

RÉUSSIR
LES TP DE PHYSIQUE
AUX CONCOURS

CLASSES PRÉPAS

TRAVAUX PRATIQUES

LAURENT SALLEN | DOMINIQUE MEIER

RÉUSSIR
LES TP DE PHYSIQUE
AUX CONCOURS

CLASSES PRÉPAS


TRAVAUX PRATIQUES

l'intégrale

3^e édition

DUNOD

Conception graphique de la couverture : Hokus Pokus Créations

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---	--

© Dunod, 2011, 2016, 2019

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079040-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	VII
Description des épreuves aux concours	IX

PARTIE 1

MÉTHODOLOGIE

Chapitre 1. Notions d'incertitudes	3
Chapitre 2. Tracer un graphe	8
Chapitre 3. Autour du matériel	15
Chapitre 4. Construire une alimentation stabilisée symétrique	23
Chapitre 5. Régler un goniomètre	24
Chapitre 6. Régler un interféromètre de Michelson	31
Chapitre 7. Quelques ordres de grandeur	42

PARTIE 2

ÉLECTRICITÉ

Chapitre 8. Étude de fonctions logiques	47
Chapitre 9. Élaboration d'une source de tension	56
Chapitre 10. Étude d'un tripôle non linéaire	68
Chapitre 11. Montage à transfert de charges ou pompe à diodes	81
Chapitre 12. Étude d'un circuit RC	93
Chapitre 13. Détermination d'un coefficient d'inductance mutuelle	103
Chapitre 14. Défauts des ALI réels	112
Chapitre 15. Analyse spectrale d'un signal	127
Chapitre 16. Valeur absolue d'un signal	140
Chapitre 17. Oscillateur à pont de Wien	153

Table des matières

Chapitre 18. Oscillateur à réseau déphaseur	169
Chapitre 19. Résistance négative et application	179
Chapitre 20. Étude d'un générateur de signaux triangulaires	193
Chapitre 21. Modulation et démodulation d'amplitude	209

PARTIE 3

OPTIQUE

Chapitre 22. Le microscope	223
Chapitre 23. Réalisation d'un système afocal	236
Chapitre 24. Biprisme de Fresnel	251
Chapitre 25. L'interféromètre de Michelson	261
Chapitre 26. Spectroscopie par prisme	276
Chapitre 27. Spectroscopie par réseaux	287

PARTIE 4

ONDES ET CONVERSION DE PUISSANCE

Chapitre 28. Câble coaxial	299
Chapitre 29. Ligne diffusive	317
Chapitre 30. Mesure de la célérité du son dans l'air	332
Chapitre 31. Étude d'un hacheur série et d'une machine à courant continu	343
Index	357

INTRODUCTION

Les travaux pratiques de Sciences Physiques font partie intégrante du programme de CPGE. Ainsi, en classe préparatoire, chaque élève aura passé deux heures par semaine pendant au moins deux ans en salle de TP. Il est donc logique que l'aspect expérimental fasse, lui aussi, l'objet d'une évaluation aux concours. Le poids de cette évaluation est loin d'être négligeable, le coefficient est le même que celui de l'épreuve de TIPE.

Toutefois, alors que les recueils d'annales relatifs aux épreuves écrites et orales de concours sont nombreux, quelles que soient la matière et la filière, il n'existait pas d'ouvrage portant spécifiquement sur l'épreuve de Travaux Pratiques aux concours. Il nous a semblé important de combler cette lacune.

Pour cela, nous avons compilé des informations fournies par nos élèves : en effet, il est fréquent, pour ne pas dire habituel, que les candidats, à l'issue des épreuves pratiques, ramènent à leurs (anciens !) professeurs les énoncés qui leur ont permis de briller... ou qui les ont conduits à un éventuel échec. Ces textes renvoyés par les étudiants constituent une mine d'informations permettant de préparer, au mieux, les élèves sur de « vraies épreuves » de Travaux Pratiques.

Cependant, il peut être difficile pour un candidat de se rappeler d'un énoncé de TP touffu et parfois long. Il arrive donc que, dans les retours de nos élèves, la valeur numérique de tel ou tel composant soit oubliée, la distance focale d'une lentille soit erronée, ou encore qu'un schéma électrique soit partiel. Ces textes deviennent rapidement des casse-têtes, voire des défis pour les enseignants tentant de comprendre un énoncé lacunaire, avant de « réaliser l'expérience ». De plus, les professeurs enseignant dans des grosses structures ont bien souvent un meilleur retour des épreuves pratiques, qualitativement et surtout quantitativement, que les collègues des petites structures. Dans un souci de transparence et d'équité nous avons voulu essayer de limiter cette inégalité en termes d'information pour ce type d'épreuve.

Les énoncés proposés dans ce livre sont le résultat de recoupements multiples, année après année, des textes écrits et renvoyés par nos étudiants. Ils sont certainement très proches des énoncés originaux, dans leur progression comme dans les données utilisées pour les expériences. Il peut néanmoins subsister encore quelques différences entre les originaux et les énoncés que nous proposons.

Il nous a fallu faire un choix parmi les nombreux TP dont nous disposions. Nous avons pensé qu'il était raisonnable de présenter dans ce livre la même proportion de TP d'électricité et d'optique qu'aux concours. À l'exception de certains textes, nous

Introduction

avons retenu des textes qui sont communs aux trois filières, soit plus d'une vingtaine de TP en tout. Pour chacun, nous avons précisé les concours dont ils sont extraits, sachant que les énoncés ne sont pas strictement identiques d'un concours à l'autre.

Si année après année, les textes proposés à l'épreuve pratique changent peu, il faut savoir qu'il existe plus d'une centaine de sujets différents. Il est donc impossible et surtout inutile de « bachoter » cette épreuve. Cet ouvrage a l'ambition de permettre aux étudiants de découvrir de nouvelles méthodes expérimentales, de s'entraîner à exploiter leur savoir-faire dans le cadre de nouvelles situations. Il est important de s'imprégner des méthodes proposées dans cet ouvrage et surtout de profiter pleinement des séances de TP proposées durant les deux années de préparation aux concours.

Les auteurs souhaitent remercier tous les étudiants qui ont fait l'effort de rédiger et de renvoyer un texte. Nous remercions aussi vivement Michelle KOPCIA et Jean-Baptiste POINCOT techniciens du laboratoire de Sciences Physiques du lycée Kléber de Strasbourg, et Abel KHARBACH technicien du laboratoire de Sciences Physiques du lycée Hoche de Versailles pour leurs encouragements et leur aide technique.

Laurent SALLEN, Dominique MEIER

DESCRIPTION DES ÉPREUVES AUX CONCOURS

I MINES

Lieu : Télécom Paris

Durée : 3h30

Cette épreuve ne concerne que les candidats des filières PC et PSI. L'épreuve a pour intitulé « Épreuve mixte » et pour objectif « l'évaluation d'un socle théorique de compétences expérimentales » pour reprendre la phrase du rapport de ce concours. Le début de l'épreuve consiste généralement en une étude théorique que l'expérience qui suit doit valider ou non.

L'examineur est très présent, pose régulièrement des questions au candidat sur l'expérience en cours ou de culture générale, le guide s'il fait fausse route. Des prises d'initiative de la part du candidat sont très appréciées et il est possible d'avoir une excellente note sans avoir terminé le TP à condition de faire preuve de bon sens et d'esprit critique concernant les résultats obtenus.

Il faut rendre un compte-rendu de TP à la fin de l'épreuve qui doit être « clair et structuré » et où les résultats expérimentaux sont exploités et interprétés.

En filière PC, les candidats ont soit TP de Physique, soit TP de Chimie. En filière PSI, les candidats ont soit TP de Physique, soit TP de SII. Ils ont connaissance de la matière environ une semaine avant l'épreuve, au moment de la convocation.

D'après nos retours, la répartition serait environ 2/3 d'électricité et 1/3 d'optique.

II CENTRALE

Lieux : Supélec et Supoptique

Durée : 3h

Cette épreuve concerne les candidats des filières MP, PC et PSI. Le lieu de passage de l'épreuve est connu avant le début de la série donc à peu près une semaine avant

Description des épreuves aux concours

l'épreuve. D'après les textes renvoyés par nos élèves, il n'y a que des TP d'électricité à Supélec et environ 70 % de TP d'optique et 30 % de TP d'électricité à Supoptique.

Il semble que l'essentiel de la notation vient du compte rendu de TP. L'interaction candidat-examineur ne paraît pas aussi importante que pour les autres concours. Les textes proposés demandent explicitement d'appeler l'examineur (à deux ou trois reprises selon les sujets). L'examineur écoute les explications et éventuellement les questions du candidat, prend note et peut intervenir pour éviter au candidat d'aller dans une mauvaise direction. Il est impératif de s'arrêter pour faire cette petite présentation à l'examineur et il ne faut pas continuer le TP. À la fin de l'épreuve, il est demandé de rédiger une synthèse. C'est l'occasion de faire le point sur ce qui a été fait en essayant d'avoir une vision un peu plus globale du problème abordé.

À noter que depuis les concours 2015, il existe également des TP de Chimie à Orsay, à proportion d'environ 15 %.

III X-ENS

1) ENS

Pour la filière PC, l'épreuve est commune pour les ENS de Paris, de Lyon et de Cachan et a lieu alternativement à l'ENS de Lyon et à l'ENS de Cachan. Elle dure 4h. Il y a une grande diversité de sujets et de thèmes abordés. Les examinateurs viennent souvent pour s'entretenir avec les candidats.

Pour la filière PSI, l'épreuve a lieu à l'ENS de Cachan et dure 3h. L'état d'esprit de cette épreuve est le même que pour la filière PC.

Il n'y a pas d'épreuve de TP en filière MP.

2) Polytechnique

Il s'agit de la même épreuve que celle de l'ENS pour la filière PSI. Elle est faite dans le même état d'esprit pour la filière PC et a lieu à l'école Polytechnique. Il n'y a pas d'épreuve de TP en filière MP.

Partie 1

Méthodologie

NOTIONS D'INCERTITUDES

1

I DÉFINITIONS

Considérons une grandeur physique G dont on cherche à connaître la valeur g . Par abus de langage, on confond souvent la grandeur physique, ici G , et sa mesure g . Pour éviter d'alourdir inutilement cette présentation, nous confondrons volontairement G et g .

Lors de la mesure de la grandeur physique G , l'erreur est la différence entre la valeur mesurée, approchée G_a et, la valeur exacte G_e . Celle-ci est inconnue sinon on ne chercherait pas à la déterminer !

L'incertitude absolue ΔG représente une estimation de l'importance de l'erreur commise. En absence d'erreur systématique, elle définit un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur exacte, du moins si cette estimation est faite correctement.

Dans le même esprit, on introduit aussi l'incertitude relative $\frac{\Delta G}{G_a}$ ou encore, précision de la mesure, elle est exprimée en %.

Il s'agit donc d'évaluer cette incertitude (ΔG) et pour ce faire, deux approches sont souvent utilisées :

La première est statistique. On effectue, lorsque cela est possible, une série de mesures et on calcule la valeur moyenne et l'écart-type de ces mesures. La valeur moyenne est la meilleure estimation de la valeur exacte G_e tandis que l'incertitude ΔG , directement reliée à l'écart-type, définit un intervalle dans lequel la valeur exacte se trouve avec une probabilité connue.

Il s'agit des incertitudes de type A. Précisons dès maintenant que ce cas de figure n'apparaît pas pour l'instant aux concours. En effet, il est plutôt demandé au candidat de réaliser des mesures uniques (mais différentes) et non pas un grand nombre de fois la même mesure dans un but de statistiques. Il s'agit autant d'un problème de temps que d'intérêt.

Cette première approche peut éventuellement être celle d'un professeur qui fait réaliser une même mesure à différents groupes pendant une séance de TP dans le but de présenter l'aspect statistique d'une étude à ses élèves.

Une seconde approche consiste à évaluer un majorant de l'erreur commise lors de la mesure. Il est estimé à partir des lectures sur les appareils de mesure et des conditions expérimentales.

Il s'agit des incertitudes de type B qui se prêtent particulièrement aux situations de concours et que l'on détaille succinctement dans la suite de ce chapitre.

Chapitre 1 · Notions d'incertitudes

L'objectif est donc double :

- Minimiser l'incertitude absolue et relative lors des expériences pour obtenir un résultat le plus précis possible ;
- Évaluer la précision des mesures et donc celle du résultat présenté.

II ESTIMATION DES INCERTITUDES

1) Par la lecture classique

Lorsque la mesure se fait à l'aide d'une échelle de graduations (sur une règle, un vernier, ou l'écran d'un oscilloscope), on considère que l'incertitude-type s vaut :

$$s = \frac{1 \text{ division}}{\sqrt{12}} = \frac{1 \text{ division}}{2\sqrt{3}}$$

où 1 division correspond à la plus petite graduation. Par exemple, pour une règle graduée en millimètres, 1 division = 1 mm.

Ce sont les lois probabilistes qui donnent cette expression. Cela correspond à un intervalle de confiance de 68 %, ce qui signifie que si G_a est le résultat de la mesure, alors la valeur exacte G_e a 68 % de chances de se trouver dans l'intervalle de confiance et donc d'être comprise entre $G_a - s$ et $G_a + s$. On écrit alors :

$$G = G_a \pm s$$

avec dans ce cas $\Delta G = s$, que l'on devrait écrire $\Delta G_{68\%} = s$.

On parle également de niveau de confiance élargi auquel cas :

$$\Delta G_{95\%} = 2 \times \Delta G_{68\%} = 2 \times s$$

correspondant à un niveau de confiance de 95 %.

L'essentiel dans un compte rendu de TP ou dans un travail est de rester cohérent avec le niveau de confiance choisi. Nous nous contenterons d'un niveau de confiance de 68 % dans cet ouvrage.

Exemple

Dans le cas de la règle graduée au millimètre, l'incertitude de lecture d'une abscisse est donc :

$$\Delta x = \frac{1 \text{ mm}}{\sqrt{12}} \approx 0,3 \text{ mm}$$

2) Instrument ou appareil affichant une tolérance

Si un instrument ou un composant affiche une tolérance t , alors l'incertitude type s vaut :

$$s = \frac{t}{\sqrt{3}}$$

et cela correspond toujours à un intervalle de confiance de 68 % : $\Delta G = \Delta G_{68\%} = s$.

Exemple

La valeur d'une résistance donnée par l'intermédiaire des 4 anneaux de couleur, est de 200 Ω avec une tolérance de 5 % :

$$\Delta R = \frac{\frac{5}{100} \times 200}{\sqrt{3}} = 5,8 \Omega \approx 6 \Omega$$

Remarque

Pour un intervalle de confiance de 95 %, il faut à nouveau multiplier cette valeur par 2 et cela s'interpréterait par : « on est sûr à 95 % que la résistance utilisée a une valeur comprise entre 188 Ω et 212 Ω ».

3) Par une lecture de type numérique

Chaque appareil numérique donne le résultat avec une précision qui lui est propre (cette valeur est accessible dans la notice d'utilisation).

En général, le constructeur indique pour l'écart type un pourcentage p de la valeur lue sur l'appareil ainsi qu'un nombre N de digits (le digit correspondant au dernier chiffre affiché sur l'appareil) :

$$s = \frac{p \times \text{valeur lue} + N \times \text{digits}}{\sqrt{3}}$$

qui correspond encore à un niveau de confiance de 68 % : $\Delta G = \Delta G_{68\%} = s$

Exemple

On lit sur un ampèremètre une valeur de 4,83 mA et l'appareil indique 2 % *rdg* + 1 *digit* (*rdg* correspond à *reading* = valeur lue), alors :

$$\Delta I = \frac{\frac{2}{100} \times 4,83 + 1 \times 0,03}{\sqrt{3}} \approx 0,08 \text{ mA}$$

Remarque

Pour un intervalle de confiance de 95 %, il faut multiplier à nouveau cette valeur par 2. Il est là aussi préférable d'utiliser le bon calibre pour effectuer la mesure c'est-à-dire, un peu comme s'il s'agissait d'une lecture sur écran, celui qui donne la plus grande valeur sans dépasser le calibre. Pour les oscilloscopes donnant directement les amplitudes crête à crête, il faut encore utiliser le calibre permettant à la courbe d'occuper la plus grande surface de l'écran pour que la valeur donnée par l'appareil soit la plus précise possible.

III MESURE INDIRECTE : PROPAGATION DES INCERTITUDES

Supposons que la grandeur G dépende des paramètres x et y : $G = g(x, y)$. Ces paramètres x et y sont mesurés directement avec une incertitude Δx et Δy , respectivement.

Dans un premier temps, on calcule la différentielle de G et on obtient :

$$dG = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy$$

L'incertitude absolue sur G est alors donnée par la relation :

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 \Delta x^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2}$$

Remarque

Une façon rapide permettant d'accéder à la différentielle de G consiste à utiliser la différentielle logarithmique. Lorsque G est de la forme :

$$G = g(x, y) = k x^\alpha y^\beta \text{ avec } k \text{ une constante}$$

alors :

$\ln G = \ln k + \alpha \ln x + \beta \ln y$ ce qui donne en différenciant :

$$d(\ln G) = 0 + \alpha d(\ln x) + \beta d(\ln y)$$

soit : $\frac{dG}{G} = \alpha \frac{dx}{x} + \beta \frac{dy}{y}$.

Pour la mesure à partir d'une lecture double avec la même incertitude ΔG à chacune des deux mesures on arrive ainsi à :

$$\Delta G_{\text{double lecture}} = \sqrt{2} \times \Delta G$$

Exemple

Si on réalise une mesure de longueur L sur une règle graduée au millimètre à partir de deux positions x_1 et x_2 , cela donne :

$$\Delta L = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2}$$

avec $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x = \frac{1 \text{ mm}}{\sqrt{12}} \approx 0,3 \text{ mm}$

d'où $\Delta L = \sqrt{2} \times \Delta x \approx 0,4 \text{ mm}$.

IV À PARTIR D'UNE RÉGRESSION LINÉAIRE

Comme cela est précisé dans le chapitre intitulé « Graphes », pour vérifier une loi, il est nécessaire de se ramener à une droite (en faisant éventuellement des changements de variables).

En traçant les points sur du papier millimétré, il faut estimer « à l'œil » les pentes p_{\min} et p_{\max} , respectivement de pente minimale et maximale, passant au plus près d'un maximum de points. La pente p a alors pour valeur :

$$p = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2} \pm \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2} \left(\frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}} \% \right)$$

Remarque

En toute rigueur, connaissant l'incertitude des variables que l'on reporte sur le graphe, il faudrait tracer non des points mais de petits rectangles dont les côtés correspondent aux valeurs de ces incertitudes.

V EXPRESSION DES RÉSULTATS

Après mesures et calculs d'incertitudes, le résultat doit s'exprimer de la façon suivante :

$$G = G_a \pm \Delta G \left(\frac{\Delta G}{G_a} \% \right)$$

en faisant attention au nombre de chiffres significatifs.

- ΔG ne doit jamais comporter plus de deux chiffres significatifs. Il faut arrondir aux valeurs supérieures ;
- pour G_a , il faut arrondir de façon cohérente en fonction de l'incertitude. Ainsi donner un résultat sous la forme :

$$R = 204,13 \pm 11 \Omega (6 \%)$$

n'a aucun sens car les deux chiffres après la virgule sont ridicules compte-tenu de l'incertitude. Le bon résultat devrait être plutôt :

$$R = 204 \pm 11 \Omega (6 \%)$$

Conséquence : Il ne faut pas recopier la valeur numérique affichée par un appareil numérique sans porter un regard critique sur ce résultat puisque cet appareil présente lui aussi des limites en termes de précision.

VI ET AUX CONCOURS ?

En électronique, les calculs d'incertitudes sont rarement exigés. En revanche, en optique, c'est systématique.

2

TRACER UN GRAPHE

I PRÉSENTATION D'UN GRAPHE

La présentation d'un graphe nécessite :

- un titre ;
- une échelle adaptée sur chacun des axes (graduations), pour que le graphe soit le plus grand possible sans déborder ;
- la variable et son nom sur chacun des axes avec son unité ;

Ne pas oublier de numéroter chaque graphe (s'il y en a plusieurs pour un compte-rendu de TP) en relation avec la question concernée : « Voir graphe numéro XX ». Trop souvent des candidats oublient de le faire et les examinateurs doivent chercher parmi les documents et faire un tri (tout ce qui fait perdre du temps à un examinateur est à déconseiller).

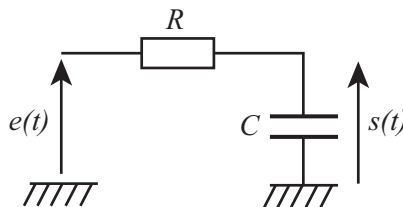
II VÉRIFICATION D'UNE LOI

Si l'on souhaite vérifier graphiquement une loi, il est nécessaire de se ramener à une droite. Par exemple, s'il faut vérifier une loi du type $y = \frac{a}{x^2}$, le graphe $y = f(x)$ ne permettra pas de conclure avec certitude. Il est judicieux de tracer $y = f(1/x^2)$ qui donnera une droite de pente a .

De façon plus générale lorsqu'il s'agit de vérifier une loi en puissance comme $y = ax^\alpha$ avec α donné, ou bien s'il faut déterminer α il faut tracer la courbe $\ln y = f(\ln x)$ qui est une droite de pente α . En effet, $\ln y = \ln(ax^\alpha) = \ln a + \ln x^\alpha$ d'où $\ln y = \alpha \times \ln x + \ln a$.

III MESURES À L'OSCILLOSCOPE

Illustrons les mesures de gain et de phase sur l'exemple du circuit RC suivant :



Avec les données suivantes : $R = 55,8 \text{ k}\Omega$, $C = 1,0 \text{ nF}$ et une tension d'entrée de fréquence $f \approx 2,7 \text{ KHz}$. Le gain théorique a pour expression :

$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \text{ où } \omega_0 = \frac{1}{RC} \approx 1,79 \cdot 10^4 \text{ rad s}^{-1} \text{ est la pulsation de coupure}$$

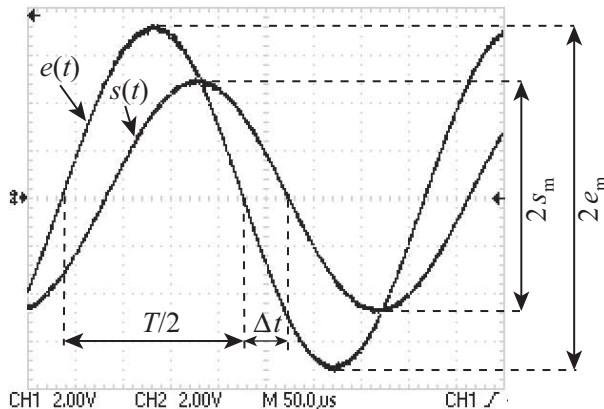
et la phase vaut $\varphi = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$.

À cette fréquence, les valeurs numériques théoriques sont :

$G \approx 0,70$ et $\varphi \approx -44^\circ \approx -0,77 \text{ rad}$.

1) Visualisation en mode bicourbe

En mode bicourbe, on observe à l'oscilloscope les tensions d'entrée et de sortie correspondant aux courbes en $X(t)$ du CH1 et $Y(t)$ du CH2.



La plupart des oscilloscopes possèdent maintenant des curseurs permettant de mesurer les amplitudes et les écarts temporels.

Pour optimiser les mesures, il faut utiliser les calibres permettant d'obtenir les courbes occupant (sans dépasser) le maximum de surface à l'écran. En effet, l'erreur de lecture correspond à « la moitié de la plus petite division » et plus la courbe est grande plus l'incertitude est faible. À noter que même sur les oscilloscopes donnant automatiquement la valeur des amplitudes (souvent crête à crête), celle-ci est plus précise avec un bon choix du calibre.

- **La mesure du gain**

Le signal d'entrée s'étale sur 7,2 carreaux crête à crête soit $2e_m \approx 7,2 \times 2 = 14,4 \text{ V}$ tandis que le signal de sortie correspond à 4,9 carreaux crête à crête, soit $2s_m \approx 4,9 \times 2 = 9,8 \text{ V}$.

Finalement, nous mesurons $G = \frac{9,8}{14,4} \approx 0,68$.

Chapitre 2 · Tracer un graphe

- **La mesure du déphasage**

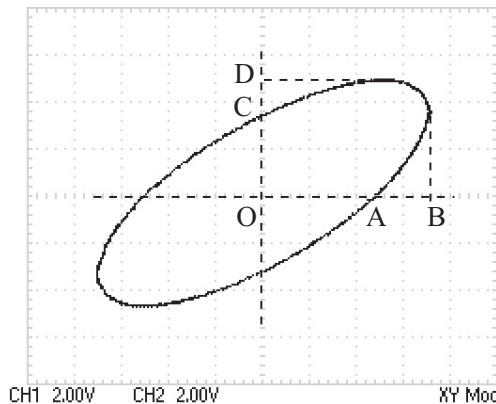
Sur l'oscillogramme précédent, la sortie est en retard par rapport à l'entrée. Une règle de trois donne $|\varphi| = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$ (en rad) donc, connaissant le signe du déphasage :

$$\varphi = -\omega \Delta t = -2\pi \frac{\Delta t}{T}$$

et l'application numérique conduit à $\varphi \approx -2\pi \frac{0,9}{7,5} \approx -0,75 \text{ rad} \approx -43^\circ$.

2) Mode Lissajous (ou XY)

La représentation en mode Lissajous, ou mode XY, correspond à une représentation paramétrique où la variable t a disparu. Pour deux tensions sinusoïdales, dans le cas d'un déphasage quelconque, la figure est une ellipse. Le signal de sortie est visualisé sur la voie Y et celui d'entrée sur la voie X.



- Pour le gain, $OD = s_m$ et $OB = e_m$ donc :

$$G = \frac{OD \text{ (en V)}}{OB \text{ (en V)}} \approx \frac{2,5 \times 2 \text{ (en V)}}{3,6 \times 2 \text{ (en V)}} \approx 0,70.$$

- Enfin le déphasage s'obtient grâce à $|\sin \varphi| = \frac{OA}{OB} = \frac{OC}{OD}$. La mesure donne donc $|\sin \varphi| \approx \frac{2,4}{3,6} \approx \frac{1,7}{2,5} \approx 0,68$ soit $\varphi \approx -43^\circ$.

Le mode XY est surtout (pour ne pas dire uniquement) intéressant lorsque le déphasage est proche de $\varphi \approx 0^\circ$ ou 180° . C'est d'ailleurs la méthode la plus précise pour repérer un déphasage nul entre le signal de sortie et celui de l'entrée comme c'est le cas, par exemple, à la fréquence centrale d'un filtre passe-bande d'ordre deux car on visualise une droite.

IV DIAGRAMME DE BODE

Un grand nombre de TP d'électronique demande l'étude d'un filtre linéaire et elle passe nécessairement par l'établissement du diagramme de Bode.

1) Définition

Soit la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = G(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$ avec $G(\omega)$ le gain et $\varphi(\omega)$ la phase (déphasage de la sortie par rapport à l'entrée).

Le diagramme de Bode consiste à tracer :

- Le gain en décibel $G_{dB} = 20 \log G(\omega)$ en fonction de $\log \omega$ (ramené à $\omega_0 = 1 \text{ rad s}^{-1}$), ou bien en fonction de $\log f$ (ramené à $f_0 = 1 \text{ Hz}$).
- Le déphasage $\varphi(\omega)$ en fonction de $\log \omega$ ou $\log f$ (ramené à $\omega_0 = 1 \text{ rad s}^{-1}$ ou $f_0 = 1 \text{ Hz}$).

2) Intérêts

Si l'on décompose une fonction de transfert en un produit de fonctions de transferts de degré inférieur ou égal à deux (possible mathématiquement) :

$$\underline{H}(j\omega) = \underline{H}_1 \times \underline{H}_2 \times \dots$$

où chaque fonction de transfert élémentaire \underline{H}_n s'écrit $\underline{H}_n = G_n e^{j\varphi_n}$ alors

$$G_{dB} = \sum_n G_{dB,n} \quad \text{et} \quad \varphi = \sum_n \varphi_n$$

Le diagramme de Bode s'obtient en sommant les diagrammes de Bode des fonctions de transfert élémentaire.

Pour cette raison, la connaissance des diagrammes de Bode des fonctions de transfert de degré un et deux suffit pour tracer le diagramme de Bode de n'importe quel quadripôle.

3) Méthode

Pour faire un diagramme de Bode à partir des mesures obtenues directement à l'oscilloscope, il faut préalablement :

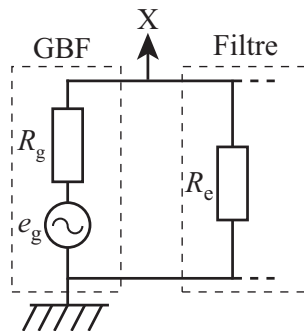
- Bien centrer les courbes (la position du zéro).
- Se placer en mode DC.

Si l'ensemble des mesures se fait au-delà 100 Hz, on peut alors se placer en mode AC (ce qui centre automatiquement les courbes).

Chapitre 2 · Tracer un graphe

a) Caractérisation rapide

- Choisir une fréquence moyenne (typiquement 1 kHz) et une tension d'entrée moyenne (environ 1 V).
- Régler convenablement l'oscilloscope afin de visualiser les tensions d'entrée et de sortie.
- Faire un balayage de fréquence sur plusieurs décades afin de :
 - déterminer la nature du filtre en repérant les fréquences « qui passent » et celles « qui ne passent pas ».
 - noter les zones de fréquences où l'amplitude varie de façon importante. C'est le cas par exemple pour un filtre passe-bande ou coupe-bande au voisinage de la fréquence centrale.
 - vérifier si le signal de sortie sature dans la région des fréquences où le gain est maximal, ce qui est fréquent dans un montage avec un ALI. Il faut alors diminuer l'amplitude d'entrée en utilisant éventuellement la fonction atténuateur du GBF.
 - vérifier également si le signal d'entrée reste constant, s'il se déforme ou s'il diminue. Cela arrive lorsque l'impédance d'entrée du filtre R_e est du même ordre que l'impédance du GBF R_g (soit 50Ω). En effet, la configuration du circuit est la suivante :



Le signal recueilli sur la voie X vaut : $\frac{R_e}{R_e + R_g} e_g$. Si $R_e \gg R_g$ on récupère effectivement la tension d'entrée e_g . Mais si ces deux valeurs de résistances sont voisines ou si $R_e < R_g$ alors l'amplitude du signal peut diminuer fortement. Il faut alors réaliser la mesure de l'amplitude du signal d'entrée et de sortie à chaque fois, ou bien intercaler un montage suiveur entre le GBF et le filtre.

Remarque

Il est impératif de ne pas se contenter de mesurer les tensions à l'aide de multimètres (ce qui d'ailleurs ne donne aucune information sur le déphasage) mais d'observer les signaux sur un oscilloscope. Cela permet de vérifier la forme du signal et d'avoir la certitude du fonctionnement linéaire du filtre : pas de saturations en courant ou en tension, ni d'effet de type « slew-rate ».

b) Caractérisation plus fine

- Dans le cas d'un filtre passe-bande ou coupe-bande, mesurer précisément la fréquence centrale f_0 en se plaçant en mode XY. À cette fréquence les tensions d'entrée et de sortie sont en phase (ou opposition de phase) et on doit observer un segment de droite au lieu de l'habituelle ellipse.
- Repérer également les fréquences de coupure définies par $G(f_c) = \frac{G_{\max}}{\sqrt{2}}$ en mesurant le gain G_{\max} à la résonance, en calculant $G_{\max}/\sqrt{2}$ puis en modifiant la fréquence de part et d'autre de f_0 pour déterminer les deux fréquences réalisant cette condition. Déterminer alors le facteur de qualité $Q = f_0/\Delta f_{3\text{dB}}$ ce qui permet d'avoir une idée quant à la sélectivité du filtre selon la valeur de Q obtenue.

c) Tracé du gain

Il faut effectuer des mesures afin d'obtenir des points régulièrement répartis sur le graphe qui est en échelle log. Le choix des gammes 1-2-5 et 8 c'est-à-dire 10-20-50 et 80 Hz puis 100-200-500 et 800 Hz et ainsi de suite, répond à cet objectif.

Rajouter ensuite des points là où la courbe varie rapidement. Enfin ne pas oublier de faire quelques mesures pour des valeurs « extrêmes » de la fréquence afin de pouvoir déterminer avec précision les pentes des asymptotes pour $f \rightarrow 0$ et $f \rightarrow \infty$ (> 100 kHz).

d) Tracé de la phase

Pour $0 < \varphi < 180^\circ$ ou π rad, le signal de sortie est en avance sur le signal d'entrée. Récapitulons ce que nous avons fait précédemment :

- repérer si la sortie est en avance ou en retard sur l'entrée afin de déterminer le signe du déphasage φ ;
- agrandir les courbes au maximum (calibres verticaux). Il est important que la pente soit grande lors du passage par zéro ;

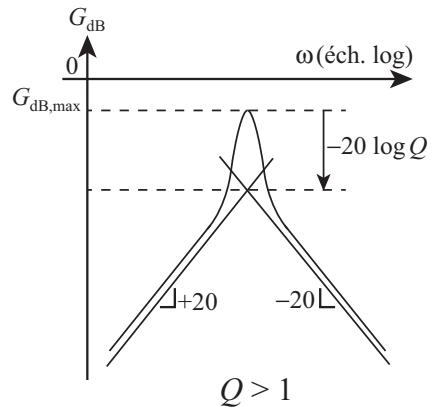
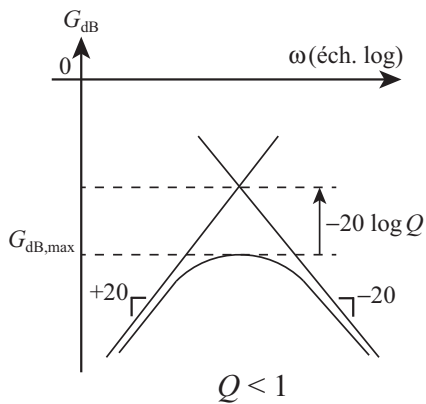
Chapitre 2 · Tracer un graphe

- augmenter horizontalement l'échelle des temps afin d'observer un peu plus qu'une demi-période ;
- mesurer l'écart temporel Δt entre les passages par zéro dans le même sens pour les deux courbes ;
- en déduire $|\varphi| = \omega \Delta t$ puis φ connaissant son signe.

e) Exploitation

Du diagramme de Bode on peut alors en déduire :

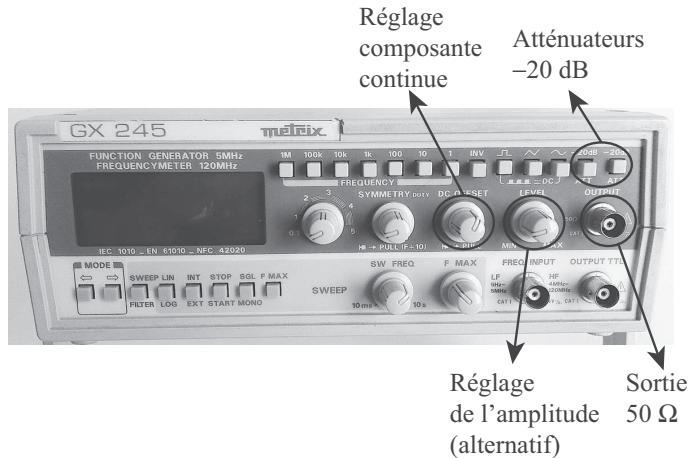
- Les pentes des asymptotes évaluées en dB/décade. Faire attention lorsqu'un énoncé demande d'évaluer la pente de ne pas donner comme résultat une valeur arrondie (+20 dB/dec par exemple), mais plutôt la valeur réelle mesurée (+19,1 dB/dec ou +21,4 dB/dec) ! Sinon cela donne la mauvaise impression de ne pas avoir réellement effectué la mesure.
- Les coordonnées du point d'intersection des asymptotes pour un filtre passe-bande par exemple. Cela permet de déterminer le facteur de qualité Q puisque la distance (algébrique) séparant le gain maximum de ce point d'intersection vaut $-20 \log Q$.



L'objectif de ce chapitre consiste à présenter brièvement quelques appareils usuels d'électronique souvent utilisés dans les TP.

I GÉNÉRATEUR BASSES FRÉQUENCES (GBF)

Il ne s'agit pas d'expliquer la totalité des fonctions d'un GBF, mais seulement d'indiquer quelques points parfois méconnus des candidats. La plupart des boutons et des touches sont intuitifs.



1) Sortie du GBF

La sortie du GBF à utiliser est celle ayant l'indication « Output 50 Ω » (voir TP « câble coaxial » pour en saisir l'utilité) et non pas la sortie « Output TTL » qui délivre un signal carré de 5 V d'amplitude pour les circuits logiques.

2) Ajouter une tension continue

Pour ajouter une tension continue au signal alternatif (sinus, créneau, triangle...) il faut tirer vers soi le bouton « Offset » sur certains GBF (comme celui présenté ci-dessus) puis le tourner pour avoir la valeur désirée. Il est conseillé de visualiser la tension de sortie directement à l'oscilloscope (en mode DC) avant de la placer à l'entrée d'un circuit électronique.