



# Mesures et capteurs

### BESOIN DE QUANTIFIÉ

Au cours de son évolution, l'homme a été confronté à de nombreux phénomènes tant naturels que dus à sa propre activité. Si lors de la préhistoire, la majorité d'entre eux restait inexplicable comme l'**éclair**



d'un orage par exemple, aujourd'hui, les scientifiques en connaissent les causes pour la plupart. L'avancée décisive qui a eu lieu en quelques milliers d'années est l'apparition du langage. En effet, grâce à la communication, les hommes ont pu s'organiser et développer des outils tels que les mathématiques et les sciences pour innover et comprendre. Or, de la même manière qu'une langue possède une orthographe, les sciences reposent sur des données quantifiables, c'est-à-dire qu'il est possible de chiffrer. Ainsi est-il devenu de plus en plus nécessaire pour l'homme de pouvoir quantifier un phénomène afin de l'étudier de façon précise. C'est alors que sont nées la notion de mesure et le besoin des capteurs.

### UNE ÉVOLUTION CONSTANTE

La mesure telle que nous la connaissons aujourd'hui n'est pas apparue ainsi dès l'Antiquité mais elle s'est développée peu à peu au fil du temps. Bien qu'elle ait été requise pour la fabrication des premiers habits et des premières maisons durant la préhistoire, les systèmes de mesure dignes de ce nom les plus anciens remontent au quatrième et troisième millénaires avant Jésus Christ et étaient utilisés en Égypte, en Mésopotamie et dans la vallée de l'Indus (fleuve parcourant l'Inde), selon les connaissances actuelles. Ces outils permettaient de quantifier les longueurs, les masses et le temps.

Les longueurs étaient souvent mesurées grâce à des éléments naturels comme la longueur d'une main, d'un pied, d'un avant-bras ou bien par la distance parcourue par une caravane de dromadaires, en Égypte. Les masses faisaient appel aux graines de céréales. Par exemple, le grain de blé pouvait servir à peser des minéraux chez le joaillier. Enfin, la notion de temps était traduite grâce au calendrier par

l'alternance des phases lunaires, par la position du soleil dans le ciel ou encore par le balancement d'un pendule ou l'écoulement d'une clepsydre. Au fil des millénaires, les références ont changé, certains systèmes sont apparus, d'autres ont disparu. La standardisation, c'est-à-dire le fait de considérer un système comme la référence pour toute mesure, est donc devenue nécessaire pour que chacun puisse exprimer les mêmes quantités avec les mêmes unités. Cette opération eut lieu à diverses époques suivant les régions. La France rendit officiel le système métrique en juin 1799, tandis que l'Angleterre utilisa des unités standardisées à partir de 1824. Au niveau mondial, le processus de standardisation dura près de deux siècles pour aboutir au Système International. Les principales unités utilisées sont alors au nombre de sept :

- le mètre pour les longueurs,
- le kilogramme pour les masses,
- la seconde pour le temps,
- l'ampère pour le courant électrique,
- le kelvin pour la température,
- la mole pour les quantités de matière,
- la candela pour l'intensité lumineuse.

Toutes les autres unités de mesure nécessaires pour les autres grandeurs physiques sont obtenues en combinant ces sept unités principales. Cependant, le Système International n'est pas figé : la Conférence Générale des Poids et Mesures décide de son évolution tous les quatre ans, à Paris.

Néanmoins, une fois que le système d'unités est choisi, il faut avoir recours à un moyen de mesure pour évaluer les grandeurs physiques à étudier. Le dispositif jouant ce rôle



est appelé **capteur**. Or, du fait que les grandeurs à vérifier dans tout procédé industriel ou dans toute expérience scientifique sont en nombre important, l'usage des capteurs est largement diversifié et appelé à sans cesse évoluer.

### MESURE

À l'heure actuelle, la science et la technique avancent à grands pas et l'accélération de leur progrès ne fait aucun doute. En effet, à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, qui aurait dit que l'homme

marcherait soixante-dix ans plus tard sur la Lune ? Qui aurait affirmé pouvoir communiquer instantanément avec quelqu'un habitant aux antipodes tel que nous le faisons aujourd'hui ? Cette évolution dont nous sommes les témoins au quotidien est portée par les besoins scientifiques croissants et par l'innovation technologique. Or, comme la compréhension des phénomènes physiques de plus en plus pointus demande des instruments toujours plus performants, la mesure et le capteur deviennent prépondérants.

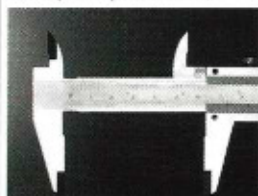
Ensuite, la mesure est la base de toute science expérimentale. En effet, pour caractériser un phénomène, le scientifique procède par l'expérimentation afin de le reproduire et de l'étudier. La manipulation vise à mettre en évidence une grandeur physique et à suivre son évolution en fonction de divers paramètres (le temps, l'espace...). Grâce à l'observation, le scientifique va émettre un modèle permettant de donner une représentation simplifiée du phénomène. Si ce modèle est vérifié par des mesures concordant avec celles obtenues dans la réalité, celui-ci est considéré comme juste et l'on pourra, en s'en aidant, développer de nouvelles théories qui feront progresser les connaissances. Ici, la mesure sert à la fois dans l'élaboration du modèle scientifique, mais aussi à prouver que les hypothèses et les conclusions sont justes.

### MESURE ET INDUSTRIE

Dans l'industrie, les mesures ont d'autres utilités. Un usage très répandu consiste en la vérification des dimensions d'une pièce mécanique qui vient d'être fabriquée. En effet, si pour la plupart des applications un écart de l'ordre du micromètre, c'est-à-dire mille fois plus petit qu'un millimètre, n'a pas de réelle importance sur le fonctionnement d'un système, un écart d'un centième de millimètre peut avoir de fâcheuses conséquences comme bloquer des mobilités entre deux pièces ou bien entraîner une usure prématurée des surfaces de contact. Il devient donc nécessaire de vérifier que les cotes sont respectées grâce à la mesure de celles-ci. Si une pièce a été fabriquée correctement, on dira qu'elle respecte les tolérances qui lui ont été fixées.

C'est la métrologie qui va chercher à trouver les écarts des dimensions réelles par rapport au modèle. Pour réaliser une mesure, l'opérateur va devoir recourir à un instrument de mesure pour évaluer la mesurande : la grandeur faisant l'objet de la

mesure. Le mesurage sera le résultat de la lecture de la mesure et devra être comparé à la cote théorique établie pour la pièce. En effet,



l'instrument de mesure peut avoir un défaut qui entraîne une erreur dans l'évaluation de la mesurande.

### APPAREILS DE MESURE

#### PROPRIÉTÉS ET USAGES

Un appareil de mesure de bonne qualité doit satisfaire plusieurs critères pour fournir des mesures adéquates :

- la fidélité,
- la justesse,
- la sensibilité.

La fidélité est la capacité d'un instrument de mesure à donner le même mesurage dans les limites d'un certain écart par rapport à la mesurande. Si l'on fait l'analogie avec le tir à l'arc, un tir fidèle serait un tir dont toutes les flèches arriveraient sensiblement au même endroit sur la cible, sans pour autant arriver dans le mille.

La justesse traduit le fait de donner pour une mesurande une série de mesurages centrée autour de la mesurande. En utilisant l'image du tir à l'arc, cela signifie que toutes les flèches arriveront autour du centre de la cible, sans pour autant être réunies au centre-même.

De ces deux qualités, nous pouvons former un autre critère appelé communément précision : une mesure précise est une mesure fidèle et juste. Sur une série de mesurages, chaque valeur sera proche l'une de l'autre et proche de la mesurande.

Enfin, un instrument de mesure se caractérise par sa sensibilité, c'est-à-dire son pouvoir d'amplification et donc de lecture de l'erreur. Par exemple, un appareil sensible pourra amplifier un million de fois l'erreur et l'opérateur pourra donc détecter un écart de l'ordre du nanomètre (un millionième de millimètre), tandis qu'un instrument peu sensible n'amplifiant que dix fois ne pourra détecter que les écarts supérieurs au dixième de millimètre.

#### L'ÉTALONNAGE

Un instrument, pour fournir des mesures de bonne qualité, à besoin d'être étalonné. L'étalonnage consiste à mesurer un étalon, c'est-à-dire une pièce dont les dimensions

ont été ajustées de façon précise. L'étalonnage est toujours réalisé dans des conditions de référence adaptées à l'utilisation future de l'instrument. La température, l'hygrométrie, la pression, etc., sont alors fixées afin qu'elles n'influencent pas la mesure de l'étalon. Si l'appareil fournit des mesurages précis de l'étalon, alors il est considéré comme opérationnel et pourra servir à effectuer des mesures d'autres pièces.

### EXEMPLES

#### MESURE D'UNE MASSE

Mais la mesure n'est pas seulement dévolue aux dimensions de pièces mécaniques. Nous pouvons mesurer des masses par exemple.

Une **balance** mécanique fonctionne



de la manière suivante : lorsqu'une personne monte sur le dispositif, son poids entraîne la déformation d'un ressort. Cette déformation qui est relativement proportionnelle au poids de la personne engendre le déplacement de l'aiguille ou du cadran de la balance, ce qui indique la masse de la personne pesée. Une balance électrique fonctionne différemment : le plateau est relié à un composant piézo-électrique. Le fait de placer un objet sur le plateau entraîne l'apparition d'une pression sur le composant piézo-électrique. Or, un matériau piézo-électrique a la propriété de voir apparaître une tension électrique à ses bornes lorsqu'il est soumis à un champ de pression. Cette tension est mesurée par un voltmètre et retranscrite sur un afficheur pour donner la masse de l'objet.

#### MESURE DE LA TENSION ÉLECTRIQUE



Nous pouvons aussi détailler le principe de mesure d'une tension électrique ou d'un courant. Les **voltmètres** et **ampèremètres** mécaniques fonctionnent de façon similaire à une balance mécanique dans la mesure où c'est en fait le déplacement d'une aiguille qui permet la lecture sur un cadran de la tension électrique ou du courant. Cependant, l'origine du déplacement de l'aiguille est différente. En effet,

### La mesure au chiffre près

- 300 av. J.-C.

Première mesure du rayon de la Terre, réalisée par Eratosthène.

1676

Premières expériences pour tenter de mesurer la vitesse de la lumière.



4,83 mm<sup>2</sup>

Taille du plus petit capteur.

380 000 km

Distance Terre-Lune connue depuis 1969.

62 MW

Puissance de la plus grande centrale solaire au monde.

Masse de la Terre



5,97.10<sup>24</sup> kg

Calculée à partir de la troisième loi de Kepler.

ces deux appareils sont constitués d'un circuit interne, le bobinage. Lorsqu'un courant électrique le parcourt, la bobine crée un champ magnétique. Or, le voltmètre et l'ampèremètre disposent aussi d'un aimant mais l'axe de celui-ci est différent de celui du bobinage. L'angle entre les deux axes crée un couple magnétique sous l'effet des champs magnétiques de la bobine et de l'aimant. Le couple met le bobinage et l'aiguille indiquant la valeur du courant ou celle de la tension électrique sur le cadran.

#### MESURE DE GRANDES DISTANCES

La mesure permet aussi de connaître les longueurs dont certaines sont emblématiques. Par exemple, la mesure de la distance séparant la Terre de la Lune n'a pu être réalisée de façon précise qu'à partir de 1969 et le jour où l'homme marcha sur la Lune pour la première fois ! Les astronautes de la mission Apollo 11 y déposèrent une plaque réfléchissante de 46 cm<sup>2</sup> composée de cent demi-cubes de silicium. Dès lors, lorsque nous



envoyons un **faisceau laser** sur cette plaque depuis la Terre, celui-ci est réfléchi et revient à l'endroit de l'émission. En mesurant la durée du parcours du rayon laser pour réaliser le trajet de la Terre à la Lune, puis de la Lune à la Terre et en connaissant la célérité de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s), les scientifiques peuvent calculer la distance réalisée par la lumière. Divisée par deux, celle-ci nous donne la distance Terre-Lune à l'instant de la mesure avec une précision d'environ 3 cm (cette distance évolue constamment et est de nos jours de l'ordre de 380 000 km). Ce dispositif de mesure nous a par ailleurs permis de confirmer le fait que la Lune s'éloigne de la Terre avec le temps.

#### CAPTEURS

Nous allons maintenant étudier les dispositifs techniques permettant de réaliser ces mesures : les capteurs. Tout d'abord, nous pouvons définir le capteur comme un dispositif qui « transforme » l'état d'une grandeur physique en une grandeur utilisable. Le capteur est en quelque sorte l'œil du système (dans le cas d'un détecteur de pluie d'une voiture, par exemple), dans la mesure où c'est lui qui va prélever l'information (présence de pluie) dans le milieu environnant et la retourner sous une forme compréhensible par le système (signal électrique traduisant la présence de pluie). Le capteur sert toujours à constater l'état d'une grandeur physique et à traduire celle-ci pour qu'elle soit comprise par l'utilisateur, que ce soit un humain ou un ordinateur.

#### MODE DE FONCTIONNEMENT

Il existe deux modes de fonctionnement pour un capteur : le mode en boucle

ouverte et le mode en boucle fermée. Le mode « boucle ouverte » est celui connu par le grand public consistant à prendre une mesure et à en afficher directement le résultat. C'est typiquement l'exemple du pese-personne : un individu monte sur l'appareil, le capteur mesure et renvoie le résultat à cet individu. On peut considérer qu'un voltmètre est aussi utilisé en boucle ouverte puisque qu'il mesure une différence de potentiels et la traduit sur l'afficheur.

Le mode « boucle fermée » est très utilisé dans tous les produits sensiblement complexes même si nous n'en avons pas conscience, au premier abord. Le principe est d'utiliser le capteur comme un moyen de contrôle du mécanisme : le capteur mesure une grandeur physique qui, au lieu d'être considérée comme un résultat, est prise en compte en tant que donnée pour ajuster le fonctionnement du système. L'information renvoyée par le capteur agit directement sur le système. Nous pouvons utiliser l'exemple de la régulation d'altitude du pilote automatique d'un avion. Le capteur d'altitude, qui peut être un **altimètre**



ou la donnée d'un système GPS, décrit la situation à l'ordinateur de bord. Imaginons que le pilote demande à voler plus haut. Le capteur va renvoyer l'altitude actuelle et l'ordinateur, grâce à la donnée du capteur et à l'altitude désirée par le pilote, va déduire que l'avion se situe trop bas et donc contrôler les commandes de l'appareil pour s'élever. Comme le système fonctionne en boucle fermée, le capteur mesure une nouvelle fois l'altitude. L'ordinateur va constater que l'avion s'est rapproché de l'altitude désirée et demander à l'appareil de ralentir son ascension. Finalement, l'avion parviendra au niveau demandé de façon autonome.

Un capteur se compose concrètement de trois parties distinctes :

- le prélèvement de la grandeur physique,

- le traitement de cette donnée,
- le renvoi du résultat.

Nous pouvons en fournir un exemple concret en utilisant la balance mécanique. Le prélèvement de la grandeur physique est réalisé, ici, par le mécanisme transmettant le poids de l'objet à peser du plateau jusqu'au ressort. Le traitement de la donnée est effectué par la déformation du ressort. Enfin, le renvoi du résultat est accompli par le système mettant en mouvement l'aiguille de la balance.

#### LE TRAITEMENT DES DONNÉES

C'est la partie cruciale du capteur, puisqu'elle doit notamment amplifier un signal de faible magnitude afin de le rendre compréhensible par son environnement. Cependant, cette opération peut engendrer une détérioration de la mesure car l'amplification va à la fois avoir lieu sur le paramètre étudié, mais aussi sur le bruit ambiant, ce qui risque de fausser la mesure. Pour éviter ce phénomène, un capteur est souvent équipé de filtres pour supprimer les composantes indésirables du signal. De plus, il faut savoir qu'un capteur ne prélève jamais une donnée physique de façon parfaite : la mesure s'accompagne toujours d'une perturbation de la grandeur physique à étudier du fait même de la prise de mesure. Il est donc nécessaire de connaître cette erreur et de vérifier qu'elle ne conduit pas à un résultat aberrant. En effet, si nous prenons l'exemple d'un anémomètre dont la précision est  $\pm 2$  km/h, alors il sera inutile de l'utiliser pour mesurer un vent dont la vitesse est trop faible car l'erreur relative serait trop importante (l'erreur relative pour un vent de 8 km/h serait de 25 %). Le choix du capteur est donc décisif dans l'obtention d'une mesure pertinente. Il est aussi réalisé en fonction du type de la mesurande.

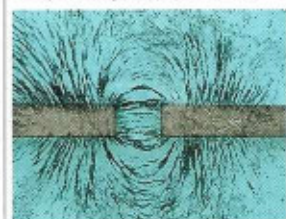
Ainsi, les besoins sont différents selon le cahier des charges. Pour illustrer les possibilités offertes, nous pouvons détailler le fonctionnement de plusieurs capteurs : interrupteur de position, capteur à seuil de pression, capteur magnétique, capteur inductif, capteur capacitif, capteur opto-électrique.

L'interrupteur de position est utilisé pour détecter une « fin de course », c'est-à-dire le moment où l'actionneur arrive à sa position finale. Cet actionneur peut être un vérin, un

moteur linéaire ou rotatif. Le capteur est le plus souvent constitué de deux lamelles métalliques reliées à des potentiels électriques différents. Lorsque le dispositif parvient en fin de course, celui-ci vient buter contre une des lamelles et la plaque sur l'autre. Le circuit électrique se ferme et permet au courant de passer et donc de transmettre l'information « fin de course atteinte ».

Le capteur à seuil de pression peut être implanté sur l'orifice d'échappement d'un vérin (l'orifice permettant au fluide de sortir du vérin, tandis que l'orifice d'admission apporte du fluide pour pousser le piston). Lorsque le piston est en mouvement, il force le fluide à sortir du vérin et entraîne une augmentation de la pression de la chambre à l'échappement. À la fin du mouvement du piston, le fluide s'écoule de lui-même et la pression diminue. Lorsque celle-ci passe sous le seuil du capteur, l'information « piston arrêté » est envoyée.

Le capteur magnétique présente un



**champ magnétique** obtenu par une bobine à noyau de ferrite placée dans un circuit électrique soumis à une tension variable. Pour détecter un changement d'état, il est nécessaire d'appliquer un champ magnétique sur la surface sensible du capteur grâce à un aimant permanent par exemple. Le courant du circuit électrique oscillant se trouve alors modifié et transformé par l'étage d'amplification en un signal de sortie.

Les capteurs inductif et capacitif fonctionnent sur le même principe. Les capteurs inductifs génèrent aussi un champ magnétique. Lors du passage d'un objet métallique, ce champ est réduit car la pièce métallique absorbe de l'énergie. Ce changement est détecté et transmis en sortie. Dans le cas d'un capteur capacitif, c'est un champ électrique qui est émis. Tout objet passant devant le détecteur va perturber ce champ et entraîner une information en sortie.

Les capteurs opto-électriques

fonctionnent grâce à la lumière. Le dispositif est composé d'un émetteur et d'un récepteur. Lorsque le récepteur enregistre une variation de l'intensité lumineuse envoyée par l'émetteur, il en déduit qu'un objet vient de passer à proximité. Cette variation peut être due au fait qu'une pièce circule entre l'émetteur et le récepteur ou bien que la distance entre l'objet réfléchissant la lumière de l'émetteur vers le récepteur a changé. Il existe de nombreux autres types de capteurs, mais le principe d'acquisition, de traitement et de renvoi de la donnée reste constant. Nous avons vu que la mesure d'un capteur est toujours entachée d'une erreur. Celle-ci provient le plus souvent, dans le cas des capteurs électriques, de la conversion du signal de l'analogique au numérique. L'analogique caractérise une évolution continue d'une grandeur offrant donc une précision infinie, mais fortement affectée par les perturbations. On peut réaliser l'analogie avec une route dont l'altitude augmente de façon continue, mais où des cahots peuvent modifier l'évolution globale. Le numérique fournit un signal discret, c'est-à-dire par niveau, ayant perdu de la qualité mais qui est plus aisé à traiter. En représentant l'image, nous pourrions assimiler la route avec un escalier. L'altitude n'est pas fidèlement représentée, mais la marge entre deux marches permet d'ignorer les irrégularités de la chaussée.

La conversion de l'analogique au numérique entraîne une perte de qualité car le signal est décrit en terme de niveaux et toutes les valeurs intermédiaires à deux niveaux sont perdues, d'où l'apparition d'une erreur. Celle-ci peut être minimisée en réduisant le pas entre les différents niveaux. La qualité du capteur est alors augmentée. Nous avons donc pu constater l'importance des mesures dans la démarche scientifique et leur utilité dans quelques applications industrielles, tout en remarquant que les capteurs réalisant ces mesures sont de types et de qualités diverses. À ce jour, une voiture moderne compte près de soixante capteurs pour assurer son fonctionnement et le confort des passagers et il est à parier que ce nombre croîtra rapidement dans les années à venir. Ainsi pouvons-nous assurer que le domaine de l'acquisition et du traitement de l'information physique est appelé à se développer de façon considérable.

#### Principe de fonctionnement d'un capteur

