

TD3

Caractéristiques dynamiques d'un capteur

3.1- Caractérisations temporelles

3.1.1- Introduction : réponse d'une sonde de température Pt100

Un four est à une température $\theta_F = 100^\circ\text{C}$ supérieure à la température ambiante $\theta_a = 20^\circ\text{C}$, soit Δ la différence.

Une sonde thermique résistive Pt100 se comporte comme un système dit « du 1^{er} ordre » et est caractérisé par une **constante de temps τ** .

L'origine du nom tient dans la classification des équations différentielles de comportement vis à vis du temps, ici (pour information) : $\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = f(t)$

1- Lorsqu'on introduit rapidement la sonde de mesure dans le four, la sonde subit un « échelon montant » de température. On constate que la température indiquée par la sonde suit la loi : $\theta = \Delta (1 - \exp(-t/\tau)) + \theta_a$

Représenter l'allure de la réponse idéale de la sonde et de la réponse observée ($\tau_m = 30\text{s}$) Interpréter.

2- Après une durée suffisante, la sonde est à la température du four. Selon vous, que se passe-t-il si l'on sort rapidement la sonde du four et qu'on l'éloigne ? Représenter l'allure de la réponse idéale de la sonde et de la réponse observée sachant que l'on constate alors une constante de temps $\tau_d = 50\text{s}$ plus longue. Quelle pourrait être l'explication physique de cette différence ?

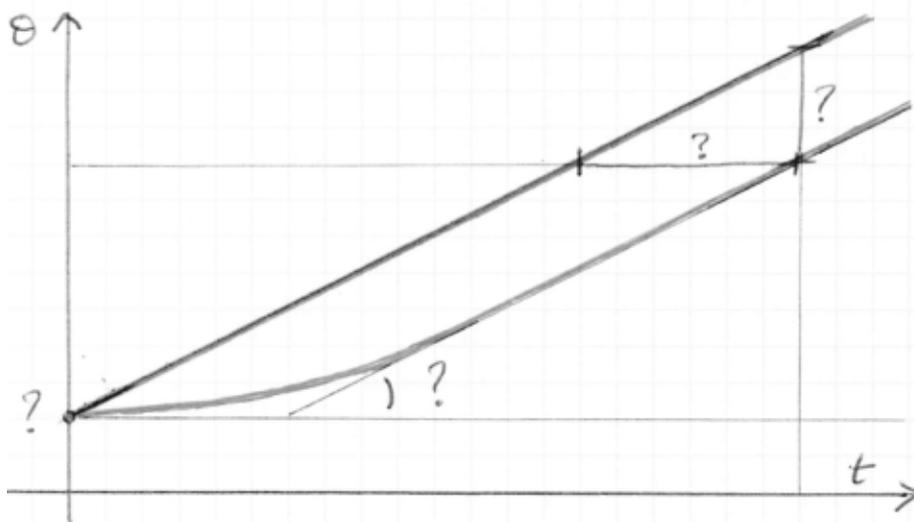
3- On repositionne la sonde dans le four, on attend que $\theta = \theta_F$.

On règle maintenant la commande du four de sorte que la température demandée augmente a priori linéairement avec le temps (« rampe » de pente p).

Une étude thermique détaillée montre que la sonde réagira en suivant la loi :

$$\theta = \theta_F + \tau p \exp(-t/\tau) + p(t - \tau)$$

Commenter l'allure de ces deux courbes. Commenter le comportement de la sonde. Identifier l'erreur de trainage.



3.1.2- Définition

Avec des comportements exponentiels, les durées pour atteindre strictement les limites sont infinies !

On définit alors :

Temps de montée global t_r [rise time] : durée nécessaire pour que la valeur absolue de l'écart entre la valeur instantanée et la valeur finale de la grandeur de sortie soit inférieure à une valeur spécifiée (5% ou 1% par exemple)

Temps de descente global t_f [fall time] : idem mais pour un échelon descendant.

Temps de montée entre 10% et 90% : durée pour croître de 10% à 90% de la valeur finale $t_{r\ 10/90}$.

Le **temps de latence** [delay time], également appelé « retard pur » est le décalage temporel entre l'effet et la cause d'un phénomène physique (donné sous la forme d'un paramètre temporel).

Le **temps de réponse** [settling time] est la somme du temps de montée et du temps de latence

Remarque :

« temps de... » est un anglicisme, on devrait employer le mot « **durée** »...

Le **temps de scrutation** est la durée minimale entre deux instants de mesure.

3.1.3- Capteur du 1^{er} ordre

1- Pour un capteur suivant la loi $s = \Delta \exp(-t/\tau)$ lors d'un échelon descendant, exprimer les durées $t_{f\ 5\%}$, $t_{f\ 1\%}$ et $t_{f\ 10/90}$ en fonction de la constante de temps.

2- Quels résultats pour un échelon montant $s = \Delta (1 - \exp(-t/\tau))$?

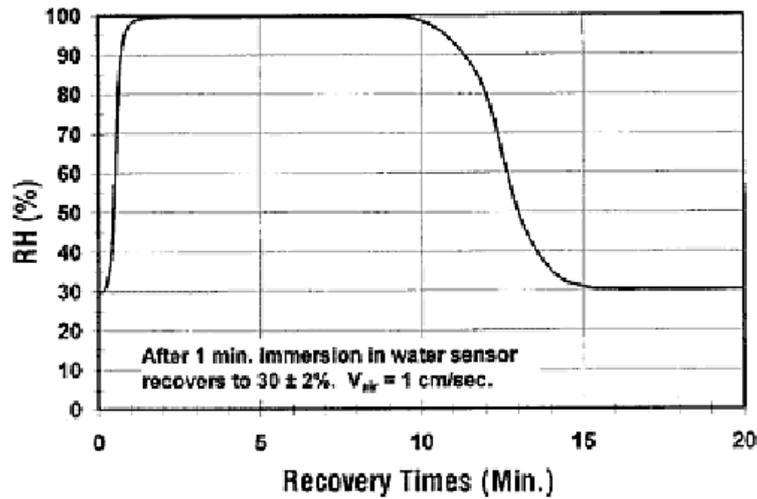
3.1.4- Capteur du 2nd ordre

On donne l'allure de la réponse pseudo-périodique d'un capteur du second ordre.

Repérer les valeurs limites à 5%, à 1%. Identifier la plage correspondant à $t_{10/90}$

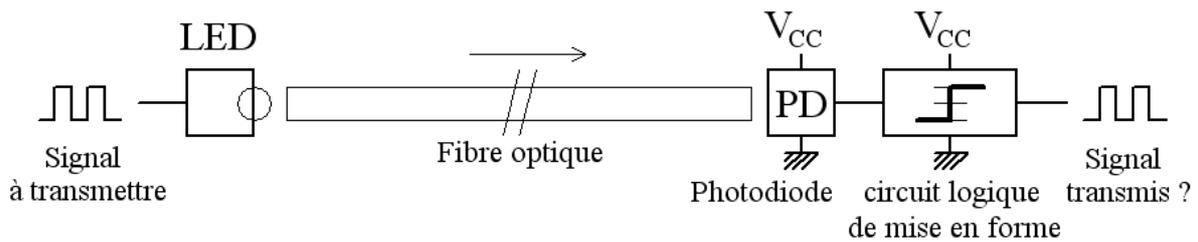
3.1.5- Exploiter des données concernant un hygromètre

Les feuilles de données propose la courbe spécifiée suivante. Quel type d'information donne-t-elle ?



3.2- Caractérisation fréquentielle

3.2.1- Introduction : fréquence limite de transmission numérique par fibre



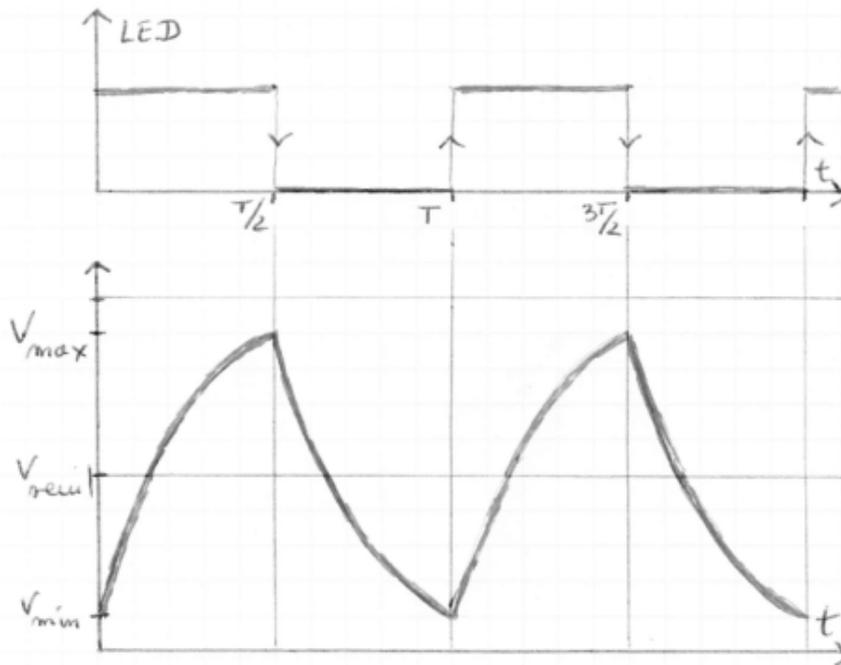
Une transmission par fibre optique est testée avec un signal numérique de fréquence $f (=1/T$ avec T période). Ce signal de forme carrée (rapport cyclique 50-50) commande un émetteur à LED.

La lumière transmise est détectée par une photodiode, caractérisée par son temps de montée (capteur supposé d'ordre 1). Le niveau de lumière transmis est réglé de sorte que la photodiode ne soit pas saturée en réception. Ainsi le signal produit lors de la réception d'un « 1 » est $V = 0.8 \times V_{cc}$, celui pour la réception d'un « 0 » est nul.

Le signal détecté est remis en forme carrée par un inverseur logique dont le seuil de discrimination entre « 0 » et « 1 » est supposé être $V_{seuil} = 0.5 \times V_{cc}$.

Dans le cadre de ce modèle simple :

1- Soit l'allure des signaux lorsque $T/2 \approx 2\tau$ obtenus en régime permanent. Obtenir graphiquement le signal remis en forme par le circuit logique et montrer que la transmission est correcte.



- 2- Dans ce système la valeur maximale du signal produit par la photodiode est $V_{max} = \frac{0.8 V_{cc}}{1+x}$ où l'on pose $x = \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)$.
 Montrer que V_{max} diminue lorsque la fréquence f augmente.
- 3- Esquisser l'allure de ce signal pour les trois réglages particuliers : $T/2 < \tau$, $T/2 \approx 5\tau$ et $T/2 \gg 5\tau$.
- 4- Montrer que la transmission d'information devient impossible si $V_{max} < V_{seuil}$.
 En déduire la fréquence maximale d'un signal correctement transmis en fonction de τ .
- 5- Calculer la fréquence maximale d'emploi de la photodiode SFH250 pour laquelle $t_{10/90} = 10 \text{ ns}$.

A noter : comportement temporel et fréquentiel sont deux aspects complémentaires d'une même propriété.

3.2.2- Fréquence limite de mesure

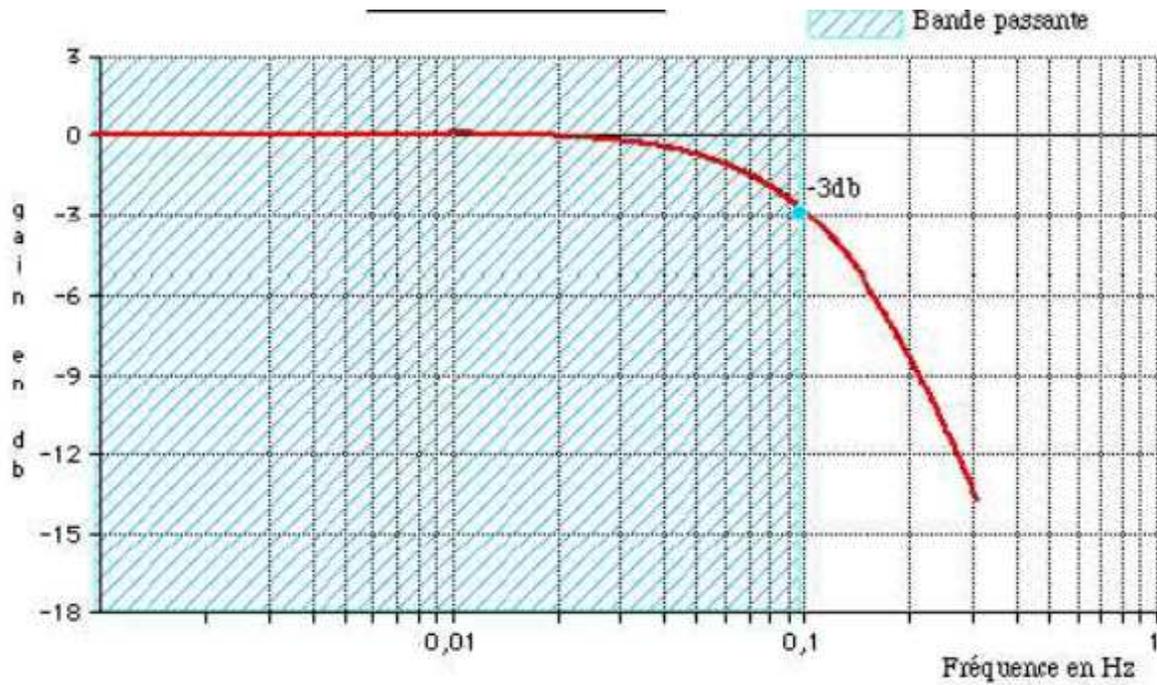
De façon plus générale la sensibilité d'un détecteur variant comme un 1^{er} ordre est S : Une **modulation d'éclairement** incident sur le détecteur doit rester **plus lente que la fréquence de coupure** $f_c = 1 / 2\pi \tau$

On parle de comportement de filtre « Passe-bas »,
 d'où une bande passante de type « passe-bas » $\Delta f = f_c - 0$
 soit $\Delta f = 1 / 2\pi \tau$

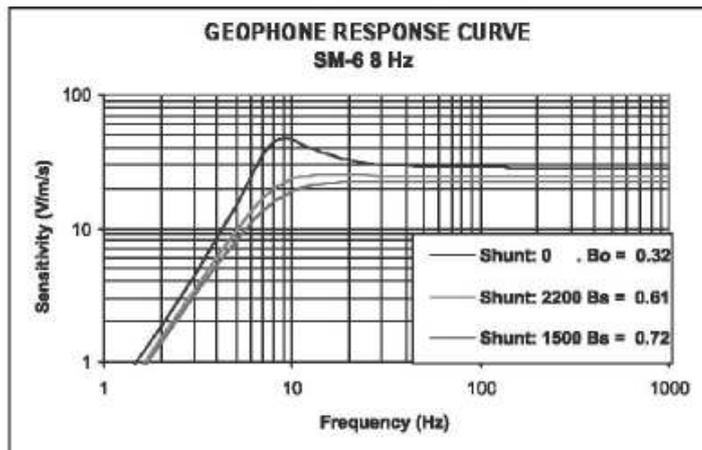
$$S = \frac{S_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

Graphiquement on a la représentation de $G_{dB} = 20 \log_{10}(S)$

le résultat de mesure est à 3 dB en dessous de la valeur à très basse fréquence considérée comme vraie.



Remarque : tous les capteurs n'ont pas un comportement de type passe-bas. Certains capteurs ont un comportement de **type passe-bande, avec même des fréquences de résonance.**



3.2.3- Que mesure un capteur lent ?

Lorsque le signal est trop rapide pour ses performances, le capteur ne suit pas les variations rapides

Il mesure en fait la partie du signal dont les fréquences sont basses.

Le résultat est proche de la valeur moyenne temporelle du signal

3.3- Performances comparées de capteurs

3.3.1- Performance comparée de photocapteurs

La lecture de notice donne des ordres de grandeurs typiques de temps de montée 10%/90% pour les principales familles de photodétecteurs :

- ✓ Photodiode PIN : 10 ns ≈ 10€
- ✓ Phototransistor : 20 μs ≈ 1€
- ✓ Photorésistance LDR : 100 ms < 1 €
- ✓ Thermopile rapide : 10 ms > 40€

Quel capteur choisir pour mettre en évidence les variations d'éclairement dues à une lampe à incandescence alimentée sur le secteur EDF ?

Réponse :

Le flux lumineux émis est proportionnel à la puissance Joule, soit RI^2

La fréquence du sin 50 Hz au carré est 100 Hz ; le détecteur retenu doit donc avoir une fréquence de coupure supérieure à 100 Hz

La fréquence de coupure du détecteur est $f_c = 1 / 2\pi \tau = 2.2 / 2\pi t_r = 0.35 / t_r$

PD 35 MHz PT 17.5 kHz LDR 3.5 Hz Thermopile 35 Hz

Le meilleur choix performance/prix : phototransistor PT



Fiber Optics

Plastic Fiber Optic Phototransistor Detector
Plastic Connector Housing

SFH350
SFH350V

| Parameter | Value | Unit |
|---|-------|------|
| Rise and Fall Times of Photo Current ($R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$, $I_C = 1.0 \text{ mA}$, $\lambda = 959 \text{ nm}$) | | |
| 10% to 90% | t_R | 20 |
| 90% to 10% | t_F | 20 |
| | | μs |

3.3.2- Thermopiles : photodétecteurs sensibles au visible et IR

Une thermopile est un détecteur destiné à mesurer la « puissance optique » d'un rayonnement visible ou InfraRouge (on utilise l'expression « flux énergétique, en W) en exploitant des propriétés thermiques.

Principe :

- La lumière mesurée chauffe une plaque d'entrée alors que le corps du détecteur reste à température constante proche de l'ambiante. Le flux à mesurer se déduit de la différence de température constatée.
- Signal de mesure : faible tension \approx continue, directement générée par des **thermocouples** montés en série.
- Soudures « chaudes » au contact de la plaque échauffée par le flux de lumière mesuré (à température T).
- Soudures « froides » à température \approx constante, au contact du corps du capteur à forte inertie thermique.

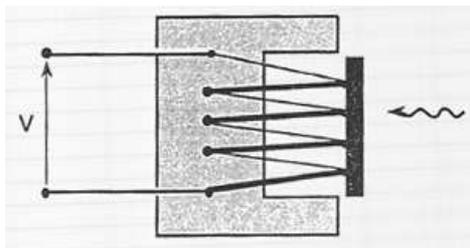
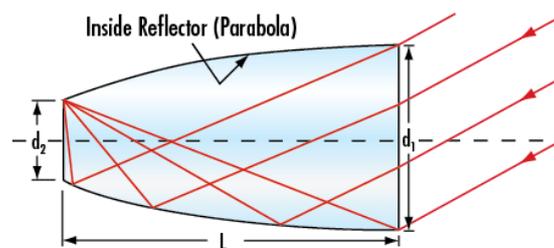


Schéma de principe (coupe)



Eventuel concentrateur de lumière (placé en avant du détecteur)

- Détecteurs lents $10^{-3} < \tau < 10$ s

- modèle théorique (analyse thermique) : $\tau_{idéal} = \frac{m c e}{4 \sigma T^3}$ avec masse m et

épaisseur e de la plaque (pour info : c chaleur spécifique du matériau, T en K température d'équilibre de la plaque d'entrée, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W.cm}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

Sur quel paramètre jouer pour améliorer le temps de réponse d'une thermopile ?

Réponse : essentiellement sur la masse et l'épaisseur de la zone recevant la lumière, donc globalement sur la taille du capteur. L'inertie thermique diminue avec la taille de la partie sensible à la lumière.

Exemples :

- Thermopiles « **lentes** » à forte capacité calorifique (\approx taille d'une pièce de monnaie) $\tau > 1$ s $S : 1$ à 10 V.W^{-1} typ.
très peu de bruit électrique surface $A : 10$ à 500 mm^2 typ.

→ Mesures de flux continu puissant (laser ...)

- Thermopiles « **rapides** » à très faible capacité calorifique (partie active : $\approx \text{mm}^3$ au + ... en tout !)

$\tau \approx 4$ à 10 ms

$S \approx 40$ à 50 V.W^{-1} typ.

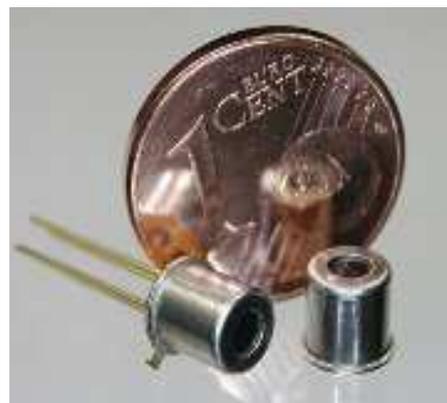
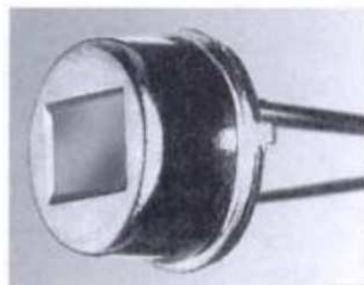
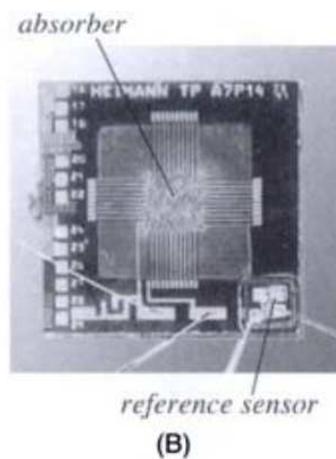
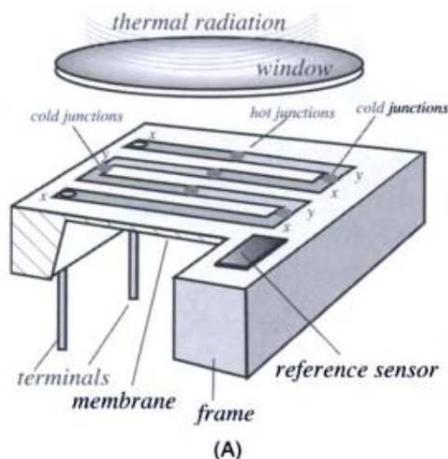
surface $A : 0.05$ à 1 mm^2 typ.

→ Suivi de présence humaine, mesure de polluant gazeux

→ Capteur de caméra thermique



Mesureur de puissance continue pour laser industriel 40 mW-150 W sur bande IR 0.19-20 μm (modèle : Ophyr 50A-BB-26)



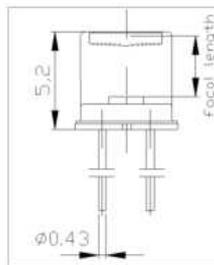
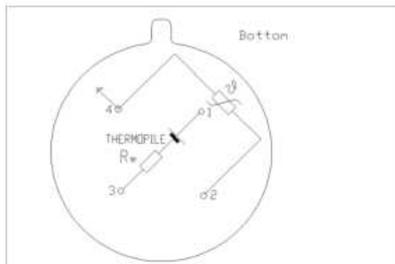
(A) Schéma d'une thermopile dédiée à la détection thermique humaine, avec mesure de température de référence du bâti (\approx température des soudures froides). (B) Vue au microscope des détails de cette thermopile en réalisation MEMS. (C) Capteur dans son boîtier (Heimann HMS-M21).



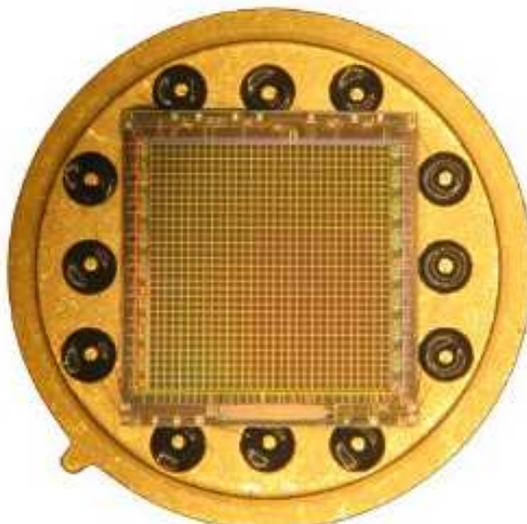
HMS-M Series

Thermopile Sensors with Lens L 3.0

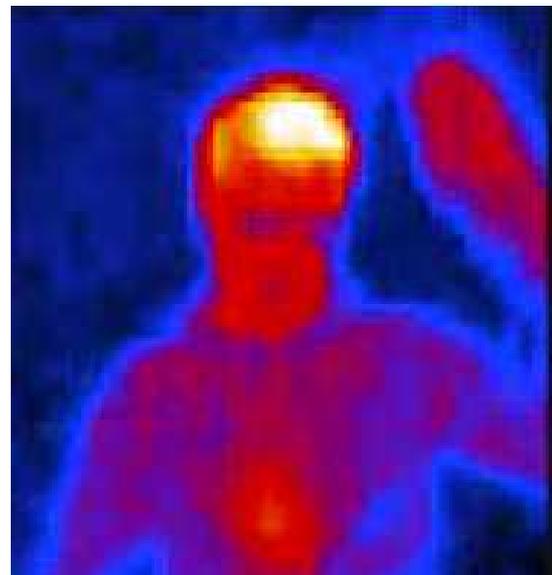
The HMS-M Series combines the good characteristics of the HMS Series in TO46 housing and the advantages of a diffractive lens in respect to field of view and signal. The focal length of this lens is 3.0 mm and it is available with F5.5 or F8.0 filter coatings.



| Parameter | HMS M11 | HMS M1C1 | HMS M21 | Unit |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| element size | 0,61 ² | 0,76 ² | 1,2 ² | mm ² |
| signal voltage ¹ | 330 | 480 | 890 | μV |
| resistance R _{TP} ² | 86 | 75 | 84 | k Ohm |
| temp. coeff. of resistance R _{TP} | 0.02 | 0.02 | 0.02 | % / K |
| noise ² | 38 | 35 | 37 | nV/ Hz ^{1/2} |
| time constant | < 6 | < 9 | < 13 | ms |
| thermistor reference ² | 100 | 100 | 100 | kOhm |
| temp. coeff. of thermistor B ³ | 3940 | 3940 | 3940 | K |
| field of view ⁴ | 12° @ 50% 20° @ 10% 25° @ 5% | 14° @ 50% 22° @ 10% 26° @ 5% | 16° @ 50% 30° @ 10% 34° @ 5% | degree |
| operating temperature | -20...120 | | | °C |
| storage temperature | -40...120 | | | °C |



capteur d'image IR *Heimann*
à 32×31 éléments
(220× 220 μm² = 0.05 mm² chaque)



Ex : personne se séchant les cheveux...

Vidéo en ligne sur : http://www.heimansensor.com/products_imaging.php

Remarque : même stratégie de miniaturisation pour des sondes de températures RTD