



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

OUTILS INFORMATIQUES

2022-2023



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.

Table des matières

1	Les outils informatiques à l'agrégation	3
2	QtiPlot	3
2.1	Premiers pas	3
2.2	Raffinements	4
2.3	Quelques remarques sur les incertitudes expérimentales	5
3	Acquisition de données via des appareils de mesure	6
3.1	Utilisation du suivi temporel - décharge d'un condensateur	6
3.2	Acquisition d'un diagramme de Bode d'un filtre d'ordre 1	7
4	Étude d'un suivi dynamique par ordinateur	7
4.1	Description de la caméra	7
4.2	Mise en place	8
4.3	Réalisation de la vidéo	8
4.4	Traitement vidéo	8
4.5	Exploitation des résultats	8
5	Premier contact expérimental avec la transformée de Fourier	9
5.1	Propriétés de la transformée de Fourier discrète d'un signal	9
5.2	Conséquences de la numérisation - critère de Shannon	10

Bibliographie :

Le but de ce TP est de vous familiariser avec les logiciels mis à votre disposition au cours de l'année, qui vous faciliteront l'acquisition et l'analyse des données expérimentales.

1 Les outils informatiques à l'agrégation

Voici une petite liste par usage :

- Tracé de graphes et courbes expérimentales
 - **Python** : le langage Python est de plus en plus utilisé de nos jours, en particulier à des fins d'enseignement. Il est entré au programme de CPGE, ainsi que celui du lycée. Pour cette raison, nous vous conseillons de l'utiliser le plus possible durant l'année qui va s'écouler. Nous ne l'incluons pas dans ce TP, deux séances seront dédiées à l'usage de Python en physique au cours du 1er mois.
 - **QtiPlot** : ce logiciel basé sur Python permet d'obtenir des rendus de graphes professionnels. Il permet en particulier de tracer les incertitudes verticales et horizontales, d'ajuster les courbes avec de nombreux modèles, tout en prenant en compte les incertitudes verticales. Python et QtiPlot constituent l'alternative principale des façons de représenter des données à l'agrégation.
 - **Regressi** : logiciel libre, s'il est très utilisé dans les lycées, son utilisation est déconseillée à l'agrégation pour tracer des graphes.
 - **Excel** ou **LibreOffice Calc** sont des tableurs, en aucun cas des logiciels à utiliser pour tracer des données. L'utilisation des graphes de ces logiciels est à proscrire.
- Acquisition de données
 - Au cours de l'année, on utilisera un programme appelé **Interface.exe** développé pour le centre de Montrouge afin de communiquer avec les appareils de mesure (oscilloscopes, multimètres, etc.)
 - **Latis Pro** : logiciel propriétaire édité par *EuroSmart* (ex-**Synchronie**). Populaire dans les lycées, il permet d'acquérir des données extérieures grâce à sa centrale d'acquisition SYSAM-SP5 (souvent appelée *galette*), ainsi que d'analyser des vidéos et de tracer des graphes. On limitera son utilisation à la communication avec la centrale d'acquisition lorsque nécessaire, et on reviendra à QtiPlot pour toute fonction graphique.
- Logiciels dédiés
 - **SpectraSuite** : logiciel propriétaire de *Ocean Optics*, il permet d'interfacer les spectromètres USB de cette marque.
 - **Atelier Scientifique** ou **Cinériss** : logiciels propriétaires édités par *Jeulin*, ils permettent de piloter la caméra rapide Jeulin, ainsi qu'étudier les vidéos avec un suivi dynamique.
 - etc.
- Simulations numériques

Le langage **Python** permet d'écrire des programmes simples simulant des phénomènes physiques. Plusieurs programmes ont été écrits par les enseignants dans cette optique, et sont disponibles sur toutes les machines de la prépa. Le logiciel que l'on utilisera cette année et permettant l'interprétation de ces programmes s'appelle **Spyder**.

2 QtiPlot

Dans cette partie, nous allons vous familiariser avec un logiciel très pratique et puissant de tracé de courbes expérimentales : QtiPlot, logiciel semi-libre (SciDaVis en est une version open-source, mais moins puissante).

2.1 Premiers pas

Ouvrir le logiciel QtiPlot. 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 *OK*. La colonne 2 est remplie. Attention à utiliser des points pour séparer les décimales, pas des virgules.

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. Si vous modifiez en revanche une valeur dans la colonne 2, le calcul automatique est désactivé pour cette case. Vous pouvez le rétablir avec *Table*, *Recalculer*.

3. Sélectionner les deux colonnes, puis dans la barre d'outils choisir *Graphe*, *Symbole* et *Nuage* (une autre possibilité est un clic droit sur la sélection). 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. Dans la légende et la fenêtre log sont données les valeurs des paramètres A et B ainsi que leurs incertitudes associées.

2.2 Raffinements

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 clic-droit sur la table ; ou encore double-clic à droite de la cellule d'entête de la seconde colonne. Cette 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* et *Nombres aléatoires normaux* (ce qui donne des nombres aléatoires distribués avec une gaussienne de moyenne nulle et d'écart-type unité). Pour la colonne "2", choisir cette fois *Fixer les valeurs de la colonne*, et faites en sorte que les valeurs de cette colonne soient $e^x \times (1,5 + \alpha_i)$ avec les α_i des nombres aléatoires entre 0 et 1 (trouver la fonction random en cliquant sur le symbole Σ , et mettre comme argument de la fonction la case i de la colonne "1"). 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 appuyée la touche Ctrl enfoncée, et tracer le graphe de "2" en fonction de "1". Les barres d'erreur devraient être présentes.

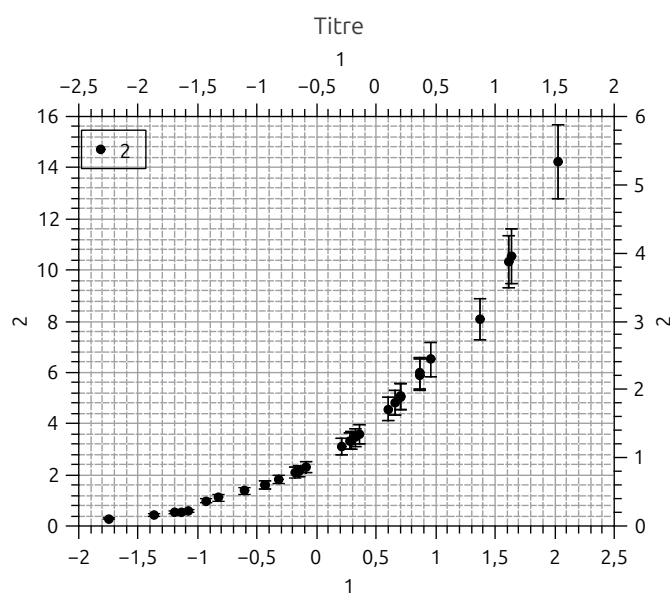


FIGURE 1 – Graphe avec incertitudes

4. Pour modifier le style deux fenêtres importantes :

- en double-cliquant n'importe où sur le graphe ou la courbe vous arriverez sur *Détail du graphe* (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* (modifier la grille, l'échelle, pour passer en log/log, etc.).

5. Ça ressemble fort à une exponentielle... Lorsque la fenêtre du graphe est active, aller dans l'onglet *Analyse, 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*, 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.

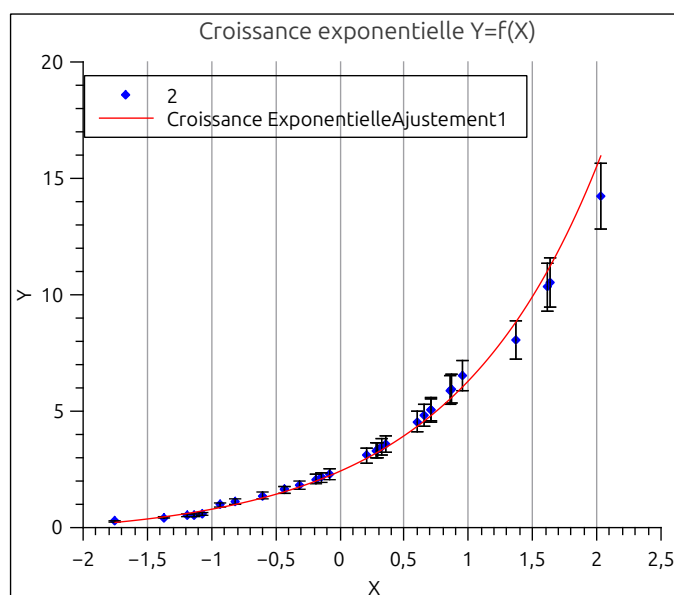


FIGURE 2 – Graphe avec ajustement

2.3 Quelques remarques sur les incertitudes expérimentales

Lors d'un ajustement par un modèle, QtiPlot fournit en plus des paramètres de l'ajustement plusieurs coefficients permettant de tester sa validité.

Le coefficient de corrélation r mesure l'éloignement entre les points de mesure et les points de même abscisse sur la courbe ; il donne uniquement une information statistique sur les données.

Lorsque des incertitudes sont spécifiées, QtiPlot calcule également le moindre carré χ^2 pour N points défini par

$$\chi^2 = \sum_{1 \leq i \leq N} \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

où σ_i est l'incertitude de mesure sur le point i . C'est ce coefficient qui est physiquement pertinent :

- Pour valider le modèle, il faut que l'ajustement soit raisonnablement proche des points (entre 0 et 2 fois la barre d'erreur typiquement). Dans ce cas, chaque terme de la somme est proche de 1, et donc $\chi^2 \approx N$. Plus précisément, si k est le nombre de paramètres ajustables dans le modèle, un bon ajustement est obtenu si

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{N - k} \approx 1 \quad (2)$$

$$N - k \quad (3)$$

est le nombre de degrés de liberté du problème, et on note aussi $\chi_{\text{red}}^2 = \chi^2/\text{doF}$ ($\text{doF} = \text{degree of freedom}$). C'est ce coefficient qui est donné par QtiPlot.

- Si χ^2/doF est grand devant 1, soit le modèle proposé est invalide, soit les incertitudes ont été sous-estimées.
- S'il est petit devant 1, les incertitudes sont probablement sur-estimées.

Qu'en est-il de votre ajustement ?

À l'agrégation, on utilise systématiquement le poids *Instrumental*, sauf si les incertitudes sont toutes identiques ou si vous ne connaissez pas les incertitudes sur les données (récupération d'un tracé d'un oscillo par exemple).

3 Acquisition de données via des appareils de mesure

Le but de cette partie est de vous présenter sur un exemple concret (la charge d'un condensateur) les fonctionnalités du programme d'interfaçage. Le programme s'appelle *Interface.exe*. Le lancer, et vérifier que le multimètre, le GBF et l'oscilloscope sont connectés à l'ordinateur (souvent en USB). Après son ouverture, le programme affiche une page d'accueil, et plusieurs onglets permettant différentes opérations : tracer un diagramme de Bode, récupérer le signal sur un oscilloscope, ou suivre temporellement un ou plusieurs signaux de multimètres (*Table traçante*).

3.1 Utilisation du suivi temporel - décharge d'un condensateur

Réaliser le circuit suivant, permettant de charger et décharger un condensateur C à travers une résistance R . Pour étudier cette décharge, on pourra soit utiliser un interrupteur, soit simplement des créneaux de très longues périodes, qui permettent généralement une étude plus propre.

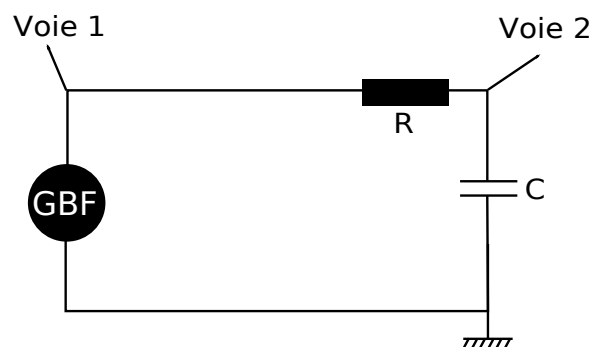


FIGURE 3 – Montage du suivi d'une décharge

Quelle est l'échelle de temps du phénomène ? Choisir les valeurs des composants de manière à ce que la charge prenne au total environ une seconde. Brancher un voltmètre aux bornes du condensateur. Observer le phénomène de décharge grossièrement au multimètre. On choisira une résolution faible pour le multimètre (4 digits) pour accélérer la prise de points.

1. Démarrer *Interface.exe*. Le multimètre indique "Remote", signe qu'il sera piloté par l'ordinateur. Pour reprendre le contrôle du multimètre, appuyer sur *Local* (sur la touche *Shift*). L'ordinateur reprendra le contrôle du multimètre tout seul lorsque nécessaire.
2. Le système est prêt pour l'acquisition. Choisir une plage d'acquisition de 30s, appuyer sur *Start* et changer l'interrupteur de position. Lorsque l'acquisition est terminée, il est possible d'enregistrer les données *via Save*.
3. Ouvrir QtiPlot et glisser-déposer le fichier de données. Une fenêtre d'importation apparaît, choisir *ESPACE* comme séparateur, et décocher *Utiliser la première ligne comme...* Valider. Tracer la première voie (le temps) en fonction de la seconde (la tension).
4. Afin de modéliser correctement ce système, supprimer les points avant le basculement de l'interrupteur dans le tableau de valeurs (il est aussi possible de préciser à QtiPlot de ne choisir qu'une plage de valeurs dans la

modélisation). Le modèle correspondant est une exponentielle décroissante. Aller dans *Analyse*, puis *Ajustement décroissance exponentielle* au premier ordre. Donner des valeurs initiales pour les paramètres d'ajustement et cliquer sur *Calculer*.

3.2 Acquisition d'un diagramme de Bode d'un filtre d'ordre 1

La partie précédente a étudié le comportement indiciel d'un circuit RC (lorsqu'on lui envoie un échelon de tension), et on s'intéresse ici à sa réponse fréquentielle (ce que renvoie le système en régime stationnaire avec une sinusoïde en entrée). Modifier le circuit précédent pour obtenir celui de la figure suivante. Changer les paramètres des composants pour avoir un temps caractéristique de 10^{-3} s.

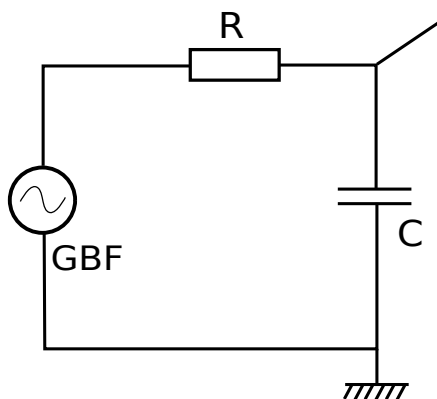


FIGURE 4 – Filtre d'ordre 1

Afficher à l'oscilloscope le signal envoyé par le GBF ainsi que la tension aux bornes du condensateur lorsque le signal envoyé a une fréquence de 1kHz et une amplitude de 1V. Attention, pour que le GBF délivre un signal, il faut que le bouton *Output* soit enclenché.

Sur la fenêtre du programme d'interfaçage, choisir l'onglet *Diagramme de Bode*. Choisir une fréquence de départ à 50Hz, vérifier que le signal de référence correspond bien à la voie de l'oscilloscope sur laquelle est branchée le GBF. Choisir 30 pas. Connecter le GBF et l'oscilloscope, vérifier que le bouton *Output* du GBF est bien enclenché, et lancer l'acquisition. Le programme affiche en temps réel le gain en dB et le déphasage entre les deux signaux. À quoi s'attendait-on dans le cas de ce filtre ?

4 Étude d'un suivi dynamique par ordinateur

Afin de réaliser le suivi automatique d'une expérience de mécanique, on propose d'utiliser ici une caméra rapide Nova. La prise de vidéo se fera avec l'outil Caméra de Windows 10 ou avec le logiciel d'édition VirtualDub, et on pourra ensuite analyser la vidéo et les données à l'aide du logiciel Tracker. Pour l'exemple, on choisit de suivre le mouvement d'une balle de ping-pong au fur et à mesure de ses rebonds.

4.1 Description de la caméra

La caméra possède plusieurs vitesses d'acquisition (60, 120 ou 260 images par seconde), selon la rapidité de l'expérience que l'on souhaite enregistrer. Cependant, la résolution diminue lorsque la vitesse augmente (1920*1080, 1280*720 ou 640*320).

La caméra est munie d'un objectif de focale variable, entre 2,8 et 12 mm. Celle-ci a trois bagues de réglage : les deux extrêmes permettent de régler cette distance focale et la mise au point. En pratique, ne desserrer qu'une des deux vis pour la mise au point, et laisser l'autre fixe. La bague centrale permet de régler l'ouverture de l'objectif, et donc la quantité de lumière reçue.

4.2 Mise en place

Brancher la caméra rapide puis lancer le logiciel **Caméra** de Windows 10. On prépare ensuite l'expérience en visualisant à la caméra un écran noir situé à quelques mètres et à la même hauteur. Régler l'horizontalité de l'image grâce aux pieds du support. Proche de l'endroit où la balle sera lancée, fixer un étalon de longueur (par exemple une règle en bois de 1m verticale) et mettre l'image au point sur ce plan.

4.3 Réalisation de la vidéo

Démarrer l'acquisition vidéo et lancer la balle de ping-pong pour que son mouvement soit dans le plan parallèle à l'écran et passant par l'étalon de longueur. Il faut pour un traitement correct au minimum 3 rebonds. Vérifier sur la vidéo que la balle ne disparaît pas du cadre, ce qui compliquerait le traitement vidéo.

Pour une utilisation avancée de la caméra et profiter des hautes vitesses d'acquisition, utiliser le logiciel **VirtualDub** avec ces quelques étapes pour l'enregistrement de la vidéo :

- Ouvrir le logiciel, et dans *File*, cliquer sur *Capture AVI*
- **Détection** : Dans la nouvelle fenêtre, aller sur l'onglet *Device* et vérifier que *HD USB Camera* est bien sélectionnée.
- **Réglage de la vitesse** : dans l'onglet *Video*, cliquer sur *Capture Pin*. On peut alors changer la résolution, qui adapte automatiquement la fréquence d'acquisition. En profiter pour mettre la qualité au maximum.
- **Timing** : dans l'onglet *Capture*, aller dans *Timing*. Vérifier que toutes les cases sont décochées. Cela permet d'assurer la précision du traitement a posteriori.
- **Acquisition** : Choisir un nom dans *File* et *Set capture file*. Puis lancer l'acquisition dans *Capture* ou avec F5, pour l'arrêter, appuyer sur Esc.

4.4 Traitement vidéo

Tracker est un logiciel open source puissant, permettant de faire du suivi automatique de forme, et d'ensuite analyser les résultats.

- Ouvrir Tracker, puis ouvrir la vidéo en question. Tracker avertit l'utilisateur si les images n'ont pas des durées identiques sur l'enregistrement (ce qui n'arrive pas avec VirtualDub, mais est fréquent sinon).
- Délimiter la partie utile : placer sur le curseur sur le début souhaité, puis avec un clic droit *définir l'image de départ*. De même pour la fin.
- **Échelle** : cliquer sur l'icône *Ruban* et créer un bâton de calibration. Définir le début et la fin en maintenant la touche Shift, et en cliquant sur les endroits choisis. Modifier la valeur de cette échelle.
- **Objet** : Créer une nouvelle trajectoire avec l'icône, et choisissez *Masse ponctuelle*. Se placer sur la première image de la séquence, cliquer sur *Masse A*, puis *Repérage automatique*. En maintenant Ctrl et Shift, cliquer sur l'objet à suivre. Puis cliquer sur *Chercher*. Le logiciel va rechercher cette forme sur toutes les images. Il peut bloquer sur certaines (souvent aux rebonds), dans ce cas déplacer à la main le gabarit sur l'objet, et cliquer sur *Chercher ceci*, et ainsi de suite.

4.5 Exploitation des résultats

Tracker permet d'afficher, de récupérer et de modéliser les données. Vous pouvez soit rester sur Tracker pour cette étape, soit exporter les données vers QtiPlot. Le texte ci-dessous décrit les étapes pour le traitement dans Tracker.

- **Affichage d'un graphe** : dans la fenêtre en haut à droite, cliquer sur l'ordonnée pour modifier la quantité à tracer. Tracker calcule automatiquement (entre autres) vitesse, accélération et énergie cinétique. Il est aussi possible de définir une nouvelle grandeur (énergie mécanique, potentielle, etc.) avec *Définir*. Une fois la quantité souhaitée affichée, double-cliquer sur le graphe : une fenêtre *Outil de données* apparaît.
- **Modélisation** : directement sur le graphe, sélectionner les points d'intérêt. Cliquer sur *Analyser*, puis *Courbe de tendance*, et cocher *Courbe de tendance automatique*.

On peut alors vérifier que l'énergie est très majoritairement dissipée lors des rebonds, et évaluer le coefficient de restitution (rapport entre l'énergie de l'objet après et avant le choc) en vérifiant qu'il est identique lors de chaque rebond. On peut également vérifier la trajectoire de chute libre entre deux rebonds.

5 Premier contact expérimental avec la transformée de Fourier

Références :

- Notice de l'oscilloscope utilisé (pour l'Agilent, notice 161 à partir de la page 72);
- Picinbono - *Théorie des signaux et des systèmes*;
- R. Duffait - *Expériences d'électronique* (chap.3).
- F. Cottet, *Traitement des signaux et acquisition de données*, 2e édition, Dunod, 2002.

Cette partie est écrite pour un oscilloscope Agilent DSOX2002A. Elle est bien sûr transposable à tous les oscilloscopes de la collection¹ mais il faudra potentiellement ajuster les valeurs. Il est ainsi conseillé de **lire attentivement la notice de l'oscilloscope** pour être capable d'obtenir le spectre et de trouver **les paramètres du calcul de la transformée de Fourier** réalisé par l'oscilloscope. En particulier, si celui-ci peut fonctionner en mode analogique ou en mode numérique, il faut préalablement se placer en mode numérique. Vérifier par ailleurs que l'oscilloscope acquiert des données en mode normal (pas de haute résolution)

5.1 Propriétés de la transformée de Fourier discrète d'un signal

On étudie le spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence $f = 10$ kHz, fourni par un générateur BF, en l'envoyant sur un oscilloscope numérique Agilent DSOX2002A qui permet de faire une transformée de Fourier via `Math > Opérateur > FFT`.

Caractéristiques du signal visualisé à l'oscilloscope Fenêtre d'analyse : Le calcul de la transformée de Fourier est fait sur une durée T finie, qui correspond à la partie du signal visible sur l'écran de l'oscilloscope et qui se détermine en utilisant le calibre temporel.²

Numérisation : En mode numérique, le signal est échantillonné régulièrement avec un pas t_e appelé durée d'échantillonnage. La fenêtre de visualisation définie précédemment correspond donc à un nombre n de points tel que $T = n \times t_e$. Le nombre de points n est généralement une puissance de 2 (typiquement $2^{16} = 65536$), pour accélérer les calculs. On définit aussi la *fréquence d'échantillonnage* $f_e = 1/t_e$. Elle est indiquée en haut à droite de l'écran, en "Sample per second" (Sa/S) qui correspond à des hertz.

Manipulation : Vous pouvez déjà relier un GBF (peu importe le modèle) à un oscilloscope et envoyer un sinus de fréquence f et d'amplitude de l'ordre du volt. Obtenez un signal stable à l'écran. Jouer sur la base temporelle et repérer la fréquence d'échantillonnage. Constaté, en variant la première, que les deux varient en sens inverse ce qui indique que l'oscilloscope enregistre toujours le même nombre de points. En augmentant la base temporelle, augmenter la durée T de la fenêtre d'acquisition de manière significative. À un certain stade (autour de 50 ms/div.) l'amplitude du signal visualisé diminue nettement. Appuyer alors sur `Run - Stop`.

- Dézoomer pour vérifier que l'oscilloscope a bien enregistré uniquement les points que vous visualisez.
- Zoomer pour constater que le sinus est déformé du fait de l'échantillonnage numérique. En répétant l'expérience avec un ratio fréquence d'échantillonnage/fréquence du signal différent, constater une première fois que lorsque l'échantillonnage est trop lent il ne permet pas de reproduire fidèlement la fréquence du signal. Le critère absolu est appelé **critère de Shannon** et impose que les seules fréquences correctement reproduites par le signal échantillonné sont celles qui vérifient $f < f_e/2$.

1. bien qu'en apparence identiques, les oscilloscopes DSOX2002A sont légèrement différents selon qu'ils soient de la marque Agilent ou KEYSIGHT. Dans le cadre d'une étude fine des paramètres de l'oscilloscope, les observations semblent plus en accord avec la notice pour les modèles Agilent.

2. La durée T correspond parfois à l'ensemble des points de mesure stockés en mémoire, vérifier la notice.

Caractéristiques du spectre obtenu : **Manipulation :** Revenez à un signal sinusoïdal stable et visualisez-en quelques périodes. Entrez dans le mode *math* de l'oscilloscope et appliquez la transformée de Fourier à la source 1. Vous accédez facilement à deux réglages : la *Plage* qui correspond à l'intervalle de fréquence sur lequel le spectre est affiché, et le *Centre* qui indique autour de quelle fréquence est centrée l'intervalle en question. Vous pouvez revenir au réglage par défaut (qui optimise le spectre affiché en fonction du signal visualisé à l'écran).

Résolution en fréquence : Deux points du spectre sont séparés par l'intervalle $\Delta f = 1/T$.

Fenêtrage : La fenêtre d'analyse du signal ne correspond pas nécessairement à un nombre entier de périodes du signal. La FFT calculée correspond à la transformée de Fourier du signal mesuré pendant T et répété indéfiniment : ce signal peut donc présenter des discontinuités tous les T , provoquant un élargissement des raies. Pour y remédier, le signal est multiplié par une fonction de fenêtrage valant zéro à chaque extrémité de l'enregistrement temporel. Cela supprime les discontinuités mais ajoute des composantes fréquentielles. Les oscilloscopes numériques disposent généralement d'au moins deux fonctions de fenêtrage, en plus de la fonction "Rectangulaire" qui correspond au signal non modifié : la fonction "Hanning", qui offre une meilleure résolution en fréquence, et la fonction "Som Plat" qui offre une meilleure résolution en amplitude (voir, par exemple, la notice de l'oscilloscope pour plus de détails).

Bornes : la borne supérieure du spectre vaut $f_{max} = \frac{f_e}{2}$.³ Le spectre est tracé autour d'une fréquence choisie dans *Centre*, et sur la plage [*Centre* - *Plage*/2, *Centre* + *Plage*/2].

Manipulation : Vérifier expérimentalement les points suivants :

- Identifier la fréquence du signal avec un curseur et comparer la avec la valeur donnée par le GBF.
- Identifier la fréquence maximum f_{max} du spectre (faire varier la *Plage* pour l'observer).
- Zoomer sur le pic principal et observer qualitativement l'effet du fenêtrage sur sa résolution.
- La résolution en fréquence du spectre peut être mise en évidence en créant un signal comportant deux fréquences proches. Pour cela, additionner simplement les signaux issus de deux GBF (ou de deux voies indépendants d'un même GBF) par exemple en réalisant le montage de la figure suivante, ou utiliser un montage additionneur déjà réalisé sur plaquette. En modifiant la *Plage* et le *Centre* zoomer sur les deux pics proches. On vérifiera l'effet des modifications des deux fréquences sur la position des deux pics. On pourra notamment constater qu'en dessous d'un certain écart en fréquence pour une configuration de l'oscilloscope donnée, on ne peut plus séparer ces deux pics. Observer l'effet de la durée T et du fenêtrage sur la résolution en fréquence.

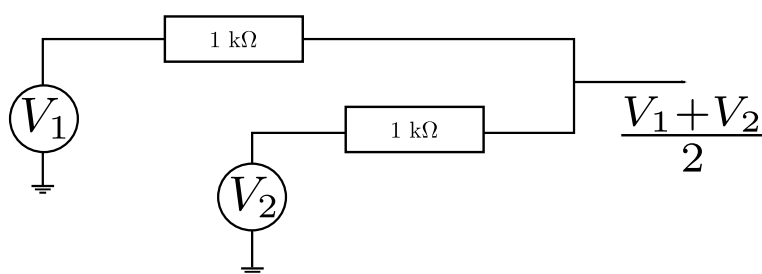


FIGURE 5 – Additionneur

5.2 Conséquences de la numérisation - critère de Shannon

On a vu plus haut que pour une fréquence d'échantillonnage donnée, la fréquence maximum du spectre est fixée : $f_{max} = f_e/2$. Ceci implique qu'on ne peut pas analyser un signal à une fréquence $f > f_{max}$ (**théorème de Shannon**). On peut l'illustrer avec les expériences suivantes.

3. En toute rigueur, le spectre s'étend de $-f_{max}$ à $+f_{max}$. Le signal de départ étant réel ce spectre est symétrique par rapport à $f = 0$ et on limite souvent son tracé à l'intervalle $[0, f_{max}]$.

Signal sinusoïdal

- Repérer la fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope. En déduire f_{max} . Choisir f_e suffisamment faible pour pouvoir atteindre f_{max} avec le GBF et suffisamment grande pour que l'acquisition soit rapide (par exemple 5 MHz).
- Observer un signal sinusoïdal de fréquence suffisamment faible pour vérifier le critère de Shannon.
- Sans changer la vitesse de balayage (donc la fréquence d'échantillonnage), augmenter la fréquence du signal et suivez le pic principal de la TF. Visualiser ce qui se produit au voisinage de la limite de Shannon : $f < f_{max}$ le pic se déplace de gauche à droite avec les fréquences croissantes, puis repart vers la gauche une fois que f a dépassé f_{max} . En particulier, le pic sur l'écran est à une fréquence différente de f . On observe un **repliement du spectre** (en anglais "aliasing") : le pic obtenu est symétrique du pic réel par rapport à f_{max} . Plus on augmente f , plus la fréquence apparente semble diminuer.
- Prendre une fréquence f proche de $f_e = 2f_{max}$. Faire un run - stop et visualiser le signal en mode temporel. Observer les battements et mesurer leur fréquence. La comparer à $f_e/2 - f$. Ces phénomènes peuvent assez bien s'interpréter en termes de stroboscopie (commencer par faire un dessin correspondant au cas $f = f_e$ et raisonner cette fois en modifiant la fréquence d'échantillonnage tout en maintenant constante la fréquence du signal).

Signal riche en harmoniques Le repliement de spectre peut s'observer facilement avec un signal de fréquence fondamentale f_0 riche en harmoniques, par exemple un créneau (ou un triangle). Si f_e n'est pas démesurément grande devant f_0 , les harmoniques de haut rang vont subir le repliement de spectre lorsqu'on réalise une FFT.

- Choisir une fréquence d'échantillonnage relativement faible (de sorte que le GBF puisse atteindre $2f_e$). Observer la FFT du signal dont la fréquence d'abord très faible devant f_e . Faire varier f et constater que les harmoniques de plus hautes fréquences progressent jusqu'à atteindre f_{max} avant de rebrousser chemin.
- Identifier les harmoniques du signal ainsi que les fréquences repliées.