

ACQUISITION INFORMATISEE DE MESURES

Les logiciels dits "d'acquisition de données" mais aussi désormais les multimètres numériques et les oscilloscopes numériques, reposent sur des dispositifs dont les principes conduisent à une double discrétisation : dans le temps et sur la valeur de la mesure. Cela a des conséquences sur les calculs qui sont ensuite effectués sur ces valeurs.

Du point de vue de la physique, l'introduction des interfaces de mesure (convertisseurs analogiques-numériques) s'est accompagnée d'un développement des capteurs. De façon plus générale, on parle ainsi de "chaîne de mesure informatisée"².

Du point de vue du vocabulaire, il convient sans doute de ne pas parler d'acquisition de données, expression qui – proche du "*data logging*" n'est pas nécessairement adaptée aux situations pédagogiques ; on pourra préférer "acquisition de mesures", et l'on précisera si nécessaire "automatique" ou "informatisée". De même il conviendrait de distinguer la mesure en tant que résultat, de l'action même de mesurer : le "mesurage".

Le présent chapitre ne vise pas à être un "cours" sur ces questions. Il présente quelques principes de base permettant de se faire une représentation du fonctionnement de la chaîne de mesure et d'en comprendre les principales propriétés.

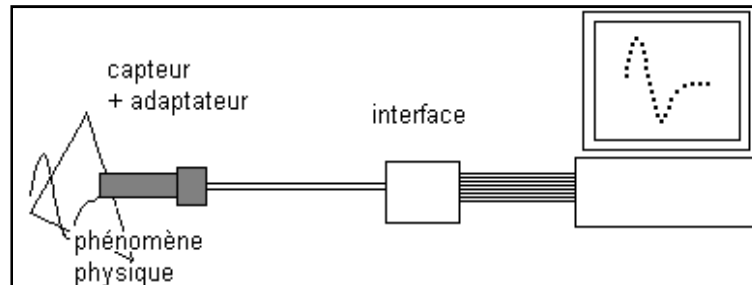
1. La chaîne d'acquisition informatisée

1.1. Capteur, adaptateur, interface, logiciel

Pour étudier un phénomène, il faut généralement un capteur qui permet de suivre la variation d'une grandeur (position, tension, etc.) et de la transformer en un signal électrique. Celui-ci doit généralement être mis en forme pour donner la mesure de la grandeur (amplification, décalage de zéro, linéarisation) ; une électronique d'adaptation est alors incluse au capteur.

L'obtention d'une tension analogique ainsi "calibrée" nécessite ensuite, pour transférer l'information à l'ordinateur, une conversion analogique – numérique (interface).

² Au programme des classes de Seconde (option MPI), terminale STL-PLPI et terminale STI - électronique.



Schématisation des éléments d'une chaîne informatisée de mesures.

La partie *convertisseur analogique-numérique (CAN)* de l'interface est, suivant les cas, extérieure à l'ordinateur (boîtier externe) ou sous forme d'une carte insérée sur la carte-mère de l'ordinateur. Un microphone branché sur la "carte son" d'un ordinateur constitue l'exemple bien connu d'une chaîne "capteur + convertisseur".

Enfin, il faut noter aussi que le dernier élément de la chaîne est le logiciel qui permet de restituer la valeur de la grandeur mesurée et en particulier d'attribuer les unités correspondantes³.

1.2. Résolution et échantillonnage

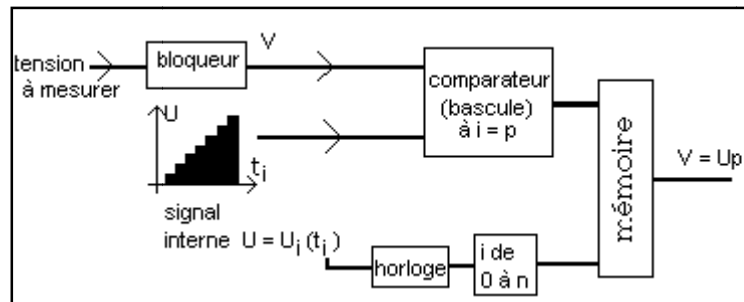
Le principe repose sur l'utilisation d'un (ou plusieurs) comparateur(s) électronique(s)⁴, la tension issue du capteur-adaptateur étant comparée à une tension connue. Cette méthode impose deux conditions : 1- la réalisation d'une tension connue pouvant prendre différentes valeurs ; 2- le "blocage" de la tension à mesurer le temps de la comparaison.

Ainsi, pour chaque relevé de mesure, la tension à mesurer (V) est "isolée" au niveau d'un condensateur, tandis qu'une tension (U) est générée en interne par un convertisseur numérique-analogique. Cette tension U est une rampe pilotée par une horloge qui gère l'incrément à chaque date t_i . Le comparateur arrête le processus dès que la valeur de U dépasse celle de V . La valeur U_p à cette date t_p est connue et constitue le résultat de la mesure⁵.

³ Dans certains cas, le logiciel "reconnait" l'adaptateur et adapte automatiquement les unités ; dans d'autres cas, c'est au niveau de l'étalonnage du capteur que l'utilisateur spécifie les unités (voir le chapitre "Capteurs").

⁴ Voir le chapitre "Amplificateur opérationnel".

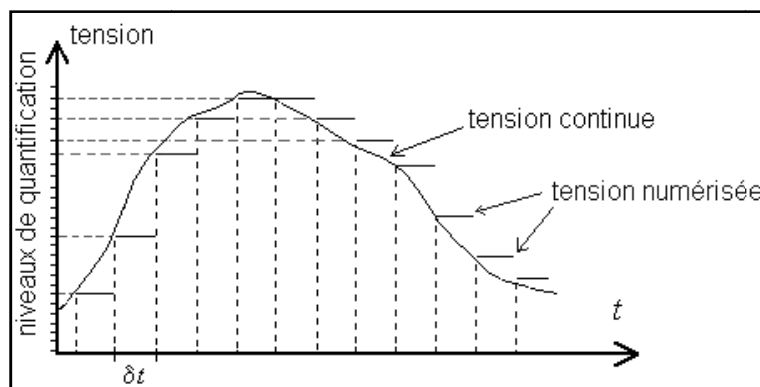
⁵ N'est pas évoquée ici la question du transcodage en nombre binaire nécessaire avant tout traitement numérique.



Le comparateur bascule et arrête la comparaison :
la valeur mémorisée correspond alors à celle qui a été générée à cette date.

Toute mesure numérisée est donc "quantifiée" et traduite par un nombre entier. La *résolution* est liée au nombre de bits du convertisseur : ainsi, un convertisseur 8 bits, code les mesures sur $2^8 = 256$ niveaux. Pour une tension maximale de 5 volts par exemple, la variation minimale de tension détectable est donc de $5/255$ V.

Dans le cas du suivi d'une grandeur en fonction du temps, la mesure ne peut donc pas être faite en continu : il faut un temps minimal pour effectuer le processus évoqué ci-dessus. Le signal est ainsi nécessairement *échantillonné* au cours du temps ; le résultat est donc une série de valeurs⁶. La qualité de l'acquisition peut reposer sur la fréquence d'échantillonnage (voir le chapitre "Calculs numériques"). Pour un cédérom audionumérique, la fréquence d'échantillonnage est de 44 100 Hz. Celle d'un oscilloscope numérique est de 1,00 MHz.



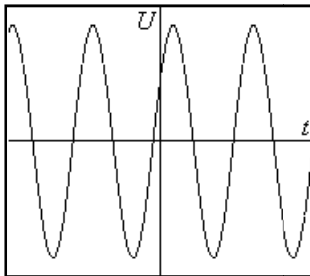
Successions de valeurs quantifiées et échantillonnées
issues d'une tension variant continûment au cours du temps.

⁶ Dans la pratique scolaire des logiciels d'acquisition, les valeurs du "pas d'échantillonnage" à utiliser pour suivre des phénomènes tels que la charge d'un condensateur ou les oscillations d'un pendule, sont largement supérieures à la limite inférieure imposée par l'interface.

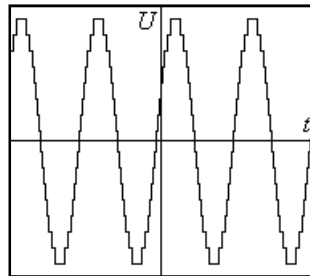
2. Quelques conséquences

2.1. Effet de quantification (résolution)

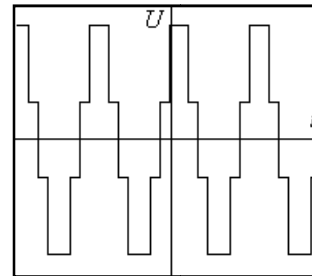
La quantification est donc caractérisée par le nombre de valeurs permises par le codage binaire. Plus le nombre de bits de codage est élevé, meilleure est la résolution. Sur les "cartes son" et les logiciels d'analyse et de traitement "grand public", le choix est généralement offert entre 8 bits et 16 bits. La qualité "cédérom audio" correspond à une résolution de 16 bits. Ci-dessous, une illustration de l'effet de quantification et de résolution lié au nombre de bits du codage.



Sur 1 octet.



Sur 4 bits.

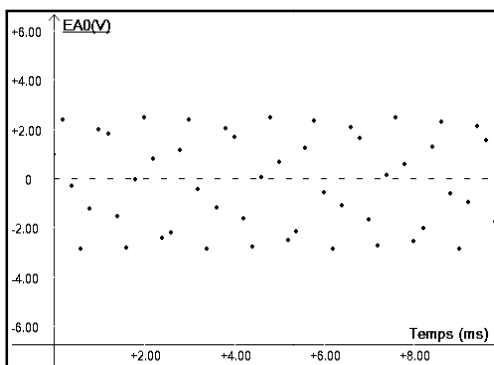


Sur 2 bits.

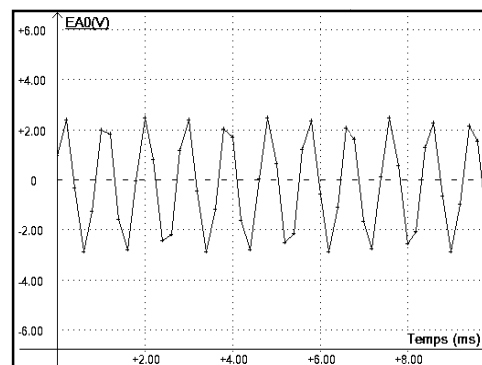
2.2. Effets d'échantillonnage

Échantillonnage insuffisant

Les copies d'écran ci-dessous illustrent l'effet d'un échantillonnage insuffisant.



Échantillonnage insuffisant : les mesures ne permettent pas de reconstituer le signal.



Mêmes données, mais en affichage "mode ligne".

Deux remarques sont à faire à ce niveau.

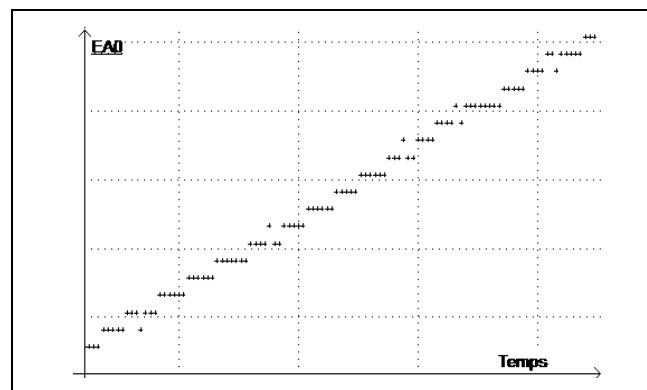
La première est l'importance de choisir l'option avec représentation "par point" (points seuls ou avec lignes d'interpolation) de façon à *voir les mesures*⁷.

La seconde est que la situation peut-être pire : un sous-échantillonnage – c'est-à-dire – à une fréquence inférieure à la fréquence (ou plus généralement au temps caractéristique du phénomène) donne un effet "stroboscopique"⁸.

Sur-échantillonnage

Augmenter la fréquence d'échantillonnage n'est pas non plus une panacée. Outre le fait que cela augmente le nombre de points et donc le temps de calcul par la suite, on risque d'obtenir un signal comportant des effets de paliers lors de variations lentes du signal. En effet, si la fréquence est trop élevée la tension n'a pas suffisamment varié pour correspondre à une valeur différente de quantification.

L'effet est facile à observer à l'aide d'un logiciel d'acquisition et d'un générateur de fonction que l'on règle sur une forme "rampe" (ou triangle) à basse fréquence (voir copie d'écran ci-dessous).



Points de mesure d'une tension type "rampe"
avec une fréquence d'échantillonnage élevée : effets de paliers.

⁷ Malheureusement, dans la plupart des logiciels, l'option par défaut est le mode "ligne" qui donne l'*illusion* de la continuité !

⁸ Ce qu'on observe, par exemple, lorsqu'on éclaire un objet oscillant avec une fréquence plus faible que celle de l'oscillation.

Compléments bibliographiques

- Manuels scolaires de Seconde, option IESP et option MPI.
- Manuels scolaires de Terminale STL-PLPI, Terminale STI électronique.
- *Bulletin de l'Union de Physiciens*, numéros thématiques : n° 754 et n° 759.
- Gauthier D. Visualisation à l'ordinateur des tensions d'un convertisseur analogique-numérique et d'un convertisseur numérique-analogique. *Bulletin de l'Union de Physiciens*, n° 837.
- Beaufils D. & Schwob M. (Dir.) (1997). *Les outils informatiques d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences physiques*. Paris : UdP-INRP.
- EDUSCOL (MPI). Acquisition d'une tension : échantillonnage et nombre de bits du convertisseur ; logiciel ORPHNUM.
[<http://eduscol.education.fr/D0030/c0tp8of.htm>]

QUELQUES CALCULS NUMERIQUES DE BASE

La fonction de calcul est la fonction principale d'un ordinateur. Du point de vue de l'utilité en physique, c'est d'abord la possibilité de calculer de nouvelles grandeurs physiques à partir de mesures, et donc d'étudier le phénomène dans différents *espaces de représentation*.

Cela nécessite, outre les opérations élémentaires et le calcul de fonctions mathématiques, l'utilisation de techniques numériques pour traiter la dérivation et l'intégration (détermination d'une vitesse à partir d'une position, de l'intensité à partir de la tension aux bornes d'un condensateur, etc.). La particularité des applications expérimentales vient de ce que ces opérations sont effectuées sur des mesures, et donc *sur des valeurs numériques comportant une part d'incertitude*. Ce "bruit" sur le signal initial n'est pas sans conséquences sur les résultats des calculs, et des techniques spécifiques doivent parfois être utilisées pour minimiser les effets.

Par ailleurs, le traitement numérique des équations différentielles permet d'étudier des systèmes régis par des équations non nécessairement solubles analytiquement et donc d'étudier des comportements non nécessairement *réduits* à des cas "simples". Il convient donc d'en connaître le principe⁹.

1. Dérivation et intégration numériques sur valeurs expérimentales

1.1. Dérivation : méthode de base

On considère un ensemble de couples de mesures (t_i, x_i) entré à la main ou automatiquement dans l'ordinateur et l'on s'intéresse à la variation de la grandeur x au cours du temps¹⁰.

Le principe de base de la dérivation numérique consiste à calculer le taux de variation entre le point précédent et le point suivant :

$$x'_i = x'(t_i) = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

⁹ Désormais aux programmes de mathématiques et de physique de la classe de Terminale S.

¹⁰ Le choix est fait ici de supposer qu'il s'agit d'une grandeur x qui varie au cours du temps, cas le plus répandu dans la pratique ; mais ceci peut être généralisé pour étudier la variation d'une grandeur y en fonction d'une autre grandeur x (calcul du gradient de température le long d'une barre par exemple).

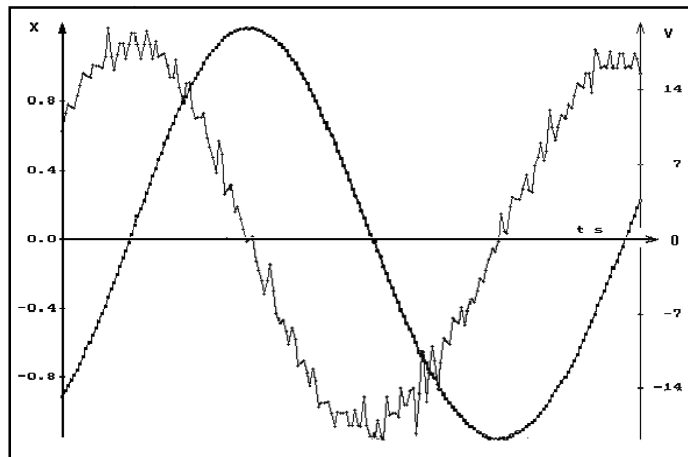
Cette méthode de base appelle plusieurs remarques :

1- la relation ci-dessus ne suppose pas que les intervalles de temps soient les mêmes ;

2- les deux points extrêmes ne peuvent évidemment pas être calculés selon ce principe ; soit on donne simplement le résultat du calcul sur l'intervalle simple, soit on effectue une correction en tenant compte de la variation de la dérivée calculée sur les points voisins ;

3- de même, si l'on applique ce calcul à un phénomène présentant des discontinuités (rebond d'une balle par exemple), il faut alors effectuer le calcul de dérivation par intervalles¹¹.

4- le résultat dépend de l'échantillonnage : un pas trop grand fait perdre le détail des variations, un pas trop petit peut entraîner une amplification du bruit qui peut être rédhibitoire¹².



Calcul d'une vitesse au cours du temps par dérivation numérique : effet d'amplification du bruit.

1.2. Dérivée avec "lissage"

Une technique de "lissage" peut être utilisée pour estomper les effets "d'amplification de bruit" que l'on peut observer lorsque les points expérimentaux sont de qualité insuffisante :

- lissage barycentrique, lorsque les points sont régulièrement échantillonnés : on effectue un calcul pondéré sur 5, 7, ... points, ce qui

¹¹ Les logiciels permettent en général de définir des intervalles en fixant des bornes sur l'ensemble des mesures.

¹² Une incertitude de quelques pour cent sur la mesure de l'élongation peut entraîner une incertitude de l'ordre de 10% sur le calcul de la vitesse par dérivation numérique. Dès lors, une incertitude de 20% peut apparaître sur la représentation de l'énergie cinétique...