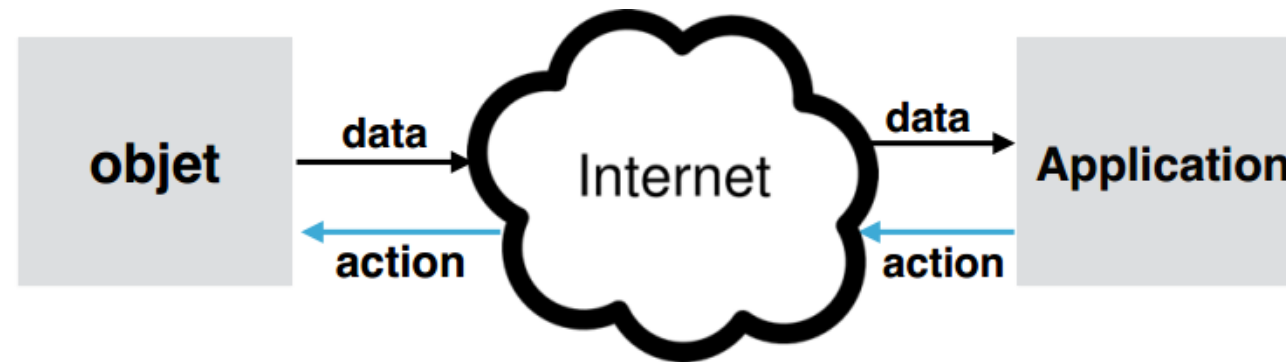




# 3. Capteurs et Actionneurs pour les Systèmes Intelligents et Connectés

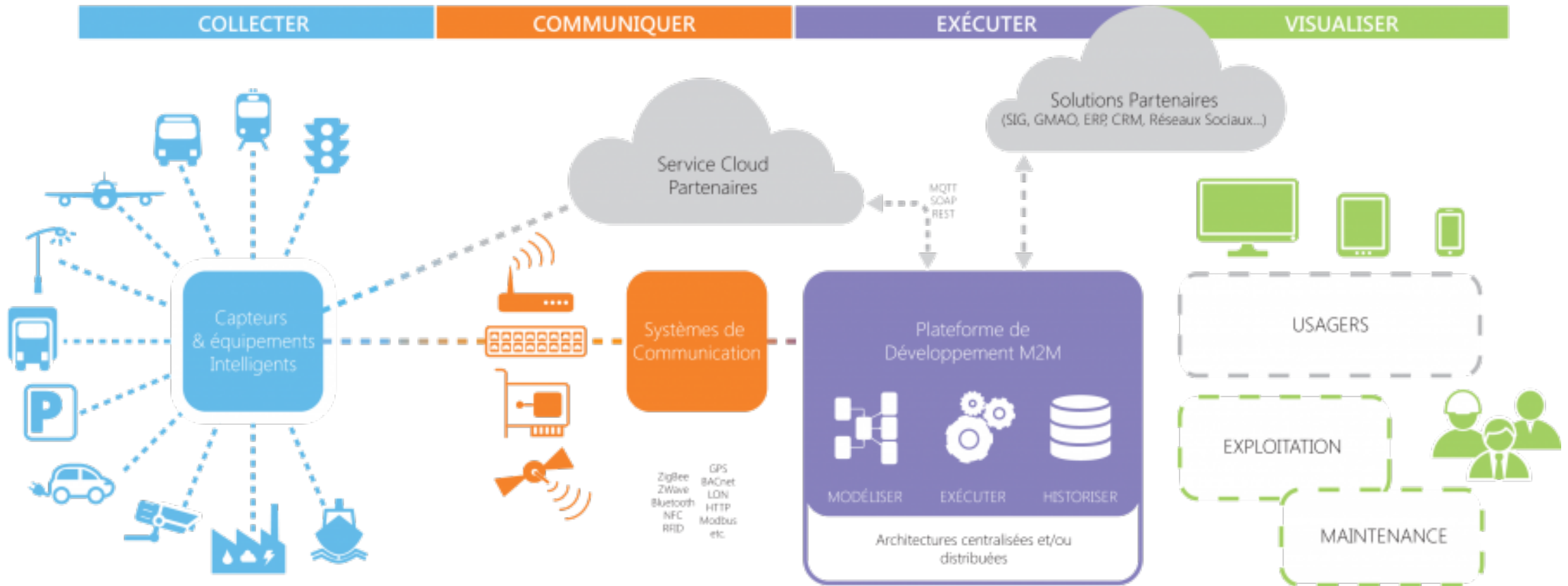
La vraie garantie du succès des systèmes intelligents et connectés dépendra de la quantité et de la qualité des informations utilisées pour créer de la connaissance, c'est-à-dire de la valeur. Une bonne partie de ces informations provient des données fournies par les capteurs.



Les capteurs jouent donc un rôle incontournable dans la conduite de la révolution des systèmes intelligents et connectés. La compréhension de l'ensemble des fonctionnalités et des capacités associées à ces capteurs est donc essentielle.

## ❑ Place des capteurs dans l'écosystème de l'Internet des Objets (IoT)

En suivant la vision de l'IoT, on se rend compte que les capteurs devront être placés partout. En effet, sans capteurs il n'y a point d'IoT.



## □ Les capteurs

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée (température, pression, vitesse ...), appelé *mesurande*, en une grandeur mesurable (tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ... ) appelée *réponse*.



## ❑ Principales caractéristiques des capteurs

Lorsqu'on souhaite utiliser un capteur pour mesurer des grandeurs analogiques, il y a des caractéristiques essentielles à connaître.

- **Plage de mesure** : correspond à la valeur minimale et maximale que l'on peut mesurer.
- **Précision** : caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure  $M$  proche de la valeur vraie  $m$  de la grandeur mesurée,  $m = M \pm \delta M$
- **Résolution** : la plus petite variation du mesurande qui provoque une variation de la sortie. Son unité est celle du mesurande.
- **Rapidité** : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

En fonction de la grandeur mesurable, on peut classer les capteurs suivant quatre familles.

## ❑ Les capteurs passifs

Ce sont des capteurs modélisables par une impédance : résistance, capacité ou inductance. Un capteur passif nécessite un circuit électrique extérieur pour mesurer cette impédance.

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Effet utilisé
Température	Résistivité électrique	Platine, Nickel, Cuivre
Rayonnement optique	Résistivité électrique	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité électrique Résistivité magnétique	Alliage de Ni, Si dopé Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnétorésistants (Bismuth, antimoine d'indium)
Vitesse	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

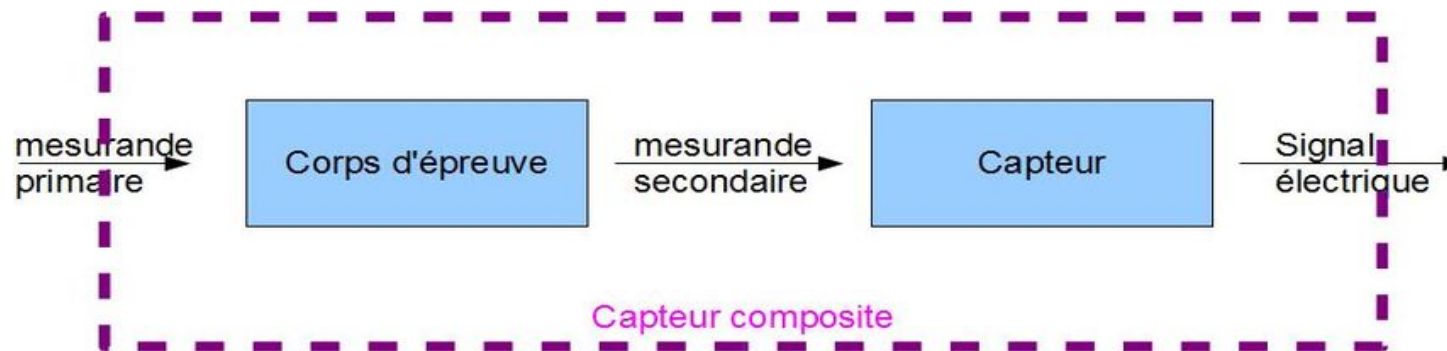
## ❑ Les capteurs actifs

Ce sont des capteurs que l'on modélise par des générateurs de tension ou de courant en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré. Ils n'ont pas besoin d'une alimentation externe (photodiode, capteur piézoélectrique).

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Effet utilisé
Température	Tension	Thermoélectricité
Flux lumineux	Courant Tension	Photoémission Effet photovoltaïque
Force, Pression et Accélération	Charge (courant)	Piézoélectricité
Position (aimant)	Tension	Effet Hall
Vitesse	Tension Fréquence	Induction électromagnétique Effet Doppler

## □ Les capteurs composites

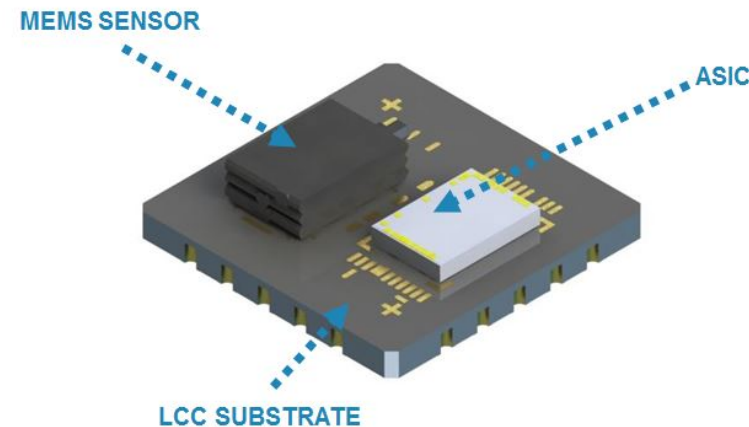
Un capteur composite est un capteur constitué d'un corps d'épreuve et d'un capteur actif ou passif. Le corps d'épreuve, quant à lui, est un capteur qui, soumis au mesurande, donne une grandeur physique non électrique appelée mesurande secondaire qui, elle, va être traduite en une grandeur électrique par un capteur.





## ❑ Les capteurs intégrés : MEMS (Microelectromechanical Systems)

Un capteur intégré est un capteur qui utilise la microélectronique. Ce capteur est constitué d'une plaque en silicium dans lequel on a fixé le capteur, le corps d'épreuve si besoin et d'autres composants électroniques qui peuvent servir à linéariser, amplifier, convertir le courant en tension, etc.



## ☐ Capteurs à sortie analogique

Une variation de la grandeur physique d'entrée du capteur produit une variation de la caractéristique électrique du capteur.

- *Capteurs TOR (Tout Ou Rien)*
- Capteurs analogiques résistifs
- Capteurs délivrant une tension analogique

## Capteurs numériques

Les capteurs numériques sont conçus pour produire une chaîne de bits en utilisant la transmission série. Les données digitales peuvent être prélevées plus rapidement que les signaux analogiques parce qu'aucun circuit supplémentaire n'est nécessaire pour lire les valeurs (CAN, adaptation à l'échelle...). L'autre grand intérêt de cette méthode est très probablement la résistance au bruit c'est-à-dire un moyen fiable de garantir que la donnée arrivera de manière intègre jusqu'au destinataire.

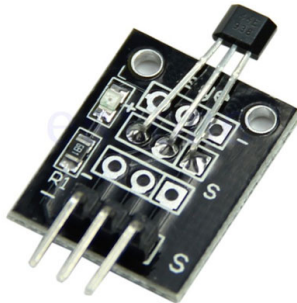
## ❑ Capteurs TOR (Tout Ou Rien)

Ces capteurs délivrent une information ne pouvant prendre que deux états. Chaque état possède une signification dans le contexte du système.

→ **Interrupteur à inclinaison (*tilt switch*)** : c'est un dispositif simple doté d'un interrupteur dont l'état (ouvert ou fermé) dépend de son inclinaison.



→ **Capteur à effet Hall** : permettent de détecter si un aimant est à proximité. Ils sont très utiles pour constituer un capteur sans contact.



## ❑ Capteurs analogiques résistifs

Capteurs donnant une image de la grandeur physique qu'ils mesurent par une résistance électrique variable.

→ **La photorésistance** : c'est une résistance dont la valeur résistive change en fonction de la quantité de lumière qui atteint le capteur. L'étendue de la variation de résistance est comprise entre 500 k $\Omega$  (noir) et 24 k $\Omega$  (luminosité de 10 lux).



## ❑ Capteurs délivrant une tension analogique

Il existe, aujourd'hui, sur le marché des capteurs parfaitement linéaires et délivrant de surcroît une tension directement mesurable.

→ **Thermomètre LM35** : c'est un circuit intégré calibré en usine pour être utilisé comme capteur de température de précision. Sa tension de sortie est linéairement proportionnelle à la température:  $V_{out} = 10mV/^{\circ}C \times T^{\circ}C$



## ❑ Liaison série One Wire

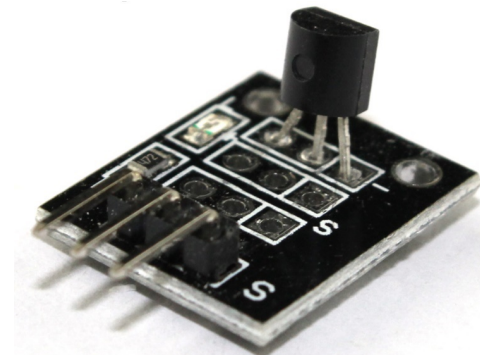
Le bus 1-Wire est basé sur une architecture maître-esclave. Il est généralement utilisé pour des mesures de températures.

→ **Thermomètre DS18B20** : du fabricant Dallas, il possède une précision de 12 bits sur une plage de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$  et contient un « scratchpad » qui est une sorte de mémoire tampon où l'on peut venir lire et/ou écrire.

Byte 0	Temperature LSB (50h)	} (85°C)
Byte 1	Temperature MSB (05h)	
Byte 2	T <sub>H</sub> Register or User Byte 1*	
Byte 3	T <sub>L</sub> Register or User Byte 2*	
Byte 4	Configuration Register*	
Byte 5	Reserved (FFh)	
Byte 6	Reserved	
Byte 7	Reserved (10h)	
Byte 8	CRC*	

Pour avoir la température en degré Celsius :

$$temp = ((MSB \ll 8) + LSB) * 0.0625$$



## ❑ Liaison série propriétaire du DHT11

Le DHT11 a la particularité d'utiliser une seule broche pour communiquer avec son maître. A la place du bus One Wire classique, la communication se fait au moyen d'un protocole propriétaire demandant de timings bien précis.

→ **Capteur de température et d'humidité** : DHT-11 est un capteur de température et d'humidité sur un même boitier. Le coefficient d'étalonnage est mémorisé dans la mémoire OTP interne. L'étendue de mesure de la température:  $0^{\circ}\text{C}$  à  $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , et l'étendue de mesure de l'humidité :  $20\text{--}90\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$ .

Octet	Contenu
1	Humidité en %
2	zéro
3	Température en degré Celsius
4	zéro
5	Checksum (= humidité + température)





## ❑ Capteurs de gaz MQ

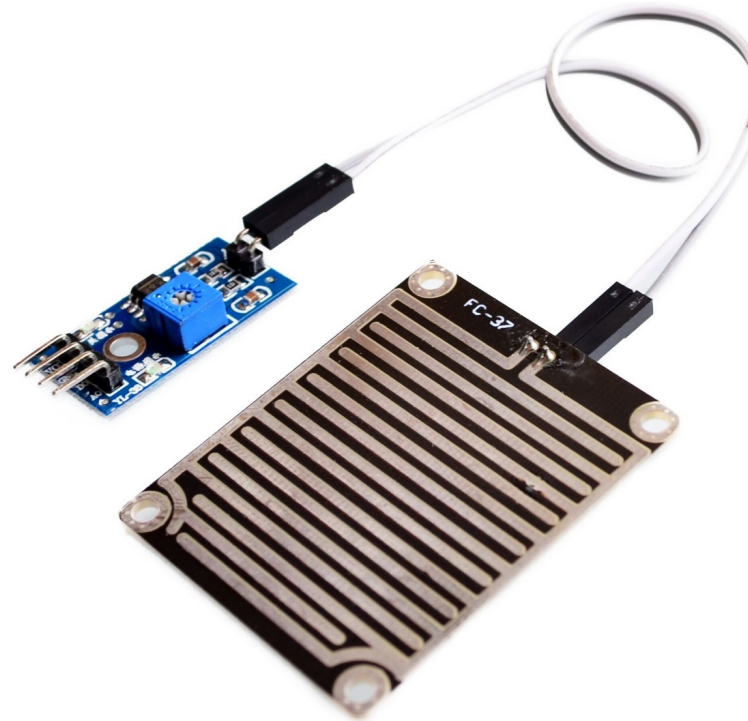
Les capteurs MQ sont des capteurs physicochimiques permettant de détecter une grande variété des gaz, polluants et fumées dans l'atmosphère.



Capteurs	Sensible à
MQ2	Méthane, Butane, GPL et fumées
MQ3	Alcool, Ethanol et fumées
MQ4	Méthane De 300 à 10000 ppm
MQ5	Gaz naturel, GPL. De 300 à 50000 ppm.
MQ6	GPL, butane. De 200 à 10000 ppm
MQ7	Monoxide de carbone . De 20 à 2000 ppm
MQ8	Hydrogène. De 100 à 10000 ppm
MQ9	Monoxyde de carbone, méthane
MQ135	Benzène, alcool, fumées

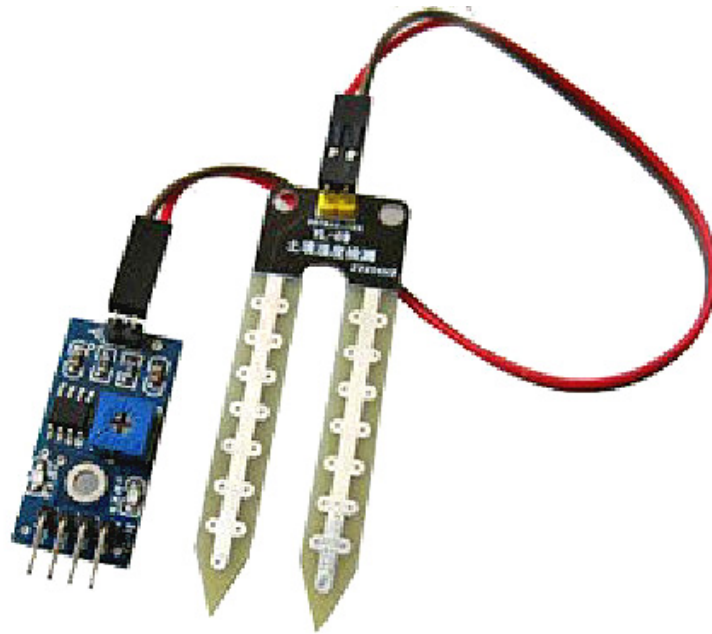
## ❏ Détecteur de pluie

Le capteur de pluie détecte de l'eau qui vient court-circuiter les pistes du circuit imprimé. Le capteur agit comme une résistance variable qui va changer d'état :  $100\text{k}\Omega$  lorsqu'il est mouillé et  $2\text{M}\Omega$  lorsqu'il est sec. Il dispose de 2 sorties, une sortie numérique 1/0, une sortie analogique 0 à 1023 .



## ❑ Capteur de l'humidité du sol

Capteur d'humidité du sol avec un niveau de sensibilité ajustable. Le module possède deux modes de fonctionnement : un mode digital (on/off) qui déclenche au-dessous d'un seuil réglable, et un mode analogique pour plus de précision.



## ❑ Capteur de débit d'eau

Ce capteur de débit est constitué d'un rotor et d'un capteur à effet hall. Lorsque l'eau passe dans le capteur, la rotation du rotor génère des impulsions en fonction du débit. La fréquence de sortie varie en fonction de la vitesse du rotor.



Plage de mesure: 1 à 30 l/min

Pression maxi: 1,2 MPa

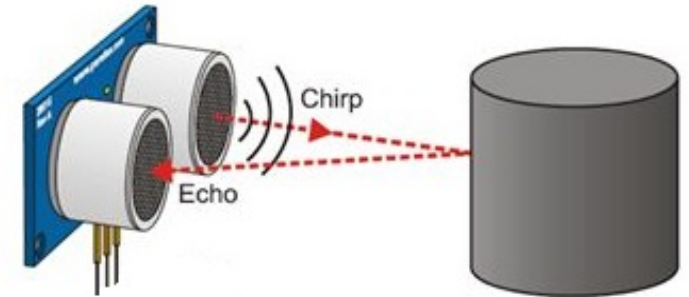
Précision: +/- 3% (entre 1 et 10 l/min)

Formule de conversion: débit (en l/min) = fréquence (en Hz) / 7,5

## □ Sonar à base d'ultrason

Permet d'évaluer les distances entre un objet mobile et les obstacles rencontrés. Un des deux petits cylindres sur la platine envoie des ultrasons, en retour l'autre cylindre récupère l'écho et fournit une impulsion dont la durée est proportionnelle à la distance de l'obstacle.

$$distance \text{ (en cm)} = \frac{durée \text{ de l'impulsion (en } \mu s) * vitesse \text{ du son (en m}/\mu s)}{2}$$



→ **HC-SR04:** ce module émet des ultrasons de fréquence 40kHz pour une portée de 2–450cm et pour un angle de mesure maximal de 15°. On prendra comme vitesse du son 340m/s.

## ❑ Géolocalisation avec le GPS (Global Positioning System)

Le GPS est un système de géolocalisation par satellite. Son utilisation avec un capteur permet d'associer aux données un caractère spatio-temporel.

→ **NEO-6M GPS** : ce module est un récepteur GPS accompagné d'une antenne et d'une mémoire intégrée EEPROM avec batterie. Il utilise une interface RS232 TTL (9600 bauds) et fonctionne sous 3–5V. La sensibilité est de -162dBm avec une mise à jour de relocalisation de 5Hz.





## ❏ GPS : format NMEA

Le module GPS renvoie une trame NMEA (National Marine Electronics Association) qui contient des informations brutes de géolocalisation. Les trois types de trames les plus utilisées sont le GGA, RMC et VTG.

```
$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.000,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,*47
```

```
$GPRMC,123519,A,4807.038,N,01131.000,E,022.4,084.4,230394,003.1,W*6A
```

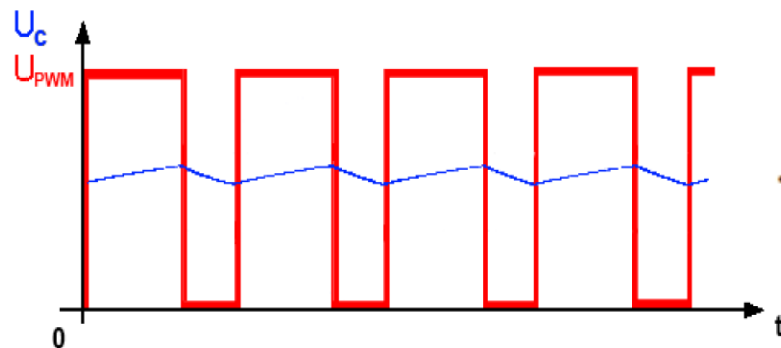
Les informations contenues dans une trame de type GGA sont les suivantes :

<b>GGA</b>	Type de trame
<b>123519</b>	Positionnement prise à 12:35:19 UTC
<b>4807.038,N</b>	Latitude 48°07.038' Nord
<b>01131.000,E</b>	Longitude 11°31.000' Est
<b>1</b>	Type de positionnement
<b>08</b>	Nombre de satellites utilisés pour calculer les coordonnées
<b>0.9</b>	Précision horizontale
<b>545.4,M</b>	Altitude 545.4 mètres
<b>46.9,M</b>	Height of geoid above WGS84 ellipsoid
(champs vide)	time in seconds since last DGPS update
(champs vide)	DGPS station ID number
<b>*47</b>	Somme de contrôle de parité

## □ Les actionneurs

L'actionneur est l'élément qui actionne le système à contrôler pour l'amener d'un état donné vers l'état souhaité. Les signaux de commande sont en général faibles et servent à actionner les systèmes de puissance.

→ **Pulse Width Modulation (PWM)** : est une technique pour obtenir des effets d'allure analogique sur des sorties numériques. Si le signal PWM est associé à un filtre passe-bas, alors on obtient à la sortie une tension analogique dont l'amplitude est égale à la valeur moyenne du signal.



$$< Signal > = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} u(t) dt = \frac{\alpha T}{T} U = \alpha U \quad \text{avec } \alpha \leq 1 ; U = 5V$$



## ❏ Moteur à courant continu

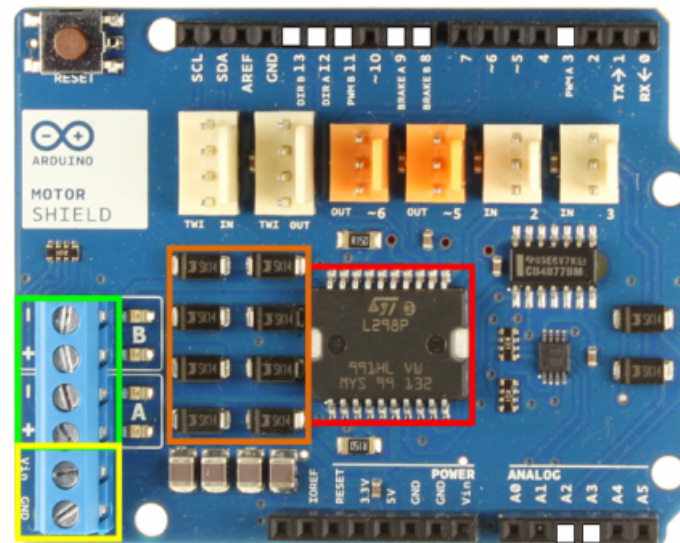
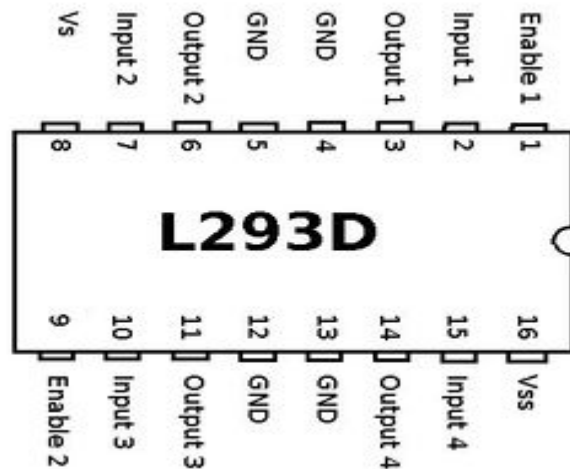
Le moteur à courant continu fonctionne quand on lui envoie un courant. Le rotor va donc tourner plus ou moins vite selon celui-ci reçoit une tension plus ou moins élevée, puis s'arrêter dès lors qu'il n'est plus alimenté. Deux autres commandes supplémentaires permettront de contrôler la vitesse et le sens de rotation du moteur.

- **Faire varier la vitesse** : la PWM permet de produire un signal carré dont le rapport cyclique est variable. Le rapport cyclique est défini par un nombre allant de 0 à 255. Le moteur tourne plus ou moins vite selon si le rapport cyclique est grand ou petit.
- **Changer le sens de rotation** : dans son principe de base, le pont H est un assemblage de 4 transistors monté de telle façon que le courant puisse passer soit dans un sens, soit dans l'autre au travers du moteur continu. En inversant le sens du courant dans le moteur, ce dernier changera de sens de rotation.

## ❑ Composants pour la commande des moteurs

Des composants “clés en main” ont été développés et permettent de commander facilement le moteur.

- **L293D** : c'est un pont de puissance composé de plusieurs transistors et relais qui permet d'activer la rotation d'un moteur et peut délivrer au maximum 600mA.
- **Motors shields** : basée sur un L298 qui contient 2 ponts en H permettant de piloter des moteurs demandant une intensité maximale inférieure à 2A.



- Le cœur du shield : le L298
- Les diodes de roue libre (4 par moteurs)
- Les sorties pour brancher les moteurs
- L'entrée de l'alimentation du shield
- Les broches d'interface entre Arduino et le shield

## □ Servomoteur

Un servomoteur permet d'effectuer des déplacements en translation ou en rotation. Les servomoteurs ont l'avantage d'être asservis en position angulaire. Cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera une consigne d'orientation que vous lui envoyez en son entrée.

- Un moteur électrique à courant continu
- Des engrenages réducteurs en sortie du ce moteur
- Un capteur type "potentiomètre" raccordé sur la sortie permettant un asservissement électronique pour contrôler la position/rotation.

Le principe de base est assez simple. Il suffit d'envoyer une impulsion PWM et c'est le temps que durera cette impulsion qui déterminera l'angle du servomoteur.

## ❑ Servomoteur : micro Servo Tower Pro SG90

Le TowerPro SG90 est un micro servomoteur largement utilisé dans le monde du modélisme. Sa prise standard Graupner à 3 fils (O : PWM, R : +, M : -) et sa tension d'alimentation de 5 volts rendent le Tower Pro directement utilisable sur un microcontrôleur.



- Amplitude : de 0 à 180°
- Vitesse : 0.12 sec/60°
- Couple : 1.2 kg.cm

## Pompe à eau

Pompe à membrane pulvérisateur commandée par un puissant moteur.



Tension de fonctionnement: DC12V

Courant de fonctionnement: 0.5-0.7A

Vide courant de charge: 0.18A

Débit : 1.5-2L/Min (environ)

Aspiration: 2 m

Diamètre : 6mm, un diamètre extérieur de 9mm

## □ Du capteur à la donnée

L'acquisition des données se fait de deux manières :

- **Push** : c'est le capteur qui fait entrer les données dans le composant logiciel.
- **Pull** : c'est le composant logiciel qui envoie une requête vers le capteur afin de récupérer les données.

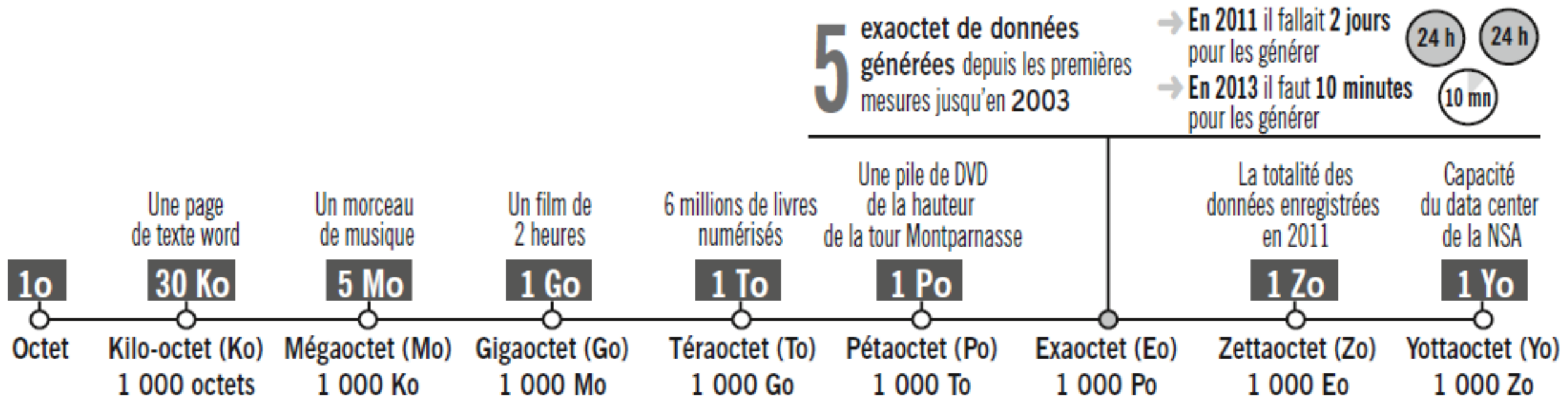
En fonction de la fréquence de collecte de données, on a des capteurs basés sur :

- **L'instant ou sur la violation de seuil** : n'envoie des données que lorsqu'un événement particulier survient.
- **L'intervalle ou la période de manifestation de l'évènement** : envoie de manière continue des données.



## □ Du capteur à la donnée : Big Data

Les objets connectés sont capables de produire un gros volume de données et en plus non structurées en un laps temps. Ainsi si l'on a une vingtaine de mesures par objet et que l'on en a une centaine, cela nous fait 2000 mesures à stocker toutes les minutes soit près de 3 millions de points/jour.



## ❑ Du capteur à la donnée : les bases de données NoSQL

NoSQL (Not only SQL) désigne une catégorie de SGBD qui n'est plus fondée sur l'architecture classique des bases relationnelles. L'unité logique n'y est plus la table, et les données ne sont en général pas manipulées avec SQL. Pour les objets connectés, les bases de données les plus employées sont les *bases de données de séries chronologiques* caractérisées par :

- **Horodatage (timestamp)** : constitue un critère de tri et d'accès particulier qu'il peut être pertinent d'optimiser.
- **Grande quantité de données immuables** : les données ne sont jamais modifiées après insertion.