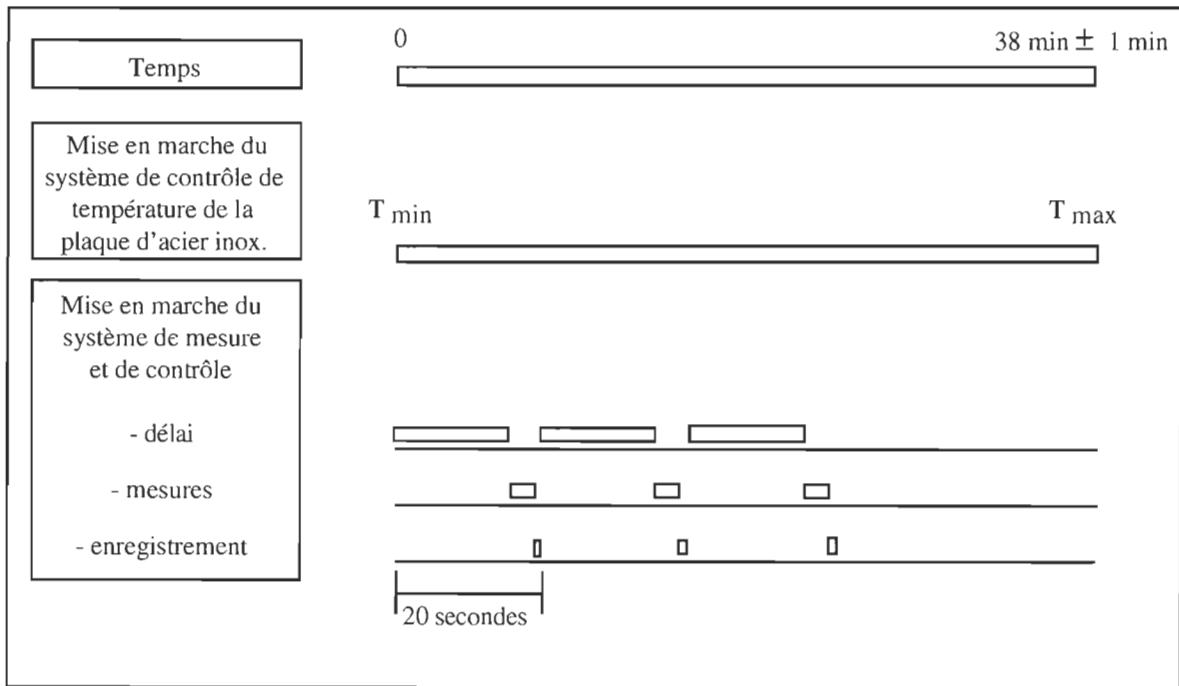


Figure 4.16 Fonctionnement global et séquentiel du système de mesure et de contrôle

Lors de l'analyse des données, les six fichiers seront manuellement reconfigurés afin de d'en obtenir que trois. Ces fichiers contiendront, pour une fréquence spécifique (50 kHz, 100 kHz et 150 kHz) les résultats de mesures (T , T_1 , T_2 , Lc , Rc) pour chacune des distances séparant le capteur de la plaque métallique. Les trois fichiers ainsi générés seront appelés F50kHz, F100kHz et F150kHz.

5. ESSAIS ET ANALYSES

L'analyse préliminaire des données recueillies lors des essais, a démontré que les résultats de mesures associés aux essais à une distance de 4.064 mm étaient incohérents. Cette incohérence était probablement due à une erreur de mesure ou de manipulation. C'est la raison pour laquelle, cette série de mesure a volontairement été retirée des résultats qui vous sont présentés. Il en est de même pour la mesure de température du capteur au niveau du concentrateur de champ (T_2). Quoique que les valeurs numériques de cette variable semblaient être justes, elle a été retirée car elle n'apportait pas d'éléments nouveaux favorisant une meilleure analyse. En effet, l'analyse ultérieure a démontré que la seule utilisation de la température du conduit du capteur (T_1) était suffisante. Cette conclusion semblait tout à fait cohérente puisque les deux valeurs (T_1 et T_2) étaient très près l'une de l'autre ; la différence maximale n'étant que de 0.8°C.

Notons aussi que des essais préliminaires ont démontré que la présence du capteur à proximité de l'objet de mesure ($d=1.016$ mm) n'était pas suffisante pour entraîner une montée en température comme c'est le cas en chauffage par induction électromagnétique. En effet, après quelques essais qui ont duré un peu plus de 45 minutes chacun, aucune montée en température significative n'a été enregistrée.

5.1. Caractérisation de l'ensemble capteur et objet de mesure

Les premiers essais qui ont été menés avaient pour but de caractériser le comportement du capteur lorsqu'il est mis en présence de l'objet de mesure. Pour ce faire, le capteur a été branché à l'analyseur d'impédance et ensuite placé à différentes distances le séparant de la plaque d'acier. Lors de ces essais, le système de contrôle et de chauffage de la plaque d'acier inoxydable n'était pas en marche. La plaque d'acier était donc à température ambiante. Pour sa part, l'analyseur d'impédance mesurait la valeur résistive et inductive du capteur et ce sur une plage de fréquence variant de 10 à 100 kHz. Les résultats de mesures sont montrés aux figures 5.1 et 5.2

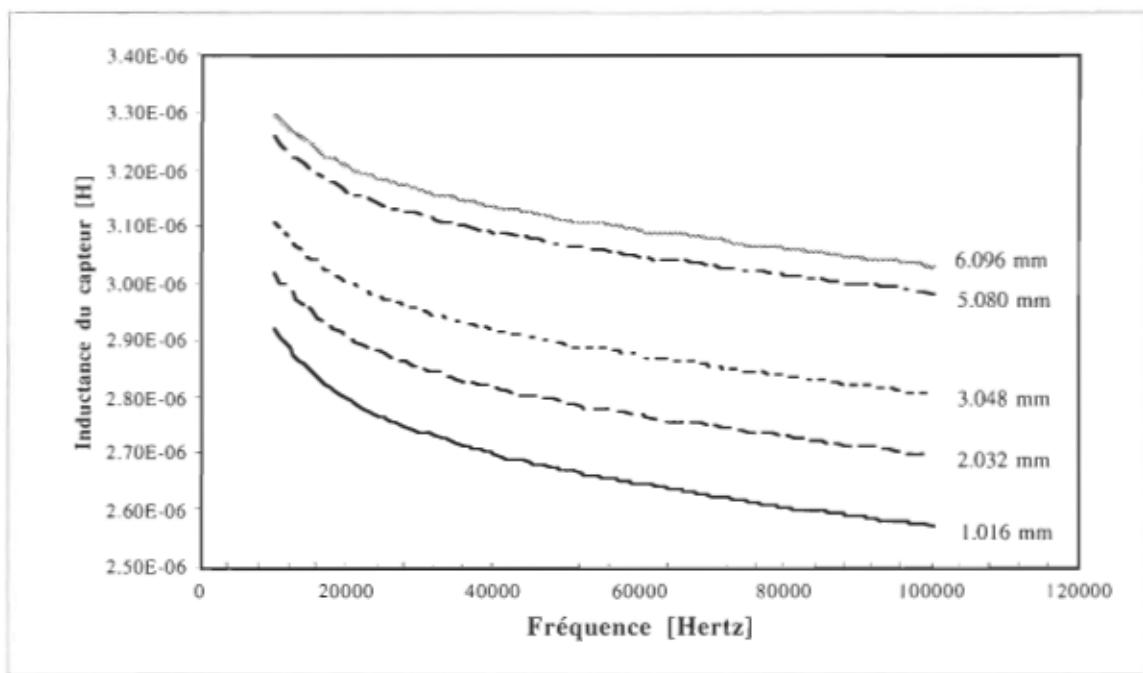


Figure 5.1 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la fréquence et de la distance

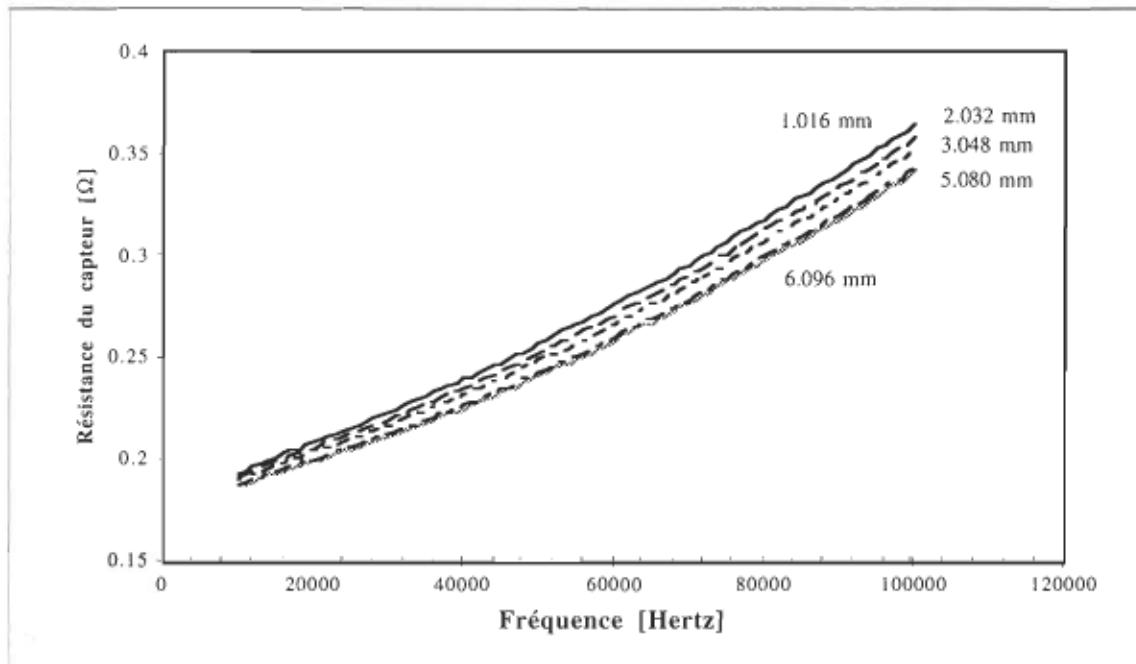


Figure 5.2 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la fréquence et de la distance

Les courbes montrées aux figures précédentes peuvent être décrites par les équations suivantes:

1. Inductance en fonction de la fréquence (f) et de la distance ;

$$Lc_{(1,016 \text{ mm})} = 4.7112 E - 06 \cdot f^{-0.0524114} \quad (5.1)$$

$$Lc_{(2,032 \text{ mm})} = 4.6159 E - 06 \cdot f^{-0.0464874} \quad (5.2)$$

$$Lc_{(3,048 \text{ mm})} = 4.5748 E - 06 \cdot f^{-0.0422768} \quad (5.3)$$

$$Lc_{(5,080 \text{ mm})} = 4.5152 E - 06 \cdot f^{-0.035704} \quad (5.4)$$

$$Lc_{(6,096 \text{ mm})} = 4.5153 E - 06 \cdot f^{-0.0343349} \quad (5.5)$$

2. Résistance du capteur en fonction de la fréquence (f) et de la distance ;

$$Rc_{(1.016 \text{ mm})} = 0.181348 \cdot 10^{3.043538 \text{ E-06.f}} \quad (5.6)$$

$$Rc_{(2.032 \text{ mm})} = 0.179192 \cdot 10^{3.004756 \text{ E-06.f}} \quad (5.7)$$

$$Rc_{(3.048 \text{ mm})} = 0.177289 \cdot 10^{2.975038 \text{ E-06.f}} \quad (5.8)$$

$$Rc_{(5.080 \text{ mm})} = 0.174343 \cdot 10^{2.929391 \text{ E-06.f}} \quad (5.9)$$

$$Rc_{(6.096 \text{ mm})} = 0.173617 \cdot 10^{2.917642 \text{ E-06.f}} \quad (5.10)$$

Les courbes présentées à la figure 5.1 montrent que l'inductance du capteur (Lc) décroît avec la fréquence et augmente avec la distance. Cette augmentation est principalement due au fait que l'objet de mesure est de type diamagnétique. Si ce dernier avait été un ferromagnétique, par exemple un acier standard 1008, la valeur de l'inductance aurait diminué avec une augmentation de la distance. Pour sa part, la figure 5.2 montre que la valeur de la résistance du capteur (Rc) augmente avec la fréquence (f) et diminue avec la distance. L'augmentation, avec la fréquence, est due à l'effet pelliculaire alors que la diminution est causée par une baisse de la valeur du facteur k.

À distance constante et en augmentant la fréquence, la profondeur de pénétration (δ) des courants induits diminue réduisant ainsi la section par laquelle ils circulent d'où une augmentation de la résistance totale du capteur. Pour sa part, la diminution de la résistance avec l'augmentation de la distance est due au fait que le facteur k devient moins important d'où une perte de sensibilité du capteur. Cette diminution de la résistance totale du capteur (Rc) avec l'augmentation de distance se poursuit tant et aussi longtemps que la distance augmente et ce jusqu'à ce que la résistance du capteur soit égale à sa résistance

interne (R_i). À ce moment, la valeur du facteur k est nulle et la résistance réfléchie (R_o) due à la charge n'a plus d'effet.

5.2. Impédance du capteur en fonction de la température de l'objet de mesure

Les essais visant à mettre en relation l'impédance du capteur (R_c, L_c) et la température superficielle de la plaque d'acier (T) se sont déroulés de la façon suivante. Après que tous les équipements aient été installés et que la distance entre le capteur et l'objet de mesure ait été ajustée, la vanne contrôlant l'arrivée d'eau, circulant dans les conduits du capteur, a été ouverte. Le débit a alors été ajusté de façon à ce que le filet d'eau qui sortait du capteur soit continu. Le débit était alors de $11.1 \text{ l h}^{-1} \pm 0.1 \text{ l}$. Une certaine période de temps s'est écoulée avant que la température du capteur se stabilise. Par la suite, les essais ont débuté.

En premier lieu, le système de régulation de température de la plaque d'acier inoxydable ainsi que le système d'acquisition et de contrôle ont été mis en marche. Comme mentionné précédemment (section 4.3), lors des mesures de températures (T, T_1) et d'impédance (R_c, L_c) la température superficielle de la plaque d'acier évoluait selon une rampe de pente de $10^\circ\text{C min}^{-1}$. Pour des raisons d'ordre pratique, la température superficielle de la plaque d'acier inoxydable a été limitée à 325°C . À l'atteinte de cette consigne maximale, le système de régulation de température ainsi que le système d'acquisition de données ont été arrêtés.

La plaque d'acier a alors été refroidie à l'aide d'un jet d'air comprimé et la distance séparant le capteur et la plaque d'acier a été ajustée à sa nouvelle valeur. Quoique les

distances faisant l'objet d'essais aient été choisies à l'avance, leur ordre d'apparition lors des essais ont été aléatoires. Cette précaution permet d'éliminer la majorité des erreurs dues aux paramètres qui évoluent dans le temps (température ambiante, débit d'eau, etc.) [37]. Après que les nouveaux ajustements aient été complétés, une nouvelle série de mesures a été prise. Les essais ont ainsi été réalisés jusqu'à ce que toutes les distances préétablies aient fait l'objet d'un essais. Lors des essais, la température de l'eau n'a pas atteint d'équilibre thermique et était encore en progression à la fin des essais. La figure 5.3 montre l'évolution de la température de l'eau pour l'ensemble des essais.

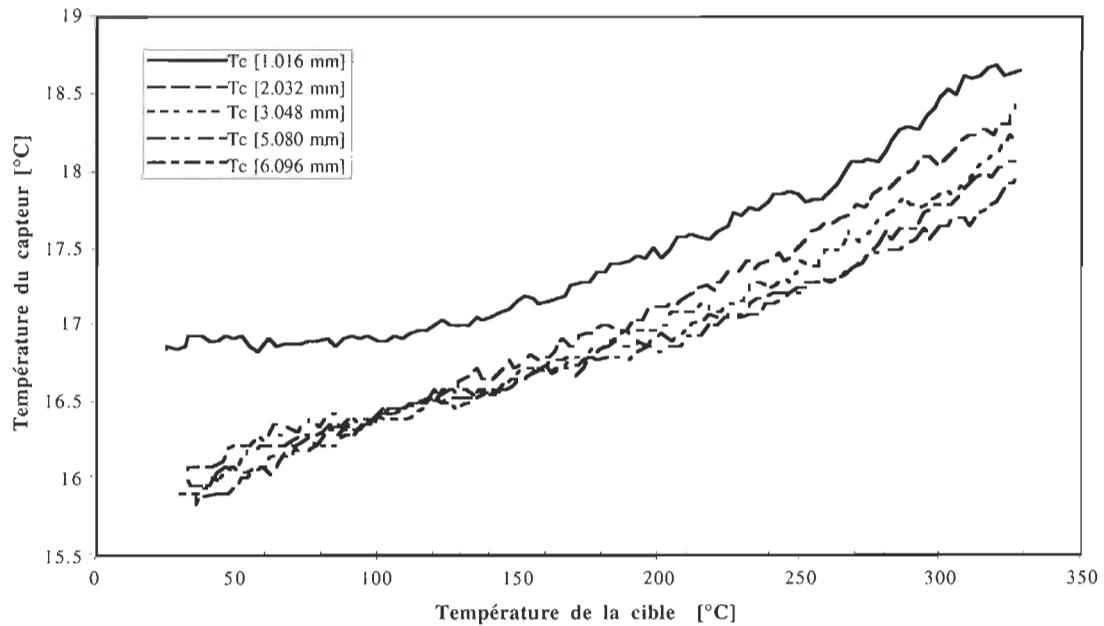


Figure 5.3 Température de l'eau en fonction de la distance et de la température de l'objet de mesure

Cette dernière figure montre que l'écart de température maximal, lors des essais, a été de 2.8 °C. Cet écart aurait pu être plus faible si le débit d'eau avait été plus élevé ou si le liquide caloporteur avait eu une chaleur spécifique plus élevée. Les figures suivantes (5.4 à 5.9) montrent les relations qui existent entre les composantes réelles et

imaginaires de l'impédance du capteur et la température de la plaque d'acier à différentes fréquences (50 kHz, 100 kHz, 150 kHz).

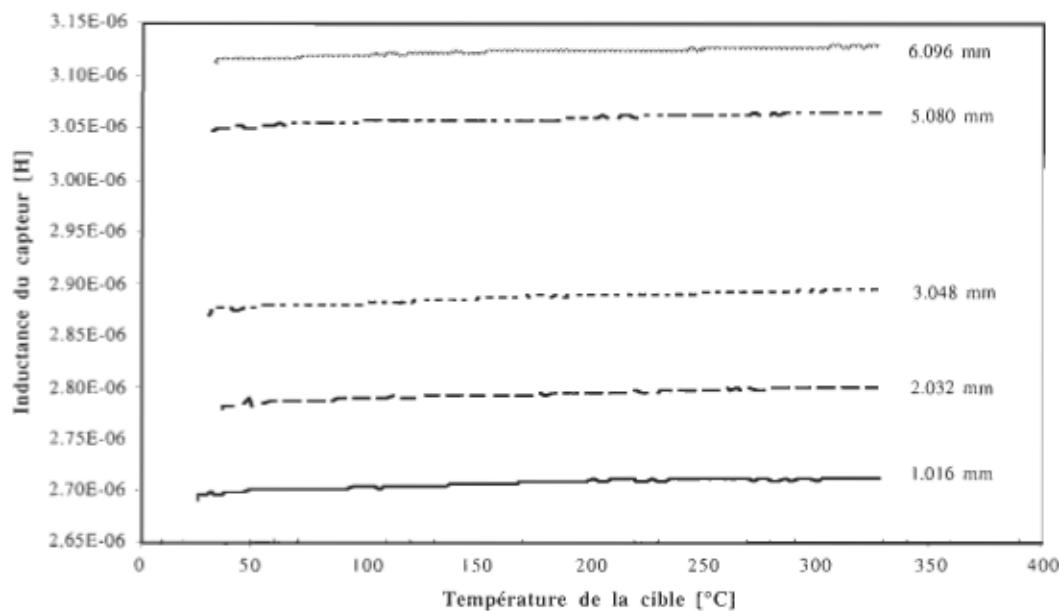


Figure 5.4 Inductance du capteur (L_c) en fonction de la température et de la distance à 50 kHz

L'analyse de la figure 5.4 révèle que, sous les conditions d'opération mentionnées précédemment, la valeur de l'inductance n'est pas affectée de façon significative par la température (T) de la plaque d'acier. La pente des courbes d'inductance, présentées à la figure 5.4, varient de 46 à $58.10^{-12} \text{ F}^\circ\text{C}^{-1}$. Ces variations ne représentent que 0.6 % par rapport à la valeur d'inductance à 30°C et ce sur toute la plage de température. Par contre, la valeur inductive du capteur est fortement affectée par la distance (d) qui sépare le capteur de l'objet de mesure. Dans les faits, cette variation peut s'exprimer sous la forme d'une équation polynomiale du troisième ordre où :

$$L_{c(50\text{ kHz})} = -1.677E-09 d^3 + 1.495E-08 d^2 + 5.067E-08 d + 2.633E-06 \quad (5.11)$$

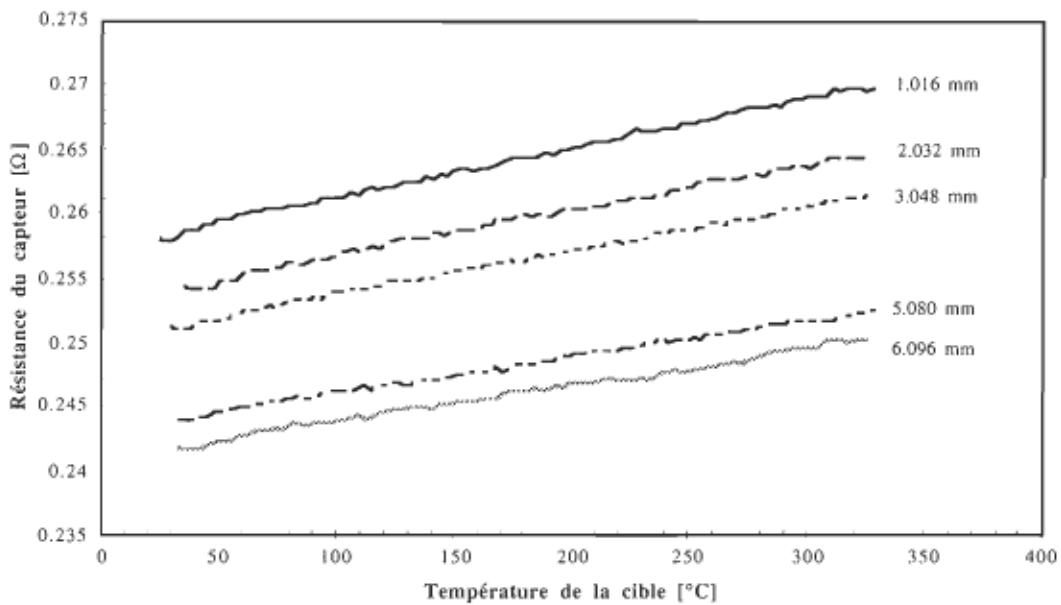


Figure 5.5 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 50 kHz

Contrairement à l'inductance, la valeur résistive (voir figure 5.5) du capteur est influencée par la température de l'objet de mesure (T) et par la distance (d) qui la sépare du capteur. À distance (d) constante, la valeur de la résistance du capteur (R_c) peut être représentée par une série d'équations de la forme suivante :

$$R_{c(50\text{ kHz},d)} = aT + b \quad (5.12)$$

Les valeurs de “a” et “b”, pour les différentes distances sont présentées dans le tableau 5.1

TABLEAU 5.1 VALEURS DE "a" ET "b" (50 kHz)

Distance (d) [mm]	a [$\Omega/\text{°C}$]	b [Ω]
1.016 mm	$3.895 \cdot 10^{-5}$	0.258
2.032 mm	$3.541 \cdot 10^{-5}$	0.254
3.048 mm	$3.428 \cdot 10^{-5}$	0.251
5.080 mm	$2.812 \cdot 10^{-5}$	0.244
6.096 mm	$2.801 \cdot 10^{-5}$	0.241

Les courbes 5.6 à 5.9 donnent les mêmes relations que celles vues aux figures 5.4 et 5.5, à l'exception du fait qu'elles originent des résultats de mesure à 100 kHz et 150 kHz.

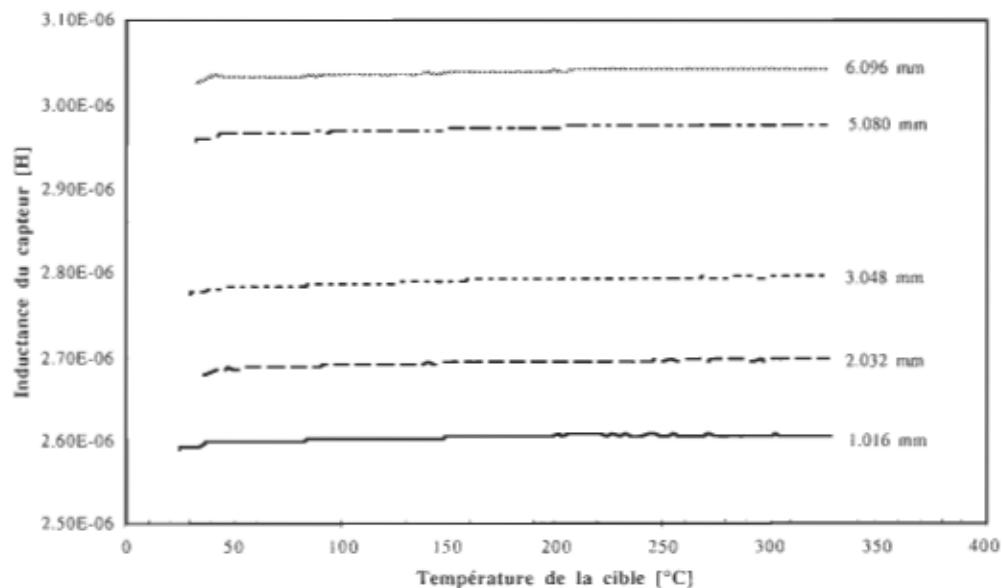


Figure 5.6 Inductance du capteur (Lc) en fonction de la température et de la distance à 100 kHz

Les valeurs d'inductance en fonction de la distance, qui sépare la plaque d'acier du capteur, sont données par la relation suivante :

$$L_{c(100 \text{ kHz})} = -2.207E - 09 d^3 + 2.026E - 08 d^2 + 3.833E - 08 d + 2.543E - 06 \quad (5.13)$$

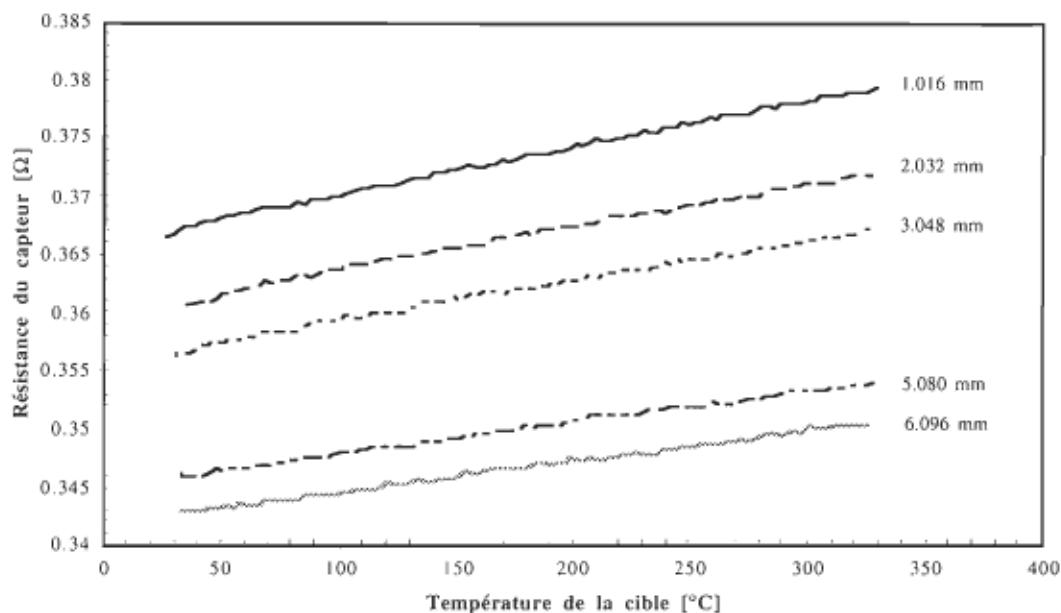


Figure 5.7 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 100 kHz

Comme décrit à l'équation 5.12, le comportement de la valeur résistive du capteur (R_c) en fonction de la distance (d) et de la température (T) peut être décrit par un ensemble de courbes linéaires. Le tableau 5.2 donne la valeur des différentes constantes (a et b) requises pour l'évaluation de la résistance du capteur .

En comparant les courbes obtenues à 50 et 100 kHz, on remarque que les valeurs des inductances ont, pour une même distance, tendance à diminuer. Par contre, les valeurs de résistance ont tendance à augmenter (effet pelliculaire). La diminution de la résistance du capteur (R_c) en fonction de la distance est due à une diminution du facteur k , d'où l'importance d'avoir une inductance la plus élevée possible lorsque les mesures doivent être prises à bonne distance de l'objet de mesure.

TABLEAU 5.2 VALEURS DE “a” ET “b” (100 kHz)

Distance (d) [mm]	a [$\Omega/\text{ }^{\circ}\text{C}$]	b [Ω]
1.016 mm	$4.137 \cdot 10^{-5}$	0.367
2.032 mm	$3.640 \cdot 10^{-5}$	0.361
3.048 mm	$3.430 \cdot 10^{-5}$	0.356
5.080 mm	$2.671 \cdot 10^{-5}$	0.346
6.096 mm	$2.575 \cdot 10^{-5}$	0.343

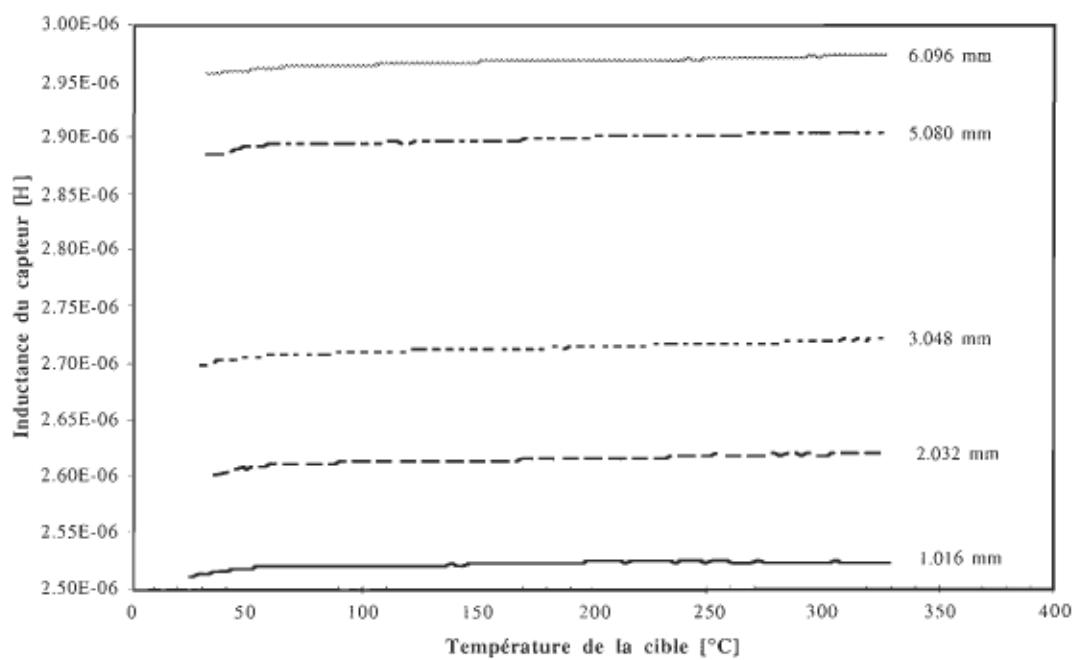


Figure 5.8 Inductance du capteur (Lc) en fonction de la température et de la distance à 150 kHz

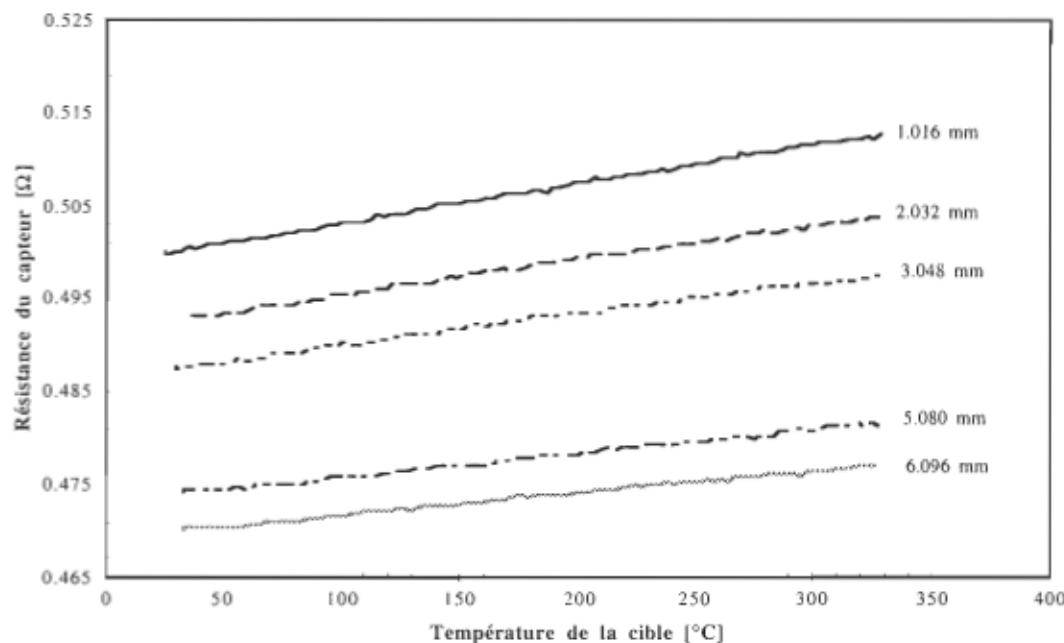


Figure 5.9 Résistance du capteur (R_c) en fonction de la température et de la distance à 150 kHz

Comme mentionné précédemment, la valeur de l'inductance est à peu de chose près indépendante de la température de l'objet de mesure. Par contre elle est grandement affectée par la distance qui sépare le capteur de la plaque d'acier. La valeur de l'inductance du capteur en fonction de la distance, à 150 kHz, est décrite par l'expression suivante :

$$L_{c(150 \text{ kHz})} = -1.766E-09 d^3 + 1.503E-08 d^2 + 5.787E-08 d + 2.447E-06 \quad (5.14)$$

Les valeurs servant au calcul de la résistance du capteur (R_c) sont données dans le tableau 5.3.

TABLEAU 5.3 VALEURS DE “A” ET “B” (150 KHZ)

Distance (d) [mm]	a [$\Omega/\text{°C}$]	b [Ω]
1.016 mm	$4.240 \cdot 10^{-5}$	0.500
2.032 mm	$3.678 \cdot 10^{-5}$	0.493
3.048 mm	$3.373 \cdot 10^{-5}$	0.487
5.080 mm	$2.537 \cdot 10^{-5}$	0.474
6.096 mm	$2.343 \cdot 10^{-5}$	0.470

5.3. Méthode d’analyse et résultats

Afin de retrouver, la température (T) de la plaque métallique à l’aide des résultats de mesures (T_l , R_c , L_c , d , f), plusieurs méthodes peuvent être envisagées. La méthode utilisée dans le cadre de ce mémoire est la multi-régressions non linéaires [38]. Cette méthode met en relation des intrants non linéaires (T_l , L_c , R_c) avec une valeur connue (T) et ce via l’utilisation de paramètres constants qui demeurent à évaluer. Cette opération mathématique, pour une température estimée donnée (T'_l), est représentée par l’équation suivante :

$$T'_l = aT_l + bT_l^2 + cT_l^3 + dL_c + eL_c^2 + fL_c^3 + gR_c + hR_c^2 + iR_c^3 + j(L_c/R_c) + k(L_c/R_c)^2 + l(L_c/R_c)^3 + m \quad (5.15)$$

Afin de pouvoir utiliser la multi-régressions non-linéaires pour l’évaluation de la température de la plaque d’acier, il a fallu ajouter, aux fichiers F50kHz, F100kHz et F150kHz, les valeurs qui leur manquaient (les paramètres d’ordre supérieur à 1, L_c/R_c à

tout ordre ainsi que la valeur de la constante). Les fichiers, qui ont été modifiés à l'aide de MicroSoft Excel version 5.0, ont été renommé FA50kHz, FA100kHz et FA150kHz.

Considérant que pour une même fréquence, plusieurs mesures de températures ont été prises, il est possible de regrouper l'ensemble des équations générées et de les représenter sous une forme matricielle .

$$\begin{bmatrix} T_i \\ \dots \\ T_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{i,i} & T_{i,i}^2 & T_{i,i}^3 & Lc_i & Lc_i^2 & Lc_i^3 & Rc_i & Rc_i^2 & Rc_i^3 & Sc_i & Sc_i^2 & Sc_i^3 & 1 \\ \dots & \dots \\ T_{f,f} & T_{f,f}^2 & T_{f,f}^3 & Lc_f & Lc_f^2 & Lc_f^3 & Rc_f & Rc_f^2 & Rc_f^3 & Sc_f & Sc_f^2 & Sc_f^3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \\ i \\ j \\ k \\ l \\ m \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Cette opération matricielle comprend les matrices suivantes :

1. matrice des températures mesurées de la valeur initiale (T_i) à la valeur finale (T_f) à différents moments et différentes distances ;
2. matrice des paramètres mesurés et calculés à différents moments et différentes distances ;
3. matrice des coefficients constants ("a" à "m")

Afin de faciliter l'écriture de la matrice des paramètres mesurés, la valeur S_c a été définie comme étant le rapport de l'inductance (L_c) sur la résistance (R_c) du capteur. Les températures T_i , jusqu'à T_f représentent l'ensemble des différentes températures de plaque prise à différentes distances. Cette façon de faire, permet de tenir compte de la distance entre le capteur et l'objet de mesure dans l'évaluation des paramètres constants ("a" à "m"). Pour couvrir l'ensemble des mesures effectuées, il faudra avoir recours à trois multi-régressions non-linéaires effectuées sur les fichiers FA50kHz, FA100kHz et FA150kHz. Les résultats de ces trois multi-régressions non linéaires permettront de vérifier si la fréquence d'opération du capteur a une influence importante sur l'évaluation de la température de la plaque d'acier (T').

Le calcul des paramètres nécessaires à l'estimation de la température (T') de la plaque d'acier , a été réalisée à partir de Matlab en utilisant la division matricielle [39]. L'organigramme du programme effectués sur Matlab est présenté à la figure suivante 5.10. Dans un premier, un des trois fichiers (format texte) est chargé dans le programme. Par la suite, une évaluation des dimensions de la matrice est effectuée dans le but de définir correctement la variable matricielle *PAR*.

La matrice de covariance, générée à l'intérieur du programme, permet de vérifier l'impact de chaque paramètre sur chacun des autres paramètres la constituant. Cette matrice d'une dimension n par n est caractérisée par une diagonale unitaire. Pour les besoins de notre analyse, c'est la première ligne de la matrice qui revêt un aspect important. En effet, cette ligne donne l'impact de chacun des paramètres mesurés et calculés sur la température superficielle de la plaque d'acier inoxydable et permet d'orienter la recherche des paramètres importants.

La première partie du calcul, servant à évaluer les valeurs des paramètres constants, consiste à faire le chargement des matrices de températures mesurées (T) et des paramètres (PAR) mesurés et calculés. Une fois ces chargements effectués, la division matricielle peut avoir lieu. Les résultats de cette division, sont envoyés dans la variable matricielle *COEF*.

Finalement, afin de vérifier la qualité de la multi-régressions, les valeurs estimées (T') des températures de la plaque d'acier sont générées à partir des coefficients constants et des paramètres mesurés et calculés comme montré à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} T'_i = & aT_i + bT_i^2 + cT_i^3 + dLc + eLc^2 + fLc^3 + gRc + hRc^2 + iRc^3 \\ & + jSc + kSc^2 + lSc^3 + m \end{aligned} \quad (5.17)$$

Les coefficients constants obtenus pour les trois multi-régressions non-linéaires sont donnés dans le tableau 5.4

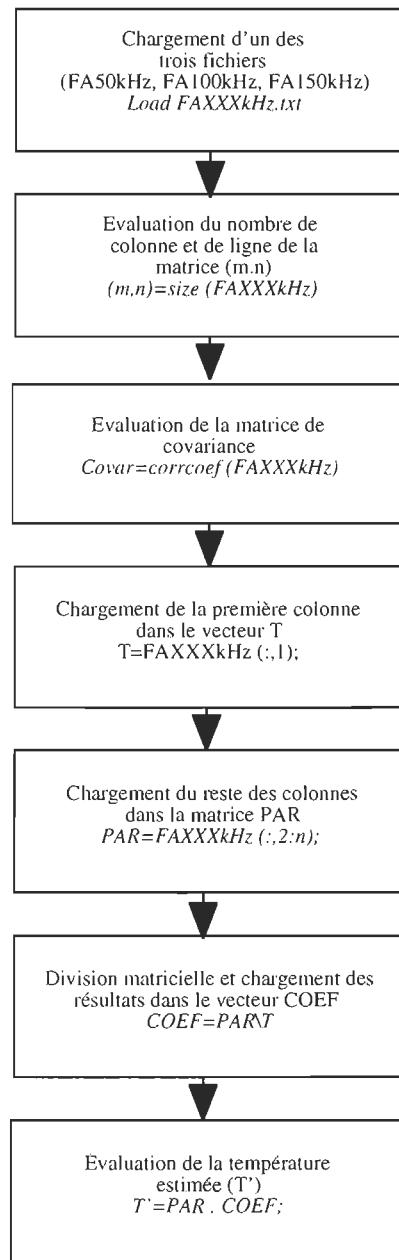


Figure 5.10 Organigramme du traitement des données sur Matlab

TABLEAU 5.4 VALEURS DES COEFFICIENTS CONSTANTS

Paramètres constants	Fréquence d'opération du capteur		
	50 kHz	100 kHz	150 kHz
a	-6.876E 03	-6.776E 03	-6.539E 03
b	4.066E 02	3.978E 02	3.829E 02
c	-7.962E 00	-7.717E 00	-7.648E 00
d	7.896E 08	-2.000E 08	-4.559E 08
e	0	0	0
f	0	0	0
g	2.936E 06	1.851E 06	1.124E 06
h	-1.121E 07	-4.841E 06	-7.641E 06
i	1.437E 07	4.271E 06	6.873E 06
j	4.166E 07	4.726E 08	5.391E 08
k	0	0	0
l	0	0	0
m	-2.219E 05	-2.033E 05	-3.562E 05

La série de graphique qui suit (5.11 à 5.13) montre l'évolution des températures estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) de la plaque d'acier inoxydable, pour différentes distances à différentes fréquences. Des résultats détaillés, sous forme de figures, sont présentés aux annexes J (50 kHz), K (100 kHz) et L (150 kHz).

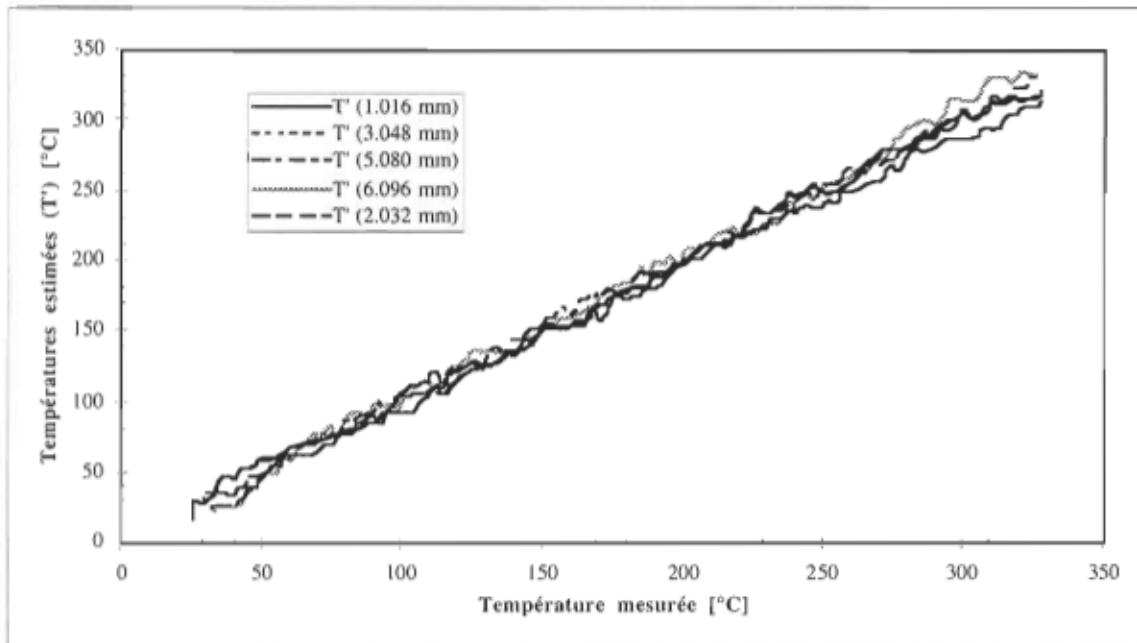


Figure 5.11 Température estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) à 50 kHz

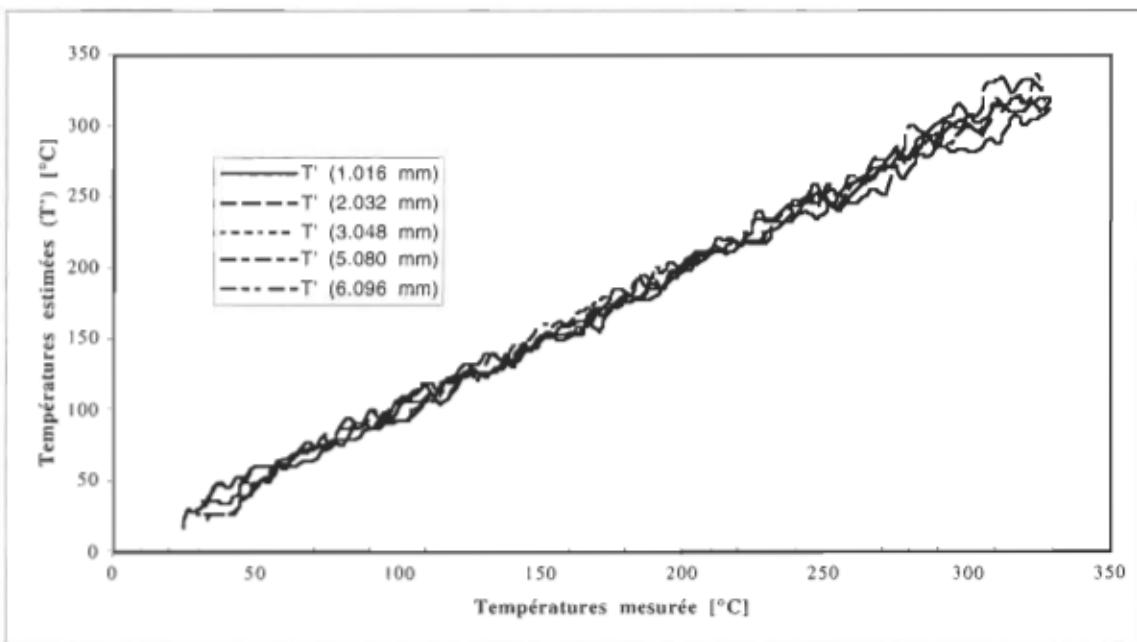


Figure 5.12 Température estimées (T') en fonction de la température mesurée (T) à 100 kHz

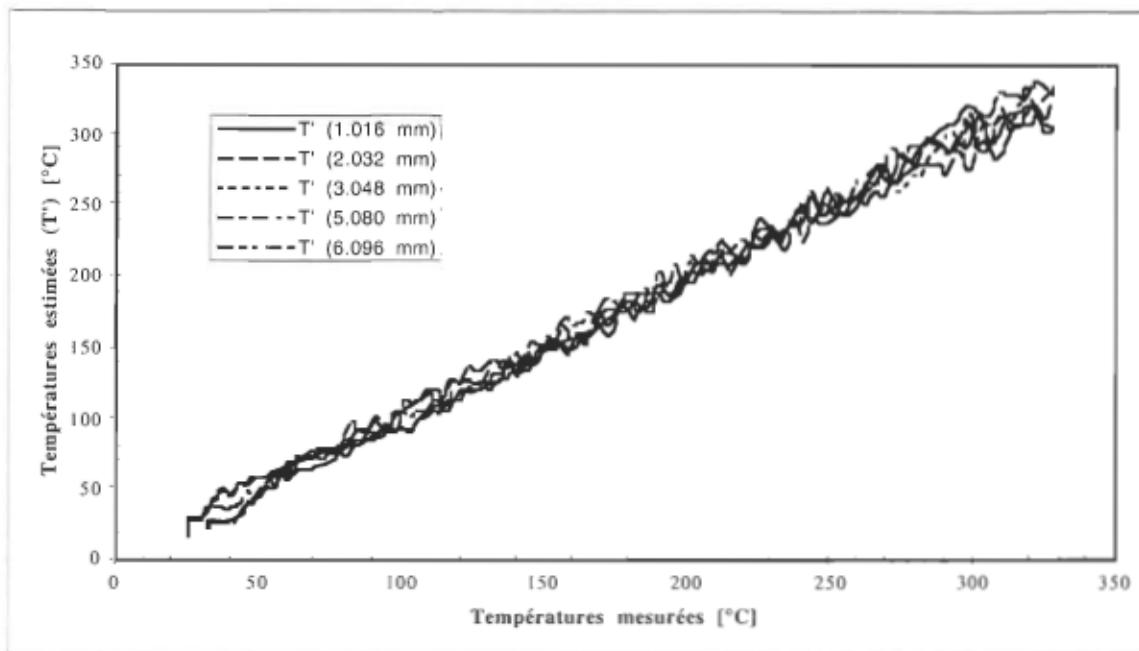


Figure 5.13 Température estimée (T') en fonction de la température mesurée (T) à 150 kHz

Faisant abstraction de l'erreur absolue, les figures 5.11, 5.12 et 5.13 montrent que l'évaluation de la température estimée (T') est indépendante de la distance séparant le capteur de l'objet de mesure et ce sur une plage de $1.016 \text{ mm} \pm 0.0127 \text{ mm}$ à $6.096 \text{ mm} \pm 0.0127 \text{ mm}$.

Le tableau 5.5 donne les différentes valeurs d'erreur absolues [$^{\circ}\text{C}$] (minimale, maximale et moyenne) pour l'ensemble des mesures à différentes distances et différentes fréquences. Un examen sommaire du tableau 5.5 permet de constater que l'erreur absolue minimale est, pour tous les essais, inférieure à 0.3°C . Cependant, ce même tableau permet aussi de constater qu'à distance constante, l'erreur moyenne comme l'erreur maximale

⁸ • À partir de ce moment, et afin d'alléger le texte, il faudra considérer que partout l'erreur absolue est en valeur absolue.

augmentent avec la fréquence. Cette augmentation de l'erreur s'explique par le fait, que sous les conditions d'opération précédemment décrites, en augmentant la fréquence d'opération du capteur, il y a diminution de son inductance (voir section 5.1 fig. 5.1), donc diminution du facteur k. Cette diminution de ce facteur entraîne à son tour une diminution de la sensibilité du capteur qui a un impact majeur sur la qualité des multi-regressions non linéaires effectuées.

TABLEAU 5.5 ERREURS ABSOLUES

Distance [mm]	Erreurs à 50 kHz [°C]			Erreurs à 100 kHz [°C]			Erreurs à 150 kHz [°C]		
	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.
1.016	0.04	11.48	4.15	0.04	14.70	5.01	0.03	23.19	5.16
2.032	0.03	10.98	4.11	0.17	12.28	4.52	0.11	19.41	5.38
3.048	0.00	9.54	3.39	0.09	12.73	3.80	0.00	16.74	5.18
5.080	0.00	17.65	6.22	0.18	22.05	5.87	0.00	24.71	5.90
6.096	0.00	20.43	6.07	0.25	23.90	5.64	0.00	22.45	7.42

Le tableau 5.5 met aussi en lumière, le fait que l'erreur maximale, et par conséquent l'erreur moyenne varient non-linéairement en fonction de la distance (d). La variation de l'erreur moyenne est mise sous forme graphique à la figure 5.14. L'analyse des résultats des trois multi-régressions non-linéaires, montre que l'erreur absolue moyenne minimale se situe à $3.048 \text{ mm} \pm 0.0127 \text{ mm}$. Cette distance correspond à l'endroit où la valeur du facteur k est optimale.

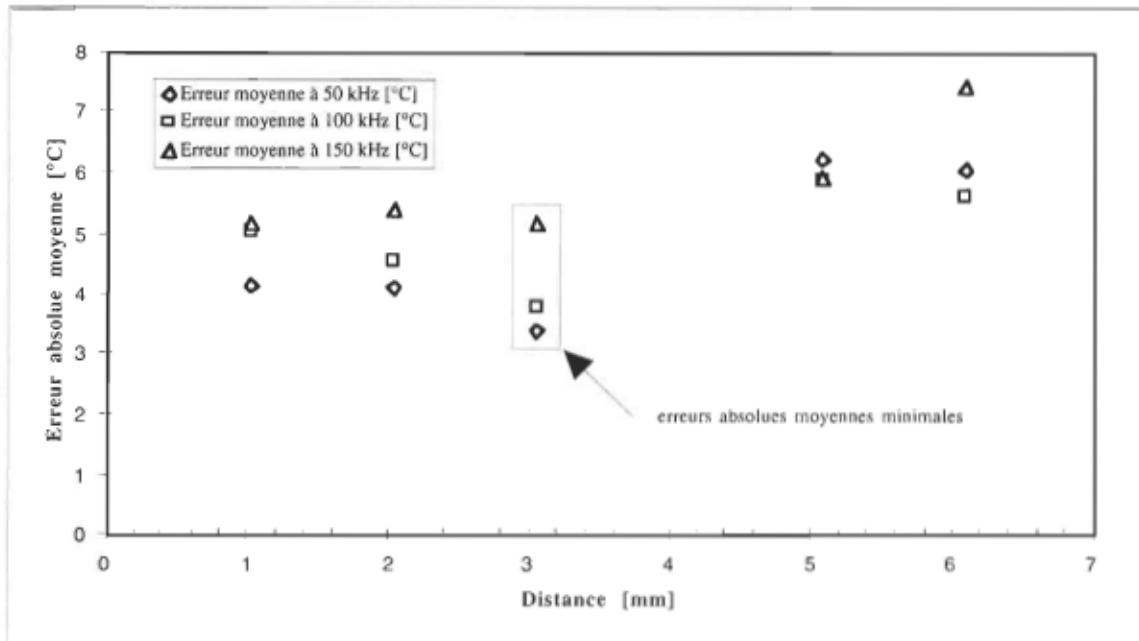


Figure 5.14 Erreur absolue moyenne en fonction de la distance

En effet, le facteur k est fonction de la valeur de l'inductance et de l'inverse de la distance séparant le capteur de l'objet de mesure. Ces deux paramètres sont mis en graphique à la figure 5.15.

$$k = F(L_c, d^{-1}) \quad (5.18)$$

À des distances inférieures à 3.048 mm (1.016 mm et 2.032 mm), la valeur de l'inductance est plus faible d'où une diminution du facteur k et une baisse de sensibilité du capteur. À de plus grande distance (5.080 mm et 6.096 mm), la valeur de l'inductance augmente. Cependant, l'augmentation de distance vient contrer l'augmentation d'inductance et a pour effet de diminuer le facteur k par rapport à ce qu'il était à 3.048 mm. Cette diminution se traduit, comme dans le cas précédent, par une diminution de la sensibilité du capteur et une augmentation de l'erreur absolue moyenne.

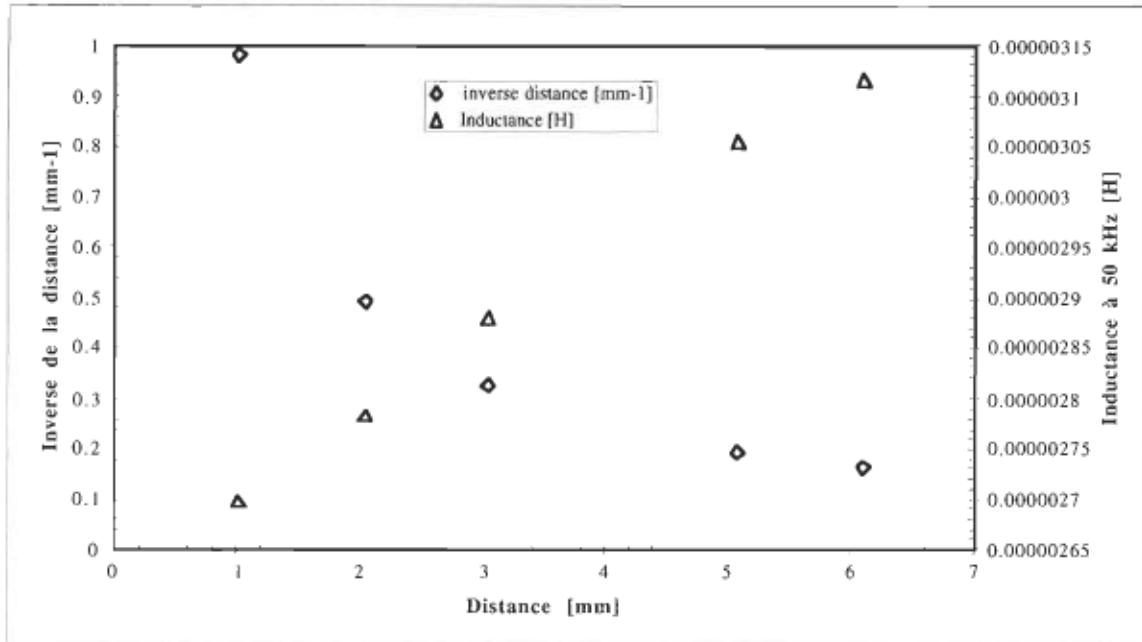


Figure 5.15 Variations des paramètres influençant le facteur k en fonction de la distance

5.4. Fidélité des mesures

Pour quantifier la fidélité des mesures, le capteur a été installé sur le mandrin de la fraiseuse comme lors des essais précédent. Cependant, lors des essais de fidélité, c'est le mandrin qui est devenu la partie mobile et ce dans le but d'éloigner ou de rapprocher le capteur de la plaque d'acier inoxydable. Les essais de répétabilité se sont déroulés selon l'organigramme présenté à la figure 5.16.

Au début des essais de fidélité, la consigne de température de l'objet de mesure a été ajustée à 50 °C. L'atteinte de la consigne de température et du régime permanent ont été détectés à partir du moment où le pourcentage de modulation de puissance de la source infrarouge a atteint une valeur minimale. À ce moment, le capteur a été approché de l'objet de mesure et une mesure a été prise. Afin d'avoir une erreur absolue au minimale, la fréquence d'opération du capteur a été ajustée à 50 kHz et la distance entre le capteur et la

plaqué d'acier à 3.048 mm. L'évaluation de la température (T') a été effectuée en utilisant les coefficients ("a" à "m") déterminés à la section 5.3.

Une fois la mesure prise, le capteur a été éloigné de l'objet de mesure. La distance est ainsi passée de 3.048 mm à plus de 160 mm. Après un délai de 30 secondes, le capteur a de nouveau été approché et une nouvelle mesure a été prise. Ainsi pour chaque consigne de température de l'objet de mesure, 10 mesures de température ont été prise à l'aide du capteur inductif. Par la suite, la consigne de température a été augmentée de 50 °C et ce jusqu'à ce que la température de consigne atteigne 300 °C. Les résultats de fidélité de mesures sont montrés dans le tableau 5.6

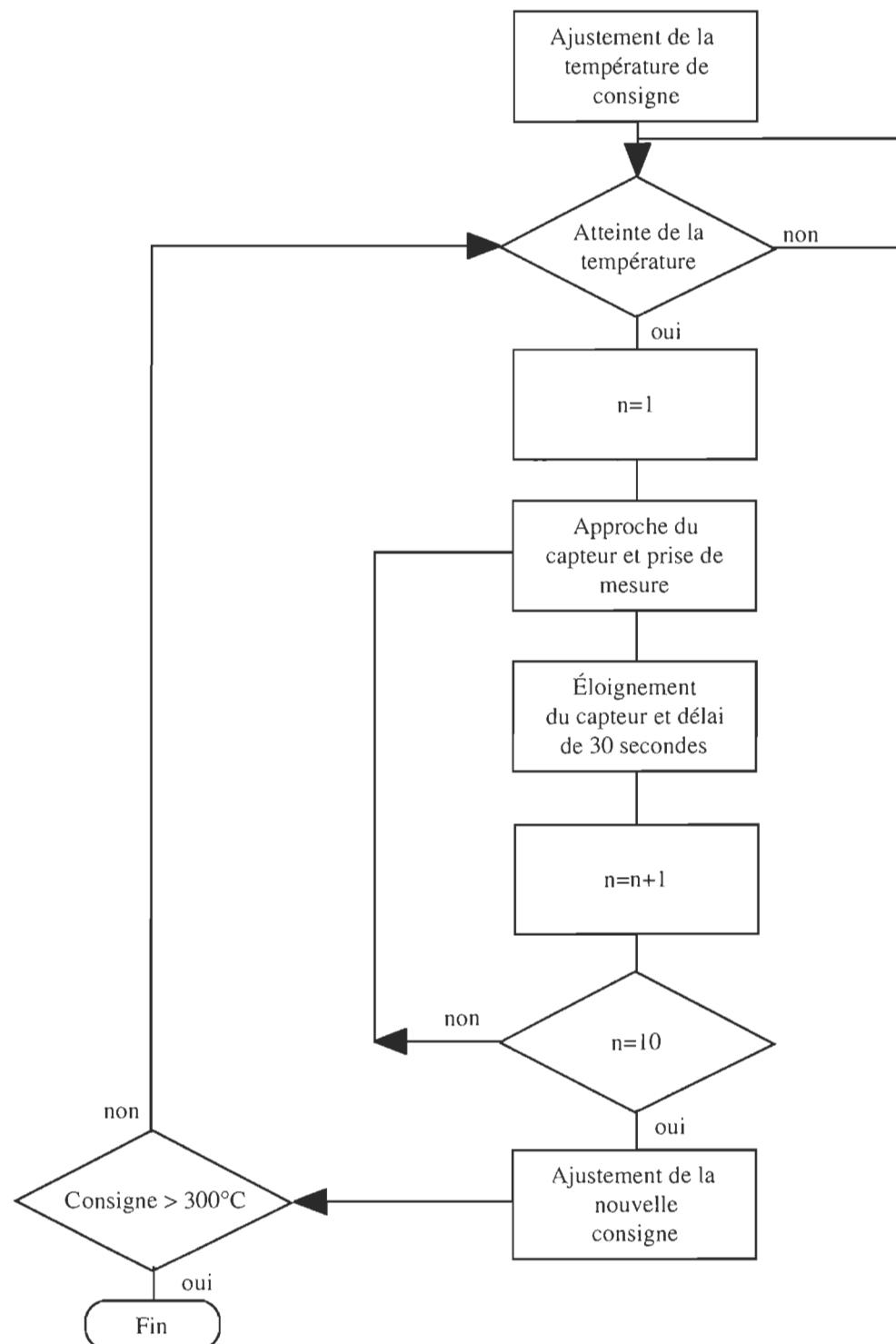


Figure 5.16 Organigramme des essais de répétabilité

TABLEAU 5.6 ESSAIS DE FIDÉLITÉ

Température mesurée (T) [°C]	Température estimée (T') [°C]									
50°C ± 0.5°C	50.1 50.6 49.3 50.3 49.8 50.0 49.7 50.3 50.0 49.6									
100°C ± 0.5°C	103.6 102.6 104.0 103.3 102.1 103.0 103.0 102.8 102.8 103.4									
150°C ± 0.5°C	152.3 150.5 149.9 150.2 153.1 153.0 154.8 153.1 153.1 150.6									
200°C ± 0.5°C	205.6 205.6 204.9 201.3 200.0 200.0 203.1 202.7 203.0 202.3									
250°C ± 0.5°C	258.4 257.3 260.1 255.6 252.9 254.8 254.8 257.0 253.4 252.0									
300°C ± 0.5°C	307.5 307.5 307.8 309.0 305.8 310.1 301.5 304.6 304.0 302.3									

L'analyse des résultats du tableau précédent montre que l'écart maximal par rapport à la moyenne de chaque essai est inférieur à ± 2 écart types comme cela a été spécifié à la section 3.3. Le tableau 5.7 fait état de ces écarts.

TABLEAU 5.7 RÉSULTATS DES ESSAIS DE FIDÉLITÉ ($d = 3$ mm)

Moyenne des valeurs estimées T' [°C]	Écart type	Valeur estimée [°C]		Écart par rapport à la moyenne [écart type]	
		minimale	maximale	minimal	maximal
49.97	0.383	49.3	50.6	-1.75	1.64
103.06	0.539	102.1	104.0	-1.78	1.74
152.06	1.646	150.2	154.8	-1.13	1.66
202.85	2.065	200.0	205.6	-1.38	1.33
255.63	2.566	252.0	258.4	-1.414	1.08
306.01	2.857	301.5	310.1	-1.578	1.431

5.5. Essais comparatifs avec pyromètre optique

Le but de ces derniers essais, était de montrer que le capteur inductif n'était pas influencé par l'état de surface de la cible comparativement au pyromètre monochromatique. Pour ce faire, le montage illustré à la figure 5.17 a été réalisé. Le pyromètre utilisé lors des essais comparatif était le TPT200 de la compagnie AGEMA. Les caractéristiques techniques de ce pyromètre sont fournies à l'annexe A. Le pyromètre a été installé près du capteur inductif afin qu'ils voient la même température. Des essais

d'uniformité de chauffage de la plaque d'acier inoxydable ont d'ailleurs été réalisés dans ce sens.

Le pyromètre optique a ensuite été relié, via sa sortie de 4 à 20 mAcc, au système d'acquisitions de données. Pour sa part, le capteur inductif a été relié à l'analyseur d'impédance qui fournissait les valeurs de résistance et d'inductance. Les thermocouples du capteur (T_1 et T_2) ont aussi été reliés au système d'acquisitions afin de suivre l'évolution en température du capteur lors des essais. Finalement toutes les données étaient envoyées au programme d'acquisition et de contrôle qui avait, pour les besoins de la cause, été légèrement modifié. Ainsi il était possible de lire et d'enregistrer les mesures provenant du pyromètres optique et du capteur inductif. La distance entre le capteur inductif et la plaque d'acier a été ajustée à $3.05 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ alors que la fréquence d'opération était de 50 kHz.

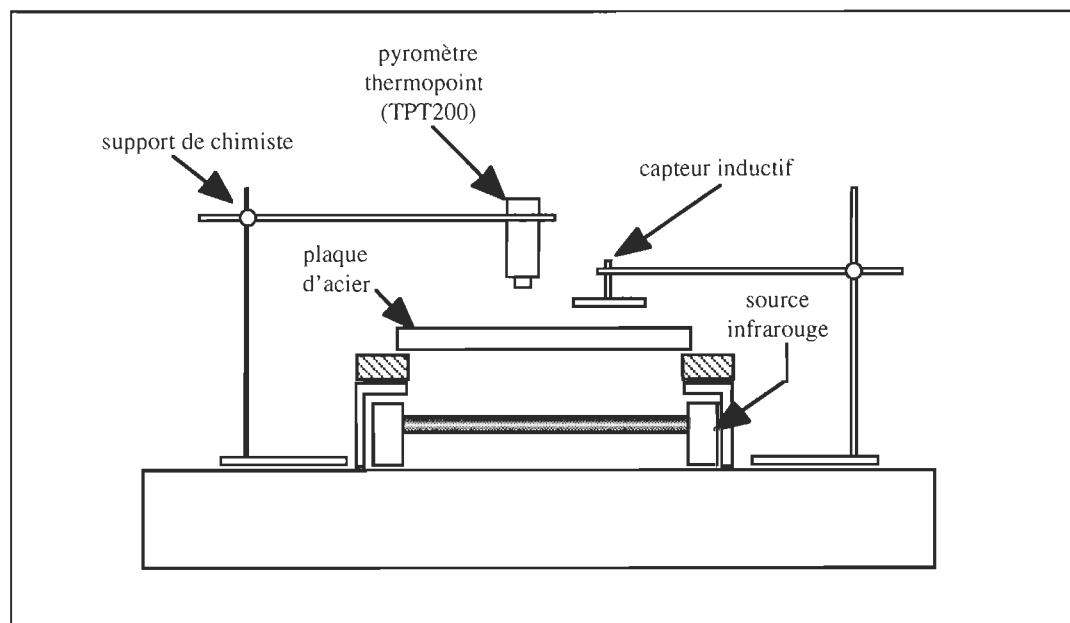


Figure 5.17 Montage pour les essais comparatifs

Pour valider que le capteur inductif n'était pas influencé par l'état de surface de l'objet de mesure, deux autres plaques d'acier inoxydable de type 304L, ont été utilisées. La première a été recouverte à l'aide d'une peinture en aérosol noir mat de la marque Harimco. Cette peinture a été appliquée en fine couches espacées d'une période de séchage de 24 heures. Après le séchage de la sixième couche, des mesures permettant d'évaluer l'émissivité de la plaque ont été effectuées. Les résultats des mesures ont montré que l'émissivité était de 0.99 et qu'elle était constante en fonction de la température de la plaque.

La seconde plaque a été polie à l'aide de papier d'émeri. Les premiers sablage ont été réalisés à l'aide de papier grossier. Au fur et à mesure du sablage, du papier plus fin a été utilisé. À la fin du sablage, l'émissivité de la seconde plaque était de 0.36 à 20 °C et variait en fonction de la température de la plaque.

Ainsi, lors des essais avec la plaque à émissivité constante, l'émissivité du pyromètre a été ajustée à 0.99. Lors des essais avec la seconde plaque (émissivité variable), l'émissivité du pyromètre a été ajustée à 0.36. Les résultats des deux essais sont présentés aux figures 5.18 et 5.19.

Les premiers résultats démontrent que lorsque l'émissivité de l'objet de mesure est bien connue, l'erreur absolue entre la température mesurée (T) et celle estimée par le pyromètre est faible. Dans les faits, l'erreur absolue moyenne n'est que de 0.7 °C alors qu'elle est de 1.86 °C pour le capteur inductif. Par contre, la figure 5.19 met en évidence que lorsque cette émissivité n'est pas connue avec précision, l'erreur absolue moyenne entre les résultats fournis par le pyromètre et ceux mesurés avec un thermocouple calibré diverge de façon très évidente. Lors des essais avec la seconde plaque, la température estimée par le pyromètre a dévié par rapport à la lecture faite par le thermocouple calibré.

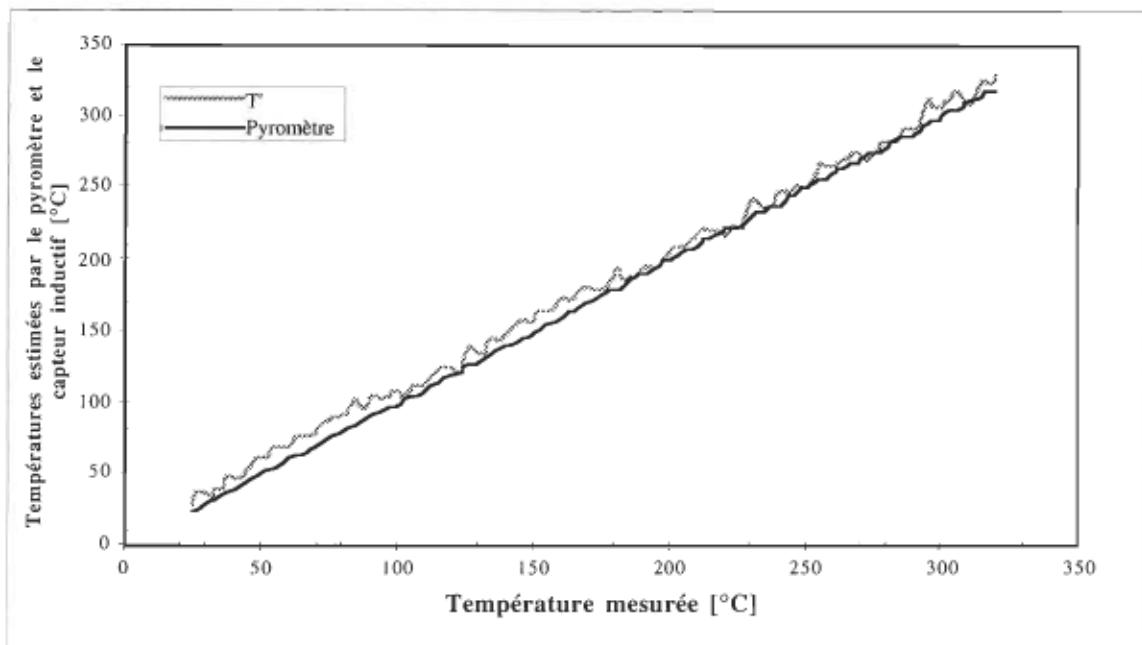


Figure 5.18 Comparaison des mesures avec cible à émissivité constante (0.99)

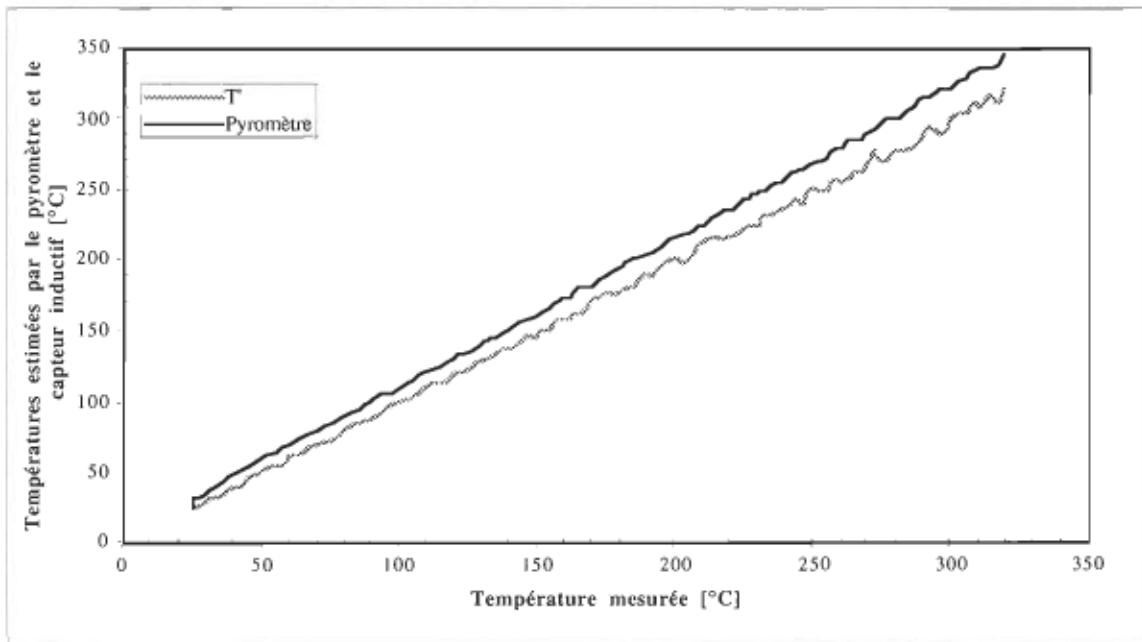


Figure 5.19 Comparaison des mesures avec cible à émissivité variable (0.36 à 20 °C)

L'erreur absolue moyenne est ainsi passée de 0.7°C , lors des premiers essais, à plus de 15°C lors des essais avec la seconde plaque. Pour sa part, lors des essais avec la

seconde plaque, l'erreur absolue moyenne entre les résultats de mesure du capteur inductif et ceux du thermocouple est demeurée stable. En effet, l'erreur absolue moyenne à été de 2.06 °C comparativement à 1.86 °C lors des essais avec la plaque à émissivité constante.

6. CONCLUSIONS ET ORIENTATIONS

Le but de la présente démarche était de valider l'utilisation d'un capteur inductif afin de faire la mesure de température de surface des objets métalliques. Comme mentionné à la section 3.3, pour que la faisabilité soit démontrée, les exigences suivantes ont été établies :

1. mesure indépendante de la distance qui sépare le capteur de l'objet de mesure ;
2. mesure indépendante de l'émissivité de l'objet de mesure ;
3. erreur de mesure relative maximale $\pm 10^\circ\text{C}$;
4. répétabilité de mesure ± 2 écart type par rapport à la moyenne des lectures.

L'analyse des essais présentée au chapitre 5 a démontré que, sous certaines conditions l'ensemble de ces critères ont été satisfait. En effet, à une fréquence de 50 kHz et une distance de 3.048 mm, l'erreur absolue maximale est de 9.5°C et l'erreur absolue moyenne est de 4.1°C . Pour ce qui est de la fidélité des mesures, les écarts maximum mesurés par rapport à la moyenne des mesures sont de -1.78 et de 1.74 écart type.

L'analyse des essais a aussi permis de mettre en lumière que le fait que le capteur inductif n'est pas influencé par l'émissivité de l'objet de mesure. Plus précisément, les

essais comparatifs ont permis de comparer l'erreur absolue moyenne d'un pyromètre monochromatique et celle du capteur inductif. Ces essais ont démontré que lorsque l'émissivité de l'objet de mesure est constante et invariable en fonction de la température, l'erreur relative moyenne du pyromètre est faible. Cependant, lorsque l'émissivité de l'objet de mesure est faible et/ou variable en fonction de la température, l'erreur absolue moyenne augmente de façon très importante. Par contre, dans un cas comme dans l'autre, l'erreur absolue moyenne calculée à partir des valeurs estimées est demeurée à peu de chose près constante.

Les essais ont aussi permis de constater que la mesure de température était relativement indépendante de la distance. En effet, à fréquence constante, l'erreur absolue moyenne ne varie de plus de 2.7°C pour une distance qui varie de 1.016 mm à 6.096 mm. Ce résultat aurait pu être grandement amélioré si le facteur k avait été plus élevé. *L'ensemble des ces constatations permettent de conclure à la possibilité d'utiliser un capteur inductif pour la mesure de température de surface des objets métalliques.*

Les recherches subséquentes à ce projet devraient avoir pour but de construire un capteur intégré. Elles devraient donc avoir pour objectif de :

1. revoir la construction du capteur ;
2. réaliser un circuit électronique permettant la mesure d'inductance, de résistance et de température du capteur ;
3. réaliser l'implantation de la méthode de multi-régressions non linéaires ou de toutes autres méthodes performantes dans un circuit intégré spécifique.

Le nouveau capteur devrait être plus petit et avoir une inductance (L_c) plus élevée afin d'augmenter la valeur du facteur k et ainsi faire diminuer l'erreur absolue moyenne. Quoique ce ne soit pas vraiment un inconvénient, le nouveau capteur devrait pouvoir fonctionner sans refroidissement externe ou utiliser une boucle de refroidissement en circuit fermé. L'atteinte de cet objectif devrait passer par l'utilisation d'une petite quantité de liquide caloporteur circulant en circuit fermé au travers du capteur et d'un échangeur air/liquide. Le débit de ce liquide devrait être contrôlé par une petite pompe à courant continu. Le contrôle de la vitesse de cette pompe devrait être effectué à partir de la température de l'eau à la sortie du capteur.

Le circuit électronique devrait pour sa part permettre de mesurer la valeur de l'inductance , de la résistance et de la température du capteur en temps réel. La mesure d'inductance et de résistance pourrait être réalisée à l'aide d'une source de courant à fréquence variable et d'une capacité de valeur connue. Il s'agirait tout simplement de créer un circuit résonnant parallèle à l'aide du capteur et de la capacité connue et de détecter la fréquence de résonnance du circuit et de mesurer la tension à ses bornes. La mesure de la fréquence de résonnance devrait permettre de déduire la valeur de l'inductance (L_c) alors que la mesure de tension, à la résonnance, devrait permettre de calculer la résistance du capteur (R_c).

Ces valeurs devraient ensuite être acheminées vers un microprocesseur, un microcontrôleur ou un circuit intégré spécifique dans lequel serait implanté la méthode de calcul pour l'estimation de la température de surface de l'objet de mesure.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 2.6
- [2] J.P. BARDON, M. RAYNAUD, Y. SCUELLE, "*Mesures par contact des températures de surface*", Revue Générale de Thermique, Hors-série / Mesure de température , Sept. 1996, Tome 1, vol. 34, p. 15
- [3] Y. LE SANT, P.MILLAN, D. PAJANI, F. PAPINI, J.J. SERRA, J.J.VULLIERME, "*Mesures par rayonnement des températures de surface*", Revue Générale de Thermique, Hors-série / Mesure de température , Sept. 1996, Tome 1, vol. 34, p. 36
- [4] G. GAUSSORGUES, "La thermographie infrarouge", Paris, technique & documentation, 1981, p 17
- [5] G. GAUSSORGUES, "La thermographie infrarouge", Paris, technique & documentation, 1981, p 17
- [6] G. GAUSSORGUES, "La thermographie infrarouge", Paris, technique & documentation, 1981, p 17
- [7] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 6.76

- [8] J. Gosse, D. Biau," Les applications industrielles du chauffage par rayonnement infrarouge", Paris, Eyrolles, 1986, p 33
- [9] J. Gosse, D. Biau," Les applications industrielles du chauffage par rayonnement infrarouge", Paris, Eyrolles, 1986, p 31
- [10] M. ORFEUIL, " Electrothermie industrielle ", Paris, Dunod, 1981, p 389
- [11] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 6.79
- [12] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 6.79
- [13] IRCON, "I.R. ANSWER AND SOLUTION HANDBOOK", États-Unis, IRCON inc., 1993, pp 13-14
- [14] IRCON, "I.R. ANSWER AND SOLUTION HANDBOOK", États-Unis, IRCON inc., 1993, pp 14-17
- [15] A. CHAMPENOIS, "Alimentations Thyristors et Optoélectronique", Montréal, ERPI, 1988, pp 480-485
- [16] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 6.80
- [17] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 6.81
- [18] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, pp 2.1 à 2.3

- [19] E. BORIDY," Életromagnétisme Théorie et Applications", Montréal, Presses de l'Université du Québec, 1985, p 477
- [20] M. ORFEUIL, " Electrothermie industrielle ", Paris, Dunod, 1981, p 435
- [21] M. ORFEUIL, " Electrothermie industrielle ", Paris, Dunod, 1981, p 437
- [22] J.L. DION, "Électromagnétisme", Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 1995, chap 3, p 88.
- [23] C.A.Tudbury, "Basics of Induction Heating", New York, John F. Rider Inc., 1960, 76
- [24] S. ZINN, S.L. SEMIATIN, "Elements of Induction Heating Design, Control and Applications",Californie, EPRI, 1988, pp 15-25
- [25] S. ZINN, S.L. SEMIATIN, "Elements of Induction Heating Design, Control and Applications",Californie, EPRI, 1988, pp 18-25
- [26] D. BIALOD, J.P. SAINT GERMAIN, V. IGNE, L. MISSENARD, "Induction Conduction électrique dans l'industrie", France, EDF, 1996, pp 42-47
- [27] G. ASCH, "Les capteurs en instrumentation industrielles", Paris, Dunod, 1991, p 4.29 figure 4.23
- [28] J.L. DION, "Électromagnétisme", Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 1995, chap 6, p 11.
- [29] J.L. DION, "Électromagnétisme", Trois-Rivières, Université du Québec à Trois-Rivières, 1995, chap 6, p 1.

-
- [30] ASM Committee on Copper and Copper alloys, "Metal handbook," Ohio, ASM, 1987, Ninth Edition, volume 2 p 395
 - [31] R.E. BOLZ, G.L. TUVE, "Handbook of tables for applied engineering science," New York, CRC press, 1992, Second Edition, p 223
 - [32] J.M. DORLOT, J.P. BAÏLON, J. MASOUNAVE, "Des Matériaux", Montréal, E.E.P.M., 1986, deuxième édition, pp 313 à 320
 - [33] J.M. DORLOT, J.P. BAÏLON, J. MASOUNAVE, "Des Matériaux", Montréal, E.E.P.M., 1986, deuxième édition, p 277
 - [34] M. BOBADILLA, "Solidification des aciers inoxydables austenitiques : microségrégation et formation de structures", Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Lorraine, 1984
 - [35] Hewlett Packard, "Test and Measurement Catalog 1994", Hewlett packard, 1986, pp 358 à 359
 - [36] Hewlett Packard, "Test and Measurement Catalog 1994", Hewlett packard, 1986, pp 126 à 129
 - [37] T.M. LITTLE, F.J. HILLS, "Agricultural Experimentation Design and Analysis", New York, John Wiley and sons, 1978, p 49
 - [38] D.C. MONTGOMERY, "Design and Analysis of Experiments", New York, John Wiley and sons, 1991, pp 498 à 501
 - [39] Math Works, "MATLAB Optimization Toolbox", p 2.37

ANNEXE A

DONNÉES TECHNIQUES DES PYROMÈTRES MONOCHROMATIQUES ET BICHROMATIQUE

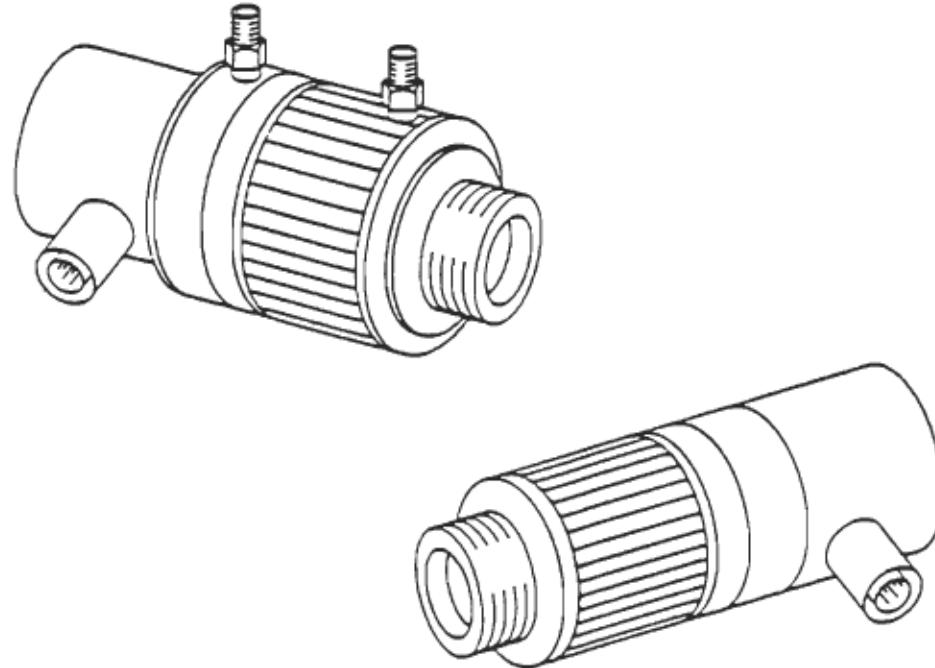
THERMOPOINT® (TPT)™

TPT 200 & TPT 300

OPERATOR'S MANUAL

Contents:

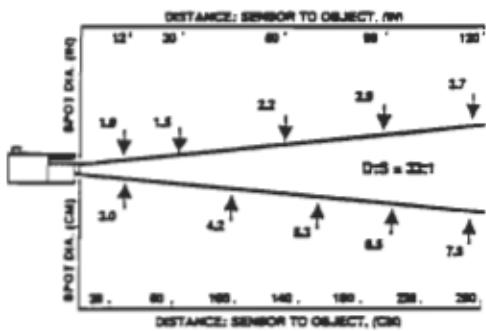
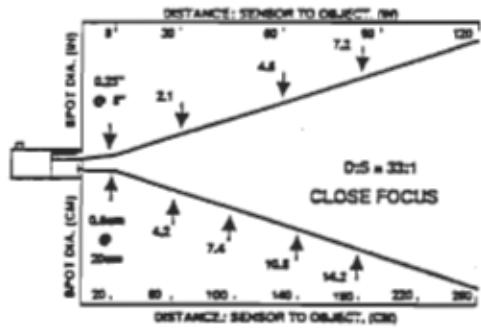
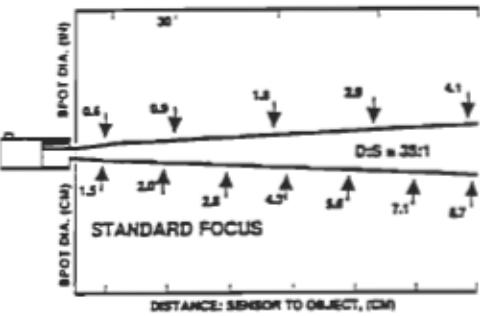
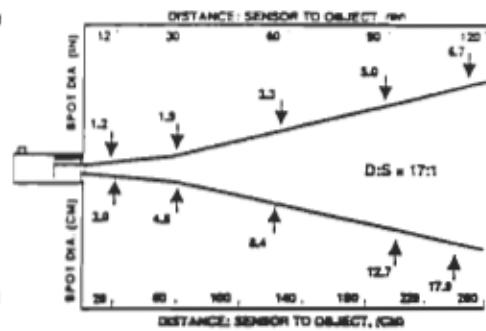
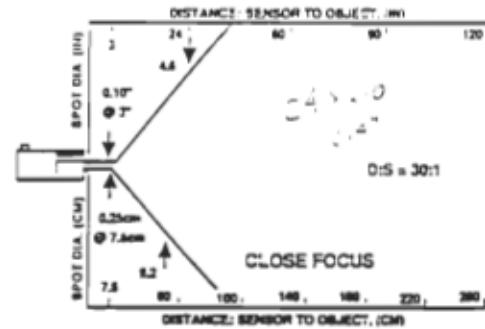
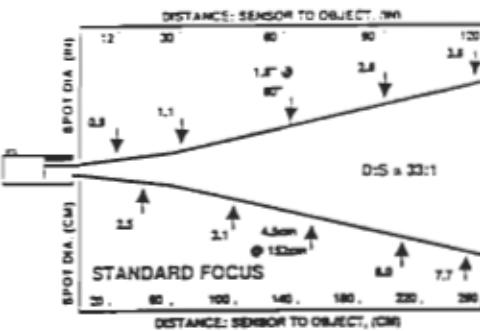
1. Description
2. Installation
3. Operation
4. Maintenance



HEADQUARTERS: AGEMA Infrared Systems AB, Box 3, S-182 11 DANDERYD, Sweden. Tel. 08-753 34 00
CANADA: AGEMA Infrared Systems Ltd., 5200 South Service Road, Suite 125, BURLINGTON, Ontario, L7L 5K2. Tel. 416-637 56 96
FRANCE: AGEMA Infrared Systems S.A.R.L., 18 Rue Hoche, B.P. 81, 92134 Issy Les Moulineaux Cedex. Tel. 01-47 36 88 11
ITALY: AGEMA Infrared Systems SRL, Via Valassina 24, I-20159 MILANO. Tel. 02-668 87 69
SWEDEN: AGEMA Direct Sales AB, Box 3, S-182 11 DANDERYD, Tel. 08-753 34 00
UNITED KINGDOM: AGEMA Infrared Systems Ltd., Arden House, LEIGHTON BUZZARD, Beds, LU7 7ND. Tel. 0525-37 56 60
UNITED STATES: AGEMA Infrared Systems, 350 County Avenue, SECAUCUS, NJ 07094. Tel. 201-667 53 90
WEST GERMANY: AGEMA Infrared Systems GmbH, Zimmersmühlenweg 40, D-6370 OBERURSEL/Ts. Tel. 06171-63 02 40

1.1 Specifications

1.1.1 Optical



$$3'' \rightarrow 0.10''$$

$$D:S = 30:1$$

1.1.2 Thermal

Measurement Range

Thermocouple Output: TPT200LTSF/CF:	-18 to 760°C (0 to 1400°F), Type J
	0 to 870°C (32 to 1600°F), Type K
TPT200G5:	260 to 1650°C (500 to 3000°F)
TPT200P7:	10 to 360°C (50 to 650°F)

Current Output (switch selectable):

TPT300

Range Setting	°C Version	°F Version
1	0 to 100	0 to 200
2	0 to 200	0 to 400
3	0 to 400	0 to 800
4	0 to 800	0 to 1400

TPT300G5

Range Setting	Temperature Range
1	500 to 1500°F
2	500 to 3000°F
3	260 to 815°C
4	260 to 1650°C

TPT300P7

Range Setting	Temperature Range
1	50 to 350°F
2	50 to 650°F
3	10 to 110°C
4	10 to 360°C

Spectral Response:	LT Versions	8-14 microns
	G5 Versions	5.0 microns (nominal)
	P7 Versions	7.9 microns (nominal)

Accuracy: $\pm 1\%$ of reading, 65 to 870°C (150 to 1600°F)
 $\pm 1^\circ\text{C}$, -18 to 65°C ($\pm 2.5^\circ\text{F}$, 0-150°F)

Repeatability: $\pm 0.5\%$ of reading

3 Operational

Response Time: 300 mSec, 80 mSec option

Note: 80 mSec is standard on HT (2.2mm) versions

Emissivity: 0.10-0.99 in 0.01 steps

Peak Hold:

- with no peak hold: 0.1 sec decay time to 50% of peak value
- with maximum peak hold: 14°C (25°F) per second (Nominal decay rate)

Averaging:

- with no averaging: 0.5 sec response time
- with maximum averaging: 5 sec response time

Fail Safe: Full scale (20.3 mA) when under or over range or subrange

4 Electrical

Power: 12 Vac, 1 VA nominal, 50 to 60 Hz

Outputs: Thermocouple Versions:

TPT200LT	Type J or K
TPT200G5	Type R
TPT200P7	Type J
TPT200HT	Type R

Current Versions:

- all ranges: 4-20 mA
- under or over specified operating temperature ranges: 20.3 mA
- loop impedance, Max: 300 ohms

Interconnection: 5-pin DIN connector, 15 ft (4.5-m) cable standard

5 Physical

Environmental Rating: NEMA 4 (IEC 529, IP 65), rated with conduit and compression fitting (which prevents liquid from entering through the connector)
NEMA-12 (IEC 529, IP 54) standard
NEMA-4 (IEC 529, IP 66) optional

Ambient Operating Temperature: 0 to 50°C (32 to 120°F)

- with air cooling: 0 to 120°C (32 to 250°F)
- with water cooling: 0 to 175°C (32 to 350°F)

Storage Temperature: -40 to 65°C (-40 to 150°F)

Dimensions	Standard	Water-Cooled Housing
Length:	17.8 cm (7.0")	17.8 cm (7.0")
Diameter:	5.7 cm (2.24")	7.57 cm (2.98")
Weight:	0.5 kg (1.2 lbs)	0.8 kg (1.7 lbs)

RATIO-SCOPE® 8

TWO-COLOR PYROMETER

OWNER'S MANUAL

Capintec Instruments, Inc.
540 Alpha Drive
Pittsburgh, PA 15238
800 CAPNTEC
(412) 963 - 1988

A Subsidiary Of
Capintec, Inc.
6 Arrow Road
Ramsey, NJ 07446

© Capintec Instruments, Inc. 1982
® Ratio-scope is a registered trademark
of Capintec, Inc.
U.S. Patent - 3,795,918
Revised September, 1982

ROS-8 SENSING HEAD

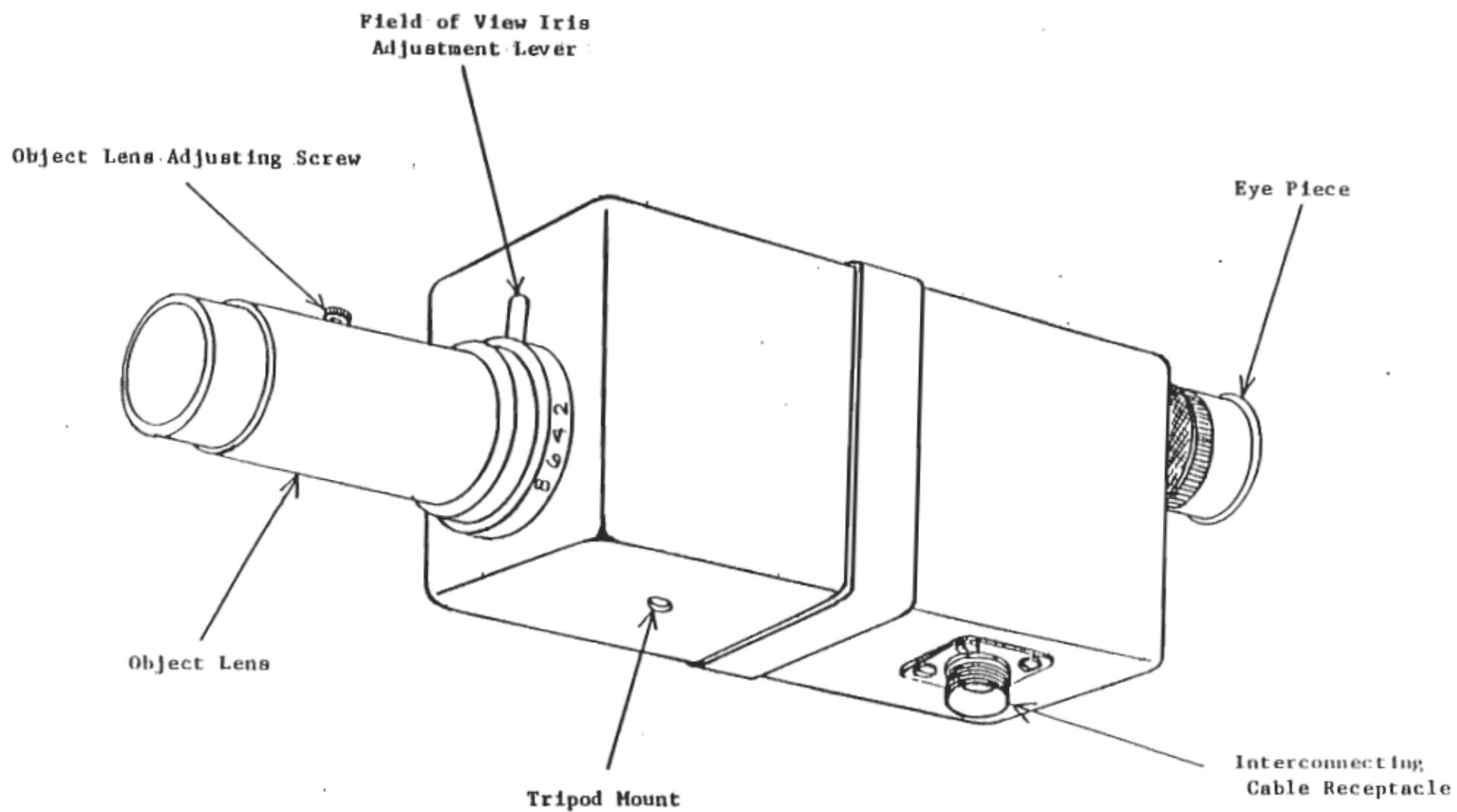


Figure 1

SECTION I
INTRODUCTION

1.1 GENERAL

This manual contains instructions for operating the Ratio-Scope 8 (ROS-8) infrared two-color pyrometer.

1.2 PURPOSE

The purpose of the ROS-8 two-color optical pyrometer is to perform accurate and reliable non-contact temperature measurements of various objects. The instrument can be used to monitor and record temperature. The instrument can also be used as a temperature transducer for process control, quality control, etc.

1.3 TWO-COLOR PYROMETRY

The ROS-8 is a two-color optical pyrometer which detects radiation in the near infrared region of the spectrum. A two-color pyrometer has a great advantage over a single-color pyrometer.

The main advantages of the two-color pyrometer arise from the fact that it measures the ratio of the energy around two wavelengths (two colors). The single-color pyrometer, on the other hand, measures the absolute energy received in a band around one wavelength. Any situation which alters the amount of detected energy will therefore, affect the temperature indication of the single-color pyrometer. The response of the two-color pyrometer, however, will not be affected by the change in detected energy. This is because the ratio of the detected energy does not change, assuming that the wavelengths are properly chosen.

The most important factors which affect the energy detected by the pyrometer are: adverse viewing conditions; unknown or changing emissivity; targets which do not fill the field-of-view; and changes in the selected size of the field-of-view. These factors are discussed in detail in Section 3.6.

Section 3 of this manual contains a detailed discussion of the principles of radiation pyrometry and a comparison of the three main types of pyrometers.

SECTION 4

SPECIFICATIONS

4.1 GENERAL

Performance specifications are listed in this section. Environmental, physical and input power requirements are shown in Section 2.

Specifications are for an ambient temperature of 22°C (72°F) unless otherwise specified.

DISPLAY

Digital Display

Analog Display = 4 1/2" taut band meter

The instrument will be calibrated over one of the following spans within the over-all temperature range:

- a) 500°C (1000°F): standard
- b) 1000°C (2000°F): optional

The calibrated span for the particular instrument will be indicated on the serial number tag on the back of the Ratio-Scope.

OVER-ALL TEMPERATURE RANGE

Standard Range: 800°C - 1800°C (1400°F - 3400°F)

Optional Range: 650°C** - 2000°C (1200°F** - 3600°F)

** for a large black body radiator

REPEATABILITY (Short Term Stability)

±[5°C (9°F) + 0.2% of temperature readings] under constant conditions.

TEMPERATURE STABILITY

0.5°C/°C*

*See next page.

.1 (cont'd)

RADIATION INTENSITY COMPENSATION

$\pm [3^\circ\text{C} (5^\circ\text{F}) + 0.2\% \text{ of temperature reading}]$ for a factor of 3 radiation intensity change.

LINEARITY

$\pm [5^\circ\text{C} (9^\circ\text{F}) \pm 0.5\% \text{ of calibrated temperature span}]$

UNIT CONVERSION ACCURACY

$\pm 5^\circ\text{C}$, $\pm 9^\circ\text{F}$

RESPONSE TIME CONSTANT

TC1 .3, 1.5, 3.0 seconds , switch selectable

TC2 .3, 2.5, 5.0 seconds , switch selectable , standard

TC3 .7, 5.0, 10.0 seconds , switch selectable

OUTPUT

0 to 1 Volt adjustable

4.2 CALIBRATION

METHOD

Prior to shipment, each Ratio-Scope is calibrated for black/gray body, tungsten or other specified target materials and target conditions. The required frequency of recalibration to maintain satisfactory accuracy will depend on environmental conditions and the degree of accuracy required. Nominal calibration period of one year is recommended.

CALIBRATION ACCURACY

$\pm [10^\circ\text{C} (20^\circ\text{F}) + 1\% \text{ of temperature reading}],*$ referenced against a black body at calibration points. Calibration to customer samples/standards is available for a nominal charge. Calibration can be supplied in either Celsius or Fahrenheit.

4.3 SENSOR SYSTEM

DETECTOR

Specially selected Silicon Cell.

FILTERS

Narrow bands around wavelengths in the near infrared. Special filters, for customer specified applications, are available on request.

4.4 OPTICS

LENS

Standard: 85 mm fixed focus (1 m to infinity)

Optional: 85 mm adjustable focus
100 mm adjustable focus
150 mm fixed focus (1.5 m to infinity)

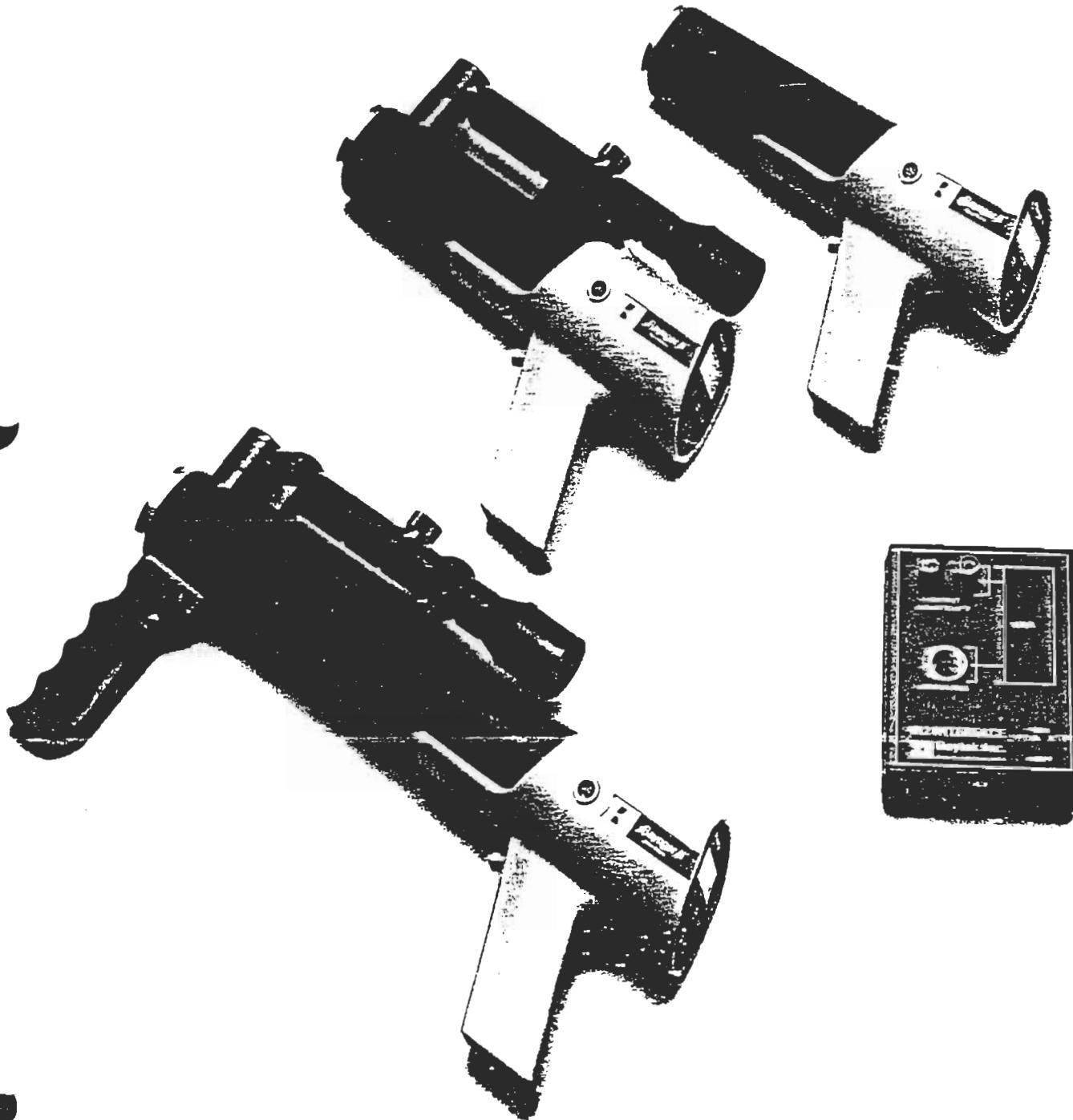
FIELD-OF-VIEW

View Angle: Adjustable from 1° to 5° (with 85 mm lens).

Raynger® II

Data System

Operating Manual



**Table 1. Raynger II
Data System
Specifications**

Raynger II	
General Operating	
<i>Accuracy</i>	± 1% reading, ± 1 digit
<i>Repeatability</i>	± 0.5% reading, ± 1 digit
<i>Emissivity</i>	0.10 to 1.00 in 0.01 steps, digital setting and display
<i>Display Resolution</i>	1.0 degree (0.1 for R2AG) in TMP, MAX, MIN, DIF display 0.1 degree in AVG display below 1000°F (500°C)
<i>Response Time</i>	250 millisec
<i>Power</i>	9 Vdc
General Environment	
<i>Operating</i>	Degrees F Degrees C
<i>Storage</i>	32 to 120 0 to 50 -40 to 150 -40 to 60
Instrument Specific Operating	
Temperature Range	
<i>Model</i>	Degrees F Degrees C
R2LT	-20 to 2500 -30 to 1400
R2LT/SC	-20 to 2500 -30 to 1400
R2HR/SC	-20 to 2500 -30 to 1400
R2HR/SC/CF30	-20 to 2500 -30 to 1400
R2HR/SC/CF12	-20 to 2500 -30 to 1400
R2HT	750 to 5400 400 to 3000
R2HT/SC	750 to 5400 400 to 3000
R2G5	200 to 3000 100 to 1600
R2G5/SC	200 to 3000 100 to 1600
R2AG	-20 to 212 -30 to 100

Optical

<i>Model</i>	<i>Distance-to Size Ratio</i>	<i>Minimum Spot @ Distance</i>	<i>Spectral Response (μ)</i>
<i>R2LT</i>	30:1	1.3" (33mm) @40° (1M)	8-14
<i>R2LT/SC</i>	30:1	1.3" (33mm) @40° (1M)	8-14
<i>R2HR/SC</i>	60:1	1.0" (25mm) @60° (1.5M)	8-14
<i>R2HR/SC/CF30</i>	60:1	0.5" (13mm) @30° (0.76M)	8-14
<i>R2HR/SC/CF12</i>	60:1	0.2" (5mm) @12° (0.3M)	8-14
<i>R2HT</i>	120:1	0.67" (17mm) @80° (2M)	2.1-2.3
<i>R2HT/SC</i>	120:1	0.67" (17mm) @80° (2M)	2.1-2.3
<i>R2G5</i>	30:1	1.3" (33mm) @40° (1M)	4.9-5.3
<i>R2G5/SC</i>	60:1	1.0" (25mm) @60° (1.5M)	4.9-5.3
<i>R2AG</i>	15:1	2.6" (66mm) @40° (1M)	8-14

Mechanical

<i>Model</i>	<i>Length</i>	<i>Height</i>	<i>Width</i>	<i>Weight</i>
<i>R2LT</i>	10" (25.4cm)	6.5" (16.5cm)	3.0" (7.6cm)	2.0 lbs (0.9kg)
<i>R2LT/SC</i>	10" (25.4cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.0 lbs (1.4kg)
<i>R2HR/SC</i>	13.5" (34.3cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.0 lbs (1.4kg)
<i>R2HR/SC/CF30</i>	13.5" (34.3cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.0 lbs (1.4kg)
<i>R2HR/SC/CF12</i>	13.5" (34.3cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.0 lbs (1.4kg)
<i>R2HT</i>	14.9" (37.8cm)	6.5" (16.5cm)	3.0" (7.6cm)	3.2 lbs (1.5kg)
<i>R2HT/SC</i>	14.9" (37.8cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.7 lbs (1.7kg)
<i>R2G5</i>	10" (25.4cm)	6.5" (16.5cm)	3.0" (7.6cm)	3.2 lbs (1.5kg)
<i>R2G5/SC</i>	13.5" (34.3cm)	7.9" (20.0cm)	3.0" (7.6cm)	3.7 lbs (1.7kg)
<i>R2AG</i>	10" (25.4cm)	6.5" (16.5cm)	3.0" (7.6cm)	2.0 lbs (0.9kg)

Raynger II Interface***General Operating***

<i>Temp. Range °F and °C</i>	-100 to 4095
<i>Accuracy</i>	±2mV @ 77°F. (25°C) ambient, ±3mV for negative temperature readings.
<i>Repeatability</i>	±1mV
<i>Response Time</i>	50msec
<i>Output Impedance</i>	100 ohm
<i>Power</i>	9Vdc

Mechanical

<i>Length</i>	5.3" (13.5cm)
<i>Height</i>	1.5" (3.8cm)
<i>Width</i>	4.0" (10.2cm)
<i>Weight</i>	0.5 lb (0.23kg)

***Raynger II AC Adapter
Specification***

<i>Voltage</i>	10 Vdc min @ 100 mA load, 18 Vdc max @ no load
<i>Current</i>	100 mA minimum
<i>Connector</i>	3.5mm x 14mm plug, tip positive

Note

AC adapter is an optional accessory. Please contact the local Raytek representative.

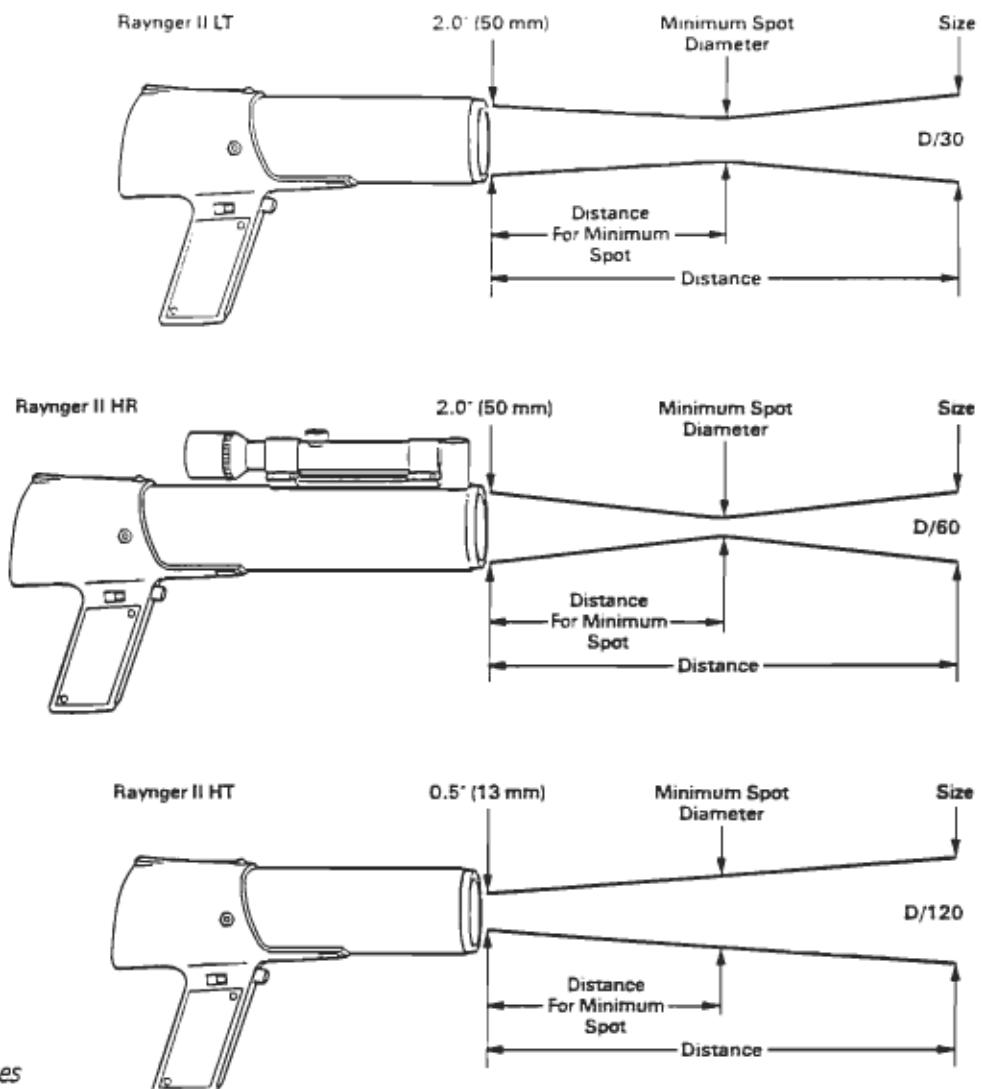


Figure 5. Raynger II Spot Sizes

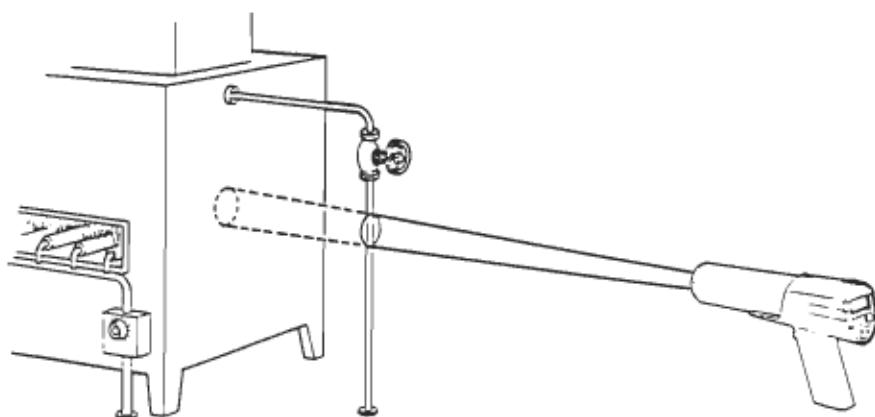


Figure 6. Small Target Temperature Measurement Problems

Introducing

mirage

LR Series Low Temperature Two-Color IR Thermometer



IRCON

Two-color (Ratio), low temperature measurement using two high-performance detectors that measure simultaneously for applications down to 500°F (250°C)

Featuring...

- High accuracy
- Fast response time
- High stability

INTRODUCTION

IRCON offers two-color infrared (IR) thermometers ideal for low temperature ferrous and non-ferrous applications with process temperatures from 500° to 1800°F (250 to 1000°C). LR Series instruments will revolutionize low temperature measurement with the same success as IRCON's high temperature two-color instruments.

Ideal applications for the LR Series include:

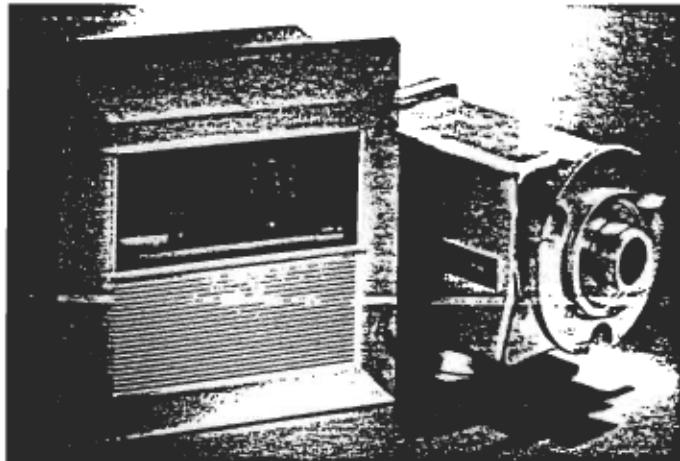
- Induction heat treating
- Steel mill applications below 1300°F (700°C), and
- Non-ferrous metal applications including aluminum.

The LR Series provides accurate non-contact measurement in applications where there is a potential for erroneous readings when using single-color instruments.

Effects of targets that are obstructed, unresolved, or have variations in surface roughness will be minimized by LR Series instruments. This is because LR Series instruments use the ratio of signals at two discrete wavelengths, 1.55 μ m and 1.68 μ m, to compute the temperature of the target. Using the ratio-measurement technique at short wavelengths with two InGaAs detectors that measure the target simultaneously, the LR Series delivers high measurement accuracy, fast response time, and low noise and high-stability operation.

DESCRIPTION

The Mirage LR Series system consists of an IR Sensor with Indicator/Processor and interconnecting cable. The Sensor offers focusable through-the-lens sighting with a reticle-defined measuring spot which simplifies installation and set-up. The Sensor is housed in a rugged NEMA 4



LR Series Sensor and Indicator/Processor

(IP66) case, with water tight connector, designed to withstand harsh environments.

The compact, rugged Indicator/Processor is simple to install and offers adjustments that are easily accessible but can be secured against tampering. Temperatures are displayed via a large four digit LCD display. Front panel controls include a four digit E-Slope potentiometer (for non-greybody applications), and a response time adjustment that allows values to be set from 0.025 to 30 seconds. Two analog outputs are available for remote access of temperature signals. Available options include: Two-Point On/Off Controller, Signal Conditioning (Peak-Picker) and Isolated Outputs.

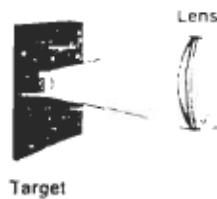
FEATURES

- Indium Gallium Arsenide (InGaAs) detectors providing stability at high ambient temperatures
- Adjustable response times ranging from 25 msec. to 30 seconds
- Temperature errors are minimized when the target is obstructed or unresolved and signal is reduced by as much as 95%
- A compact, self-contained Indicator/Processor unit designed for simple installation, easy operation and service
- Highly visible four digit LCD with °F or °C display
- Sensor housing rated NEMA 4 (IP66), Indicator Box rated NEMA 12K (IP52)
- Focusable optics with through-the-lens viewing (SLR)

LR TECHNIQUE ADVANTAGES

IRCON's LR measuring technique (A) overwhelmingly provides faster and more accurate temperature measurement over instruments that use filter wheel technique (B). In the LR scheme, ratio computation of the two spectral signals takes place simultaneously. In the filter wheel scheme, ratio computation is displaced in time resulting in slower operation and subject to error. Superior temperature measurement with LR Series under dynamic target conditions (*target moving in and out of the field of view or temperature fluctuations*) is made possible because both detectors view and measure the same spot on the target at the same instant.

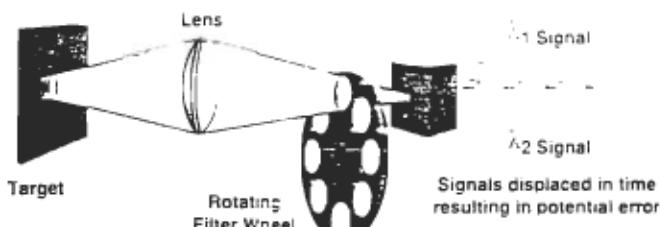
A.) The LR technique using two detectors measures simultaneously, allowing accurate readings and fast response time.



λ_1 and λ_2 Signals

Signals sensed simultaneously — for more accurate readings

B.) Filter wheel technique using one detector is time-delayed, resulting in potential error and slow response time.



λ_1 Signal

λ_2 Signal

Signals displaced in time resulting in potential error

APPLICATIONS

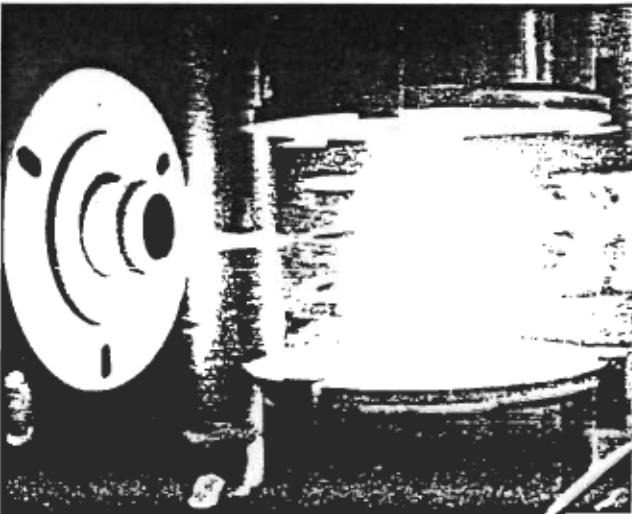
Two-color IR thermometers are less influenced by the things which will cause single-color IR thermometers to read incorrectly: smoke and dust in the sight path; dirty viewing windows; emissivity changes; and small and moving targets that do not fill the optical field of view. This forgiveness, which is inherent to two-color IR thermometry, coupled with the LR Series technique—with its two detectors taking simultaneous readings—provides more easily applied, accurate, non-contact measurement in these and other complex applications.

Targets that Enter and Leave the Field of View

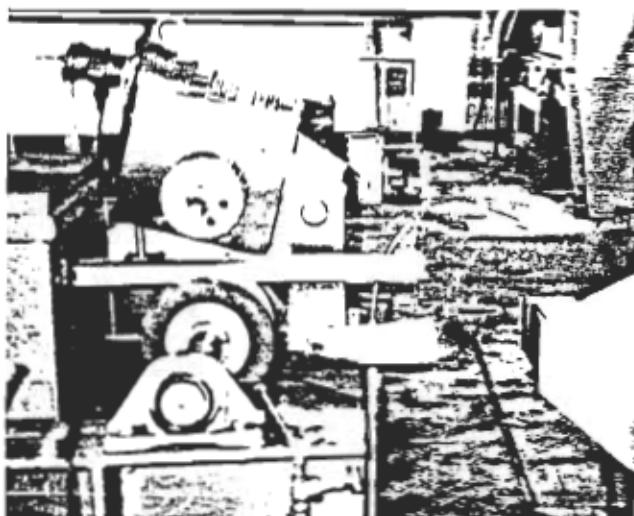
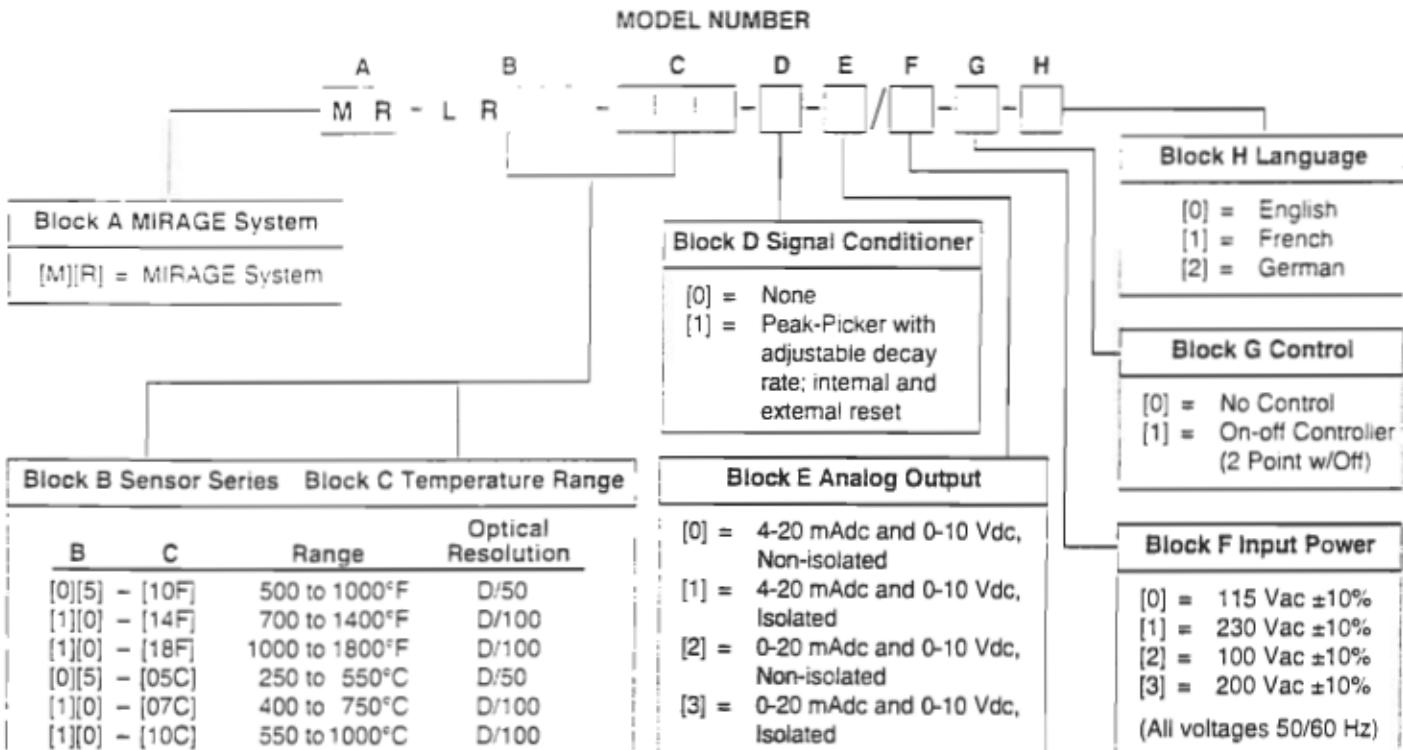
In steel wire and rod mill applications the target is in constant motion entering and leaving the field of view. Control of the metallurgical properties of the steel is critical under cooling conditions, when the loop is being coiled, and when the coil is assembled on the cooling conveyor. For this set of measurements, the LR thermometer does not require that its optical field of view be filled by the target. Even more importantly the instrument's two detectors measure the same event—the same rod passing by—measuring both spectral regions simultaneously. The LR Series provides the quick response time needed with system response times as fast as 25 milliseconds.

Obstructed Targets

Targets are viewed through small openings in insulation and/or spacing between coil turns when temperature readings are taken in induction heating processes. Though the cone of vision is cut, the LR Series obtains readings with minimized errors even when as much as 95% of the signal is reduced. With care in set-up and use of the Peak-Picker Option, the LR Series can resolve targets with smoke and steam present.



ORDERING INFORMATION

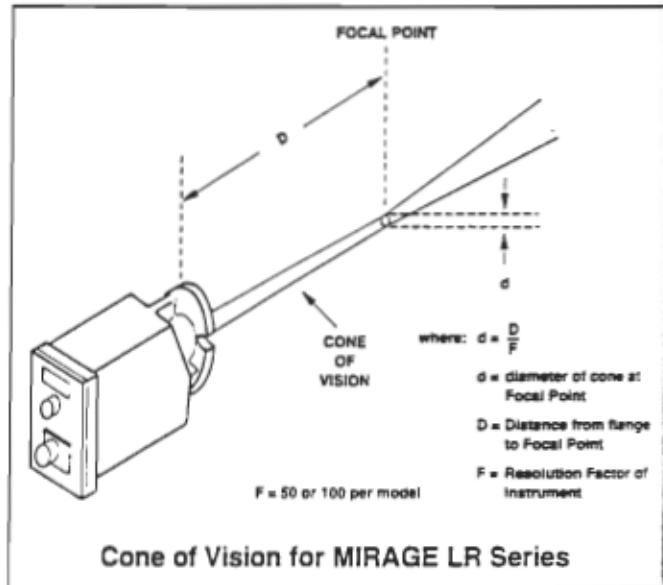


Variations in Surface Roughness

During forming operations of metals, considerable changes to metal surfaces occur. These surface changes usually constitute a grey change—i.e., the emissivity values at the two operating wavelengths are identical—and therefore, the LR Series will compensate automatically. The LR Series will accurately read the correct temperature without any calibration.

For targets which are not greybodies, such as bare or non-oxidized metals, the LR Series provides E-Slope adjustment to compensate for the non-greybody condition. The adjustment provides a means for correcting measurement and indication of these targets.

OPTICAL CHARACTERISTICS



Cone of Vision for MIRAGE LR Series

The LR Series is sensitive to infrared radiation in an area indicated by the Cone of Vision. The diameter of the cone at any point will determine the area of measurement (spot size) at that point. Anything within that area will be focused on the detector element and will therefore produce a temperature signal.

When an LR is sighted on an object, the Cone of Vision is "aimed" so that it falls on the object. When focusing the lens, adjustments are made so the focal point is at the surface of the object. The formula shown in the diagram defines the spot size at the focal point. Simply divide the Working Distance (D) by the Resolution Factor (F) to determine the Spot Size (d). See Ordering Information for Optical Resolution Factor.

SPECIFICATIONS LR Series

Calibration Accuracy

Within 0.75% of reading or 5°F (3°C)

Repeatability

0.2% of full scale temperature ±1 (noise-free)

Response Time

Adjustable from 0.025 to 30 seconds ±5%

E-Slope (4 digit Pot) Adjustment

0.850 to 1.150

Signal Reduction Ratio

Up to 95%

Invalid Alarm

LCD display indication, plus relay contact closure

Invalid relay contact rating

1 A at 24 Vdc

0.5 A at 120 Vac—Non-Inductive Load

Display

4-digit LCD with F° or C° display; Out of range arrows display; On/Off control options with set-point display; and invalid indication display.

Display updates every 1/2 second

Power Requirements

100, 115, 200, 230 Vac ±10%, 50/60 Hz per order

Sensing Head Weight

Approx. 7 lbs (3.18 kg)

Approx. 34.5 lbs (15.65 kg) with optional water cooling enclosure

Peak-Picker (Optional)

Adjustable decay rate 0.01% to 5% of span per second. A three-position control switch permits Off, Peaking or Reset functions, also Reset can be activated from user supplied contact

Analog Outputs

Non-isolated:

0 to 10 Vdc (3 mA max.)

4 to 20 mA or 0 to 20 mA (500 ohms max.)

Isolated (Optional):

0 to 10 Vdc (3 mA max.)

4 to 20 mA or 0 to 20 mA (500 ohms max.)

Two-Point On/Off Controller (Optional)

Two Form-C relay outputs rated 3 A, 250 Vac resistive.

1 A, 250 Vac inductive

5 millisecond relay delay time

Hysteresis: 0.3% of span or 1°F (1°C) whichever is greater

Ambient Temperature Range

Sensing Head: 32 to 130°F (0 to 55°C)

Indicator Box: 32 to 122°F (0 to 50°C)

Sensor Humidity

10 to 90% non-condensing

Environmentally Sealed Housing

Sensor in Aluminum casting rated NEMA 4 (IP66),

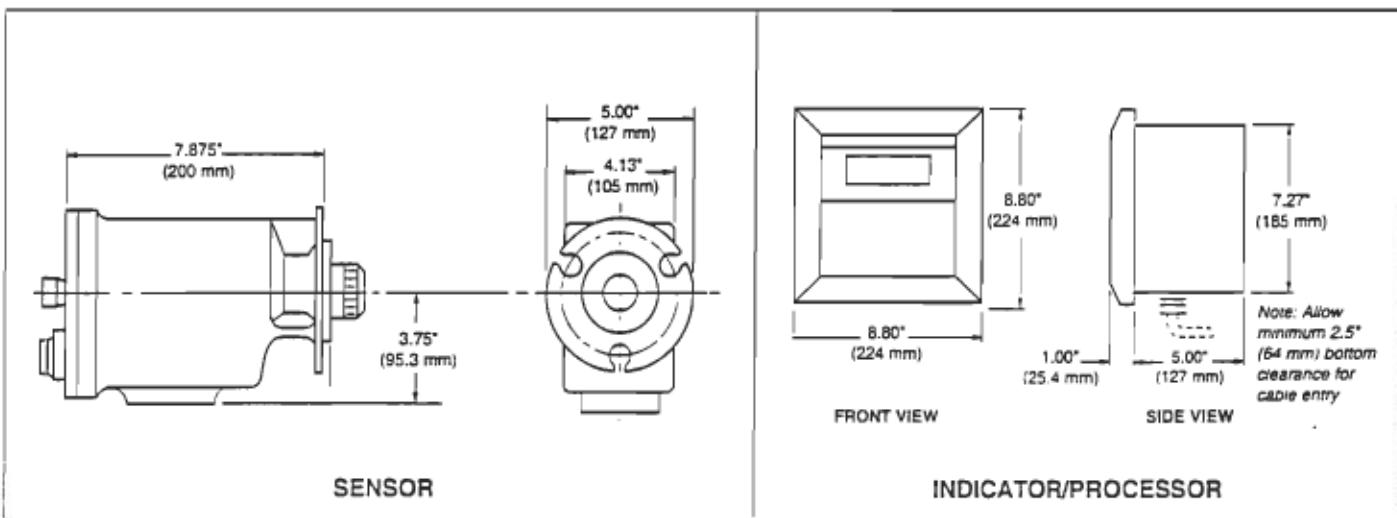
Indicator Box rated NEMA 12K (IP52)

Design and specifications subject to change without notice.
PATENTS PENDING.

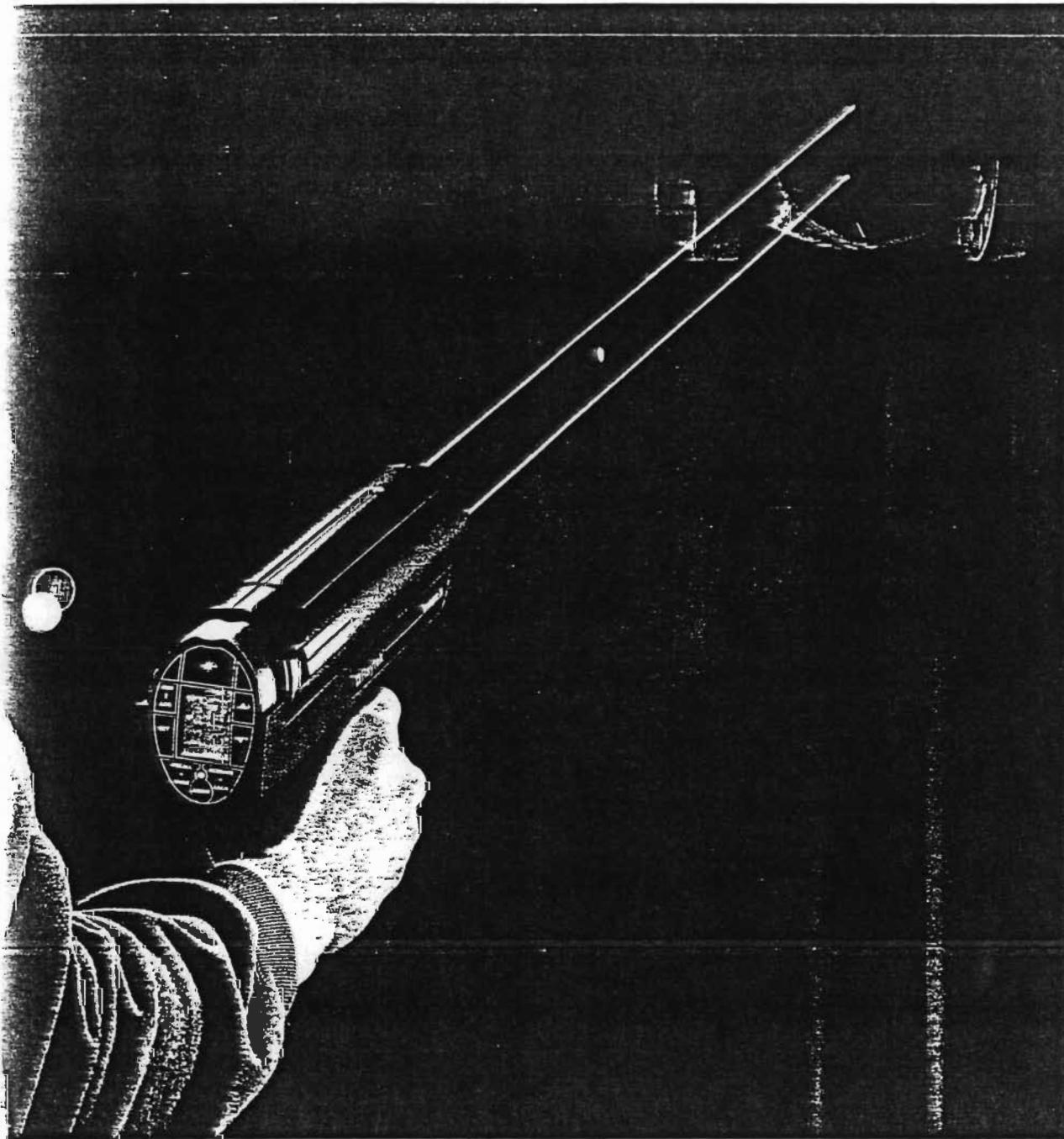
For additional details and specifications on Accessories see Catalog PB-0070.

For additional details and specifications on Mirage Indicator/Processor see Catalog MR-05.

DIMENSIONS



Raynger 3i
noncontact IR thermometers
with precision laser sighting



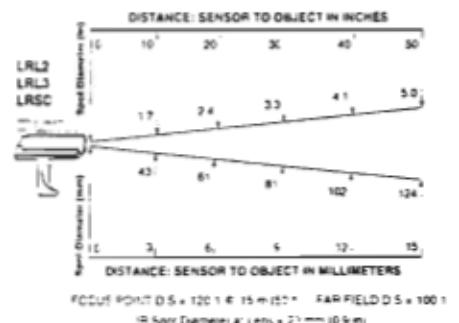
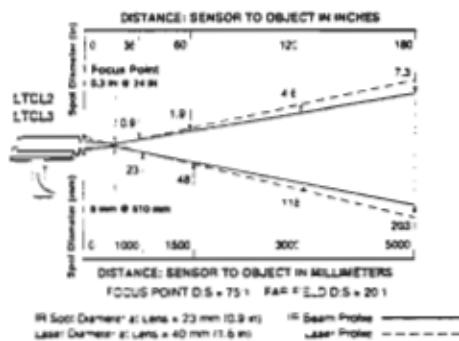
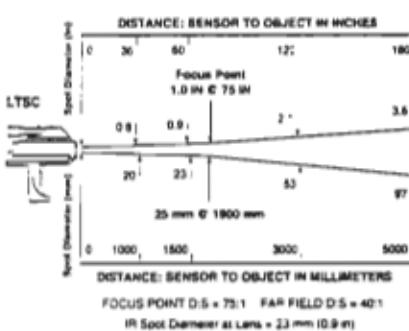
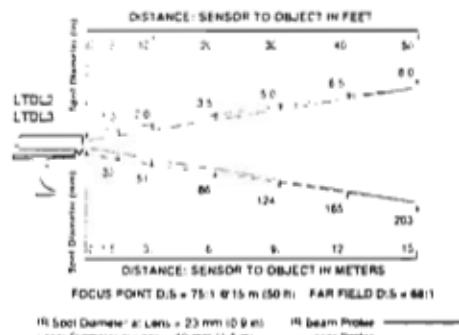
 Raytek®

Leaders in Noncontact Temperature Measurement



Laser output:	L2 models meet IEC Class 2/FDA Class II (<1mW) L3 models meet FDA Class IIIa (<5mW)
Optical resolution (D:S):	
LT models	75 : 1
LR models	120 : 1
Measurement range:	
LT/LR models	-30 to 1200°C (-20 to 2200°F)
Spectral response:	
LT/LR models	8 - 14 µm
Display accuracy:	±1% of reading or ±1°C (±1.5°F) whichever is greater at 23°C±5°C (73°F±9°F) ambient operating temperature
Repeatability:	±0.5% of reading or ±1°C (±1°F), whichever is greater
Temperature display:	°C or °F (selectable), multifunction 4-digit backlit LCD
Display and digital output resolution:	1°C or F (0.1° C or F in AVG mode up to 999°)
Analog output resolution:	1°C or F
Response time (95%):	
LT/LR models	700 mSec
Emissivity:	Adjustable from 0.10 to 1.00 in 0.01 increments. (Factory installed default = 0.95)
Analog output:	
LT/LR models	1mV/°C or 1mV/°F (selectable)
Digital output:	RS232 9600 baud, output interval adjustable from 1 to 9999 seconds
Power requirement:	4 AA alkaline or rechargeable batteries or 6-9 V, 200 mA DC power supply
Ambient operating range:	0 to 50°C (32 to 120°F)
Storage temperature:	-20 to 50°C (-4 to 120°F), without batteries
Relative humidity:	10 to 95%, non-condensing @ up to 30°C (86°F)
Dimensions/Weight:	
Laser models:	208 H x 257 L x 71 W mm / 794 g (8.2 H x 10.1 L x 2.8 W in / 1.75 lb)
Scope models:	244 H x 257 L x 71 W mm / 1000 g (9.6 H x 10.1 L x 2.8 W in / 2.21 lb)
Options:	NIST Certification
<i>Must be specified at time of order</i>	
Accessories:	Hard shell case, variable brightness filter, DataTemp 2 software, 110V/60Hz or 220V/50Hz voltage adapters, computer cable, analog cable, printer cable, and portable printer.

OPTICS LT AND LR MODELS



Specifications subject to change without notice

© 1995 Raytek Printed in USA 6/95 LTR31E



Worldwide

Raytek, Inc.
1201 Shaffer Road, PO Box 1820
Santa Cruz, CA 95061-1820 USA
Phone 408/458-1110
FAX 408/458-1239
(800) 227-8074
(In the U.S. and Canada)

Europe

Raytek GmbH
Arkonastrasse 45-49
D-13189 Berlin, Germany
Phone 49-30/478006-38
49-30/478006-42
49-30/478006-0
49-30/478006-1

Japan

Raytek Japan, Inc.
Sumitomo Marine Building
2-27-15, Hon-Komagome
Bunkyo-ku
Tokyo 113, Japan
Phone 81-3 5976 1531
FAX 81-3 5976 1530

China

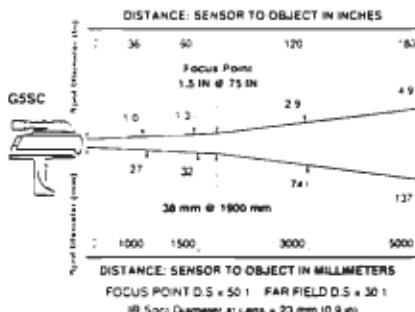
Raytek China Company
Zhong Fa Investment Bldg., Ste. 221
12 Jiu Xian Qiao Road
Chao Yang District
Beijing 100016 China
Phone 86-10 437 0284
FAX 86-10 437 0285

Laser output:	L2 models meet IEC Class 2/FDA Class II (<1mW) L3 models meet FDA Class IIIa (<5mW)
Optical resolution (D:S):	
G5 model	50 : 1
P7 models	25 : 1
Measurement range:	
G5 model	150 to 1800°C (300 to 3275°F)
P7 models	10 to 800°C (50 to 1450°F)
Spectral response:	
G5 model	5 µm
P7 models	7.9 µm
Display accuracy:	±1% of reading or ±1°C (±1.5°F) whichever is greater at 23°C±5°C (73°F±9°F) ambient operating temperature
Repeatability:	±0.5% of reading or ±1°C (±1°F), whichever is greater
Temperature display:	°C or °F (selectable), multifunction 4-digit backlit LCD
Display and digital output resolution:	1°C or F (0.1° C or F in AVG mode up to 999°)
Analog output resolution:	1°C or F
Response time (95%):	
G5 model	700 mSec
P7 models	700 mSec
Emissivity:	Adjustable from 0.10 to 1.00 in 0.01 increments. (Factory installed default = 0.95)
Analog output:	
G5 model	1mV/°C or 1mV/°F (selectable)
P7 models	1mV/°C or 1mV/°F (selectable)
Digital output:	RS232 9600 baud, output interval adjustable from 1 to 9999 seconds
Power requirement:	4 AA alkaline or rechargeable batteries or 6-9 V, 200 mA DC power supply
Ambient operating range:	0 to 50°C (32 to 120°F)
Storage temperature:	-20 to 50°C (-4 to 120°F), without batteries
Relative humidity:	10 to 95%, non-condensing @ up to 30°C (86°F)
Dimensions/Weight:	
Laser models:	208 H x 257 L x 71 W mm / 794 g (8.2 H x 10.1 L x 2.8 W in / 1.75 lb)
Scope models:	244 H x 257 L x 71 W mm / 1000 g (9.6 H x 10.1 L x 2.8 W in / 2.21 lb)
Options:	
<i>Must be specified at time of order</i>	NIST Certification
Accessories:	Hard shell case, variable brightness filter, DataTemp 2 software, 110V/60Hz or 220V/50Hz voltage adapters, computer cable, analog cable, printer cable, and portable printer.

OPTICS

G5SC FOR GLASS

150 to 1800°C (300 to 3275°F)



Spectral Response: Nominal 5.0 Microns

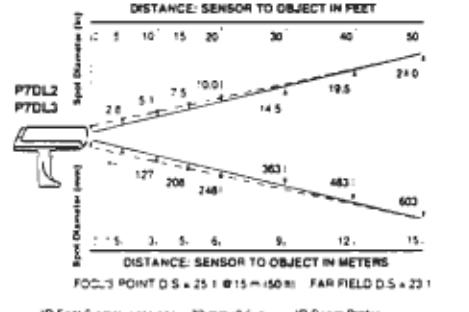
Applications:

Glass surface measurement for tempering, annealing, forming, sealing, laminating, and bending.

OPTICS

P7DL FOR THIN FILM PLASTICS

10 to 800°C (50 to 1450°F)



Spectral Response: Nominal 7.9 Microns

Applications:

Production and converting of films of polyester (PET), fluoroplastic, Teflon® acrylic, nylon (polyamide), cellulose, acetate, polyimide, polyurethane, PVC, polycarbonate. Applications include lamination, flexo-printing, film orientation, extrusion and extrusion coating. You may submit a sample of your thin film plastic for evaluation.

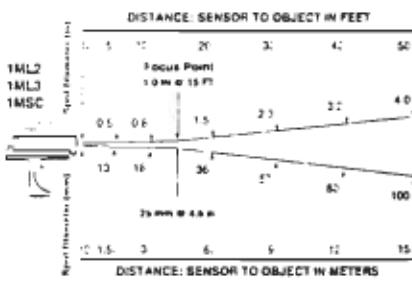
SPECIFICATIONS: 3M™ 32M™ HIGH TEMPERATURE SENSORS

Laser output:	L2 models meet IEC Class 2/FDA Class II (<1mW) L3 models meet FDA Class IIIa (<5mW)
Optical resolution (D:S):	
1M models	180 : 1
2M models	90 : 1
Measurement range:	
1M models	600 to 3000°C (1100 to 5400°F)
2M models	200 to 1800°C (400 to 3275°F)
Spectral response:	
1M models	1.0 μm
2M models	1.6 μm
Display accuracy:	±1% of reading ($\pm 0.5\%$ for 1M) or $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.5^\circ\text{F}$) whichever is greater, or $\pm 2^\circ\text{C}$ ($\pm 4^\circ\text{F}$) for targets below 0°C (32°F), at $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ($73^\circ\text{F} \pm 9^\circ\text{F}$) ambient operating temperature
Repeatability:	±0.5% of reading or $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1^\circ\text{F}$), whichever is greater
Temperature display:	°C or °F (selectable), multifunction 4-digit backlit LCD
Display and digital output resolution:	1°C or F (0.1°C or F in AVG mode for temperatures up to 999.9°)
Analog output resolution:	1°C or F
Response time (95%):	
1M models	550 mSec
2M models	550 mSec
Emissivity:	Adjustable from 0.10 to 1.00 in 0.01 increments. (Factory installed default = 0.95)
Analog output:	
1M models	1mV/°C or 0.5 mV/°F (selectable)
2M models	1mV/°C or 1mV/°F (selectable)
Digital output:	RS232, 9600 baud, output interval adjustable from 1 to 9999 seconds
Power requirement:	4 AA alkaline or rechargeable batteries or 6-9 V, 200 mA, DC power supply
Ambient operating range:	0 to 50°C (32 to 120°F)
Storage temperature:	-20 to 50°C (-4 to 120°F), without batteries
Relative humidity:	10 to 95%, non-condensing @ up to 30°C (86°F)
Dimensions/Weight:	
Laser models:	208 H x 257 L x 71 W mm / 794 g (8.2 H x 10.1 L x 2.8 W in / 1.75 lb)
Scope models:	244 H x 257 L x 71 W mm / 1000 g (9.6 H x 10.1 L x 2.8 W in / 2.21 lb)
Options:	
<i>Must be specified at time of order</i>	NIST Certification
Accessories:	Hard shell case, variable brightness filter (<i>included on 1MSC and 2MSC models</i>), DataTemp 2 software, 110V/60Hz or 220V/50Hz voltage adapters, computer cable, analog cable, printer cable, and portable printer.

OPTICS

1M HIGH TEMPERATURE

600 to 3000°C (1100 to 5400°F)



FOCUS POINT D.5 = 180 ft FAR FIELD D.5 = 140 ft
IR Spot Diameter at Lens = 25 mm (0.98 in)

Spectral Response: 1 Micron

Applications:

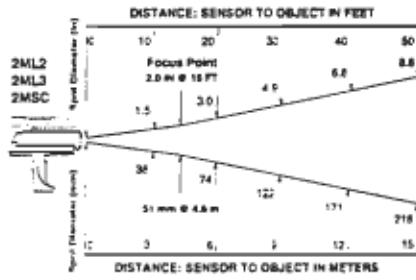
Raynger 3i 1M units are designed for applications that demand high accuracy and optical resolution under conditions of uncertain or changing emissivity.

Applications include iron, steel, and other metals refining, foundry and processing operations, as well as glass, ceramics, semiconductor, chemical, petrochemical, and research.

OPTICS

2M HIGH TEMPERATURE

200 to 1800°C (400 to 3275°F)



FOCUS POINT D.5 = 80 ft FAR FIELD D.5 = 60 ft
IR Spot Diameter at Lens = 31 mm (1.22 in)

Spectral Response: 1.6 Micron

Applications:

Raynger 3i 2M units are designed for applications that demand high accuracy and optical resolution under conditions of uncertain or changing emissivity. These units are especially valuable for temperatures below 600°C.

Applications include iron, steel, and other metals refining, foundry and processing operations, as well as glass, ceramics, semiconductor, chemical, petrochemical, and research.

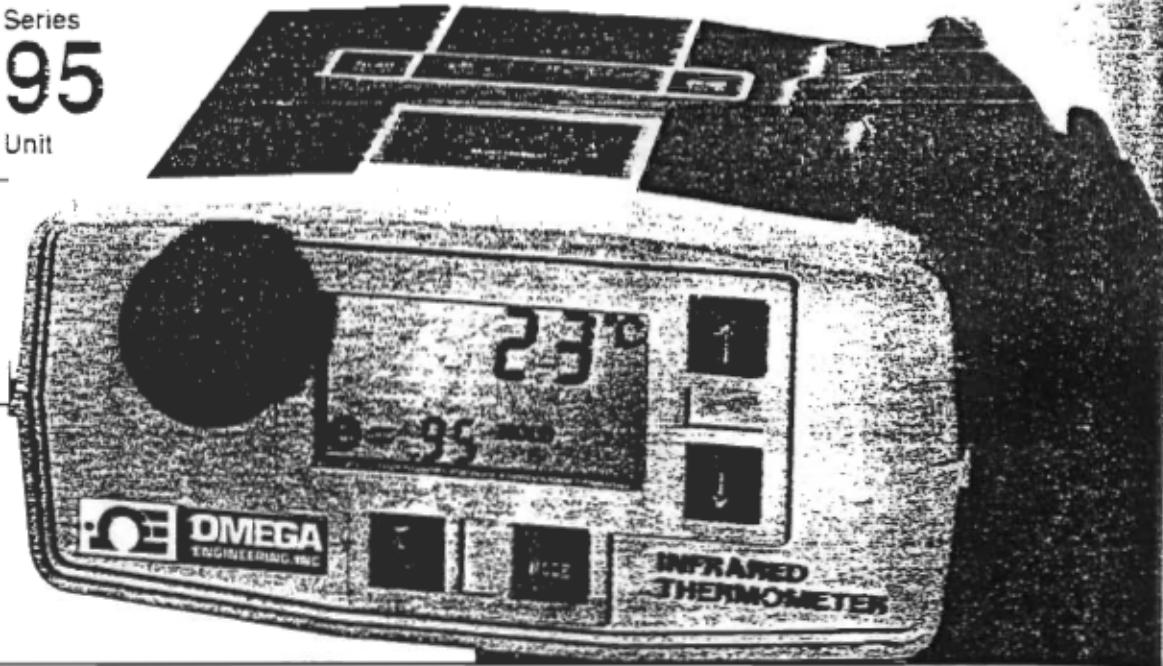
Portable Infrared Thermometers

OS3700 Series

\$2295

Basic Unit

MADE IN



2-Color and Optical Pyrometer Models Available

- ✓ Through-the-Lens Sighting
- ✓ Variable Focus
- ✓ Handheld or Tripod Mount
- ✓ Temperature Display in Eyepiece
- ✓ Analog and RS-232 Outputs
- ✓ Accessory Datalogger, Printer Available
- ✓ Models from 0.65 to 14 Microns

The OS3700 series infrared thermometers are available for a variety of temperature measurement applications. Models are available for:

- 2-Color Applications
- Replace Visual Comparison Optical Pyrometers
- Metals
- Glass and Ceramics
- Thin Film Plastics
- Furnace Tubes
- General Purpose
- Life Sciences

Each unit features dual displays: on the unit rear and in the lens viewfinder. The rear display also provides emissivity and operating mode indication. Standard features include peak, valley and average functions, data hold, RS-232 and analog outputs, microprocessor controlled calibration and diagnostics, and IBM PC compatible communications software.

OMEGACARE™ WARRANTY EXTENSION SERVICE
Very Low Cost!
4+4+2 PROGRAM
1 Year Add 4% to price
2 Years Add 8% to price
3 Years Add 10% to price
See last page of handbook for more

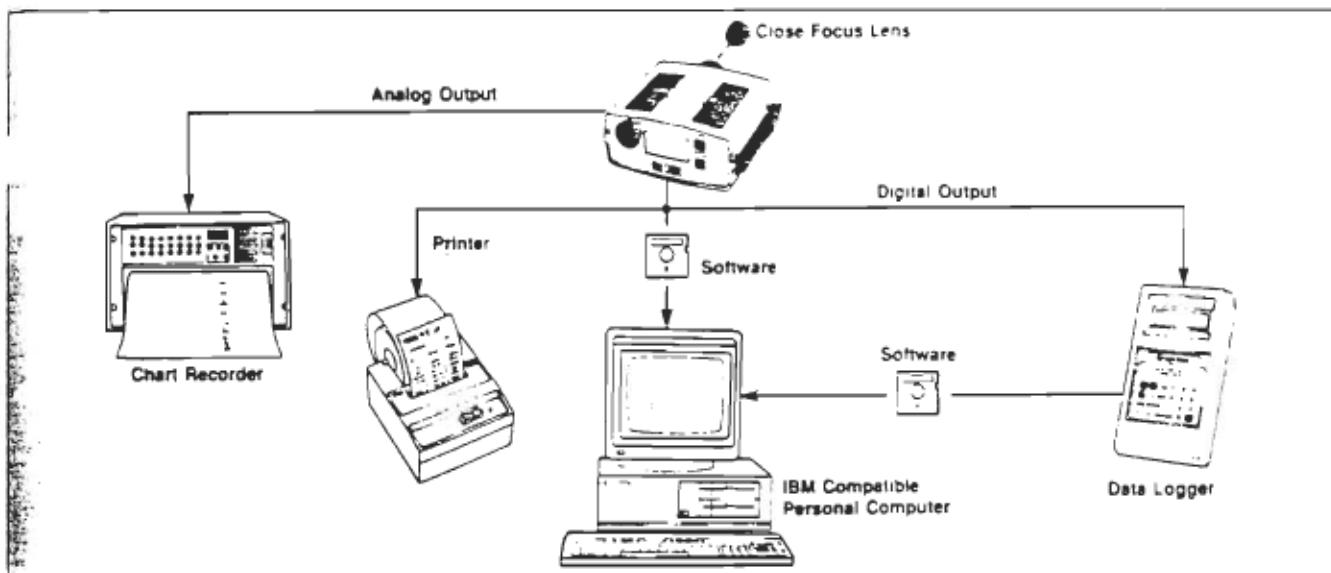


2-Color Measurements

- Emissivity Independent
- Unaffected by Dust and Other Contaminants in the Field of View
- Unaffected by Dirty Viewing Windows

The OS3721 and OS3722 are designed specifically for two-color temperature measurements. Measurements are made by comparing the ratio of two adjacent radiation wavelengths, rather than from one absolute radiation. Two-color units eliminate inaccuracies inherent in conventional infrared thermometers, as for example, to measure pouring of molten metals in a foundry.

See page J-21 for complete ordering information.



SPECIFICATIONS: OS3700 SERIES

Focusing: 50 cm (20") to infinity
Viewfinder: 9° sighting, eyepiece adjustable, illuminated temperature display. High temperature eye protection filter, built-in and selectable in high temperature models.

Operating Modes: Run, Peak, Valley, Average, Hold

Resolution: 1°; 0.1° for OS3702

Response Time: 1 sec; 0.5 sec for OS3707; OS3708, OS3709, OS3721 and OS3722; 0.75 sec for OS3701

Emissivity Range: 0.1 to 1.0, in 0.1 steps, digital adjustment

Slope Adjust (OS3720): 0.850 to 1.150 in 0.001 steps, digital adjustment

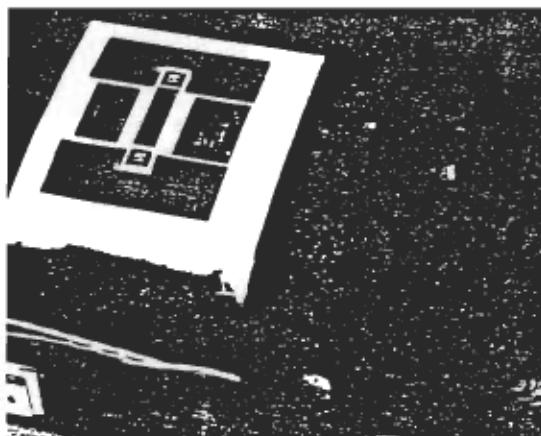
Digital Output: RS-232, 2400 baud

Analog Output: 1 mV/°C, 1 mV/°F or 0-1 V; user selectable

Ambient Temperature: 0 to 50°C (32 to 122°F); 0 to 90% RH, non-condensing

Storage Temperature: -20 to 65°C (-5 to 150°F)

Power: rechargeable NiCad. AA; 16 hours continuous operation for OS3708, OS3709. 8 hours for others



Each unit comes complete with high impact plastic carrying case, NiCad batteries, 115 Vac battery charger, lens cap, communication software for use with IBM PC, 10' RS-232C output cable, analog output cable and operator's manual.

Dimensions: 76 H x 165 W x 187 mm D (3.0 x 6.5 x 7.3")

Weight: 1.1 kg (2.5 lb) with lens and batteries

SPECIFICATIONS:

OS3700-DL DATALOGGER

Memory: 5200 readings, temperature °C/°F, date, time and battery condition

Display: 2-line LCD, 16

alphanumeric characters per line

Sampling Interval: continuous to 999 sec. in 1 sec increments

Log Mode: Auto or Manual

Software: supplied for IBM PC or compatible 1-2-3 format

Output: RS-232; 1 m (3.3') cable supplied

Power: Four NiCad batteries AA size. 8 h continuous operation. 115 Vac charger included

Ambient Temperature: -10 to 60°C (14 to 140°F)

Dimensions: 130 H x 100 W x 35 mm D (7.1" x 3.9" x 1.4")



OS3700-DL Digital Datalogger, \$945

SPECIFICATIONS:

OS3700-PRT PRINTER

Paper: 70 mm (2.25") width

Mechanism: impact dot matrix

Input: RS-232

Format: 24 column (mode and temperature)

Control: On, Off, Paper Feed

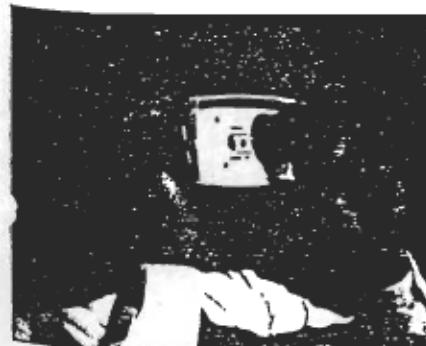
Operating Temperature: 0 to 50°C (32 to 122°F)

Power: 115 Vac

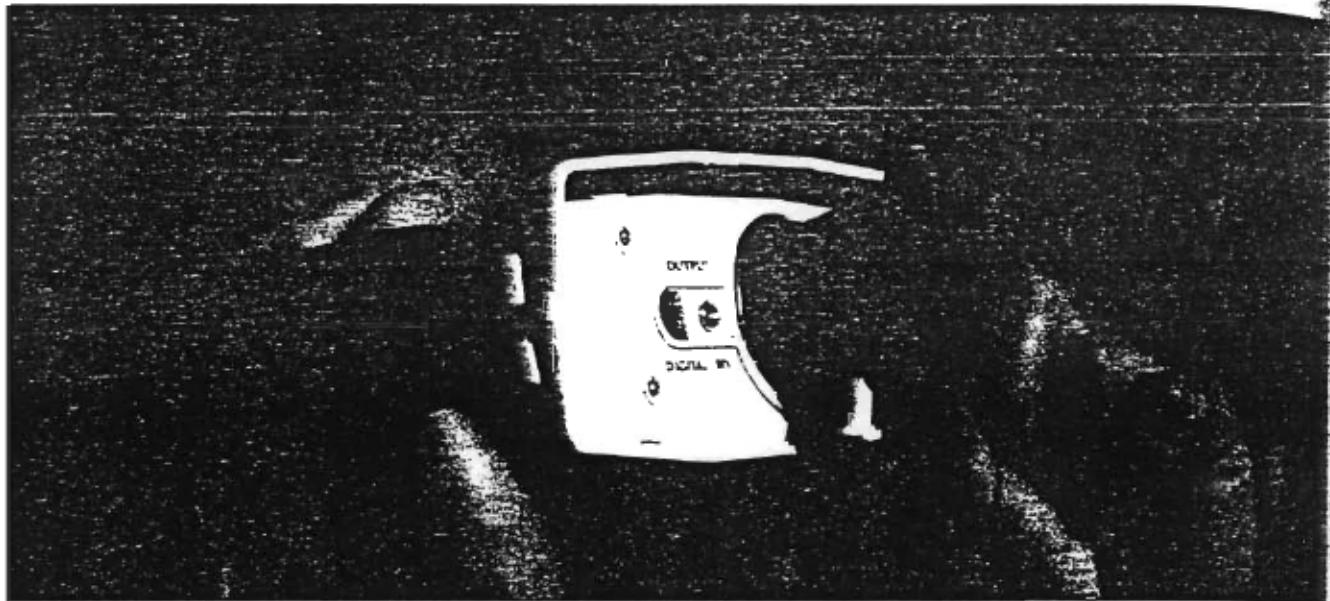
Dimensions: 114 H x 100 W x

51 mm D (4.5 x 4 x 2")

Weight: 0.45 kg (1 lb)



Portable Infrared Thermometers



To Order (Specify Model Number)

Model No.	Typical Applications	Temperature Range	Special Response	Field of View Beyond 1 m	Min. Spot Size	Accuracy
Price						
OS3701 \$2595	General purpose, for textile, printing, food, rubber, thick plastics, paints, laminating, maintenance	-50 to 1000°C -58 to 1832°F	8-14 μ	40:1 (1.5°) 0.6"		±0.8% rdg (K)
OS3702 \$2745	Life sciences, biology, zoology, botany, veterinary medicine, heat loss and research	0 to 500°C 32 to 932°F	8-14 μ	20:1 (2.5°) 1.2"		±0.8% rdg (K)
OS3703 \$2795	Thin film plastic, polyester, fluorocarbons, etc. Low temperature glass	50 to 600°C 122 to 1112°F	7.9 μ	40:1 (1.5°) 0.6"		±1.0% rdg (K)
OS3704 \$2645	Glass and ceramic surfaces, tempering, annealing, sealing, bending and laminating	300 to 1500°C 572 to 2732°F	4.8 to 5.2 μ	60:1 (1.0°) 0.4"		±1.0% rdg
OS3706 \$2745	See through clean combustion flames and hot gases. Furnace tubes.	500 to 1500°C 932 to 2732°F	3.86 μ	90:1 (0.67°) 0.27"		±1.0% rdg
OS3707 \$2995	Medium to high temperature ferrous and non-ferrous metals. See through glass	250 to 2000°C 482 to 3632°F	1.1 to 1.65 μ	60:1 (1.0°) 0.4"		±0.5% rdg
OS3708 \$2295		600 to 3000°C 1112 to 5432°F	0.78 to 0.92 μ	180:1 (0.33°) 0.14"		±0.4% rdg
OS3709 \$2695	Hot and molten metals, foundries, hardening, forging, annealing, induction heating	900 to 3000°C 1652 to 5432°F	0.65 μ (same as optical pyrometers)	300:1 (0.20°) 0.08"		±0.25% rdg (NIST traceable)
OS3721 \$3845		700 to 2000°C 1292 to 3632°F	2-color	60:1 0.4"		±1% rdg
OS3722 \$3985		900 to 3000°C 1652 to 5432°F	near 0.9 μ	180:1 0.14"		±1% rdg

[†]Note: min. spot size is at 20'

Accessories

Model No.	Price	Description
OS3700-DL	\$945	Digital datalogger (110 Vac)*
OS3700-PRT	345	Digital printer (110 Vac)*
OS3700-PRT-RP	28	Five rolls replacement printer paper
OS3700-CF1**	280	Close focus lens attachment for working distance of 21 to 14 inches
OS3700-CF2*	280	Close focus lens attachment for working distance of 13 to 8.5 inches

Each unit comes complete with high impact plastic carrying case, NiCad batteries, 115 Vac charger, lens cap, IBM PC communications software, 10' RS-232 cable, analog output cable and operator's manual. To order unit with 100 or 220 Vac charger, add suffix -100VAC or -220VAC to model number. No additional price.

Ordering Example: OS3704, infrared thermometer, with 300 to 500°C (572 to 2732°F) range, for glass and ceramic surfaces, \$2645.

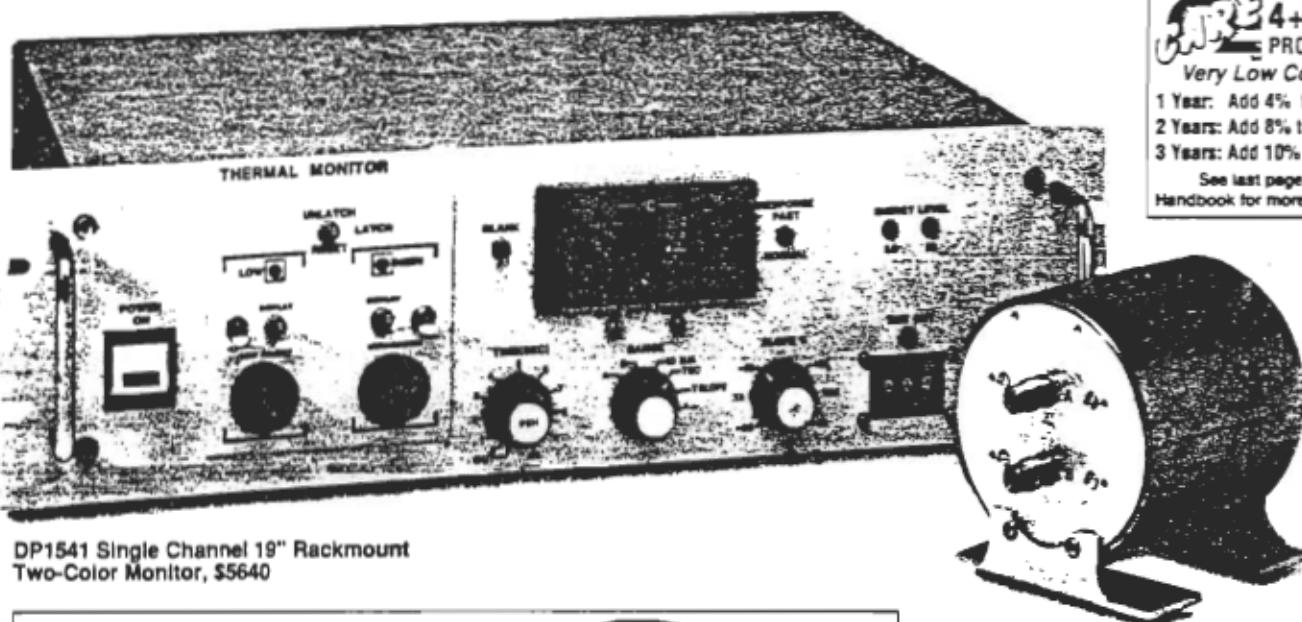
*Add suffix "-220VAC" for 220 Vac power. Example: OS3700-DL-220VAC.

**May be used only with OS3707, OS3708, OS3709, OS3721, and OS3722. When both close focus attachments are used together, working distance is 9.5 to 7.5 inches.

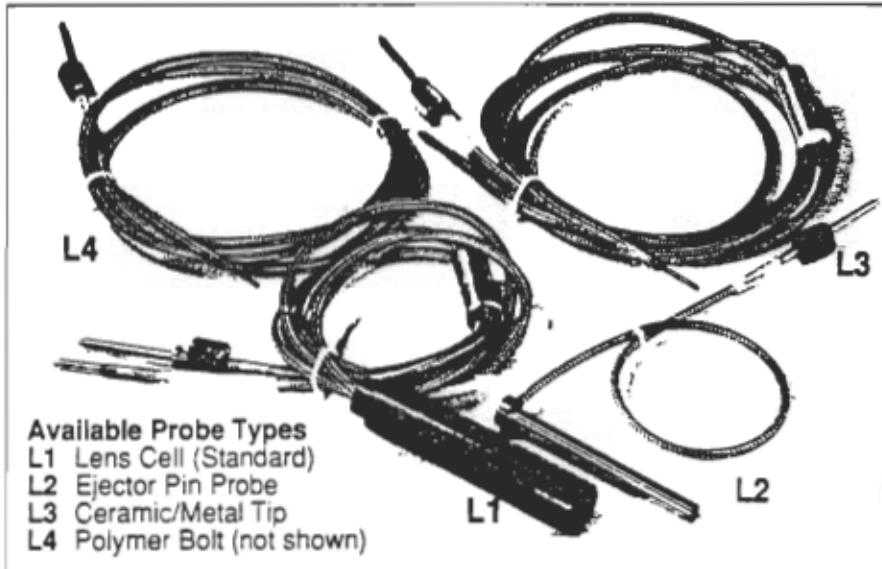
NEW

Emissivity-Independent Two-Color Systems

Complete Fiber Optic Infrared System Includes Sensor and Monitor



DP1541 Single Channel 19" Rackmount Two-Color Monitor, \$5640



Available Probe Types

- L1 Lens Cell (Standard)
- L2 Ejector Pin Probe
- L3 Ceramic/Metal Tip
- L4 Polymer Bolt (not shown)

Custom Assemblies

Available

- ✓ Small Spot Sizes Down to 0.004"
- ✓ Temperatures to 800°F at Pressures to 30,000 PSI

- ✓ Ceramic/Metal Tip Probe for Induction Heating Where Probe is Close to Surface
- ✓ Polymer Bolt Probe for Extrusion Applications
- ✓ Ejector Pin Probe for Injection Molding



OS1542 Fiber Optic Sensor, \$3515.

The DP1541 may be used to measure temperature in the range of 250-2575°C (480-4665°F), depending on the fiber optic cable length and detectors used. Two LED indicators are provided to indicate out-of-range conditions.

Output signals include 1 mV/degree standard; with either 4-20 mA, or 0-10 Vdc as an optional second output for recording or datalogging.

The DP1541 has optional controller outputs: one is a two-level on/off output with two setpoints available, the other output is a Hi/Lo logic band control with one setpoint for keeping the output active within a specific temperature range or outside a specific temperature range. Dual SPDT electromechanical relays or solid state relays are also available. Consult OMEGA for additional ordering.

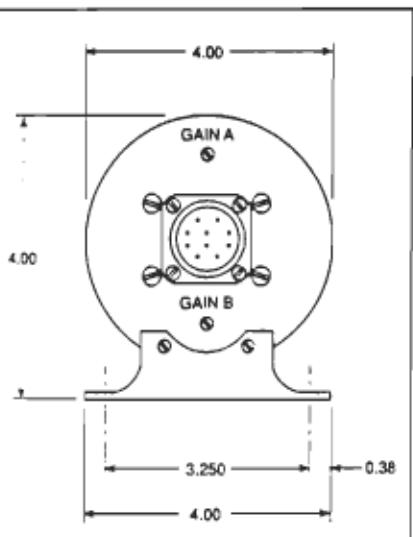
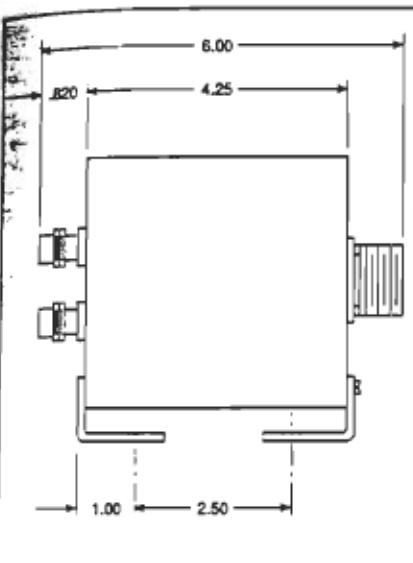
Specifications for DP1541 Monitor

Temperature Range: -250 to 2575°C (480 to 4665°F).
LED shows out-of-range conditions
Accuracy: ±1% rdg
Repeatability: ±0.5% rdg
Resolution: 1°C/F
Ambient Temperature: 10 to 50°C (50 to 122°F)

OS1542 Sensors

- ✓ **Silicon Detector**
- ✓ **0.9 and 1.06 Micron Filters**
- ✓ **Temperatures from 980 to 1800°C**
- ✓ **Minimal Effect by Steam or Hot Gas**

OS1543 Sensors



Power: 115 Vac standard (230 Vac optional)

Power Dissipation: 50 watts max

Output: 1 mV/degree

Display: 3½ digit, max. rdg 3999

Response Time: 50-500 msec
 10 to 95% switchable

Spectral Response: 0.90 and 1.06 microns or 1.55 and 2.25 microns (center bands)

Fiber Optic Cable: Glass or quartz fiber with heavy duty S.S. jacket; standard, 0.020-0.070 cable dia.
 300°F max ambient temperature

Optional Controller Outputs: 2A SPDT relay or 20A SSR @ 115V ac

Signal Processing Adjustment: 0.5-10 sec hold and decay times

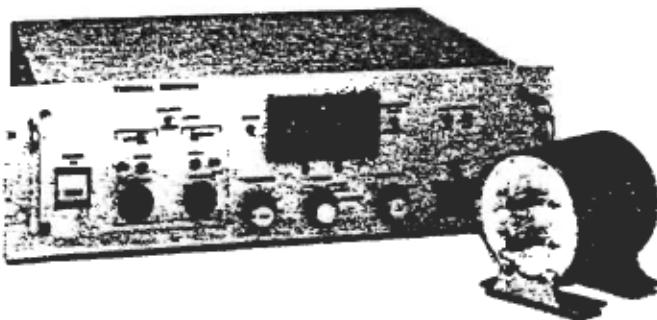
Dimensions: 13.34 H x 46.26 W x 30.46 cm D (5.25" x 19" x 12")

Weight: 5.44 kg (12 lb)

✓ Lead Sulfide Detector

✓ 1.55 and 2.25 Micron Filters

✓ Temperatures from 250 to 1500°C



Display

To Order (Specify Model Number)

Model No.	Price	Description
DP1541-(*)	\$5640	Single channel 19" rackmount two-color monitor, slope control, 1 mV/degree output, 3½ digit display. (For use with OS1542 or OS1543 sensors.)

* Specify analog output: "F" for 1 mV°F, or "C" for 1 mV°C.

Each unit supplied with complete operator's manual.

Consult OMEGA for information on custom controller configurations.

Optional Second Output

Order Add'L. Suffix	Price	Description
-V	\$75	0 to 10 Vdc
-MA	125	4 to 20 mA

Ordering Example: DP1541-C-MA-VS19" monitor with °C display and 1 mV°C analog output, 4-20 mA second output, and valley sense and hold. \$5640 + 125 + 330 = \$6095.

Signal Processing Outputs

Order Add'L. Suffix	Price	Description
-PS	\$330	Peak Sense and Hold
-SA	330	Signal Averaging
-VS	330	Valley Sense and Hold
-ST	330	Sample Timed Hold
-FR	330	Fast Rise Variable Decay

Sensors

To Order (Specify Model No.) MOST POPULAR ASSEMBLIES

Model No.	Base Price	Temperature Range	Spot Size @ 36"	Max. Focal Dist.
OS1542-L1-R1-(*)	\$3605	1050-1800°C (1925-3270°F)	1.2" @ 36"	30'
OS1542-L1-R2-(*)	3455	980-1650°C (1850-3000°F)	0.18" @ 14"	10'
OS1543-L1-R3-(*)	4075	800-1500°C (1470-2730°F)	0.076" @ 6"	8'

* Specify cable length in feet. Cable is \$10 per foot.

Each unit supplied with interconnecting cable for use with DP1541 monitor, fiber optic lens assembly, fiber optic cable and complete operator's manual.

Introducing

Mirage®

LR Series Low Temperature Two-Color IR Thermometer



IRCON.

Two-color (Ratio), low temperature measurement using two high-performance detectors that measure simultaneously for applications down to 500°F (250°C)

Featuring...

- High accuracy
- Fast response time
- High stability

INTRODUCTION

IRCON offers two-color infrared (IR) thermometers ideal for low temperature ferrous and non-ferrous applications with process temperatures from 500° to 1800°F (250 to 1000°C). LR Series instruments will revolutionize low temperature measurement with the same success as IRCON's high temperature two-color instruments.

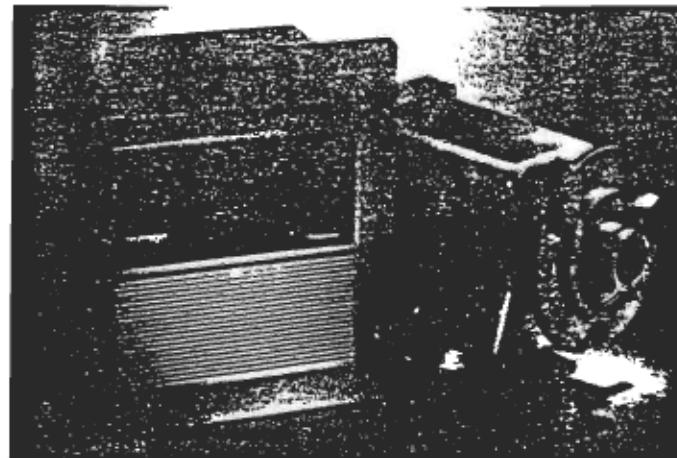
Ideal applications for the LR Series include:

- Induction heat treating
- Steel mill applications below 1300°F (700°C), and
- Non-ferrous metal applications including aluminum.

The LR Series provides accurate non-contact measurement in applications where there is a potential for erroneous readings when using single-color instruments. Effects of targets that are obstructed, unresolved, or have variations in surface roughness will be minimized by LR Series instruments. This is because LR Series instruments use the ratio of signals at two discrete wavelengths, 1.55 μ m and 1.68 μ m, to compute the temperature of the target. Using the ratio-measurement technique at short wavelengths with two InGaAs detectors that measure the target simultaneously, the LR Series delivers high measurement accuracy, fast response time, and low-noise and high-stability operation.

DESCRIPTION

The Mirage LR Series system consists of an IR Sensor with Indicator/Processor and interconnecting cable. The Sensor offers focusable through-the-lens sighting with a reticle-defined measuring spot which simplifies installation and set-up. The Sensor is housed in a rugged NEMA 4



LR Series Sensor and Indicator/Processor

(IP66) case, with water tight connector, designed to withstand harsh environments.

The compact, rugged Indicator/Processor is simple to install and offers adjustments that are easily accessible but can be secured against tampering. Temperatures are displayed via a large four digit LCD display. Front panel controls include a four digit E-Slope potentiometer (for non-greybody applications), and a response time adjustment that allows values to be set from 0.025 to 30 seconds. Two analog outputs are available for remote access of temperature signals. Available options include: Two-Point On/Off Controller, Signal Conditioning (Peak-Picker) and Isolated Outputs.

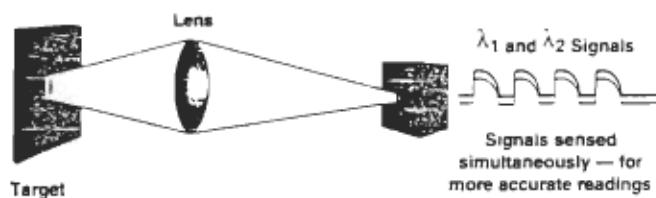
FEATURES

- Indium Gallium Arsenide (InGaAs) detectors providing stability at high ambient temperatures
- Adjustable response times ranging from 25 msec. to 30 seconds
- Temperature errors are minimized when the target is obstructed or unresolved and signal is reduced by as much as 95%
- A compact, self-contained Indicator/Processor unit designed for simple installation, easy operation and service
- Highly visible four digit LCD with °F or °C display
- Sensor housing rated NEMA 4 (IP66), Indicator Box rated NEMA 12K (IP52)
- Focusable optics with through-the-lens viewing (SLR)

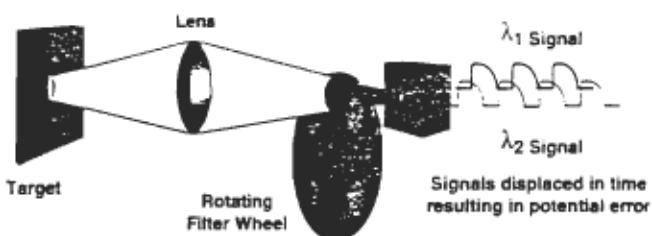
LR TECHNIQUE ADVANTAGES

IRCON's LR measuring technique (A) overwhelmingly provides faster and more accurate temperature measurement over instruments that use filter wheel technique (B). In the LR scheme, ratio computation of the two spectral signals takes place simultaneously. In the filter wheel scheme, ratio computation is displaced in time resulting in slower operation and subject to error. Superior temperature measurement with LR Series under dynamic target conditions (*target moving in and out of the field of view or temperature fluctuations*) is made possible because both detectors view and measure the same spot on the target at the same instant.

A.) The LR technique using two detectors measures simultaneously, allowing accurate readings and fast response time.



B.) Filter wheel technique using one detector is time-delayed, resulting in potential error and slow response time.



APPLICATIONS

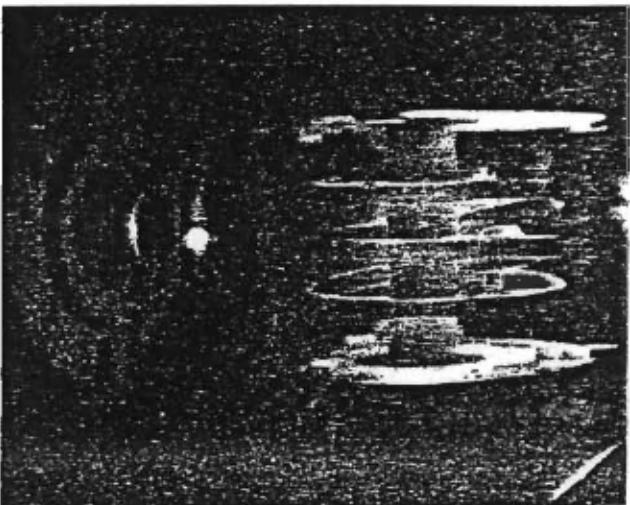
Two-color IR thermometers are less influenced by the things which will cause single-color IR thermometers to read incorrectly: smoke and dust in the sight path; dirty viewing windows; emissivity changes; and small and moving targets that do not fill the optical field of view. This forgiveness, which is inherent to two-color IR thermometry, coupled with the LR Series technique—with its two detectors taking simultaneous readings—provides more easily applied, accurate, non-contact measurement in these and other complex applications.

Targets that Enter and Leave the Field of View

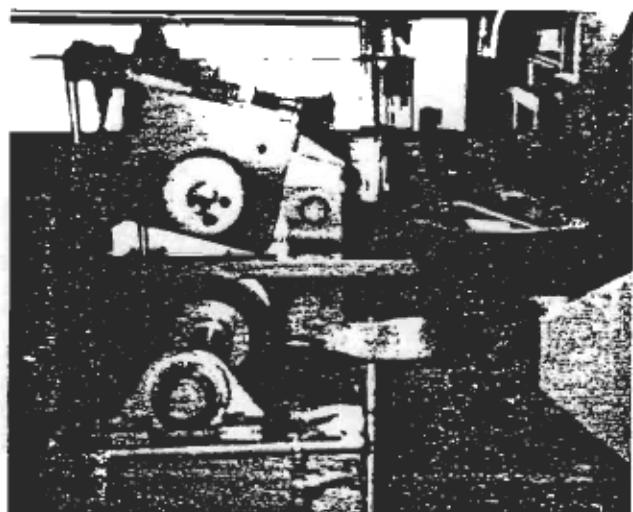
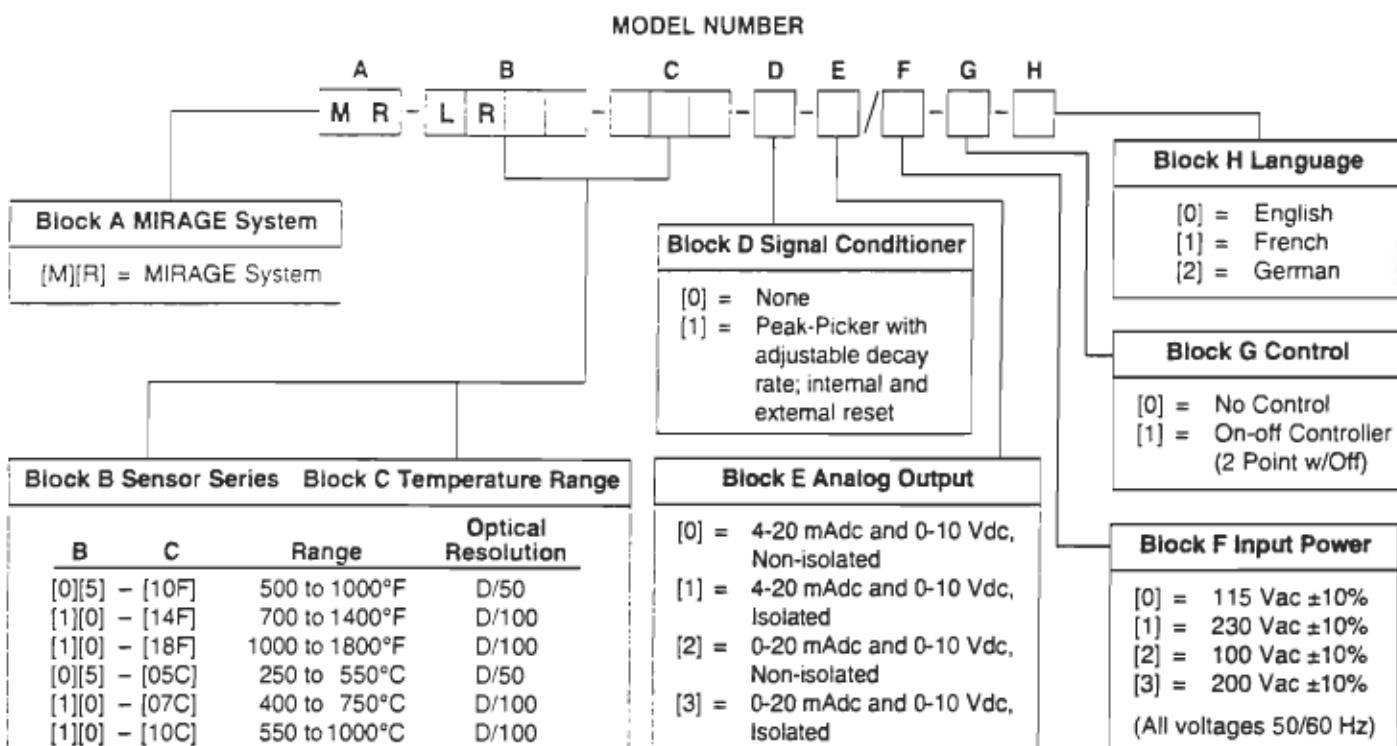
In steel wire and rod mill applications the target is in constant motion entering and leaving the field of view. Control of the metallurgical properties of the steel is critical under cooling conditions, when the loop is being coiled, and when the coil is assembled on the cooling conveyor. For this set of measurements, the LR thermometer does not require that its optical field of view be filled by the target. Even more importantly the instrument's two detectors measure the same event—the same rod passing by—measuring both spectral regions simultaneously. The LR Series provides the quick response time needed with system response times as fast as 25 milliseconds.

Obstructed Targets

Targets are viewed through small openings in insulation and/or spacing between coil turns when temperature readings are taken in induction heating processes. Though the cone of vision is cut, the LR Series obtains readings with minimized errors even when as much as 95% of the signal is reduced. With care in set-up and use of the Peak-Picker Option, the LR Series can resolve targets with smoke and steam present.



ORDERING INFORMATION

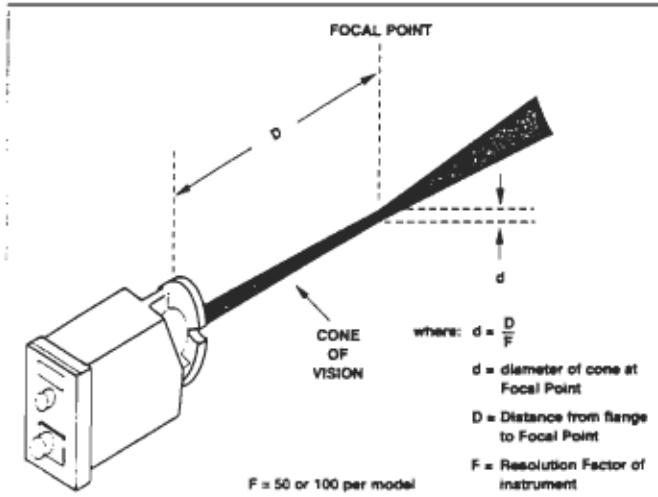


Variations in Surface Roughness

During forming operations of metals, considerable changes to metal surfaces occur. These surface changes usually constitute a grey change—i.e., the emissivity values at the two operating wavelengths are identical—and therefore, the LR Series will compensate automatically. The LR Series will accurately read the correct temperature without any calibration.

For targets which are not greybodies such as bare or non-oxidized metals, the LR Series provides E-Slope adjustment to compensate for the non-greybody condition. The adjustment provides a means for correcting measurement and indication of these targets.

OPTICAL CHARACTERISTICS



Cone of Vision for MIRAGE LR Series

The LR Series is sensitive to infrared radiation in an area indicated by the Cone of Vision. The diameter of the cone at any point will determine the area of measurement (spot size) at that point. Anything within that area will be focused on the detector element and will therefore produce a temperature signal.

When an LR is sighted on an object, the Cone of Vision is "aimed" so that it falls on the object. When focusing the lens, adjustments are made so the focal point is at the surface of the object. The formula shown in the diagram defines the spot size at the focal point. Simply divide the Working Distance (D) by the Resolution Factor (F) to determine the Spot Size (d). See Ordering Information for Optical Resolution Factor.

SPECIFICATIONS LR Series

Calibration Accuracy

Within 0.75% of reading or 5°F (3°C)

Repeatability

0.2% of full scale temperature ±1 (noise-free)

Response Time

Adjustable from 0.025 to 30 seconds ±5%

E-Slope (4 digit Pot) Adjustment

0.850 to 1.150

Signal Reduction Ratio

Up to 95%

Invalid Alarm

LCD display indication, plus relay contact closure

Invalid relay contact rating

1 A at 24 Vdc

0.5 A at 120 Vac—Non-inductive Load

Display

4-digit LCD with F° or C° display; Out of range arrows display; On/Off control options with set-point display; and invalid indication display.

Display updates every 1/2 second

Power Requirements

100, 115, 200, 230 Vac ±10%, 50/60 Hz per order

Sensing Head Weight

Approx. 7 lbs (3.18 kg)

Approx. 34.5 lbs (15.65 kg) with optional water cooling enclosure

Peak-Picker (Optional)

Adjustable decay rate 0.01% to 5% of span per second. A three-position control switch permits Off.

Peaking or Reset functions, also Reset can be activated from user supplied contact

Analog Outputs

Non-isolated:

0 to 10 Vdc (3 mA max.)

4 to 20 mA or 0 to 20 mA (500 ohms max.)

Isolated (Optional):

0 to 10 Vdc (3 mA max.)

4 to 20 mA or 0 to 20 mA (500 ohms max.)

Two-Point On/Off Controller (Optional)

Two Form-C relay outputs rated 3 A, 250 Vac resistive, 1 A, 250 Vac inductive

5 millisecond relay delay time

Hysteresis: 0.3% of span or 1°F (1°C) whichever is greater

Ambient Temperature Range

Sensing Head: 32 to 130°F (0 to 55°C)

Indicator Box: 32 to 122°F (0 to 50°C)

Sensor Humidity

10 to 90% non-condensing

Environmentally Sealed Housing

Sensor in Aluminum casting rated NEMA 4 (IP66),

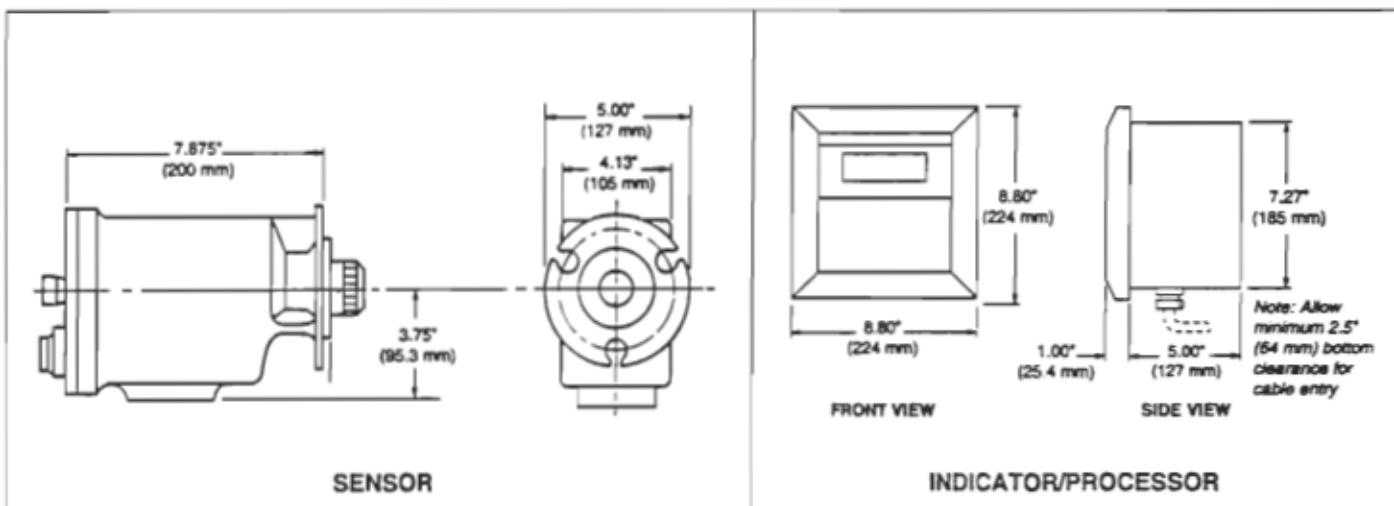
Indicator Box rated NEMA 12K (IP52)

Design and specifications subject to change without notice.
PATENTS PENDING.

For additional details and specifications on Accessories see Catalog PB-0070.

For additional details and specifications on Mirage Indicator/Processor see Catalog MR-05.

DIMENSIONS



IRCO
7300 I
Niles,



WILLER
ENGINEERING LTD./TÉLÉ

TORONTO •

SARNIA •

SL'DBURY •

MONTREAL:
6333 Chemin St. François
St-Laurent, Québec
H4S 1B6
TEL: (514) 333-8555
FAX: (514) 333-4862
MARITIMES:
(902) 464-4499

5151
13-7660
48

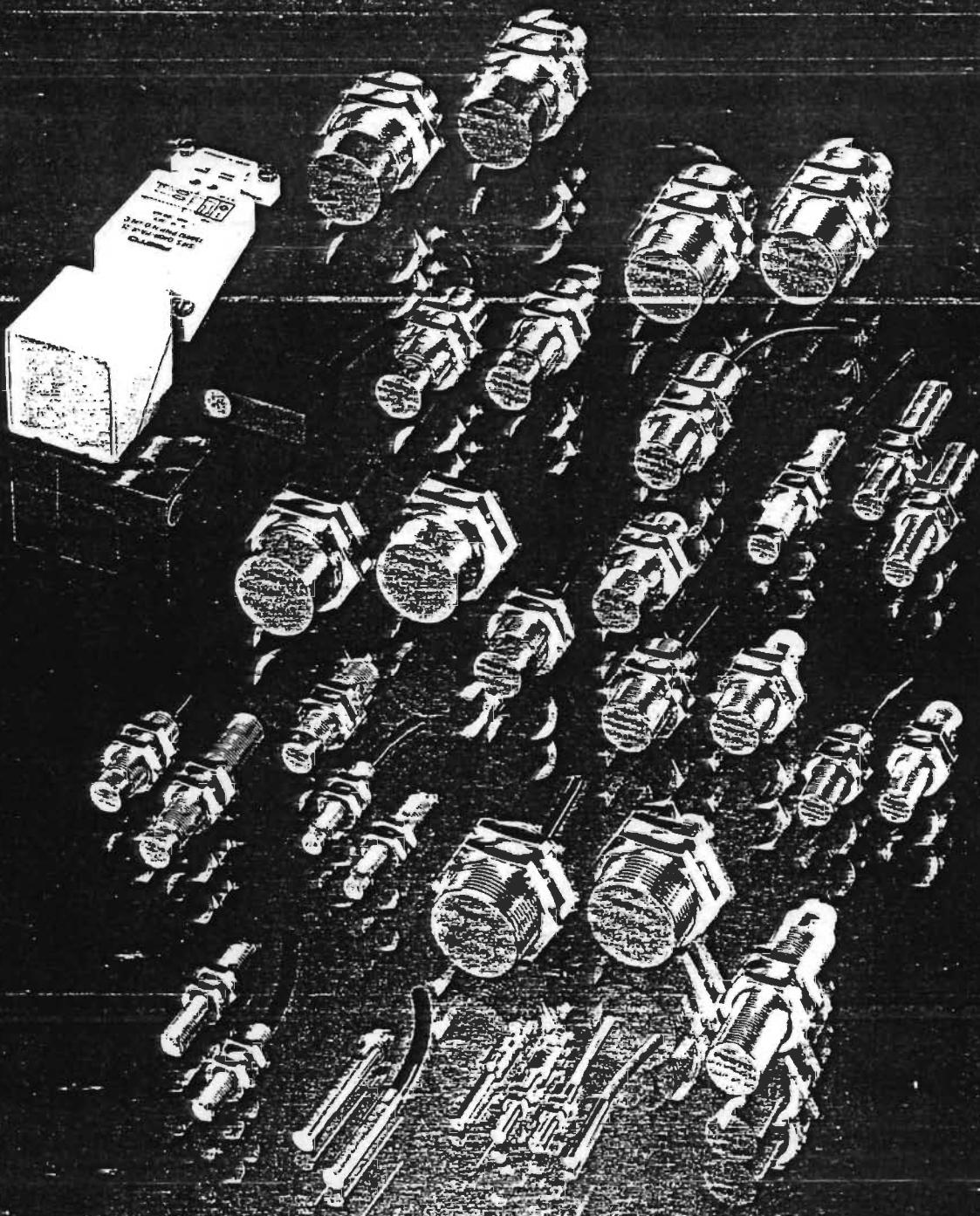
PDS-009
Part No. 010281 Rev C Printed in USA 3M E96
©1995 IRCON INC All Rights Reserved



ANNEXE B

DONNÉES TECHNIQUES DE QUELQUES DÉTECTEURS DE PROXIMITÉ

Industrial Connectors
Robust – precise – reliable



FESTO
PNEUMATIC

New
Products

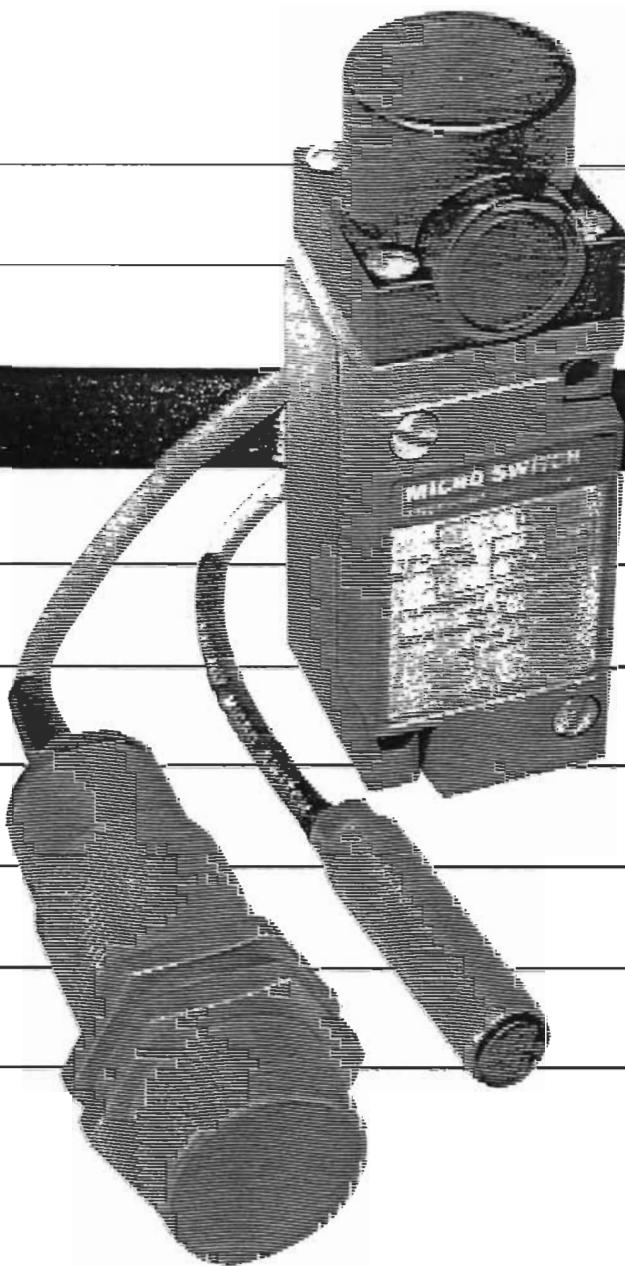
JC inductive sensors with 3-wire technology

Switching gap		
Nominal switching gap	sn :	Depends on type
Actual switching gap	sr :	0.9 x sn ... 1.1 x sn (0.77 x sn ... 1.23 x sn for SIEH-...)
Effective switching gap	su :	0.6 x sn ... 1.2 x sn (0.7 x sn ... 1.3 x sn for SIEH-...)
Operational switching gap	sa :	0.6 x sn (0.7 x sn for SIEH-...)
Reproducibility	R :	5% sn
Switching hysteresis	H :	3%...20% sn
Reduction factors for sn	:	Al: 0.4; Cu: 0.2; CuZn: 0.4; ST18/B: 0.7
Power supply		
Operating voltage range	UB :	10...30 V DC
Permissible residual ripple	:	+/- 10% UB
Idle current	Io :	<= 1 mA (10 mA for SIEN-4, M5, Q40)
Supply frequency	:	--
Output		
Type of output	:	3-wire PNP or NPN (4-wire with SIES-Q40)
Switch contact function	:	N/O or N/C (antivalent with SIES-Q40)
Nominal output current	le :	200 mA (300 mA with SIES-Q)
Voltage drop	Ud :	<= 3.2 V
Residual current	Ir :	<= 0.01 mA (< 0.1 mA with SIEN-4, M5)
Min. load current	Im :	--
Short-time current	Ik :	--
Times		
Switching frequency	f :	Depends on type
"Ready" time delay	tv :	<= 10 ms (<= 30 ms for SIES-Q, Q40)
Switch-on error pulse	:	Suppressed
Temperatures		
Ambient temperature	Ta :	-25 to +85 °C (-25 to +70 °C with SIEN-4, M5)
Storage temperature	Ts :	-40 to +85 °C
Electrical protection		
Short-circuit protection	:	Integral, pulsed
Overload protection	:	Integral
Polarity reversal protection	:	Integral
Open-circuit protection	:	Integral
Induction protection	:	Integral
EMC measures	:	IEC 601-2-4 KV IEC 601-3-10 V/m IEC 601-4-4 KV IEC 255-5-1 KV (1 KV with SIEN-4, M5)
Insulation test voltage	:	500 V
Mechanical protection		
Degree of protection	:	IP 67
Shock resistance	:	30 g, 18 ms, half-sine-wave
Vibration resistance	:	10 to 55 Hz, 1 mm amplitude
Indicators		
Operational status	:	Yellow LED, lights when output is active
Design features		
Connection system	:	Cage or plug (M8 or M12 thread, depending on type)
Cable type	:	Polyurethane coated cable, 2.5 m long
Mounting method	:	Flush or non-flush (depending on type)

Key technical data

AC inductive sensors with 2-wire technology

Switching gap	
Nominal switching gap	sn : Depends on type
Actual switching gap	st : 0.9 x sn...1.1 x sn
Effective switching gap	se : 0.8 x sn...1.2 x sn
Operational switching gap	sa : 0.8 x sn
Reproducibility	R : 5% sn
Switching hysteresis	H : 3%...20% sn
Reduction factors for sn	Al: 0.4; Cu: 0.2; CuZn: 0.4; ST18/8: 0.7
Power supply	
Operating voltage range	UB : 20...265 V AC
Permissible residual ripple	: ---
Idle current	Io : <= 1.5 mA
Supply frequency	: 45...65 Hz
Output	
Type of output	: 2-wire
Switch contact function	: N/O or N/C
Nominal output current	le : 300 mA
Voltage drop	Ud : <= 6 V
Residual current	Ir : <= 1.5 mA
Min. load current	Im : 5 mA
Short-time current	Ik : 3 A (20 ms, 1 Hz)
Times	
Switching frequency	f : Depends on type
"Ready" time delay	tv : <= 50 ms
Switch-on error pulse	: Suppressed
Temperatures	
Ambient temperature	Ta : -25 to +85 °C
Storage temperature	Ts : -40 to +85 °C
Electrical protection	
Short-circuit protection	: None
Overload protection	: None
Polarity reversal protection	: Integral
Open-circuit protection	: Integral
Inductor protection	: Integral
EMC measures	: IEC 801-2 4 KV IEC 801-3 10 V/m IEC 801-4 4 KV IEC 255-5 1 KV
Insulation test voltage	: 2 KV
Mechanical protection	
Degree of protection	: IP 67
Shock resistance	: 30 g, 18 ms, half-sine-wave
Vibration resistance	: 10 to 55 Hz, 1 mm amplitude
Indicators	
Operational status	Yellow LED, lights when sensor is attenuated
Design features	
Connection system	: Cable or plug (M12 thread)
Cable type	: Polyurethane coated cable, 2.5 m long
Mounting method	: Flush or non-flush (depending on type)



DIV.
3

Proximity Sensors

Self-contained proximity sensors

Intrinsically safe proximity controls

Modular proximity controls

LYS/LYT All-metals sensitive self-contained proximity sensors

FEATURES

- AC and DC versions
- Optional time delay versions
- N.O. or N.C. convertible AC
- Complementary DC sink or source
- Zinc die-cast housing
- Plug-in body uses same receptacle as electromechanical HDLS and LP photoelectric products
- Noise protected integrated circuitry
- False pulse and transient protected
- Self-lifting pressure plate terminals for easy wiring
- LED indicators
- NEMA 3, 3R, 3S, 4, 12 and 13 sealing
- UL pending

OPERATING CHARACTERISTICS

LYS/LYT AC AND DC

Differential Travel	
Typ.	0.5mm (0.02 in.)
Max.	1.27mm (0.05 in.)
Min.	0.25mm (0.01 in.)
Repetition Rate, Max.	AC, 1500/min. DC, 6000/min.
Temperature Range	-30°C to -55°C (-22°F to -131°F)

Shock: 50G
Vibration: 10G to 500 Hz
Humidity: 95%

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	AC	DC
Supply Voltage	93-132VAC, 50/60 Hz	9-30VDC
Load Current Continuous	0.5A over full temperature range	200mA
Inrush, max. Min.	2.7A 5mA (10mA relay load)	
Leakage Current, max. (OFF state)	2mA	10 μA
Saturation Voltage max.	7V with 0.5A load	1.25V with 200mA load

Side sensing



Sensing Distance	Shielded	LED Indicator	Output Type	Catalog Listings	Dimension Drawing (pg. 24)
14.5mm (0.57 in.)	No	Output ON	AC N.O.	LYS02C-2S	1
		Power ON	AC N.O. or N.C.	LYS02E-2S	
12.7mm (0.50 in.)	Yes	Output ON	AC N.O.	LYS01C-2S	
		Power ON	AC N.O. or N.C.	LYS01E-2S	
		Output ON	DC sinking	LYS01A-1S	
			DC sourcing	LYS01B-1S	

Top sensing



Sensing Distance	Shielded	LED Indicator	Output Type	Catalog Listings	Dimension Drawing (pg. 24)
14.5mm (0.57 in.)	No	Output ON	AC N.O.	LYT02C-2S	1
		Power ON	AC N.O. or N.C.	LYT02E-2S	
12.7mm (0.50 in.)	Yes	Output ON	AC N.O.	LYT01C-2S	
		Power ON	AC N.O. or N.C.	LYT01E-2S	
		Output ON	DC sinking	LYT01A-1S	
			DC sourcing	LYT01B-1S	

FY/AC All-metals sensitive self-contained proximity sensors

2-WIRE AND 3-WIRE AC MODELS

FEATURES

- **FYF** 12mm diameter model
Rugged threaded aluminum bushing
2-wire AC
- **FYB** 18mm diameter model
Rugged threaded aluminum bushing
2-wire AC
LED output indicator
- **FYC** 30mm diameter model
Rugged threaded aluminum bushing
2-wire and 3-wire AC
Optional LED output indicator
- **FYD** 76mm diameter model
Rugged aluminum housing
2-wire and 3-wire AC
Optional LED output indicator
Long sensing distance — 32mm

For additional information:

- Wiring/interfacing page 21
 Conduit adapters page 22
 Mounting brackets page 22
 Power supplies page 33
 Logic cards page 39

OPERATING CHARACTERISTICS

	2-Wire AC			3-Wire AC	
	FYD	FYF	FYB, FYC	FYC	FYD
Differential Travel, Typ.	8% of sensing distance	3-10% of sensing distance between -25°C and +85°C	10% of sensing distance	4% of sensing distance	
Repetition Rate, Max.	780/min.	1500/min.	330/min.	3300/min.	2400/min.
Temperature Range	-25°C to +85°C (-18°F to +185°F)			-30°C to +70°C (-22°F to +160°F)	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	2-Wire AC			3-Wire AC	
	FYD	FYF	FYB, FYC	FYC	FYD
Supply Voltage	94-132VAC	20-260VAC	80-275VAC	94-132VAC	
Input Frequency	50-60 Hz	45-65 Hz	45-65 Hz	50-60 Hz	
Load Current Max. Inrush	2.7A	1A	3.0A	7.5A (less than 1 millisecond)	
Continuous	0.5A up to 70°C Derated linearly to .3A at 85°C	0.5A up to 60°C Derated linearly to .25A at 85°C	.23A	1.2A	
Minimum	20mA		20mA	50mA	
Leakage Current Max. RMS (unoperated)	8.5mA (0.5A load)	2mA	2mA	6mA (1.2A load)	
Voltage Drop Max. Operated	9V	4V	9V	10V	9V

2-WIRE AC PROXIMITY SENSOR ORDER GUIDES

12mm Diameter



Shielded

Sensing Distance*	Shielded	LED Output Ind.	Output Type	Catalog Listing	Dimension Drawing (Pg. 24)
2mm (.079 in.)	Yes	No	N.O.	FYFA2C8-2	2
			N.C.	FYFA2D8-2	
5mm (.196 in.)	No	No	N.O.	FYFB4C8-2	3
			N.C.	FYFB4D8-2	

18mm Diameter



Unshielded

Sensing Distance*	Shielded	LED Output Ind.	Output Type	Catalog Listing	Dimension Drawing (Pg. 24 & 25)
5mm (.196 in.)	Yes	Yes	N.O.	FYBC5C5-2	4
			N.C.	FYBC5D5-2	
			N.O.	FYBC5C5-33**	
8mm (.315 in.)	No	Yes	N.O.	FYBD8C5-2	7
			N.C.	FYBD8D5-2	

*See Targets page 16

**Connector versions mate with Brad-Hamson NEMA type 40901, Canadian Code type 4095E and Jov. Mtg. Co. NEMA type 4-8984-3 Cables

FY/DC All-metals sensitive self-contained proximity sensors

2-WIRE DC MODELS

FEATURES

- Direct interface to sinking or sourcing circuits
- 12, 18 and 30mm diameter threaded aluminum bushings
- 2-wire as easy to wire as mechanical switch
- Complies with NEMA 4 and 13

For additional information:

Wiring/interfacing page 21
 Conduit adapters page 22
 Mounting brackets page 22
 Power supplies page 33
 Logic cards page 39

OPERATING CHARACTERISTICS

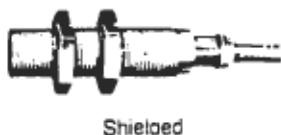
	2-wire DC
Repeatability	3%
Switching Hysteresis	3 to 19% of sensing range
Max. Switching Frequency	FYF 2 kHz FYB 1 kHz FYC 500 Hz
Temperature Range	-25°C to +85°C (-18°F to +185°F)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	2-wire DC
Supply Voltage	9.6-55VDC
Output Current	3-200mA
Current Consumption	1.5mA
Supply Ripple	10%

2-WIRE DC PROXIMITY SENSOR ORDER GUIDES

12mm Diameter



Sensing Distance*	Shielded	LED Output Ind.	Output Type	Catalog Listing	Dimension Drawing (Pg. 25 & 26)
2mm (.079 in.)	Yes	No	N.O.	FYFA2N6-2	16
5mm (.197 in.)	No	No	N.O.	FYFB5N6-2	17

18mm Diameter



Sensing Distance*	Shielded	LED Output Ind.	Output Type	Catalog Listing	Dimension Drawing (Page 26)
5mm (.197 in.)	Yes	No	N.O.	FYBA5N6-2	22
8mm (.314 in.)	No	No	N.O.	FYBB8N6-2	23

30mm Diameter



Sensing Distance*	Shielded	LED Output Ind.	Output Type	Catalog Listing	Dimension Drawing (Page 27)
10mm (.393 in.)	Yes	No	N.O.	FYCA10N6-2	29
16mm (.630 in.)	No	No	N.O.	FYCB16N6-2	30

*See Targets, page 16.

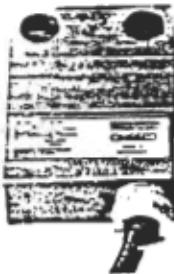
FYW All-metals sensitive self-contained proximity sensors

AC AND DC MODELS

FYW 3-wire DC



FYW 2-wire AC



FEATURES

- Rugged aluminum housing
- 2-wire AC or 3-wire DC versions
- Mounting interchangeability with MICRO SWITCH mechanical 914CE type compact enclosed switch
- Sealed and potted to meet NEMA 4, 12 and 13

OPERATING CHARACTERISTICS

	FYW AC and DC
Switching Hysteresis	3 to 10%
Repeatability	± 3%
Temperature Range	- 25°C to + 85°C (- 18°F to + 185°F)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	FYW	
	2-Wire AC	DC
Supply Voltage	90-260VAC 45-65 Hz	9.6-36VDC
Current Consumption (exclusive of load)	<10mA max.	<20mA max.
Output Current	180mA max.	200mA max.
Inrush Current, max.	5 Amperes at 20msec.	
Leakage Current, max.	2mA at 260VAC	
Max. Switching Frequency	20 Hz	1 kHz
Saturation Voltage	≤10V	≤0.1V

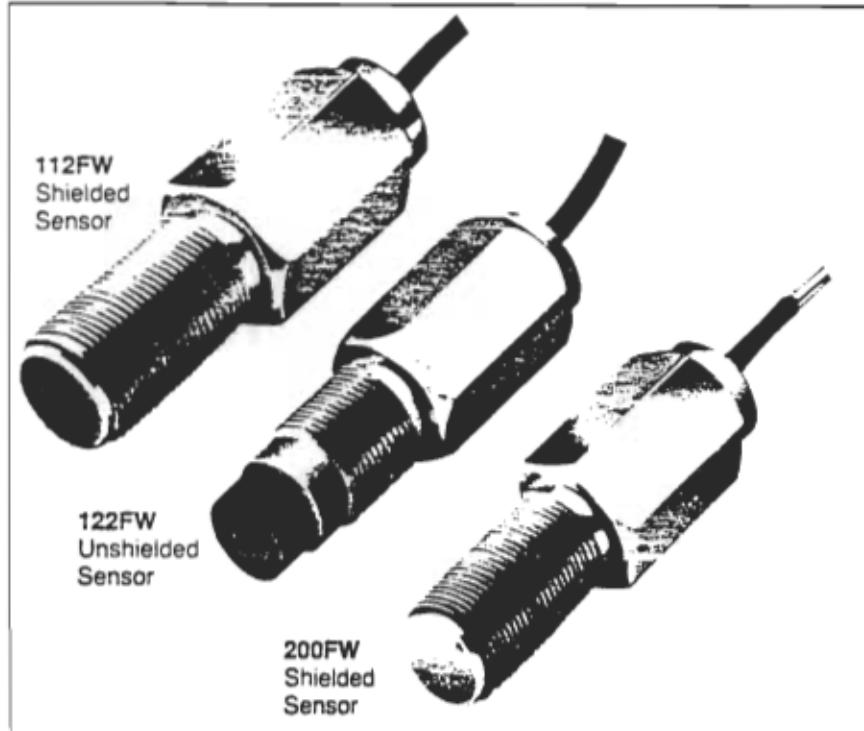
FYW PROXIMITY SENSOR ORDER GUIDE

Sensing Distance*	Input Voltage	Output Type	LED Output Ind.	Catalog Listing	Dimension Drawing (Page 24)
3mm (.118 in.)	90-260VAC	N.O.	No	FYWA3C5-1	6
	9.6-36VDC	N.O. Sinking	No	FYWA3K2-1	

*See Targets, page 16.

Environmentally protected proximity sensors

FW



FEATURES

- **Solid state sensors**
 - All-metals sensitive 100FW types
 - Hall effect, magnetic field sensitive 200FW types
 - **Self-contained ... all circuitry in a single compact package**
 - **Exceptionally long life ... no moving parts**
 - **Designed for aircraft, ordnance, marine, mass transit equipment, high performance industrial equipment**
 - **Compact, light weight package**
 - **Stainless steel housing ... thick wall construction for effective shielding**
 - **Circuit protection against:**
 - Transients ... MIL-STD-704
 - False pulse
 - Load shorts (100FW) ... EMI- MIL-STD-461A
 - Reverse voltage
 - 400 Hz interference
 - **Environmentally protected**
 - **Leadwire or connector termination**
 - **Bushing mounted**
 - **18 to 32 VDC supply voltage**

FW OPERATING CHARACTERISTICS

Sensing Range		Temperature Range	Catalog Listing
Shielded	Unshielded		
2.4mm .095 in.*		-54°C to + 125°C (-65°F to + 257°F)	112FW12-R1 112FW12-4
	5.8mm .230 in.*		122FW12-R1 122FW12-4
Operate Gauss 350 max.	Release Gauss 30 min.	-54°C to + 100°C (-65°F to + 212°F)	211FW10-R 211FW10-4 212FW10-R 212FW10-4
Distance ** 2.4mm min. .095 in.	Distance ** 11.4mm max. .450 in.		

*With standard actuator 15.9 dia. x 1.59 thick (.625 dia. x .062 thick) SAE 1020 steel (head-on mode).

****101MG7** magnet, available from MICRO SWITCH.

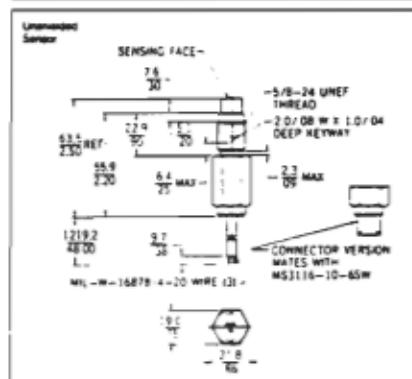
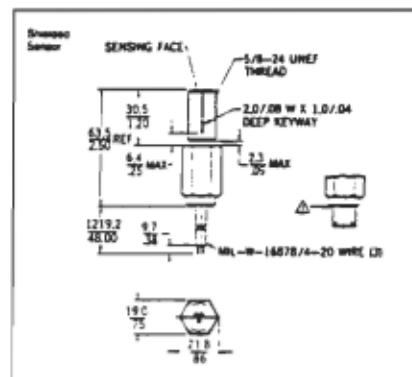
Characteristics can be varied by using different magnets as actuators.

FW ORDER GUIDE

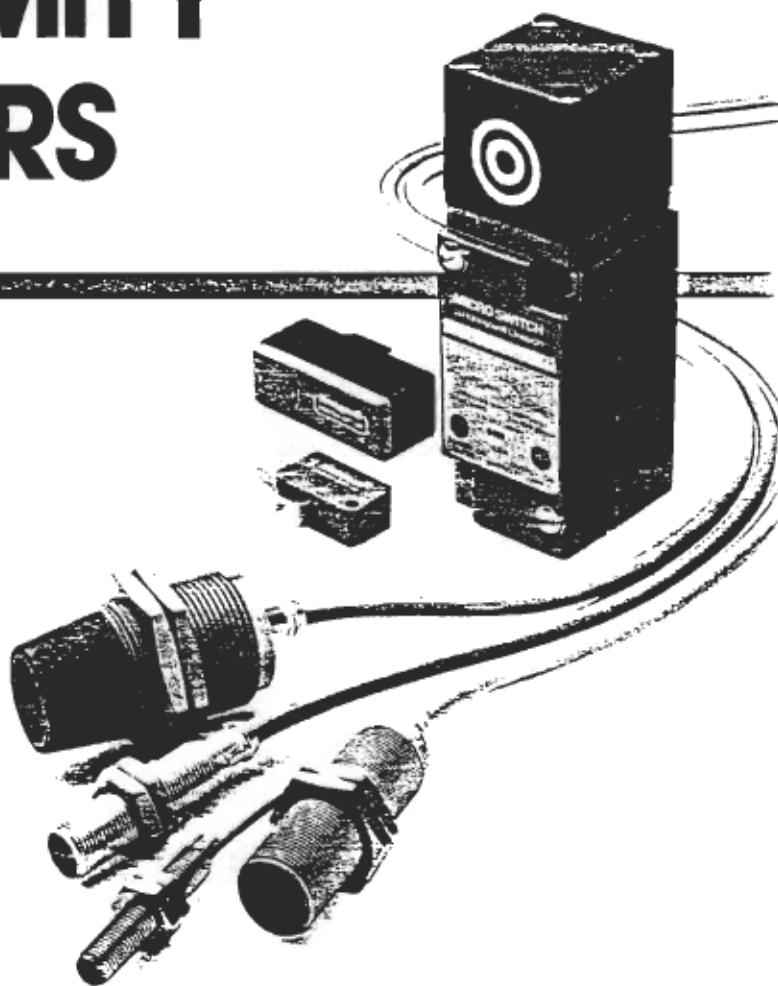
Supply Voltage (VDC)	Supply Current (mA max.)	Output Type*	Output Current (Res. or Ind.)	Output Voltage (VDC max.)	Catalog Listing	Termination
18-32	20	Sink N.O.	120mA max. 50mA max. Lamp	1.0 ON 32 OFF	112FW12-R1 112FW12-4 122FW12-R1 122FW12-4	Connector Leadwire Connector Leadwire
		Sink N.C.	100mA max.	0.4 ON 32 OFF	211FW10-R 211FW10-4	Connector Leadwire
		Sink N.O.	50mA max. Lamp	0.4 ON 32 OFF	212FW10-R 212FW10-4	Connector Leadwire

*N.O. means output is OFF when no target is present.
N.C. means output is ON when no target is present.

MOUNTING DIMENSIONS



MICRO SWITCH 920 SERIES PROXIMITY SENSORS



Honeywell

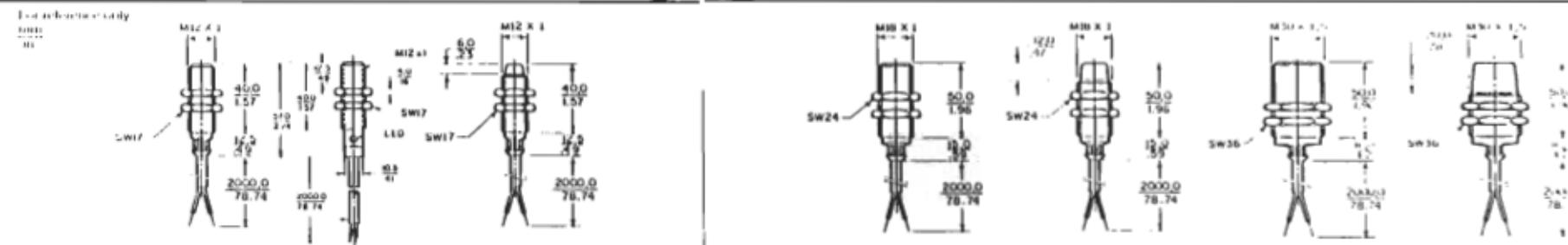
MICRO SWITCH 92O Series Proximity Sensors

2-Wire AC Sensors



SENSING DISTANCE	2mm (0.08)	5mm (0.20)	8mm (0.32)	10mm (0.40)	15mm (0.60)	20mm (0.79)
SENSOR SIZE	12mm (0.47) shielded	12mm (0.47) Unshielded	18mm (0.71) shielded	18mm (0.71) Unshielded	30mm (1.18) shielded	30mm (1.18) Unshielded
CATALOG LISTINGS*	92JAA2W A/T	92JAB2W A/T	92JAA3W A/T-L	92JAB3W A/T-L	92JAA4W A/T-L	92JAB4W A/T-L
Normally Open	NO	NO	YES	YES	YES	YES
Normally Closed	92JAA2W-B/T	92JAB2W-B/T	92JAA3W-B/T-L	92JAB3W-B/T-L	92JAA4W-B/T-L	92JAB4W-B/T-L
LED Indicator						
Repeatability, max	±3%	13%	±3%	±3%	±3%	±3%
Low-hfreq Frequency	20 Hz	20 Hz	20 Hz	20 Hz	20 Hz	20 Hz
Standard Target	12 x 12 x 1mm (.47 x .47 x .04)	12 x 12 x 1mm (.47 x .47 x .04)	18 x 18 x 1mm (.71 x .71 x .04)	18 x 18 x 1mm (.71 x .71 x .04)	30 x 30 x 1mm (1.18 x 1.18 x .04)	30 x 30 x 1mm (1.18 x 1.18 x .04)

MOUNTING DIMENSIONS



SPECIFICATIONS	Electrical Ratings
Supply Voltage (Vs)	20 to 260VAC
Frequency	45 to 65 Hz
Leakage Current	2mA max.
Load Current	500mA max. cont. derated -10mA/ $^{\circ}$ C. at 50 to 85 $^{\circ}$ C
Inrush Current	1.2A/20ms
Voltage Drop	4V (7V w/LED) max.
Hysteresis	3-15%
(1%) Tolerance at 20 $^{\circ}$ C	+10%
Factory Defaults (initial)	100ms
Setpoint Adjustment	100ms

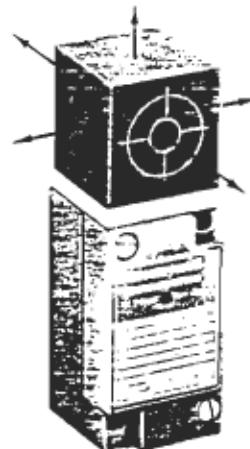
Environmental Ratings	Temperature Range Sealing	-25 to +85°C [-13 to +185°F] IP67 and NEMA 1, 3R & 12
Materials	Sensing Element Housing Cable	Polyamidic Anodized Aluminum PVC



Warning: Wrong sensor w/o load will
Cause permanent damage

MICRO SWITCH 920 Series Proximity Sensors

5-Direction Heavy Duty Sensor

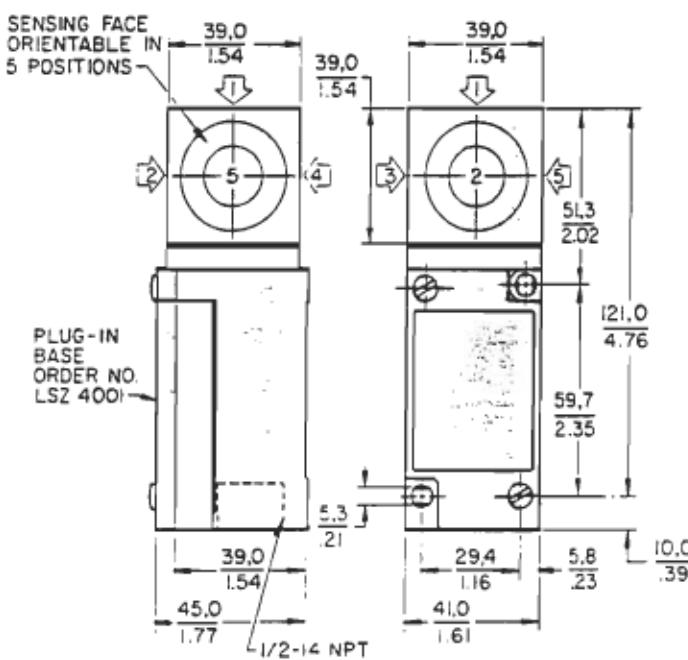


SENSING DISTANCE	15mm (0.59)	15mm (0.59)
SENSOR TYPE	3-Wire DC	2-Wire AC
CATALOG LISTINGS*	Normally Open S22H26Q-A9N-L Normally Closed 922H26Q-B9N-L LED Indicator YES Repeatability, max. $\pm 1\%$ Switching Frequency 0.3kHz Standard Target 40 x 40 x 1mm (1.57 x 1.57 x .04)	S23H26Q-A7T-L S23H26Q-B7T-L YES $\pm 3\%$ 20 Hz 40 x 40 x 1mm (1.57 x 1.57 x .04)

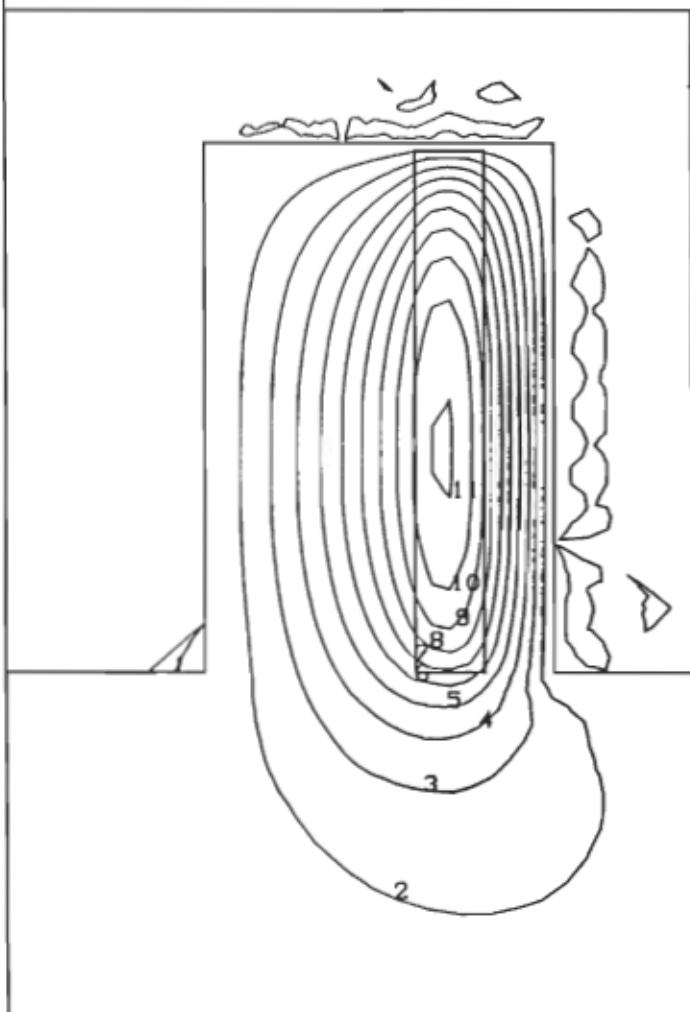
*Bold listings - Normally in stock.
Light listings - Check MICRO SWITCH distributor of Sales Office for availability.

MOUNTING DIMENSIONS For reference only

mm
in.



ANNEXE C
RÉSULTATS DES SIMULATIONS SUR FLUX2D^{MC}

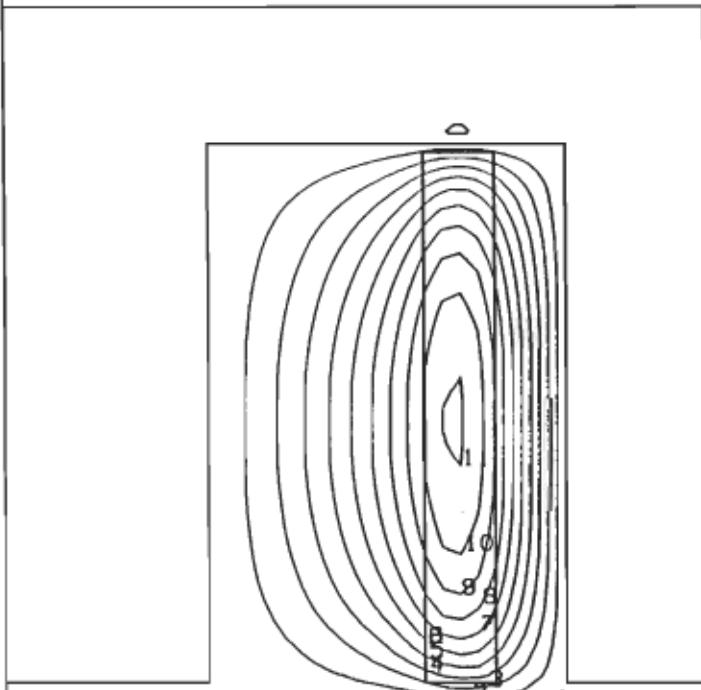


Weber

1	- .825877E-10
2	.238902E-07
3	.478630E-07
4	.718358E-07
5	.958086E-07
6	.119781E-06
7	.143754E-06
8	.167727E-06
9	.191700E-06
10	.215673E-06
11	.239645E-06

Inductance 136e-06 Henry
Courant 10 Amperes
solt 100 turns
f

FLUX2D 7.07	CAO-BIBS	V2.27 ECL/IEG LICENCE CNRS/INPG	carignan
capteur a video			DATE 5/03/96
Phase = 0 deg.			video

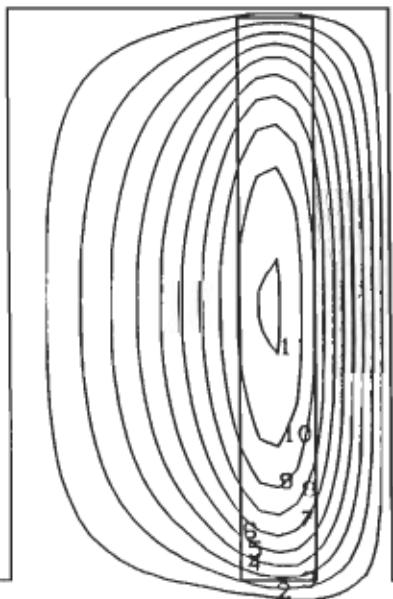


Weber

1	- .181934E-08
2	.216839E-07
3	.451870E-07
4	.686902E-07
5	.921934E-07
6	.115697E-06
7	.139200E-06
8	.162703E-06
9	.186206E-06
10	.209709E-06
11	.233213E-06

Courant 10 Amperes
Inductance 126e-06 Henry
0.126e-04 Weber
self 100 turns

FLUX2D 7.07	CAO-BIBS	V2.27 ECL/IEG LICENCE CNRS/INPG	cartignan
Equiflux / cible 50 C / distance 1mm Phase = 0 deg.			DATE 5/03/96 sim50_3



\emptyset

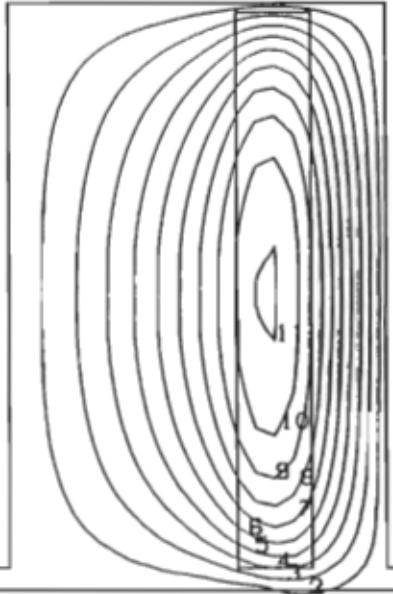
Weber

1	- .290195E-08
2	.207284E-07
3	.443588E-07
4	.679892E-07
5	.916196E-07
6	.115250E-06
7	.138880E-06
8	.162511E-06
9	.186141E-06
10	.209772E-06
11	.233402E-06

Courant 10 Amperes
inductance 127e-06 Henry
0.127e-04 Weber
self 100 turns

FLUX2D 7.07	CAO-BIBS	V2.27 ECL/IEG LICENCE CNRS/INPG	cartignon
DATE 5/03/96			sim100_3

Equiflux / cible 100 C / distance 1mm
Phase = 0 deg.



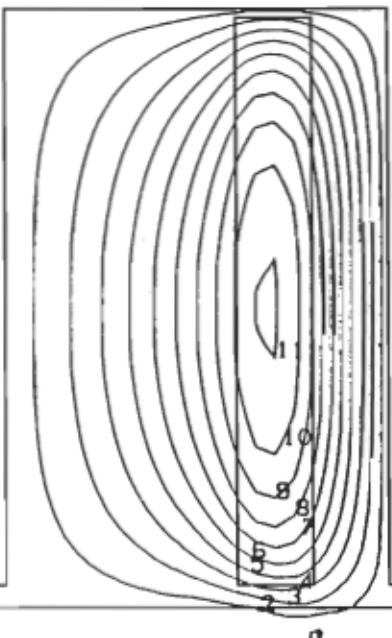
\emptyset

Weber

1	- .553605E-08
2	.184036E-07
3	.423432E-07
4	.662828E-07
5	.902225E-07
6	.114162E-06
7	.138102E-06
8	.162041E-06
9	.185981E-06
10	.209921E-06
11	.233860E-06

Courant 10 Amperes
 Inductance 127e-06 Henry
 0.127e-04 Weber
 self 100 turns

FLUX2D 7.07	CAO-BIBS	V2.27 ECL/IEG LICENCE CNRS/INPG	carignon DATE 5/03/96
Equiflux /cible 200 C / distance 1mm Phase = 0 deg.			
sim200_3			



Weber

1	- .871863E-08
2	.155979E-07
3	.399144E-07
4	.642309E-07
5	.885473E-07
6	.112864E-06
7	.137180E-06
8	.161497E-06
9	.185813E-06
10	.210130E-06
11	.234446E-06

Courant 10 Amperes
Inductance 128e-06 Henry
0.128e-04 Weber
self 100 turns

FLUX2D 7.07

CAO-BIBS

V2.27 ECL/IEG
LICENCE CNRS/INPG

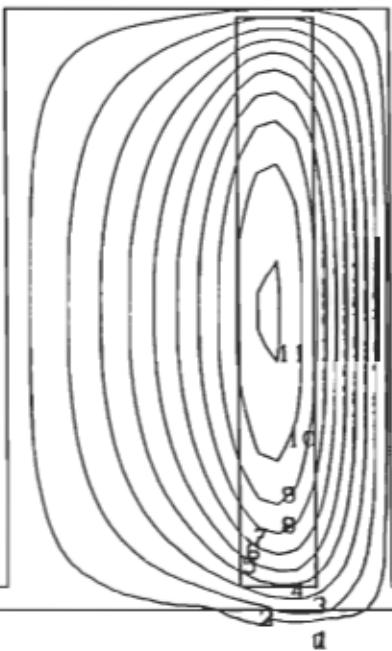
cartignan

DATE 5/03/96

Equiflux / cible 300 C / distance 1mm

Phase = 0 deg.

sim300_3



Weber

1	- .122185E-07
2	.125207E-07
3	.372600E-07
4	.619992E-07
5	.867384E-07
6	.111478E-06
7	.136217E-06
8	.160956E-06
9	.185695E-06
10	.210435E-06
11	.235174E-06

Courant 10 Amperes
Inductance 129e-06 Henry
0.129e-04 Weber
self 100 turns

FLUX2D 7.07

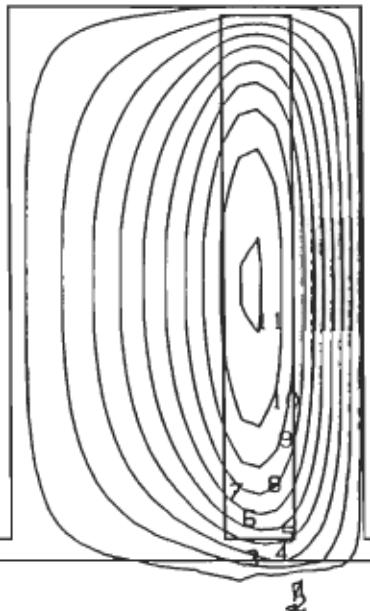
CAO-BIBS

V2.27 ECL/IEG
LICENCE CNRS/INPG

cartignon
DATE 5/03/96

**Equiflux / cible 400 C / distance 1mm
Phase = 0 deg.**

sim400_3



Weber

1	- .159218E-07
2	.927546E-08
3	.344728E-07
4	.596701E-07
5	.848674E-07
6	.110065E-06
7	.135262E-06
8	.160459E-06
9	.185657E-06
10	.210854E-06
11	.236051E-06

Courant 10 Amperes
 Inductance 131e-06 Henry
 0.131e-04 Weber
 self 100 turns

FLUX2D 7.07	CAO-BIBS V2.27 ECL/IEG LICENCE CNRS/INPG
Equiflux / cible 500 C / distance 1mm Phase = 0 deg.	

cartignan
DATE 5/03/96
sim500_3

ANNEXE D

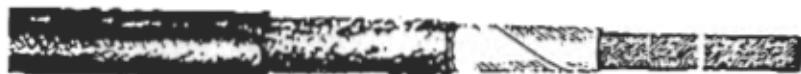
DONNÉES TECHNIQUES DES CONDUCTEURS HAUTE TEMPÉRATURE

MGS Apparatus & Motor Lead Wire

600 Volts

Single Conductor

538°C



Description

27% Nickel coated copper conductor, Class K & H stranded per ASTM B355, B174 and B175.
Sizes: 18 AWG - 2 AWG

INSULATION

Composite Insulation System consisting of mica/glass tapes and ceramic tapes.

JACKET OVERALL

Glass braid impregnated with high temperature silicone finish.

Application

For internal wiring of domestic and commercial apparatus, and motor lead wire with operating temperatures from 150°C to 538°C. For a specific recommendation for your application, please consult your Trans Canada Electro Representative.

Features and Benefits

Temperature Rating:
Normal 538°C

MGS is listed as a lead wire in sizes 18 AWG - 2 AWG in accordance with UL Subject 758.

MGS is listed as a 250°C equipment wire Type A-23(b); by Canadian Standards Association in sizes 18 AWG - 6 AWG in accordance with CSA Standard C22.2 No. 26.

Conductor:
Nickel coated copper maintains flexibility and conductivity at elevated temperatures.

The use of Class K and H stranding provides additional flexibility.

The composite insulation system provides:

Thermal resistance as well as good dielectric properties at elevated temperatures.

Glass Braid jacket provides:

Mechanical protection as well as flame resistance.

NOTE: At approximately 420°C, the impregnation will begin to dissipate; however, the insulation and jacket materials will continue to be held in place and function properly.

How to Specify

Specify by Trans Canada Electro product name, single conductor, size of conductor, stranding, voltage.

How to Order

Order by Trans Canada Electro product name, quantity required, single conductor, stranding, voltage, Number of specific lengths required and packaging.

EXAMPLE

Trans Canada Electro

MGS XNCC Apparatus & Motor Lead Wire

1000 feet, single conductor, 14 AWG, Class K, 600 volts.

2-500 foot lengths on non-returnable reels.



TRANS CANADA ELECTRO LTD LTÉE

MGS Apparatus & Motor Lead Wire

600 Volts

Single Conductor

538°C

AWG Size	Stranding	Ceramic Tape THICKNESS (In.) (mm)	Mica THICKNESS (In.) (mm)	Ceramic Tape THICKNESS (In.) (mm)	Glass Braided THICKNESS (In.) (mm)	Overall Diameter (In.) (MM)	NET WEIGHT (lbs/Mft) (Kg/Km)	AWG Size					
MGS XNCC* Flexible Stranded 27% Nickel Coated Copper 600 Volts 538°C													
18	16/.010	.027	.69	.015	.38	.025	.64	.18	4.6	18	27	18	
16	26/.010	.027	.69	.015	.38	.025	.64	.20	5.1	22	33	18	
14	41/.010	.027	.69	.015	.38	.025	.64	.21	5.3	20	43	14	
12	65/.010	.027	.69	.015	.38	.025	.64	.23	5.8	39	58	12	
10	105/.010	.027	.69	.015	.38	.025	.64	.26	6.6	52	77	10	
8	133/.0111	.015	.38	.027	.69	.020	.51	.025	.64	.34	8.6	102	8
6	133/.0142	.015	.38	.027	.69	.020	.51	.025	.64	.39	9.9	120	6
4	133/.0179	.015	.38	.027	.69	.020	.51	.025	.64	.44	11.2	176	4
2	133/.0223	.016	.38	.027	.69	.020	.51	.025	.64	.51	13.0	265	2

* Authorized Stock Items

Dimensions and weights shown are Standard lengths, multiples of 500' nominal, subject to standard industry tolerances, plus or minus 10%.

Dimensions and weights shown are Standard lengths, multiples of 500' nominal, subject to standard industry tolerances, plus or minus 10%.

Other constructions are available upon request. Please consult your Trans Canada Electro sales representative.



ANNEXE E

CARACTÉRISTIQUES DE LA CÉRAMIQUE DE LA COMPAGNIE COTRONIX

CHROMIC

CORP.

**HIGH
TEMPERATURE
EPOXY
CERAMIC
and
ADHESIVE
MATERIALS**

VOLUME 94
NUMBER 23

3379 Shore Parkway, Brooklyn, N.Y. 11235
Tel: 718-646-7996 Fax: 718-646-3028

SINCE 1971

DURAPOT CERAMICS

POTTING COMPOUNDS TO 3000 °F

High Temp, High Resistance Potting, and Encapsulating Materials

801 - 99% PURE ALUMINA CERAMIC

801 is a specially formulated room temperature curing 99% PURE ALUMINA CERAMIC, providing the ultimate properties of pure Alumina. No binders to contaminate even the most delicate systems. 801 provides highest electrical resistance at high temperatures. 99% Pure Alumina Ceramic finds uses in many electrical and metallurgical applications.

804, 805 - 96% PURE ALUMINA CERAMIC

804 and 805 are formulated to provide high strength, LOW COST ALUMINA POTTING AND CASTING materials where the ultra high purity of type 801 is not required. Electrical and metallurgical properties are excellent. Simply mix and pour, cure at room temperature. Choose 804 for small parts and 805 for large parts.

808 - HIGH RESISTANT CERAMIC

808 is a non-corrosive high resistant ceramic encapsulated for use from -70°F to +2000°F. Specially formulated with a chemically neutral system that will not corrode the most delicate electrical components.

809 - ELECTRICAL RESISTANT CEMENT

809 is a 2800°F, HIGH RESISTANCE CERAMIC for potting, sealing, bonding. Just mix and apply, and cure at room temperature. Use in ignitions, heating coils, electronics, etc. The best general purpose ceramic potting compound.

810 - THERMALLY CONDUCTIVE -

HIGH RESISTANCE CEMENT

810 is a 3000°F High Thermally Conductive alumina based potting compound and adhesive that has been developed to provide excellent electrical resistance at high temps. and improve the thermal conductivity for high power applications. Choose regular grade for maximum thermal conductivity or extra fine for small parts.

814 - HIGH SPEED POTTING

814 is formulated for general purpose use, where a *FAST CURE* is required. Just mix and apply. Will cure in 5 minutes at 175°F - 225°F.

820 - ELECTRICALLY RESISTANT COATING

A one component paint and coating which air dries to a high resistance 3200°F coating containing over 90% ALUMINA. Does not contain any sodium to contaminate delicate alloys.

AVAILABILITY:

DURAPOT	FORM	COST / QUART	COST / GALLON
801	Paste & Activator	1-12 69.95	13-49 59.95
804	Powder	39.95	34.95
805	Powder	39.95	34.95
808	Powder & Activator	69.95	59.95
809	Powder	49.95	44.95
810	Powder	49.95	44.95
814	Powder & Activator	49.95	44.95
820	Paint	69.95	57.95



COTRONICS

3379 SHORE PARKWAY

BROOKLYN N.Y. 11235

DURAPOT CERAMICS

POTTING COMPOUNDS TO 3000°F

DURAPOT	801	804	805	808	809	810	814	820
SPECIAL FEATURE	Pure Alumina	Small Parts	Large Castings	Non Corrosive	High Dielectric Strength	Thermal Cond.	Fast Cure	Dielectric Coating
BASE	99% Al_2O_3	96% Al_2O_3	96% Al_2O_3	Mica	MgO Base	Alumina	Zirconia Silicate	Alumina Silicate
Temp Limit °F	3350	3000	3000	2000	2800	3000	2200	3200
Volume Resistivity ohm / cm	10^{15}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{12}	10^{12}	10^9	10^{10}
Dielectric Strength volt / mil	350	150	150	100	280	280	100	125
Thermal Expansion $10^{-6} / ^\circ\text{F}$	4.3	4.0	4.0	4.4	2.8	4.0	6.5	3.0
Thermal Conductivity BTU In / Hr $^\circ\text{F Ft}^2$	8.0	8.0	10.0	2.0	4.0	15	3.4	2.0
Chemical Resistance	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
Solvent Resistance	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Pot Life	4 hours	30 min.	30 min.	30 min.	20 min	20 min	10 min.	Infinite
Components	2	2	2	2	2	2	2	1
Mix Ratio Base Activator	100 parts	100 parts	100 parts	100 parts	100 parts	100 parts	100 parts	one component
	44 parts	19 parts	12 parts	80 parts	13 parts	13 parts	30 parts	

**NOTE: Cure may be accelerated by mild heating @ 150°F - 200°F.

Post cures @ 250°F will improve moisture resistance for 801, 808, 809, 814.

CUSTOM FORMULATIONS ON REQUEST

 COTRONICS

3379 SHORE PARKWAY BROOKLYN N.Y. 11235

Tel 718-646-7996 Fax 718-646-3028

ANNEXE F

**DESCRIPTION DE L'ANALYSEUR D'IMPÉDANCE 4194 A DE LA COMPAGNIE HEWLETT
PACKARD**

COMPONENT MEASUREMENT

Impedance/Gain-Phase Analyzer HP 4194A

- High accuracy and wide range

Impedance measurement:

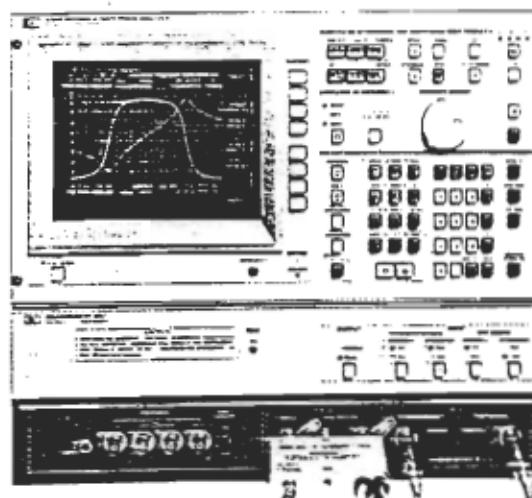
100 Hz to 40 MHz, 0.1 mΩ to 1.6 MΩ, 0.1%
10 kHz to 100 MHz, 0.1 Ω to 1 MΩ, 1.5%, when
used with the HP 4194A/B

Gain-phase measurement:

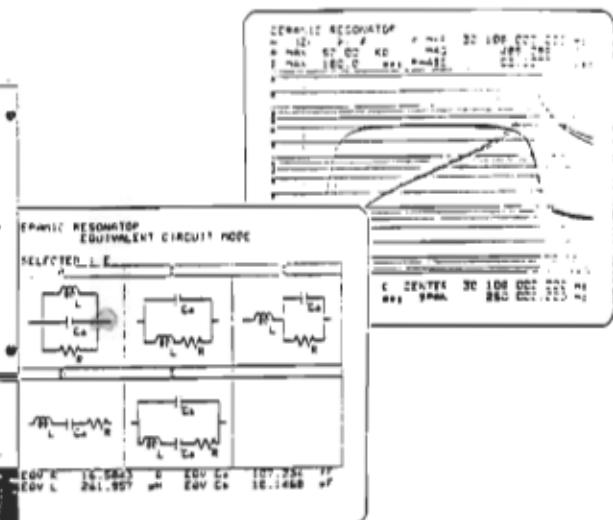
10 Hz to 100 MHz, -107 dBm to +15 dBm,

0.1 dB resolution

- Flexible measurement, computation, and analysis capabilities on a color graphic display
- Fully programmable



HP 4194A with HP 4194A/B



HP 4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer

The HP 4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer is an integrated solution for efficient measurement and analysis or go/no-go testing of components and circuits. Detailed impedance and transmission characteristics, including secondary parameter derivations, can be simply and quickly evaluated or tested. The HP 4194A can contribute to improving engineering productivity and reducing test cost. The analyzer is flexible and has wide measurement capabilities in both impedance and transmission measurements. It is also fully programmable using Auto Sequence Programming (ASP). Desired measurements and computations, including graphics analysis, can be programmed simply by storing front-panel keystroke operations, allowing you to customize measurement, computation, and analysis functions. The HP 4194A also features high-accuracy and error elimination functions to ensure reliable measurements.

Wide Range Accurate Measurement

Featuring a wide test frequency range—100 Hz to 40 MHz for impedance measurements (10 kHz to 100 MHz when using the HP 4194A/B Impedance Probe Kit) and 10 Hz to 100 MHz for gain-phase measurements—the HP 4194A satisfies a wide spectrum of needs. Realistic device characteristics can be analyzed under actual operating conditions by varying the test frequency, test signal level, and dc bias. The HP 4194A's high degree of measurement accuracy—0.1% percent for impedance measurements (1.5 percent when using the HP 4194A/B, with an amplitude ratio of 0.1 dB)—ensures that you'll improve the quality of your test devices.

Quick Analysis

The HP 4194A makes high-speed measurements, (approximately 3.7 ms per point), displays results on a color CRT, and performs parameter analysis of components and circuits quickly and efficiently, substantially reducing development and evaluation time. The analysis function not only provides you with impedance and transmis-

sion characteristics, but also allows you to determine secondary parameters. Using the marker and line cursor functions, you can obtain the resonating frequency of resonators and the pass band width of band pass filters quickly.

Equivalent Circuit Analysis Function

Using the HP 4194A's Equivalent Circuit Analysis Function, you can easily and quickly obtain those equivalent circuit constants that, until now, required a number of time-consuming, complicated calculations. By using measured values, this unique function can approximate the circuit constant values of five circuit models. For example, a resonator's equivalent circuit elements or a coil's self inductance, lead resistance, and stray capacitance can be easily obtained.

The Equivalent Circuit Analysis Function also simulates the frequency characteristics of components by using derived circuit values or values you specify. By using approximation and simulation, you can compare design values to measurement values, and thereby improve component design efficiency.

Auto Sequence Program (ASP)

The HP 4194A's ASP function, an internal programming feature, allows you to control all HP 4194A operations (measurement, display, and analysis) without the need for an external computer. By using ASP and actual measurement values, you can readily calculate many secondary parameters that you may need to evaluate. You can use the HP 4194A's powerful analysis functions to analyze these calculated parameters.

You can also use ASP to enhance such HP 4194A functions as alternate sweep, sweep timing control, and marker tracking. Because ASP eliminates the need for external controller, thereby eliminating data transfer time, the HP 4194A can quickly and efficiently perform production line go/no-go testing of components such as resonators and filters. All these features combine to increase your engineering and manufacturing productivity.

Increased Capabilities with the HP 41941A/B Impedance Probe Kit

When using the HP 4194A with the HP 41941A/B Impedance Probe Kit, you can perform reliable impedance evaluations up to 100 MHz. Measurement errors due to residual impedance and stray admittance are eliminated by using the calibration standards furnished with the HP 41941A/B and the HP 4194A's automatic calibration function. This makes it possible to make highly accurate measurements (basic measurement accuracy 1.5 to 3 percent) over a wide measurement range of 10 mΩ to 1 MΩ. Calibration accuracy is guaranteed to the tips of the HP 41941A (1.5 m) and HP 41941B (3 m) impedance probes.

The HP 41941A/B can be used as a grounded probe to evaluate the impedance of in-circuit components such as printed circuit patterns, the input output impedance of circuits. In addition, you can connect an external dc bias source directly to the HP 41941A/B to perform dc biased measurements up to ± 150 V/0.5 A, to measure the characteristics of inductors, capacitors, materials, and semiconductors. To perform swept dc bias measurements, use the HP 4194A's ±20 V internal dc bias source.

Specifications

Impedance Measurements

Measurement Parameters: $|Z|$, $|Y|$, θ , R, X, G, B, L, C, D, Q. Twenty parameter combinations are available.

Test Frequency: 100 Hz to 40 MHz (Cable length: 0m), 100 Hz to 15 MHz (Cable length: 1 m), 1 mHz resolution.

OSC Level: 10 mV to 1 V rms (≤ 10 MHz), 10 mV to 0.5 V rms (> 10 MHz) (UNKNOWN terminal open), 3-digit resolution

dc Bias: 0 to ± 40 V, 10 mV resolution

Measurement Terminal: 4-terminal pair configuration

Measurement Range and Maximum Resolution:

Measurement parameter	Range	Max resolution
$|Z|, R, X$	10 mΩ to 100 MΩ	100 μΩ
$|Y|, G, B$	10 nS to 100 S	1 nS
θ	$\pm 180^\circ$	0.01°
L	1 nH to 100 kH	10 pH
C	10 fF to 0.1 F	0.1 fF
D	0.001 to 10	0.0001
Q	0.1 to 1000	0.1

Basic Measurement Accuracy: 0.17%

Level Monitor: 1 mV to 1 V rms, 1 μA to 20 mA

Gain-Phase Measurements

Measurement Parameters: Tch/Rch (dB, Linear Ratio), Tch, Rch (V, dBm, dBV), θ (degree, rad), τ

Tch = Test Channel, Rch = Reference Channel, τ = Group Delay

Measurement Frequency: 10 Hz to 100 MHz, 1 mHz resolution

Aperture Frequency Range (Group Delay Measurements): 0.5% to 100% of frequency span

OSC Level: -65 dBm to -15 dBm, 0.1 dB resolution

Measurement Range:

Tch/Rch: 0 to ± 120 dB, 0.001 dB resolution

Tch, Rch: -10³ dBm to -5 dBm (0 dB attenuator)
-87 dBm to -15 dBm (20 dB attenuator)

0.001 dB resolution

θ : $\pm 180^\circ$ (can display phase continuously with the phase scale expansion function), 0.01° resolution

τ : 0.1 ns to 1 s, 0.1 ns resolution

Basic Measurement Accuracy:

Tch/Rch: 0.1 dB, 0.5°

Tch, Rch: 0.35 dBm

Level Monitor: Monitor the input level of the reference and test channels in units of dBm, dBV and Volts.

Impedance Measurements Using the HP 41941A/B

The specifications listed below are for the HP 4194A when used with the HP 41941A/B.

Frequency Range: 10 kHz to 100 MHz, 1 mHz resolution

OSC Level: Opt 350: 10 mV to 1.25 V rms

Opt 375: 10 mV to 1.54 V rms

dc Bias: Internal: ± 40 V, ± 20 mA

External: ± 150 V, ± 500 mA, max 25 W

Measurement Range: 10 mΩ to 1 MΩ

Basic Measurement Accuracy:

$15\% \pm 1.5\% \text{ to } 3\% \pm 3\% \text{ at } 100 \text{ kHz}$, $\pm 3\% \text{ to } 6\% \text{ (< } 100 \text{ kHz)}$

Cable Length: HP 41941A: 1.5 m, HP 41941B: 3 m

Common Specifications

Trigger Mode: Internal, external, and manual

Sweep Capabilities

Sweep parameter: Frequency, OSC level, dc bias (impedance measurements only)

Entry: START STOP or CENTER SPAN

Sweep type: LIN, LOG, ZERO SPAN (dc Bias: LIN or ZERO SPAN only)

Number of measurement points: 2 to 401 points

Sweep functions: Partial sweep, expand markers sweep, program points measurement

Display

CRT: 7.5-in color CRT

Display Mode: Rectangular (X-A & B), rectangular (A-B), table

Display Control: Autoscale, superimpose, and storage

Analysis

Marker: Single, delta, double markers

Line-Cursor: Line-cursor, delta-line cursor

Equivalent Circuit Function: Approximation, simulation

Arithmetic Operation

Data register manipulation: Use arithmetic operations and functions to manipulate data registers

Go/no-go limits

Programming

Auto Sequence Program (ASP): Control the HP 4194A's operation with an internal program language. ASP can be entered using the front panel keys or downloaded from HP-IB.

Program Memory Size: 20 kB of nonvolatile memory

Copy: Dump, plot, print mode

General Specifications

Operating Temperature and Humidity: 0° C to 40° C (HP 41941A/B: -20 to +65° C), $\leq 95\%$ RH at 40° C

Storage Temperature: -30° C to -60° C (HP 41941A/B: -40 to -65° C)

Safety: Based on IEC -348, UL -1244

Power: 100, 120, 220V $\pm 10\%$, 240 V $\pm 10\%$, 48 to 66 Hz, 400 VA (max)

Size: 425 mm W \times 375 mm H \times 620 mm D (16.75 in \times 14.76 in \times 24.41 in)

Weight: Net, approximately 37 kg (81.4 lb)

Reference Data

Typical Measurement Speed

Impedance: Approximately 3.7 ms/point

Gain-phase: Approximately 3.5 ms point

Impedance when used with the HP 41941A/B: Approximately 6 ms/point

Accessories Furnished

HP 16047D: Direct Coupled Test Fixture

HP 8120-1838: 30-cm BNC Cable (2 ea) (Opt 350)

HP 04194-61640: 30-cm BNC Cable (2 ea) (Opt 375)

HP 8120-1839: 60-cm NNC Cable (Opt 350)

HP 04194-61641: 60-cm NNC Cable (Opt 375)

HP 1250-0080: BNC Adapter

Accessories Available

Refer to page 347.

Ordering Information

HP 4194A Impedance/Gain-Phase Analyzer

Opt 350* 50 Ω System

Opt 375* 75 Ω System

Opt W30 Extended Repair Service (see page 624)

Opt 001 High Stability Frequency Reference

HP 41941A* Impedance Probe Kit (1.5 m)

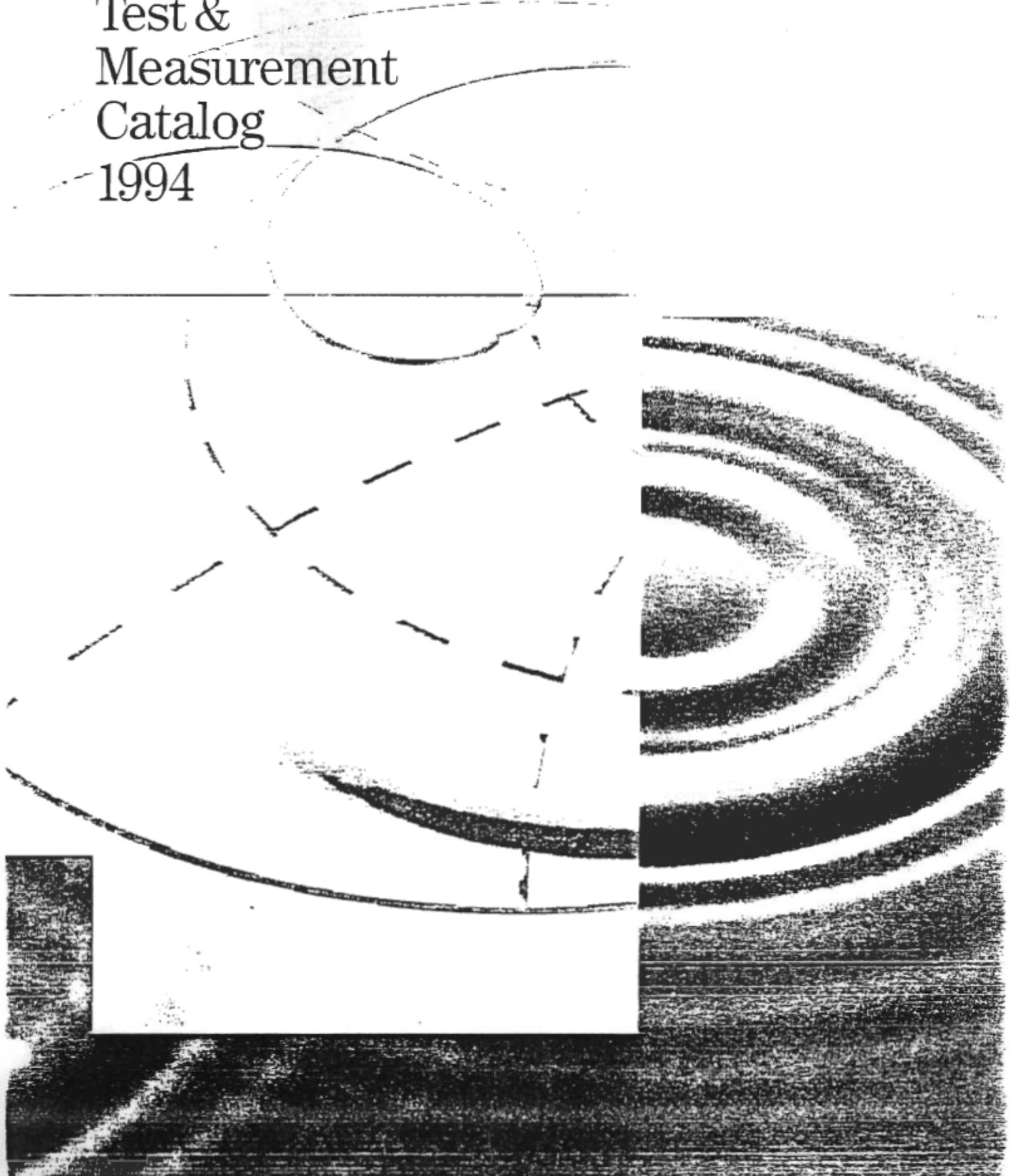
HP 41941B* Impedance Probe Kit (3 m)

*Must select either Opt 350 or 375

ANNEXE G

DESCRIPTION DU SYSTÈME D'ACQUISITION 3852A DE LA COMPAGNIE HEWLETT

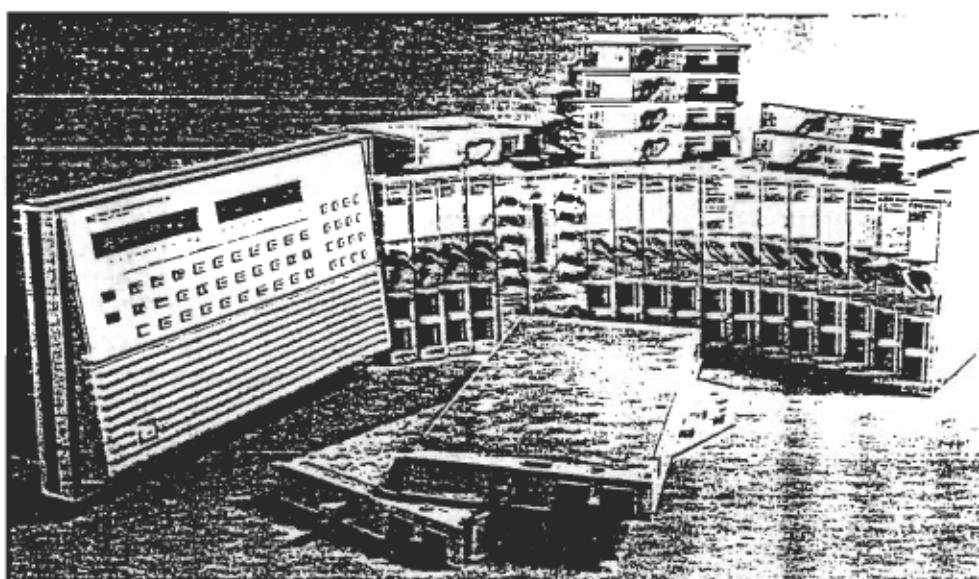
Test & Measurement Catalog 1994



DATA ACQUISITION SYSTEMS

Instruments for Measurement and Control

HP 3852A



HP 3852A



HP 3852A Data Acquisition and Control System

You can easily configure an HP 3852A Data Acquisition and Control System to meet your needs for measuring physical parameters through transducers, and for providing control outputs. The HP 3852A Data Acquisition Control Unit (mainframe) has 8 slots for plug-in function modules. If more slots are needed, up to seven extenders can be added, each with 10 additional slots. You can choose any combination of capabilities that include precision and high-speed plug-in voltmeters and a variety of analog and digital input/output functions.

A system clock and programmable pacer are built-in to drive your system. The clock—non-volatile for four years, 1 msec—resolution allows data to be time-stamped and events to be timed. The pacer—0.25 μ sec resolution—provides powerful capabilities to initiate and pace measurements, scans, or events.

Include High-Speed and Accurate Analog Measurements in One System

Choose from three digital voltmeters to meet your measurement needs. For applications that require sensitive, accurate measurements in the presence of noise (for example, thermocouples), use the 5½-Digit Integrating Voltmeter and Relay Multiplexers. If you need speed, the 13-Bit High-Speed Voltmeter and High-Speed FET Multiplexers are the answer, providing single-channel bursts, channel-to-channel, random channel, full auto-ranging, and direct DMA transfers to a hard disk at an honest 100,000 readings/sec. High speed, high accuracy readings can be achieved with the 16-bit, 100 kHz high speed voltmeter. The system voltmeters can be used in the mainframe or any extender, and multiple voltmeters are allowed per card cage.

Add Versatility and Expandability to Your System

With the HP 3852A Data Acquisition and Control System, you'll have available a complete set of input and output plug-in modules for interfacing to measurements and for controlling and sequencing your tests. Modules are available to handle physical measurements of temperature, flow, pressure, level, and strain. The HP-IB controller module gives you the capability to autoboot subroutines stored on a disk and to store data to the disk without computer assistance.

Take Advantage of Extensive Front-End Intelligence

The HP 3852A mainframe has considerable built-in intelligence to increase the speed of collecting measurement and control data. Control decisions can be handled faster using subroutines running within the mainframe. This intelligence can be used to return only significant data to the computer, thus increasing its efficiency.

Up to 5,500 readings can be stored in the standard HP 3852A mainframe. Expand this memory (used for storage of user routines as well as readings) to 1 MB, 2 MB, or 4 MB with an Extended Memory board. Extended memory fits inside the mainframe controller module without using an I/O slot.

The power of this front-end intelligence in combination with an HP 9000 Series 300 computer and the optional data acquisition software adapts easily to testing your complex product or characterizing your process. Of course, the mainframe can be also used with HP 1000 computers, HP Vectra PCs, other IEEE-488 controllers and instruments, and a variety of computer peripherals.

Data A

HF 385

Maintra

- S Pu

- Da

- Sys

- Me

- Fu

Benefit

- Ma

- you

• Op
nee

Exter

Extenc

Expans

5½- to

HP 42

Direct

The H

- A

- C

- w

- O

Best c

13-B

HP 4

Direct

The F

- C

- M

Best c

16-E

HP 4

Direct

- c

The I

- E

- S

Best

Data Acquisition and Control Unit—HP 3852A

Mainframe Supports

- 8 Function Module Slots
- Data Acquisition Operating System
- System Timer
- Measurement Pacer
- Full Alphanumeric Keyboard, Command and Result Displays

Benefits

- Make real-time decisions and reduce data without burdening your computer:
 - Multitasking operating system prioritizes and timeslices tasks.
 - Powerful HP 3852A command statements simplify complex measurements.
 - Execution speed of command sequences are enhanced by executing subroutines stored in the HP 3852A memory.
 - Built-in, easy-to-use transducer conversions are supported for thermocouples, thermistors, RTDs, and strain gages.
 - Post-processing and data reduction before transferring results to a computer are achievable by first storing data to the HP 3852A internal memory.
 - Limit checking of analog measurements is performed in real time or after the measurements have been stored in mainframe memory.
- Optimize measurement timing and throughput to meet your needs:
 - Real-time interrupts allow higher priority tasks and external inputs to be serviced at any time.
 - Asynchronous communication with a computer is achieved through input and output buffering.
 - Control can be timed using built-in clock and alarm capabilities (can cause an interrupt).
 - A built-in pacer simplifies measurement timing and triggering.
 - Multiple voltmeters can be used. The high-speed voltmeter can control scanning, timing, and triggering of its own high-speed FET multiplexer subsystem via ribbon cable. Several of these subsystems can run simultaneously.

Extender Chassis—HP 3853A

Extender supports: 10 Function Module Slots

Expand your system with no loss of functional capability:

- Up to seven extenders may be used with each HP 3852A mainframe.
- Any slot can be used for any function module and multiple voltmeters can be used with parallel triggering.
- All mainframe functions, including interrupts and triggering, are available through the extender control cable.

5½- to 3½-Digit Integrating Voltmeter

HP 44701A

Directly measures: • dc voltage • ac voltage • Resistance

The HP 44701A lets you:

- Accurately measure small signal changes in noisy environments
- Choose the resolution, accuracy, and noise rejection needed while maximizing measurement speed
- Optimize resistance measurements to the accuracy you need

Best dc voltage accuracy: $\pm(0.008\% - 8\mu\text{V})$ for 3 V range

13-Bit High-Speed A/D

HP 44702B

Directly measures: • dc voltage • dc resistance

The HP 44702B will allow you to:

- Collect data quickly (100,000 readings/sec)
- Maximize your measurement throughput

Best dc voltage accuracy: $\pm(0.05\% - 1.88 \mu\text{V})$ for 2.56 V range

16-Bit High-Speed A/D

HP 44704A

Directly measures:

- dc voltage • Resistance • 100,000 readings/sec @ 16 bits

The HP 44704A will let you:

- Enjoy high accuracy at high speed
- Maximize your measurement throughput

Best dc voltage accuracy: $\pm(0.015\% - 340 \mu\text{V})$ for 2.56 V range

Relay Multiplexers

HP 44705A/44705H 44706A/44708A/

44708H 44717A 44718A

Directly multiplexes:

- Voltage • Resistance • Thermocouples • Strain gages
- Relay Multiplexers for the HP 3852A do the following:
 - Reduce the effects of real-world measurement errors in a multichannel system
 - Optimize thermocouple measurement accuracy
 - Measure strain accurately

Solid State Relay Multiplexers

HP 44705F/44708F

Directly multiplexes:

- Voltage
- 4-wire Ω resistance (44705F only)
- Thermocouples (44708F only)

Solid State Relay Multiplexers give you the following benefits:

- Solid state switching, free from wearout associated with electromechanical relays
- Precision measurements of real-world electrical systems
- Optimized thermocouple measurement accuracy (44708F)

FET Multiplexers

HP 44709A/44710A/44711A/44711B/44712A/

44713A 44713B 44719A/44720A

Directly multiplexes:

- Voltage • Resistance • Thermocouples • Strain gages

HP's FET Multiplexers allow you to:

- Maximize your measurement throughput
- Increase your system reliability

20-Channel Low Resistance FET Multiplexers

HP 44709A Opt H01/HP 44710A Opt H01

Directly multiplexes:

- Voltage • Resistance • Thermocouple • Strain gages

The low resistance of the FETs reduces the effects of injected current from scanning with high-speed guarded voltmeters (e.g. HP 3458A).

Anti-Noise Filter Option

HP 44713A/B Opt 003

Directly provides:

- Attenuation of 50 or 50 Hz noise
- Fast scanning; no need to average to get rid of unwanted noise
- One filter for each of the 24 channels

The anti-noise filter option allows you to:

- Scan lists quickly and accurately
- Reduce noise in a single measurement

12-Channel Isolated FET Multiplexer

with Gain of 100

HP 44713A Opt H01

Directly multiplexes: • Voltage • Thermocouple

Amplify low level signals with built-in gain of 100 to reduce offset and noise effects.

Measure voltage and temperature with common mode voltages of up to 100 V.

12-Channel Isolated FET Multiplexer

with Gain of 0.1

HP 44713A Opt H02

Measure voltages up to ± 50 V with the gain of 0.1

Measuring inputs with common mode voltages of up to 100 V.

4-Channel Track Hold with Signal Conditioning

HP 44730A

4-Channel Dynamic Strain Gage Multiplexers

HP 44732A 44733A

Directly multiplexes:

- Transient dc voltages • Dynamic strain gages
- HP's 4-Channel Track Hold and Strain Gage Multiplexers let you:
 - Enhance dynamic signal measurement accuracy
 - Set gains of 1, 10, or 100 on each channel
 - Use the analog peak detect hold feature

DATA ACQUISITION SYSTEMS

Instruments for Measurement and Control

HP 3852A

Serial Interface

HP 44789A

Directly provides:

- Serial programming port for the HP 3852A
- Control port for RS-232 or RS-422 devices

The HP 44789A Serial Interface allows you to:

- Interface your computer to the HP 3852A using RS-232 or RS-422 devices
- Locate the HP 3852A long distances from your host computer
- Control RS-232 or RS-422 devices directly from the HP 3852A
- Program the HP 3852A from a remote terminal

Specifications

Baud Rates: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, and 19200

Interrupts: Special character, buffer conditions, carrier detect, ring indicator, and receiver error conditions

Handshake: None, XON/XOFF, or hardware

Buffer Size: User-defined up to 6 KB on both transmitter and receiver

Arbitrary Waveform Digital-to-Analog Converter

HP 44726A

Directly outputs:

- Arbitrary waveforms
- dc voltages (2-channel, non-isolated)

The HP 44726A Arbitrary Waveform D/A Converter:

- Provides a stimulus voltage signal with a step rate of up to 800 kHz
- Gives you random-access memory (RAM) for each channel on this accessory

Digital-to-Analog Converter

HP 44727A/44727B/44727C

Directly outputs:

- dc voltage
- dc current

Simplify your test setup by providing test or control of devices with one data acquisition control system.

Specifications

dc Voltage:

Ranges: 0 to -10.235 V or -10.235 to +10.235 V

Resolution: 2.5 mV (12 bits plus a sign for bipolar range)

dc Current:

Ranges: 0 to -20.16 mA or -4 to +20.16 mA

Resolution: 2.5 μ A (13 bits)

3-Channel Stepper Motor Controller

HP 44714A

Directly provides:

- Stepper motor control signals
- Limit inputs
- Built-in quadrature counters
- Pulse output

The HP 44714A 3-Channel Stepper Motor Controller lets you:

- Completely control three stepper motors with one module
- Use the module as a pulse generator

8-Channel LVDT Signal Conditioner/Multiplexer

HP 44736A Opt H05

Directly provides:

- Conditioning multiplexing for up to 8 LVDTs
- Independent excitation source for each transducer
- Independent demodulation circuits for each transducer
- Fast FET multiplexer scanning of demodulator outputs
- Analog output for each demodulator at terminal block

The HP 44736A will help you:

- Simplify your data acquisition system configuration
- Reduce your cost per channel

5-Channel Counter/Totalizer

HP 44715A

Directly provides:

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| • Count measurements | • Frequency measurements |
| • Period measurements | • Interrupts |

Reduce your costs by taking advantage of this frequency counting versatility.

Digital Inputs with Totalize and Interrupt

HP 44721A/44722A

Directly provides:

- Logic readings
- Totalize count measurements
- Interrupts

Conveniently read a variety of digital values in your system.

32-Channel High-Speed Digital Sense/Control

HP 44723A

Directly provides:

- High-speed digital input and output
- Triggered input and output
- Interrupts
- Output handshaking

The HP 44723A allows you to:

- Input 16 channels or output 16 channels over 150,000 times per second
- Capture and load 16-bit patterns with external triggers
- Interrupt on any input channel on any transition or on a user-specified 16-bit pattern

16-Channel Digital Output

HP 44724A

Directly Provides Open Drain Digital Outputs

The HP 44724A gives you convenient control of dc devices or logic levels.

Open drain outputs are used to control dc devices of up to 55 V, or drive TTL logic levels. An external power supply and external pull-up resistors are required.

Switching

HP 44725A/44728A/44729A

Directly switches:

- Voltage
- Current
- Power

Reliably switch the voltage, current, or power you need.

Binary Mode Software

HP 44790A

HP 44790A Binary Mode Software is a collection of subprograms used to access high-speed opcodes within the HP 3852A. It helps system programmers increase the run-time speed of data acquisition functions up to five times over standard high-level commands. The software is written for the professional programmer familiar with opcode programming. HP systems engineers can provide consulting services for those unfamiliar with this type of programming.

System Requirements

Binary Mode Software requires HP 3852A firmware Rev. 3.5 or later. It is supplied on a 3½-in single-sided disk. The subprograms are written in HP BASIC in modular form, so they can be ported to other languages.

HP-IB Controller

HP 44788A

Directly controls:

- HP-IB disk drives (CS80/SS80)
- HP-IB printers
- HP-IB instruments

The HP-IB Controller lets you:

- Conduct remote operations without a computer
- Load subroutines at power-up into an HP 3852A from an HP-IB disk drive and start executing the subroutines
- Send data to an HP-IB disk drive without using a computer
- Print out data stored in the HP 3852A without using a computer
- Control other HP-IB instruments directly through the HP 3852A

32-Channel Isolated Digital Input/Interrupt

HP Z2204A

Directly provides:

- Logic readings
- Positive and negative interrupts
- Change of state interrupts

2 sets of three handshake lines usable for banks of 16 or 32 channels (Strobe In, Ready for Data, and Interrupt Out)

Order
To
ware.
extra
compu
Brack
garde

Data
HP 44
Series
(BASI
HP 44
4458E
HP 44
HP Ve
(BASI
HP 44
Includ
HP 44
Win t2

Mainf
HP 38
HP 44
Order
Indote
8508.a
uctis h:
or sup
condu
cards .

Exter
HP 38
functi
two l-
includ
mainf
Analc
voltag
exten
Voltr
HP 4-
HP 4-
readiu
HP 4-
expair
HP 4-
readi

Rela
HP 4-
HP 4-
Mult:
HP 4-
Mult:
HP 4-
Ther
HP 4-
Mult:
HP 4-
Mult:
HP 4-
Mult:
HP 4-
Mult:
FET
HP .
HP .
The:
HP .
HP .
use

Only

Ordering Information

To order, specify an HP 3852A system with the appropriate software, controller, mainframe, extenders, function modules, racks, and extra terminal modules. The HP 3852A itself has no cost—each component of the system is priced individually. ROM revision is in brackets []. Please contact your local sales office for ROM upgrade pricing and information.

Data Acquisition Manager

HP 44458A Data Acquisition and Control Software for Series 300/200 Computers on 3½-in and 5¼-in diskettes (BASIC 4.X, 5.X, and 6.X)

HP 44458R License to Reproduce HP 44458A or 44459B. Includes one set of software manuals.

HP 44459A Data Acquisition and Control software for HP Vectra Computers on 3½-in and 5¼-in diskettes (BASIC 5.3X)

HP 44459R License to reproduce HP 44459A/44459B. Includes one set of software manuals.

HP 44460A HP DACQ/UX Manual and Software, 3½-in tape

Mainframe

HP 3852A Data Acquisition and Control Unit

HP 44703B Mainframe Extended Memory Card—1 MB* Order extended memory cards for 2 MB and 4 MB from Infotek Systems, 1045 S. East Street, Anaheim, CA 92805-5908, as AM220B and AM244B, respectively. These products have been functionally tested, but are not warranted or supported by HP (no RFI or environmental tests were conducted). Two-year warranty and support of individual cards are provided by Infotek.

Extender Chassis

HP 3853A Extender Chassis with 10 additional slots for function modules. A 1-m extender control cable, and two 1-m (3 wires each) analog signal extender cables are included. A total of seven extenders may be added to a mainframe. Extender control cables are always needed. Analog signal extender cables are needed if analog voltages must be switched to the mainframe or another extender.

Voltmeters

HP 44701A 5½- to 3½-Digit Integrating Voltmeter

HP 44702B 13-Bit High-Speed Voltmeter (100,000 readings/sec; buffer for over 64,000 readings)

HP 44703C High Speed Extended Memory Card for expanding HP 44702A Buffer to over 64,000 readings

HP 44704A 16-Bit High-Speed Voltmeter (100,000 readings/sec; buffer for over 64,000 readings) [4.2]

Relay Multiplexers

HP 44705A 20-Channel Relay Multiplexer

HP 44705H 20-Channel High-Voltage Relay

Multiplexer

HP 44706A 60-Channel Single-Ended Relay

Multiplexer

HP 44708A 20-Channel Relay Multiplexer with Thermocouple Compensation

HP 44708H 20-Channel High-Voltage Relay

Multiplexer with Thermocouple Compensation

HP 44717A 10-Bridge 120 Ω Static Strain Gage Relay

Multiplexer [2.0]

HP 44718A 10-Bridge 350 Ω Static Strain Gage Relay

Multiplexer [2.0]

FET Multiplexers

HP 44709A 20-Channel FET Multiplexer

HP 44710A 20-Channel FET Multiplexer with Thermocouple Compensation

HP 44711A 24-Channel High-Speed FET Multiplexer

HP 44711B 24-Channel High-Speed FET Multiplexer

(use with HP 44704A)

*Up to one extended memory option may be added per mainframe.

HP 44712A 4-Channel High-Speed Single-Ended FET Multiplexer

HP 44713A 24-Channel High-Speed FET Multiplexer with Thermocouple Compensation

HP 44713B 24-Channel FET Multiplexer with Thermocouple Compensation

HP 44713A/B Opt H05 Anti-Noise Filter Option

HP 44719A 10-Bridge 120 Ω Static Strain Gage FET Multiplexer

HP 44720A 10-Bridge 350 Ω Static Strain Gage FET Multiplexer

HP 44730A 4-Channel Track/Hold Multiplexer with Signal Conditioning [3.5]

HP 44732A 4-Channel 120 Ω Dynamic Strain Gage Multiplexer [3.5]

HP 44733A 4-Channel 350 Ω Dynamic Strain Gage Multiplexer [3.5]

HP 44736A Opt H05 LVDT Sig Conditioner MUX [4.2]

Solid State Relay Multiplexer

HP 44705F 20-Channel Solid State Multiplexer

HP 44708F 20-Channel Solid State Multiplexer T/C

Analog Outputs

HP 44726A 2-Channel Arbitrary Waveform DAC [3.5]

HP 44727A 4-Channel Voltage DAC

HP 44727B 4-Channel Current DAC

HP 44727C 2-Channel Voltage; 2-Channel Current DAC

Stepper Motor Controller

HP 44714A 3-Channel Stepper Motor Controller Pulse Output [3.0]

Counter

HP 44715A 5-Channel Counter/Totalizer (200 kHz)

Digital Inputs/Outputs—Switching

HP 44721A 16-Channel Digital Input with Totalize and Interrupt

HP 44722A 8-Channel AC Digital Input with Totalize and Interrupt

HP 44723A 32-Channel High-Speed Digital Sense/Control [3.0]

HP 44724A 16-Channel Digital Output

HP 44725A 16-Channel General Purpose Switch

HP 44728A 8-Channel Relay Actuator

HP 44729A 8-Channel Power Controller

Interfaces

HP 44788A HP-IB Controller [3.5]

HP 44789A Serial Interface [4.2]

Breadboard

HP 44736A Breadboard

Service and Support Products

HP 44743F Service Kit consists of specially designed hardware and software for operationally verifying and calibrating the HP 3852A. Fixtures for testing individual plug-in modules should be ordered separately.

ANNEXE H

DIAGRAMME BLOC DU PROGRAMME DE CONTRÔLE ET D'ACQUISITION DE DONNÉES

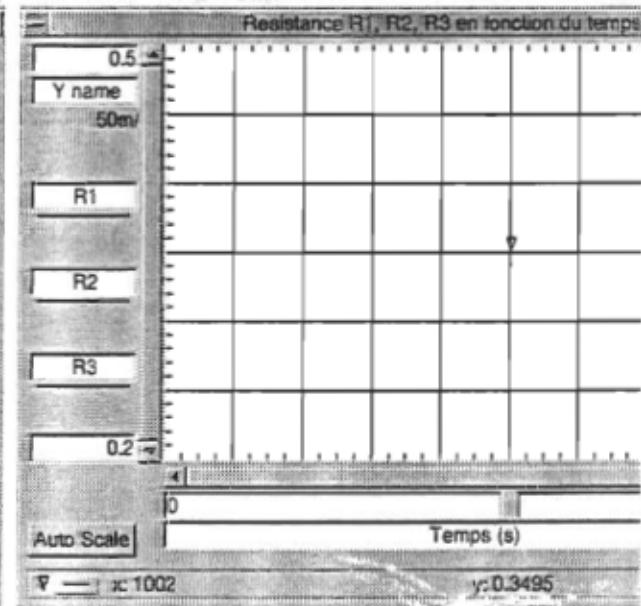
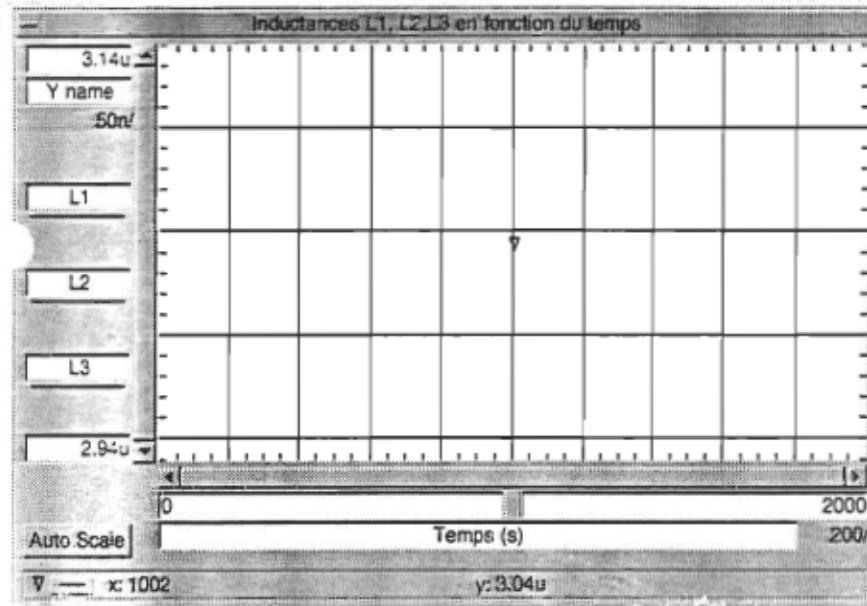
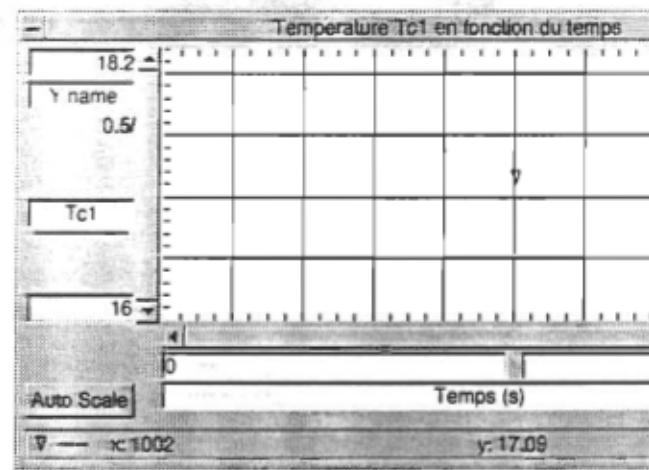
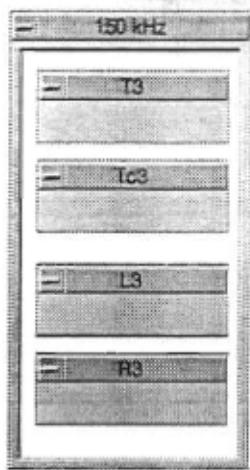
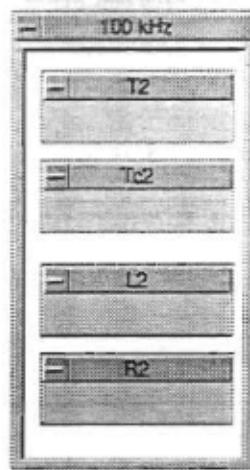
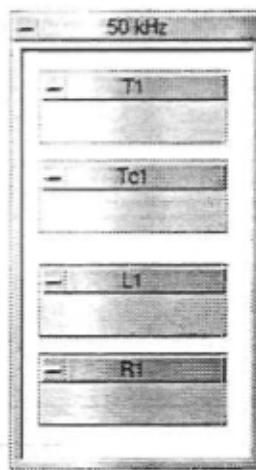
Enregistrement

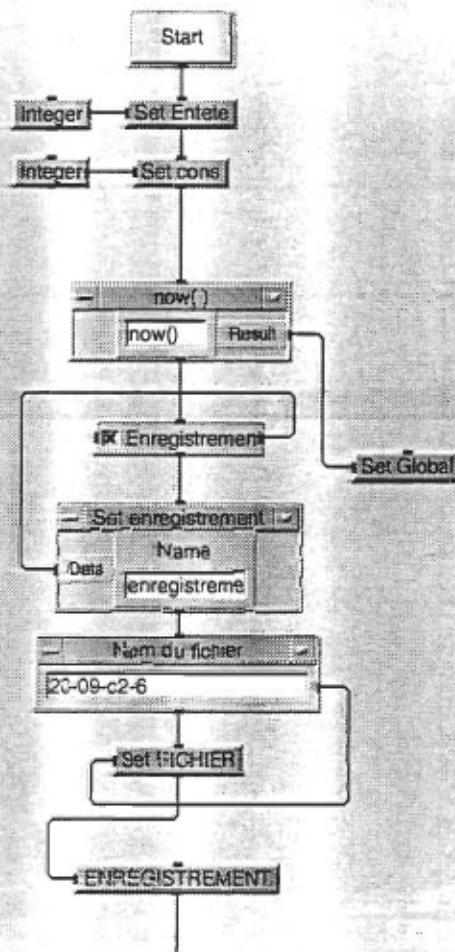
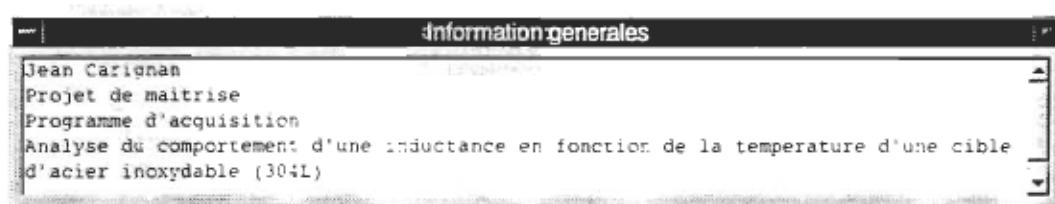
Nom du fichier	20-09-c2-6
----------------	------------

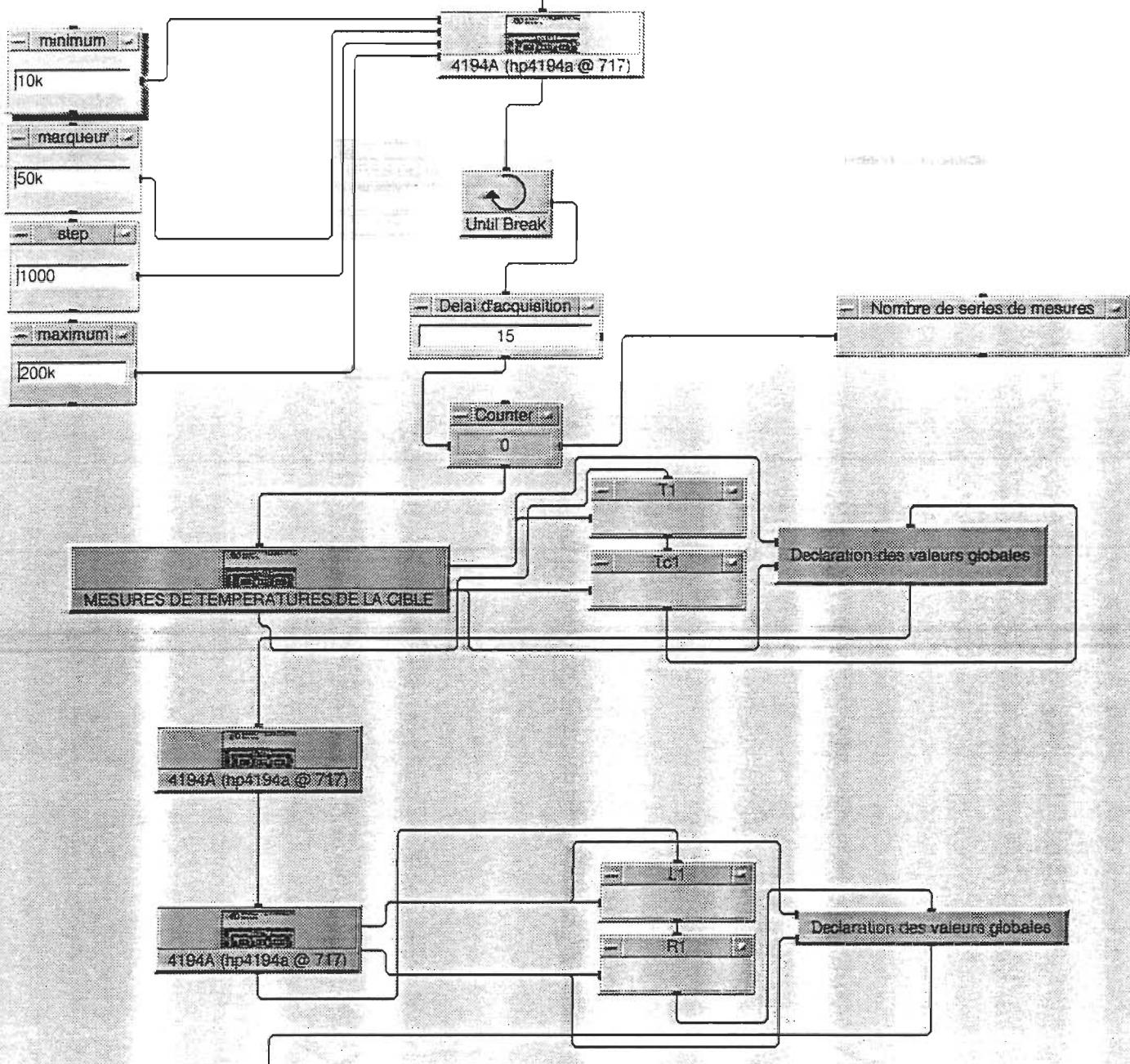
Délai d'acquisition	15
---------------------	----

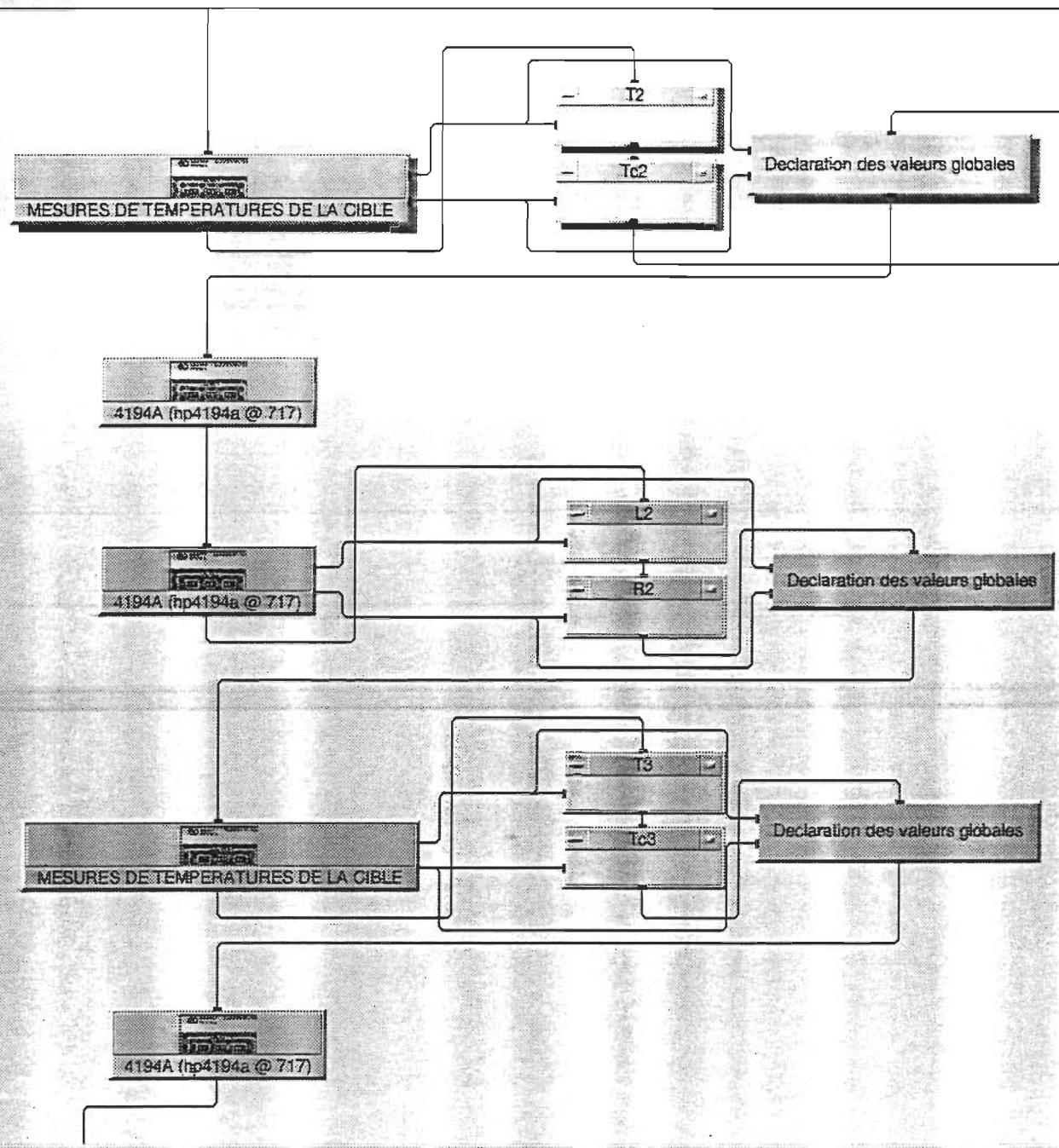
Nombre de séries de mesures	
-----------------------------	--

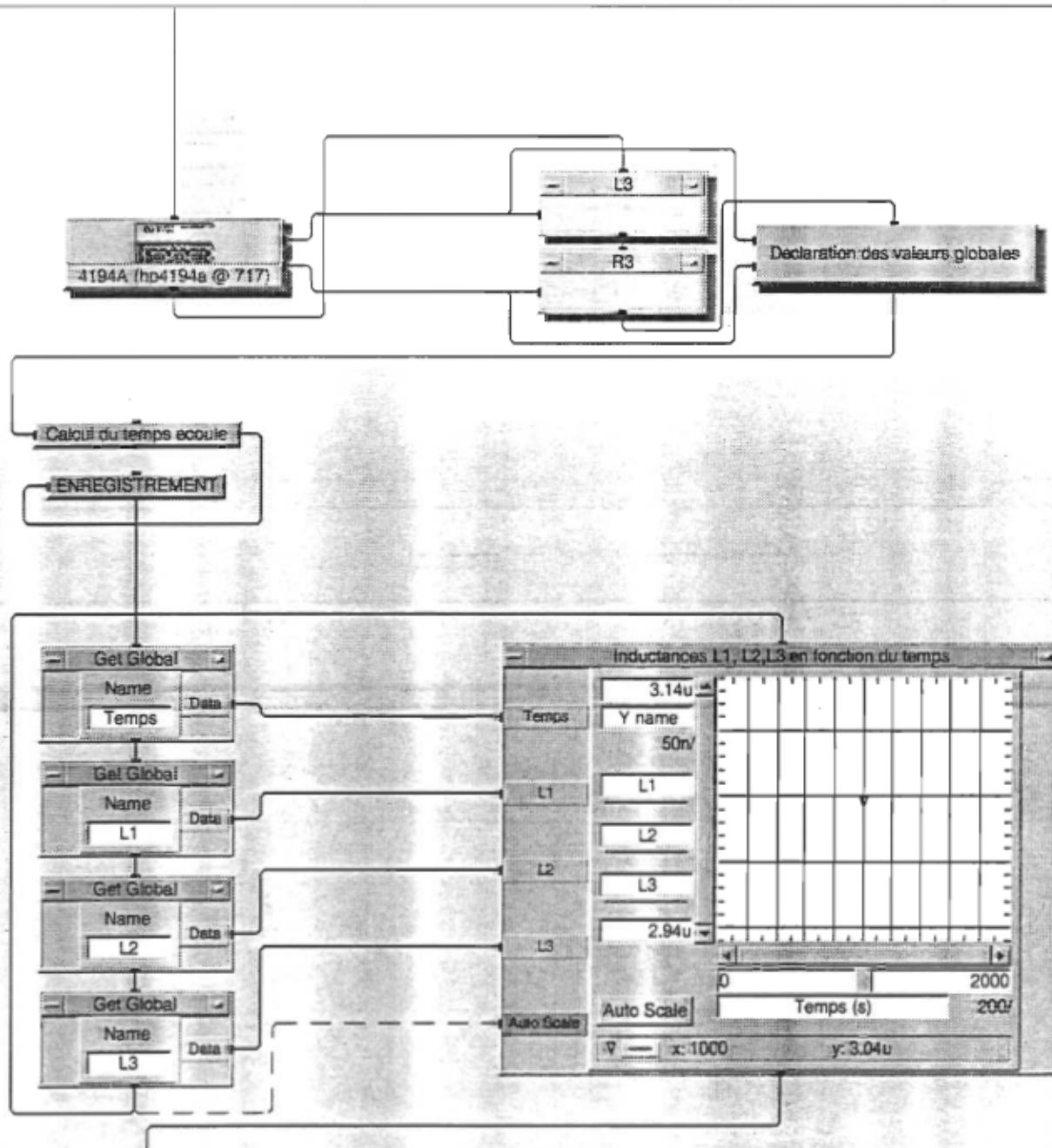
Graphiques

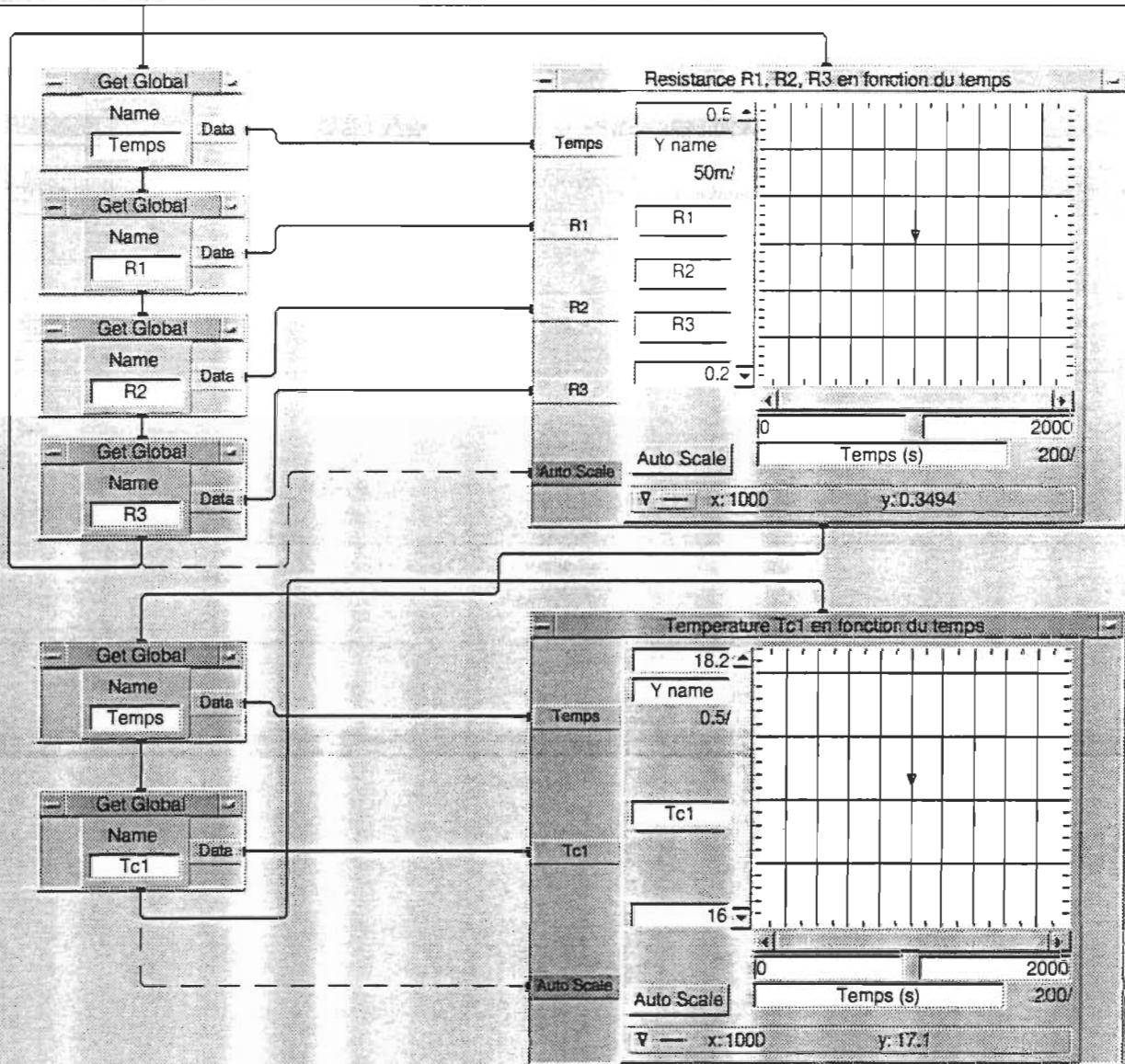












(→ commandes utilisées dans le programme)

ANNEXE I

LISTE COMPLÈTE DES COMMANDES DE L'ANALYSEUR D'IMPÉDANCE HP4194A

E-1. HP 4194A PROGRAM CODES

Note

- (1) (*) indicates a selected code as power-on default setting.
- (2) (Code=) indicates data write/read type registers.
- (3) (R) indicates Read-Only type registers.
- (4) (#) indicates battery back-up registers.

1: MENU

1-a : FUNCTION

Code	Function
<hr/>	
*FNC1	: Impedance measurement ('IMPEDANCE')
FNC2	: Gain-Phase measurement
FNC3	: Impedance measurement ('IMP with Z PROBE')
measurement function for impedance	
*IMP1	: |Z|-θ
IMP2	: R-X
IMP3	: Ls-Rs
IMP4	: Ls-Q
IMP5	: Cs-Rs
IMP6	: Cs-Q
IMP7	: Cs-D
IMP8	: |Y|-θ
IMP9	: G-B
IMP10	: Lp-G
IMP11	: Lp-Q
IMP12	: Cp-G
IMP13	: Cp-Q
IMP14	: Cp-D
IMP15	: |Z|-Ls
IMP16	: |Z|-Cs
IMP17	: |Z|-Lp
IMP18	: |Z|-Cp
IMP19	: Lp-Rp
IMP20	: Cp-Rp
measurement function for gain-phase	
*GPP1	: Tch/Rch(dB)-θ
GPP2	: Tch/Rch-θ
GPP3	: Tch/Rch(dB)-θ
GPP4	: Rch-Tch(V)
GPP5	: Rch-Tch(dBm)
GPP6	: Rch-Tch(dBV)
monitor function for impedance	
*IVM0	: Off
IVM1	: V(AC)
IVM2	: I(AC)
monitor function for gain-phase	
*GNM0	: Off
GNM1	: Rch(V)
GNM2	: Rch(dBm)
GNM3	: Rch(dBV)
GNM4	: Tch(V)
GNM5	: Tch(dBm)
GNM6	: Tch(dBV)

1-b : SWEEP

sweep parameter	
*SWP1	: Frequency
SWP2	: DC Bias (Impedance measurement Only)
SWP3	: Osc level(V)
SWP4	: Osc level(dBm) (Linear sweep Only)
SWP5	: Osc level(dBV) (Linear sweep Only)
sweep type	
*SNT1	: Linear
SNT2	: Log.
sweep direction	
*SWD1	: Up
SWD2	: Down

1-b : SWEEP(continued)

Code	Function
<hr/>	
*PPMO	: Off
PPM1	: On
o-marker to --marker sweep	
HXEXP	: Execute sweep between markers.
<hr/>	
compensation for impedance measurement	
*CMPPN1	: Interpolation mode
CMPPN2	: All points mode
ZOPEN	: Start open calibration
ZSHRT	: Start short calibration
*OPHO	: Open calibration off
OPN1	: Open calibration on
*SETO	: Short calibration off
SET1	: Short calibration on
CALY	: Start 0Ω calibration
CALSTD	: Start 50Ω (standard) calibration
*CAL0	: Standard calibration off
CAL1	: Standard calibration on
*PHS1	: Phase scale to normal mode
PHS2	: Phase scale to expansion mode
<hr/>	
compensation for gain-phase measurement	
OFSTR	: Store offset reference
*AOFO	: Data A offset off
AOF1	: Data A offset on
*BOFO	: Data B offset off
BOF1	: Data B offset on
*PHS1	: Phase scale to normal mode
PHS2	: Phase scale to expansion mode

1-d : DISPLAY

display mode	
*DSP1	: X-A/B
DSP2	: A-B
DSP3	: Table
<hr/>	
display function effective for X-A&B mode	
AUTOA	: Autoscale A
AUTOB	: Autoscale B
DPA0	: Display data A off
*DPA1	: Display data A on
DPB0	: Display data B off
*DPB1	: Display data B on
*ASC1	: Data A scale to linear
ASC2	: Data A scale to Log.
*BSC1	: Data B scale to linear
BSC2	: Data B scale to Log.
AMAX=	: Maximum value for data A scale
AMIN=	: Minimum value for data A scale
BMAX=	: Maximum value for data B scale
BMIN=	: Minimum value for data B scale
ADTV=	: Scale division for data A (Linear scale Only)
BDTV=	: Scale division for data B (Linear scale Only)
GRTO	: Graticule off
*GR1	: Graticule on
UNTO	: Unit display off
*UNT1	: Unit display on
*STRG	: Storage mode off
STRG1	: Storage mode on

1-d : DISPLAY(continued)

Code	Function
-----	-----
	display function effective for A-B mode
→ AUTO	: Autoscale A/B both
*SPAB0	: Display data A/B both off
*SPAB1	: Display data A/B both on
*ASC1	: Data A scale to Linear
ASC2	: Data A scale to Log.
*BSC1	: Data B scale to Linear
BSC2	: Data B scale to Log.
AMAX=	: Maximum value for data A scale
AMIN=	: Minimum value for data A scale
BMAX=	: Maximum value for data B scale
BMIN=	: Minimum value for data B scale
ASTV=	: Scale division for data A (Linear scale Only)
BTIV=	: Scale division for data B (Linear scale Only)
GRC0	: Graticule off
*GRC1	: Graticule on
UNIT0	: Unit display off
*UNIT1	: Unit display on
*STRG0	: Storage mode off
STRG1	: Storage mode on
	display function effective for Table mode
UNIT0	: Unit display off
*UNIT1	: Unit display on
LINE=	: Top line number (1 to 401)
	superimpose display function effective for X-AAB mode
SPSTR	: Store superimpose data
*SPAO	: Superimpose data A off
SPA1	: Superimpose data A on
*SPBO	: Superimpose data B off
SPB1	: Superimpose data B on
*LMSPO	: Limit-superimpose off
LMSPI	: Limit-superimpose on
	superimpose display function effective for A-B mode
SPSTR	: Store superimpose data
*SPAB0	: Superimpose data A/B both off
SPAB1	: Superimpose data A/B both on

1-e : MKR/LCURS

Code	Function
-----	-----
	Marker/line cursor function effective for X-AAB mode
MCT0	: Marker/Lcursor off
*MCT1	: o-marker on
MCT2	: o-marker and --marker both on
MCT3	: Lcursor on
MCT4	: o-marker/Lcursor both on
MCT5	: o-marker and --marker both on
MCR=	: o-marker setting on X-axis position
MOCOA	: o-marker to maximum point of data A
MOCOA	: o-marker to minimum point of data A
MOCOB	: o-marker to maximum point of data B
MOCOB	: o-marker to minimum point of data B
LCYRS=	: Lcursor setting on Y-axis
DLCYRS=	: Difference value between o-marker and lcursor on Y-axis
*CTRL1	: Lcursor for data A
CTRL2	: Lcursor for data B
CRAY	: Lcursor to average point of data
REFRD	: Read o-marker position
WIDTH	: Read difference value of LCYRSR and DLCYSL
SMCR=	: --marker setting on X-axis
SRSR	: Store sweep range
*SWRO	: Partial sweep range off
SWRL	: Partial sweep range on
*ANAD	: Partial analysis range off
ANAL	: Partial analysis range on
ARSTR	: Store analysis range
DRGR=	: Difference value between o-marker and --marker on X-axis.
	Marker/lcursor function effective for A-B and Table modes
MCT0	: Marker/Lcursor both off
*MCT1	: o-marker on
MCT5	: o-marker and --marker both on
MCR=	: o-marker setting on X-axis
MOCOA	: o-marker to maximum point of data A
MOCOA	: o-marker to minimum point of data A
MOCOB	: o-marker to maximum point of data A
MOCOB	: o-marker to minimum point of data B
SMCR=	: --marker setting on X-axis
SRSR	: Store sweep range
*SWRO	: Partial sweep range off
SWRL	: Partial sweep range on
ARSTR	: Store analysis range
*ANAD	: Partial analysis range off
ANAL	: Partial analysis range on

1-f : MORE MENUS

Code	Function
-----	-----
	BASIC program commands for ASP
EDIT	: EDIT-->(line number 1 to 32767)
CAT	: Catalog
LOAD	: LOAD-->(file number 1 to 999)
STORE	: STORE-->(file number 1 to 999), "comment"
PURGE	: PURGE-->(file number 1 to 999)
SCRATCH	: SCRATCH working areas
RUN	: RUN
PSTOP	: STOP
PPAUSE	: PAUSE
CONT	: CONTINUE
PSTEP	: STEP
QUIT	: QUIT editor
	BASIC program statements for ASP
IF	:
THEN	:
FOR	:
DO	:
NEXT	:
GOTO	:
GOSUB	:
RETURN	:
INPUT	:
OUTPUT	:
WAIT	:
PAUSE	:
BEEP	:
DISP	:
END	:
SEND	:
	HP-IB definition
*ADRS=	: HP-IB address(0 to 10)
	copy function
COPY	: Execute copy(plot/print/dump)
CPYH1	: Plot
CPYH2	: Print
*CPYHD	: Dump
*PSCALE	: Plot scale(left,bottom,right,top)
*SCLP1	: Set plot scale(P1,P2) to normal
SCLP2	: Set plot scale(P1,P2) to graticule base
*PLTF1	: Plot (all)
PLTF2	: Plot (graticule/data both)
PLTF3	: Plot (data only)
SENDPS	: Send plot scale(P1,P2) to plotter
	self test
STSET	: Set up self test page
STN=	: Set self test number
STSTR	: Start self test
STSTP	: Stop self test
STEND	: End self test page
	equivalent circuit
ECDSP	: Display equivalent circuit page
*ECC1	: Select equivalent circuit to A
ECC2	: Select B
ECC3	: Select C
ECC4	: Select D
ECC5	: Select E
ECCAL	: Calculate equivalent circuit parameters
EQVR=	: Equivalent circuit parameter R(G)
EQVL=	: Equivalent circuit parameter L(H)
EQVCA=	: Equivalent circuit parameter Ca(F)
EQVCB=	: Equivalent circuit parameter Cb(F)
FCRHS	: Simulate frequency characteristics
	set programmed point table
PTSET	: Set programmed points table page
PTN=	: Programmed points table number(1 to 16)
PTCLR	: Clear programmed points table
PTSWP1	: Sweep parameter to Frequency
PTSWP2	: Sweep parameter to DC bias
PTSWP3	: Sweep parameter to Osc level(V)
PTSWP4	: Sweep parameter to Osc level(dBm)
PTSWP5	: Sweep parameter to Osc level(dBV)
*LMF1	: Limit for data A
LMF2	: Limit for data B
POINT=	: Programmed point(point.minimum,maximum)
PTSET	: Set programmed points table
PTEND	: End programmed points table set-up

2: SWEEP

Code	Function
*SWM1	: Sweep mode to Repeat
SWM2	: Sweep mode to Single
SWM3	: Sweep mode to Manual point mode
MANUAL	: Manual point Hz/V/dBm/dBV
SWTRG	: Sweep start trigger

3: TRIGGER

*TRGM1	: Internal trigger mode
TRGM2	: Ext/Manual trigger mode
TRIG	: Measurement trigger for External mode.

4: INTEG TIME

*ITIM1	: Integration time to Short (50usec.)
ITIM2	: Integration time to Medium (1msec.)
ITIM3	: Integration time to Long (100msec.)

5: AVERAGING

NOA=	: Averaging number (1,2,4,8,16,32,64,128 or 256)
------	--

6: PARAMETER

START=	: Hz/V/dBm/dBV
STOP=	: Hz/V/dBm/dBV
STEP=	: Hz/V/dBm/dBV
CENTER=	: Hz/V/dBm/dBV
SPAN=	: Hz/V/dBm/dBV
NOP=	: Number of measurement points (2 to 401)
FREQ=	: Spot frequency(Hz)
BIAS=	: Spot bias voltage(V)
OSC=	: Spot osc level(V/dBm/dBV)
SAVE	: Save measurement state(0 to 4)
GEE	: Get(recall) measurement state
DTIME=	: Delay time (0 to 1 hour in msec.)
DYRED=	: Delay aperture(0.50 to 100.00%)
DCOFF	: DC bias off
CMT	: Input comment on display data

7: MEASUREMENT UNIT

*PWS1	: Power splitter to DUAL mode
PWS2	: Power splitter to SINGLE mode
*ATR1	: Reference channel attenuation to 0dB
ATR2	: Reference channel attenuation to 20dB
ARI	: Reference channel input impedance to 1MΩ
*TIR1	: Reference channel input impedance to 50Ω
*ATT1	: Test channel attenuation to 0dB
ATT2	: Test channel attenuation to 20dB
SIZ1	: test channel input impedance to 1MΩ
*SIZ2	: Test channel input impedance to 50Ω

8: OTHERS

Code	Function
RST	: Reset the instrument

Note

The RST command resets the instrument to the power-on default conditions except for the following settings.

1. Sweep mode is set to the Single sweep mode (code : SWM2) and the traces on the screen will be erased.
2. Data registers(A ~ D), general purpose registers (RA ~ RL), all registers for compensation, Rn, I, and all read-only type registers are not reset.
3. Program WCRs AREA is not cleared.

local maximum

LMX(A)	: Move the o-marker to the first peak position within the specified range.
LMX(B)	: Move the --marker to the last peak position within the specified range.

local minimum

LMN(A)	: Move the o-marker to the first valley position within the specified range.
LMN(B)	: Move the --marker to the last valley position within the specified range.

Note

1. LMN(A) or LMN(B) is used in connection with the array variables except for X register.
Example , LMNA LMNB LMCA(LMX(A)), LMCB(LMX(B))
2. Select the "Double Marker Mode" (Code : MCFS)
3. When only a peak or valley exists within the specified range, the o-marker moves to maximum or minimum point and --marker moves to Sweep Start point.
When no peak or valley exists, the o-marker moves to Sweep Start point and --marker moves to Sweep Stop point.

array variables

A=	: Register for display data A
B=	: Register for display data B
C=	: Register for superimpose data A
D=	: Register for superimpose data B
DE=	: General purpose register
EF=	: General purpose register
FG=	: General purpose register
HR=	: General purpose register
FI=	: General purpose register
FJ=	: General purpose register
RA=	: General purpose register
RB=	: General purpose register
RC=	: General purpose register
RD=	: General purpose register
RE=	: General purpose register
RF=	: General purpose register
RG=	: General purpose register
RH=	: General purpose register
RI=	: General purpose register
RJ=	: General purpose register
RK=	: General purpose register
RL=	: General purpose register

OFFSTA=	: Register to save offset data for display A
OFFSTB=	: Register to save offset data for display B
OG=	: Register to store OPEN offset data in G value
OB=	: Register to store OPEN offset data in B value
SR=	: Register to store SHORT offset data in R value
SX=	: Register to store SHORT offset data in X value
TYG=	: Register to store OS calibration data in G value
TYB=	: Register to store OS calibration data in B value
HYG=	: Register to store OS calibration data in G value
HYB=	: Register to store OS calibration data in B value
TIR=	: Register to store OL calibration data in R value
TXN=	: Register to store OL calibration data in X value
HIR=	: Register to store OL calibration data in R value
HIX=	: Register to store OL calibration data in X value
TSDR=	: Register to store 50Ω calibration data in R value
TSDX=	: Register to store 50Ω calibration data in X value
MSTD=	: Register to store 50Ω calibration data in R value
MSTDX=	: Register to store 50Ω calibration data in X value
X	: Register to store each point of sweep parameter

single variables

Rn=	: General purpose register Rn(n=1 to 99)
I=	: Register for "Keyboard Input Line" block
MON	: Register to store monitor data
GONG	: GO/NO-GO result(I=GO,0=NOGO)
MXRA	: o-marker reading value on Y-axis for data A
MXRB	: o-marker reading value on Y-axis for data B
SHRA	: --marker reading value on Y-axis for data A
SHRB	: --marker reading value on Y-axis for data B
DMXRA	: Difference value between o-marker and --marker on Y-axis for data A
DMXRB	: Difference value between o-marker and --marker on Y-axis for data B
LCURSL	: Line cursor left reading value
LCURSR	: Line cursor right reading value
WID	: Difference value between LCURSR and LCURSL

masking status byte

RGS(0)	: Mask the status byte(RGS0 means all masked)
--------	---

data transfer format

*FMT1	: Data format ASCII mode
FMT1	: Data format Binary 64 bit
FMT2	: Data format Binary 12 bit

ASP programming via HP-IB

PROG	: Create ASP program via HP-IB
------	--------------------------------

E-2. Program Codes in alphabetical order

(See the designated location in " E-1. HP 4194A Program Codes " for complete description.)

Code	Location	Code	Location	Code	Location	Code	Location
A	{ 8 }	EQDSP	(1-f)	OFSTA	{ 8 }	SPAB	(1-d)
ADIV	(1-d)	EQVCA	(1-f)	OFSTB	{ 8 }	SPAN	{ 6 }
ADRS	(1-f)	EQVCB	(1-f)	OFSTR	(1-c)	SPBS	(1-d)
ANAX	(1-d)	EQVL	(1-f)	OG	{ 8 }	SPSTR	(1-d)
AMIN	(1-d)	EQVR	(1-f)	OPN	(1-c)	SR	{ 8 }
ANA	(1-e)	F	{ 8 }	OSC	{ 6 }	SRSTR	(1-e)
AOF	(1-c)	FCHERS	(1-f)	PMS	(1-c)	START	{ 6 }
ARSTR	(1-e)	FMT	{ 8 }	PLTT	(1-f)	STEND	(1-f)
ASC	(1-d)	FNC	{ 1-a }	POINT	(1-f)	STEP	{ 6 }
ATR	{ 7 }	FREQ	{ 6 }	PPAUSE	(1-f)	STH	(1-f)
ATT	{ 7 }	G	{ 8 }	PPM	(1-b)	STOP	{ 6 }
AUTO	(1-d)	GET	{ 6 }	PROG	{ 8 }	STORE	(1-f)
AUTOA	(1-d)	GNM	{ 1-a }	PSCALE	(1-f)	STRG	(1-d)
AUTOB	(1-d)	GONG	{ 8 }	PSTEP	(1-f)	STSET	(1-f)
B	{ 8 }	GPP	{ 1-a }	PSTOP	(1-f)	STSTP	(1-f)
BDIV	(1-d)	GRT	(1-d)	PTCLR	(1-f)	STSTR	(1-f)
BIAS	{ 6 }	H	{ 8 }	PTEND	(1-f)	SND	{ 1-b }
BMAX	(1-d)	I	{ 8 }	PTN	(1-f)	SWM	{ 2 }
BMIN	(1-d)	IMP	{ 1-a }	PTSET	(1-f)	SWP	(1-b)
BOF	(1-c)	ITM	{ 4 }	PTSR1	(1-f)	SWR	{ 1-e }
BSC	(1-d)	IVM	{ 1-a }	PTSWP	(1-f)	SWT	(1-b)
C	{ 8 }	J	{ 8 }	PURGE	(1-f)	SWTRG	{ 2 }
CAL	(1-c)	LCURS	{ 1-a }	PWS	{ 7 }	SX	{ 8 }
CALSTD	(1-c)	LCURSL	{ 8 }	QUIT	(1-f)	TRGM	{ 3 }
CALY	(1-c)	LCURSR	{ 8 }	RA	{ 8 }	TRIG	{ 3 }
CALZ	(1-c)	LINE	(1-d)	RB	{ 8 }	TSTDR	{ 8 }
CAT	(1-f)	LMF	(1-f)	RC	{ 8 }	TSTDX	{ 8 }
CENTER	{ 6 }	LNN	{ 8 }	RD	{ 8 }	TYB	{ 8 }
CNT	{ 6 }	LMSP	(1-f)	RE	{ 8 }	TYG	{ 8 }
CSPN	(1-c)	LMX	{ 8 }	REFRD	(1-e)	ZIR	{ 8 }
CONT	(1-f)	LOAD	(1-f)	RF	{ 8 }	ZIX	{ 8 }
COPY	(1-f)	MANUAL	{ 2 }	RG	{ 8 }	UNTT	(1-d)
CPYM	(1-f)	MCF	{ 1-e }	RH	{ 8 }	WID	{ 8 }
CRAY	(1-e)	MKEXP	(1-b)	RI	{ 8 }	WIDTH	{ 1-e }
CUR	(1-e)	MKMA	{ 1-e }	RJ	{ 8 }	X	{ 8 }
D	{ 8 }	MKMB	{ 1-e }	RK	{ 8 }	ZIR	{ 7 }
DCOFF	{ 6 }	MKMA	{ 1-e }	RL	{ 8 }	ZIT	{ 7 }
DFREQ	{ 6 }	MKMB	{ 1-e }	RN	{ 8 }	ZISRT	(1-c)
DLCRS	(1-e)	MKR	{ 1-e }	RQS	{ 8 }	ZOPEN	(1-c)
DMKR	(1-e)	MKRA	{ 8 }	RST	{ 8 }	Z	{ 8 }
DMKRA	{ 8 }	MKRB	{ 8 }	RUN	(1-f)		
DMKRS	{ 8 }	MKN	{ 8 }	SAVE	{ 6 }		
DPA	(1-d)	MSTD	{ 8 }	SCLP	(1-f)		
DPAB	(1-d)	MSTDX	{ 8 }	SCRATCH	(1-f)		
DPB	(1-d)	MYB	{ 8 }	SEND	(1-f)		
DSP	(1-d)	MYC	{ 8 }	SENDPS	(1-f)		
DTIME	{ 6 }	MZR	{ 8 }	SHT	(1-c)		
E	{ 8 }	MZX	{ 8 }	SMGR	{ 1-e }		
EDIT	(1-f)	NOA	{ 5 }	SMKRA	{ 8 }		
EQC	(1-f)	NOP	{ 6 }	SMKRB	{ 8 }		
EQCAL	(1-f)	OB	{ 8 }	SPA	(1-d)		

E-3. HP 4194A ASCII Character Codes

(The HP 4194A unique codes are (*)marked on decimal number)

Character	Dec	Character	Dec	Character	Dec	Character	Dec
'	0	SPACE	32	'	64	,	96
a (alpha)	*1	:	33	A	65	a	97
g (beta)	*2	*	34	B	66	b	98
w (omega)	*3	#	35	C	67	c	99
	4	\$	36	D	68	d	100
	5	%	37	E	69	e	101
	6	&	38	F	70	f	102
	7	,	39	G	71	g	103
	8	(	40	H	72	h	104
	9	)	41	I	73	i	105
LF	10	*	42	J	74	j	106
	11	+	43	K	75	k	107
	12	,	44	L	76	l	108
CR	13	=	45	M	77	m	109
	14	.	46	N	78	n	110
z (ohm)	*15	/	47	O	79	o	111
: (bar)	*16	0	48	P	80	p	112
: (bar)	*17	1	49	Q	81	q	113
	18	2	50	R	82	r	114
- (arrow)	*19	3	51	S	83	s	115
- (arrow)	*20	4	52	T	84	t	116
- (arrow)	*21	5	53	U	85	u	117
- (pi)	*22	6	54	V	86	v	118
- (delta)	*23	7	55	W	87	w	119
- (mu)	*24	8	56	X	88	x	120
- (degree)	*25	9	57	Y	89	y	121
- (phi)	*26	:	58	Z	90	z	122
- (gamma)	*27	:	59	^	91	(	123
- (theta)	*28	<	60	\	92	)	124
- (tau)	*29	=	61	*	93	)	125
- (lambda)	*30	>	62	-	94	- (tau)	*126
- (lambda)	*31	?	63	-	95	- (circle)	*127

E-4. SUFFIX

Prefix:	M (mega) =E+06	Engineering Units:	Hz
K (kilo)	=E+03		kHz
M (milli)=E-03			MHz
U (micro)=E-06			V
N (nano)=E-09			dBV
P (pico)=E-12			DEM

E-5. STATUS BYTE

MSB	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	LSB	B0

B7 : always 0
 B6 : RQS
 B5 : Error (Hardware trips)
 B4 : Ignore trigger
 B3 : End status
 B2 : always 0
 B1 : Sweep complete
 B0 : Measurement complete

E-6. REGISTER SETTING RANGE

Register Name	Value
A,B,C,D,E,F,G,H,I,J RA,RB,RC,RD,RE,RF,RG,RR,RI,RJ,RR,RL OFSTA,OFSTB,OG,OB,SR,SX TIG,TTB,TZR,TAX,TSTDTR,TSTDOK MVG,MVB,MVR,MSTDR,MSTDOK LCDRS,DLCDRS EQVR,EQVL,EQVCA,EQVBC	: 1E-37 ~ + 9.99999E+37 Res. 6 digits mantissa
Rn,Z	: 1E-37 ~ + 9.99999E+37 Res. 12 digits mantissa
AMAX,AMIN,ADIV BMAX,BMIN,BDIV	: 1E-37 ~ + 9.999E-37 Res. 4 digits mantissa

IMPEDANCE MEASUREMENT ('IMPEDANCE' mode) :

Register Name	Mode	Value
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR FREQ	Frequency	Min. 100.000 Hz Max. 40 000 000.000 Hz *1 15 000 000.000 Hz *2 Res. 0.001 Hz
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR OSC	OSC Level	Min. 10.0 mV *3 Max. 1.00 V *3 Min. 10.0 mV *4 Max. 0.50 V *4 Res. 1 % Span 26.0 dB
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR BIAS	DC Bias	Min. -40.00 V Max. -40.00 V Res. 0.01 V

*1: Cable Length= 0 m *2: Cable Length= 1 m

*3: Frequency range 100 Hz to 10 MHz (10 MHz inclusive)

*4: Frequency range 10 MHz to 40 MHz

IMPEDANCE MEASUREMENT ('IMP with Z PROBE' mode) :

Register Name	Mode	Value
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR FREQ	Frequency	Min. 10.000 Hz Max. 100 000 000.000 Hz Res. 0.001 Hz
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR OSC	OSC Level	Min. -65.0 dBm Max. -15.0 dBm Res. 0.1 dB Span 26.0 dB
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR BIAS	DC Bias	Min. -40.00 V Max. -40.00 V Res. 0.01 V

GAIN-PHASE MEASUREMENT ('GAIN PHASE' mode) :

Register Name	Mode	Value
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR FREQ	Frequency	Min. 10.000 Hz Max. 100 000 000.000 Hz Res. 0.001 Hz
START,STOP,STEP CENTER,SPAN MANUAL,MKR,SMKR,DMKR OSC	OSC Level	Min. -65.0 dBm Max. -15.0 dBm Res. 0.1 dB Span 26.0 dB

E-7. DEFAULT PARAMETER VALUES

SWEET RANGE :

IMPEDANCE MEASUREMENT ('IMPEDANCE' mode)

Register Name	Frequency(HZ)	DC Bias(V)	OSC(mV)	OSC(dBm)	OSC(dBV)
START	100.000	0.00	10.0	-26.0	-39.0
STOP	*40 000 000.000	0.00	110.0	0.0	-13.0
STEP	*15 000 000.000				
	99 999.750	0.10	1.0	0.2	0.2
NOP	401	101	101	131	131

* 40 MHZ (Cable Length= 0 m) 15 MHZ (Cable Length= 1 m)

IMPEDANCE MEASUREMENT ('IMP with Z PROBE' mode)

Register Name	Frequency(HZ)	DC Bias(V)	OSC(mV)	OSC(dBm)	OSC(dBV)
START	10 000.000	0.00	10.0	-26.0	-39.0
STOP	100 000 000.000	0.00	110.0	0.0	-13.0
STEP	249 975.000	0.10	1.0	0.2	0.2
NOP	401	101	101	131	131

GAIN-PHASE MEASUREMENT ('GAIN-PHASE' mode)

Register Name	Frequency(HZ)	OSC(mV)	OSC(dBm)	OSC(dBV)
START	10.000	10.0	-26.0	-39.0
STOP	100 000 000.000	110.0	0.0	-13.0
STEP	249 999.975	1.0	0.2	0.2
NOP	401	101	131	131

Note

(1) CENTER & SPAN can be defined as :

$$\begin{aligned} \text{CENTER} &= (\text{START} + \text{STOP})/2 \\ \text{SPAN} &= (\text{STOP} - \text{START}) \end{aligned}$$

(2) Relationship between STEP & NOP

$$\text{STEP} = \frac{1}{(\text{NOP} - 1)} (\text{STOP} - \text{START})$$

STEP value is rounded to its designated resolution.

$$\text{NOP} = \frac{(\text{STOP} - \text{START})}{\text{STEP}} + 1$$

NOP is rounded to an integer value.

SPOT PARAMETER :

Register Name	'IMPEDANCE' mode	'GAIN-PHASE' mode	'IMP with Z PROBE' mode
FREQ	100 000.000 Hz	100 000.000 Hz	10 000 000.000 Hz
BLAS	0.00 V	0.00 V	0.00 V
OSC	500 mV	0.0 dBm	500 mV

OTHER PARAMETERS :

Register Name	Default Value
NOA	1
NOP	401
DFREQ	0.50 %
DTIME	0 msec

ANNEXE J
RÉSULTATS DES ESSAIS À 50 KHZ

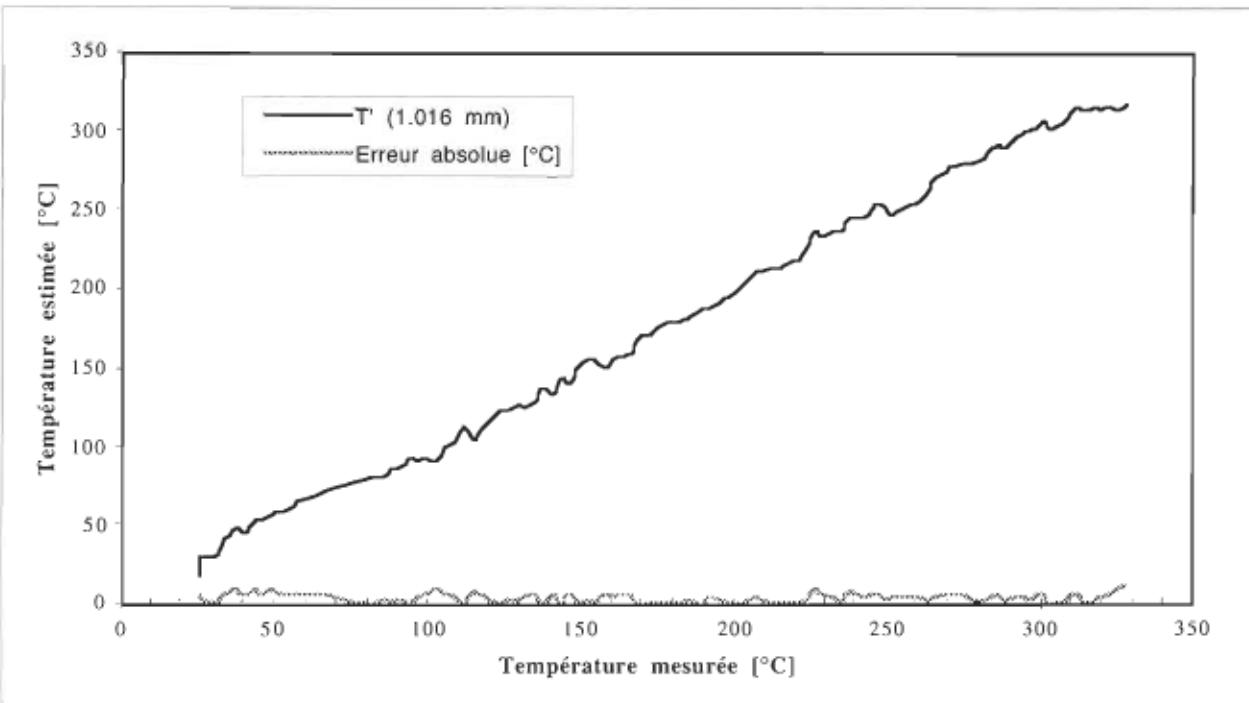


Figure J.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 50 kHz.

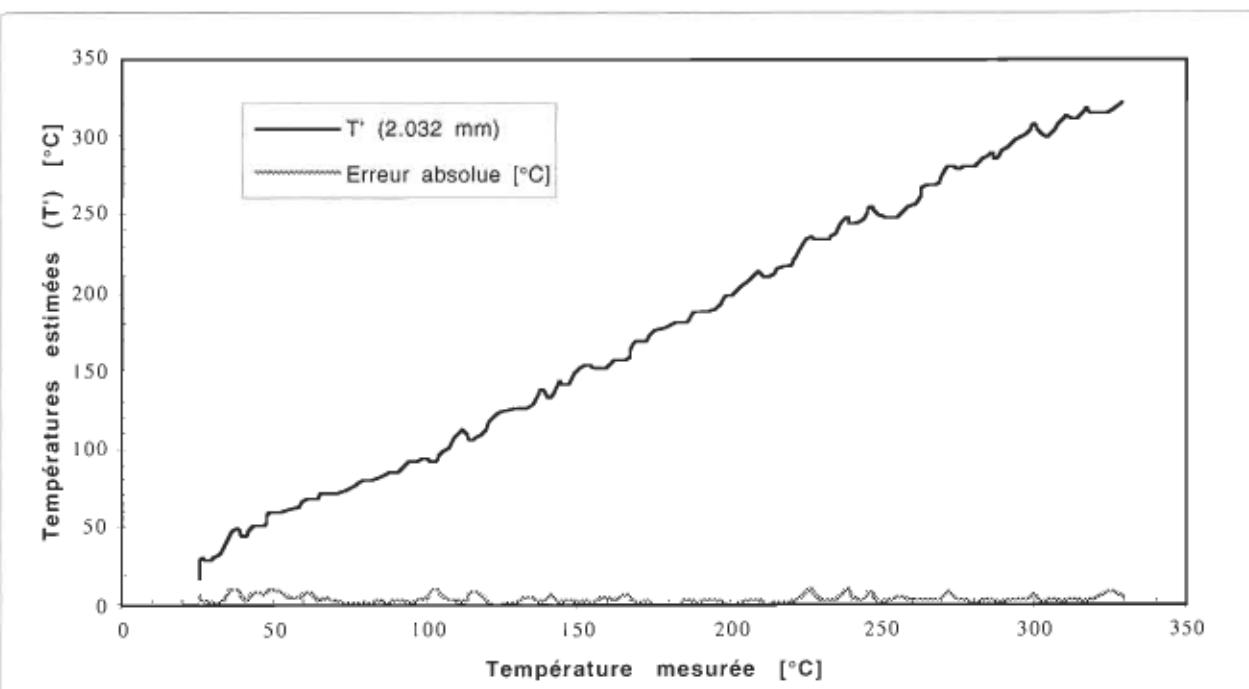


Figure J.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 50 kHz.

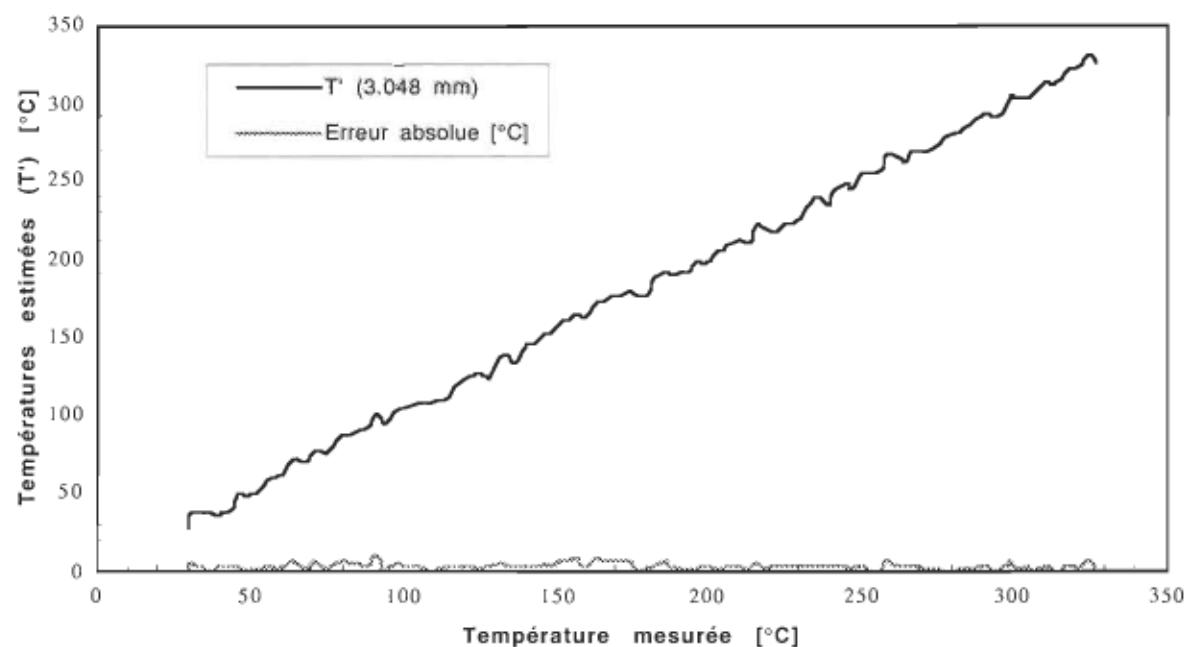


Figure J.3 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 3.048 mm à une fréquence de 50 kHz.

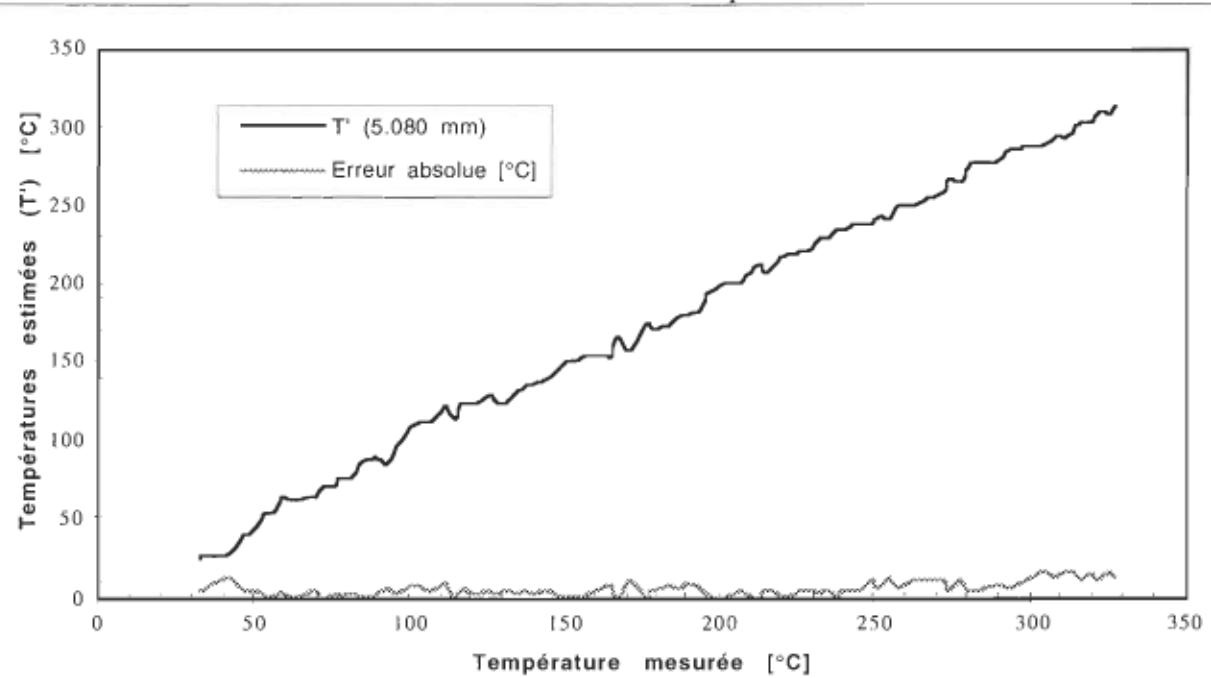


Figure J.4 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 5.080 mm à une fréquence de 50 kHz.

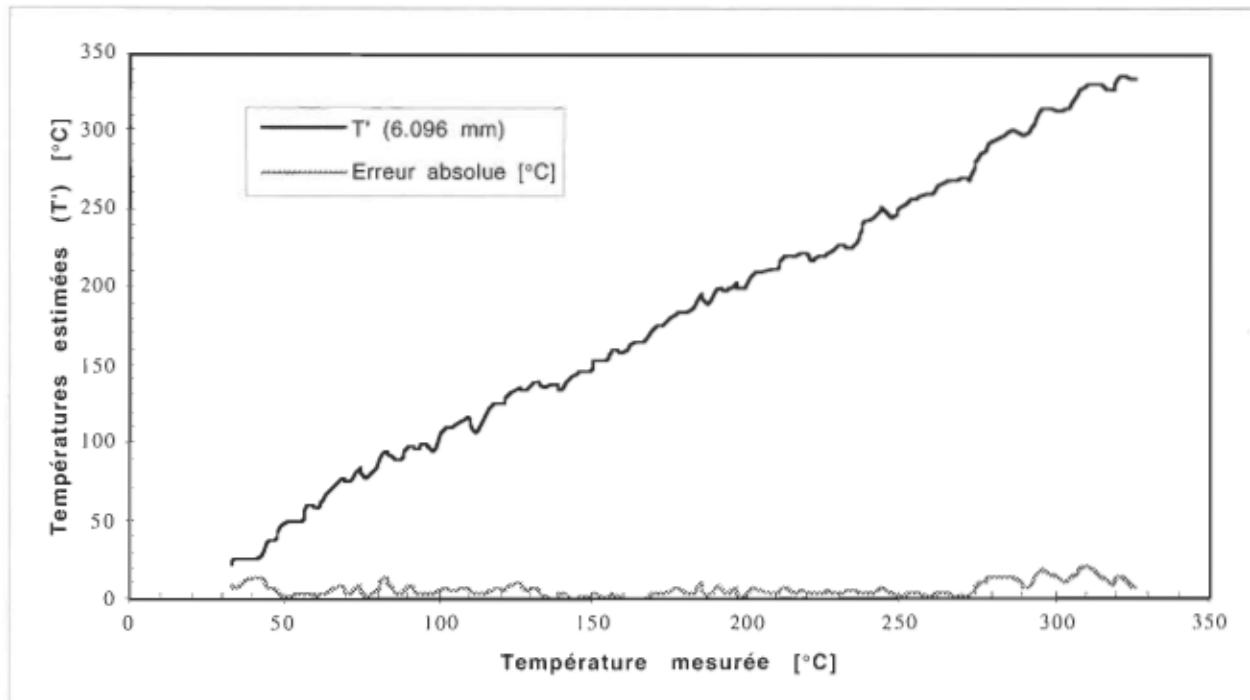


Figure J.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 50 kHz.

ANNEXE K
RÉSULTATS DES ESSAIS À 100 KHZ

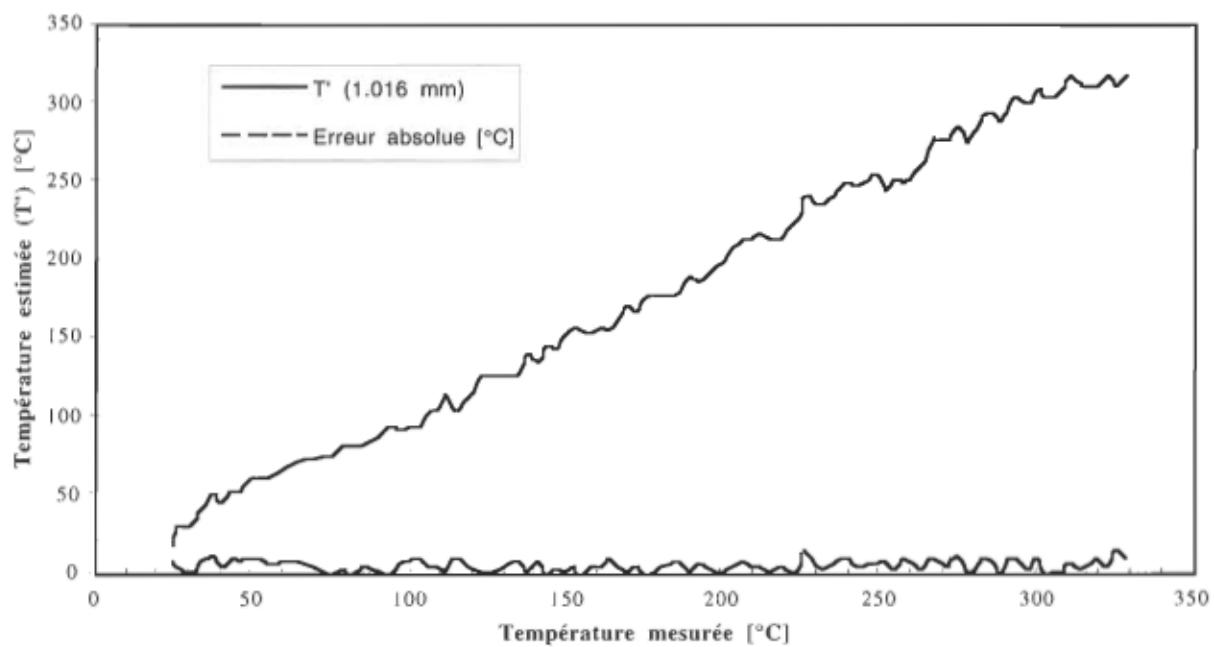


Figure K.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 100 kHz.

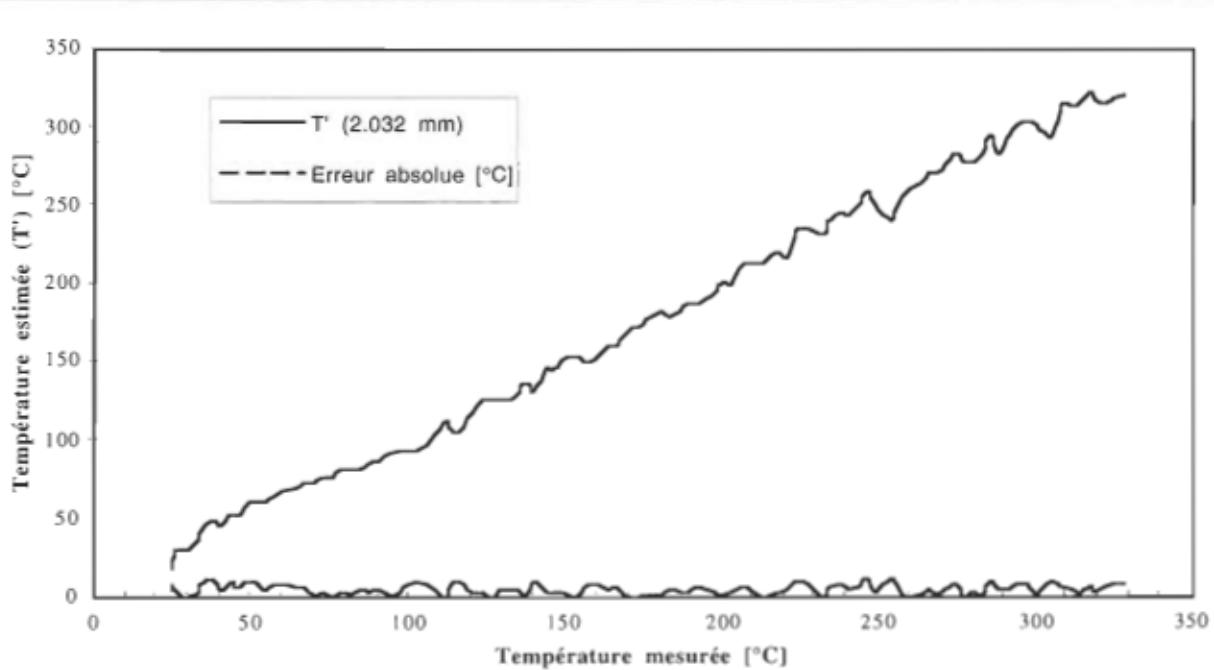


Figure K.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 100 kHz.

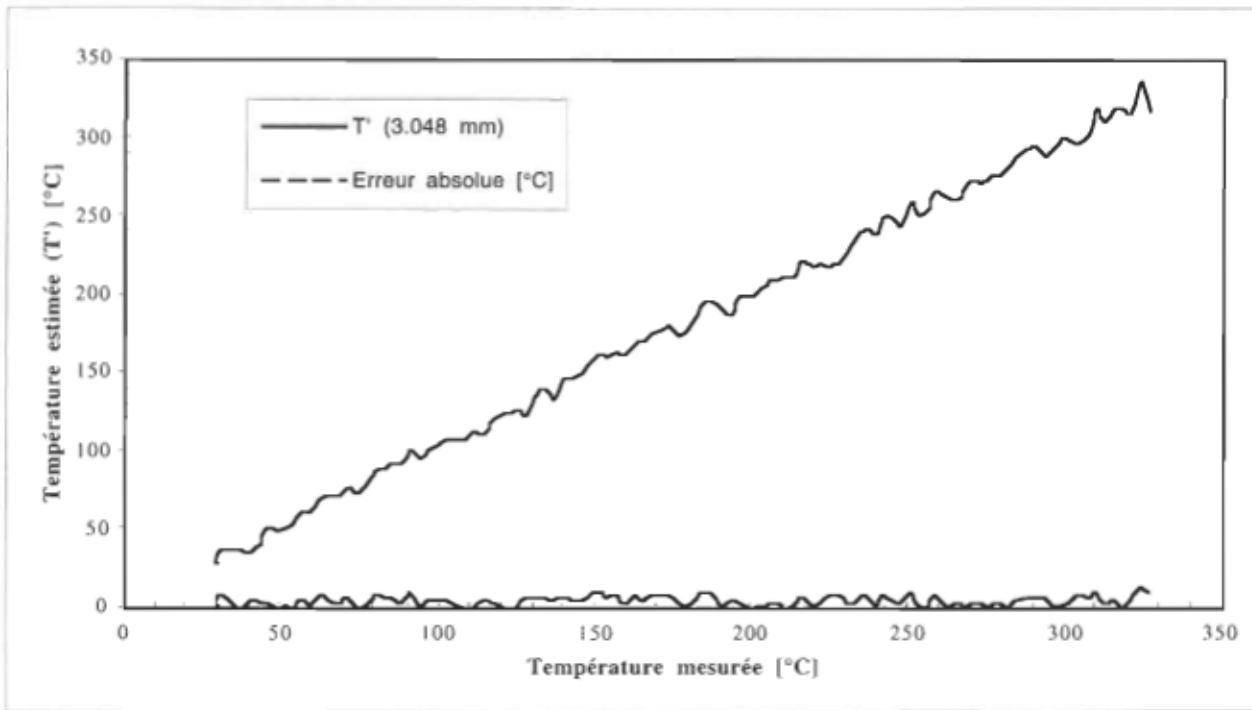


Figure K.3 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 3.048 mm à une fréquence de 100 kHz.

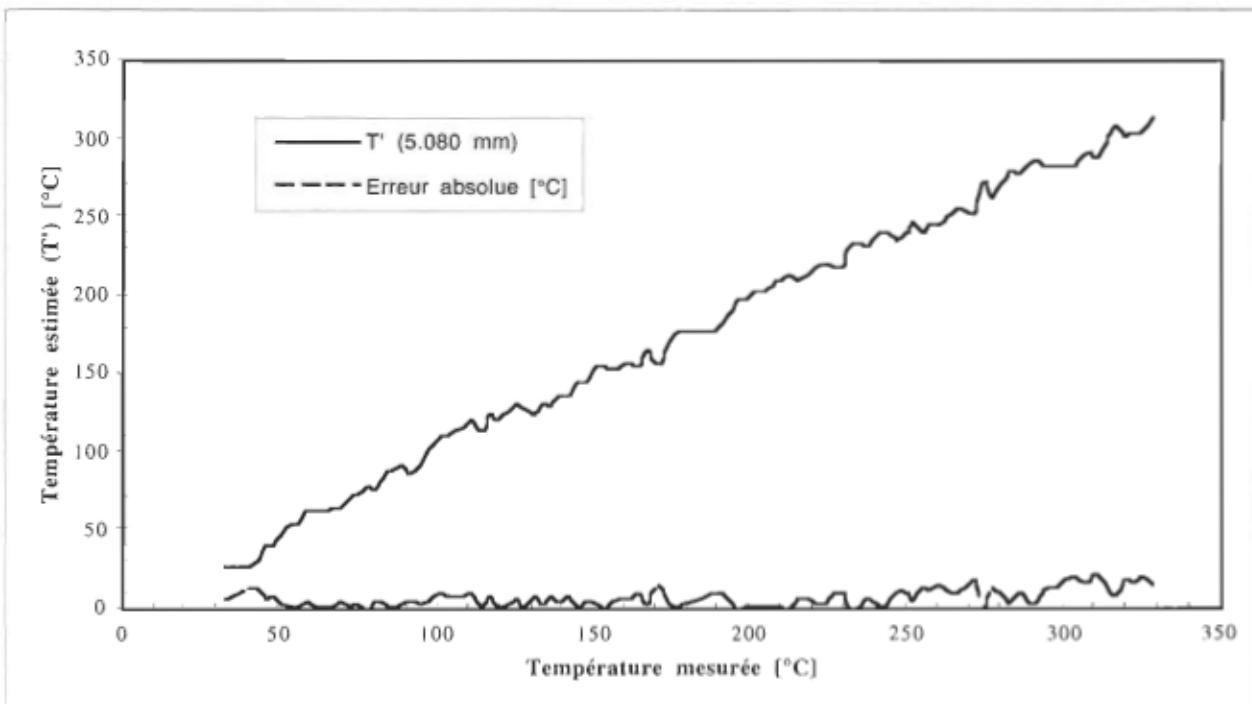


Figure K.4 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 5.080 mm à une fréquence de 100 kHz.

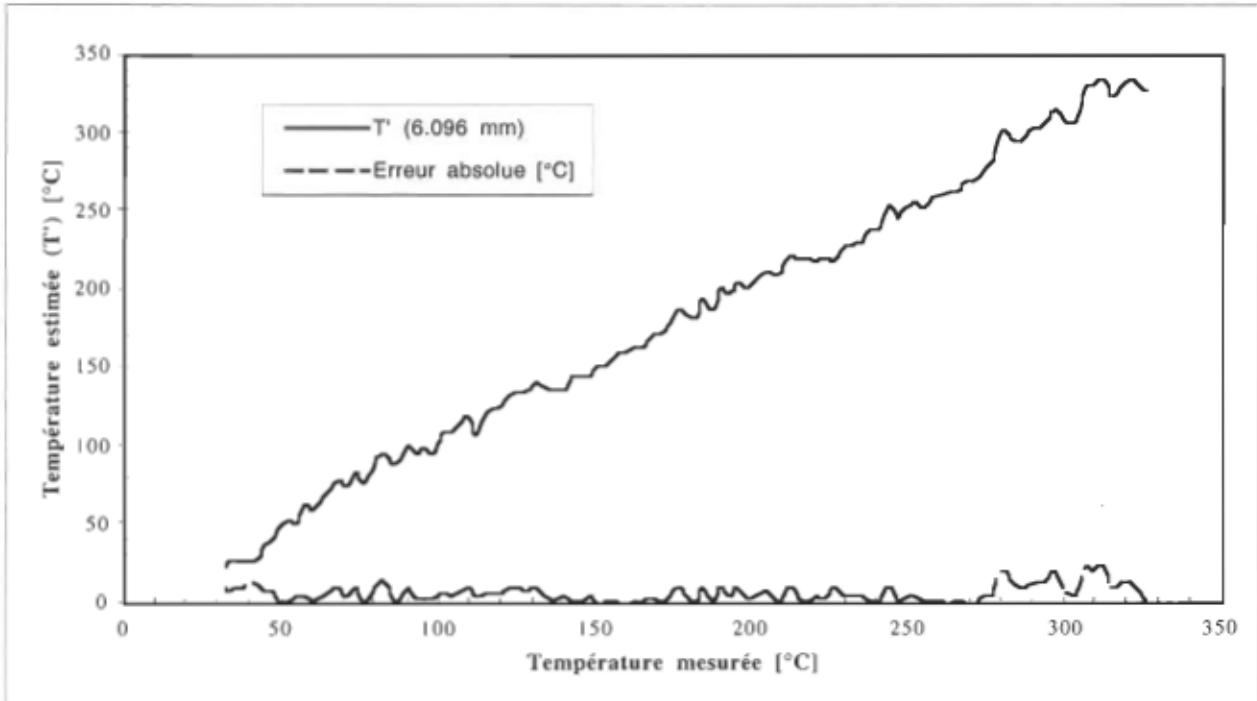


Figure K.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 100 kHz.

ANNEXE L

RÉSULTATS DES ESSAIS À 150 KHZ

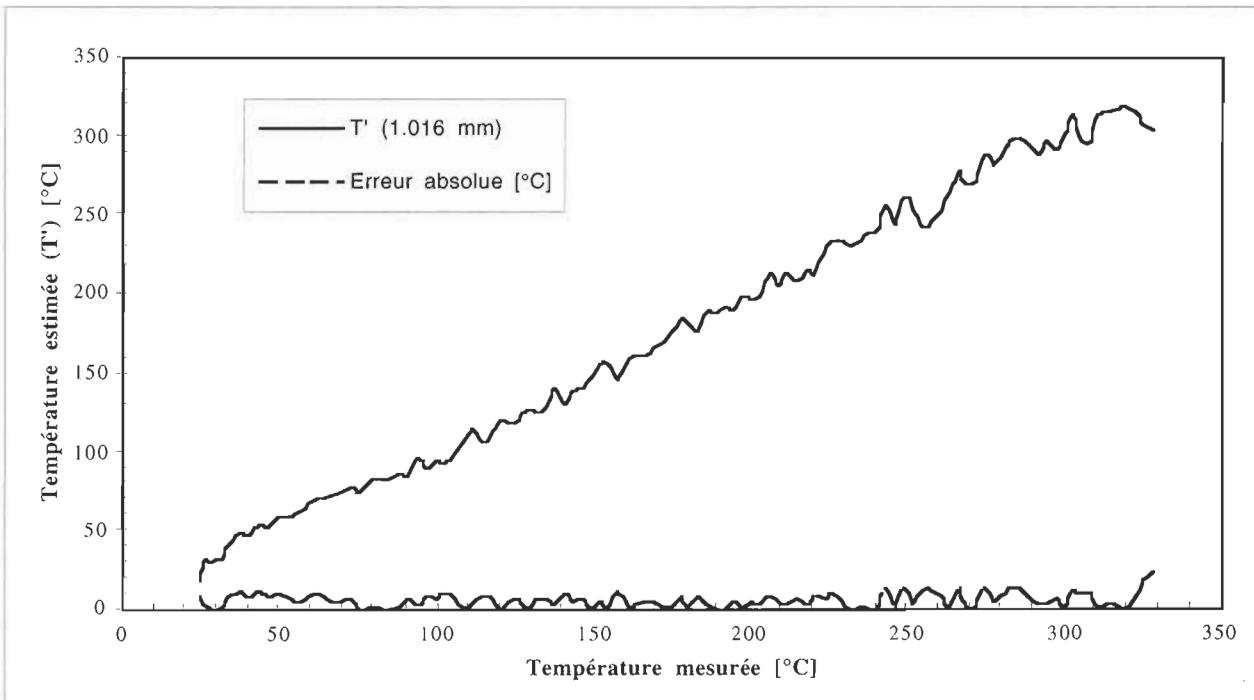


Figure L.1 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 1.016 mm à une fréquence de 150 kHz.

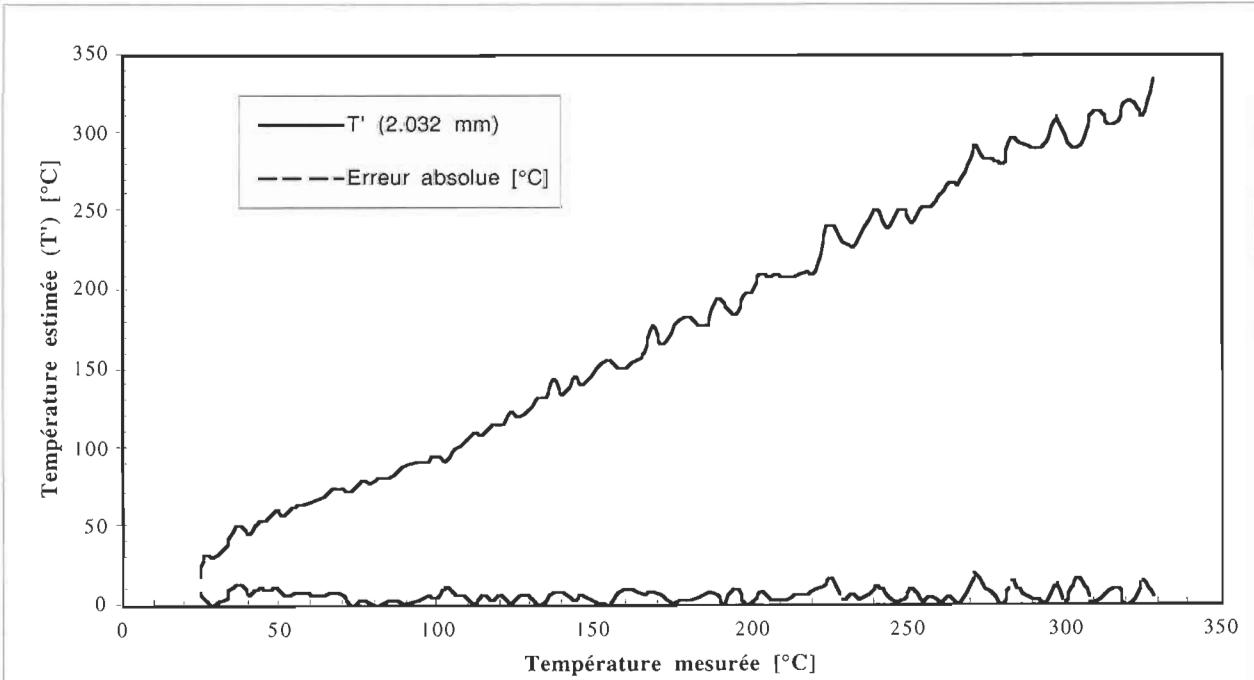


Figure L.2 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 2.032 mm à une fréquence de 150 kHz.

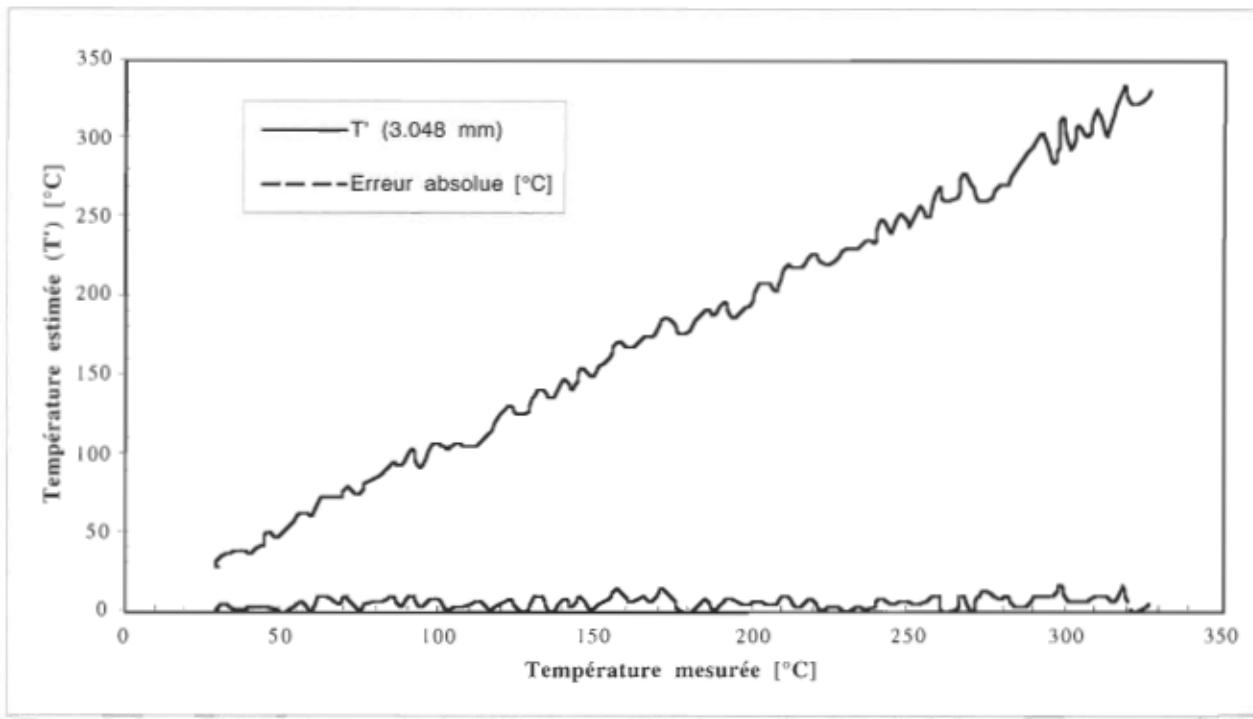


Figure L.3 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 3.048 mm à une fréquence de 150 kHz.

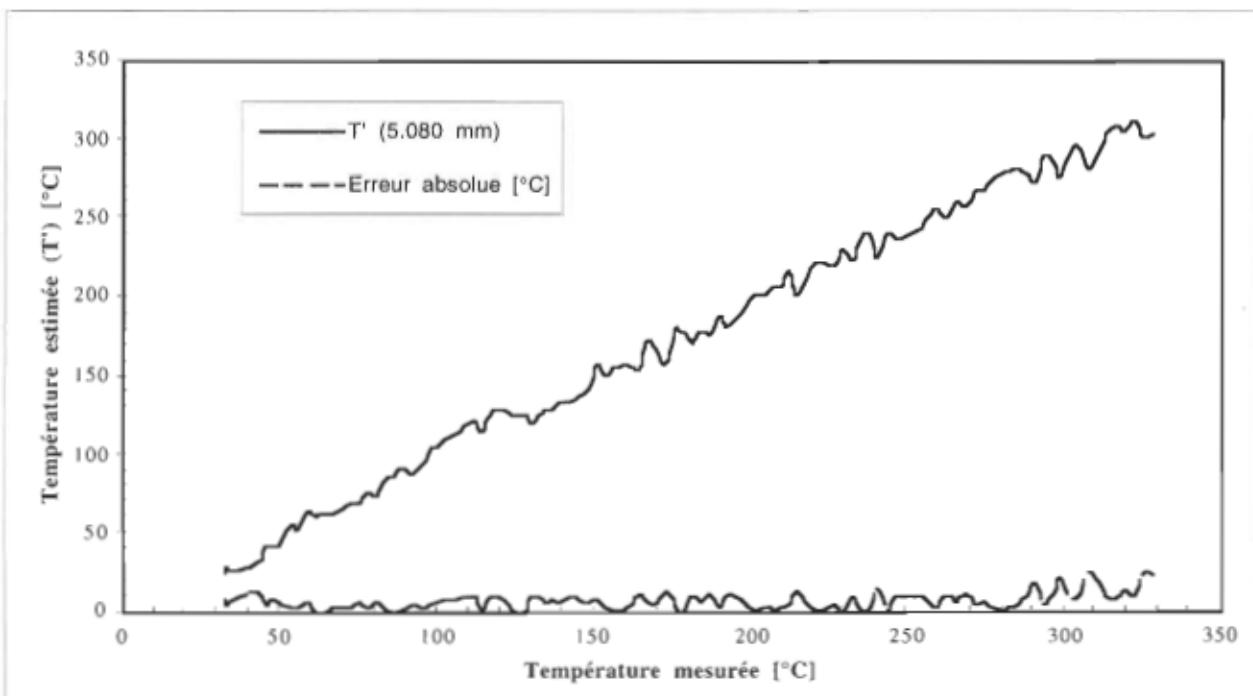


Figure L.4 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 5.080 mm à une fréquence de 150 kHz.

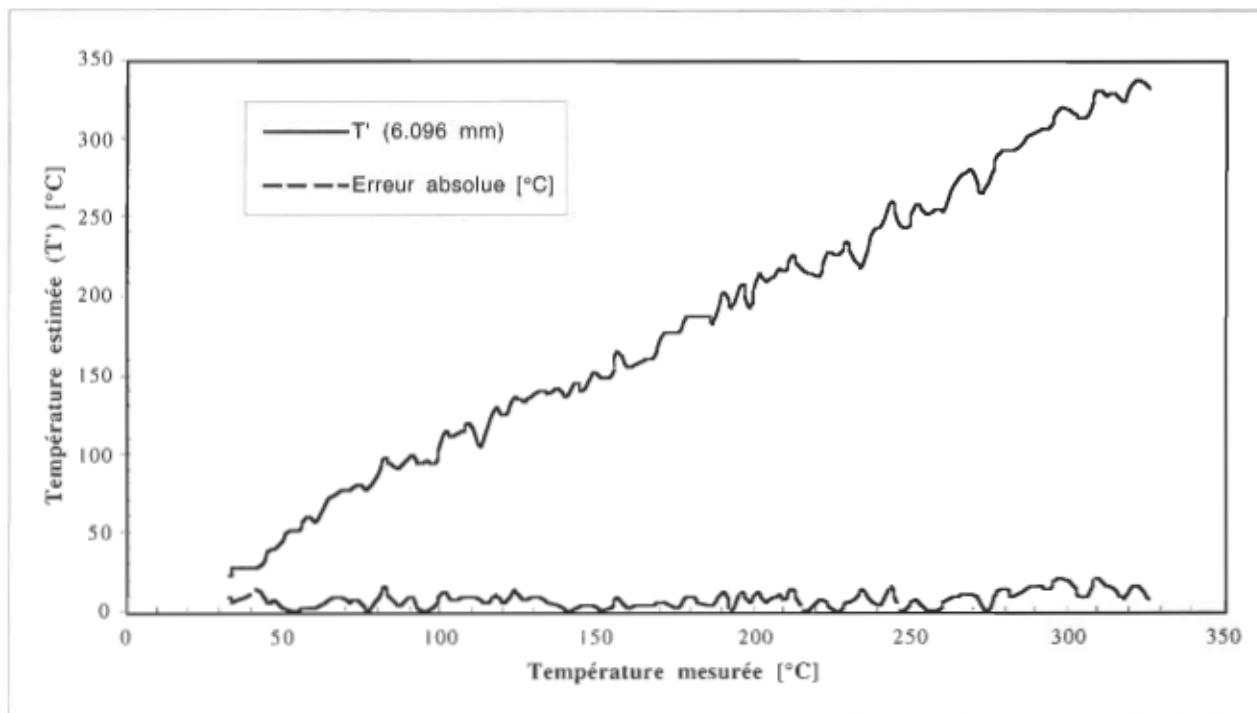


Figure L.5 Température estimée (T') et erreur absolue en fonction de la température mesurée(T) à une distance de 6.096 mm à une fréquence de 150 kHz.