

Conseils pour les travaux pratiques

I. Généralités

I.1. Rédaction d'un compte-rendu

- Un compte-rendu de TP doit contenir **suffisamment d'informations** pour que le correcteur soit en mesure de juger de la réalité, de la pertinence et de la qualité des mesures effectuées...
Comment est effectué le montage (position des appareils de mesure dans le circuit...)? Que vaut la tension d'entrée? Quel est le calibre choisi pour telle mesure? Quel protocole choisi pour le repérage (mode XY, pointé de la lentille systématique sur sa face de sortie au milieu...)?
- En particulier, les **mesures brutes doivent toujours figurer dans le rapport**, avant transformation (conversion d'unités, application d'une translation pour changement d'origine ou correction quelconque...)
- Les développements calculatoire et théoriques n'ont pas leur place. Certains **résultats théoriques** peuvent toutefois permettre de localiser plus facilement un point de mesure (ex : recherche d'une résonance), soutenir une interprétation, appuyer une mesure (comparaison avec la valeur théorique attendue). Auquel cas, on laisse les calculs au brouillon et on ne mentionne que les résultats importants dans le compte-rendu.
- *Exemple : Valeur "théorique" attendue*
Supposons un filtre de gain maximal théorique $G_{\max} = \frac{R}{R'}$, avec des résistances proposées sur le papier de $R = 10\text{ k}\Omega$ et $R' = 1\text{ k}\Omega$. L'élève qui propose $G_{\max} = 10$ en guise de mesure se tire une balle dans le pied... D'abord il ne propose pas d'incertitude! D'autre part la valeur théorique attendue n'est certainement pas 10 car les valeurs des résistances ont toutes les chances d'être différentes de celles indiquées dans le texte. Il est plus pertinent de les re-mesurer au multimètre¹ et de l'indiquer clairement sur le compte-rendu.
Ainsi, une valeur dite « théorique » est théorique parce qu'elle repose sur un modèle mathématique, mais elle est évaluée à partir des valeurs « réelles », ou du moins les plus proches possible de la situation réelle. Ainsi, **l'expérience permet d'évaluer la pertinence du modèle théorique**, et non pas l'écart du matériel réellement utilisé par rapport aux indications fournies sur le papier (ce qui a peu d'intérêt).
- Par contre, les **commentaires** et les **interprétations** ont toute leur place. Toutefois, il faut rester concis. Un **schéma** est toujours bienvenu (allure des signaux sur l'oscilloscope, montage expérimental effectué...). La reproduction schématique d'un **oscillogramme** permet de rendre compte efficacement de l'allure d'un signal.

I.2. Relevés, tableaux de valeurs, graphes

- On réalise un **tableau** dans lequel on consigne les mesures **brutes** (ex : amplitudes U_e , U_s , amplitudes crête-à-crête $U_{e_{cc}}$ et $U_{s_{cc}}$, pointés du viseur x_1 et x_2 , angles des rayons sur le vernier du goniomètre θ_i et $\theta_{e...}$). Il est inutile de répéter n fois l'unité d'une mesure... mais il ne faut pas oublier de l'indiquer dans l'intitulé de la ligne (colonne)!
- Dans les lignes (colonnes) suivantes on calcule les grandeurs qui doivent nous servir dans la régression linéaire, ainsi que leur incertitude respective si on demande une régression avec barres d'erreur.
- Un graphe (une figure) doit être autonome, c'est-à-dire contenir toutes les informations nécessaires à sa lecture et sa compréhension (à part les développements expliquant le protocole de mesure ou les interprétations/discussions des résultats). Ceci nécessite en particulier : un titre, des labels pour les

1. La plupart des multimètres électroniques propose une mesure de résistance et une mesure de capacité. On peut mesurer indirectement une inductance en étudiant un circuit RLC série par exemple... mais là c'est déjà plus long.

axes (avec unité), une légende indiquant l'échelle de chaque axe, avec un minimum de graduation, une identification claire des différentes courbes si plusieurs sont superposées. On peut aussi ajouter sur le graphe le résultat numérique issu d'une régression linéaire (manuelle ou à l'ordinateur ou calculatrice).

- Pour être lisible et instructif, un graphe doit être **suffisamment grand** (au moins au format A5, si ce n'est A4). Les **points de mesure doivent occuper tout le graphe**, sinon c'est qu'on aurait pu zoomer encore et donc que l'échelle et/ou la fenêtre d'observation sont mal choisies.

1.3. Incertitudes

Tout résultat de mesure doit être affecté d'une incertitude, même évaluée de façon grossière.

- C'est aussi important que la valeur même de la mesure. On indique rapidement sur quelles hypothèses/critères repose cette incertitude. Il est bon de connaître le niveau de confiance associé à l'incertitude choisie (écart-type versus incertitudes élargies), que l'on peut citer une fois histoire de montrer qu'on le connaît.

On tient compte ensuite de l'incertitude pour adapter le nombre de chiffres significatifs choisis. La notation scientifique s'impose la plupart du temps.

- De façon générale il faut savoir appliquer la méthode de différenciation pour obtenir une formule de propagation des erreurs, et en déduire une incertitude. On peut souvent utiliser la dérivée logarithmique, mais cela ne s'impose pas toujours. En particulier, il faut connaître ou savoir retrouver les formules de propagation dans le cas des produits de puissances. Pour les cas compliqués, la relation sera fournie.

- **Barres d'« erreur » :**

Les barres d'erreur ou plutôt barres d'incertitude doivent normalement figurer sur les « points » du graphe (qui ne ressemblent pas à des points mais à des + visibles!) Même si l'incertitude d'une mesure brute répétée est toujours la même (ex : erreur de lecture Δx sur le banc d'optique), les incertitudes associées aux grandeurs portées sur le graphe, x et y , peuvent varier d'un point de mesure à l'autre si elles sont obtenues indirectement (ex : Focométrie, incertitude sur $\frac{1}{OA}$; Filtrage, incertitude sur G_{dB} ...). En cas de manque de temps (et/ou d'absence d'un outil adéquat... type tableur), on affecte l'incertitude maximale à tous les points ou on explique son choix de façon claire. En particulier il est possible d'écarter des points trop incertains (conditions de mesure difficiles...) et donc réduire l'incertitude globale retenue, mais toujours de façon explicite et si possible en expliquant d'où vient le problème.

1.4. Validation d'un modèle - régression linéaire

- Pour valider un modèle, on cherche à vérifier une relation mathématique par comparaison avec le comportement observé dans les mesures. Pour obtenir une **validation à la fois qualitative et quantitative**, il est nécessaire de procéder à un ajustement par la méthode des moindres carrés ou assimilé (maximum de vraisemblance). La régression linéaire reste alors la méthode à privilégier car :

- c'est la plus facilement accessible d'un point-de-vue logiciel (dans les calculatrice notamment ;
- c'est la plus simple à comprendre d'un point de vue théorique ;
- c'est la plus explicite sur le plan graphique pour constater une distribution aléatoire des erreurs (et donc valider le modèle), ou au contraire repérer une dérive systématique nette (et donc invalider le modèle) ;
- pour trancher entre deux modèles différents, les coefficients de corrélation doivent être comparables, et donc reposer sur deux modèles identiques. C'est pourquoi on se ramène naturellement à des progressions linéaires (affines).

Exemple : pour distinguer différents modèles de frottement fluide pour la chute d'une balle, il serait peu pertinent de comparer le coefficient de corrélation issu d'un ajustement exponentiel à celui obtenu pour un ajustement en tangente hyperbolique ou en parabole...

- **Cas d'une régression linéaire** $y = ax + b$:

On ne peut pas déterminer une incertitude Δa et Δb sur les paramètres de la droite a et b sans connaître les barres d'erreur (les incertitudes $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ sur les points de mesure (x_i, y_i)). Plus exactement, les logiciels de régression fournissent en général une incertitude, mais qui provient uniquement de la dispersion naturelle des valeurs introduites. Cette incertitude est donc en général peu pertinente pour notre problème.

La seule façon simple à notre niveau² pour obtenir Δa et Δb consiste à tracer les droites « extrêmes », le moins arbitrairement possible. Si l'on estime connue de façon certaine la valeur de a , on trace des droites extrêmes parallèles à la droite de régression. Inversement, si b est connue de façon certaine, on trace deux droites extrêmes passant par $(x = 0, y = b)$. Finalement on obtient un intervalle de **valeurs possibles** pour a et b , qui peut être divisé par $\sqrt{12}$ pour plus d'optimisme !

I.5. Acquisition numérique

- Bien choisir le calibre (sensibilité "verticale")... le plus bas possible comme d'habitude, pour avoir la meilleure précision relative.
- Toujours bien réfléchir à la fréquence d'échantillonnage pertinente pour le problème posé. Si le signal est grosso modo monochromatique c'est simple (au moins 10 points par période, mais plutôt plus s'il y a du traitement par la suite). Si le signal est polychromatique, **se souvenir du critère de Shannon**.
- L'incertitude ultime sur la mesure est liée à la fréquence d'échantillonnage (en temps) et à la résolution de la carte d'acquisition pour le calibre choisi (nombre de bits). Cela s'observe aisément en zoomant sur le signal.
Un bruit d'origine électronique plus ou moins important s'ajoute au signal, qui peut dégrader cette incertitude (« largeur » de trait)

II. Conseils particuliers

II.1. Equilibre liquide-vapeur et calorimétrie

- Connaître et savoir interpréter l'équation d'état de Van der Waals.
- Diagramme (p, V) : faire des mesures suffisamment rapprochées dans les zones utiles. Manoeuvrer délicatement, sans acoups, et sans aller-retours sur une même isotherme.
- Eviter la multiplication des récipients et transvasements.
- Ne pas oublier la capacité du calorimètre, si elle est connue.

II.2. Optique

De façon générale pour l'optique géométrique, il faut se souvenir des lois de Descartes et des implications en terme de trajet de la lumière (ex : prisme), savoir un minimum de choses sur les lentilles et les instruments d'optique courants.

a. Goniomètre à prisme - Spectroscopie

En général, vous n'aurez pas à réaliser intégralement toute la procédure de réglage, et le goniomètre sera au moins partiellement réglé. Toutefois il faut connaître le principe des différents réglages, et être à même de corriger un problème d'alignement et d'« horizontalité ».

- Vérifier que la plate-forme est approximativement horizontale.
- Savoir régler dans l'ordre : la lunette autocollimatrice (oculaire puis objectif), puis le collimateur.
- Réglage de la perpendicularité de la lunette avec un miroir par autocollimation.
- Ne pas oublier de noter la valeur de l'angle de référence θ_0 du faisceau non dévié.

². donc hors méthodes statistiques sophistiquées.

- Ensuite on positionne le prisme :
 - Trouver une position où les faces utiles du prisme sont face à une vis de plate-forme (le plan de symétrie du prisme passe par l'axe de rotation de la plate-forme).
 - Décentrer l'axe de symétrie du prisme.
 - Repérer la position angulaire du minimum de déviation en vision directe à l'oeil, réajuster la position du prisme pour que le faisceau passe bien au milieu de la face du prisme dans cette configuration.
- Réglage de la plate-forme (« horizontalité ») par autocollimation sur les 2 faces utiles du prisme.
- Régler une fente fine pour avoir de la précision dans la lecture des angles.
- Savoir lire le vernier. Ne pas oublier que les minutes d'arc ne sont pas des décimales (0 à 60). Convertir numériquement les degrés-minutes en degrés décimaux.
- Ecrire des relations entre angles orientés algébriques, et respecter le sens positif arbitraire du vernier.
- Savoir mesurer l'angle d'incidence du faisceau parallèle, et l'angle du prisme.

b. Focométrie

- Connaître les méthodes simples et rapides de détermination
 - du caractère convergent ou divergent d'une lentille,
 - de la distance focale d'une lentille.
- Connaître la méthode d'**autocollimation**.
- Connaître le principe de fonctionnement du **viseur** et de la **lunette**, leur utilité, et savoir les utiliser.
- Connaître la règle des $4f$, le principe des méthodes de **Bessel** et de **Silbermann**.

II.3. Electronique

a. Montages

- Faire un schéma du montage. Ne pas représenter les fils coaxiaux tels qu'ils sont réellement ; on dessine à la place des fils simples comme dans tout schéma électrique symbolique.
- Réfléchir à la position de la « masse » qui en pratique est quasiment toujours reliée à la Terre via le GBF et/ou l'oscilloscope.
- Utiliser des **fils de couleur, noirs pour la masse, et minimiser le nombre de fils/connexions** utilisés pour :
 - faciliter la lisibilité (pour vous et pour le correcteur) ;
 - faciliter la détection des erreurs de montage ou les dysfonctionnements ;
 - minimiser les problèmes de faux contact ;
- Ne pas oublier de connecter complètement les câbles coaxiaux (pas de fil manquant...), et notamment de fermer le circuit !

b. Utilisation de l'oscilloscope

- Commencer de préférence en mode analogique pour être au plus proche de la réalité et bien savoir où vous en êtes. Le mode numérique (STORAGE ON) n'est vraiment utile que si le balayage est lent (signal lent) et donc l'affichage intermittent (fatigue les yeux). Il est utile aussi pour les acquisitions d'événements uniques (SINGLE).
- Régler la focalisation à un trait fin (pour plus de précision).
- Régler régulièrement le zéro, ou s'assurer de sa position avant une mesure absolue...

- Réfléchir au couplage d'entrée³ : DC a priori (=), AC si besoin d'enlever toute composante continue (\sim , notamment pour une mesure de déphasage). Attention **le couplage AC filtre les basses fréquences en dessous de qqs Hz**.
- Toujours veiller à bien synchroniser le balayage :
 - Se placer a priori en mode AUTO (voyant NM éteint), notamment lorsque le signal est constant sinon on ne verra rien.
 - Vérifier sur quel signal la synchronisation est faite : en haut milieu de l'écran⁴.
 - Pour une mesure (durée ou tension) dilater au maximum le signal pour une mesure précise (temps caractéristique de décroissance...).
 La mesure d'une période est d'autant plus précise que le nombre de périodes choisi est grand... pour un même calibre !! Toutefois l'incertitude est généralement proportionnelle au calibre donc il n'est pas très utile de mesurer 10 périodes...

c. Etude d'un filtre

- Vocabulaire : on n'écrit pas qu'un filtre «laisse passer» ou «coupe» des fréquences. On parle plutôt d'*amplification*, *atténuation*, *rejet*, et *bande-passante*.
- Il faut connaître (ou savoir retrouver rapidement) les formes canoniques des filtres courants d'ordre 1 et 2 de façon à pouvoir raisonner sur l'expérience, et retrouver rapidement les résultats nécessaires.
- Par exemple, cela peut permettre de retrouver qu'un filtre **passé-bande** d'ordre 2 vérifie les propriétés suivantes :
 - le déphasage à la résonance vaut $0[\pi]$, donc dépend du signe du gain à la résonance. Cela permet de déterminer la résonance en mode XY, ce qui est nettement plus précis.
 - la bande passante et le facteur de qualité sont reliés par $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}$.
 - la connaissance de la formule canonique permet enfin de trouver les caractéristiques du filtre en fonction des paramètres : ω_0 , Q , H_0 (pour les examens, la fonction de transfert peut être donnée dans l'énoncé si nécessaire).

Attention : il est absurde de rechercher une fréquence de coupure en mode XY, quelque soit le filtre. En particulier le mode XY est peu utile pour un filtre passe-bas ou passe-haut.

- Le diagramme de Bode doit être tracé sur au moins 3 décades, centré sur la fréquence caractéristique f_0 (coupure, résonance...), et permettre la détermination expérimentale des pentes des asymptotes. Cela exige d'avoir fait au préalable un balayage fréquentiel⁵ pour observer le comportement sur plusieurs décades et connaître la nature du filtre.

Lors de ce balayage en fréquence, il faut aussi s'assurer que **la sortie ne sature jamais** sur toute la gamme de fréquence étudiée⁶. En particulier cela peut arriver si votre montage comporte un AO. Si le filtre sature, c'est qu'il fonctionne de façon non-linéaire, donc le filtre ne remplit plus sa fonction de **filtre linéaire**.

Exemple : Une saturation en tension sur un passe-bande induit une erreur sur la fréquence de résonance, et une sur-estimation de la bande-passante.

- On travail soit
 - sur un papier semi-log avec log en abscisse, donc on calcule G_{dB} ,
 - soit sur un papier log-log, donc on place les valeurs de G sur l'axe log qui est donc gradué en $G_{dB}/20$.
- On prend des valeurs bien distribuées de $\frac{f}{f_0}$ (ex : $[\frac{1}{50}; 50]$).

3. indiqué en bas de l'écran, gauche ou droite selon la voie.

4. indique aussi le type de couplage appliqué à ce signal pour synchro : AC DC, LF... mais cela n'est pas important en général

5. c'est-à-dire passer de décade en décade à la main pour voir l'évolution du signal de sortie...

6. La saturation se traduit de façon générale par une déformation du signal de sortie, qui ne ressemble plus à un signal sinusoïdal : écrêtage, triangularisation...

- On hésite pas à augmenter la tension d'entrée pour la mesure du gain pour des fréquences hors de la bande passante. Ceci permet d'augmenter la précision de ces mesures, et notamment d'obtenir les pentes des asymptotes.
- On prend des valeurs rapprochées là où c'est nécessaire si le filtre est sélectif (pentes fortes).
- Diagramme de phase : on mesure des intervalles de temps Δt algébriques (et incertitude) en faisant attention au signe, puis on en déduit la valeur du déphasage connaissant la fréquence précise. Là aussi il faut connaître le résultat attendu en théorie, à condition de savoir de quel type de filtre il s'agit.
- Connaître l'intérêt du **montage suiveur** (à amplificateur opérationnel) et savoir le mettre-en-oeuvre. Le schéma sera donné.

d. **Analyse spectrale**

- Il faut connaître la forme générale d'une décomposition en série de Fourier, et sa signification en terme de signal.
 - Le terme de fréquence nulle représente la valeur moyenne, puis le mode fondamental représente la période observée du signal.
 - Les harmoniques traduisent des variations plus rapides que le mode fondamental.
 - Un signal présentant des discontinuités ou des ruptures de pente aura un spectre plus riche, c'est-à-dire avec des amplitudes importantes pour les autres fréquences.
- Savoir raisonner sur l'effet d'un filtre sur le spectre d'un signal. Notamment relier cela au caractère dérivateur ou intégrateur quand c'est le cas.
- Savoir détecter/interpréter une non-linéarité du circuit par l'apparition d'harmoniques (enrichissement spectral). La non-linéarité peut être recherchée (montage non-linéaire à diode, à AO en mode saturé...), ou à éviter (saturation de l'AO dans un filtre).
- Connaître l'effet en terme spectral de la multiplication de deux signaux de fréquences différentes.
- Lorsqu'on utilise un multiplieur, vérifier son fonctionnement indépendamment du reste du circuit.
- De façon générale, il faut toujours tester les éléments séparés avant de les associer dans un montage plus complexe.

e. **Transitoires électriques (ou mécaniques)**

- Connaître la théorie pour les systèmes linéaires d'ordre 1 ou 2.
- Connaître le décrétement logarithmique, son utilité, et la façon de le mesurer.
- Savoir utiliser Generis et la carte d'acquisition pour enregistrer un événement unique.
- Savoir de même enregistrer un événement unique avec l'oscilloscope en mode numérique (STORAGE ON) et en mode de déclenchement SINGLE.

f. **Diode**

- Connaître le montage du redressement simple alternance.
- Connaître le montage du détecteur de crête et savoir ajuster la valeur des composants en fonction de la situation.