

*l'intègre*

**PRÉPAS SCIENTIFIQUES**

LAURENT **SALLEN**

DOMINIQUE **MEIER**

# Réussir les TP de **PHYSIQUE** aux concours

**2<sup>E</sup> ÉDITION**

DUNOD

## Conception et création de couverture : Atelier 3+

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.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

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.

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).



© Dunod, 2011, 2016

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-074676-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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

<b>Introduction</b>	<b>V</b>
<b>Description des épreuves aux concours</b>	<b>VII</b>

## PARTIE 1

---

### MÉTHODOLOGIE

<b>Chapitre 1. Notions d'incertitudes</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre 2. Tracer un graphe</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 3. Autour du matériel</b>	<b>14</b>
<b>Chapitre 4. Construire une alimentation stabilisée symétrique</b>	<b>23</b>
<b>Chapitre 5. Régler un goniomètre</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre 6. Régler un interféromètre de Michelson</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre 7. Quelques ordres de grandeur</b>	<b>42</b>

## PARTIE 2

---

### ÉLECTRICITÉ

<b>Chapitre 8. Étude de fonctions logiques</b>	<b>47</b>
<b>Chapitre 9. Élaboration d'une source de tension</b>	<b>56</b>
<b>Chapitre 10. Étude d'un tripôle non linéaire</b>	<b>68</b>
<b>Chapitre 11. Montage à transfert de charges ou pompe à diodes</b>	<b>81</b>
<b>Chapitre 12. Étude d'un circuit RC</b>	<b>92</b>
<b>Chapitre 13. Détermination d'un coefficient d'inductance mutuelle</b>	<b>102</b>

## Réussir les TP de PHYSIQUE aux concours

Chapitre 14. Défauts des ALI réels	111
Chapitre 15. Analyse spectrale d'un signal	127
Chapitre 16. Valeur absolue d'un signal	140
Chapitre 17. Oscillateur à pont de Wien	153
Chapitre 18. Oscillateur à réseau déphaseur	168
Chapitre 19. Résistance négative et application	178
Chapitre 20. Étude d'un générateur de signaux triangulaires	192
Chapitre 21. Modulation et démodulation d'amplitude	208

### PARTIE 3

---

#### OPTIQUE

Chapitre 22. Le microscope	223
Chapitre 23. Réalisation d'un système afocal	236
Chapitre 24. Biprisme de Fresnel	250
Chapitre 25. L'interféromètre de Michelson	260
Chapitre 26. Spectroscopie par prisme	275
Chapitre 27. Spectroscopie par réseaux	286

### PARTIE 4

---

#### ONDES ET CONVERSION DE PUISSANCE

Chapitre 28. Câble coaxial	297
Chapitre 29. Mesure de la célérité du son dans l'air	314
Chapitre 30. Étude d'un hacheur série et d'une machine à courant continu	325
Index	339

# 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 avons retenu des textes qui sont communs aux trois filières, soit plus d'une vingtaine

## Réussir les TP de PHYSIQUE aux concours

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 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 re-

## Réussir les TP de PHYSIQUE aux concours

prises 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.







# 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  $\Delta G$  absolue 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 ( $\Delta G$ ) et pour ce faire, deux approches sont souvent utilisées.

La première 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.

La seconde est statistique. On effectue, lorsque cela est possible, une série de mesures et on évalue 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  $\Delta G$ , directement liée à l'écart-type définit un intervalle dans lequel la valeur exacte se trouve avec une probabilité connue.

L'objectif est donc double :

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

## II MINIMISATION 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 maximale de lecture correspond à la moitié de la plus petite graduation (ce qui est la capacité d'appréciation d'un œil normal).

Par conséquent la lecture à l'oscilloscope doit se faire avec les courbes occupant la surface maximale de l'écran (sans déborder) en choisissant convenablement le calibre.

Ensuite l'incertitude réelle ou « type » peut s'évaluer selon la relation suivante :

$$\frac{\Delta_{\text{const.}}}{\sqrt{12}}$$

où  $\Delta_{\text{const.}}$  représente l'incertitude donnée par le constructeur de l'appareil. Pour les appareils analogiques  $\Delta_{\text{const.}}$  représente une division.

### 2) 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). Elle est de l'ordre du pourcent par exemple pour un multimètre Metrix. On obtient l'incertitude réelle en divisant l'incertitude maximale (donnée par le constructeur) par  $\sqrt{3}$ .

Ainsi si une boîte à décades indique une incertitude maximale de 5 % et que l'indication de la boîte indique 100  $\Omega$ , alors l'erreur maximale est de 5  $\Omega$  et l'erreur réelle vaut 3  $\Omega$ . Ainsi l'incertitude réelle n'est que de 3 %.

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 valeur la plus grande 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 CALCULS DE L'INCERTITUDE

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

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

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

## IV. À partir d'une régression linéaire

L'incertitude 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 :

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

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

## IV À PARTIR D'UNE RÉGRESSION LINÉAIRE

Comme cela est précisé dans le chapitre intitulé *Tracer un graphe*, 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 à ces incertitudes.

## V EXPRESSION DES RÉSULTATS

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

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

## Chapitre 1 • Notions d'incertitudes

en faisant attention au nombre de chiffres significatifs

- $\Delta G$  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 :

$$R = 102,13 \pm 11 \Omega (11 \%)$$

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

$$R = 102 \pm 11 \Omega (11 \%)$$

**Conséquence** : il ne faut pas recopier la valeur numérique affichée par un appareil numérique sans porter sur ce résultat un regard critique. Cet appareil présente lui aussi ses 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.

# TRACER UN GRAPHE

# 2

## 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).

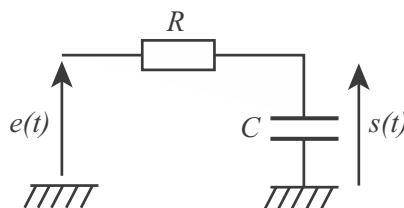
## II VÉRIFICATION D'UNE LOI

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  $\alpha$  donné, ou bien s'il faut déterminer  $\alpha$  il faut tracer la courbe  $\ln y = f(\ln x)$  qui est une droite de pente  $\alpha$ . 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 :



## Chapitre 2 • Tracer un graphe

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 :

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

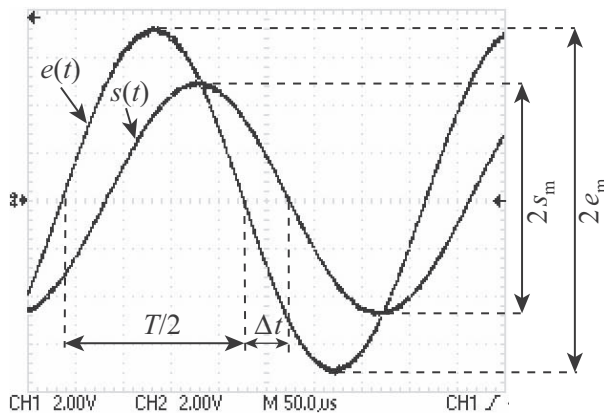
et la phase vaut  $\varphi = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$ .

À cette fréquence, les valeurs numériques théoriques sont :

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

### 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  $2s_m \approx 4,9 \times 2 = 9,8 \text{ V}$ .

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



• **La mesure du déphasage**

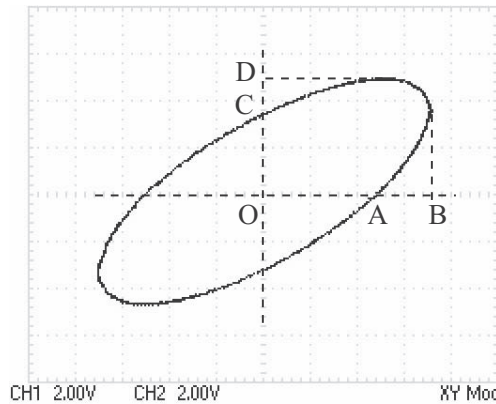
Sur l'oscillogramme précédent, la sortie est en retard par rapport à l'entrée. Une règle de trois donne  $|\varphi| = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$  (en rad) donc, connaissant le signe du déphasage :

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

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  $180^\circ$ . 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

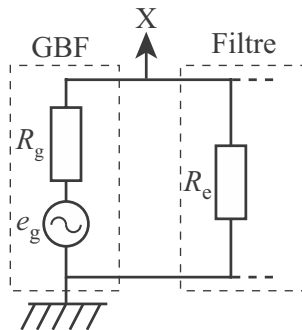
Pour faire un diagramme de Bode à partir des mesures obtenues directement à l'oscilloscope, il faut préalablement :

- 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).

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 50  $\Omega$ ). 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

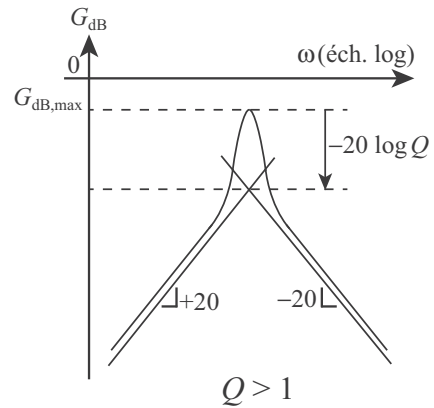
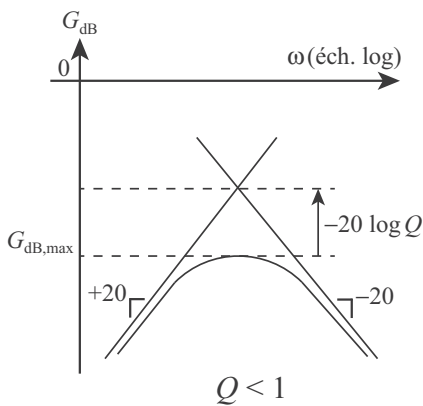
Pour  $0 < \varphi < 180^\circ$  ou  $\pi$  rad, le signal de sortie est en avance sur le signal d'entrée. Récapitulons ce que nous avons fait précédemment :

- repérer si la sortie est en avance ou en retard sur l'entrée afin de déterminer le signe du déphasage  $\varphi$  ;
- agrandir les courbes au maximum (calibres verticaux). Il est important que la pente soit grande lors du passage par zéro ;
- augmenter horizontalement l'échelle des temps afin d'observer un peu plus qu'une demi-période ;
- mesurer l'écart temporel  $\Delta t$  entre les passages par zéro dans le même sens pour les deux courbes ;
- en déduire  $|\varphi| = \omega \Delta t$  puis  $\varphi$  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  $-20 \log Q$ .



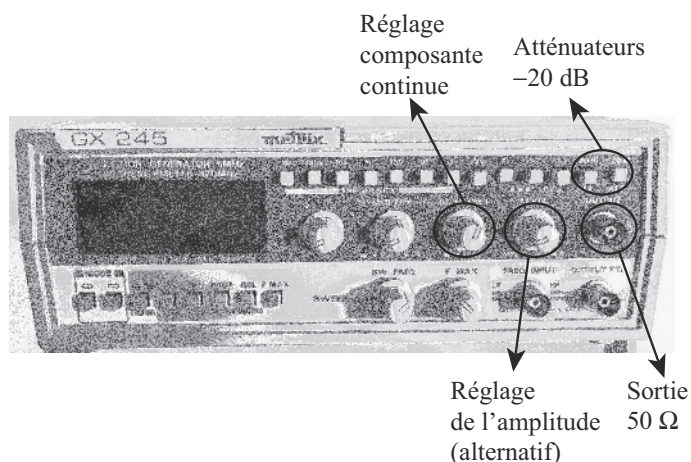
# 3

## AUTOUR DU MATÉRIEL

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.

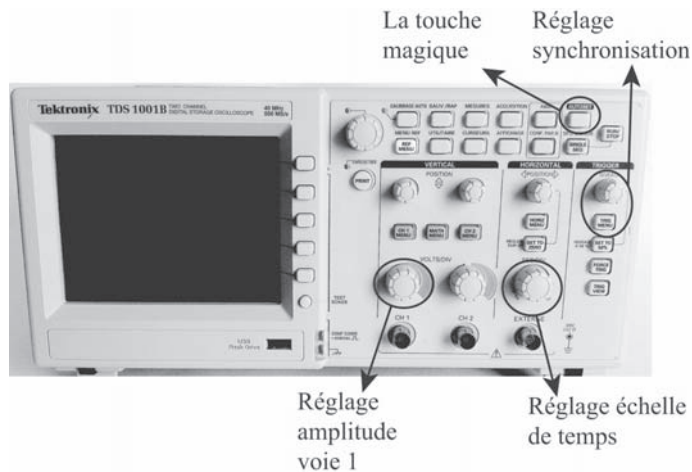
#### 2) Ajouter une tension continue

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.

### 3) Atténuation

Lorsqu'un circuit présente une résonance forte ou un fort coefficient d'amplification, pour rester dans le domaine linéaire du circuit, il faut baisser l'amplitude de la tension d'alimentation. Pour le faire tout en restant précis, le GBF possède une fonction « -20 dB » (certains GBF en ont même deux) dont le rôle est de diviser par 10 l'amplitude du signal : ainsi en actionnant le bouton d'amplitude du signal, celle-ci varie de 0 à 1 V environ au lieu de l'habituelle gamme de tensions de 0 à 10 V environ.

## II OSCILLOSCOPE



### 1) La synchronisation

La synchronisation permet l'observation d'un signal périodique à l'oscilloscope. Sans celle-ci c'est un signal instable qui défilerait sans cesse sur l'écran. Il faut donc indiquer à quel endroit (à quelle valeur du signal) il convient de démarrer la courbe (à gauche de l'écran par exemple). Pour stabiliser le signal il faut aller dans le menu « Trigger » de l'oscilloscope puis :

- Faire le bon choix de la voie par rapport à laquelle on synchronise : c'est la « Source ».
- Choisir le niveau de synchronisation (c'est la fonction « Level » du Trigger). Une petite flèche indique généralement sur l'écran ce niveau au moment du réglage. Bien sûr, il est impératif que cette valeur de tension soit atteinte par le signal que l'on cherche à observer.
- Choisir le sens de variation du signal (montant ou descendant) : parfois appelé « Slope » en anglais.

Ce qu'il ne faut pas faire :

- observer un signal sur la voie 1 et synchroniser sur la voie 2 où aucun signal n'est présent ;
- essayer d'observer un signal d'amplitude trop faible par rapport au niveau du Trigger (signal instable) ;
- synchroniser sur la porteuse lors de l'observation d'un signal modulé en amplitude. Il faut dans ce cas synchroniser sur le signal modulant, celui que l'on cherche à transmettre, pour stabiliser la courbe.

## 2) AC/DC

### a) DC

Le mode DC (parfois nommé CC sur certains oscilloscopes) signifie « *Direct Current* ». Dans ce cas le signal observé sur l'écran est exactement l'image du signal envoyé. Si  $e(t)$  est le signal que l'on cherche à observer et  $X(t)$  celui que l'on observe à l'oscilloscope alors :

$$X(t) = e(t)$$

### b) AC

Le mode AC (parfois nommé CA) signifie « *Alternative Current* ». Dans ce cas la tension  $e(t)$  passe par un filtre passe-haut de fréquence de coupure  $f_C \approx 10$  Hz qui élimine la composante continue et modifie les signaux de fréquences voisines de  $f_C$ . Pour un signal dont la fréquence est supérieure à 100 Hz c'est-à-dire nettement supérieure à  $f_C$ , cela revient simplement à supprimer la composante continue et donc :

$$X(t) = e(t) - \langle e(t) \rangle$$

Nous insistons sur le fait que la phrase maintes fois entendue « AC supprime la composante continue » ne se justifie qu'au-delà d'une centaine d'Hertz. En deçà de cette valeur, le signal que l'on souhaite observer est déformé par le filtre.

**Conclusion :** toujours commencer par utiliser la position DC afin de voir la totalité du signal.

Il n'est pas rare de voir des candidats s'étonner de ne rien observer à l'oscilloscope alors que le signal est continu et que le mode AC est enclenché.

Par ailleurs, il peut arriver qu'une erreur de connections dans un montage implique la saturation d'un ALI. Le mode DC permet immédiatement de repérer ce type de problème par l'observation d'un signal continu à  $\approx \pm 15$  V.



#### 3) La touche AUTOSET

La touche préférée des élèves... C'est la touche magique et l'on pourrait aisément traduire « Autoreset » par « *Au secours, je ne sais pas comment régler cet oscilloscope !* ». Pour cette raison, l'utilisation abusive de cette touche par les candidats lors d'un TP est souvent mal vue des examinateurs.

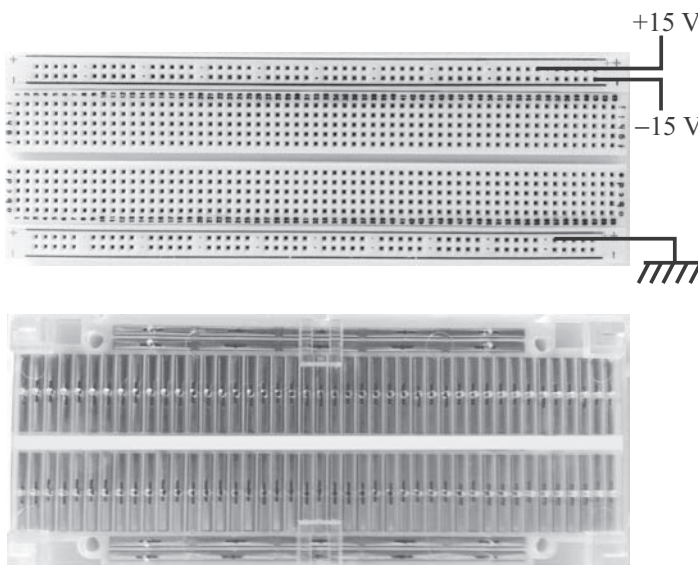
Une autre raison pour éviter son utilisation : c'est l'oscilloscope tout seul qui fait les réglages, sans forcément savoir ce que l'on cherche à mesurer. Par ailleurs, il bascule souvent en mode AC, ce qui peut provoquer des surprises désagréables dans la suite du TP.

#### 4) Réglages

Comme cela est expliqué dans la partie « Graphes », l'échelle de temps doit être réglée de façon à obtenir une période à l'écran (pour un signal périodique) et le réglage de l'amplitude doit permettre d'observer une courbe la plus grande possible sans déborder de l'écran.

## III PLAQUETTE

La plupart des TP de concours sont déjà montés sur plaquette et les candidats n'ont qu'à placer des cavaliers pour relier les différents blocs entre eux. Mais, pour certains TP, il arrive parfois que le candidat doive faire lui-même le montage sur plaquette dont l'utilisation n'est pas évidente la première fois...



Vu de dessous, on peut observer les lignes équipotentielles. Les lignes verticales sont séparées en deux au milieu de la plaquette : sur une même verticale le potentiel du haut diffère du potentiel du bas. Il existe également 4 lignes horizontales que l'on réserve habituellement à la masse et aux alimentations de l'ALI (lorsque le montage comporte plusieurs ALI).

## IV AMPLIFICATEUR LINÉAIRE INTÉGRÉ (ALI)

L'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) est un composant électronique permettant d'amplifier la différence de potentiel entre ses deux entrées.

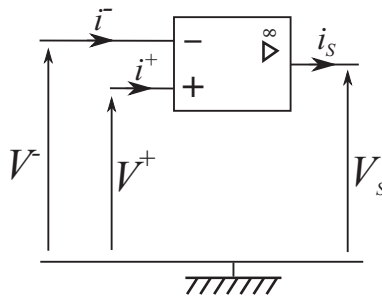
L'ALI est étudié de façon approfondie en filière PSI ; il est vu succinctement en filière PC dans le cadre de l'oscillateur à pont de Wien, et n'est pas au programme de la filière MP (sauf en TP).

L'ALI est encore appelé amplificateur opérationnel (AO).

### 1) Présentation

L'ALI présente plusieurs bornes de connexion dont trois principales :

- deux entrées ;  $E^+$  dite entrée non inverseuse et  $E^-$  dite entrée inverseuse. On note  $V^+$  et  $V^-$  les potentiels de ces deux entrées par rapport à la masse et  $i^+$  et  $i^-$  les courants d'entrée.
- une sortie S. On appelle  $V_S$  la tension de sortie et  $i_S$  le courant de sortie.



Il s'agit d'un composant actif, c'est-à-dire nécessitant une source d'énergie (alimentations  $\pm 15$  V). Il est impératif d'alimenter ce composant avant le reste du circuit.

On appelle tension différentielle la grandeur  $\varepsilon = V^+ - V^-$ .

### 2) ALI idéal ou parfait

Un ALI idéal possède les caractéristiques suivantes :

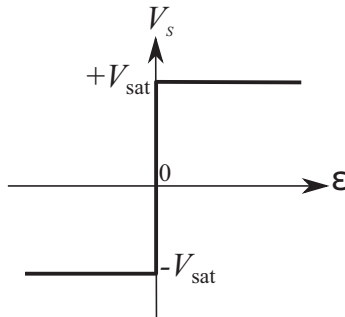
- Les courants d'entrée  $i^+$  et  $i^-$  sont nuls (ce qui revient à dire que son impédance d'entrée est infinie).

## IV. Amplificateur linéaire intégré (ALI)

- En régime linéaire, on a égalité des deux tensions d'entrée :  $V^+ = V^-$  ou encore  $\varepsilon = 0$  ;
- Lorsque l'ALI ne fonctionne pas en régime linéaire, il fonctionne alors en régime saturé et on a :

$$V_S = +V_{\text{sat}} \text{ si } \varepsilon > 0$$

$$V_S = -V_{\text{sat}} \text{ si } \varepsilon < 0$$



### Remarque

Comme il est important de connaître les deux tensions d'entrée pour les comparer ou les évaluer (en cas de fonctionnement linéaire), on aura intérêt à appliquer la loi des nœuds en termes de potentiels (le théorème de Millmann) sur chacune des entrées.

## 3) Défauts et limitations

### a) Limitations

L'ALI a trois limitations :

- **en tension** : la tension de sortie ne peut pas dépasser, en valeur absolue, une tension de saturation  $V_{\text{sat}} \approx 15 \text{ V}$  ;
- **en courant** : le courant de sortie ne peut excéder la valeur  $i_{S,\text{Max}} \approx 20 \text{ mA}$  ;
- **en vitesse** : la tension de sortie ne peut pas varier trop rapidement et l'on a  $\left| \frac{dV_S}{dt} \right| \leq \sigma \approx 1 \text{ à } 10 \text{ V } \mu\text{s}^{-1}$  où  $\sigma$  est appelé vitesse de balayage ou *slew-rate*.

### b) Défauts

L'ALI présente plusieurs défauts, notamment :

- un gain non infini dépendant de la pulsation : on a ainsi la relation :

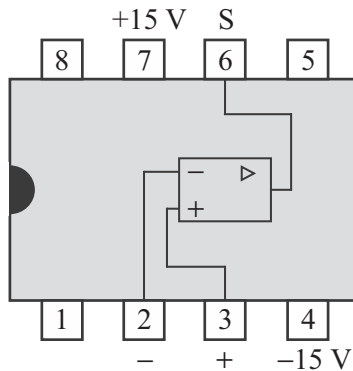
$$V_S = \mu \varepsilon \text{ avec } \underline{\mu}(j\omega) = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_C}}$$

## Chapitre 3 • Autour du matériel

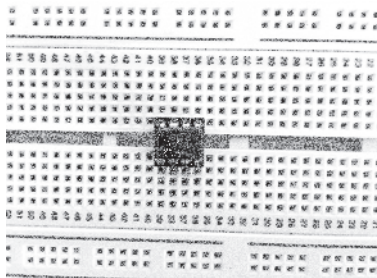
- $\mu_0$  est le gain statique et vaut  $\mu_0 \approx 10^5$
- $\omega_C$  est la pulsation de coupure et  $\omega_C \approx 100 \text{ rad s}^{-1}$
- Des impédances d'entrées non infinies ce qui implique des courants d'entrée non nuls (de l'ordre 10 nA ou moins suivant le modèle).

### 4) Branchements

L'ALI possède 8 pattes repérables par un demi-cercle ou un point sur le circuit intégré. Les branchements à effectuer sont représentés ci-dessous (schéma donné le jour du concours) :



Sur la plaquette précédente, l'ALI doit être disposé de façon à ce que les 8 pattes aient un potentiel différent :



Ne pas oublier d'alimenter d'abord l'ALI puis le circuit et à la fin du TP, d'éteindre en premier le GBF puis les alimentations  $\pm 15 \text{ V}$  de l'ALI.

## V LA DIODE

La diode est un composant non linéaire souvent utilisé en électronique et faisant l'objet de nombreux TP de concours.