

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

Physique pour les chimistes -Acquisition et traitement des données

2022-2023

Bibliographie :

Table des matières

1	Introduction : les concepts de base		3
	1.1 Les chaînes d'acquisition		3
	1.2 Le codage numérique		3
	1.3 Quelques ordres de grandeur		4
	1.4 La compression des données numériques		5
2	Conversion analogique-numérique		5
	2.1 Convertisseur de démonstration		5
	2.2 Autres expériences possibles illustrant l'effet de la fréquence d'échantillonnage		7
	2.3 Transformée de Fourier, échantillonnage et théorème de Shannon		7
3	Acquisition d'un signal sur l'ordinateur avec Latis Pro		8
	3.1 Acquisition d'un signal périodique		9
	3.2 Acquisition d'un signal transitoire : charge et décharge d'un condensateur	• •	9
4	Modélisation		10
	4.1 Avec Latis Pro		11
	4.2 Avec QtiPlot	• •	11
5	Compléments sur le traitement des données		14
	5.1 Compression		14
	5.2 Détramage	• •	14

Ce TP-cours hors série a pour objectif de vous familiariser avec les principes et les méthodes pratiques de l'acquisition de signaux physiques, de leur traitement et de leur analyse.

1 Introduction : les concepts de base

1.1 Les chaînes d'acquisition

L'acquisition de données à partir de signaux physiques de natures diverses utilise des dispositifs variés qu'il serait illusoire de vouloir lister exhaustivement (caméras, microphones, capteurs de température, de pression, anémomètres,) Pourtant, toutes les chaînes d'acquisition présentent des éléments communs :

- Une étape de conversion du signal d'intérêt sous une forme a priori manipulable plus facilement, en l'occurrence en un signal électrique.
- Une étape d'amplification de ce signal électrique, lorsque celui-ci est trop faible pour être exploitable directement en sortie du convertisseur.
- Une étape d'échantillonnage temporel et de numérisation, c'est-à-dire le passage d'un signal défini sur un axe continu en temps et pouvant prendre n'importe quelle valeur en une succession discrète, à intervalles de temps réguliers, de nombres ne pouvant prendre qu'un ensemble fini de valeurs.
- Enfin une étape de stockage de cette information numérique sur un système dédié (un disque dur, par exemple).

Dans ce qui suit, nous ne nous intéresserons pas à proprement parler aux deux premières étapes, qui sont très spécifiques à chaque type de signal considéré, et seront illustrées dans les différents TP à l'aide de nombreux types de capteurs différents. Nous nous concentrerons sur les problématiques liées à la numérisation et à l'échantillonnage, avant de passer à la modélisation des données expérimentales, c'est-à-dire leur ajustement par un modèle théorique.

1.2 Le codage numérique

Dans la plupart des applications actuelles, l'information, qu'il s'agisse de texte, de sons, ou encore d'images, est donc le plus souvent représentée sous forme numérique, c'est-à-dire codée sur un ensemble d'entiers¹. Ces entiers sont représentés en binaire, c'est-à-dire en base deux, où l'entité de base est le "bit"², ne pouvant donc prendre que deux valeurs, typiquement 0 ou 1. L'octet³ est un ensemble de 8 bits, permettant de coder les nombres de 0 (00000000 en binaire) à 255 (11111111 en binaire). Un codage sur *n* bits permet donc de représenter les nombres entiers de 0 à $2^n - 1$. À titre d'exemple le système ASCII est un codage sur 7 bits (permettant de représenter 128 caractères, ce qui est largement assez pour tous les alphabets, en majuscules et en minuscules, complétés des chiffres et de tous les symboles usuels de ponctuation).

Cette représentation numérique de l'information présente plusieurs intérêts majeurs :

- Elle est par nature indépendante du médium de stockage.
- Elle se prête facilement à des manipulations mathématiques d'analyse et de traitement par des outils informatiques. Via ces manipulations, on peut notamment modifier a posteriori le texte, le son et les images⁴ et leur appliquer des opérations de compression, avec ou sans perte d'information, qui réduisent les besoins de stockage.
- Elle est facilement transportable d'un point à un autre sans perte et sans ajout de bruit.

1. Par exemple, dans le système ASCII (American Standard Code for Information Interchange), le caractère "A" est codé par l'entier 65.

^{4.} Par exemple, on peut modifier une photographie pour enlever ou modifier un élément gênant, ajouter un écho sur un son ou bien corriger la justesse d'une voix dans une chanson après l'enregistrement. La liste des modifications n'est pas envisageable, mais il est intéressant de remarquer que la plupart de ces modifications sont basées sur un mécanisme physique (l'écho, le flou, le changement de ton).



^{2.} Contraction de "binary digit" (chiffre binaire)

^{3.} En anglais, un octet se dit "byte" et son symbol est "B", à ne pas confondre avec "b", qui est le symbole de "bit"

La restitution, par un système adapté (une chaîne-hifi, un téléviseur) de cette information numérique sous une forme physique pertinente (une perturbation de pression ou un champ de rayonnement électromagnétique, dans chacun de ces deux exemples), est censée provoquer chez l'être humain une réaction physiologique la plus proche possible de ce que l'on aurait ressenti "en direct".

1.3 Quelques ordres de grandeur

Il est important d'avoir une idée de la quantité d'information, en bits, en octets, en méga-octets⁵, ou dans une autre unité, que représentent divers types de media.

Par exemple, l'information contenue dans une page manuscrite est principalement donnée par la succession des caractères alphabétiques, discrets et fixes, codés par exemple en ASCII. Si l'on estime qu'il y a environ 80 caractères par ligne et environ 40 lignes par page, il faut donc environ 22400 bits pour coder une page, et donc environ 280 ko pour stocker un livre d'une centaine de pages.

Pour un son, il faut tenir compte de deux complexités supplémentaires :

- D'une part, un champ sonore est caractérisé par une quantité, la pression locale, qui est continue et non pas discrète ⁶. Un nombre binaire, aussi grand soit-il, ne peut représenter qu'avec une certaine fidélité la pression réelle. Les mesures psychoacoustiques montrant que l'être humain n'est pas capable de distinguer l'amplitude d'un son en dessous d'une certaine sensibilité δP (de l'ordre de quelques dizaines de μ Pa), on en tire le nombre d'entiers nécessaire pour coder suffisamment précisément la pression, connaissant l'amplitude maximale ΔP des variations de pression⁷, à savoir $\sim \Delta P/\delta P$.
- D'autre part, le signal sonore est par définition variable dans le temps ⁸. Il faut donc procéder à un échantillonnage de ce signal, ce qui pose la question du temps d'échantillonnage t_e ou de la fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/t_e$, sachant que l'oreille humaine perçoit les sons compris entre 20 Hz et 20 kHz. Un théorème dû à C. Shannon ⁹ indique que **la représentation discrète d'un signal analogique par des échantillons régulièrement espacés exige une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la fréquence maximale présente dans ce signal. Ceci explique pourquoi le signal numérique gravé sur un CD est échantillonné à 44,1 kHz (>2x20 kHz), ce qui permet de garantir la fidélité de la restitution sonore.**

Pour avoir un ordre de grandeur, on note que sur ce même CD, le codage du signal est fait sur 16 bits. On en déduit donc un débit d'information par seconde ¹⁰ de 1411,2 kbps (kilobit par seconde), en tenant compte de la stéréophonie. Un CD pouvant contenir 700 Mo de données ¹¹, on peut y enregistrer environ 73 minutes de musique.

Pour une image fixe, d'autres complexités apparaissent :

- L'intensité lumineuse est une fonction continue de la direction d'observation, qu'il convient donc d'échantillonner spatialement, au moyen de pixels ¹². Une image numérisée est donc décrite par la succession de la composition en couleur de ces pixels, dont la taille est déterminée de sorte que leur densité (nombre par unité de longueur, en ppp : pixel-per-point) soit suffisante, sachant que deux rayons lumineux séparés d'un angle inférieur à une minute d'arc (1/60 de degré) ne peuvent pas être distingués par l'œil.
- D'autre part, pour les images en couleurs, la continuité du spectre électromagnétique dans le visible impose elle aussi un échantillonnage, mais la physiologie de l'œil permet cependant d'en choisir un très grossier : les cônes sont des photodétecteurs très large bande et sont de trois types. De ce fait, on peut reproduire les

^{12.} Abréviation de "picture element" en Anglais.



^{5.} $1 \text{ Mo} = 1024 \text{ ko} = (1024)^2 \text{ octets} = 8388608 \text{ bits}.$

^{6.} On peut cependant limiter l'information nécessaire à seulement deux points de l'espace, correspondant aux oreilles droite et gauche (stéréophonie).

^{7.} Si le signal à coder dépasse l'amplitude maximale lors de l'enregistrement, on aura une saturation et la restitution sera nécessairement déficiente.

^{8.} Dans le cas contraire, ce serait vite lassant...

^{9.} https://fr.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon

^{10.} En anglais, cette quantité est appelée "bitrate".

^{11.} Pour information, un DVD simple couche et simple face offre un stockage de 4,7 Go.

stimuli visuels en se plaçant en simple trichromie. C'est ce que l'on réalise via la synthèse additive RVB (rouge-vert-bleu, RGB en anglais). Pour plus d'information sur la synthèse des couleurs, on se reportera au TP Optique I.

En définitive, chacun des trois canaux RGB est le plus souvent codé sur 8 bits, de sorte qu'une image remplissant un écran 15 pouces (1680 par 1050 pixels) occupe environ 5 Mo sur disque.

Enfin, pour la vidéo, il faut rajouter la dimension temporelle, avec un débit typique de 25 images par seconde. En format "4K", chaque image est codée sur 4096 par 2160 pixels. Un film d'une heure trente occupe donc, hors compression, un espace disque d'environ 3,26 To¹³.

1.4 La compression des données numériques

Ce dernier exemple illustre la nécessité de recourir à une compression des données, d'une part pour économiser l'espace de stockage, mais aussi pour permettre un échange efficace d'un grand nombre de données sur un réseau de télécommunication. Cette compression tire partie du fait que les sons et images que nous percevons comportent une grande part de redondance. Par exemple, un silence enregistré prend autant de place sur un disque dur qu'une symphonie de même durée, alors que ce silence ne contient en effet aucune information stricto sensu. La compression consiste à utiliser une transformation mathématique du signal de manière à diminuer la taille nécessaire pour le décrire. On définit l'efficacité de la compression par le rapport de la taille de l'objet numérique original sur la taille de l'objet comprimé. Il existe deux grandes classes de méthodes de compression :

- La compression sans perte permet de reconstituer exactement l'information numérique d'origine. La technique standard consiste à repérer les motifs binaires apparaissant fréquemment dans le fichier décrivant les données. On classe ces motifs par ordre de fréquence d'apparition et on attribue à chacun un mot binaire d'autant plus petit que sa fréquence d'apparition est importante. Cette technique nécessite de construire un dictionnaire en début de fichier de manière à permettre la traduction inverse.
- La compression avec perte qui utilise les spécificités des réponses physiologiques humaines pour supprimer une partie des informations non perçues (ou non interprétées par le cerveau) et donc superflues. Cette approche est bien sûr beaucoup plus efficace que la compression sans perte, mais elle ne permet pas l'exploitation ultérieure d'un détail de l'original (par exemple, zoomer dans une photo).

2 Conversion analogique-numérique

On aborde maintenant les aspects pratiques de l'acquisition de données, en illustrant d'abord les concepts de fréquence d'échantillonnage et de profondeur de numérisation.

2.1 Convertisseur de démonstration

[Facultatif] On dispose d'un convertisseur analogique numérique (CAN) de démonstration (ENSP 4367, notice N3). Il permet de visualiser les effets de différentes fréquences d'échantillonnage (1, 5, 10 ou 20 kHz) et différentes profondeurs de numérisation (2, 4, 8 ou 10 bits). Cette manipulation, essentiellement illustrative, permet de visualiser ces concepts au moyen d'un dispositif purement pédagogique. Elle pourra trouver sa place dans la leçon 'Acquisition et traitement de données'.

Expérience : Brancher un GBF délivrant un signal sinusoïdal à 100 Hz en entrée du CAN, et brancher un oscilloscope en parallèle, afin de visualiser le signal envoyé. Brancher l'autre voie de l'oscilloscope sur la sortie du CAN (avec la borne rouge indiquée *sortie de restitution du signal converti* sur la notice). Votre montage devrait ressembler à celui de la figure.

^{13.} Un tera-octet correspond à 1024^4 octets.





FIGURE 1 - Montage avec le CAN de démonstration

Régler la fréquence d'échantillonnage sur *direct* via le bouton poussoir Fe, ce qui permet de visualiser en direct la forme du signal numérisé. Jouer alors sur le niveau de codage (2, 4, 8 ou 10 bits) via le bouton poussoir Q et observer la forme du signal de sortie. Observer également l'effet d'une modification de l'amplitude du signal d'entrée. Vérifier en particulier, en utilisant une amplitude suffisamment grande, que le signal numérisé est bien codé sur le nombre de bits attendu (on doit voir 16 niveaux pour un codage sur 4 bits, par exemple).

Expérience : Toujours avec le même signal sinusoïdal à 100 Hz, choisir maintenant un codage sur 10 bits et une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz (toujours via le bouton poussoir *Fe*). Choisir une base de temps sur l'oscilloscope de l'ordre de 50 ms et synchroniser l'oscilloscope sur le signal de sortie du CAN avec un niveau de déclenchement adapté à l'amplitude du signal (choisir un niveau proche de zéro par sécurité). Réaliser alors une acquisition du signal (bouton *acquisition*, voir la notice p. 3). Visualiser le signal échantillonné via le bouton de restitution (voir la notice, même page). Le signal est identique à celui acquis. Attention, le signal enregistré n'est restitué que pendant une durée finie, mais il est toujours en mémoire, il suffit de presser à nouveau le bouton *restitution* pour le revoir. Changer maintenant la fréquence de restitution (10, puis 5 et 1 kHz) et observer son effet ¹⁴. On pourra rendre cela quantitatif en incluant une mesure de la fréquence de ce signal sur l'oscilloscope. Proposer une interprétation de cet effet.

Expérience : Ce boîtier dispose d'une entrée microphone et d'une sortie audio mono. Brancher un microphone en entrée et un haut-parleur sur la sortie de restitution, au travers d'un amplificateur de puissance, comme indiqué sur la figure.



FIGURE 2 - Montage avec le CAN de démonstration, un microphone et un haut-parleur

Réaliser un enregistrement en 10 bits et 20 kHz, puis restituer le son avec d'autres paramètres (d'abord en changeant la profondeur de numérisation et à 20 kHz, puis en changeant la fréquence de restitution et en 10 bits) pour montrer l'effet de la profondeur de numérisation et de la fréquence de restitution sur le son obtenu.



^{14.} Pour des fréquences de restitution plus faibles, la durée de signal affichée est plus longue, puisque l'ensemble des données stockées à une taille déterminée.

2.2 Autres expériences possibles illustrant l'effet de la fréquence d'échantillonnage

[Facultatif] Ces manipulations peuvent être l'occasion de vous familiariser avec le logiciel Audacity (pour le son) et Gimp (pour les images). Elles aussi pourraient illustrer la leçon 'Acquisition et traitement de données'.

Expérience : Ouvrir le logiciel "Audacity" et choisir un fichier sonore de test au format wav (au besoin, on en trouve libres de droits sur internet). Modifier l'échantillonnage via le menu *Pistes > Rééchantillonner* (de 8 kHz à 384 kHz) et observer les modifications du son. Noter en particulier que la fidélité de la reconstitution augmente avec la fréquence de numérisation jusqu'à devenir imperceptible. Une écoute au casque peut être plus adaptée que l'utilisation des haut-parleurs du PC.



FIGURE 3 - Fenêtre "Audacity"

Expérience : Lancer le logiciel "Gimp" et ouvrir une image en couleurs RVB. Réaliser une décomposition de cette image via le menu *Couleurs > Composants > Décomposer*. On obtient une image contenant 3 calques (afficher la pile des calques via *Fenêtres > Fenêtres ancrables > Calques* si elle n'apparaît pas automatiquement). Chaque calque contient l'un des trois canaux RGB, en niveaux de gris. Sélectionner un des calques et observer l'effet de la profondeur de numérisation (entre 2 et 256 niveaux, soit de 1 à 8 bits) via *Couleurs > Postériser*. On peut ensuite recomposer l'image via *Couleurs > Composants > Recomposer*. Facultativement, on pourra observer les effets d'autres opérations sur l'image (filtres, flous, détection de bords, etc...).



FIGURE 4 – Fenêtre "Gimp"

2.3 Transformée de Fourier, échantillonnage et théorème de Shannon

[**Important**] Ces manipulations, très importantes, vous permettront de vous familiariser avec l'utilisation de la FFT sur un oscilloscope.

Expérience : Utiliser un générateur basse fréquence ainsi qu'un oscilloscope numérique rapide à transformée de Fourier pour illustrer le théorème de Shannon. Commencer par injecter une sinusoïde de faible fréquence (par exemple 1 kHz) et observer la transformée de Fourier à l'oscilloscope. Par exemple, sur un DSOX2002A, appuyer sur le bouton *Math*, sélectionner *FFT* dans le deuxième menu en bas de l'écran, puis choisir la plage et la fréquence centrale (quatrième et cinquième menus en bas de l'écran), en les réglant avec la molette. Changer la base de temps et observer l'effet sur la résolution de la FFT (indiquée sur l'écran). Du fait de la durée finie d'acquisition du signal, le pic de Fourier associé n'est en effet pas infiniment fin : mesurer sa largeur à -3 dB et faire le lien avec la résolution de la FFT.



Expérience : Choisir maintenant un réglage de FFT fixe (fréquence centrale 25 kHz et plage 50 kHz par exemple, de sorte que la fréquence nulle soit tout à gauche de l'écran et que la drosser de l'écran corresponde à 50 kHz), et régler la base de temps de sorte que l'acquisition, en haut à gauche de l'écran, indique 100 kSa/s, ce qui indique que la fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz¹⁵. Augmenter alors progressivement la fréquence du signal depuis 1 kHz pour faire sortir le pic de l'étendue de la transformée de Fourier. Observer le "repliement de spectre" illustrant le théorème de Shannon, lorsque l'on dépasse une fréquence de signal de 50 kHz.



FIGURE 5 – Repliement de spectre

3 Acquisition d'un signal sur l'ordinateur avec Latis Pro

[Important] Nous abordons maintenant l'acquisition de données proprement dite, dont la conversion analogiquenumérique vue ci-dessus n'est que la première étape. Pour cela, on dispose d'un PC et de cartes d'interface SYSAM-SP5 contrôlées par le logiciel Latis Pro¹⁶. Ces cartes peuvent mesurer jusqu'à huit tensions dépendantes du temps simultanément, et le logiciel permet ensuite de traiter et d'analyser les signaux acquis, en leur appliquant des opérations mathématiques ou en ajustant un modèle théorique. L'intérêt principal de l'ordinateur par rapport à l'oscilloscope est, outre ces capacités de traitement des données, la possibilité d'étudier des phénomènes transitoires (non-périodiques), comme par exemple la décharge d'un condensateur à travers une résistance. Ces méthodes trouveront des applications dans la plupart des leçons.



FIGURE 6 – Centrale d'acquisition SYSAM-SP5



^{15.} Faire attention à ce réglage, car si on l'oublie et qu'on a une fréquence d'échantillonnage trop élevée, on n'observera pas le repliement attendu !

^{16.} Il est aussi possible d'utiliser le logiciel Synchronie 6, qui fonctionne de manière semblable.

3.1 Acquisition d'un signal périodique

Pour commencer, on va enregistrer quelques périodes d'un signal périodique, issu d'un GBF, afin de se familiariser avec la carte et le logiciel.

Mise en place Brancher le cordon d'alimentation sur la carte d'acquisition SYSAM-SP5 et relier celle-ci à l'ordinateur via le câble USB. Brancher la sortie du GBF sur la carte à l'aide d'un cordon BNC-banane entre la masse et une des entrées, par exemple EA0. Lancer le logiciel Latis Pro. Cliquer sur le logo au centre pour faire disparaître la fenêtre d'information ¹⁷. En haut de la fenêtre se trouvent une première ligne avec des menus déroulants et une deuxième ligne d'icônes. La fenêtre n°1 est ouverte, elle possède des onglets en bas à gauche, permettant de basculer vers la feuille de calcul et vers le tableur. Ceux-ci n'apparaissent pas nécessairement à l'ouverture, vous pouvez les trouver dans le menu *Traitements* ou avec les touches F3 ou F11. Dans la colonne de gauche est indiqué le système utilisé : SYSAM-SP5 - EUROSMART (tout en bas), avec les différentes voies d'entrée (EA0, EA1, ...) et les paramètres d'acquisition (nombre de points, échantillonnage, ...)

Paramétrage Cliquer sur la voie *EA0* dans la boîte *Entrées analogiques*, puis spécifier les paramètres de l'acquisition dans la boîte *Acquisition*. Il s'agit essentiellement de sélectionner le calibre et l'échantillonnage.

- Pour le calibre, la sélection se fait via un clic droit sur le bouton de la voie (-10/+10, -5/+5, -1/+1, ou -0.2/+0.2). Il faut choisir un calibre bien adapté : en effet, quel que soit le calibre choisi, il est découpé en $N = 2^{12} = 4096$ niveaux (codage sur 12 bits). Si le calibre couvre une gamme de tension ΔV , la précision est donc de $\Delta V/N$. Par conséquent, si le calibre choisi est trop faible, le signal saturera, mais s'il est trop élevé on perd en précision. D'autre part, si on a le choix, il vaut mieux travailler avec des tensions de plusieurs volts, qui permettent souvent de rendre les bruits résiduels moins visibles.
- Pour l'échantillonnage, on se placera dans le mode *Temporel*, et on veillera à ce que le temps caractéristique d'échantillonnage t_e soit adapté à la fréquence du signal délivré par le GBF (selon le théorème de Nyquist-Shannon). Cette sélection se fait en indiquant le nombre N de points à acquérir, entre 10 et 256000, et le temps d'échantillonnage t_e (entre 100 ns et 1440 minutes). Il faut préciser l'unité (ns, μ s, ms, s ou min). La durée totale T de l'enregistrement (au moins $20 \,\mu$ s) est alors adaptée automatiquement, puisqu'on a la relation suivante : $T = Nt_e$. Les trois cases ne sont donc pas indépendantes. Si l'on agit sur l'une des cases, les autres sont modifiées automatiquement. Expérimenter pour s'en convaincre.

Acquisition Une fois que la paramétrisation est faite pour chaque entrée (ici une seule), le système est prêt pour l'acquisition. Pour la lancer, vous pouvez utiliser le menu déroulant *Exécuter* > *Acquisition des entrées*, ou l'icône *Acquisition*, ou la touche F10 du clavier. L'acquisition doit avoir lieu, sinon appuyer sur la touche *Esc* et vérifier les réglages. Il peut être utile de contrôler le bon fonctionnement du circuit à l'aide d'un oscilloscope. Pour adapter l'affichage, on peut double cliquer sur le nom de la voie en haut du graphique. Un clic droit sur celui-ci permet aussi, via l'onglet *Propriétés*, de choisir les noms et unités des axes ¹⁸. Cette rubrique permet aussi de choisir le style (trait, points...) et la couleur de l'affichage. Différentes fonctions sont également disponibles via un clic droit sur le graphique lui-même.

3.2 Acquisition d'un signal transitoire : charge et décharge d'un condensateur

On va appliquer cette méthode d'acquisition au cas d'un signal transitoire, à savoir la charge d'un condensateur, via le montage représenté sur la figure ci-aprés. Selon la position de l'interrupteur, le condensateur se charge ou se

^{18.} On n'insistera pas assez sur l'importance de donner des noms clairs et explicites aux axes des graphiques que vous présentez...



^{17.} À tout moment, vous pouvez utiliser l'aide en ligne de Latis Pro (boutons ? ou touche F1 du clavier). Le logiciel dispose également d'une aide contextuelle : quand on positionne la souris sur un bouton, une icône, une case, une information s'affiche.



FIGURE 7 – Fenêtre "Latis Pro"

décharge. On rappelle l'expression théorique de la tension aux bornes du condensateur en fonction du temps, lors de la charge du condensateur

$$u(t) = E\left[1 - \exp\left(-t/\tau\right)\right] \tag{1}$$

et lors de sa décharge

$$u(t) = E \exp\left(-t/\tau\right) \tag{2}$$

Dans ces deux expressions, la constante de temps est $\tau = RC$. Pour pouvoir observer de manière satisfaisante la décharge il faut utiliser des commutateurs "sans rebond" ou les petits interrupteurs sur plaquette, pour que le temps de passage d'une voie à l'autre soit le plus court possible, sinon le condensateur, qui a une faible résistance de fuite, se décharge avant que l'on referme le circuit. On choisira les valeurs de la capacité et de la résistance de manière à avoir une constante de temps longue (de l'ordre de la seconde).



FIGURE 8 - Charge et décharge d'un condensateur

Répéter les étapes de branchement de la carte et de sélection de la voie pour mesurer la tension aux bornes du condensateur, et choisir les paramètres d'acquisition adaptés pour enregistrer la charge du circuit étudié. Par rapport à l'expérience simple précédente, il est nécessaire de se préoccuper du déclenchement du signal. Comme sur un oscilloscope, le déclenchement a lieu sur un front de tension. Il faut donc choisir la source (ici la tension aux bornes du condensateur), le niveau de déclenchement et le sens du front. Choisissez les paramètres pertinents pour enregistrer la charge du condensateur dans le circuit étudié ¹⁹.

4 Modélisation

La modélisation de données acquises expérimentalement consiste à les ajuster par un modèle théorique, par exemple une constante moins une exponentielle décroissante, dans le cas de la charge du condensateur vue à l'instant. Pour une introduction théorique à ces problématiques et aux concepts qui lui sont liés, on pourra se reporter au TD-cours sur les incertitudes expérimentales. Ici, on va voir en pratique comment procéder à ces modélisations.



^{19.} La tension peut être irrégulière au début. Cela vient du contact fluctuant de l'interrupteur lors de son basculement : il vaut mieux le mettre juste au contact, sans chercher à l'enfoncer, ou utiliser les interrupteurs dits *sans rebond*. De plus, ce phénomène se produit avec un temps caractéristique court. On peut donc le minimiser en augmentant la durée entre deux points d'acquisition t_e . Il faut toutefois garder suffisamment de points pour enregistrer la charge : c'est pour cela qu'on a choisi les composants pour qu'elle dure environ une seconde. Si l'on souhaite étudier des charges plus rapides, il faut procéder autrement, par exemple en remplaçant ll'ensemble alimentation + interrupteur par un générateur de signaux créneaux, pour réaliser des charges et décharges successives.



FIGURE 9 - Montage pour observer la charge d'un condensateur sur Latis Pro

4.1 Avec Latis Pro

On va ajuster les données obtenues lors de la charge du condensateur par le modèle théorique. Dans le menu *Traitements*, choisir *Modélisation* (ou touche F4). Juste en dessous de *Paramètres*, en haut à gauche, cliquer sur le bouton représentant une sinusoïde verte, afin d'afficher la liste des courbes disponibles, et tracter celle de la tension d'intérêt dans la fenêtre de modélisation, sous *Courbe à modéliser*. Cliquer sur la double flèche en bas à droite de la fenêtre de modélisation (») afin de faire apparaître toutes les informations. Dans *Modèles*, choisir le modèle approprié (constante moins une exponentielle décroissante) et cliquer sur *Calculer le modèle*. Si tout se passe bien, l'ajustement converge et retourne les valeurs des paramètres, notamment la constante de temps τ . En cliquant dans la fenêtre du graphe, on peut choisir la plage sur laquelle est fait l'ajustement et constater que les valeurs des paramètres peuvent changer.



FIGURE 10 - Modélisation de la charge du condensateur avec "Latis Pro"

4.2 Avec QtiPlot

Dans certains cas, on pourra souhaiter utiliser un autre logiciel que Latis Pro pour effectuer une telle modélisation. Par exemple parce que les données ont été prises à la main, ou encore parce que le modèle théorique n'est pas disponible dans Latis Pro. Dans ce cas, on utilisera par exemple QtiPlot, un logiciel semi-libre ²⁰ très pratique et puissant de tracé de courbes expérimentales.

Introduction et premier pas [Important] Dans cette section, on vous guide pas à pas dans la prise en main de QtiPlot, qui pourra vous servir à de nombreuses occasions au cours des TP.

Au lancement du logiciel, une table apparaît. Commençons par un exemple simple.

1. Taper 1, 2, 3, etc. jusqu'à 9 dans la première colonne.

2. Sélectionner la colonne 2, puis dans la barre d'outils aller dans *Table > Fixer les valeurs de la colonne à*. Dans la nouvelle fenêtre, vous allez pouvoir définir une expression pour la colonne 2. Par exemple 0.1*col("1"). Cliquer sur

^{20.} SciDaVis en est une version open source, mais moins puissante



OK. La colonne 2 est remplie. Attention à utiliser des points pour séparer les décimales, et non des virgules, sinon cela ne fonctionne pas.

3. Ajouter la valeur "10" à la colonne 1. La colonne 2 est directement mise à jour. De même si une valeur de la colonne 1 est modifiée. En revanche, si vous modifiez directement une valeur dans la colonne 2, le calcul automatique est désactivé pour cette case. Vous pouvez le rétablir avec *Table > Recalculer* si la case est sélectionnée, ou *Table > Recalculer tout*.

3. Sélectionner les deux colonnes ensemble, puis dans la barre d'outils choisir *Graphe > Symbole > Nuage* (une autre possibilité est un clic droit sur la sélection). Sans surprise, ce graphe ressemble fortement à une droite. Pour ajuster les points, sélectionner le graphe, et dans *Analyse*, sélectionner *Ajustement linéaire*. L'ajustement est très bon : un coefficient $R^2 = 1$ indique que la courbe passe exactement par tous les points. Ce coefficient mesure l'éloignement mathématique de la courbe d'ajustement et des points de mesure. Il ne contient aucune information sur des incertitudes physiques, et en pratique n'est pas d'une très grande utilité pour juger de l'adaptation d'un modèle aux données dans les applications que vous rencontrerez. Dans la légende et la fenêtre log ("Historique des résultats") sont données les valeurs des paramètres A et B (y=Ax+B) ainsi que leurs incertitudes associées.

Nous avons réussi à tracer une courbe et l'ajuster par un modèle linéaire. Essayons d'aller un peu plus loin : réduire Table1 et Graphe1, puis avec un clic droit sur le fond gris, choisir *Nouvelle fenêtre > Nouvelle table* (ou Ctrl+T).

1. Ajouter une colonne supplémentaire. Pour cela plusieurs possibilités : via le menu *Table > Ajouter une colonne*, ou un clic-droit sur la table, ou encore un double-clic à droite de la cellule d'entête de la seconde colonne. Cette troisième colonne servira aux incertitudes de mesure. Pour accéder aux propriétés de la colonne "3", double-cliquer sur la cellule d'entête, et dans *Type de Graphe* choisir *Erreur en Y*.

2. Avec un clic droit sur l'entête de la première colonne, choisir *Remplir la colonne avec* > *Nombres aléatoires normaux* (ce qui donne des nombres aléatoires distribués selon une Gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type unité). Pour la colonne "2", choisir cette fois *Fixer les valeurs de la colonne*, et faire en sorte que les valeurs de cette colonne soient $e^x \times (1.5 + \alpha_i)$ avec *x* les valeurs de la première colonne et les α_i des nombres aléatoires entre 0 et 1 (trouver la fonction *random* qui permet de les générer en cliquant sur le symbole Σ et mettre comme argument - la graine aléatoire - la valeur de la case *i* de la première colonne). Enfin, remplir la colonne "3" avec des valeurs correspondant à 10% de la colonne "2".

3. Sélectionner les trois colonnes de la table en maintenant enfoncée la touche Ctrl, et tracer le graphe de "2" en fonction de "1". Les barres d'erreur devraient être représentées sur le graphique.



FIGURE 11 - Graphe avec incertitudes



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

4. Pour modifier le style de graphe, il y a deux fenêtres importantes :

- en double-cliquant n'importe où sur le graphe ou la courbe vous arriverez sur *Détail du graphe* (qui gère ce qui a trait au tracé en lui-même : couleur des courbes, symboles, barres d'erreurs, etc.);
- en cliquant sur les axes vous modifierez les *Propriétés générales des graphes* (modification de la grille, de l'échelle, passage d'une représentation linéaire à une représentation logarithmique, etc.).

5. Le graphe obtenu ressemble fort à une exponentielle... Lorsque la fenêtre du graphe est active, aller dans l'onglet *Analyse > Ajustement > Assistant d'ajustement*. Choisir la fonction croissance exponentielle (dans la catégorie *Interne*, et cocher *Ajuster par une fonction interne*. Appuyer sur la flèche vers la droite. Cocher la case *Aperçu* pour voir le tracé de l'ajustement avec les valeurs par défaut. Dans *Poids*, choisir *Instrumental*²¹, et cliquer sur *Ajuster*. Si l'ajustement a convergé, cliquer sur la flèche de droite. Sinon modifier les paramètres initiaux. Dans *Sortie personnalisée*, ne modifiez rien, et fermer la fenêtre. QtiPlot prend en compte les incertitudes lors de l'ajustement. Vous pouvez le vérifier en créant un second graphe, avec les mêmes valeurs sans barres d'erreur, et comparer les ajustements. Lors d'un ajustement par un modèle, QtiPlot fournit en plus des paramètres de l'ajustement plusieurs coefficients permettant de tester sa validité, à savoir le coefficient de corrélation *r* et le chi carré réduit χ^2_{red} si l'on a indiqué la valeur des incertitudes σ sur Y. Pour leurs interprétations, on se reportera au TD-cours sur les incertitudes expérimentales.



FIGURE 12 – Graphe avec ajustement

Application à la modélisation de la charge ou de la décharge d'un condensateur [Important] On va appliquer ce qu'on vient de voir pour tracer et modéliser, dans QtiPlot, la courbe correspondant à la tension aux bornes du condensateur obtenue avec Latis Pro. Pour cela, il faut commencer par exporter ces données depuis Latis Pro, via *Fichier > Exportation*. Tracter la courbe de tension de la fenêtre "Courbes disponibles" vers "Courbes à exporter". Sélectionner le format "TXT", le point comme séparateur décimal et le point virgule comme séparateur entre les données, puis sauvegarder dans un fichier. Dans QtiPlot, choisir *Fichier > Importer > Importer un fichier ASCII* et sélectionner le fichier texte que vous venez de créer. Sélectionner le point virgule dans le menu déroulant *Séparateur*. N'ignorer aucune ligne, mais spécifier que la première ligne doit être prise comme nom des colonnes. Un aperçu permet de vérifier le résultat qui sera obtenue lors de l'importation. Quand vous êtes satisfaits, cliquer sur *OK*. À partir de là, tracer la courbe de tension en fonction du temps et effectuer l'ajustement par le modèle attendu. Penser à prendre en compte les incertitudes dans votre calcul.

^{21.} Ce mode indique que les poids des différents points dans le chi carré réduit sont calculés comme les inverses des carrés des valeurs de la colonne *Erreur en Y*. Voir le TD-cours sur les incertitudes expérimentales pour plus de détails. À l'agrégation, on n'utilisera que ce mode.



5 Compléments sur le traitement des données

[Facultatif] Dans cette dernière partie, on propose des expériences complémentaires illustrant d'autres aspects du traitement de données, à savoir la compression et le détramage des images. Ces manipulations sont pour l'essentiel illustrations et facultatives.

5.1 Compression

Expérience : Ouvrir une image PNG (non compressée) avec "Gimp" et la convertir en image JPEG (comprimée avec une qualité de 5 %) via *Fichier > Exporter Sous...* Comparer la qualité des deux images.

Expérience : Faire de même avec un fichier son en utilisant "Audacity" pour faire une conversion en MP3 (compression avec pertes) d"un fichier WAV (son de qualité CD), qu'on pourra chercher sur internet. On choisira un morceau de musique classique, par exemple, pour bien apprécier la dégradation due à la compression avec pertes. Faire une exportation en MP3 avec un débit peu élevé (32 kbps) via *Fichier > Exporter'* >Exporter en MP3'' et comparer qualitativement les deux sons.

5.2 Détramage

Le détramage est une technique de traitement d'images particulièrement intéressante du point de vue physique. Lorsqu'une image imprimée est scannée numériquement, le scan fait apparaître une trame due au motif d'impression utilisé : la trame est un motif de petite taille périodique dans deux directions d'espace, de sorte qu'il est possible de faire disparaître la trame sans trop altérer l'image, via une transformation mathématique impliquant la transformée de Fourier. Dans l'espace de Fourier, le motif de la trame se manifeste par l'apparition de répliques, équivalentes aux ordres supérieurs de diffraction par un réseau. En supprimant ces répliques, on supprime aussi l'information sur la trame de petite taille, de sorte que la transformée de Fourier inverse permet alors de récupérer une image sans trames.

Expérience : Ouvrir une image possédant une trame (comme celle de gauche sur la figure ci-dessous) avec Gimp. Il est nécessaire d'avoir installé le plugin gratuit G'Mic pour Gimp (version 2.8 ou ultérieure). Faire la transformée de Fourier directe de cette image via *Filtres > G'MIC QT*. Choisir le filtre *Frequencies > Fourier Transform*. Sélectionner *One layer* pour qu'amplitude et phase soient sauvegardées côte à côte dans la même image et choisir *Nouvelle image* dans *Mode de sortie* pour ne pas écraser l'image de départ. Vous remarquerez que l'image obtenue est constituée de 2 panneaux : l'un contenant l'amplitude de la transformée de Fourier, l'autre contenant la phase. Il ne faut pas modifier la partie contenant la phase. Utiliser l'outil pinceau pour recouvrir de noir les ordres de diffraction autres que l'ordre zéro. Appliquer une transformée de Fourier inverse (en réappliquant G'MIC QT sur l'image ainsi modifiée) et comparer. Vous devriez obtenir une image proche de celle de droite sur la figure ci-dessous.



FIGURE 13 –

