

# THERMODYNAMIQUE

## Mesures de Température et de Pression

*On prendra soin de reporter dans le compte-rendu :  
courbes visualisées, mesures et leur incertitude, commentaires et interprétations.*

### **Objectifs :**

Ce TP a pour but de mettre en œuvre et tester deux types différents de capteurs de température, et un capteur de pression absolu.

Les deux capteurs de température sont basés sur deux composants :

- la *thermistance* (composant conducteur ou semi-conducteur de résistance variable dépendant fortement de la température), de type CTN ou CTP<sup>1</sup> ;
- la *thermopile* utilisée comme capteur Infra-Rouge (assemblage de thermocouples entre deux plaques qui convertit en tension un différentiel de flux de rayonnement thermique IR, donnant accès à la température à distance via la loi du corps noir).

On utilisera ensuite le capteur IR pour réaliser des **mesures à distance dans des situations où le contact est difficile**.

Le capteur de pression est construit à partir d'une *jauge de contrainte piezorésistive*, et sera utilisé pour **vérifier la loi de l'hydrostatique**, et en déduire une mesure du champ de pesanteur.

Chaque mesure se traduit par un signal électrique de tension, dont on fera l'acquisition numérique via l'interface ARDUINO-PYTHON, ou l'interface FOXY.

### **Compétences expérimentales exigibles :**

- Mettre en œuvre un capteur de température, par exemple avec l'aide d'un microcontrôleur.
- Mettre en œuvre un capteur infrarouge pour mesurer la température.
- Mettre en œuvre un capteur de pression, en identifiant son caractère différentiel ou absolu.

## I. Partie expérimentale

### I.1. Thermométrie

On dispose de trois instruments de mesure de la température : le thermocouple (effet thermo-électrique Seebeck, supposé déjà étalonné), la thermistance (type CTN) et le capteur IR à étalonner pour une utilisation ultérieure. Le but final du TP est de

- vérifier le modèle de dépendance en température de la résistance de la thermistance (rappelé en annexe) ;
- réaliser des mesures sans contact avec le capteur IR.

Après avoir étudié l'annexe et la documentation jointe à ce TP concernant les deux capteurs de température, on pourra aborder les manipulations suivantes.

Toutes les mesures de température se feront via des mesures de tension. On pourra utiliser le voltmètre numérique pour la précision, et pour des mesures ponctuelles (ex : étalonnage). Pour un suivi temporel et un enregistrement automatique on associera les capteurs à la carte ARDUINO. On pourra se référer au TP Traction pour toutes les informations sur le fonctionnement et l'utilisation de la carte, ainsi que son interfaçage avec Python. Deux scripts `lecture_capteur.ino` et `acquisition_capteur.py`, à adapter éventuellement, sont fournis pour démarrer.

1. CTN pour *Coefficient de Température Négatif* ( $R(T)$  diminue si  $T$  augmente) et CTP pour *Coefficient de Température Positif* ( $R(T)$  augmente si  $T$  augmente).

- **MANIP 1 : Mise en place des capteurs**

- Alimenter les capteurs avec +5 V (depuis la carte ARDUINO), ou avec +15 V (alimentation stabilisée).
- Faire une acquisition continue sur FOXY avec un échantillonnage temporel suffisant pour repérer le bruit lié à l'installation électrique du bâtiment.
- Comparer les niveaux de bruit avec les deux alimentations. Quel choix est préférable ?

Dans la suite, on alimente les capteurs avec la carte ARDUINO, pour être certain que le signal ne dépasse pas 5 V en entrée analogique de l'ARDUINO.

- **MANIP 2 : Étalonnage des capteurs**

- Étalonner les deux capteurs à l'aide :
  - d'une part d'un bac de glaçons en fusion ;
  - et d'autre part d'eau à température ambiante, ou chauffée (combiner avec la manip suivante). en se référant à la valeur donnée par le thermocouple (on profitera pour en vérifier le 0°C et le corriger si besoin).
- En déduire numériquement les relations Tension-Température pour chacun des deux capteurs.

- **MANIP 3 : Analyse détaillée sur une courbe de chauffage d'eau**

- Enregistrer, à l'aide de la carte ARDUINO (ou FOXY si manque de temps), une courbe temporelle de chauffage de l'eau dans une bouilloire (en mélangeant régulièrement), à l'aide des trois capteurs <sup>a</sup>.
- Traiter les données de façon à comparer les courbes de températures. Les trois capteurs donnent-ils des valeurs cohérentes ?
- La loi  $R(T)$  donnée en annexe pour la thermistance est-elle validée ? On pourra tracer une relation affine bien choisie. Que vaut le coefficient  $\beta$  mesuré ? Que vaut la température  $T_0$  pour  $R_0 = 10,0 \text{ k}\Omega$  ? Comparer avec la documentation.

a. On prendra soin de ne pas laisser le capteur IR se couvrir de buée, en l'ôtant lorsque la température est trop chaude.

Le signal du capteur IR étant faible (de l'ordre de 1 V, l'interface ARDUINO se révèle pénalisante en terme de résolution (1024 niveaux pour 5 V).

**Q1.** Par quel moyen pourrait-on améliorer la résolution en température tout en conservant ARDUINO comme interface ?

- **MANIP 4 : Augmentation de la sensibilité du capteur IR (facultatif)**

- Mettre en œuvre cette solution avec le matériel d'électronique disponible, en prenant soin de ne pas atteindre 5 V en entrée d'ARDUINO.
- Adapter la relation d'échantillonnage Tension-Température en conséquence.

- **MANIP 5 : Utilisation du capteur IR**

- Effectuer différentes mesures sans contact sur les corps avoisinant : boîtier de générateur, de smartphone ou d'ordinateur, température corporelle frontale, objet exposé au soleil...
- Enregistrer, à l'aide de la carte ARDUINO (ou FOXY si manque de temps) une courbe temporelle de température de l'ampoule de la lampe de bureau à partir de l'allumage.

## I.2. Vérification de la loi de l'hydrostatique

Après avoir étudié l'annexe et la documentation jointe à ce TP concernant le capteur de pression, on pourra aborder les manipulations suivantes.

La mesure de la pression se fait via une mesure de tension. On pourra utiliser le voltmètre numérique pour la précision, et pour des mesures ponctuelles (ex : étalonnage). Pour un suivi temporel et un enregistrement automatique on associera les capteurs à la carte d'acquisition FOXY ou à la carte ARDUINO. On pourra se référer au TP Traction pour toutes les informations sur le fonctionnement et l'utilisation de la carte ARDUINO, ainsi que son interfaçage avec Python. Deux scripts `lecture_capteur.vérifier la loi de l'hydrostatiqueino` et `acquisition_capteur.py`, à adapter éventuellement, sont fournis pour démarrer.

Le capteur est équipé d'un tuyau transparent connecté de façon hermétique (normalement). Il est possible de plonger le tuyau dans l'eau de l'éprouvette, ou de le remplir d'eau à condition de le fixer correctement à la potence.

- **MANIP 6 : Loi de l'hydrostatique**

- Alimenter le capteurs avec +5 V (depuis la carte ARDUINO).
- Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de vérifier la loi de l'hydrostatique.
- En déduire une mesure du champ de pesanteur.

## II. ANNEXE - Utilisation d'une thermistance CTN

Une thermistance est un composant électronique dont la résistance électrique varie en fonction de la température. C'est l'un des principaux capteurs de température utilisés en électronique. Les thermistances de type CTN sont en général composées d'oxydes de métaux de transition (manganèse, cobalt, cuivre et nickel) semi-conducteurs.

Sur la plage de température utile, on modélise la relation Température-Résistance par une relation du type

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

où  $\beta$  est une constante valable sur un certain domaine (fournie par le constructeur mais à vérifier), et  $R_0$  une résistance de référence pour la température de référence  $T_0$ .

On accède donc à  $T$  en mesurant  $R$ , ce qui peut se faire de nombreuses manières plus ou moins précises. La méthode retenue ici sera celle du *pont diviseur de tension*, qui a l'avantage de convertir la valeur de résistance en tension, qui peut être directement enregistrée par une carte d'acquisition, puis traitée numériquement. Le pont est constitué à l'aide d'une seconde résistance  $R_1$  de l'ordre de  $R_0$ , et alimenté par une tension  $E$  constante (autant que possible...). Le capteur fourni pour ce TP contient le pont, et fourni la tension aux bornes de  $R_1$ , qui vérifie donc

$$u = \frac{R_1}{R_1 + R(T)} E = \frac{E}{1 + R(T)/R_1}.$$

### Branchement

Le capteur est équipé d'une fiche de type *grove* qui se branche sur la carte ARDUINO par l'intermédiaire de l'interface *shield* qui est enfichée dessus. Choisir l'entrée appelée A0, qui permet de connecter directement :

- le fil noir à la masse (rélié à la borne extrême du pont diviseur, sur la résistance  $R_1$ ) ;
- le fil rouge à l'alimentation (régler le sélecteur sur +5 V, il s'agit de l'autre borne extrême du pont, sur la thermistance  $R(T)$ ) ;
- le fil jaune à l'entrée A0 (il s'agit du point milieu du pont, c'est-à-dire le signal utile) ;
- le fil blanc à l'entrée A1 (inutile) ;

### Extrait de la documentation du fabricant

Le capteur CTN est un MF52D103F3950(B)

MF52 : type/série de l'élément NTC

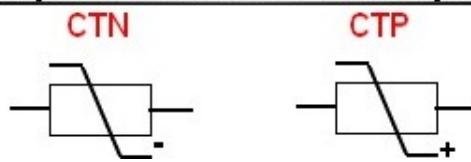
D : boîtier

103 : 10 kOhm, valeur de résistance à 25°C F : tolérance 1% sur la valeur de résistance 3950 : valeur B (beta) qui indique la forme de la courbe qui représente la relation entre la valeur de résistance et la température.

(B) : tolérance 1% sur la valeur de beta

Tableau ci-contre : Valeur de la résistance en kOhms en fonction de la température en °C.

### Représentation schématique

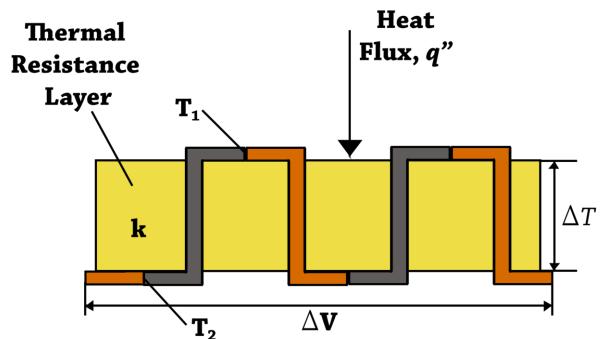


$T(\text{°C})$	$R_{25}$	$B$	$10 \text{ k}\Omega$
-30			181.70
-25			133.30
-20			98.88
-15			74.10
-10			56.06
-5			42.80
0			39.50
5			25.58
10			20.00
15			15.76
20			12.51
25			10.00
30			8.048
35			6.518
40			5.312
45			4.354
50			3.588
55			2.974
60			2.476
65			2.072
70			1.743
75			1.473
80			1.250
85			1.065
90			0.911
95			0.7824
100			0.6744
105			0.5836
110			0.5066

### III. ANNEXE - Utilisation d'un capteur de température IR

Le thermomètre IR utilisé ici est assimilable à un pyromètre<sup>2</sup>, c'est-à-dire un capteur permettant de mesurer une température à distance grâce notamment à une thermopile.

La thermopile est un assemblage de thermocouples montés en série (pour augmenter le signal par rapport à un seul), pris dans une matrice thermiquement isolante et couverte d'une couche absorbante pour le rayonnement. Elle permet de mesurer un différentiel de température entre la face « avant » (celle exposée à un flux thermique en provenance de l'objet à mesurer), et la face « arrière » (celle tournée vers l'intérieur du thermomètre).



En effet, la loi du corps noir conduit à une irradiance totale proportionnelle à  $T^4$ , donc la thermopile fournit une tension du type

$$u = A(T_o^4 - T_a^4)$$

où  $T_o$  est la température de l'objet mesuré (visé par le capteur) et  $T_a$  la température du milieu dans lequel baigne le capteur. Pour des plages de température suffisamment faibles, ce signal varie de façon affine avec  $T_o$ .

Pour construire un thermomètre infra-rouge, il faut adjoindre à la thermopile un **système optique** de visée qui garantisse un angle solide de mesure fixe, à respecter (au sein duquel tout objet rayonnant est susceptible de contribuer au signal). La température mesurée est une moyenne sur ce *cône de visée*. Par conséquent il est nécessaire que l'objet mesuré soit plus grand que la section du cône de visée sur lui.

Par ailleurs, le thermomètre IR utilisé ici intègre en fait aussi un autre capteur dans son circuit de traitement (PTAT, pour *Proportional To Absolute Temperature sensor*, probablement une thermistance) donnant un accès direct à la température ambiante  $T_a$ . Cela permet au thermomètre de fournir in fine un signal dit « absolu », c'est-à-dire représentant directement la température  $T_o$  sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une correction via une mesure supplémentaire de  $T_a$ . Cette mesure est faite en interne, et le calcul est géré au sein du circuit de traitement et de conditionnement du signal.

#### Extrait documentation capteur IR (*Type : SEN0256-TS01(0-3V) - DFRobot*)

##### 1. Introduction

This product is a non-contact infrared temperature sensor. It can be used to detect the infrared intensity of an object so as to calculate its surface temperature without touching, and then convert the temperature value into voltage value and output it.

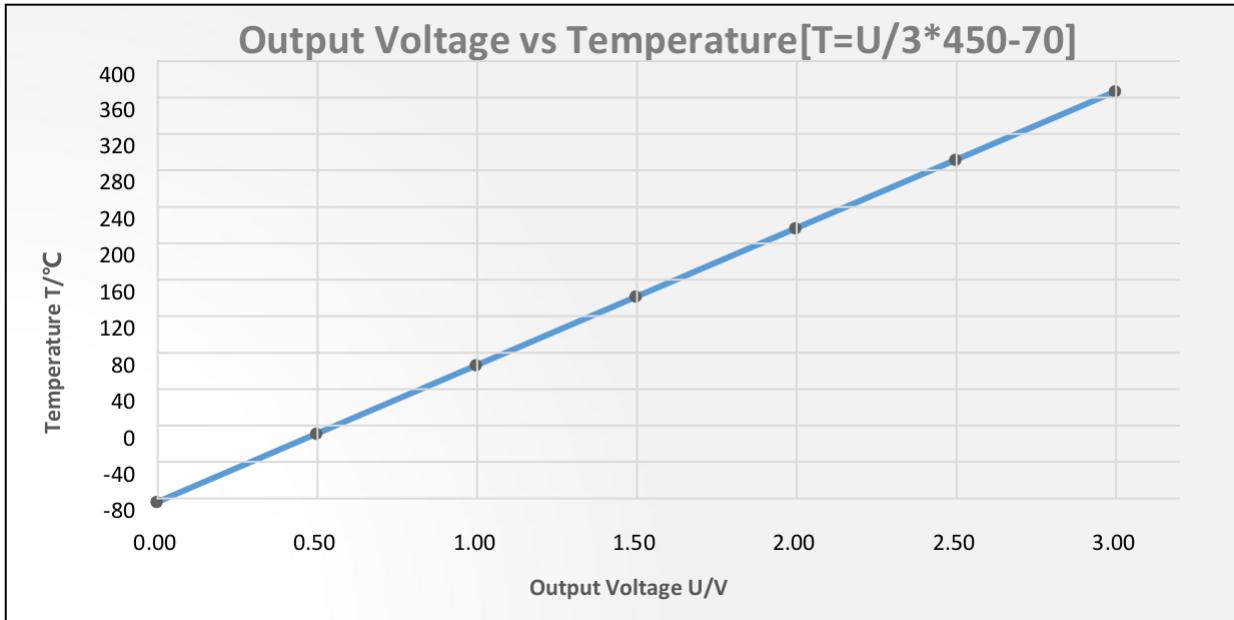
The sensor's case is made of metal which makes it able to protect against impact, water, dust and so on. Given stable output data, this temperature sensor can exhibit a much better measuring performance than most other similar products on the market.

##### 2. Specification

- Operating Voltage: DC 5.0~24.0V
- Operating Temperature Range: -40°C~85°C
- Measuring Range: -70°C~380°C
- Output Signal: 0~3V
- Temperature Resolution: 0.11°C
- Measuring Accuracy: ±0.5°C~±4°C [see remarks]
- Nominal Operating Current: 20mA
- Field of View(FOV): 5° [see remarks]
- Defense Grade: IP65
- User Interface: DuPont Pin

2. Un pyromètre est un thermomètre permettant la mesure sans contact de hautes températures.

### 3. Output Voltage vs Temperature



### 4. Dimension and Interface Description (mm)



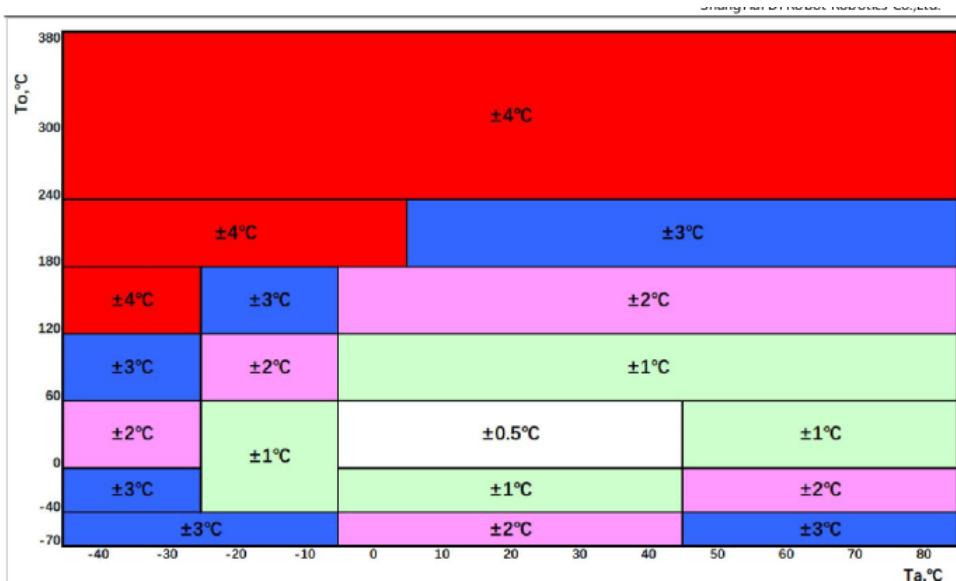
Interface Description	
Name	Description
Power Supply	Positive Pole (Vin)
Ground	Negative Pole(GND)
Signal	Analog Voltage Output (0-3V)
Shielding	Grounding the shielding can help to reduce noise

### 5. Remarks

- The field of view(FOV) of the sensor is 5°. The target dimension and the optical properties of the IR temperature sensor decided the maximum distance between the target and the probe. The field of view of the sensor is shown below.



- The gradient diagram of measuring accuracy of the sensor is shown below (To is the measured temperature; Ta is the temperature of the environment the sensor locates in). Please note that the temperature error only applies to a certain isothermal condition, and it's only valid when the detected object is fully filling in the FOV of the sensor.



- The measured temperature is an average temperature value that belongs to the detected heat source in the FOV of the sensor. If there is a need for accurate measurement, users have to correct the data for the practical using scene.
- Using low-noise power input is helpful to improve the accuracy.
- Do not use the sensor in the condition out of the rated technical parameters in order to avoid device damage.
- The product is equipped with an all-metal case and shielding wires, which can effectively reduce electromagnetic interface. However, for a more stable performance, please try to keep the sensor away from electromagnetic source (such as motor, high-power cable) when installing the device.

## IV. ANNEXE - Utilisation d'un capteur de pression piezorésistif

Un capteur piezorésistif est conçu à partir d'un cristal semi-conducteur (silicium dopé), dont la résistance est modifiée par déformation élastique sous l'effet d'une contrainte. Ainsi, la force de pression extérieure est convertie en une tension, par le biais d'un pont de Wheatstone (principe d'une jauge de contrainte). Enfin, le capteur fournit une tension en relation affine avec la pression extérieure au capteur (cas d'un *capteur absolu*) ou avec la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du capteur (cas d'un *capteur différentiel*). Dans le cas présent, le capteur SEN-0257 est un capteur absolu, qui peut mesurer la pression au contact de l'air ou de l'eau mais non immersible).



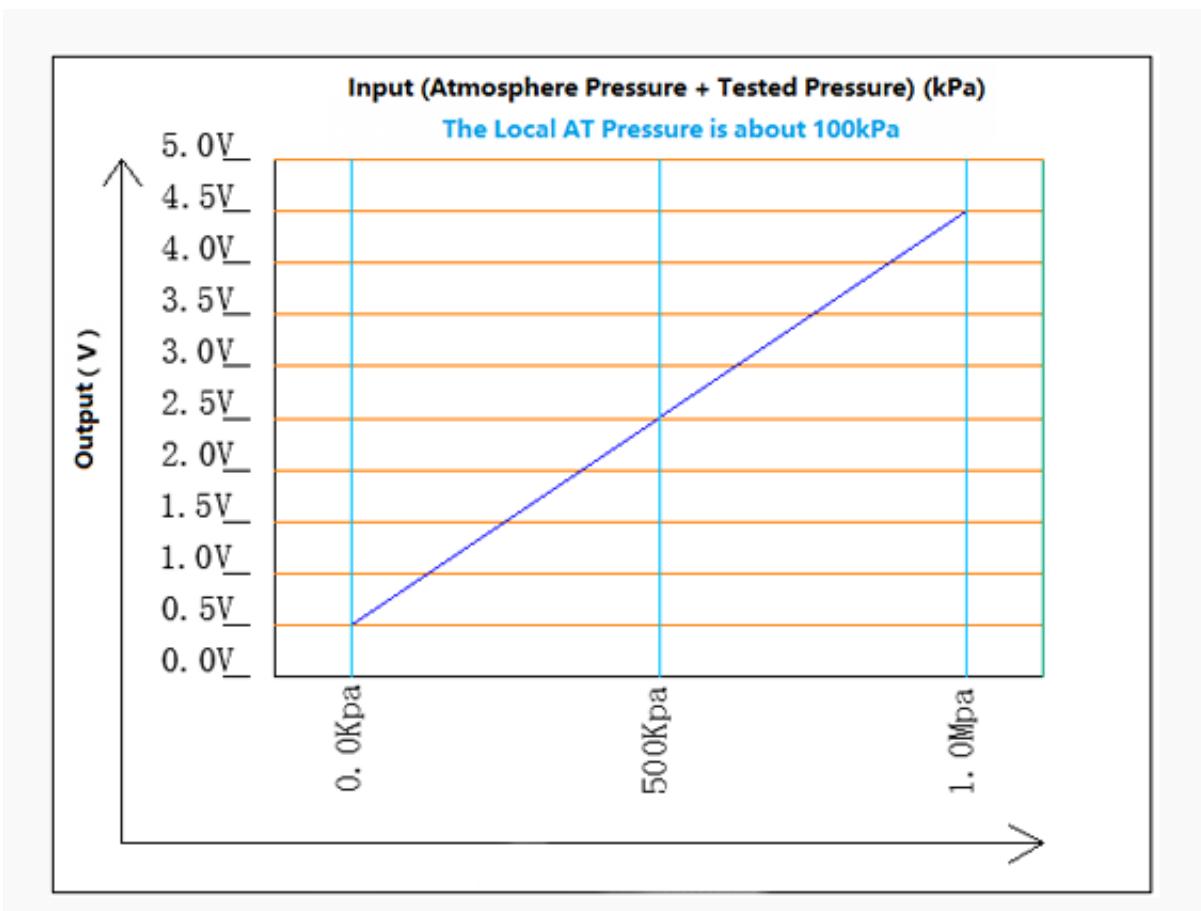
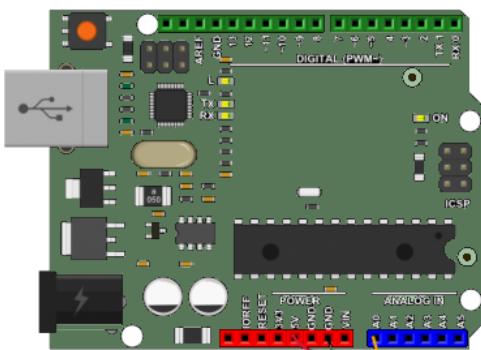
### Extrait de la documentation du fabricant

Application : détection de la pression de l'eau dans des réservoirs, des tuyaux, etc...

Remarques : ne pas dépasser les 3 Mpa de pression appliquée sur le capteur sous peine de l'endommager. Nécessite un joint et du ruban PTFE non inclus pour le montage.

Caractéristiques :

- Alimentation : Vcc
- Consommation : 2 mA
- Interface : tension analogique de 0,5 à 4,5 Vcc
- Connecteur Gravity 3 broches (Signal, Vcc, GND)
- Plage de mesure : 0 à 1 Mpa
- Précision : 0,5 à 1 % de la pleine échelle
- Temps de réponse : < 2 ms
- Raccordement : filet 1/4" et adaptateur filet 1/2"
- Température de service : -20 à 85°C
- Dimensions de la sonde : 22 x 59 mm
- Longueur du cordon : 1 m



## TP THERMODYNAMIQUE 2 - Thermométrie et Hydrostatique

### **Liste de matériel pour chaque poste - 6 postes**

- Un thermocouple + adaptateur FOXY + carte FOXY ;
- Un capteur thermistance CTN ;
- Un capteur IR SEN0256 ;
- Plaquette ARDUINO avec shield grove + câble USB + connectique micro-fils (4 liaisons par capteur) ;
- 4 connections micro-fils vers banane (pour relier les capteurs au multimètre ou carte Foxy) ou pinces croco ;
- Une bouilloire électrique ;
- Un agitateur pour la bouilloire (tige en bois) ;
- Un capteur de pression d'eau SEN-0257 ;
- Un tuyau transparent de même diamètre connecté au capteur de façon étanche ;
- Une grande éprouvette (50 cm minimum de hauteur) ;
- Une alimentation  $\pm 15$  V (le moins bruitée possible, éventuellement réglable à 5 V) ;
- Voltmètre numérique ;
- Un support orientable complet pour capteur IR : un pied à potence + 2 noix + tige + pince ;
- Une lampe de bureau avec ampoule à incandescence classique ou halogène ;
- Un ordinateur avec Python (et librairie Pyserial), avec LibreOffice ou Excel, connecté à l'imprimante.

### **Liste de matériel partagé**

- glaçons ;
- un récipient (plastique de préférence) pour glaçons fondant ;
- chiffons nettoyage (chute d'eau) ;
- ruban adhésif, pour fixer les thermomètres ;
- imprimante avec papier.