

Cours Capteurs et Instrumentation

CH-4: Capteurs pour les Applications Embarquées et IoT

Par:

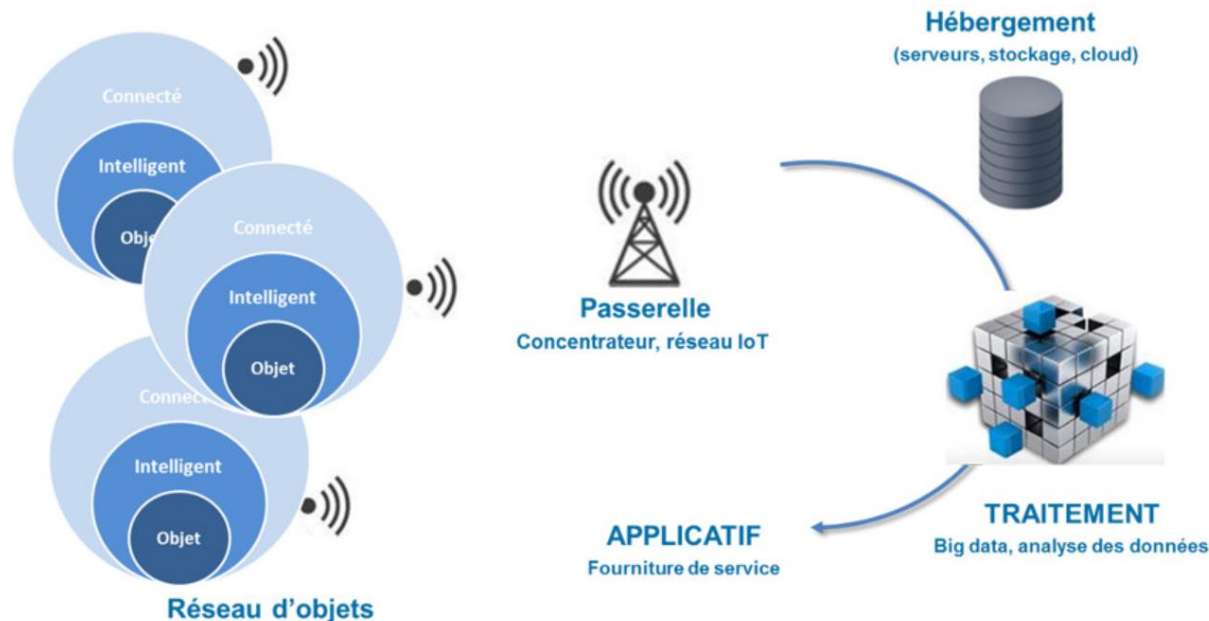
LASSIOUI Abdellah

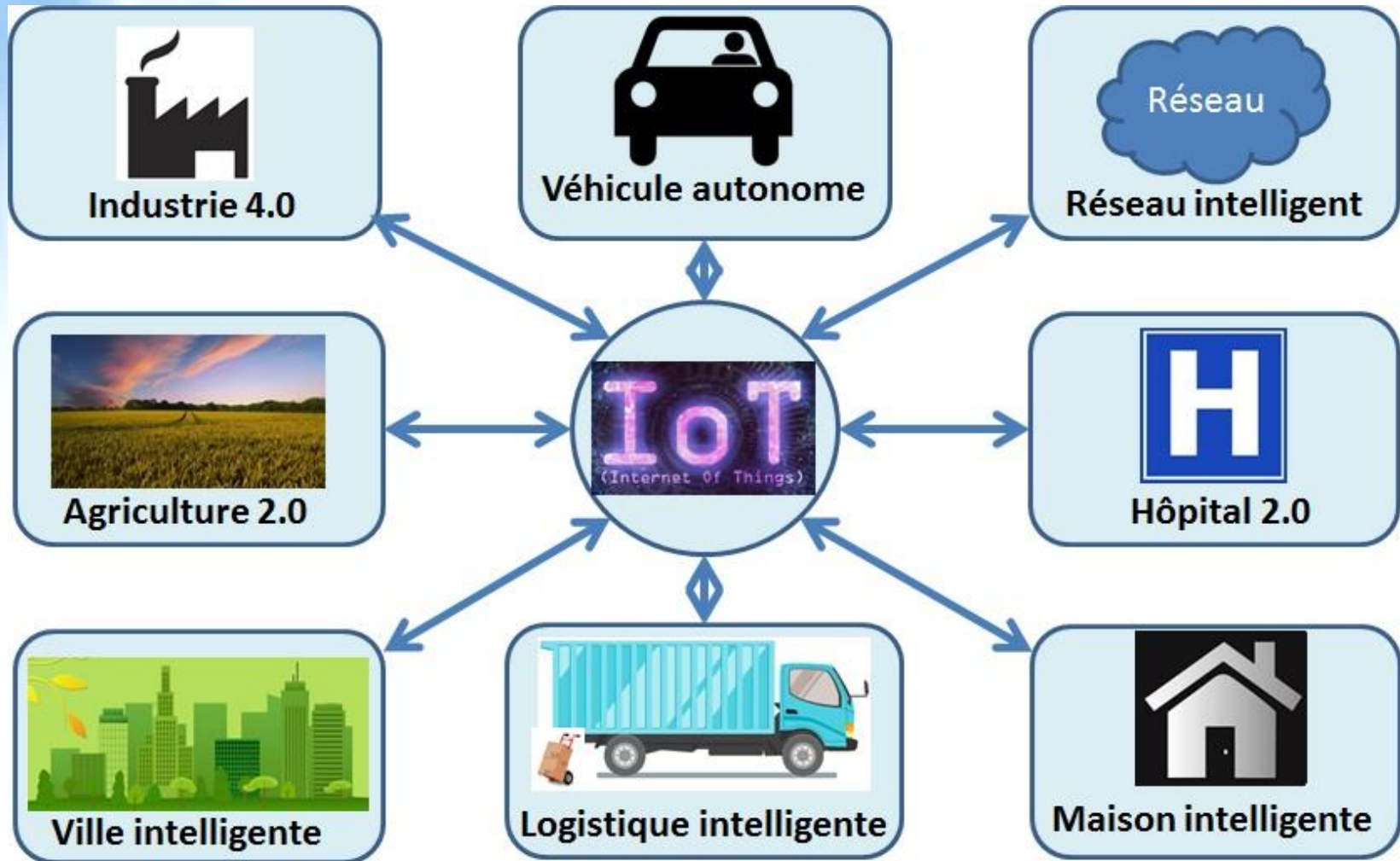
1. Le domaine IoT (Internet des Objets)

1.1. définition

Un système IoT (Internet of Things) ou IIoT (Industrial IoT) réunit de nombreuses fonctions et composantes technologiques.

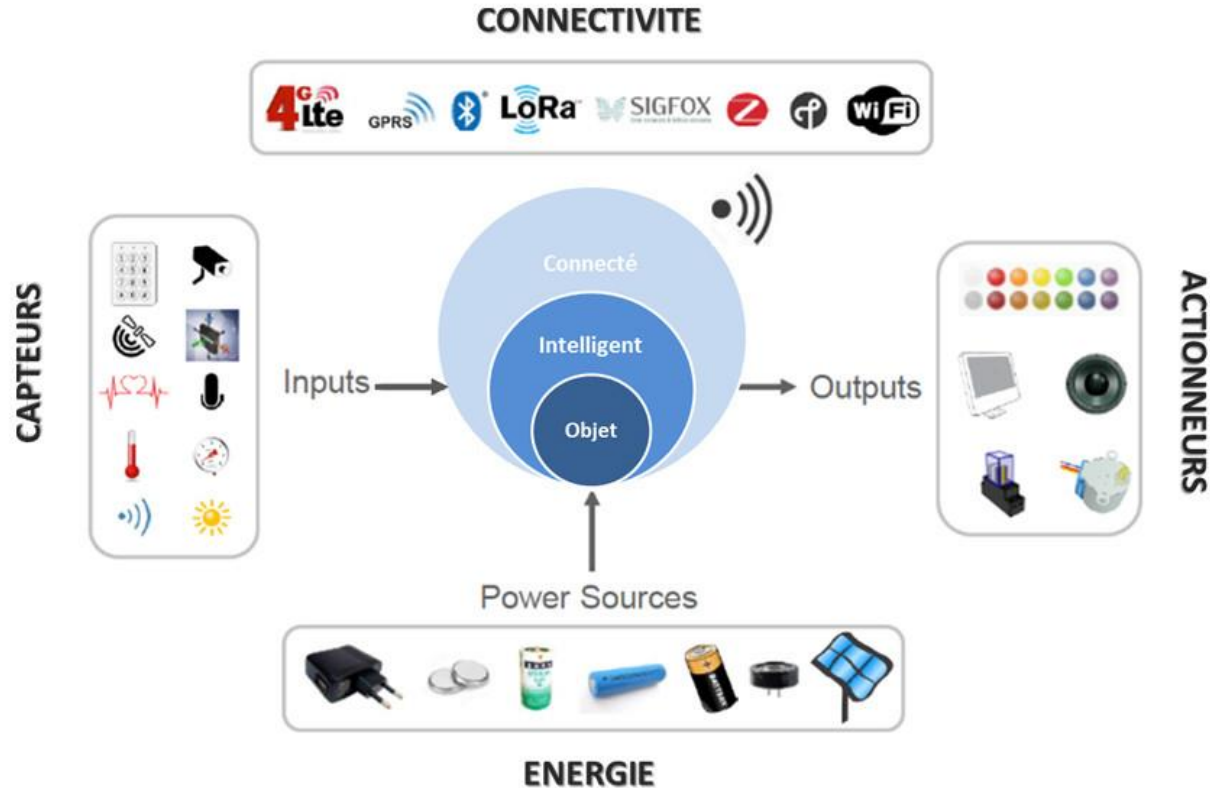
- *Objets connectés,*
- *Réseaux de communication sans fil,*
- *Plateformes de collecte/d'hébergement/de traitement des données (Cloud Computing),*
- *Applications/services pour les utilisateurs finaux*
- *Supervision/sécurisation de toute la chaîne*





1.2. Les fonctions de l'objet connecté

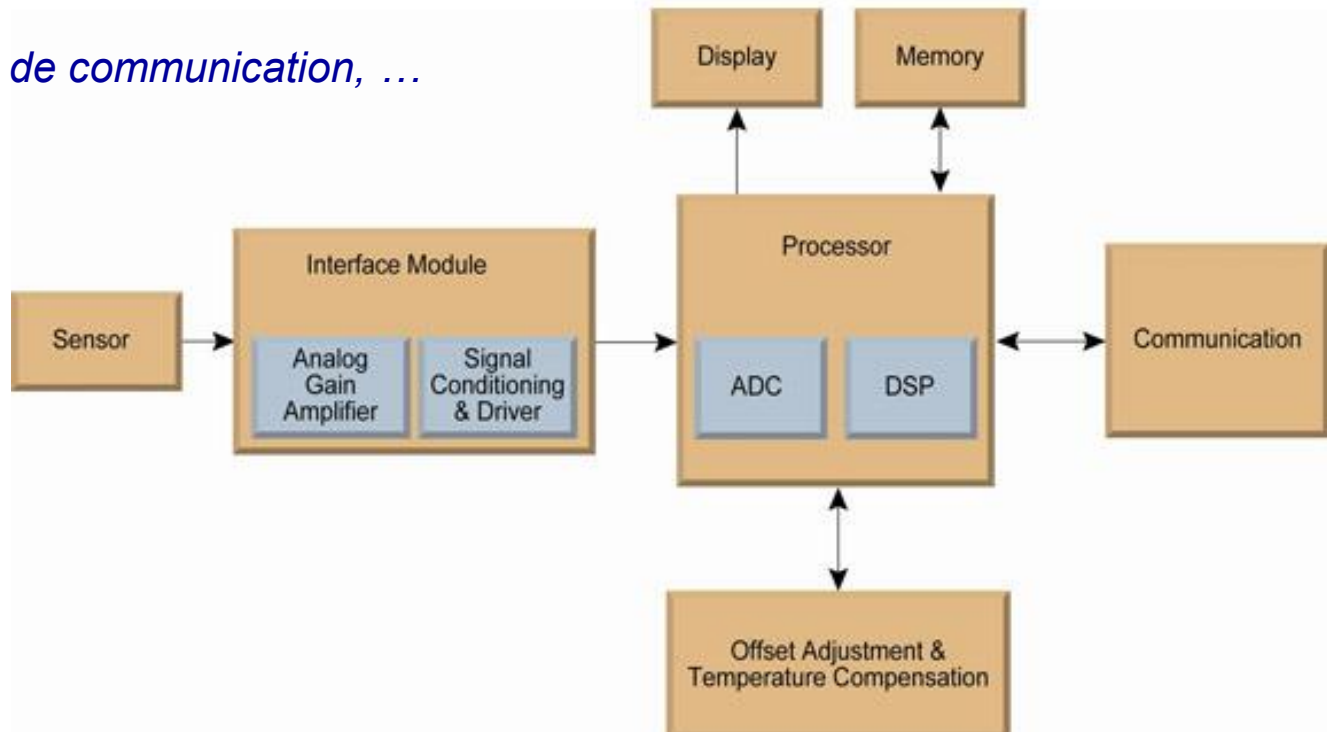
Un **objet connecté** a pour fonction de collecter des données de capteurs, de traiter ces données et de les communiquer à l'aide de d'une fonction de connectivité et de recevoir des instructions pour exécuter une action.



1.3. Architecture globale d'un capteur intelligent

En général, les capteurs intelligents intègrent:

- *Un élément de détection, le front-end analogique*
- *Un étage d'amplification et de conditionnement*
- *Un convertisseur analogique-numérique*
- *Une unité de traitement numérique pour fournir une sortie numérique linéarisée*
- *Des mémoires*
- *Des interfaces de communication, ...*

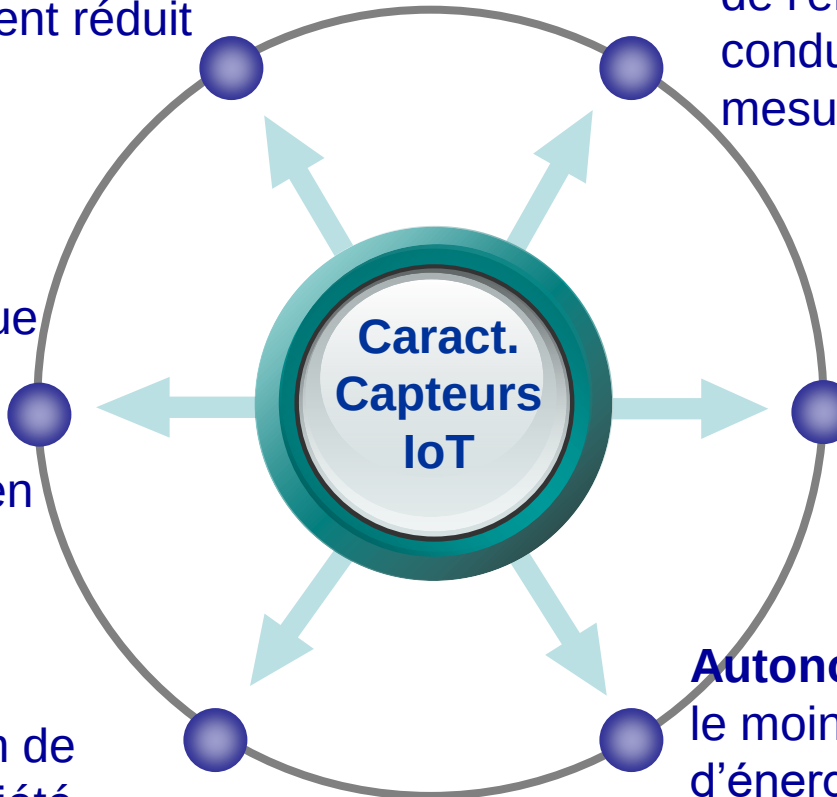


3.5. Caractéristiques des capteurs IoT

Compacité: Encombrement réduit

Traitement embarqué:
associé à une électronique
qui permet la réalisation
de certains traitements
embarqués pour fournir en
temps réel les résultats

Robustesse: conçus afin de
fonctionner dans une variété
de conditions environnementales



Fiabilité: Le vieillissement
de l'électronique ne doit pas
conduire à la dérive des
mesures.

Valeurs mesurées:
sélectionné selon
la plage de
mesure et l'incertitude
de mesure répondant
aux exigences de
l'application IoT

Autonomie: doit consommer
le moins possible
d'énergie pour éviter le
changement fréquent de
batteries

4. Capteurs du domaine de l'IoT et l'embarqué

Different Types of Sensors



4.1. Capteurs de température et d'humidité

1. Capteur de température DS18B20 de Maxim Integrated (numérique)

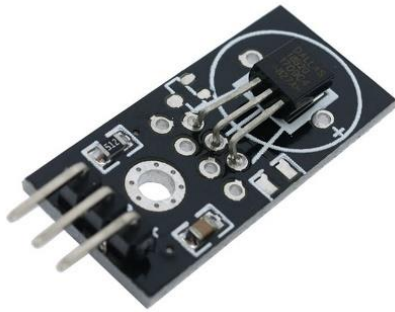
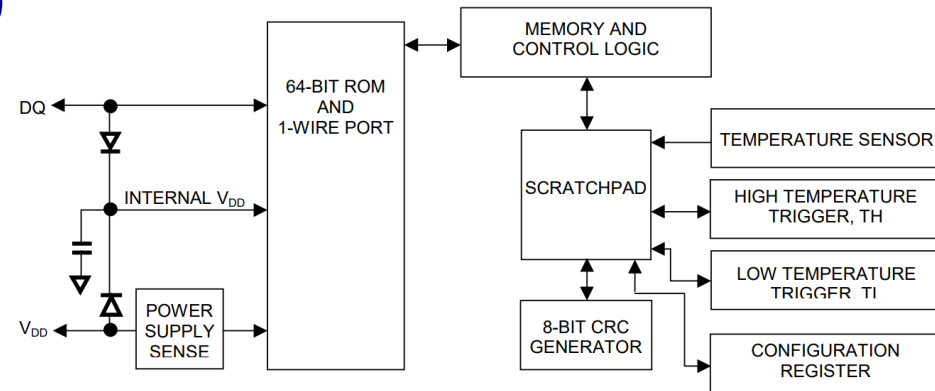
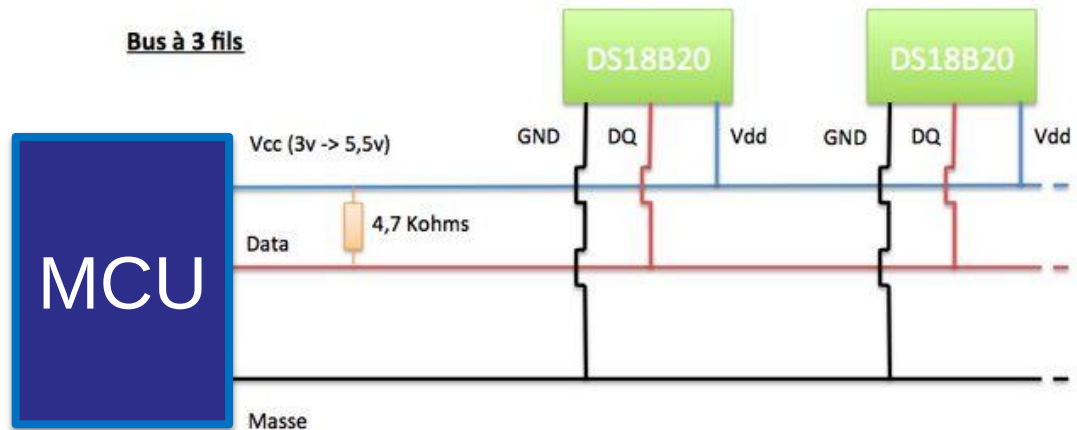


Schéma bloc du capteur



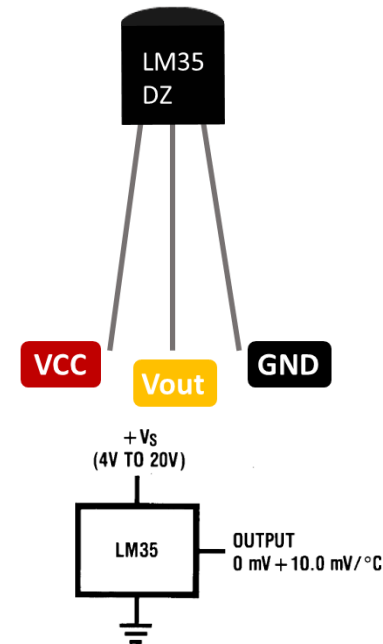
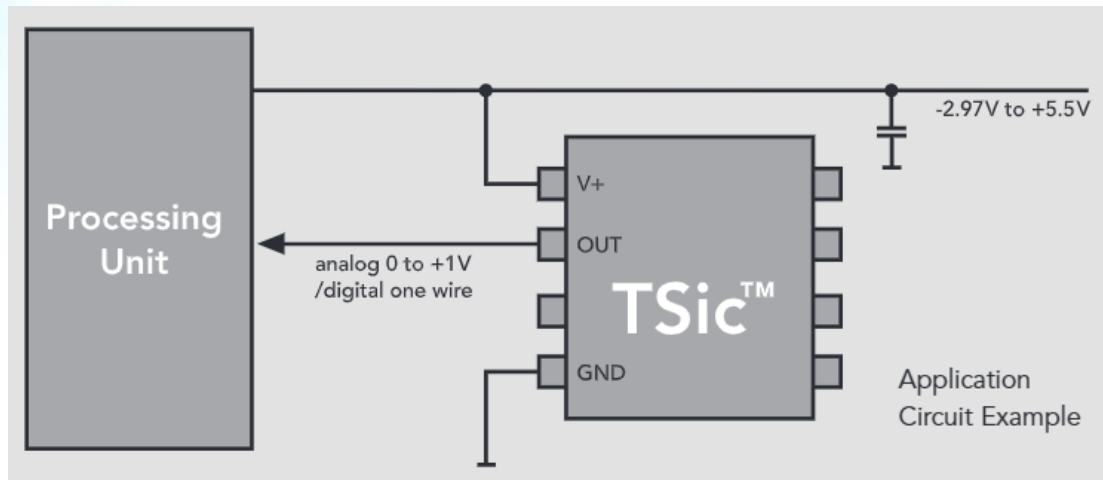
Liaison du Capteur avec le MCU



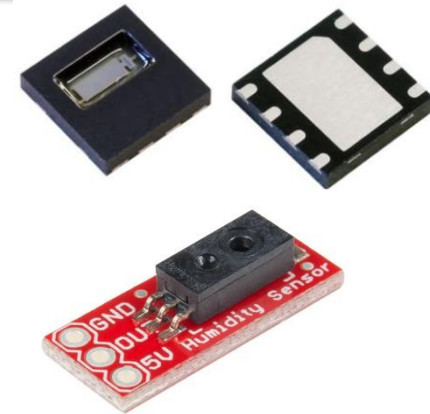
2. Capteur de température **TSIC206 (analogique).**
TSIC206D (numérique)
3. Capteur de température **LM35 (analogique)**



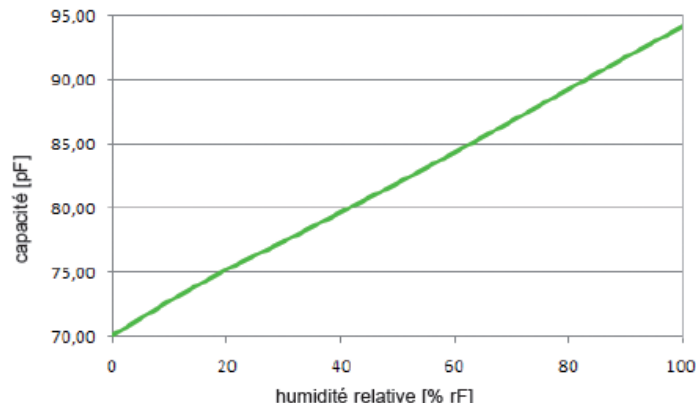
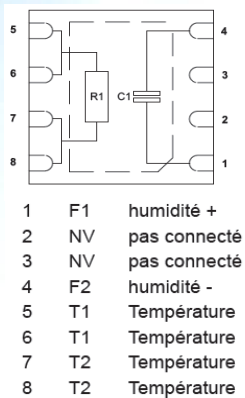
Liaison du capteur TSIC206 avec le MCU



4. Capteur d'humidité et de température **HCT01** (analogique)
5. Capteur d'humidité capacitif **HIH-4030** de Honeywell (analogique)



Evolution de la capacité de HCT01 en fonction de l'humidité

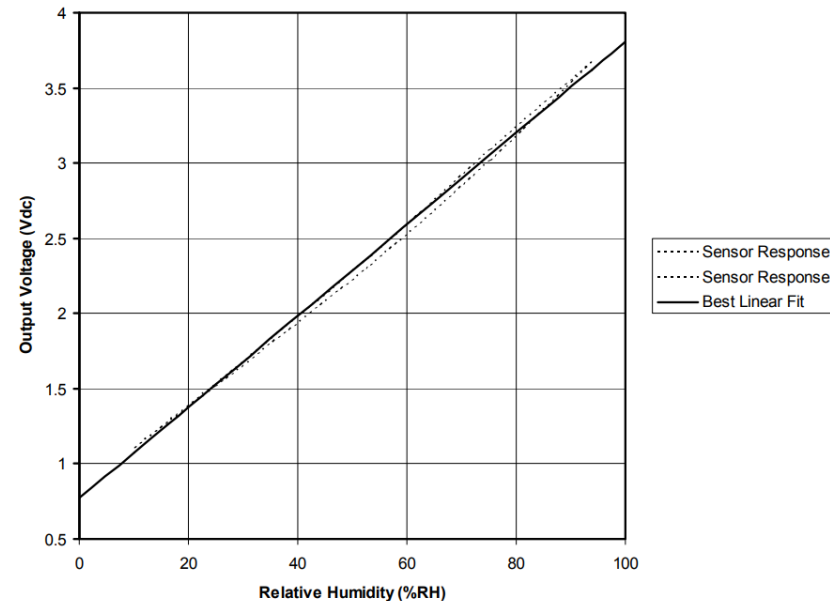


$$C(U_w) = C_0 * [1 + HC_0 * U_w]$$

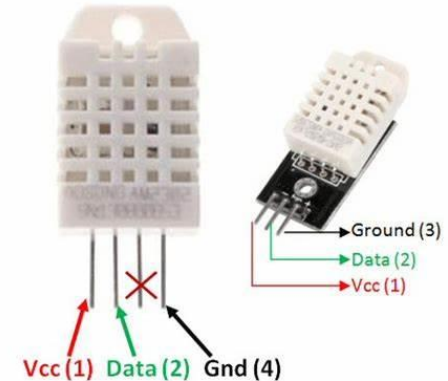
avec $HC_0 = 3420 \pm 191 \text{ ppm / \% HR}$

$$C_0 = 70 \text{ pF}$$

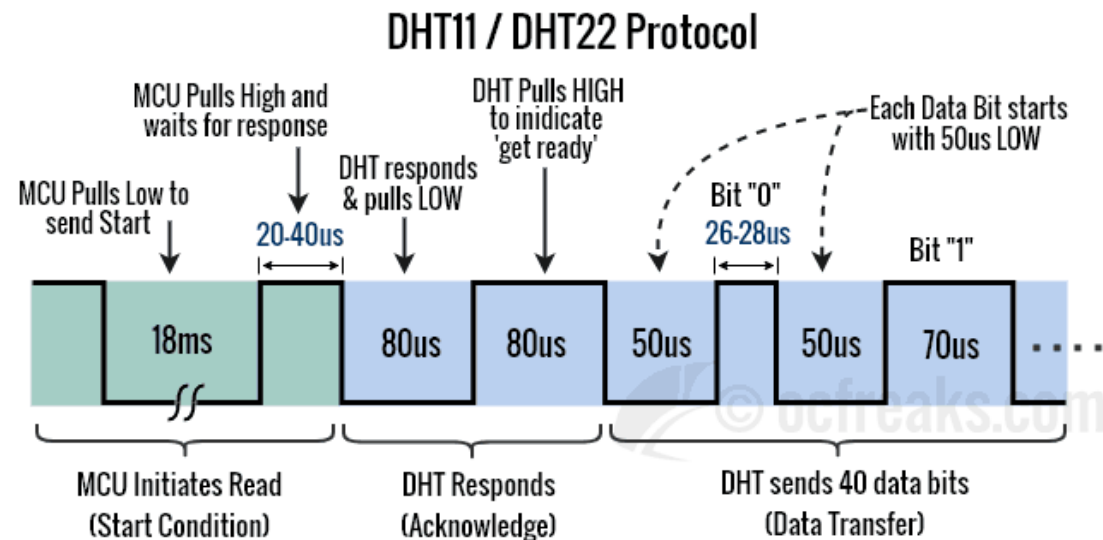
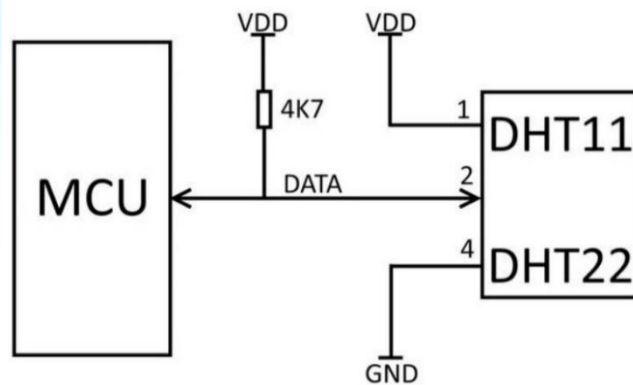
Evolution de la tension de sortie de HIH-4030 en fonction de l'humidité



6. Capteur d'humidité et de température DHT11, DHT22 de Adafruit (numérique).



Protocole de communication entre le MCU et le DHT11/DHT22

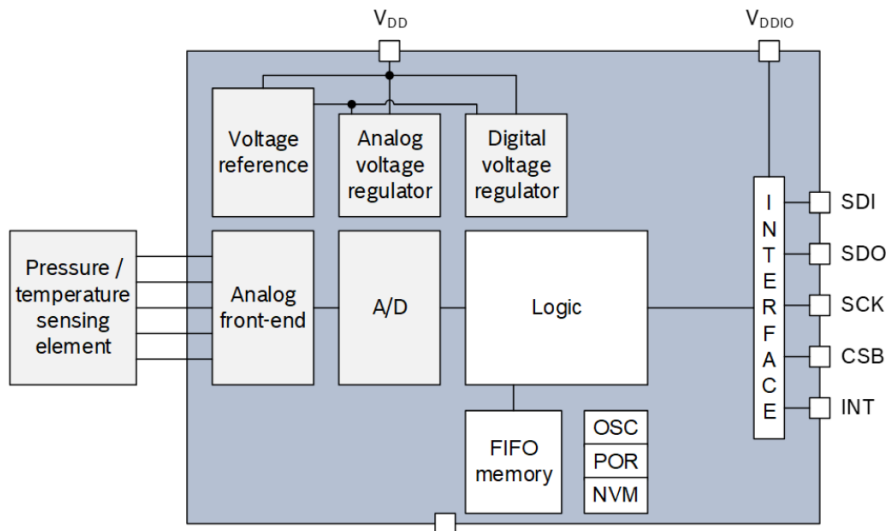


4.2. Capteurs de pression et de débit

1. Capteur de pression absolue **BMP388** de Bosch Sensortec (**numérique**).



Schéma bloc du capteur de pression BMP388



The I²C interface uses the following pins:

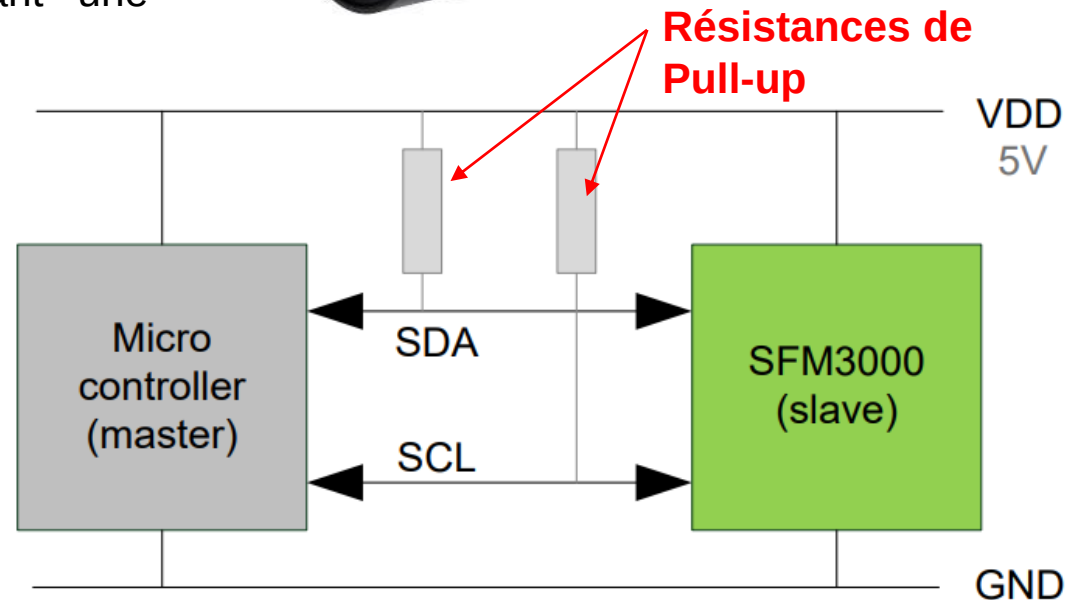
- SCK: serial clock (SCL)
- SDI: data (SDA)
- SDO: Slave address

3. Capteur de débit massique SFM3000 de Sensirion (numérique)

Le SFM3000 est un capteur de débit massique d'air et de gaz développé par Sensirion. Il est particulièrement utilisé pour les applications médicales (ventilateurs, respirateurs) et industrielles nécessitant une mesure précise du débit d'air.

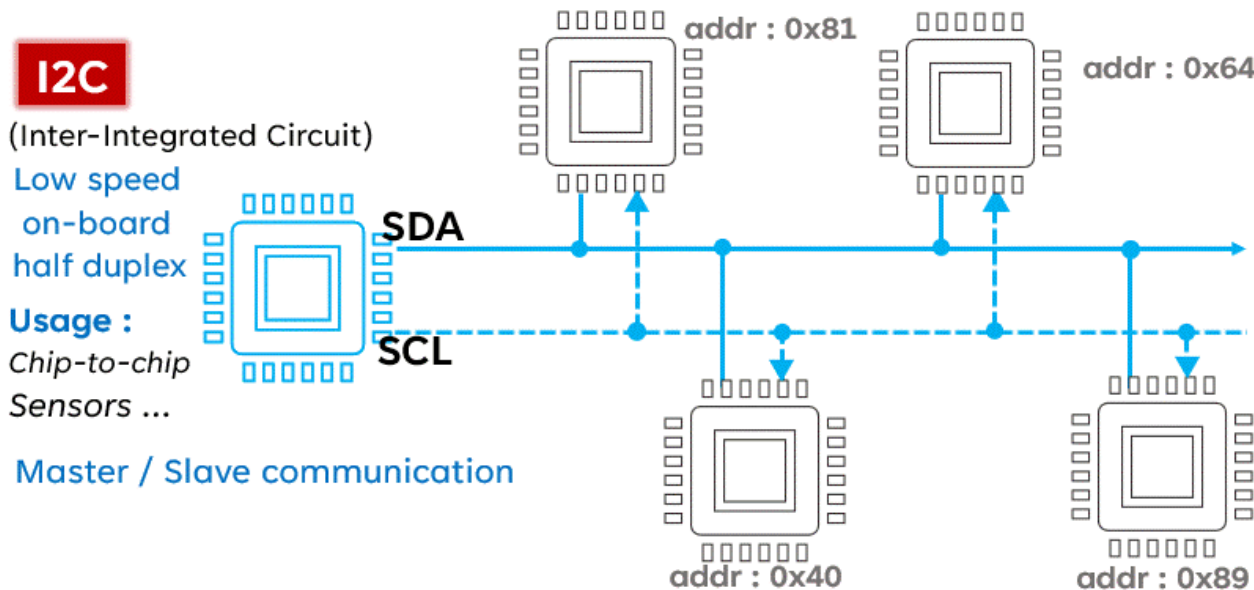


SFM3000 avec une communication bidirectionnelle (Bus I2C)



Les lignes SDA et SCL

- Le bus utilise deux lignes pour la communication entre le maître et les esclaves: SDA et SCL
- Le maître peut accéder à n'importe quel esclave avec une seule adresse envoyée à travers SDA



www.parlezvoustech.com

La couche physique du bus I2C

- Cette structure permet de protéger le bus I2C contre un état destructrice (court-circuit entre VDD et GND (**Push-Pull**))
- Dans ce cas, nous avons le NMOS du nœud 1 qui est ON alors et le NMOS du nœud 2 OFF alors la ligne SCL est mise au niveau logique 0.
- Elle s'agit d'une connexion de **type AND**: la sortie est le AND de toutes les entrées

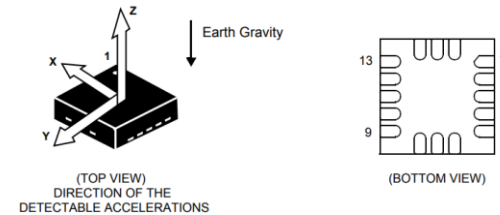
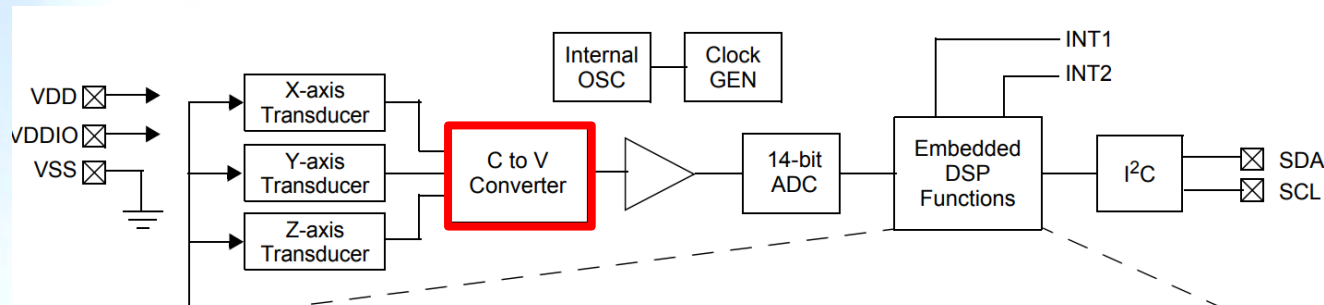


4.3. Capteurs de mouvement

1. Accéléromètre MEMS MMA8451Q de NXP (numérique).

Capteur capacitif: Mesure l'accélération dans trois directions : x, y et z

Schéma bloc du l'Accéléromètre MMA8451Q



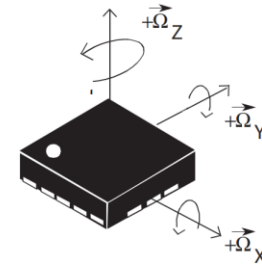
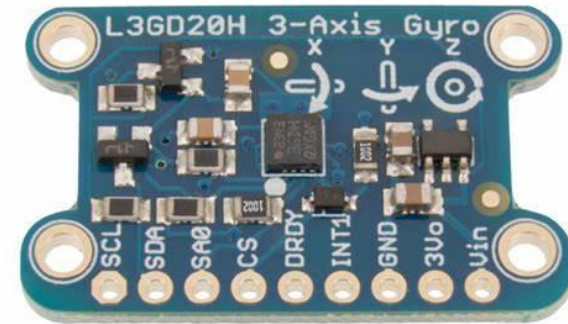
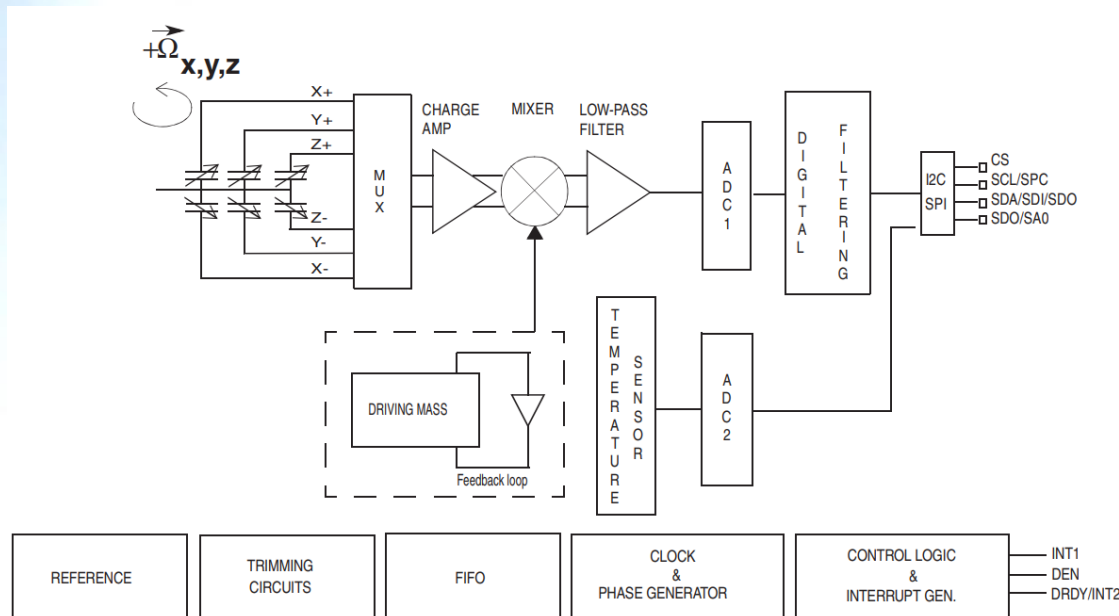
Le MMA8451Q est basé sur la technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Il fonctionne selon les principes suivants :

- 1.Capteur MEMS** : Une structure microscopique suspendue subit une déviation lorsqu'elle est soumise à une accélération.
- 2.Variation de capacité** : Cette déviation modifie la capacité entre des plaques fixes et mobiles.
- 3.Conversion électronique** : Un circuit interne convertit cette variation en un signal numérique via un **CAN 14 bits**.
- 4.Sortie numérique I²C** : L'accélération sur **les axes X, Y et Z** est transmise via le protocole I²C au microcontrôleur.

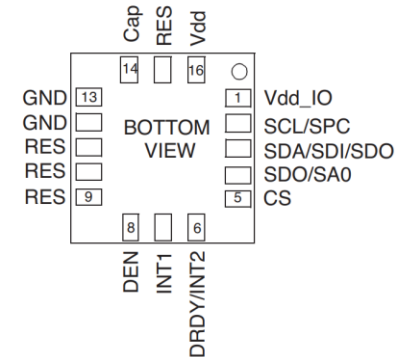
2. Gyroscope MEMS L3GD20H de STMicroelectronics (numérique).

Mesure l'orientation angulaire ou la rotation d'un objet
autour de 3 axes (x,y,z)

Schéma bloc de Gyroscope L3GD20H



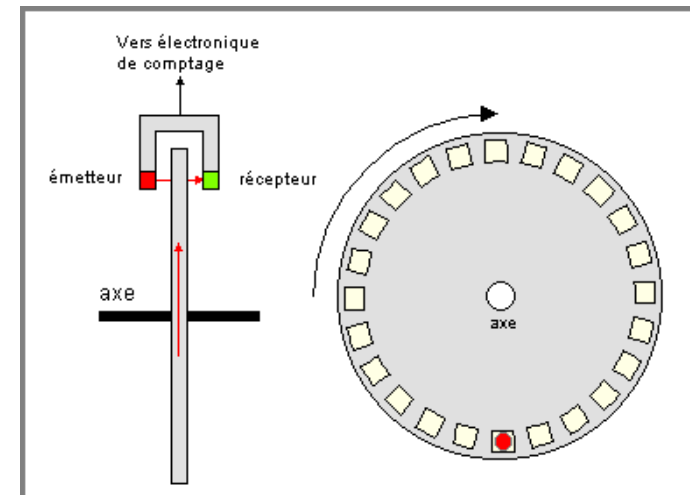
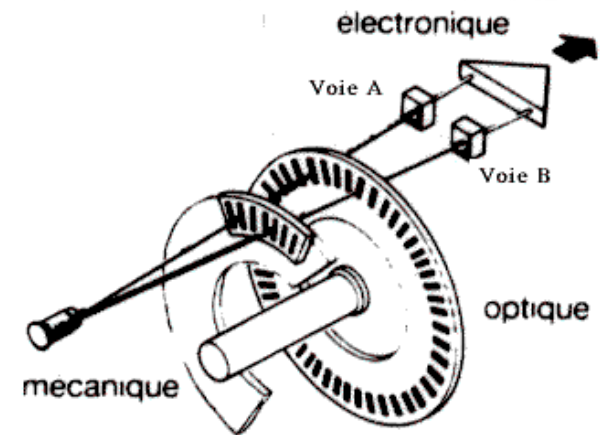
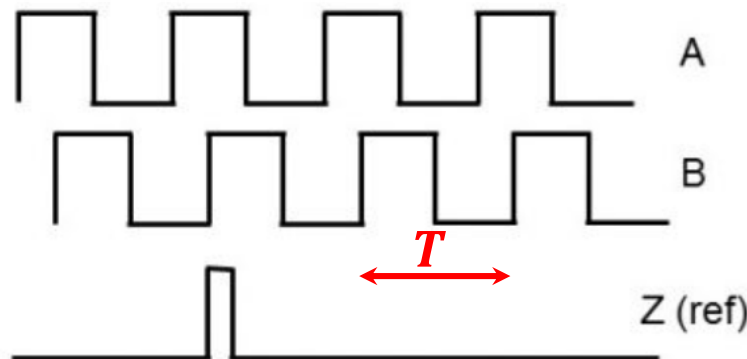
(TOP VIEW)
DIRECTIONS OF THE
DETECTABLE
ANGULAR RATE



Interfaces série possibles:
I2C et SPI

3. Codeur Incremental:

- Permet de mesurer la **position angulaire** (cas des moteurs par exemple)
- Il comporte deux pistes:
 - piste extérieure (A ou A et B)
 - et piste intérieure (Z).
- En mesurant le **nombre d'impulsions** du signal A ou B on peut connaître la **position** et la **vitesse** de rotation.



3. Codeur Incrémental:

$$Pas = \frac{2\pi}{n}$$

n : nombre de trous dans le disque

N_i : nombre d'impulsions générées

T : Période du signal A ou B

θ : position en rad

Ω : vitesse de rotation en rad/s

Position angulaire:

$$\theta = N_i \times Pas$$

Vitesse angulaire:

$$\Omega = \frac{Pas}{T}$$

Exemple:

XCC1510PS50Y



Characteristics

Residual ripple	0...500 mV
Maximum revolution speed	9000 rpm
Shaft moment of inertia	0 lb.in ² (10 g.cm ²)
Torque value	0.04 lbf.in (0.004 N.m)
Maximum load	5 daN axial 10 daN radial
Output frequency	300 kHz
Number of channels	3

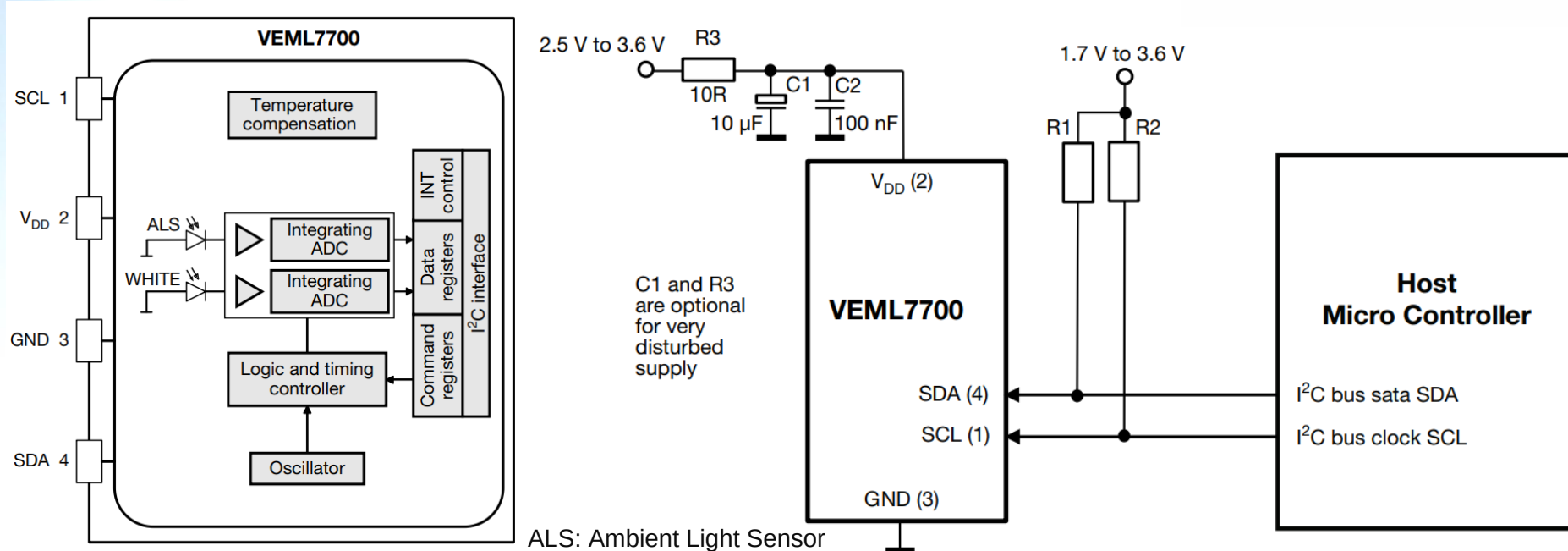
4.4. Capteurs de lumière et de couleur

1. Capteur de lumière ambiante VEML7700 de Vishay (numérique).

Un capteur **ALS (Ambient Light Sensor)** mesure l'intensité de la lumière ambiante en **lux** pour ajuster automatiquement l'éclairage des dispositifs électroniques ou surveiller les conditions lumineuses d'un environnement.

Liaison du Capteur de lumière ambiante VEML7700 avec le MCU

Schéma bloc



2. Capteur de couleur TCS3200 de AMS (numérique).

Principe de fonctionnement

1. Matrice de photodiodes

: Le capteur contient une grille de **64 photodiodes** (16 rouges, 16 vertes, 16 bleues, et 16 sans filtre).

2. Filtrage de la couleur :

En activant un groupe de photodiodes (rouge, vert ou bleu), il détecte l'intensité de cette couleur dans la lumière réfléchie.

3. Conversion fréquence-couleur : L'intensité lumineuse est convertie en un signal de fréquence via un oscillateur interne.

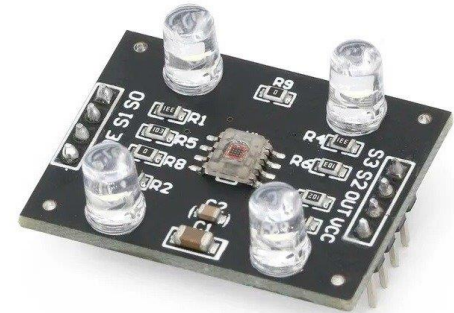
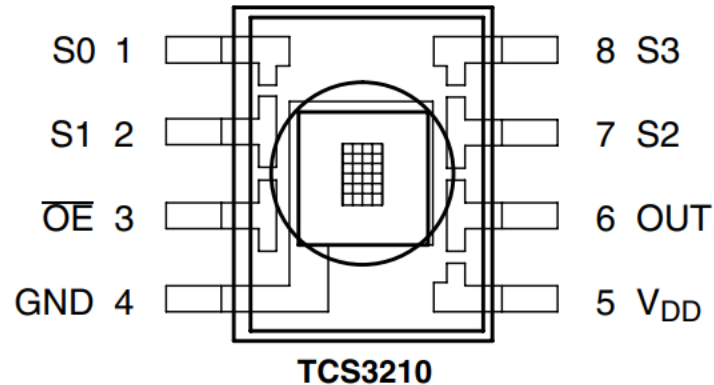
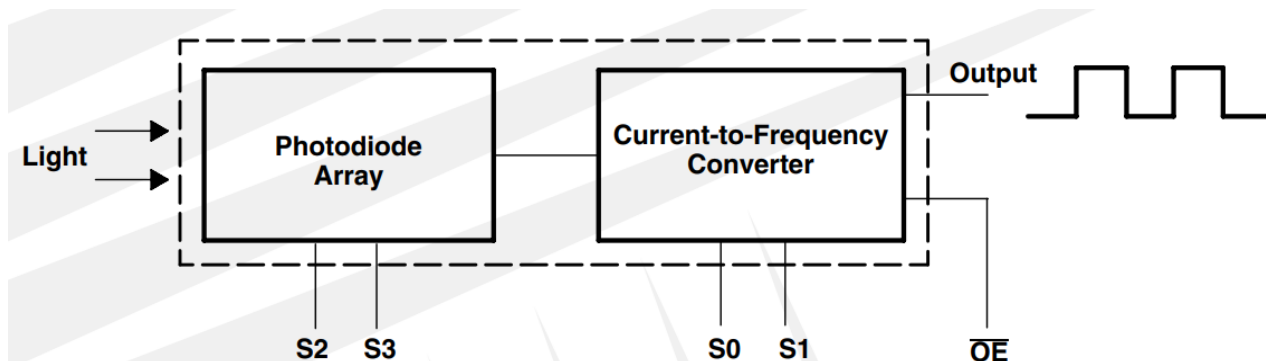


Schéma bloc du Capteur de couleur TCS3200



Le choix du type de photodiodes activées se fait via les broches **S2** et **S3** du capteur.

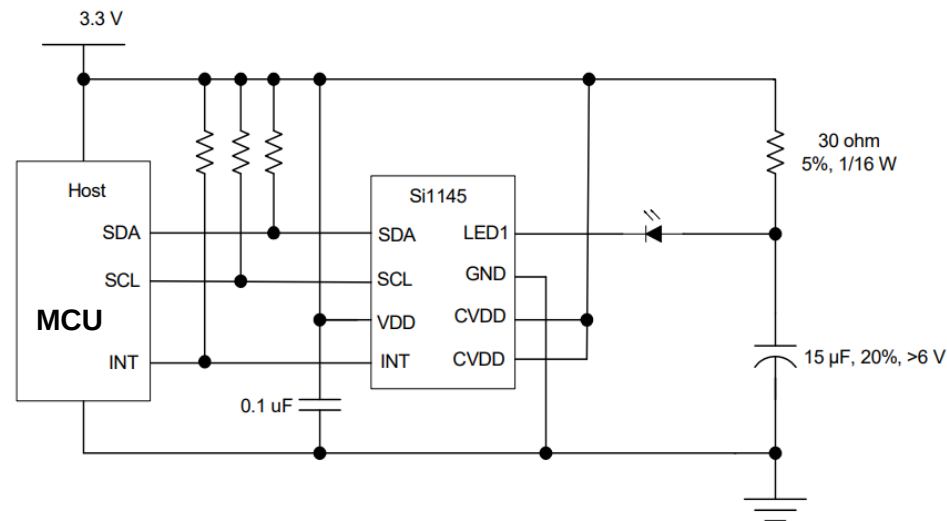
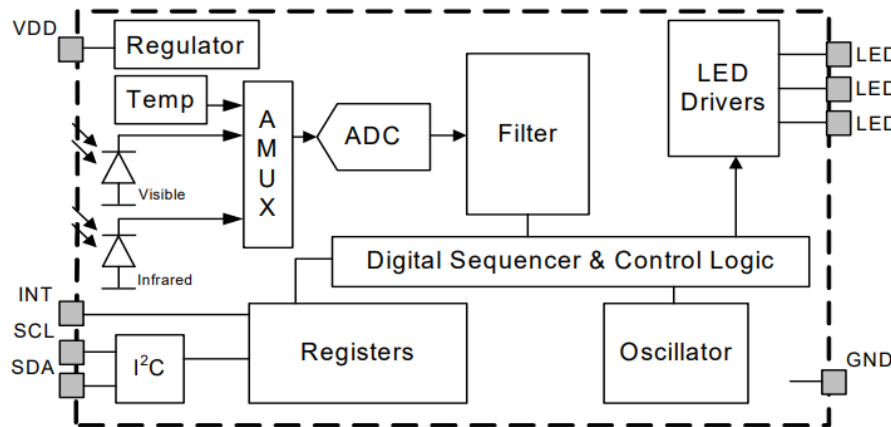
3. Capteur de lumière UV SI1145 de Silicon Labs (numérique).

Utilisation: Dispositifs de bien-être et de santé : Pour prévenir les coups de soleil ou le cancer de la peau, en mesurant l'exposition aux rayons UV.



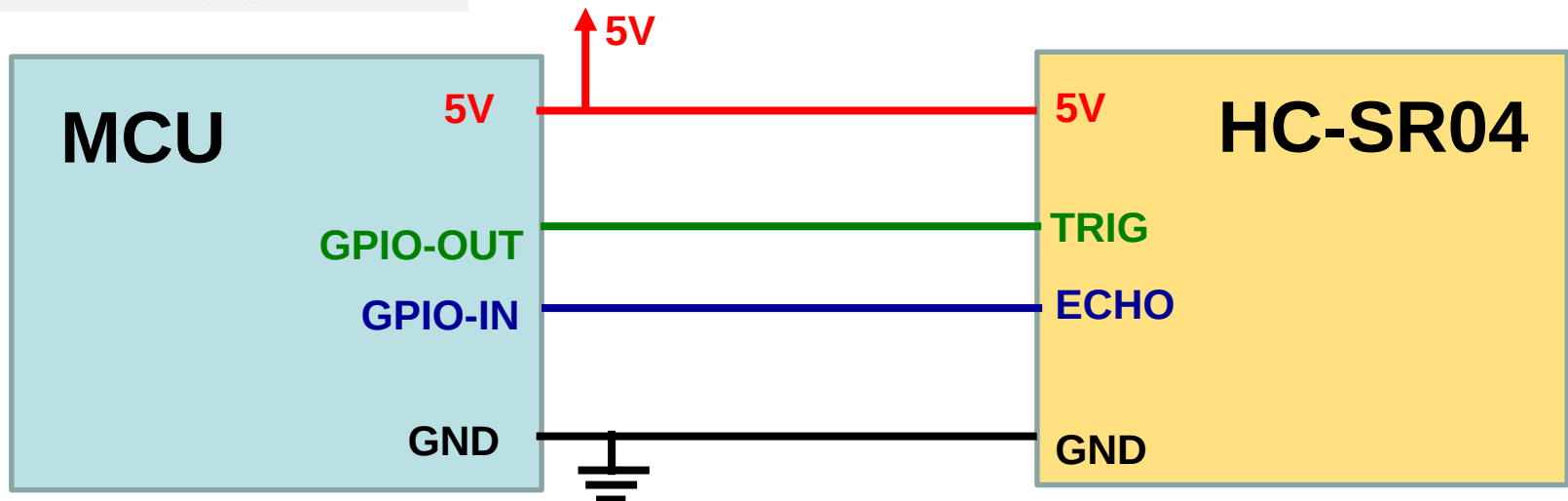
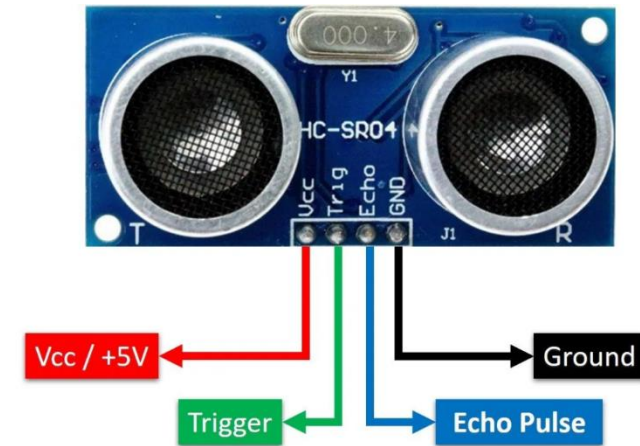
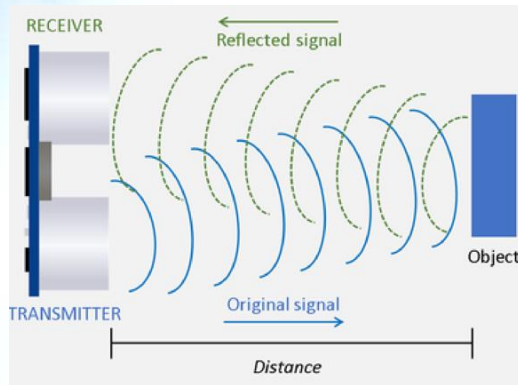
Schéma bloc du Capteur de lumière UV SI1145

Liaison avec le microcontrôleur



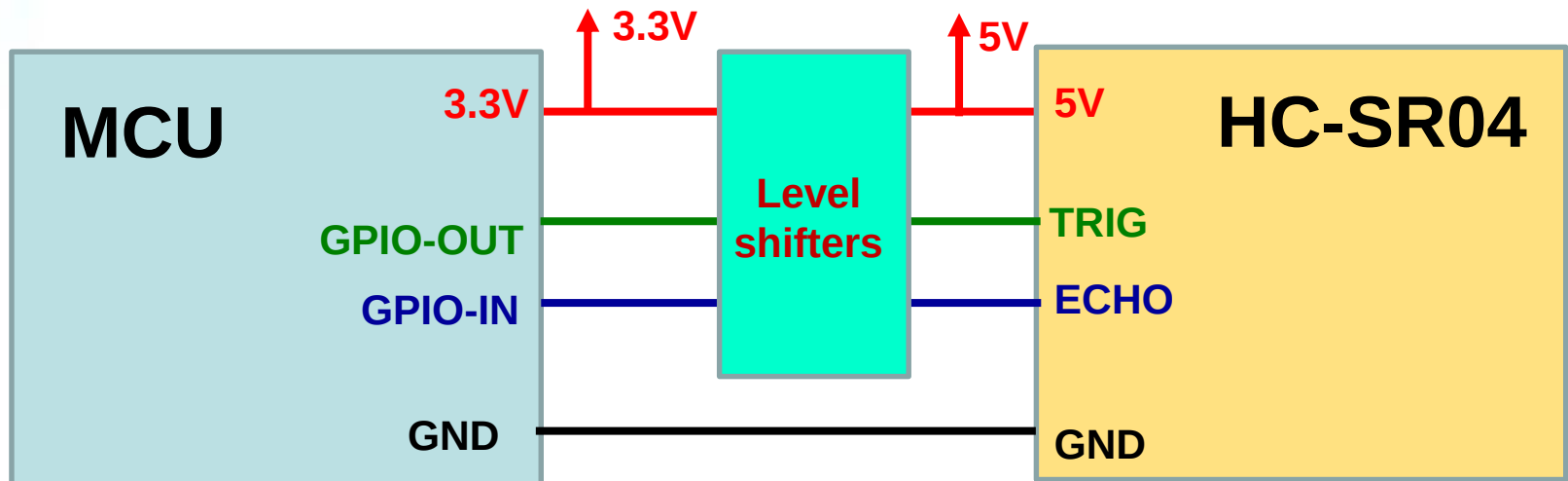
4.5. Capteurs de proximité et de présence

1. Capteur de proximité à ultrasons HC-SR04 de Maxbotix (numérique).



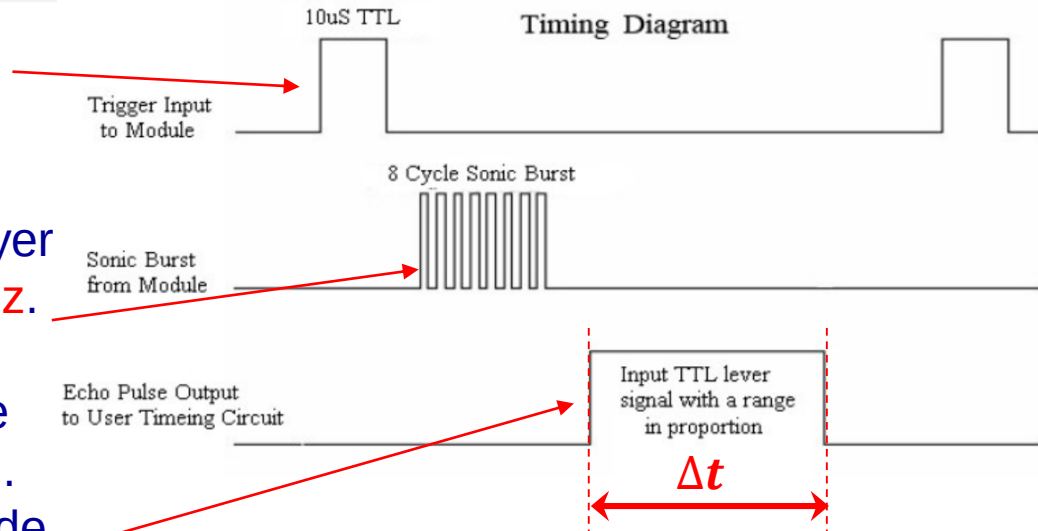
Remarque:

- Si vous utilisez une carte ou un microcontrôleur alimenté en 3.3 volts, vous devrez peut-être utiliser des adaptateurs de niveau logique (**level shifters**: adaptateur de niveau logique) pour adapter les niveaux logiques entre le HC-SR04 et le microcontrôleur.
- Pour créer un level shifter, vous pouvez utiliser des composants tels que des transistors, des diodes, des résistances et parfois des circuits intégrés spécifiques comme le 74HC4050 ou le 74HC4051.



...Capteurs de proximité et de présence

1. Le microcontrôleur envoie une impulsion HIGH de **10 μ s** sur la broche TRIG du HC-SR04. Cela déclenche le HC-SR04 pour envoyer une impulsion **ultrasonore** à **40 kHz**.
2. Après avoir envoyé l'impulsion ultrasonore, le HC-SR04 attend de recevoir l'écho de l'objet devant lui.
3. ECHO passe à HIGH au moment de l'envoi et revient à LOW au moment de la réception de l'écho.
4. Le microcontrôleur mesure le temps entre le **passage de (ECHO à HIGH) au passage de de (ECHO à LOW)**.
5. Ce **temps** est **proportionnel** à la **distance** entre le capteur et l'objet. La formule générale pour calculer la distance est donnée ci-contre :



$$d = \frac{v \times \Delta t}{2}$$

v : vitesse de propagation du son dans l'air ($v \approx 343m/s$)

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{343 \times 100}{10^6} (cm/\mu s) \right) \Delta t (\mu s)$$

$$d(cm) = \frac{\Delta t (\mu s)}{58}$$

2. Capteur de proximité infrarouge SHARP GP2Y0A21YK0F (analogique).

Constitué d'une combinaison intégrée de PSD (position sensitive detector), de diode électroluminescente infrarouge (IRED: infrared emitting diode) et de circuit de traitement du signal

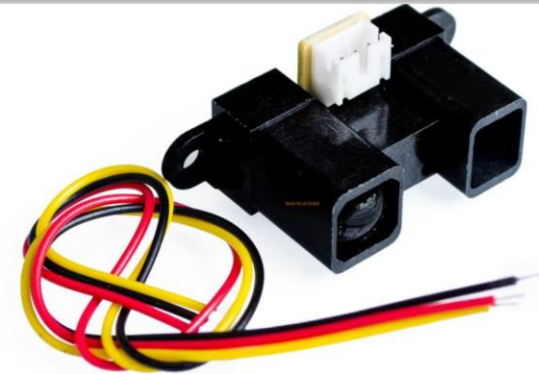
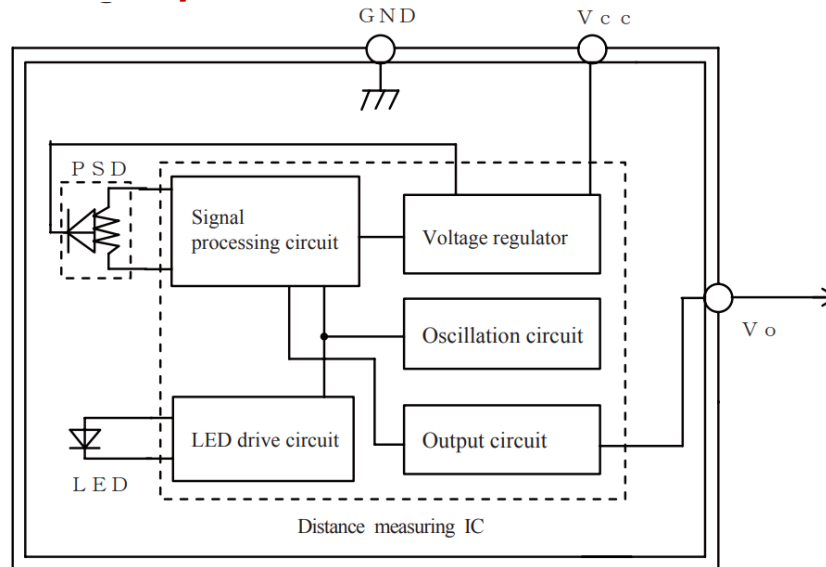
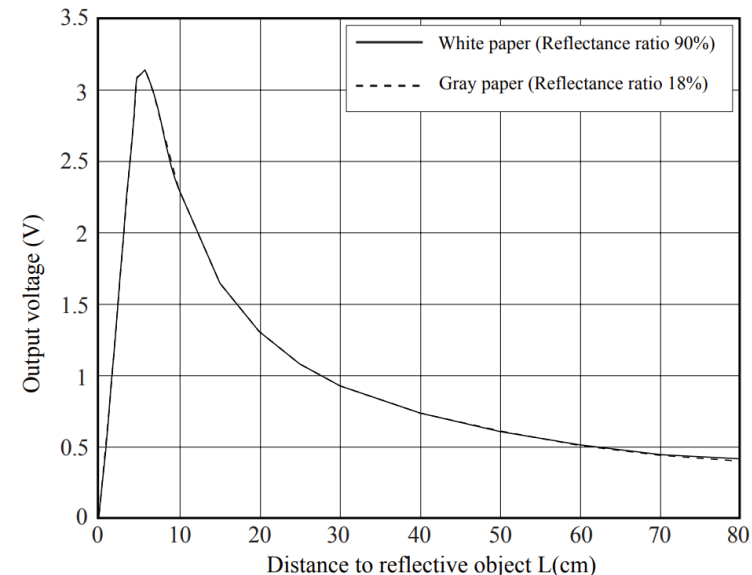


Schéma bloc du capteur GP2Y0A21YK0F



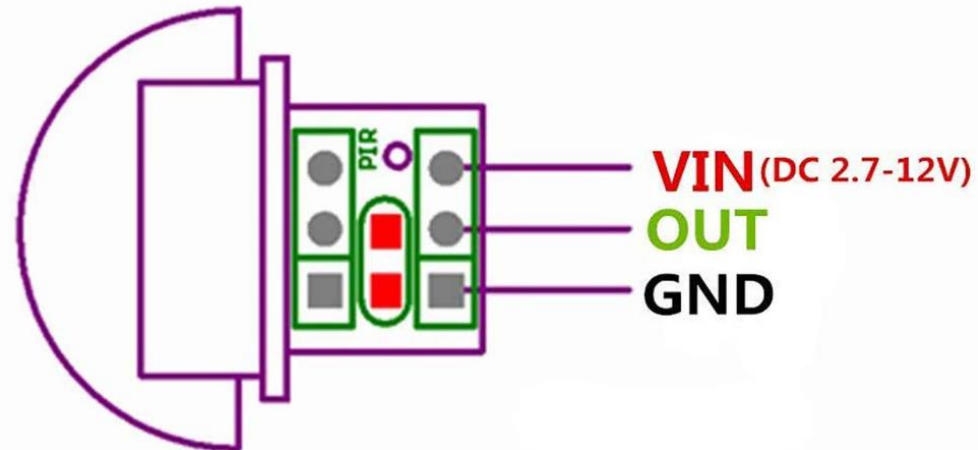
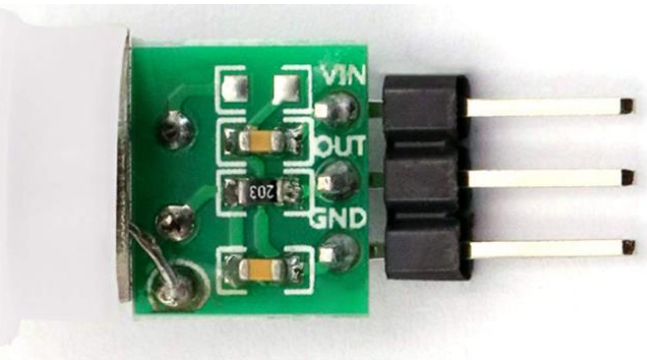
Tension de sortie en fonction de la distance



3. Détecteur de présence PIR AM312 (Analogique)

Détection du rayonnement thermique : Tous les objets émettent un rayonnement infrarouge selon leur température. Le capteur PIR contient un détecteur sensible aux variations de ce rayonnement.

La tension de sortie du PIR AM312 varie en passant d'un niveau bas à un niveau plus élevé lorsqu'un objet est détecté, puis revient à son niveau bas une fois que l'objet n'est plus présent dans la zone surveillée.



4.6. Capteurs de son et d'acoustique

1. Capteur de son omnidirectionnel (microphone) **INMP441 (Numérique).**

I2S (Inter-IC Sound) est un protocole de communication numérique utilisé pour transférer des données audio entre des composants électroniques tels que des microcontrôleurs et des codecs audio.

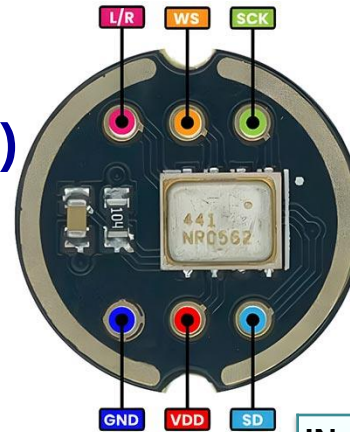
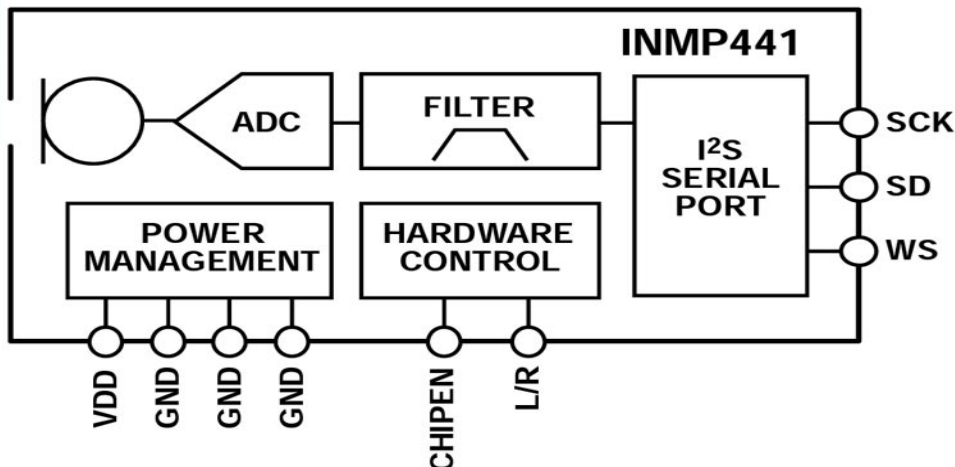


Schéma bloc du capteur INMP441

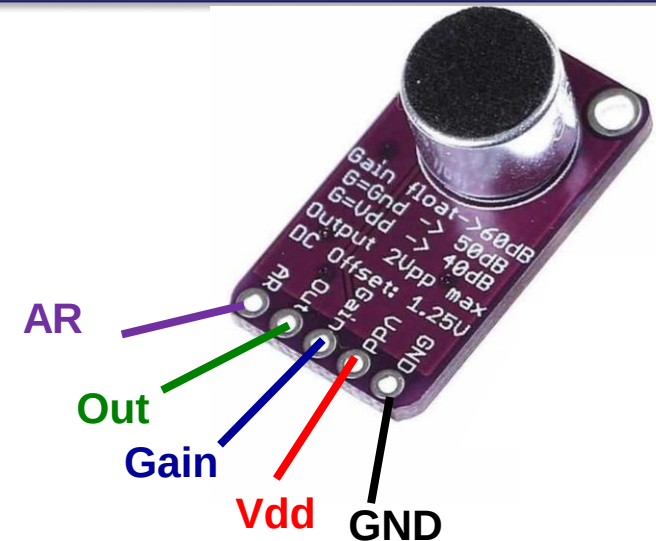
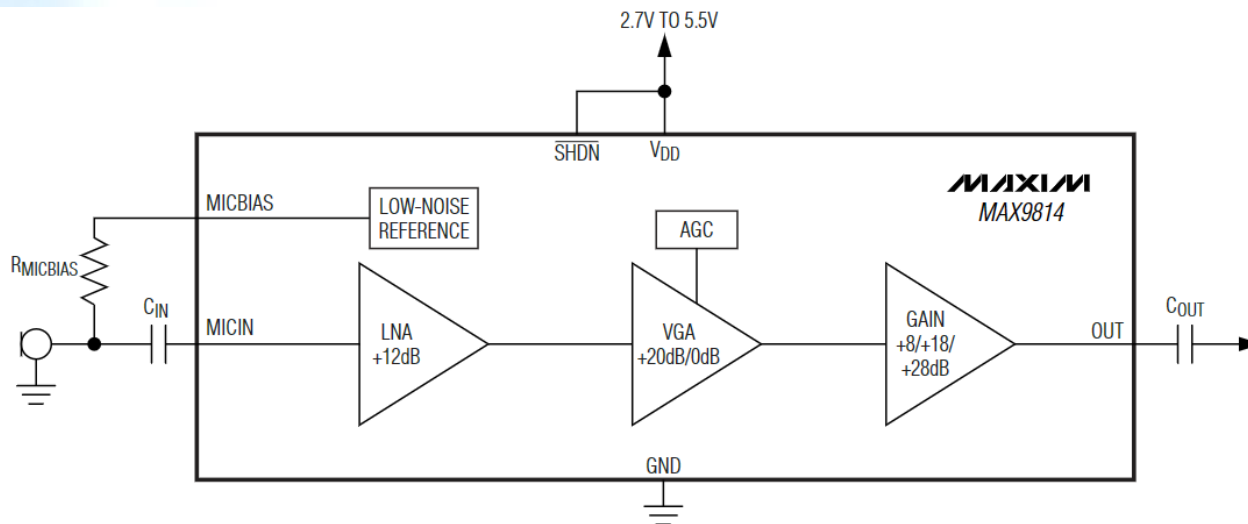


IN	FUNCTION
SCK	Serial-Data Clock for I ² S Interface
SD	Serial-Data Output for I ² S Interface. This pin tri-states when not actively driving the appropriate output channel.
WS	Serial Data-Word Select for I ² S Interface
L/R	Left/Right Channel Select. When set low, the microphone outputs its signal in the left channel of the I ² S frame. When set high, the microphone outputs its signal in the right channel.
VDD	Power, 1.8 V to 3.3 V
GND	Ground.

2. Capteur de niveau sonore MAX9814 de Maxim Integrated (Analogique).

L'**AGC** (Automatic Gain Control) ajuste automatiquement le gain de l'amplificateur en fonction du niveau de signal entrant, ce qui permet d'obtenir un signal de sortie constant même si le niveau d'entrée varie

Schéma bloc du circuit intégré MAX9814



la broche **AR** (Automatic Gain Control Release) contrôle le temps de libération de l'AGC (Automatic Gain Control), ce qui influence la manière dont l'amplificateur réagit aux changements de niveau du signal audio.

Gain (non-connectée) $\Rightarrow$ 60dB

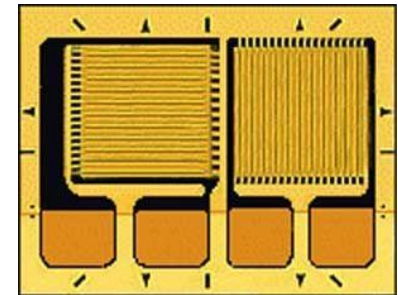
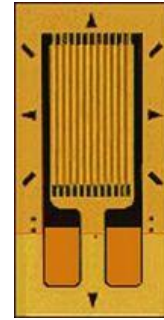
Gain=GND $\Rightarrow$ 50dB

Gain=Vdd $\Rightarrow$ 40dB

4.7. Capteurs de Force et de Vibrations

4.7.1. Capteur de force à jauge de contrainte

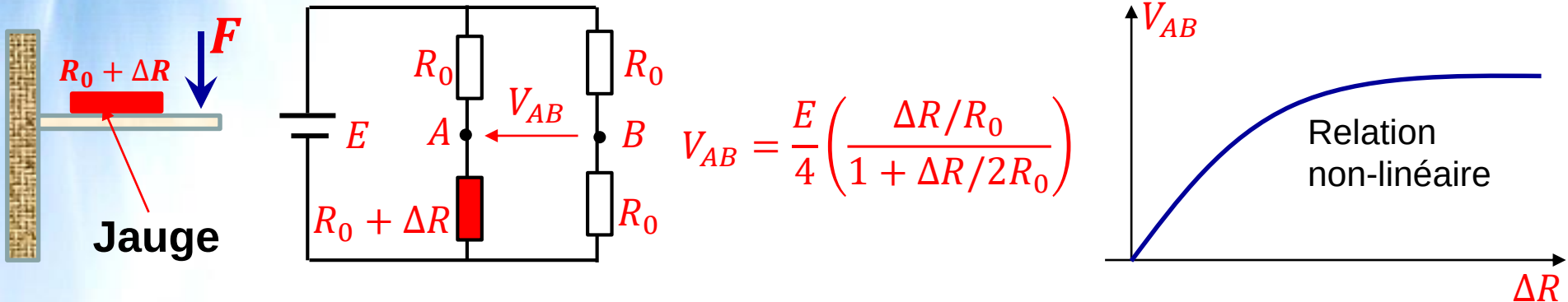
- Le but des **jauges de contrainte (strain gauge)** est de traduire la déformation d'une pièce en variation de résistance électrique.
- Il existe deux familles
 - à trames métalliques
 - à semi-conducteurs
- L'application d'un effort ***F*** sur le support métallique se traduit par une variation relative de la longueur du support induisant une variation relative de la résistance de la jauge: $R = R_0 + \Delta R$



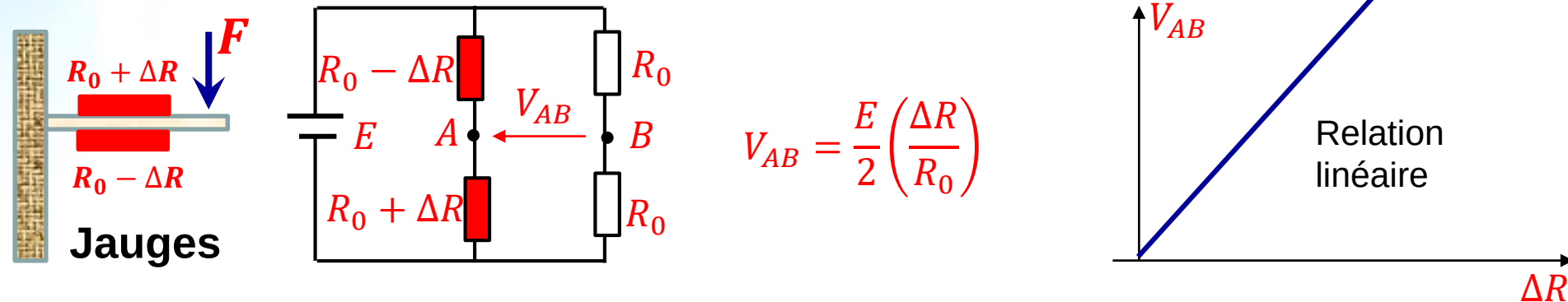
$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta L}{L_0}$$

K: **facteur de jauge** valant 2 à 4 pour les jauges métalliques de 50 à 200 pour les jauges semi-conductrices.

a) Montage à une jauge:

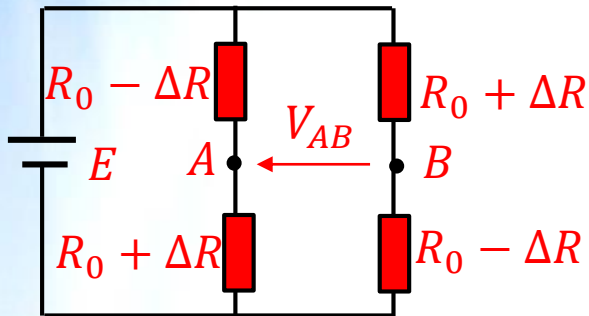


b) Montage en $\frac{1}{2}$ pont : 2 jauges

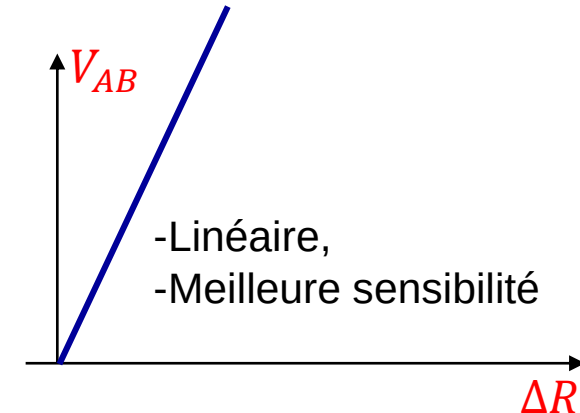


c) Montage en pont complet : 4 jauges

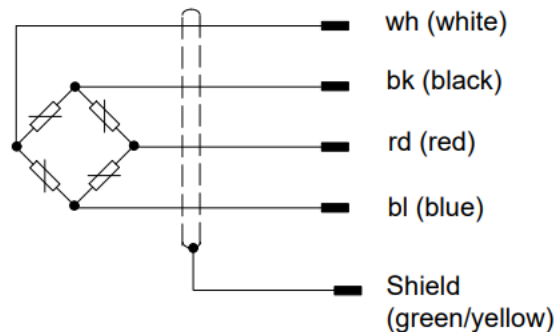
- Les éléments adjacents sont de signe contraire et les éléments opposés sont de même signe.



$$V_{AB} = E \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)$$



Exemple: Capteur de force C18 de HBM (analogique).
Forces nominales: 10kN à 5MN



Measurement signal (+) U_A

Excitation voltage (-) U_B

Measurement signal (-) U_A

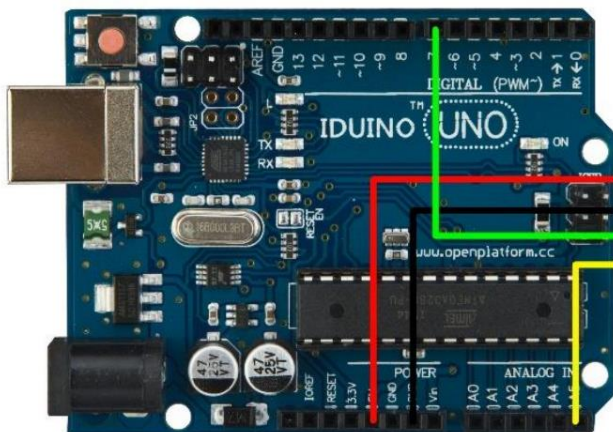
Excitation voltage (+) U_B

Cable shield, connected to the housing

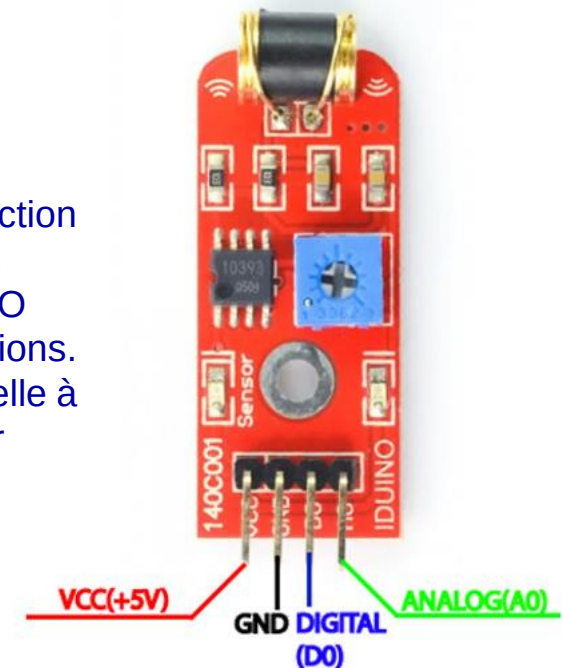
4.7.2. Capteur de vibrations

Module KY-075 801S

- **DO (Sortie numérique)** : fournit un signal logique haut ou bas en fonction de la détection de vibrations par le capteur. Par exemple, lorsque des vibrations sont détectées et dépassent un seuil prédéfini, la broche DO peut passer à l'état haut (HIGH), indiquant ainsi la présence de vibrations.
- **AO (Sortie analogique)** : fournit une tension analogique proportionnelle à l'intensité des vibrations détectées. Cette sortie peut être utilisée pour mesurer la force ou l'amplitude des vibrations de manière continue.



Exemple de connexion
avec la carte Arduino

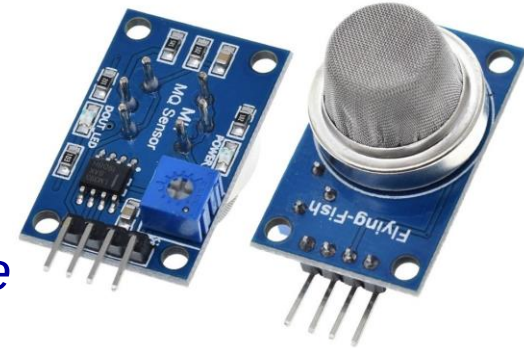


Pin	Description
A0	Analog signal output pin
G	Ground
+	Power(5V/3.3V)
D0	Digital signal output pin

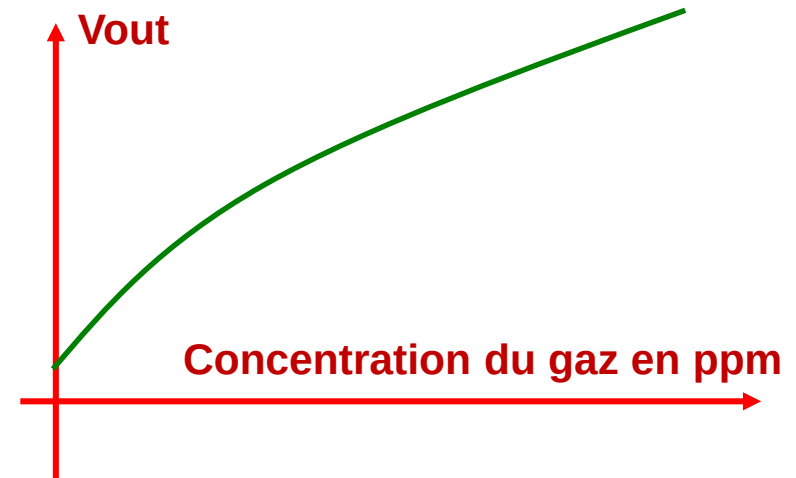
4.8. Capteurs de gaz et de qualité de l'air

1. Capteur de gaz MQ-2 pour la détection de gaz inflammables de Winsen (**analogique**)

Ils sont utilisés dans les équipements de détection de fuites de gaz dans les foyers et l'industrie, et conviennent pour la détection de **GPL** (Gaz de Pétrole Liquéfié), **i-butane**, **propane**, **méthane**, **alcool**, **hydrogène** et **fumée**.



Exemple de connexion avec la carte Arduino



5. Etapes pour exploiter un capteur Intelligent

1. **Identification du Capteur** : Familiarisez-vous avec ses spécifications techniques, son protocole de communication, ses capacités et ses exigences d'alimentation
2. **Connexion Physique** : Connectez physiquement le capteur à votre MCU ou à votre réseau
3. **Configuration Matérielle** : alimentations électriques, des antennes (si c'est un capteur sans fil), des adaptateurs ou des interfaces nécessaires pour la communication, des résistances de pull-up
4. **Configuration Logicielle** : Installez les pilotes, les bibliothèques et tout logiciel nécessaire pour interagir avec le capteur depuis votre système.
5. **Intégration avec le Système** : Intégrez le capteur intelligent dans votre système global en utilisant les protocoles de communication appropriés
6. **Collecte et Traitement des Données** : Commencez à collecter des données à partir du capteur intelligent.
7. **Analyse et Action** : Utilisez les données collectées pour effectuer des analyses et des actions pertinentes.