

# TP2: Mesures de forces pendant un choc

## 1 Objectifs pédagogiques

Nous vous présentons un TP qui est "ouvert" pour permettre plus de réflexion de votre part. C'est-à-dire que, dans ce TP, on ne vous donne pas une recette à suivre et ce sera à vous de décider de la démarche scientifique à suivre pour obtenir des résultats utiles. N'hésitez donc pas à demander conseil aux instructeurs et aux assistants; ils sont là pour vous aider à développer votre capacité de réflexion et de démarche scientifique. Au lieu de rendre un rapport complet, on vous demande de rédiger, de manière précise et détaillée, des réponses aux questions que l'on vous pose dans cette notice.

Les objectifs d'apprentissage de ce TP sont donc les suivants:

- S'entraîner à planifier une expérience scientifique.
- S'entraîner à analyser des données.
- S'entraîner à évaluer des résultats scientifiques.
- S'entraîner à comprendre l'impact de nos suppositions.
- S'entraîner à communiquer précisément la démarche suivie et les résultats obtenus.
- Avoir la possibilité de se familiariser avec Jupyter Notebooks et la programmation en python.

## 2 Objectif scientifique

Lorsque qu'une balle rebondit sur un surface solide, la balle se déforme pendant le choc comme un ressort. On vous demande de caractériser la force de déformation qui s'exerce pendant qu'une balle rebondit, et de comparer les différences entre deux balles de matériaux différents. Plus précisément, on vous demande de mesurer la force de compression,  $F(x)$ , qui s'exerce sur un balle rebondissante quand celle-ci est comprimée d'une distance,  $x$ . On suppose que la surface solide ne se déforme que de manière négligeable. Vous devrez comparer la courbe,  $F(x)$ , que vous mesurez pour deux balles différentes.

On vous propose de comparer une balle de ping-pong et une balle en caoutchouc, étant donné qu'on s'attend à ce qu'une des deux se déforme plus que l'autre.

### Question 1 (2 points):

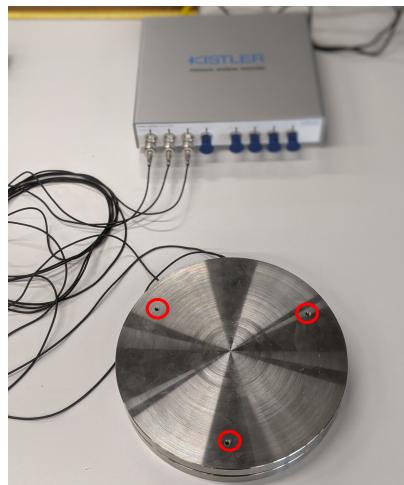
**Estimation de force pendant un choc:** *En sachant qu'une balle de ping-pong pèse environ 2g, et qu'on la lâche d'une hauteur de 30 cm sur une table, quelle est la force maximale exercée par la table sur la balle quand cette dernière rebondit? Pensez vous qu'il s'agit d'une force de l'ordre de 0.02 N (= mg), 2 N, 20 N? Donner votre estimation et préciser comment vous avez déduit celle-ci. Complétez cette question avant de commencer l'expérience!*

## 3 Matériel à disposition

Vous avez à votre disposition:

1. Trois capteurs piézo-électriques (Kistler 9132C) montés entre deux plaques en acier. Un couple de  $2 \text{ N} \cdot \text{m}$  a été appliqué aux vis qui maintiennent les deux plaques ensemble pour mettre les capteurs en pré-tension (pourquoi?). Voir Fig. 1.
2. Amplificateur pour lire les données des capteurs et les numériser.
3. Ordinateur de contrôle et d'acquisition.
4. Balance de précision.
5. Différentes combinaisons de poids, de 50 g à 3kg. Attention, ne faites pas confiance à la valeur indiquée sur les poids, et utilisez toujours une valeur que vous avez mesurée précisément.

6. Différentes balles que vous pouvez analyser. Utiliser au moins deux balles différentes.



*Fig. 1: Plaque avec 3 capteurs piézo-électriques et amplificateur.*

### Question 2 (4 points):

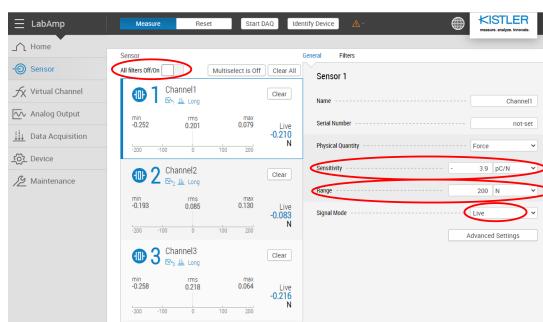
**Fonctionnement du matériel (à compléter hors du laboratoire):** Décrivez de manière précise le fonctionnement d'un capteur piézo-électrique et le matériel correspondant que vous avez à disposition. Préciser la marque et le modèle des équipements (capteurs, amplificateur), la gamme des forces qui peuvent être enregistrées (à comparer avec votre estimation pour la première question), le type d'amplificateur (courant, tension, charge), la fréquence et la précision (en bits) avec lesquelles les données peuvent être numérisées, et toute autre information qui est utile pour pouvoir reproduire vos résultats.

#### 3.1 Utilisation du matériel

On vous invite à découvrir comment fonctionne le matériel en le testant vous-même.

Pour éviter de perdre trop de temps, on vous donne ici quelques indications à suivre pour utiliser le système d'acquisition:

- Il est important de laisser au moins une heure pour que l'électronique dans l'amplificateur se stabilise pour permettre de prendre des données précises. **Allumer celui-ci dès votre arrivée dans le laboratoire si il n'est pas déjà allumé!**
- Pour contrôler l'amplificateur, vous allez utiliser un navigateur web sur l'ordinateur d'acquisition. Ouvrez le navigateur Microsoft Edge qui devrait déjà contenir un signet pour se connecter à l'amplificateur en utilisant le logiciel LabAmp.
- Vous pouvez régler la sensibilité et la gamme de force mesurables pour chaque capteur (voir Fig. 2). Réglez la sensibilité pour que celle-ci soit maximale (3 pC/N). Vous déduirez vous-même une bonne valeur à utiliser pour la valeur maximale.



*Fig. 2: Configuration d'un capteur.*

- À chaque fois que vous prenez une nouvelle mesure, appuyer sur “Reset” puis sur “Measure”, dans le logiciel d’acquisition (sur le navigateur web). La fonction “Reset” remet la valeur lue par les capteurs à zéro.
- Assurez-vous que tous les capteurs sont en mode “Live” (au lieu de “Max” ou autre chose). Les données lues sont alors en temps réel.
- Assurez-vous que tous les capteurs sont en mode avec le filtre “long time constant”, sinon les valeurs lues passent par un filtre RC. Assurez-vous aussi qu’aucun filtre sur les fréquences ne soit activé (voir Fig. 3).

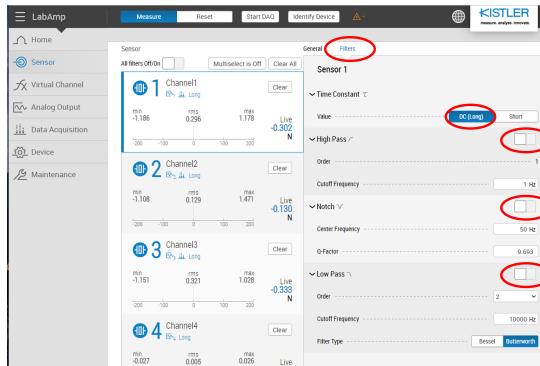


Fig. 3: Configuration des filtres pour un capteur.

- Assurez-vous qu’un virtual channel est enclenché pour lire la somme des trois capteurs, aussi en mode “Live” sans filtre (voir Fig 4).

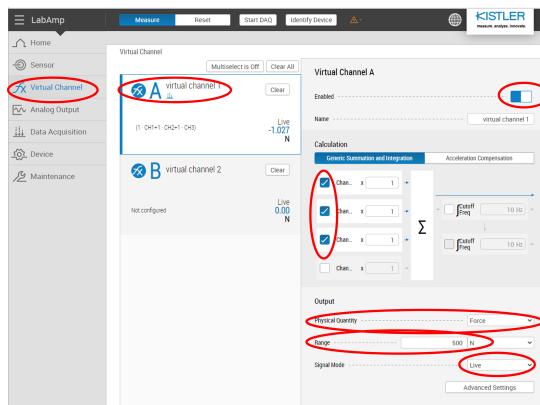


Fig. 4: Configuration d’un virtual channel.

- Dans la partie “Data Acquisition”, vous pouvez régler la durée des mesures enregistrées sur disque dur, la fréquence à laquelle elle sont lues, et le nom du fichier dans lequel seront enregistrées les données. On vous conseille d’enregistrer les données en format CSV, sans les “headers”, et de les limiter dans le temps. Voir Fig. 5.

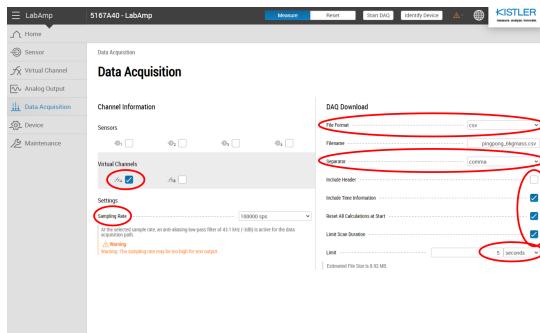


Fig. 5: Configuration de l’enregistrement de données en format CSV.

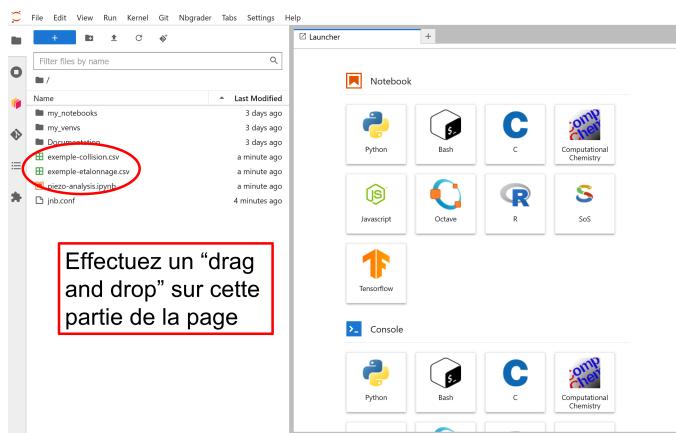
- Prenez l'habitude de tout-de-suite regarder les données que vous enregistrez. On vous propose un notebook Jupyter (voir ci-dessous) pour faire ceci de manière efficace.
- Si une lumière clignote sur l'amplificateur, cela veut dire que le capteur correspondant à enregistré une valeur supérieure à la valeur limite que vous avez programmée. En effectuant un "Reset", le capteur peut être ré-initialisé. Effectuer un réglage de la valeur maximale si nécessaire.
- Quand vous enregistrez des données à haute fréquence, il y aura un délai entre le moment où vous appuyez sur "Start DAQ" et le moment où les données sont enregistrées.

## **4 Analyse de données avec Jupyter Notebooks**

On met à votre disposition un notebook Jupyter avec quelques exemples de code en python qui vous permettront d'analyser les données récoltées avec l'amplificateur de manière efficace. Pour l'utiliser, connectez-vous à <https://noto.epfl.ch> en utilisant votre login de l'EPFL. Une fois connecté, vous verrez une liste de vos fichiers sur la partie gauche de l'écran (voir Fig 6). Il s'agit ensuite de télécharger les fichiers suivants sur la plateforme Jupyter Notebooks:

- le fichier notebook piezo-analysis.ipynb.
- le fichier avec données CSV exemple-etalonnage.csv.
- le fichier avec données CSV exemple-choc.csv.

Les fichiers se trouvent tous sur le bureau (desktop) de l'ordinateur d'acquisition et peuvent être téléchargés en effectuant un "drag and drop" du desktop à la page web. Vous ferez ensuite de même avec les données que vous enregistrerez.



*Fig. 6: Page Jupyter Notebook et liste des fichiers après qu'ils aient été téléchargés.*

**Avertissement:** cette démarche est bien plus simple que d'analyser les données avec Excel, même si il vous faudra une dizaine de minutes pour vous familiariser avec Jupyter notebooks! On vous le conseille vivement! Pour ouvrir le notebook (piezo-analysis.ipynb), double-cliquez sur celui-ci dans la page web. Suivez ensuite les instructions qui sont dans le notebook.

## **5 Démarche expérimentale à suivre**

On vous propose ici une démarche qui vous permettra d'atteindre vos objectifs scientifiques. Vous êtes libres d'en dévier mais vous devez répondre aux questions que l'on vous pose. On vous conseille vivement de regarder le notebook d'analyse Jupyter et la section suivante sur l'analyse de données avant de prendre vos données. Les questions dans cette section correspondent plus ou moins aux diverses étapes de la démarche qu'on vous propose.

- Effectuez quelques essais en lâchant les balles sur la plaque et prenez note de la force maximale enregistrée sur les capteurs, et de leur somme. Assurez vous que vous avez fixé des valeurs appropriées pour la valeur maximale de chaque capteur et de la somme. En général, il est bon d'utiliser une valeur maximale qui donne une bonne marge en plus de la valeur à laquelle vous vous attendez à mesurer. N'oubliez pas de tripler la valeur maximale pour la somme.
- Il vous faudra étalonner les mesures que vous faites puisque les valeur enregistrées ne sont pas en Newtons, même si elles en donnent l'impression. Utilisez les poids à votre disposition pour pouvoir convertir les valeur lues en "vrais" Newtons. Utiliser vos test précédents pour déduire sur quelle gamme de forces vous devez étalonner le matériel. Réfléchissez à quelle fréquence il convient d'enregistrer les données pour l'étalonnage. N'oubliez pas de faire un "Reset/Measure" avant chaque mesure (chaque poids que vous utilisez). On vous conseille de prendre des mesures pendant quelques secondes et d'ensuite prendre une valeur moyenne des données comme valeur lue par la somme des capteurs. Il y a un exemple dans le notebook Jupyter qui est fournit.
- Enregistrez un choc entre la balle et la plaque et regardez les données (la somme) que vous avez enregistrées. Réfléchissez à quelle fréquence (et pendant combien de temps) il convient d'enregistrer ces données (on vous conseille au moins 5 s de données, avec le délai nécessaire entre appuyer sur Start DAQ et lâcher la balle). Assurez vous d'enregistrer plusieurs rebonds. Quand vous regardez les données, faites un zoom sur l'instant du/des choc(s) et vérifiez que la valeur lue n'excède pas la valeur maximale que vous avez programmée. Il y'a une cellule dans le notebook fournit qui vous permet de rapidement regarder vos données.
- Maintenant que tout est réglé, vous êtes en mesure de récolter de bonnes donnée à analyser pour en déduire  $F(x)$  pour deux balle différentes. Réfléchissez à comment vous allez analyser les données avant de les enregistrer (consulter la prochaine section)!

### Question 3 (2 points):

**Ordre de grandeur:** *Est-ce que l'ordre de grandeur de la force maximale correspond à vos attentes (question 1)? Comparez avec votre première estimation et expliquez si ces deux diffèrent.*

### Question 4 (4 points):

**Étalonnage:** *Est-ce que la force lue par la somme des capteurs est linéaire en fonction de la force que vous avez utilisée pour votre étalonnage? Décrivez précisément comment vous avez étalonné le système (quelle données avez vous enregistrées, comment avez vous fait l'analyse) et montrez une courbe d'étalonnage ainsi qu'un fit à une fonction linéaire. Il vous faut décrire assez précisément pour que quelqu'un puisse lire votre réponse et reproduire vos résultats (ou les évaluer). Commentez sur les résultats et si vous pouvez utiliser un étalonnage linéaire. Dans le cas contraire, expliquer comment vous allez convertir les valeur lues en Newtons.*

### Question 5 (4 points):

**Caractéristique d'un choc:** *En regardant les données pour un choc, qu'observez vous sur la force en fonction du temps. Quelle est la durée approximative d'un choc? Est-ce que cette durée vous permet d'estimer la force moyenne pendant le choc et de comparer avec vos réponses aux questions 1 et 3? Il se peut qu'il y ait une série d'oscillations dans les mesures, de quoi s'agit-il?*

## **6 Démarche à suivre pour analyser les données**

Si tout c'est bien passé, vous avez enregistré la force lue par la somme des capteurs (convertie en Newtons avec votre étalonnage) en fonction du temps pendant plusieurs rebonds d'une balle sur la plaque. Il s'agit maintenant de mesurer la force en fonction de la compression de la balle,  $F(x)$ . On vous donne ici une démarche que vous pourriez suivre.

Vous avez enregistré plusieurs rebonds, que vous devriez voir très clairement dans vos donnée. Choisissez une des chocs (un des rebonds) à analyser pour déduire  $F(x)$ . Si vous prenez le temps entre ce

rebond et le précédent, vous pouvez déduire la vitesse,  $v_1$ , de la balle juste avant le choc d'intérêt. De même, avec le prochain rebond, vous pouvez déduire la vitesse,  $v_2$ , après le rebond d'intérêt (qui ne serait la même que  $v_1$  seulement si il n'y a pas de pertes).

#### Question 6 (3 points):

**Mesure des vitesses:** *Décrivez précisément votre démarche pour obtenir les vitesses avant et après le rebond que vous analysez. Comment avez-vous défini l'instant de la du choc? Quelles suppositions avez-vous faites? Est-ce qu'il y a des pertes?*

En connaissant la vitesse avant et après le rebond vous pouvez déduire le changement de la quantité de mouvement,  $\Delta p$ , de la balle. Ce changement dépend de la force,  $F(t)$ , qui a été exercée sur la balle:

$$\Delta p = mv_2 - mv_1 = \int F(t)dt \quad (1)$$

Vous avez les données pour calculer l'intégrale de la force sur le temps et pouvez donc vérifier que la force que vous avez enregistrée a bien le bon ordre de grandeur. Dans vos données vous pouvez faire un zoom sur le choc et prendre l'intégrale. Une intégrale est tout simplement une somme, donc il suffit de prendre la somme des valeurs de la force et de multiplier celle-ci par le temps d'échantillonage,  $\Delta t$ , que vous avez utilisé pour prendre les données:

$$\int F(t)dt = \Delta t \sum_i F_i \quad (2)$$

Il s'agit par contre de trouver les bonnes bornes pour la somme sur la force.

#### Question 7 (3 points):

**Changement de la quantité de mouvement:** *Comparez l'intégrale de la force sur le temps avec le changement de quantité de mouvement que vous aurez déduite avec la mesure des vitesses. Décrivez précisément votre démarche pour obtenir l'intégrale de la force, en particulier, comment vous avez choisi les bornes d'intégration. Est-ce que la force a le bon ordre de grandeur? Est-ce que l'intégrale de la force est plus grande ou plus petite que le changement de la quantité de mouvement que vous avez calculé? Pourquoi, selon vous? Quelles suppositions avez vous faites et quelle influence ont-elles ici? Pensez vous avoir sur/sous-estimé l'intégrale, les vitesses?*

Finalement, vous pouvez déduire la force en fonction de la compression de la balle:

1. Vous connaissez la vitesse,  $v_1$ , avant le choc.
2. Vous connaissez la force exercée sur la balle à chaque instant (chaque échantillon), et donc son accélération.
3. Vous pouvez donc calculer la vitesse de la balle à chaque instant.
4. Vous pouvez calculer la position du centre de masse de la balle à chaque instant, étant donné que vous connaissez sa vitesse. Si vous fixez à zéro la position du centre de masse quand le choc commence, la position du centre de masse équivaut à la compression de la balle.
5. Quand la vitesse de la balle est nulle, la balle est comprimée de manière maximale.
6. Connaissant la position du centre de masse (la compression de la balle) et la force à chaque instant, vous pouvez maintenant faire un graphique de la force en fonction de la compression. Un exemple vous est fourni dans le notebook Jupyter (mais attention, il faudra le modifier car il ne correspond pas exactement à votre situation).

#### Question 8 (5 points):

**Courbes  $F(x)$ :** *Décrivez précisément comment vous avez obtenu la courbe,  $F(x)$ , et comparez celle-ci entre deux balles. Est-ce que ces courbes suivent vos attentes? Par exemple, est-ce que les balles*

*agissent comme des ressort linéaires ( $F = -kx$ )? Est-ce que cela suit vos attentes quant aux matériaux? Quelle est la compression maximale des balles, est-ce que cela suit vos attentes? Quelles suppositions avez-vous faites qui pourraient changer vos résultats? Est-ce que vous pouvez confirmer la fonction,  $F(x)$ , avec une expérience différente? Si oui, décrivez comment vous le feriez. Est-ce qu'il y a une valeur dans la littérature scientifique avec laquelle vous pouvez comparer vos résultats?*