

Propagation d'un signal

I - Signal, information et bruit

I.1 - Principes généraux

De façon générale, un signal est la *variation temporelle* d'une quantité physique portant une *information*¹. La quantité physique en jeu comme la nature de l'information portée peuvent être très variées. Dans tous les cas, un *capteur* est nécessaire afin de détecter le signal et en extraire l'information. Très souvent, le capteur réalise une transformation de la grandeur physique en une autre, plus facilement *traitable* par l'utilisateur (dans l'immense majorité des cas, la grandeur physique finale est électrique).

Néanmoins, toutes les variations des grandeurs physiques ne portent pas forcément une information, celles qui ne portent pas d'information sont appelées « bruit »¹. La séparation signal/bruit est un problème très complexe, subjectif (il dépend d'un point de vue de l'utilisateur) et est abordé par la discipline dite du traitement du signal.

Exemple : dispositif rudimentaire de chronométrage en athlétisme.

Une source lumineuse émet un rayon lumineux d'un point A vers un point B. AB est la « ligne d'arrivée ». Un capteur (cellule photoélectrique) placé en B transforme l'éclairement lumineux en grandeur électrique. Lorsqu'un coureur franchit la ligne d'arrivée, le rayon lumineux n'arrive plus au récepteur et le capteur est *sensible* à cette variation.

- grandeur : éclairement lumineux ;
- signal : variation de l'éclairement lumineux ;
- information : un coureur franchit la ligne d'arrivée ;
- capteur : cellule photoélectrique ;
- bruit : lumière ambiante et toute chose perturbant l'éclairement lumineux entre l'émetteur et le récepteur.

On notera que le signal n'est pas l'éclairement lumineux mais la *variation* de cet éclairement, qu'il y a certainement un *seuil de détection* de la cellule photoélectrique, et que pour séparer le signal du bruit, puis interpréter correctement l'information transportée, il est nécessaire de connaître ou de savoir étudier les caractéristiques temporelles des signaux et notamment leur spectre, c'est-à-dire l'amplitude des différentes fréquences dont il est constitué.

I.2 - Exemples

Un signal peut être associé à n'importe quel type grandeur physique :

- mécanique : variation de position, de vitesse ;
- sonore ou acoustique : il s'agit également d'une oscillation mécanique, en l'occurrence celle d'un milieu (par exemple un fluide comme l'air, l'eau, etc.), la grandeur associée étant alors la pression (ou surpression) du milieu ;
- électrique : variations de tension ou d'intensité de courant ;
- électromagnétique : variation du champ électromagnétique, c'est-à-dire des champs électrique et magnétique ;
- optique : variation d'intensité lumineuse, de longueur d'onde ; un signal optique n'est qu'un cas particulier de signal électromagnétique détectable par le capteur appelé « œil » ;
- thermodynamique : variation de pression, de température ;
- chimique : variation de composition (concentrations).

1. Richard Taillet, Loïc Villain, Pascal Febvre, *Dictionnaire de physique*, deuxième édition, De Boeck, 2009, page 503.

II - Signaux périodiques

II.1 - Information portée

Les signaux parfaitement périodiques ne sont généralement porteurs que de peu d'information car une seule caractéristique temporelle les définit : leur période T (ou leur fréquence f). Une fois le signal reçu pendant au moins une période, ils se répètent indéfiniment, sans aucun changement, et n'apporte plus d'information.

Néanmoins, les signaux périodiques sont quand même très utilisés si l'une de leur propriété (amplitude ou fréquence) varie dans le temps : c'est le cas des signaux *modulés*, à la base des communications par radio notamment.

D'autre part, les *signaux sinusoïdaux* revêtent une importance majeure parce que n'importe quelle forme de signal peut généralement être décomposée en une somme particulière de signaux sinusoïdaux d'amplitudes et de fréquences différentes². La donnée de ces amplitudes et de ces fréquences de décomposition, appelée *spectre du signal*, est alors une information (sur la source du signal par exemple).

II.2 - Ordres de grandeur de fréquences

En acoustique : les signaux acoustiques **audibles** par l'Homme ont des fréquences comprises entre quelques dizaines de hertz et une quinzaine de kilohertz, l'intervalle étant variable d'une personne à l'autre et avec l'âge. La norme HiFi retient comme plage de fréquence l'intervalle [20 Hz ; 20 kHz]. Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 kHz ; néanmoins, certaines personnes ayant une fréquence d'audition haute proche de 20 kHz, pour éviter que ces ultrasons ne leur soient audibles (ce qui peut vite être très pénible), on utilise en travaux pratiques une fréquence bien supérieure, d'environ 40 kHz.

En électromagnétisme et en optique : Les figures 1 et 2 résument les différents domaines électromagnétiques. On retiendra que :

- l'énergie électrique domestique est transportée à la fréquence de 50 Hz ;
- les téléphones portables et le Wifi utilisent des fréquences autour du gigahertz ;
- les micro-ondes sont comprises entre $3 \cdot 10^8$ et $3 \cdot 10^{11}$ Hz ;
- le **domaine visible**, étudiée par l'optique est contenu dans l'intervalle de longueurs d'onde [400 nm ; 700 nm], c'est-à-dire des fréquences autour de $5 \cdot 10^{14}$ Hz.

En travaux pratiques, les gammes de fréquences électriques utilisées sont très variables mais on peut retenir que de façon usuelle elles vont de quelques hertz à quelques mégahertz.

II.3 - Signaux sinusoïdaux

L'expression générale d'un signal sinusoïdal s est :

$$s(t) = s_0 + s_m \cos(\omega t + \varphi)$$

Où :

- s_0 est la valeur moyenne du signal,
- ω est la pulsation,
- $T = \frac{2\pi}{\omega}$ est la période,
- s_m est l'amplitude,
- $\omega t + \varphi$ est la phase,
- φ est la phase à l'origine des temps.

Par exemple, si le signal est électrique, on peut en observer l'évolution temporelle grâce un oscilloscope (voir figure 3).

2. Cette décomposition est appelée décomposition de Fourier.

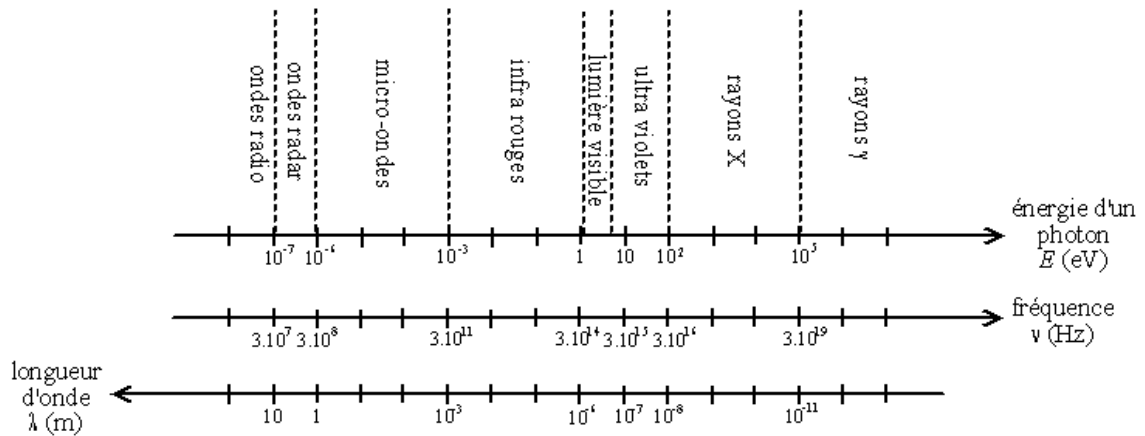


FIGURE 1.1 – Spectre en énergie, fréquence et longueur d'onde lumineuses.

Par Christophe Dang Ngoc Chan Cdang at fr.wikipedia (work by Cdang) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) ou CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

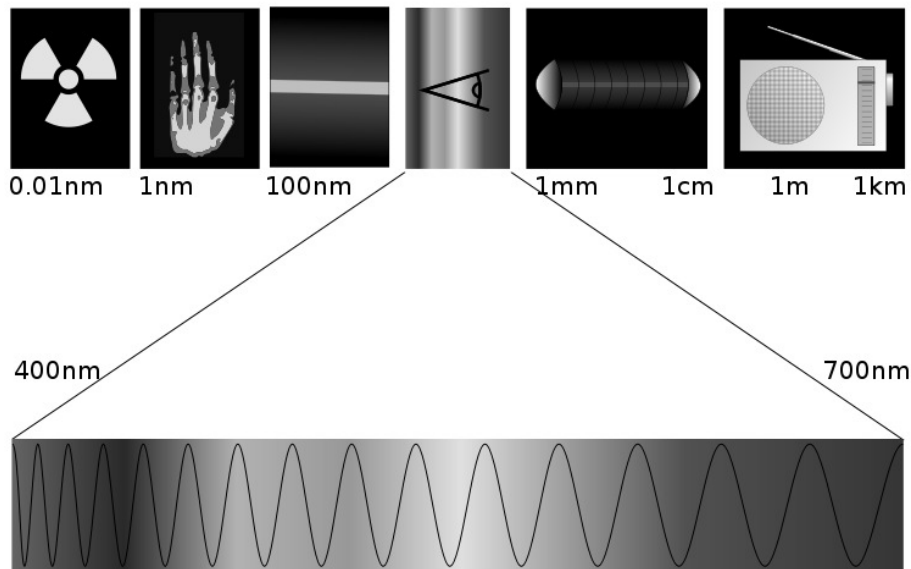


FIGURE 1.2 – Spectre électromagnétique et spectre visible.

Par Tatoute and Phrood (inconnu) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>), CC-BY-SA-3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) ou CC-BY-SA-2.5-2.0-1.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5-2.0-1.0/>)], via Wikimedia Commons.

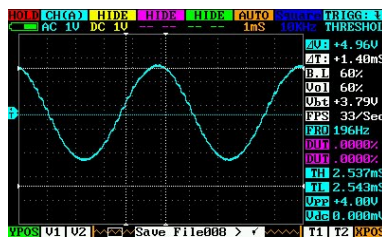


FIGURE 1.3 – Capture d'écran d'un oscilloscope numérique, affichant l'évolution temporelle d'un signal sinusoïdal.

II.4 - Valeur moyenne et valeur efficace

Valeur moyenne

Dans un cas général, la valeur moyenne d'un signal périodique s de période T est donnée par :

$$\langle s \rangle = s_{moy} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, la valeur moyenne est alors :

$$\langle s \rangle = s_{moy} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [s_0 + s_m \cos(\omega t + \varphi)] dt = s_0$$

La première difficulté survient lorsque le terme s_0 est égal à 0 : tous les signaux ayant s_0 nul ont la même valeur moyenne, quelle que soit leur amplitude. Il faut alors déterminer une autre grandeur, pour décrire plus complètement le signal, c'est un des rôles de la valeur efficace.

Valeur efficace

Dans un cas général, la valeur efficace s_{eff} d'un signal périodique s de période T est donnée par :

$$(s_{eff})^2 \equiv \langle s^2 \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt$$

ou encore

$$s_{eff} \equiv \sqrt{\langle s^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

On peut montrer que :

$$s_{eff} = \frac{s_m}{\sqrt{2}}, \text{ pour un signal sinusoïdal de valeur moyenne nulle}$$

Relation avec l'énergie

On peut s'étonner de la présence du carré du signal dans la définition de la valeur efficace. La raison en est que, généralement, la grandeur énergétique associée à un signal physique est proportionnelle au carré de ce signal ; la valeur efficace d'un signal permettra donc de déterminer facilement l'énergie et la puissance moyenne associée au signal. On a déjà vu, par exemple, que pour l'oscillateur harmonique l'énergie potentielle élastique est $\frac{1}{2} k (\ell - \ell_0)^2$, proportionnelle au carré de l'élongation $\ell - \ell_0$. On rencontrera d'autres exemples analogues en électricité notamment.

IV - Onde progressive unidirectionnelle

