

Erreurs et incertitudes en Physique-Chimie.

1. Les objectifs à atteindre.

1.1. Les mesures sont entachées d'erreur.

Pour comparer les différents objets qui nous entourent, les physiciens définissent pour chacun d'eux des caractéristiques multiples : longueur, masse, résistance, etc... qu'ils appellent grandeurs physiques.

Mesurer une grandeur G , c'est chercher combien de fois elle contient une grandeur G_0 , de même espèce choisie une fois pour toute comme unité. On fait ainsi correspondre à cette grandeur un nombre n qui s'appelle sa mesure dans l'unité choisie. On écrit symboliquement : $G = n G_0$.

Pour que ceci soit réalisable, c'est-à-dire pour qu'une espèce de grandeur soit mesurable, il faut pouvoir définir expérimentalement :

- ou bien l'égalité et la somme
- ou bien directement le rapport de deux grandeurs de cette espèce et une origine.

Quelques définitions relatives aux mesures :

- **mesure directe** d'une grandeur : la mesure s'obtient en comparant directement la grandeur à une représentation matérielle de l'unité (ou d'un multiple, ou sous-multiple). Exemples : mesures usuelles des longueurs (règle graduée), des masses (balances à plateaux).
- **mesure indirecte** d'une grandeur : la mesure s'obtient par un calcul à partir des mesures de grandeur obtenues directement. Exemples : surface d'un rectangle calculée à partir de la mesure de ses côtés, vitesse moyenne à partir de $v = d/t$.
- **mesure relative** d'une grandeur : s'obtient en comparant un effet de cette grandeur à celui de la grandeur unité. Exemple : mesure de l'intensité d'un courant à l'aide d'un ampèremètre (effet observé : déviation de l'aiguille).
- **mesure absolue** d'une grandeur non mécanique : c'est une mesure indirecte, le résultat s'exprimant en fonction des mesures de grandeurs mécaniques.

Savoir qu'une mesure physique, aussi précise qu'elle soit, comporte toujours une part d'incertitude est un incontestable élément de la culture scientifique.

Pour obtenir les mesures des grandeurs étudiées, on utilise des appareils de mesure. Quelles en sont les qualités ?

Les deux principales qualités sont :

- **la fidélité** : un appareil de mesure est fidèle si, mesurant plusieurs fois la même grandeur, il indique le même résultat. Cette qualité conditionne toutes les autres ; c'est elle qui « fait » le prix d'un appareil.
- **la sensibilité** : c'est l'aptitude de l'appareil à déceler une petite variation de la grandeur à mesurer (la valeur initiale pouvant être nulle). Un appareil de mesure déformable est d'autant plus sensible qu'il se déforme plus fortement lors de la mesure d'une grandeur déterminée. Si, pour obtenir la mesure x , on observe n , on caractérise la sensibilité par la grandeur : $\sigma = \frac{dn}{dx}$. Les constructeurs d'appareils électriques caractérisent la sensibilité de ces appareils par $1/\sigma$, ce qui n'est pas grave mais il nomme $1/\sigma$ « sensibilité », ce qui est regrettable car un appareil est d'autant plus sensible que $1/\sigma$ est petit.

Autres qualités :

- **la justesse** : correspond à un étalonnage (une graduation) correct : à un moment ou un autre on doit pouvoir vérifier cet étalonnage et son lien avec les grandeurs du système international. Le défaut de justesse entraîne des erreurs systématiques (ainsi la mesure d'une longueur à l'aide d'une règle dont ses graduations sont trop rapprochées donnera toujours un résultat trop fort).
- **la rapidité** : (qualité importante pour l'étude des phénomènes variables dans le temps) caractérisée souvent par un « temps de réponse ».
- **la finesse** : l'appareil doit perturber le moins possible la grandeur étudiée au cours de la mesure (exemple : un thermomètre à dilatation de liquide doit avoir une faible capacité calorifique pour que la température du corps en contact avec le thermomètre ne soit pas trop différente de celle qu'il avait avant le contact). La finesse devient une qualité très importante pour les mesures faites à l'échelle des particules.

1.2. Présentation des résultats de mesure.

Toute comparaison entre deux grandeurs s'accompagne inévitablement d'erreurs. La mesure d'une grandeur est toujours incertaine, à cause :

- des erreurs commises dans la mesure,
- de l'imprécision dans la définition d'une grandeur (exemple : longueur d'une table).

On distingue :

- **les erreurs systématiques** : dues aux défauts de justesse des appareils, ou à la méthode utilisée (défaut d'étalonnage, variation intempestive d'un paramètre physique). Par exemple la mesure d'une résistance à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre branché en longue dérivation donnera un résultat plus fort que la réalité. Les erreurs systématiques peuvent être corrigées ou réduites autant que l'on veut (il suffit d'y mettre le prix !).
- **les erreurs fortuites ou accidentelles ou aléatoires** : dues aux défauts de fidélité des appareils, à l'imperfection des sens de l'opérateur. Elles ont lieu « tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre » et ne peuvent être corrigées. On peut les réduire mais non les supprimer.

Quelques définitions :

si X est la valeur « vraie » de la mesure d'une grandeur G (X est toujours inconnue) et x , la valeur de la mesure obtenue expérimentalement, alors on appelle :

erreur absolue : $\varepsilon_g = x - X$

erreur relative : ε_g/x

le résultat de la mesure de G doit être donné sous la forme « $x \pm \Delta x$ », où Δx est l'incertitude absolue sur la

mesure de G , telle que la probabilité P ou encore **niveau de confiance**, pour que l'intervalle $[x - \Delta x, x + \Delta x]$, appelé **intervalle de confiance**, contienne effectivement X soit assez élevée (typiquement $P = 0,95$).

Ce point de vue, qui considère les différentes mesures indépendantes x_i de G comme les valeurs successives prises par la **variable aléatoire** x (il s'agit donc d'erreurs aléatoires), se heurte cependant à une difficulté importante : pour affecter à une incertitude Δx un niveau de confiance P donné, il faut connaître la loi de répartition des mesures x_i autour de X , encore appelée densité de probabilité. On suppose en général qu'il s'agit d'une répartition gaussienne, que chacun connaît au moins approximativement et qu'on appelle la loi normale de Gauss ; cette supposition est en général légitime et la loi de répartition a été prouvée dans de très nombreux cas (validité : causes d'erreurs multiples et d'importance comparable). Il faut savoir qu'en matière d'incertitudes de mesures, les méthodes statistiques normalisées se sont imposées au début des années 90, d'abord dans les laboratoires de métrologie puis dans les entreprises, avec l'installation des normes d'assurance qualité ISO 9000.

1.3. Les chiffres significatifs.

L'écriture « $x \pm \Delta x$ » suppose que l'on choisisse les chiffres significatifs qui expriment x et Δx .

Il existe des critères quantitatifs et statistiques pour choisir le nombre de chiffres significatifs, mais les consignes données il y a longtemps par le grand physicien G. Bruhat, dans son traité de mécanique, restent tout à fait d'actualité : après avoir trouvé, par exemple, pour l'indice d'un prisme $n = 1,50944 \ 0,00039$, il recommande d'écrire $n = 1,5094 \ 0,0004$. « L'erreur étant de plusieurs unités sur la quatrième décimale, il est inutile, disait-il, de conserver la cinquième, mais il faut garder la quatrième car en la supprimant on introduirait une erreur d'écriture parfaitement inutile, comparable à l'erreur expérimentale ».

2. Evaluation de l'incertitude.

2.1. Recherche des sources d'erreur.

Les erreurs susceptibles d'entacher la mesure d'une grandeur sont multiples et la recherche de leurs causes peut être passionnante :

- l'environnement de la grandeur mesurée, qui peut être influencée par d'autres grandeurs ;
- l'équipement de mesure ;
- la méthode utilisée ;
- la qualification des opérateurs effectuant la mesure.

La dispersion observée des résultats de mesures d'une même grandeur sera un bon point de départ pour essayer de les recenser. Il faudra cependant veiller aux erreurs systématiques. En effet, telle erreur systématique qui est indécélable dans une mesure isolée où les causes d'erreurs sont nombreuses peut fort bien apparaître en faisant la moyenne d'une dizaine de mesures indépendantes où les erreurs de type aléatoire se compensent partiellement, tandis que les erreurs systématiques se conservent.

2.2. Le calcul d'incertitude classique « des petites variations », ses limitations.

Il s'agit d'un calcul *a priori*, applicable uniquement dans les situations suivantes :

- à une mesure *isolée, unique* d'une grandeur physique donnée
- quand on veut définir à l'avance l'incidence de telle mesure particulière d'une grandeur sur le résultat final (mesures indirectes).

Supposons que la mesure x d'une grandeur G se calcule à partir de mesures a, b, c d'autres grandeurs, ces mesures étant effectuées *indépendamment* les unes des autres, soit $x = f(a, b, c)$, et ces mesures ont donné les résultats suivants : $a = a \pm \Delta a$ $b = b_0 \pm \Delta b$ $c = c \pm \Delta c$ (voir §3.1. pour l'estimation de Δa)

Le problème consiste à estimer Δx , souvent considérée comme une limite supérieure de la valeur absolue de ϵ_x (erreur absolue), ce qui est abusif en général, voir faux, car les incertitudes sont estimées de manière très empirique, sans pouvoir préciser le niveau de confiance accordé à chaque incertitude.

Néanmoins la règle pratique pour calculer l'incertitude (ou en tout cas l'ordre de grandeur) sur la mesure indirecte d'une grandeur est la suivante :

1. s'assurer que la mesure x est exprimée en fonctions de mesures indépendantes a, b, c .
2. écrire les relations liant les erreurs, en assimilant les erreurs supposées de faible amplitude aux différentielles, et considérant les dérivées partielles à des constantes :

$$\epsilon_x \approx f'_a(a_0, b_0, c_0)\epsilon_a + f'_b(a_0, b_0, c_0)\epsilon_b + f'_c(a_0, b_0, c_0)\epsilon_c$$
 ($da \approx \epsilon_a = a_0 - A$)
 en particulier : si $x = a + b - c$, $\epsilon_x = \epsilon_a + \epsilon_b - \epsilon_c$ (théorème des erreurs absolues)
 si $x = a^\alpha b^\beta c^\gamma$, $\frac{\epsilon_x}{x} = \alpha \frac{\epsilon_a}{a} + \beta \frac{\epsilon_b}{b} + \gamma \frac{\epsilon_c}{c}$ (théorème des erreurs relatives)
3. regrouper les termes portant sur les mêmes erreurs.
4. « passer aux incertitudes », c'est-à-dire remplacer les erreurs par les incertitudes et leurs coefficients par leurs valeurs absolues :

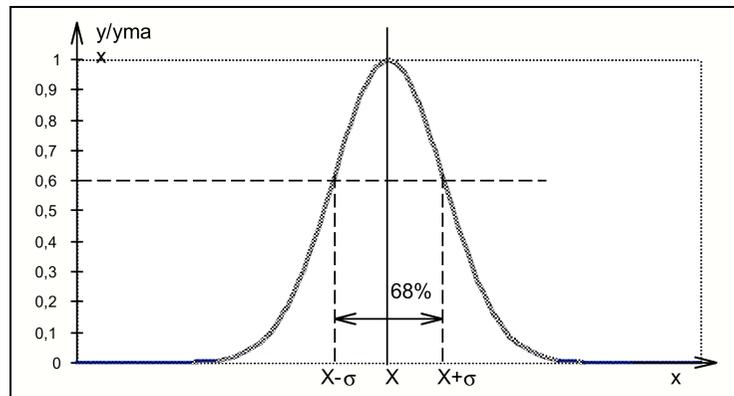
$$\Delta x \approx |f'_a(a_0, b_0, c_0)|\Delta a + |f'_b(a_0, b_0, c_0)|\Delta b + |f'_c(a_0, b_0, c_0)|\Delta c$$
5. A.N.

2.3. Le calcul statistique.

L'interprétation statistique s'impose dès que l'on possède *plus de deux mesures d'une grandeur physique* donnée. C'est un calcul *a posteriori* qui permet de tirer profit des informations contenues dans une série de mesures indépendantes d'une même grandeur.

Soit une grandeur physique dont la valeur vraie est X et dont la mesure a donné la valeur x , uniquement entachée d'erreur accidentelle ou aléatoire. En *absence d'erreur systématique*, un *très grand nombre* de mesures se répartissent suivant une courbe dite de Gauss représentant donc le nombre de mesures y (fréquence d'obtention d'une valeur) ayant une valeur donnée x pour différentes valeurs de x : il s'agit d'une loi de probabilité. On trouve ci-après l'allure de la courbe y/y_{max} en fonction de x .

avec $\frac{y}{y_{max}} = \exp\left[-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}\right]$ et $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n}$



On définit ainsi la valeur moyenne qui tend vers X pour un nombre infini de mesure et l'écart-type, ou moyenne quadratique σ . Si on fait une mesure dont le résultat est x et si on peut dire qu'on a une probabilité p pour que la vraie valeur soit dans l'intervalle $X-b\sigma$ et $X+b\sigma$, on dira que *l'intervalle de confiance est* $X-b\sigma, X+b\sigma$ avec le niveau de confiance p ; on utilise souvent le niveau de confiance 0,95 ce qui signifie qu'il y a 95 chances sur 100 pour que la mesure soit dans l'intervalle ci-dessus.

Intervalle de confiance	niveau de confiance
$x = m \pm \sigma$	68 %
$x = m \pm 1,96 \sigma$	95 %
$x = m \pm 2 \sigma$	95,4 %
$x = m \pm 2,57 \sigma$	99 %
$x = m \pm 3 \sigma$	99,7 %

On va utiliser cette idée pour donner une estimation de la moyenne X et de son incertitude.

a) Méthode basée sur la loi de Student.

On n'effectue bien sûr jamais un nombre infini de mesures, mais un nombre *fini* n , il faut donc trouver des *estimateurs* m et s^2 des valeurs X et σ^2 de la distribution théorique de Gauss. Après *élimination* éventuelle de résultats *manifestement aberrants*, on peut montrer que, pour n mesures faites, les meilleurs estimateurs sont :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{et} \quad s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n-1}$$

alors l'intervalle de confiance auquel

appartient X est estimé par : $m - t \frac{s}{\sqrt{n}} \leq X \leq m + t \frac{s}{\sqrt{n}}$, où t est une variable aléatoire dépendant de n et du niveau de confiance suivant la loi de Student ci-dessous :

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	40	50	∞
$t_{0,95}$	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09	2,06	2,04	2,02	2,01	1,96
$t_{0,99}$	63,7	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,11	3,01	2,95	2,90	2,86	2,80	2,76	2,70	2,68	2,58

Alors $\Delta x = t \frac{s}{\sqrt{n}}$ est une estimation de l'incertitude de la mesure de X .

b) Méthode basée sur l'étendue des mesures.

En fait, c'est la même méthode que la précédente, mais l'estimation de l'écart-type, au lieu de se faire à partir du coefficient s , est effectuée à partir de *l'étendue r des mesures* (différence entre la valeur maximale x_M et la valeur minimale x_m). Si q est le coefficient qui dépend du nombre de mesure conservées, et du niveau de confiance désiré, on a : $m - q.r \leq X \leq m + q.r$ avec $r = x_M - x_m$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18
$q_{0,95}$	6,35	1,30	0,72	0,51	0,40	0,33	0,29	0,26	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14
$q_{0,99}$	31,8	3,01	1,32	0,84	0,63	0,51	0,43	0,37	0,33	0,28	0,24	0,21	0,19

Bien que moins précise (pour un niveau de confiance, elle conduit généralement à des intervalles de confiance légèrement plus grand que précédemment), cette méthode est néanmoins acceptée par l'A.F.N.O.R. et est plus facile à mettre en œuvre en T.P.

3. Exemples d'application.

3.1. Cas de mesure unique.

Pour l'évaluation de l'incertitude, il faut se placer dans le cas le plus défavorable où toutes les incertitudes s'ajoutent.

Incertitude de lecture : voir si on peut apprécier la moitié, ou une fraction plus petite encore de la division (dépend de la qualité des graduations).

Incertitude due à un appareil à aiguille de *classe C*, utilisé sur un calibre comportant d_m divisions. L'incertitude sur une lecture d est indépendante de d et vaut : $\Delta d = d_m C/100$.

3.2. A partir d'un graphique : « méthode des droites extrêmes ».

Soient par exemple deux grandeurs, X et Y , liées par la relation : $Y^2 = A X$, où on peut choisir X avec une très bonne précision, et on pointe le Y correspondant avec une incertitude ΔY . Le résultat final, soit le coefficient A , est déterminé à partir d'une série de mesures par la pente la mieux ajustées aux points (X_i, Y_i) , par une régression linéaire, par exemple (voir TD informatique associé).

On rencontre souvent le calcul suivant : $2 \Delta Y/Y = \Delta A/A$, utilisant une seule mesure, qui n'est pas valable dans le cas de mesures multiples.

Il faut savoir faire un **traitement visuel des données** quand cela est possible, sans obligatoirement mettre en œuvre des outils sophistiqués. En effet les **barres d'erreur** (qui peuvent être la représentation de 2 écart-type si on a fait plusieurs mesures) sont représentables graphiquement, excepté les points visiblement aberrants s'il y en a, et on peut estimer grossièrement les incertitudes sur la pente et l'ordonnée à l'origine en traçant deux « **droites de confiance extrêmes** », au-delà desquelles il paraît peu raisonnable de penser que la meilleure droite cherchée puisse se trouver. Cette façon d'opérer permet aussi de tenir compte du poids des différents points en fonction de leur incertitude.

L'utilisation du graphique, très importante, permet aussi de valider ou de modifier l'estimation initiale de ΔY .

3.3. Détermination expérimentale des erreurs aléatoires.

Elles peuvent être évaluées par le « **bruit** » observé sur les courbes expérimentales et peuvent varier d'un point à l'autre.

4. Les unités.

4.1. Unités fondamentales et unités dérivées d'un système d'unités.

Quand on construit un système d'unités, la présence de coefficients de proportionnalité dans toutes les relations exprimant des théorèmes mathématiques (exemple : $S_{\text{rectangle}} = k LL'$) ou des lois physiques (exemple : $P = k' RI^2$) est une complication souvent inutile puisque les grandeurs peuvent être choisies arbitrairement. On peut supprimer un grand nombre de ces coefficients (mais pas tous) en renonçant à l'arbitraire du choix de l'unité de mesure d'une des grandeurs dans une relation où elle intervient. Par exemple, si on écrit $S_{\text{rectangle}} = LL'$, on doit prendre comme unité de surface celle d'un rectangle dont les côtés ont une longueur unité (c' est un carré). On dira que l'unité de surface est une unité dérivée (de l'unité de longueur). En procédant ainsi pour les différents théorèmes mathématiques et les lois physiques, on peut faire « dériver » toutes les unités à partir d'un certain nombre minimum d'entre elles choisies arbitrairement qu'on appelle « unités fondamentales ». Un tel système d'unités est dit cohérent.

Exemples :

- pour le système international (S.I.) les unités fondamentales sont :

le mètre unité :	<i>m</i>	dimension :	<i>L</i> (longueur)
le kilogramme	<i>kg</i>		<i>M</i> (masse)
la seconde	<i>s</i>		<i>T</i> (durée)
l'ampère	<i>A</i>		<i>I</i> (intensité de courant électrique)
le kelvin	<i>K</i>		Θ (température thermodynamique)
la candela	<i>cd</i>		<i>J</i> (intensité lumineuse)
la mole	<i>mol</i>		<i>N</i> (quantité de matière)

- pour les systèmes C.G.S. (en cours d'abandon), les unités fondamentales de mécaniques sont : cm, g, s.

4.2. Equations aux dimensions.

Considérons deux systèmes d'unités cohérents, 1 et 2, adoptant mêmes relations de définition des unités dérivées et ne différant que par la valeur des unités fondamentales.

Soit une grandeur dont la mesure x est une fonction des mesures a, b, c de grandeurs d'autres espèces du type : $x = f(a, b, c)$. Dire que l'équation aux dimensions de cette grandeur est $[x] \cup A^{\alpha} B^{\beta} C^{\gamma}$ signifie que, lorsqu'on passe d'un système d'unités cohérent à un autre système cohérent utilisant les mêmes équations de définition des unités secondaires, en multipliant l'unité de la première grandeur par A , celle de la seconde par B , etc... alors l'unité de la grandeur (dont la mesure est x) est multipliée par $[x] \cup A^{\alpha} B^{\beta} C^{\gamma}$.

Utilisations :

- calculer le rapport des unités de deux systèmes cohérents utilisant les mêmes relations de définition pour les unités dérivées.
- calculer la mesure d'une grandeur dans un système à partir de sa mesure dans un autre système (cohérent, utilisant les mêmes ...)
- vérifier l'homogénéité d'un résultat calculatoire** : les deux membres d'une égalité doivent avoir même dimension, sinon l'égalité cesserait d'être vraie si l'on changeait de systèmes d'unités. Toute relation non homogène est nécessairement fautive (mais une relation homogène peut quand même être fautive).

Exemple : $T = 2\pi\sqrt{\frac{g}{L}}$ est nécessairement fautive

$T = 3\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ n'est pas nécessairement fautive (mais l'est s'il s'agit de la période du pendule simple)

- analyse dimensionnelle** : dans l'étude de phénomènes physiques complexes (type mécanique des fluides) on peut quelquefois se laisser guider par des considérations d'homogénéité pour déterminer la relation probable entre les mesures de certaines grandeurs.

Exemple : période d'un pendule simple. A priori $T_0 = f(m, l, g; \theta_{\max})$, ayant remarqué expérimentalement que T_0 ne dépendait pas de θ_{\max} pour de petits angles, cherchons si la relation précédente peut être de la forme : $T_0 = k m^{\alpha} l^{\beta} g^{\gamma}$ où k serait sans dimension. Nécessairement :

$[T] \cup M^{\alpha} L^{\beta} [L T^{-2}]^{\gamma}$ soit $\alpha = 0$, donc T_0 ne dépend pas de la masse, puis $-2\gamma = 1$, $\beta + \gamma = 0$, d'où $T_0 = k(l/g)^{1/2}$, il reste alors déterminer la constante.

Listes des montages pour 2009

Pour chacun des sujets de la liste ci-dessous, il conviendra, dans la mesure du possible, de présenter des applications. L'utilisation de l'ordinateur interfacé, pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales, est à privilégier.

1. Dynamique newtonienne.
2. Transitions de phase.
3. Ondes acoustiques.
4. Formation des images en optique.
5. Présentation du goniomètre.
6. Spectrométrie optique.
7. Polarisation de la lumière.
8. Condensateurs.
9. Bobines ; transformateurs.
10. Capteurs.
11. Induction, auto-induction.
12. Production et mesure de champs magnétiques.
13. Transducteurs électromécaniques.
14. Régimes transitoires en électricité.
15. Filtres actifs et passifs.
16. Conversions alternatif-continu et continu-alternatif en électricité.
17. Amplification en électronique.
18. Oscillations électriques entretenues.
19. Analyse harmonique et synthèse d'un signal périodique.
20. Modulation d'amplitude et modulation de fréquence.
21. Filtres linéaires en électrocinétique.
22. Oscillateurs couplés.
23. Mesure de longueurs d'onde.
24. Mesure d'impédances.
25. Interférences.
26. Diffraction.
27. Spectroscopie à réseau.
28. Ondes stationnaires.
29. Résonance.
30. Propagation d'une onde.

AGREGATION INTERNE SESSION 2009

MONTAGE 1

Illustration de quelques lois de la dynamique newtonienne

1 - Relation fondamentale de la dynamique

1.1 - Mouvement de translation

$$\vec{F} = m\vec{a} \text{ ou } \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Exemple sur table à coussin d'air (ou à digitaliser)

Chute libre (et chute avec vitesse limite – programme Terminales- en filmant le mouvement avec une webcam)

1.2 Mouvement de rotation

$$M(f) = I\ddot{\theta}$$

Mouvement accéléré d'un solide soumis à une force de moment constant

2 - Relations de conservation

2.1- Conservation de la quantité de mouvement : choc élastique ou non sur table

2.2- Conservation du moment cinétique : expérience sur tabouret

2.3- Conservation de l'énergie mécanique dans le cas des forces conservatives : table à digitaliser et pendule élastique

3 - Limites de validité

Présenter un cliché de chambre à bulles : choc élastique p+p sur cible au repos : les trajectoires après le choc ne sont pas perpendiculaires.

Biblio Duffait CAPES p 217-223 ; 231 ; 310

MONTAGE 2

Transitions de phase

1 - Température de changement d'état

Fusion de la glace ou du naphthalène, ébullition de l'eau

2 - Chaleur latente de changement d'état

Méthode calorimétrique (fusion de la glace)

Utilisation de la relation de Clapeyron $L_{1,2} = T(v_2 - v_1)(dP/dT)$ (ébullition de l'eau)

3 - Autres exemples de changements d'état

Sublimation et condensation de l'iode

Changement allotropique (fer α - fer β)

Cristal liquide (afficheur LCD température de transition 74°C)

Biblio Duffait CAPES p.262-265

MONTAGE 3**Ondes acoustiques**

Ondes acoustiques sonores et ultrasonores dans les milieux élastiques : production, détection et analyse

Mesure de la célérité dans un gaz

- Avec 2 micros séparés de la distance d (utiliser un oscillo numérique)
- mesure de λ en Ultra Sons (émetteur-récepteur vers 40 kHz)
- utilisation sonar (mesure de distance)

Mesure de la célérité dans un solide ou liquide

- fréquence propre d'une tige : tenir en son milieu une tige de 1 mètre en dural ; la frapper longitudinalement avec un marteau ; après un régime transitoire complexe, il reste un son « pur » dont on mesure la fréquence (la tige est de longueur $\lambda/2$)
- temps de propagation liquide (avec récepteurs US dans l'eau)

Analyse d'un son

- intensité sonore avec sonomètre. Vérifier l'échelle logarithmique du sonomètre (on diminue de moitié l'amplitude de la tension appliquée au HP, la puissance acoustique est divisé par 4, l'intensité sonore diminue de 6 dB)
- hauteur d'un son (diapason 440 + HP 880)
- diapason, voyelle, instrument : fondamental, harmoniques (utiliser plutôt une acquisition informatisée permettant de faire la TF sur un nombre entier de périodes).
- battements entre 2 diapasons dont l'un possède une surcharge

Diffraction, interférences

- en US :
 - interférence avec 2 émetteurs
 - diffraction par une fente (placer l'émetteur dans la boîte et déterminer l'angle pour lequel l'amplitude s'annule
- trombone de Koenig (travailler vers 2-3 kHz)
-

Biblio Duffait CAPES p.276-284

MONTAGE 4**Formation des images en optique**

On pourra illustrer ce thème par l'étude d'un ou plusieurs instruments modélisés.

1 - Conditions d'obtention des images. Aberrations

- 1.1 - Conditions de Gauss (avec dispositif 5 diodes Laser)
- 1.2 - Relations de conjugaison
Illustrer dans quelques cas : OR-IR, OR-IV (lentille convergente) ...
- 1.3 - Aberrations (avec lampe Quartz Iode et projection sur grand écran)
Géométriques (caustique, coma, distorsions)
Chromatiques

2 - Instrument modélisé

- 2.1 - Lunette astronomique
Mesure du grossissement (comparer au rapport des diamètres objectif/cercle oculaire), mise en évidence du rôle des diaphragmes (ouverture et champ)
- 2.2 - Microscope
Grandissement de l'objectif, puissances de l'oculaire et du microscope

Biblio Duffait CAPES 172- 197 ; Duffait Optique 22-33 ; 100-116, Sextant p 42-55

MONTAGE 5**Présentation du goniomètre**

Le goniomètre est un appareil de précision pour mesurer des angles. Repérer d'abord les différents éléments

- un collimateur formé d'une fente réglable située après réglage dans le plan focal de la lentille du collimateur de façon à donner un faisceau parallèle.
- une lunette d'observation qui devra être réglée « sur l'infini » pour recevoir le faisceau précédent. Elle comprend aussi un réticule qu'un oculaire (réglable selon la vue de l'observateur) permet de voir à l'œil. Sous la lunette, une vis permet d'orienter l'axe de la lunette (il devra être parallèle à celui du collimateur).
- Une plate-forme sur laquelle on peut poser un prisme (éventuellement un réseau). Cette plate-forme doit être horizontale (c-à-d perpendiculaire à son axe de rotation qui est aussi l'axe de rotation de la lunette).
- La position angulaire de la lunette est repérée sur un disque gradué avec un vernier (angles mesurés à 1 minute de degré près sur le modèle le plus courant).

1- réglages du goniomètre

Les réglages préliminaires avant toute mesure sont de 2 types :

- un réglage « mécanique » pour rendre l'axe de la lunette parallèle à celui du collimateur (et donc orthogonal à l'axe de rotation) et la plate-forme perpendiculaire à cet axe.
- un réglage « optique » du collimateur et de la lunette pour travailler en faisceau parallèle.

On trouvera sur internet (yahoo-goniomètre) différentes procédures de réglages – en particulier le site de l'université de Nantes (Cortial) (j'ai trouvé d'autres méthodes d'ailleurs « discutables »).

Pour résumer

1.1 – réglage optique. Régler la lunette sur l'infini par auto collimation : on éclaire le réticule (par une lampe annexe), on règle l'oculaire à sa vue en visualisant le réticule.

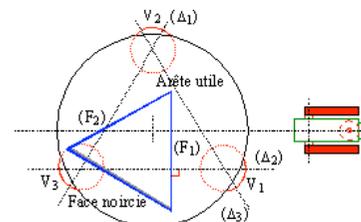
On dispose un miroir contre la lunette et on règle la grosse bague moletée pour rendre nette l'image du réticule en reflet.

Ensuite, on vise la fente du collimateur et on agit sur sa bague pour avoir une image nette de la fente (éclairée par la source utilisée ensuite : vapeur de Hg ou autre).

1.2 – réglage mécanique. Il est assez laborieux (heureusement il n'est pas critique pour les mesures)

1.2.1 - Il faut d'abord régler l'axe de la lunette perpendiculaire à l'axe de rotation. On place un prisme (de bonne qualité) sur la plate-forme face polie dirigée vers la lunette de façon à s'en servir de miroir (on retrouve la méthode d'auto-collimation). Le réticule horizontal n'est pas confondu avec son « reflet » : on agit sur la vis située sous la lunette pour les confondre. Ensuite on tourne la plate-forme de 180° (ainsi que le prisme) : il n'y a plus coïncidence. On corrige la moitié du défaut avec la vis adéquate de la plate-forme, l'autre moitié avec la vis de la lunette. Eventuellement on refait l'opération initiale.

1.2.2- Pour régler l'horizontalité de la plate-forme, on place le prisme de telle sorte que ses faces utiles F1 et F2 soient perpendiculaires aux axes Δ_2 et Δ_3 . On règle par auto-collimation sur F1 en agissant sur la vis V3. On tourne la lunette de 120° pour régler sur la face F2 en agissant sur V2

**2 -Mesures (Voir Duffait CAPES p170)****2.1 - minimum de déviation du prisme****2.2 - angle au sommet du prisme**

En déduire l'indice de réfraction du verre du prisme pour différents longueurs d'onde (celles de la lampe à décharge par exemple Hg). Il est indispensable de donner ces valeurs avec la précision (et les barres d'incertitude) que permet l'appareil (au moins 3 chiffres après la virgule).

2.3 -Mesures de longueurs d'onde

Le prisme n'étant pas vraiment adapté (dispersion non linéaire), il est préférable d'utiliser un réseau. On travaillera au minimum de déviation (voir Duffait Optique) pour s'affranchir de l'incertitude de positionnement du réseau.

MONTAGE 6**Spectrométrie optique****1 - Spectromètres à fentes**

1.1 - Montages généraux (rigoureux et pratiques)

1.2 - Etude du prisme : minimum de déviation

Mesure au goniomètre de l'indice pour différentes longueurs d'onde, vérification de la loi de Cauchy sur l'indice du verre

1.3 - Etude du réseau : influence de n et de l'ordre k

1.4 - Mesure de longueur d'onde (Hg-Cd)

2 - Interféromètre : le Michelson

2.1 - Principe et réglage

2.2 - Franges d'égale épaisseur et anneaux d'égale inclinaison

2.3 - Mesure du doublet du sodium

2.4 - interférogramme d'un filtre interférentiel

Biblio Duffait Optique 121-135 ; 64-82 ; Duffait CAPES 204-206

MONTAGE 7**Polarisation de la lumière****1 - Polarisation rectiligne**

Production et analyse (par réflexion et par polaroïds)

2 - Biréfringence

Mise en évidence (cristal de spath)

Lignes neutres d'une lame mince

Interférences en lumière polarisée

3 - Polarisation rotatoire

Mise en évidence et mesure (quartz perpendiculaire ou solution active)

4 - Polarisation elliptique ou circulaire

Avec lame mince biréfringente ou lame quart d'onde

Biblio Duffait Optique 177-189 ; 141-151 ; 167-172

MONTAGE 8**Condensateurs****1 - Mesure de capacités**

Mesure d'impédance ($U/I = 1/C\omega$)

Mesure par résonance

Pont de Sauty-Wien

Mesure de constante de temps (charge à travers une résistance ou charge à courant constant)

2 - Imperfections des condensateurs

Mise en évidence de la résistance de fuite (surtout avec électrochimiques)

Mise en évidence des pertes diélectriques (délicate).

3 - Utilisations des condensateurs et différents types

Filtrage (alimentation continue - C électrochimiques)

Liaison alternative (exemple montage amplificateur à transistor EC, liaison AC de l'oscillo).

Biblio Duffait CAPES 41-43 ; Duffait-Lievre 17-22

MONTAGE 9**Bobines ; transformateurs**

Montage très vaste qui peut être restreint à

1 - Mesure des caractéristiques des bobines

Inductance (Am-Vm ; résonance ; pont de Maxwell)

Résistance propre et capacité parasite

2 - Transformateurs

2.1 - Transfo à vide : loi des tensions, forme du courant à vide

2.2 - Transfo en charge : loi des courants (diagramme de Kapp)

3 - Applications

■ transport de l'énergie sous haute tension

■ adaptation d'impédance

■ lissage d'un courant

Biblio Duffait CAPES 75-76 ; 91-98 et texte en fin de fascicule

MONTAGE 10**Capteurs****1 - Variation d'une impédance (résistance) avec le paramètre extérieur**

Il s'agit d'étudier :

■ la forme de la caractéristique $U=f(I)$

■ la loi de variation de R avec le paramètre (linéarisation éventuelle)

On prendra comme capteurs

la photorésistance LDR (R prop. $1/\varphi$)

la thermistance ou la résistance de platine

la jauge de contrainte

2 – Capteurs actifs

- Capteur piézoélectrique

- Thermocouple

3 - Applications

Thermomètre, luxmètre...

Biblio Duffait-Lievre 100-115 ; Duffait CAPES 143-147

MONTAGE 11**Induction ; auto-induction****1 - Expériences qualitatives - loi de Lenz**

Visualiser la tension induite par variation de flux (sur un voltmètre numérique ou mieux avec un oscillo à mémoire numérique) ou le courant induit (sur un galvanomètre)

2 - Loi de Faraday

Faire passer un courant triangulaire dans une bobine et mesurer la tension induite aux bornes d'une 2^{ème} bobine en influence totale.

3 - Auto-induction

Comme en 2, faire passer un courant triangulaire dans la bobine et déterminer le terme Ldi/dt

4 - Etablissement du courant dans un circuit RL

Retard à l'établissement du courant

Surtension à l'ouverture (avec un néon ; **ne pas** essayer de visualiser à l'oscillo)

Mesure de constante de temps

Biblio Duffait CAPES p.59 et 70-75

MONTAGE 12**Production et mesure de champs magnétiques**

On s'intéressera à des champs d'ordre de grandeur divers (voir Duffait CAPES 61-67)

Mesure du champ magnétique terrestre

Il est d'abord instructif de déterminer la direction du champ magnétique

Placer la boussole d'inclinaison sur un support loin d'aimants et même de toute pièce métallique ferromagnétique. Dans un plan horizontal, l'aiguille s'oriente en indiquant le nord (magnétique) qui est actuellement très voisin du nord géographique (déclinaison en 2001 de l'ordre de 1° en France). Placer le plan de rotation de l'aiguille dans un plan vertical contenant la direction du nord : l'aiguille s'incline d'un angle très important (environ 65°) qui s'appelle inclinaison du champ magnétique terrestre.

Valeur du champ magnétique : utiliser une sonde de Hall (de préférence la sonde Phytex qui est plus précise et surtout plus stable).

Placer la sonde de telle sorte que le champ terrestre soit perpendiculaire au plan de la plaquette (donc selon l'axe du support). Relever la valeur V_+ de la tension de Hall. Ensuite, retourner le plan de la sonde pour mesurer $-B : V_-$

$$2 B_T = V_+ - V_-$$

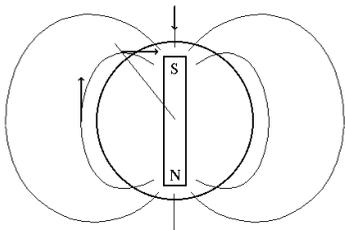
La mesure « en différentiel » est indispensable pour éliminer le décalage de 0 de la sonde.

Pour mesurer la composante horizontale du champ magnétique, utiliser la même méthode en plaçant la sonde dans les positions adéquates.

Pour améliorer la précision : pour la boussole dans un plan horizontal, créer un champ magnétique, perpendiculaire au champ terrestre, à l'aide de bobines de Helmholtz pour dévier l'aiguille de 45°. Multiplier ensuite le courant par 10 dans les bobines, et mesurer en différentiel le champ ainsi créé : c'est 10 fois le champ terrestre horizontal.

Résultat : $B_T \approx 0.05 \text{ mT}$ et composante horizontale $\approx 0.02 \text{ mT}$ ($\approx 0.5 * \cos(65^\circ)$)

Remarque : le champ magnétique terrestre possède une topologie voisine de celle d'un dipôle (aimant droit). La figure ci-dessous explique l'orientation du champ à nos latitudes (aux pôles, le champ est pratiquement vertical ; à l'équateur, il est horizontal).



L'existence du champ magnétique terrestre est basée sur le principe de la dynamo auto-excitée : si un champ magnétique existe dans le noyau métallique de la Terre, la rotation terrestre induit un courant qui crée le champ magnétique présumé...

Le champ peut prendre une orientation ou son opposé. On ne comprend pas encore totalement la raison de l'inversion du champ magnétique à des échelles de temps de l'ordre de 10^5 années.

MONTAGE 13**Transducteurs électromécaniques****1 - Le haut-parleur**

Détermination des différents termes de l'équation différentielle qui décrit le comportement du HP (ou détermination de l'impédance)

Haut parleur : caractéristiques électriques et mécaniques. Mesures et modélisation

Voir le texte de R. Moreau (Bulletin de l'Union des Physiciens 744(1992) 655)

$$\underline{Z} = R + j L \omega + \underline{Z}_m$$

$$\text{avec } \underline{Z}_m \text{ (impédance motionnelle)} \quad \underline{Z}_m = \frac{B^2 l^2}{h + j(\mu \dot{u} - k/\dot{u})}$$

Mesures à effectuer

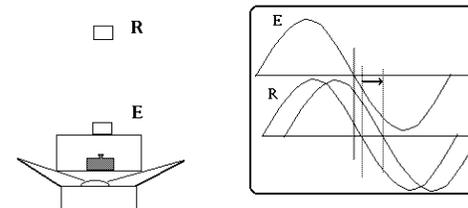
- Raideur k

Sur le HP, on place un émetteur ultrasonore et à une dizaine de cm au dessus un récepteur. On alimente l'émetteur à 40 kHz (fréquence de fonctionnement des émetteurs) et on observe à l'oscillo le décalage temporel entre les 2 signaux avec des curseurs. On ajoute des masses sur le plateau (à l'intérieur du boîtier) et on détermine le déplacement à partir du déphasage $\varphi = 2\pi d / \lambda$ ($\lambda = c/f = 8\text{mm}$) et $mg = kd$

- coefficient d'amortissement h et fréquence propre $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$ (enregistrement à l'oscillo numérique ou à l'ordinateur de la réponse à une impulsion mécanique sur la membrane)

- détermination de $B l$: reprendre la méthode de mesure de k . On ajoute des masses sur le plateau (à l'intérieur du boîtier) et on fait passer un courant continu I dans le HP pour revenir au même décalage (donc à la même position). $F = mg = B l I$. On peut apprécier un décalage de $0.15 \mu\text{s}$ soit un déplacement de $d = v * t$ de $50 \mu\text{m}$!

Attention : le HP a une résistance faible (8Ω) ; il est indispensable de mettre un rhéostat de quelques dizaines d'ohms en série (I maximum 0.5 A).



- mesures électriques :

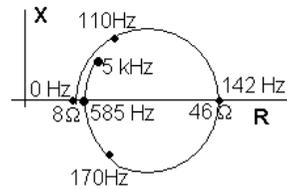
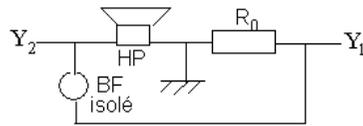
- R à l'ohmmètre

- Mesure des fréquences pour lesquelles l'impédance est réelle (u et i en phase) :

La première permet de vérifier le terme $B^2 l^2 / h$ (on néglige L et $m \omega = k/\omega$)

La deuxième permet de déterminer $L = B^2 l^2 / m \omega_1^2$ (on néglige h)

Terminer en traçant le cercle de Kennelly (impédance dans le plan complexe) du HP (l'oscillo numérique permet de mesurer rapidement $|Z|$ et $\Delta \varphi$ d'où $\text{Re}(Z)$ et $\text{Im}(Z)$)



Rendement acoustique du HP

Il nécessite de mesurer la puissance électrique consommée et la puissance acoustique effectivement délivrée.

La puissance électrique peut être mesurée simplement en déterminant u et i (par exemple à une fréquence où ces grandeurs sont en phase).

La puissance acoustique est déterminée par le sonomètre en un endroit donné.

On a la relation entre l'intensité sonore (en W/m^2) et le niveau sonore (en dB)

$$L(\text{dB}) = 10 \log (I / 10^{-12})$$

Une mesure correcte de la puissance totale (en W) nécessite d'établir l'indicatrice d'émission.

On peut en première approximation supposer l'isotropie de l'émission. (dans quel sens fait-on une erreur ?)

2 - Le quartz piézoélectrique

Détermination de l'impédance en fonction de la fréquence (d'où les éléments du modèle). Il est indispensable de posséder un générateur très stable.

Applications : oscillateur piloté par Quartz ; stabilité de la fréquence

3 - Le moteur Pas à pas

Le principe

Pilotage par ordinateur

MONTAGE 14

Régimes transitoires en électricité

1 - Circuit RC

Utilisation d'une acquisition sur ordinateur pour enregistrer la charge et la décharge du condensateur. Vérification des formes exponentielles et mesure de la constante de temps. Détermination des solutions des équations correspondantes (Synchronie).

2 - Circuit RL

Idem

3 - Circuit RLC

Toujours la même technique. Détermination de la pseudo-période, de l'amortissement (décrément logarithmique)

Faire la TF de la réponse impulsionnelle : on obtient la réponse fréquentielle. Vérifier la bande passante.

4 - Régime transitoire précédant un régime forcé

Solution = somme de la solution générale sans second membre et de la solution particulière avec second membre. Existence de battements qui s'atténuent.

Expérimentalement, en l'absence de générateur disposant d'une porte, on peut se servir de la sortie analogique (SA2 avec Synchronie) de la carte d'acquisition :

Construire par la feuille de calcul une tension sinusoïdale de fréquence voisine de la fréquence de résonance. La faire émettre sur SA2 et l'appliquer au circuit RLC. Acquérir en mode entrelacé la tension aux bornes de R. On peut aussi utiliser un multiplicateur.

Faire varier la fréquence émise et conclure

Voir aussi la solution de l'équation du 2^{ème} ordre avec second membre sinusoïdal.

5 - Applications

Oscillateur à résistance négative. Comparaison avec l'équation de Van der Pol.

Oscillateur à relaxation à circuits logiques ou à AO

Biblio Duffait CAPES 53-57 ; 123 ; 132-133 ; 155-160

MONTAGE 15**Filtres actifs et passifs**

On consultera avec profit les ouvrages de D. Aubert (dictionnaire de la Physique tome 3), de M. Vauchelles (TP d'électronique Ellipses) et le Duffait-Lievre (Bréal)

1 – Généralités

La fonction de transfert d'un filtre $H(\omega)$ est le rapport entre les amplitudes complexes des tension de sortie et d'entrée.

Lorsque le filtre est composé seulement de composants passifs, le débit sur une charge non infinie modifie la fonction de transfert (ce qui complique les calculs des filtres en série). On préfère les filtres actifs (dans lesquels il y a un apport d'énergie, en général avec un AO) dont l'impédance de sortie est très faible.

Pour mesurer la Fonction de transfert, il faut mesurer

- en régime forcé, l'amplitude et la phase des tensions de sortie et d'entrée (oscillo, voltmètre ou décibelmètre).
- en régime impulsionnel : on prend la Transformée de Fourier de la réponse
- en régime indiciel : on prend la TF de la dérivée de la réponse

2 - Mesures

2.1 - Filtres du 1^{er} ordre (passe-bas RC ou passe-haut)

2.2 - Filtres du 2^{ème} ordre

- RLC (aux bornes de R -passe-bande - de C -passe-bas- ou L)

- Filtres actifs type Sallen-Kay ou Rauch

Remarque : le montage 21 (2006) sur les filtres linéaires en électrocinétique semblerait limiter le montage 15

3 - Applications

- Séparation des voies d'enceintes acoustiques

- Analyseur de spectre analogique à filtres

Circuit bouchon R- LC parallèle : déterminer les harmoniques d'un signal carré en modifiant C (prendre $C = 900 \text{ nF}$ et choisir la fréquence pour isoler le fondamental ; les harmoniques impairs seront isolés pour 100 nF , 36 nF , 18 nF ...)

- Réception d'une onde modulée : accord sur une longueur d'onde

MONTAGE 16**Conversions alternatif-continu et continu-alternatif****1 - Conversion alternatif-continu**

1.1 - Redressement

Simple alternance (caractéristique de diode)

Double alternance (pont de diode)

Filtrage par condensateur

1.2 - Stabilisation

Par Zener ; par Zener et transistor ; par RIT

1.3 - Influence d'une charge inductive

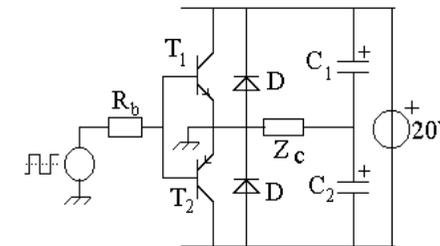
Montrer le rôle d'une diode de roue libre

2 - Conversion continu-alternatif

Un oscillateur quasi-sinusoïdal ou à relaxation constitue bien une conversion continu - alternatif mais ces montages ne peuvent délivrer une puissance importante. Il faut illustrer le principe d'un onduleur.

Un type d'onduleur est donné dans la fig.1 (Ref : Hébert Electronique de puissance (fin de l'ouvrage, problèmes de bac))

. Ce montage ressemble a priori au montage Push-Pull mais les transistors fonctionnent ici en commutation et le rôle des condensateurs C_1 et C_2 est essentiel.



R_b qqques $k\Omega$

T_1 npn (2N2219 ou autre)

T_2 pnp (2N2905 ou autre)

C_1 C_2 100 μF (polarisés)

Z_c Rhéostat 100 Ω
puis RL avec $L = 1\text{H}$

fig.1 - Onduleur à transistors

Considérons une situation initiale où les transistors T_1 et T_2 sont bloqués (I_{B1} et I_{B2} nuls) et la charge seulement résistive. Si les 2 condensateurs sont égaux, la situation d'équilibre stable correspond aux potentiels de la fig.2a où le courant dans la charge est nul et les 2 condensateurs chargés sous une tension $E_{alim}/2$.

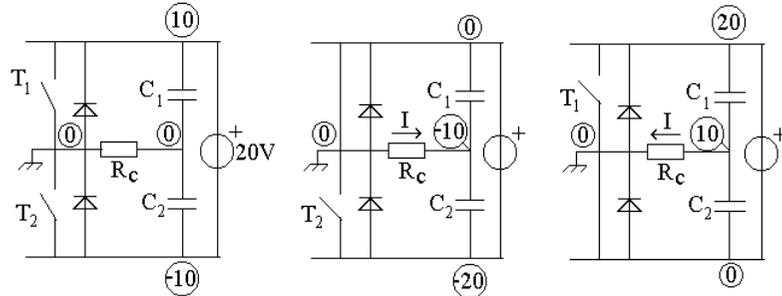


fig.2a,b,c - Etats du montage suivant la tension de commande

Appliquons un signal carré de période T sur les bases. Pendant $T/2$, cette tension de commande est positive et telle que T_1 est saturé (interrupteur fermé) et T_2 bloqué. Les charges des condensateurs ne pouvant varier instantanément, les potentiels sont translatés de $E_{aim}/2$ vers le bas (fig.2b). Il apparaît un courant dans R_c qui tend à décharger C_1 et à charger C_2 avec la constante de temps $\tau = R_c(C_1 + C_2)$.

A $T/2$, la tension de commande devient négative pour rendre T_2 passant et T_1 bloqué. Si $T/2 \ll \tau$, les potentiels deviennent alors ceux indiqués en fig.2c. Le courant dans la charge s'inverse. Pour $t = T$, on retrouve la situation 2b.

Le courant dans la charge est donc alternatif carré et sa fréquence est celle de la tension de commande. Le courant de commande est faible (courant base des transistors) et peut être fourni par un oscillateur à relaxation. Le courant de charge beaucoup plus important est fourni par l'alimentation continue. Les transistors étant bloqués ou saturés dissipent peu de puissance.

Si la charge est de nature inductive, le courant dans la charge ne peut s'inverser instantanément : le rôle des diodes est celui de diode de roue libre (voir Duffait-Lievre p303) évitant les surtensions aux bornes des transistors. Le courant dans la charge est formé de branches d'exponentielles et si l'inductance est de grande valeur, le courant devient triangulaire.

Une amélioration intéressante de ce montage est l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui est une modulation du rapport cyclique du signal carré de commande.

On peut la réaliser assez facilement avec un comparateur sur lequel on applique une tension sinusoïdale et un signal triangulaire de plus haute fréquence mais de même amplitude.

On applique la sortie du comparateur à l'onduleur précédent et on prend une charge inductive telle que L/R soit grand devant la période du signal triangulaire. Le courant dans la charge s'approche d'une sinusoïde ce que l'analyse de Fourier permet de confirmer : on a une fréquence fondamentale qui est celle du sinus de départ et les harmoniques (de fréquences beaucoup plus élevées) sont très atténués.

Biblio Duffait CAPES 101-108 ; Duffait-Lievre 291-304

MONTAGE 17

Amplification en électronique

Il faut séparer la préamplification (où l'on cherche un gain en tension élevé tout en gardant une bande passante suffisante et une distorsion négligeable) de l'amplification de puissance qui permet de débiter sur des charges de faible impédance. Dans ce deuxième étage, ce n'est pas le gain en tension qui est important (souvent 1) mais le gain en courant et donc surtout la puissance disponible en sortie.

1 – Préamplification

Elle peut se réaliser simplement avec un AO en montage ampli inverseur ou non-inverseur (anciennement avec un transistor en mode émetteur commun).

Caractériser le gain et la bande passante de ces montages. On montrera que le produit gain-bande passante est constant. Déterminer également l'impédance d'entrée de ces 2 types.

Montrer la limitation en courant de sortie de l'AO.

2 - Ampli de puissance

On étudie d'abord le montage collecteur commun dont on détermine le gain en tension (≈ 1) et surtout l'impédance de sortie (très faible - qqes Ω).

Ensuite on réalise le montage Push-Pull, d'abord simple où l'on observe une forte distorsion (dite de raccordement) puis associé à un AO pour réduire cette distorsion.

Biblio Duffait-Lievre 125-132 et Duffait CAPES 139-142

MONTAGE 18**Oscillations électriques entretenues****1 - Oscillations quasi-sinusoïdales**

1.1 - Oscillateur à filtre de Wien

Détermination du diagramme de Bode du filtre et surtout mesure de la fréquence donnant un déphasage sortie-entrée nul. Pour cette fréquence, déterminer l'atténuation du filtre.

Ensuite on associe avec un ampli non-inverseur. Vérifier la condition d'oscillation (dite de Barkhausen).

Acquérir à l'ordinateur le démarrage des oscillations. Qu'est-ce qui limite l'amplitude ?

Par principe dans ces oscillateurs, une non-linéarité est indispensable pour empêcher la divergence du régime (par exemple la saturation de l'AO) et les oscillations ne peuvent être que « quasi-sinusoïdales ».

Réaliser une non-linéarité plus « douce » au moyen d'un dipôle non-linéaire (par exemple une VDR).

1.2 - Oscillateur à résistance négative

Caractéristique de la résistance négative

Condition d'oscillation

2 - Oscillateur à relaxation

Etudier d'abord les comparateurs à hystérésis inverseur et non inverseur (caractéristique $V_s = f(V_e)$)

Réaliser l'oscillateur avec 2 AO (un intégrateur et le comparateur inverseur) ou compacté avec un seul (pseudo intégrateur - charge de condensateur à tension constante). Vérification de la période.

3 - Passage continu des oscillations quasi-sinusoïdales aux oscillations de relaxation

Oscillateur de type Van der Pol (voir article de M. Krob BUP 785 n°2 p131 1996).

Comparer avec la solution de l'équation de Van der Pol

Biblio Duffait-Lievre 165-207 ; 94-95 ; Duffait CAPES 155-160

MONTAGE 19**Analyse harmonique et synthèse d'un signal périodique****1 – Analyse**

L'outil de base est maintenant l'analyse de Fourier réalisée dans les logiciels d'acquisition (par exemple Synchronie).

Sur un signal sinusoïdal, montrer l'influence

- de la fréquence d'échantillonnage (critère de Shannon)

- des « fuites spectrales » lorsque la durée totale d'acquisition n'est pas un nombre entier de périodes

- des fenêtres de pondération (Hamming) qui sont une réponse -imparfaite- au problème précédent.

Sur un signal carré, on montrera le phénomène de repliement de spectre (conséquence du critère de Shannon).

2 – Mesures

- série de Fourier d'un signal carré

- analyse d'un son (diapason, instrument, voyelle chantée)

- modulation d'amplitude ou de fréquence

On peut aussi présenter un modèle d'analyseur analogique à filtre accordable (voir montage filtre actif) en l'appliquant à un signal carré.

3 - Synthèse harmonique

3.1 - purement analogique

Avec des additionneurs (utilisation d'Harmonos d'Electrome)

3.2 - à l'ordinateur

En utilisant les sorties analogiques (et donc le CNA) de la carte d'acquisition. Construire numériquement (feuille de calcul de Synchronie) la somme de différents harmoniques. Visualiser à l'oscillo.

Biblio Duffait-Lievre 36-42 ; 47-54 ; Duffait CAPES 282-283

MONTAGE 20**Modulation d'amplitude et modulation de fréquence****1 - Modulation d'amplitude**

Utiliser un multiplieur

Visualiser les différents signaux (porteuse, modulation, produit) et leur spectre de fréquence (utilisation judicieuse des fenêtres e pondération type Hamming).

Nécessité (?) du décalage continu du signal de modulation (sinon surmodulation).

2 - Démodulation

2.1 - Par détection d'enveloppe

Diode plus circuit RC parallèle. Choix de la constante de temps

(on peut améliorer le montage en utilisant un AO - voir expériences illustrant Synchronie).

2.2 - Par détection synchrone

Utilisation d'un multiplieur (porteuse sur une entrée, le signal modulé sur l'autre). Possibilité de démoduler une surmodulation.

3 - Modulation de fréquence

Utilisation de l'entrée VCO ou wobblution d'un générateur BF.

Mesure du coefficient $k = \Delta N/V_{\text{mod}}$ en prenant une tension V_{mod} continue.

Ensuite détermination de l'indice de modulation pour une tension V_{mod} sinusoïdale d'amplitude A et de fréquence N_{mod} : $m = kA/N_{\text{mod}}$

Faire l'analyse de Fourier du signal modulé. Vérifier que pour $m = 2.4$, on observe une annulation de la fréquence de la porteuse.

4 - Démodulation de fréquence

Utiliser un filtre passe-bande (par exemple RLC aux bornes de R) et placer la fréquence de la porteuse sur le flanc (au voisinage du point d'inflexion) du filtre. On récupère un signal qui est en plus modulé en amplitude. Extraction du signal par la méthode 2.1

Biblio Duffait-Lievre 208-236 ; Duffait CAPES 148-154

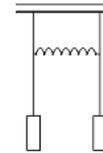
MONTAGE 21**Filtres linéaires en électrocinétique**

Ce nouveau montage (2006) paraît partiellement recouper le montage 15 (filtres actifs et passifs). Ici, il faudrait se limiter aux filtres passifs.

MONTAGE 22**Oscillateurs couplés****1 - En mécanique : oscillateur à 2 degrés de liberté (pendules couplés)**

Il est simplement formé de 2 pendules simples identiques montés sur roulement (pour réduire les frottements solides sur l'axe). Un petit catadioptré est fixé sur chaque pendule pour donner un reflet directement visible par le détecteur Vidéocom.

Un ressort de faible raideur (5N/m) est placé à un niveau variable entre les pendules (fig.1a). On étudie les oscillations libres en écartant manuellement un (ou les deux) pendule de sa position d'équilibre.

**1.2 – Dispositif d'enregistrement du mouvement**

Utilisation de Vidéocom

Le détecteur est une barrette CCD sur laquelle on fait l'image (grâce à un objectif photo) des reflets des diodes électroluminescentes. Sur l'objectif repérer la bague de réglage de l'ouverture et celle de mise au point.

Connecter le cordon sur COM1 (ou 2) et alimenter le boîtier avec le bloc ACDC (les diodes s'allument).

Si le PC ne reconnaît pas Vidéocom, modifier (icône outillage - généralités) le port d'entrée (COM 1 ou 2).

Faire d'abord un test de l'intensité pour détecter le réflecteur et seulement celui-ci. Régler au mieux en déplaçant verticalement le dispositif. Bien aligner la direction de la barrette sur la direction de déplacement du réflecteur. Au départ ouvrir l'objectif photo au maximum (en agissant sur la bague) sur 2 ou 2.8 puis réduire l'ouverture (en augmentant ce nombre). Régler la mise au point pour avoir un pic intense mais fin (on peut être guidé par l'indication de distance de l'objectif photo).

Ensuite cliquer sur l'onglet distance : le (ou les) marqueur suit le mouvement.

Régler la période des flashes (sur le boîtier ou avec l'icône outillage) et l'adapter au mouvement : prendre un échantillonnage suffisant (Shannon) tout en limitant le nombre de points d'acquisition (ceci afin de pouvoir transférer ensuite sur Synchronie, limité à 10000 points).

Lancer l'acquisition par l'icône « chronomètre ».

Un certain nombre d'outils sont disponibles par le clic droit de la souris : définition des variables acquises et visualisées (distance, vitesse, accélération); zoom; transfert.

La vitesse est calculée dans Vidéocom par un algorithme utilisant 5 points (c'est la raison pour laquelle le tableau des vitesses ne commence qu'au 3^{ème} point). Il est donc préférable de la faire calculer dans Vidéocom avant de transférer dans Synchronie (on pourrait faire de même dans Synchronie mais il faudrait d'abord effectuer un lissage).

Lorsque l'acquisition est terminée, on peut effectuer quelques traitements dans Vidéocom (en particulier la Transformée de Fourier). Si l'on désire exploiter plus complètement les données (calculs d'énergie, portrait de phase), il est préférable de transférer dans Synchronie afin de

pouvoir utiliser la feuille de calcul et. La TF est aussi un peu supérieure (possibilité de fenêtre de pondération, sélection de zone de calcul sur un nombre entier de périodes...).

Pour cela, suivre les indications suivantes :

- exporter dans le presse-papier (clic droit) et sortir de vidéocom
- appeler un éditeur de fichier (Wordpad par exemple dans Fichiers- accessoires) et coller le presse-papier
- retoucher la première ligne afin de supprimer les unités (t/s ...) non acceptées sous ce format par Synchronie.
- enregistrer ce fichier en format Texte en lui donnant un nom avec extension .txt. Repérer le dossier dans lequel on l'enregistre (par défaut dans Mes Documents).
- Lancer Synchronie et lire ce fichier en format TXT (après avoir remonté au bon dossier).

1.3 – Expériences à réaliser

Mesurer (par exemple au chronomètre) les périodes correspondant aux deux modes d'oscillation en les excitant sélectivement (par exemple en choisissant des conditions initiales adéquates)

Ensuite mesurer la période des battements.

Faire ces mesures pour deux valeurs du couplage

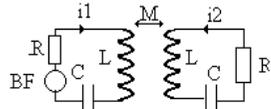
Dans un deuxième temps, enregistrer le mouvement des 2 pendules avec Vidéocom et retrouver les résultats précédents en utilisant la Transformée de Fourier.

On peut aussi faire une étude énergétique.

2. En électricité : Circuits RLC couplés par mutuelle

Rappels

On étudiera le cas de 2 circuits identiques couplés par l'inductance mutuelle M entre les deux bobines, le circuit 1 étant alimenté par un générateur de tension V_1 .



I_1 et I_2 étant les courants dans les 2 circuits, on arrive aux équations couplées ci-dessous :

$$\underline{V}_1 = \underline{Z} I_1 + j M \omega I_2$$

$$0 = \underline{Z} I_2 + j M \omega I_1$$

$$\text{avec } \underline{Z} = R + j(L\omega - 1/C\omega)$$

$$\text{d'où } I_2 = -j M \omega \underline{V}_1 / (Z^2 + M^2 \omega^2)$$

A la résonance d'un circuit isolé, la pulsation ω_0 vérifie $LC \omega_0^2 = 1$

On pose $k = M/L$ coefficient de couplage

$$Q = L\omega_0 / R, \text{ coefficient de qualité d'un circuit}$$

On arrive à $\underline{Z} = R(1 + jQ(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega))$

On étudie la réponse des circuits à des fréquences pas très éloignées de la fréquence propre de chacun et on pose $h = (\omega - \omega_0)/\omega_0$

$$\text{Alors } \underline{Z} \approx R(1 + 2jQh) \quad \text{et} \quad M\omega \approx kQR$$

$$I_2 \approx j k Q \underline{V}_1 / R[(1+2jQh)^2 + k^2 Q^2]$$

A la fréquence de résonance f_0 ($h = 0$), le module du courant I_2 s'écrit

$$I_2 = k Q \underline{V}_1 / R(1 + k^2 Q^2)$$

Ce courant passe par un maximum pour $kQ = 1$: contrairement à ce que l'on pourrait penser, le courant n'est pas maximum pour le couplage le plus élevé : $I_{2\text{Max}} = kQV_1/2R$

Lorsque h est différent de 0, l'évolution du courant en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de couplage n'est pas aussi simple que pour un circuit unique.

Analytiquement, en posant $x = 2Qh$ et $n = kQ$ (indice de couplage), l'expression de I_2 s'écrit

$$I_2/I_{2\text{Max}} = 2n / (n^2 + 1 - x^2 + 2jx)$$

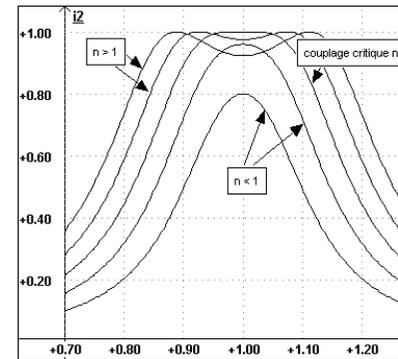
Et dont le module s'écrit $2n / [(n^2 + 1 - x^2)^2 + 4x^2]^{1/2}$

Conclusion

Pour $n < 1$, la courbe $I_2(f)$ présente un maximum pour $x = 0$ c'est à dire pour f_0

Pour $n > 1$, la courbe présente 2 maximums pour $x = \pm (n^2 - 1)^{1/2}$ soit pour les fréquences $f = f_0(1 \pm (n^2 - 1)^{1/2} / 2Q)$

Pour $n = 1$ (couplage critique), la courbe présente un « méplat » (maximum « plat ») (la dérivée s'annule jusqu'au 3^{ème} ordre). C'est un moyen pour créer un filtre passe-bande plus performant qu'un circuit résonnant simple.



Expériences

Prendre deux bobines de 1000 spires (inductance voisine de 38 mH) et deux condensateurs de 0.01 μ F. On placera au primaire une très faible résistance R_1 (pour pouvoir visualiser I_1) et au secondaire une résistance $R_2 = R_1 + R_g$ ($R_g = 50 \Omega$; résistance interne du générateur alimentant le circuit primaire).

Le coefficient de couplage $k = M/L$ dépend directement de la distance d entre les 2 bobines. La courbe $k = f(d)$ est fournie sur place (elle a été mesurée en déterminant au préalable la fem aux bornes de L_2 seul, le circuit 1 (RL) étant alimenté en alternatif $U = M\omega I_1$)

Oscillations libres

Alimenter le premier circuit en signal carré très basse fréquence.

Visualiser les intensités I_1 et I_2 et mesurer les fréquences propres et la fréquence des battements (par TF et par la période des battements). Faire varier le couplage

Oscillations forcées

Vérifier d'abord manuellement que pour le couplage maximum ($d=0$), l'intensité au secondaire (mesurée par la tension aux bornes de R_2) présente 2 maxima lorsqu'on fait varier la fréquence du générateur.

Visualiser simultanément le courant au primaire et au secondaire : que peut-on dire du déphasage entre les 2 courants pour ces 2 fréquences de résonance ?

Se placer à la fréquence de résonance d'un circuit unique (on peut la déterminer en prenant un couplage faible). Ensuite diminuer la distance entre les deux bobines : le courant I_2 passe par un maximum pour une distance correspondant au couplage critique.

Ensuite, enregistrer les courbes de résonance en intensité sur le 2^{ème} circuit pour différents coefficients de couplage $k = M/L$, de part et d'autre du couplage critique en utilisant l'analyseur de spectre ou la technique d'acquisition pilotée présentée plus loin (cela permet de superposer les différentes courbes).

Vérifier la valeur de k pour le couplage critique et les fréquences des 2 maxima (pour $k > k_{crit}$).

Complément : Acquisition pilotée

Un wobulateur est un générateur BF dont la fréquence est commandée par un signal extérieur (ou en interne) en forme de rampe (c'est une modulation de fréquence particulière).

La fréquence délivrée varie dans le temps entre une fréquence minimum et une fréquence maximum. On peut régler la plage de variation de la fréquence (excursion en fréquence) ainsi que la vitesse de variation de la fréquence en modifiant la « hauteur » de la rampe et sa fréquence.

Ici, la rampe sera élaborée par la sortie analogique de la carte d'acquisition.

Fabriquer cette rampe avec le logiciel Synchronie et la carte d'acquisition.

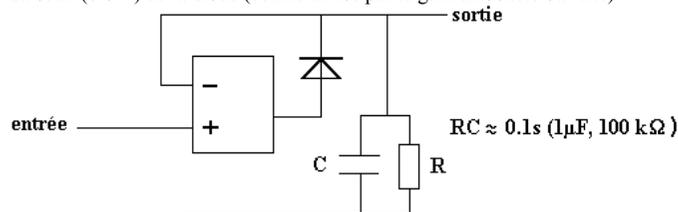
Régler le temps d'acquisition sur 10 s avec 200 points

Programmer une sortie analogique (SA1 par exemple)

Mettre un signal Rampe (il fait partie des signaux proposés) et le mettre en mode « émission pendant l'acquisition » c'est à dire que l'ordinateur va émettre chaque pas de la rampe suivi d'une acquisition du signal mis en entrée. On peut régler les bornes de la rampe (commencer avec 0V - 5V)

Regarder à l'oscillo qu'en lançant la rampe (F10) la fréquence du générateur varie entre F_{min} et F_{Max} .

Il ne faut pas acquérir le signal instantané (la tension aux bornes de R_2) mais seulement sa valeur crête. Le détecteur d'enveloppe (absolument identique à celui utilisé en modulation d'amplitude) est formé d'une diode et d'un circuit RC parallèle. L'AO permet de s'affranchir du seuil (0.6 V) de la diode (cela le divise par le gain en boucle ouverte)

**Procédure expérimentale**

Alimenter le circuit avec le générateur BF en fonctionnement normal (fréquence contrôlée manuellement) et déterminer la plage de variation de fréquence (f_{min} - f_{Max}) qui permet de

passer de part et d'autre des fréquences de résonance en visualisant la tension aux bornes de R_2 .

Ensuite, appliquer cette tension à l'entrée du détecteur d'enveloppe et vérifier son bon fonctionnement en visualisant à l'oscillo simultanément l'entrée et la sortie tout en faisant varier la fréquence.

Mettre le BF sur la fréquence f_{min} et appliquer en entrée wobbulation le signal de la rampe fournie par la sortie SA1 de la carte d'acquisition.

Acquérir le signal de sortie sur la voie 0 de la carte d'acquisition : la courbe de résonance se trace automatiquement.

Si la plage de variation de fréquence n'est pas convenable, on peut changer les tensions mini et Maxi de la rampe.

Améliorations

a - Si le signal est bruité, on peut améliorer

- en augmentant RC du détecteur
- en cochant « moyenne » dans les paramètres d'acquisition (mettre moyenne sur 100)¹

b - Si l'on désire tracer plusieurs courbes (pour plusieurs couplages), se servir de la fonction Copier une variable (dans Outils).

c - Pour finir, il faut tracer ces courbes en fonction de la fréquence (jusqu'à présent, elles sont tracées en fonction de t entre 0 et 10s).

Noter sur le fréquencemètre du générateur les fréquences correspondant aux valeurs Min et Max de la rampe. Pour cela, programmer la sortie sur Constante et donner la valeur Min (d'où F_{min}) puis Max (d'où F_{max}).

Dans la feuille de calcul, écrire $Freq = F_{min} + ((F_{max} - F_{min})/10) * t$

(cela redonne bien F_{min} pour $t=0$ et F_{max} pour $t=10$)

Il suffit ensuite de mettre en abscisse Freq

¹ Cela revient à effectuer 100 mesures au cours de la durée d'un échantillon et d'affecter la moyenne de ces 100 mesures au contenu de l'échantillon.

MONTAGE 23**Mesure de longueurs d'onde****1 - En optique**

1.1 - Avec réseau

1.2 - Mesure d'un doublet avec l'interféromètre de Michelson

2 - En acoustique (sonore ou ultrasonore)

En ondes progressives ou par des phénomènes d'interférences ou d'ondes stationnaires

3 - En hyperfréquences : ondes stationnaires dans un guide (λ_{guide}) ou avec un « Michelson » (λ_{libre}). Vérification de la relation entre les deux longueurs d'onde.

On pourrait aussi faire des mesures en mécanique (corde de Melde, ondes à la surface d'un liquide). Une autre façon de présenter ce montage serait de regrouper les mesures par type (interférences...)

Biblio Duffait CAPES 204-206 ; 270-271 ; 245-246 ; 277-279 ; Duffait Optique 76-77 ; 121-132

MONTAGE 24**Mesure d'impédances**

La plus grande partie du montage concernera des impédances électriques mais il n'est pas exclu de traiter aussi d'autres domaines

Impédances électriques Voir Duffait CAPES 44-47 ; Duffait-Lievre 13-22 ; montage 13 Haut-Parleur article de R.Moreau BUP 744

Impédances en hyperfréquences : voir Quaranta tome 4 , méthode de l'abaque de Smith

MONTAGE 25**Interférences**

Reprendre les différents domaines comme en montage 23 (voir aussi texte en fin de fascicule)

MONTAGE 26**Diffraction****1 - Diffraction de Fresnel**

Qualitatif : bord d'écran, fil, trou circulaire

2 - Diffraction de Fraunhofer

Diffraction par une fente. Mesure du profil avec barrette de photodiodes ou détecteur motorisé

L'utilisation du dispositif Caliens donne de très bons résultats (voir texte en fin de fascicule)

Diffraction par un trou : tache d'Airy

Théorème de Babinet sur les écrans complémentaires

3 - Applications

Strioscopie

Pouvoir de résolution des instruments d'optique

4 - Autres domaines (facultatif)

Ultrasons, ondes à la surface d'un liquide, ondes EM hyperfréquences

Biblio Duffait Optique 38-49 ; Duffait CAPES 284 ; 274 ; 270

MONTAGE 27**Spectroscopie à réseau**

Ce montage nouveau (2006) est en grande partie commun avec le montage 6 (et 5) .
Inattention du jury ? !!

MONTAGE 28**Ondes stationnaires**

Reprendre les différents domaines. Etudier plus précisément la corde de Melde qui permet de bien mettre en évidence la différence entre une onde stationnaire à 2 ondes (lorsque la longueur de la corde est quelconque) et le phénomène de résonance qui se produit lorsque $l = k \lambda / 2$ et qui correspond à des interférences à ondes multiples.

En acoustique : tube de Kundt. Permet de déterminer la longueur d'onde donc la vitesse de propagation.

Pour les hyperfréquences, déterminer le taux d'ondes stationnaires (TOS) qui permet de remonter au coefficient de réflexion (et même à l'impédance en utilisant l'abaque de Smith).

Biblio Duffait 245-246 ; Quaranta tome 4

MONTAGE 29**Résonance**

Etudier en détail le phénomène en électricité mais illustrer aussi dans d'autres domaines (mécanique, acoustique, résonance optique)

1 - Circuit RLC

Diagramme de Bode amplitude (courant) et phase : tracé point par point ou automatique (avec wobulateur et détecteur d'enveloppe), détermination de la fréquence de résonance, de la bande passante à -3dB, du coefficient de surtension aux bornes de C ; ceci pour plusieurs valeurs de R.

Biblio Duffait CAPES 48-52

2 - Autres domaines

Mécanique Duffait CAPES 242-246

Acoustique Duffait CAPES 278-279

Optique Duffait Optique 132-133

MONTAGE 30**Propagation d'une onde****1 - Mise en évidence qualitative de la propagation d'une onde**

Avec la cuve à ondes ou l'échelle de perroquet. Déterminer approximativement la vitesse de propagation .

Nécessité d'un milieu de propagation (pour les ondes mécaniques) : cloche à vide et vibreur

2 – Détermination de la vitesse de propagation**2.1 – Acoustique**

Voir montage 4

2.2 – Electromagnétisme (lumière)

Voir montage 25

3 – Propriétés de la propagation**2.1 Propagation en ligne droite**

En optique en utilisant les dispositifs à pinceau lumineux. Illustrer la réfraction due au changement de vitesse de propagation

2.2 – Limite de validité : diffraction

Voir montage 26

2.3 – Propagation guidée

Illustration avec la fibre optique

En ondes Hyper fréquences ou en ultrasons Modes de propagation guidée dans un tuyau en US

On émet des trains d'ondes courts dans le tuyau de PVC de 3 mètres : mesurer les temps de propagation des premiers modes (émettre des trains d'onde courts en utilisant le boîtier Electrome) d'où les vitesses de propagation que l'on peut vérifier à partir de la formule ci-dessous. On peut renforcer certains modes en décentrant et en inclinant l'émetteur (et le récepteur). Voir l'article BUP 742(1992)385

$$\frac{1}{\lambda_0^2} = \frac{1}{\lambda_g^2} + \frac{1}{\lambda_c^2}$$

Dans cette relation, analogue à celle obtenue en ondes EM, λ_0 est la longueur d'onde en propagation libre et λ_c la longueur d'onde de coupure imposée par les dimensions transversales du guide. Dans le cas d'un tuyau de section circulaire de rayon a , on a $\lambda_c = 2\pi a/\mu_{nm}$; μ_{nm} est la valeur de la variable r pour laquelle la fonction de Bessel J_n d'ordre n admet son $m^{\text{ième}}$ maximum. Le tableau ci-dessous donne les valeurs correspondantes :

Ordre n	μ_{n1}	μ_{n2}	μ_{n3}
0	0	3.83	7.01
1	1.84	5.33	8.54
2	3.05	6.71	9.97
3	4.20	8.01	

Le mode 0,1 correspond à $\lambda_c = \infty$ soit $\lambda_g = \lambda_0$: c'est l'onde plane habituelle se propageant à la célérité des ondes libres. Les autres modes se propagent à des vitesses inférieures. On verra essentiellement les modes (0,1) et (0,2). Comparer leur extension transversale.

Transformateur monophasé**Etablissement expérimental d'un modèle ; validation du modèle par un essai****1 - Présentation**

Un transformateur monophasé se compose d'une carcasse en fer feuilleté sur laquelle deux bobinages (généralement) distincts : le primaire (nombre de spires n_1) et le secondaire (n_2). L'application d'une tension alternative au primaire y crée un courant donc un flux magnétique variable. Cela va créer dans le secondaire une fem d'induction pouvant faire passer un courant dans un circuit d'utilisation.

2 - Transformateur parfait

On établit d'abord une modélisation du transformateur moyennant quelques hypothèses simplificatrices (transformateur parfait).

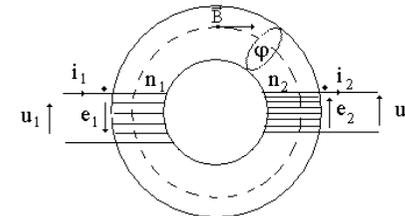
- les résistances des bobinages sont nulles
- le flux magnétique est entièrement canalisé par le circuit magnétique
- il n'y a pas de pertes dans le circuit magnétique (ni hystérésis ni courants de Foucault)
- on néglige le courant à vide devant le courant d'utilisation (c-à-d que l'on considère la perméabilité du fer infinie).

On pose $n_2/n_1 = m$ rapport de transformation

On utilise la convention récepteur pour le primaire et la convention générateur pour le secondaire et les fem d'induction e_1 et e_2 sont orientées dans le sens des courants i_1 et i_2 .

On définit aussi les bornes homologues, repérées par des points sur le schéma : lorsque les courants entrent par ces bornes, les flux magnétiques créés dans le noyau sont de même signe. Le flux magnétique créé par i_2 est donc négatif.

D'où le schéma :

**Loi de Faraday**

$$e_1 = -n_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow e_2/e_1 = m$$

$$u_1 = -e_1 ; u_2 = e_2 \Rightarrow |u_2/u_1| = m$$

Théorème d'Ampère

Avec la définition des bornes homologues, le théorème d'Ampère s'écrit

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = \int_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \ell \phi / \mu S = \mathfrak{R} \phi$$

\mathfrak{R} est la réluctance du circuit magnétique (ℓ longueur du circuit magnétique, S sa section, μ la perméabilité du matériau)

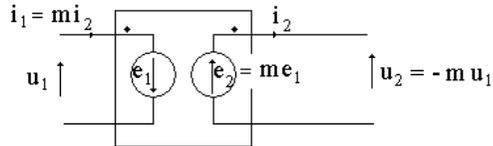
$$\text{A vide : } i_2 = 0 \Rightarrow n_1 i_1 = \mathfrak{R} \phi$$

i_{1v} est le courant primaire à vide ; il est très inférieur au courant i_1 en charge mais il crée un flux qui est le même lorsque le transformateur est en charge sous la même tension u_1 ($u_1 = n_1 d\phi/dt$).

Alors, en négligeant i_{1v} , on a $n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0$

$$i_1 / i_2 = m$$

D'où le schéma équivalent du transformateur parfait



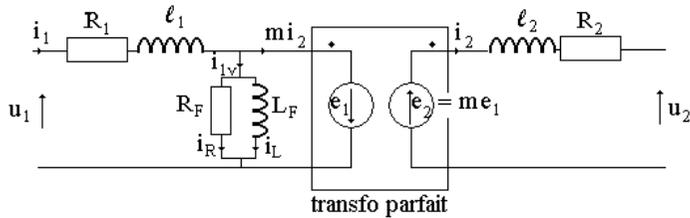
3 - Transformateur réel

1 - On linéarise le circuit magnétique en introduisant une inductance L_F de magnétisation, les pertes dans le circuit magnétique étant représentées par une résistance équivalente R_F telle que $P_F = u_1^2 / R_F$

2 - les résistances des bobinages sont notées R_1 et R_2

3 - les fuites de flux magnétique sont modélisées par l'existence des inductances ℓ_1 et ℓ_2 ; elles ne correspondent pas aux inductances des bobines et ne peuvent être mesurées directement.

Le schéma équivalent du transformateur réel ainsi modélisé est alors



3.1 - Fonctionnement à vide

$$i_2 = 0 \Rightarrow i_1 = i_{1v}$$

On néglige $(R_1 + j\ell_1\omega) i_1$ devant u_1

$u_1 = -e_1$: la loi des tensions du transfo parfait est vérifiée à vide

$$\underline{i}_{1v} = \underline{i}_R + \underline{i}_L \text{ avec}$$

$$\underline{i}_R = u_1 / R = i_{1v} \cos \varphi$$

$$\underline{i}_L = u_1 / L\omega = i_{1v} \sin \varphi \text{ (courant magnétisant)}$$

Les puissances active et réactive mesurées au primaire à vide sont alors (les grandeurs notées en majuscule sont les valeurs efficaces) :

$$P_{1v} = U_1^2 / R_F \quad (= U_1 I_{1v} \cos \varphi)$$

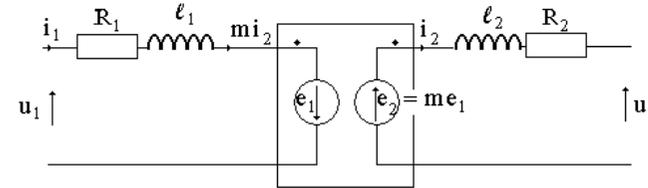
$$Q_{1v} = U_1^2 / L_F \omega \quad (= U_1 I_{1v} \sin \varphi)$$

Les mesures de P_{1v} (avec un wattmètre) et Q_{1v} (avec certains wattmètres numériques, sinon à partir de $Q = (S^2 - P^2)^{1/2}$ où la puissance apparente $S = U.I$) permettent de déterminer les valeurs de R_F et L_F

3.2 - Hypothèse de Kapp

Dans cette hypothèse, on néglige le courant à vide (i_{1v}) devant le courant d'utilisation (i_2) c'est-à-dire que le transformateur est parfait pour les courants.

Le schéma équivalent se simplifie alors en



$$u_1 = (R_1 + j\ell_1\omega)m i_2 - e_1$$

$$u_2 = m e_1 - (R_2 + j\ell_2\omega)i_2$$

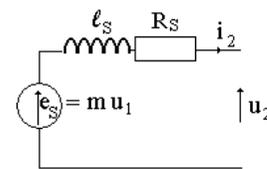
Après quelques calculs, on obtient

$$u_2 = m u_1 - Z_S i_2 \text{ avec } Z_S = R_S + j X_S = R_S + j \ell_S \omega$$

$$R_S = R_2 + m^2 R_1$$

$$\ell_S = \ell_2 + m^2 \ell_1$$

Le modèle équivalent de Thévenin du transformateur vu par la charge est donc



Pour déterminer ces éléments, on fait

a - une **mesure à vide** permet de déterminer la force électromotrice $e_S = u_2 = m u_1$

b - une **mesure en court-circuit** au secondaire (et à très faible tension au primaire) permet de déterminer Z_S dont on connaît la composante résistive $R_S = R_2 + m^2 R_1$ et le module : $u_2 = 0 \Rightarrow m u_1 = Z_S i_2$

$Z_S = m U_1 / I_2$ où U_1 et I_2 sont les valeurs efficaces de la tension au primaire et du courant au secondaire.

Ces deux mesures sont obtenues par deux essais qui ne mettent en jeu que des puissances faibles mais elles permettent de caractériser le transformateur même pour des utilisations avec des puissances beaucoup plus importantes.

Remarque :

Comme généralement, dans un « bon » transformateur, $Z_S I_2$ est beaucoup plus faible que U_2 , il est intéressant d'exprimer la chute de tension ΔU_2 entre la tension de sortie à vide $U_{2v} = mU_1$ et la tension en charge.

En appelant φ_2 le déphasage courant-tension au secondaire, on peut montrer que

$$\Delta U_2 \approx R_S I_2 \cos \varphi_2 + \ell_S \omega I_2 \sin \varphi_2$$

Les transformateurs démontables utilisés dans l'exemple plus loin ne vérifient pas du tout cette approximation

3.3 - Rendement du transformateur

L'essai en court-circuit permet la détermination des **pertes dans le cuivre**

$$P_{Cu} \approx R_S I_2^2$$

L'essai à vide sous la tension primaire U_1 permet de déterminer les **pertes dans le fer**

$$P_{Fe} = P_{1v} = U_1^2 / R_F$$

Le rendement du transformateur peut alors être calculé (méthode des pertes séparées) :

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (= U_2 I_2 \text{ si la charge est résistive par exemple})$$

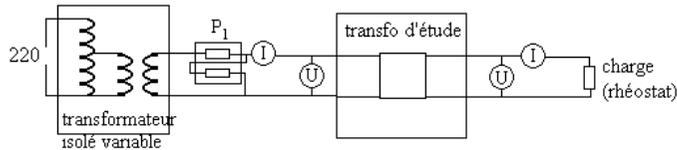
$$P_1 = P_2 + P_{Cu} - P_{Fe}$$

On peut montrer que le rendement du transformateur est maximum lorsque $P_{Cu} = P_{Fe}$

4 - Exemple de mesures

On utilise un transformateur démontable avec 1000 spires (8Ω) au primaire et 500 spires (3Ω) au secondaire (chacune des bobines possède un point milieu, on peut alors réaliser les rapports $m = 1/2$ - le cas décrit ci-dessous -, 1 ou $1/4$).

On alimente le transformateur d'étude avec un transformateur variable isolé branché sur le secteur 220V 50 Hz. On place les différents appareils de mesure : voltmètre et ampèremètre au primaire et au secondaire ainsi qu'un wattmètre au primaire. On se restreindra à une charge résistive au secondaire.



A vide (on ouvre le circuit au secondaire)

$U_1 = 100 \text{ V}$; $U_2 = 49.2 \text{ V}$ (donc rapport de transformation $m = 0.492$, très voisin de la valeur théorique)

$$I_2 = 0$$
 ; $I_1 = 0.058 \text{ A}$

$$P_{1v} = 2.5 \text{ W}$$

On en déduit $R_F = U_1^2 / P_{1v} = 4000 \Omega$

$$Q_{1v} = (U_1^2 I_1^2 - P_{1v}^2)^{1/2} = 5.2 \text{ VAR} \Rightarrow L_F = 6 \text{ H}$$

Les pertes fer (pour $U_i = 100\text{V}$) sont de $P_{Fe} = 2.5 \text{ W}$

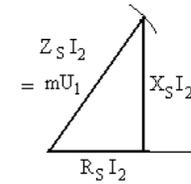
Court-circuit (on ne laisse que l'ampèremètre au secondaire)

On alimente à partir d'une tension faible et on augmente pour se fixer par exemple $I_2 = 1 \text{ A}$

$$I_1 = 0.556 \text{ A}$$
 ; $U_1 = 89 \text{ V}$; $P_1 = 8 \text{ W}$

$$Z_S = 44.5 \Omega$$

Comme $R_S = R_2 + R_1/4 = 5 \Omega$, on a $X_S = \ell_S \omega = 44 \Omega$ avec la construction de Fresnel suivante :



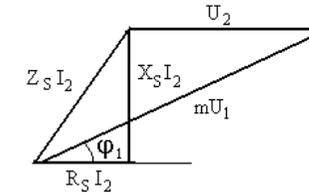
Les pertes fer dans cet essai sont de U_1^2 / R_F soit environ 2 W. Les pertes cuivre (pour $I_2 = 1 \text{ A}$) sont alors de $8 - 2 = 6 \text{ W}$.

Mesures en charge

Exemple A (on place un rhéostat de $\approx 26 \Omega$ et on règle la tension d'alimentation pour avoir $I_2 = 1 \text{ A}$)

$$U_1 = 110 \text{ V}$$
 ; $I_1 = 0.56 \text{ A}$; $P_1 = 34 \text{ W}$

$$U_2 = 25.9 \text{ V}$$
 ; $I_2 = 1 \text{ A}$



Par la construction de Fresnel, on peut vérifier que $mU_1 = ((R_S I_2 + U_2)^2 + (X_S I_2)^2)^{1/2}$

Ici , on trouve $mU_1 = 54 \text{ V}$ et l'autre membre $((R_S I_2 + U_2)^2 + (X_S I_2)^2)^{1/2} = 53.6 \text{ V}$

On peut également déterminer le déphasage entre U_1 et I_1 (qui est celui entre mU_1 et I_2 donné par la construction)

$$\cos \varphi_1 \text{ (construction)} = 30.9/54 \Rightarrow \varphi_1 = 55^\circ$$

$$\cos \varphi_1 \text{ (wattmètre)} = 34/0.56 \cdot 110 \Rightarrow \varphi_1 = 56^\circ$$

Rendement $P_2 / P_1 = 25.9/34 = 76 \%$

On retrouve bien à peu près $P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}$ (34 et 34.9). On calcule P_{Fe} par U_1^2 / R_F

Exemple B (rhéostat de 53.6Ω)

$$U_1 = 150 \text{ V}$$
 ; $I_1 = 0.56 \text{ A}$; $P_1 = 64 \text{ W}$

$$U_2 = 53.6 \text{ V}$$
 ; $I_2 = 1 \text{ A}$

$$mU_1 = 74 \text{ V}$$

$$((R_S I_2 + U_2)^2 + (X_S I_2)^2)^{1/2} = 73.5 \text{ V}$$

$$\cos \varphi_1 \text{ (construction)} = 58.6/74 \Rightarrow \varphi_1 = 38^\circ$$

$$\cos \varphi_1 \text{ (wattmètre)} = 64/0.56 \cdot 150 \Rightarrow \varphi_1 = 40^\circ$$

Rendement $P_2 / P_1 = 53.6/64 = 84 \%$

On retrouve bien à peu près $P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}$ (64 et 65.2)

DIFFRACTION ET INTERFERENCES

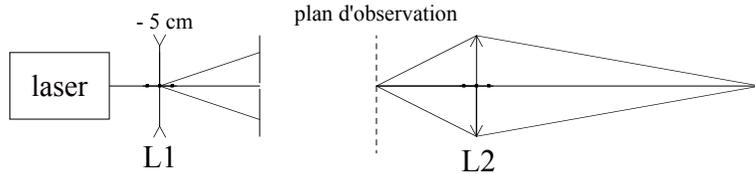
1 – Diffraction de Fresnel

C'est la situation la plus générale : en l'absence d'objet diffractant (OD), l'écran doit être uniformément éclairé.

Mettre en évidence, visuellement, les figures correspondant au bord d'écran, à une fente (influence de sa largeur), à un fil (influence de sa largeur), à un trou circulaire (diamètre de 0.5 à 4 mm), à un écran opaque (tache de Poisson).

Montrer l'influence des distances source-objet et objet-écran.

La lentille L1 permet de créer un point source (virtuel si la lentille est divergente) à distance finie et d'élargir le faisceau pour éclairer l'OD entièrement. La lentille L2 permet d'agrandir le phénomène (prendre une courte focale 5 ou 10 cm). Si l'on utilise un épureur (faisceau élargi et épuré), la lentille L1 est de focale 20 ou 30 cm (on peut même s'en passer).



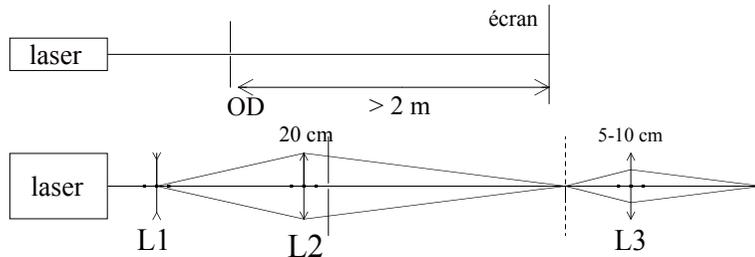
Enregistrement des figures avec CCD Caliens : utiliser une source Quartz-iode (voir annexe 1).

2 – Diffraction de Fraunhofer

C'est la situation particulière où l'on observe dans le plan de l'image de la source : en l'absence d'OD, on observe seulement un point lumineux, le reste de l'écran n'est pas éclairé (c'est la condition pour que le théorème de Babinet soit valide).

Montage A suffisant lorsque l'OD est de très faible dimension. Mesures quantitatives sur les dimensions des figures à faire dans ces conditions.

Montage B préconisé dans le cas contraire (L2 forme l'image de la source, L3 agrandit le phénomène).



Montrer sur l'écran les figures correspondant à une fente, 2, n fentes, un trou circulaire, N écrans au hasard (diamètre des grains de la poudre de lycopode).

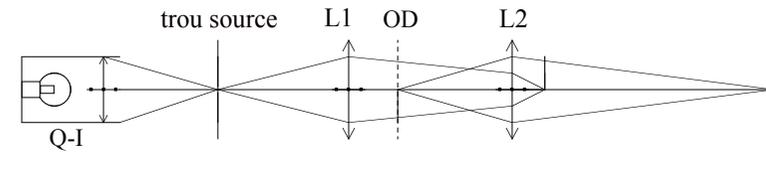
Faire des enregistrements (voir Caliens, utiliser plutôt une diode Laser) et les exploiter numériquement (largeur, profil).

Illustrer le théorème de Babinet (fil-fente, réseaux complémentaires).

Faire au moins une expérience en lumière blanche (fente, poudre de lycopode). Il faut naturellement rendre la source cohérente spatialement en faisant converger la lumière issue de la Q-I sur un trou (ou une fente si l'OD possède cette symétrie).

3- Applications

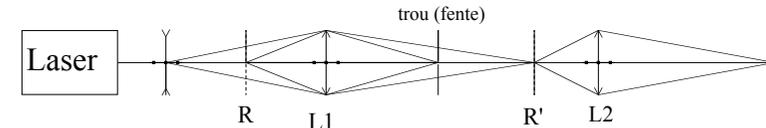
Strioscopie (en lumière blanche) : OD : fils opaques puis fragments de plume.



En l'absence d'OD, l'écran doit être noir puisque toute la lumière est arrêtée par l'écran opaque (extrémité d'une tige) qui doit être placé au point de convergence du faisceau issu de la source (image du trou à travers L1 et L2).

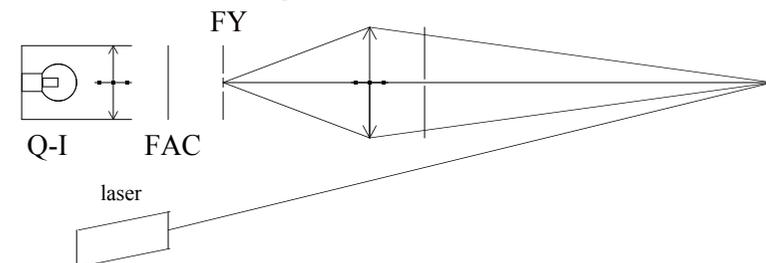
La lentille L1 (qui a un rôle de condenseur) n'est pas indispensable. Elle améliore le champ visible de l'objet mais ajoute de la lumière parasite.

Filtrage des fréquences spatiales (Abbe)



R est un réseau à deux dimensions (grille 10 t/mm) et R' son image (modifiée par le filtre spatial) par L1. La fente qui sert de filtre spatial est située dans le plan de l'image de la source Laser par L1. La lentille L2 (courte focale 5 cm) agrandit l'image R'.

Résolution des instruments. Expérience de démonstration



On fait l'image des fentes de Young (protégées par le filtre anticalorique) avec une lentille de projection. On diaphragme ensuite la lentille avec une fente réglable jusqu'à ne plus séparer les 2 fentes. On place ensuite cette fente sur le faisceau Laser (que l'on avait dirigé sur l'image d'une des 2 fentes) : la figure de diffraction doit être telle que le 1^{er} minimum est situé sur l'autre fente (l'expérience marche encore mieux avec un laser vert dont la longueur d'onde est plus voisine du maximum de sensibilité de l'œil).

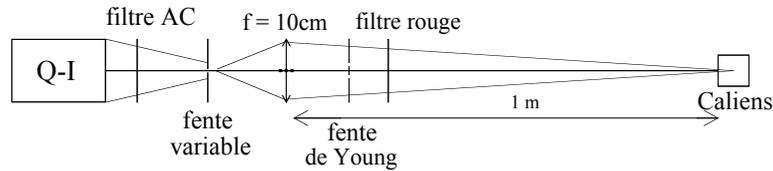
4 - Interférences non localisées

Miroirs de Fresnel, fentes de Young avec le Laser puis en lumière blanche (visualisation avec oculaire micrométrique à l'œil puis avec une caméra). Interposer des filtres (cohérence temporelle).

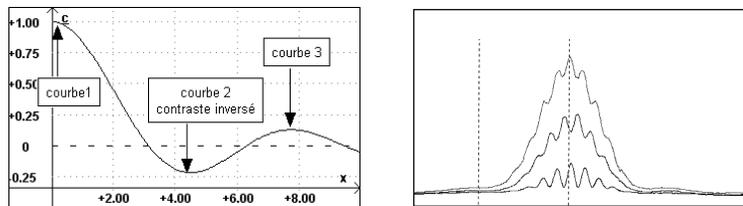
Influence de la cohérence spatiale (largeur de la source) avec Caliens :

Eclairer la fente source (protégée par le filtre anti-calorique) de largeur variable et placer Caliens dans le plan de son image par la lentille convergente. Placer un filtre coloré (par exemple rouge) pour améliorer la cohérence temporelle.

Partir d'une fente source très étroite : les franges sont très contrastées ($C = (I_M - I_m) / (I_M + I_m)$) : $C=1$. En élargissant la fente, on diminue le contraste jusqu'à l'annuler (plus de franges d'interférences). Ensuite, les franges réapparaissent en contraste inversé et plus faible (la frange centrale est sombre). On peut observer une deuxième annulation puis une nouvelle réapparition. Si la largeur L de la fente source est calibrée, on doit pouvoir vérifier que la première annulation se produit pour une largeur telle que $L = d \cdot i / D = \lambda \cdot d / a$ (D : distance FY-Caliens, d : distance fente source – FY, a : distance des fentes d'Young).



La figure ci-dessous présente l'enregistrement avec Caliens des figures d'interférences observées avec 3 largeurs de fente source. On voit bien la diminution du contraste et les inversions successives.



Différentes expériences avec la barrette CCD CALIENS

Ce capteur est une barrette CCD de 2.9 cm de longueur comprenant 2048 diodes (pixels) distants de 14 μm et de 0.2mm de haut. Il est piloté (via un boîtier de commande) par le PC. Le logiciel a prévu quelques applications « standard » : diffraction et interférences, spectrométrie, Michelson.

La sensibilité (très grande) d'un capteur CCD n'est pas réglable directement : on peut agir sur le temps d'intégration (c.-à-d. la période de lecture) dans une plage assez réduite (de 1 à 16). On agit plutôt sur des absorbants (amovibles) montés à l'avant (polariseur- analyseur plus ou moins croisés, filtre).

La conversion analogique – numérique de l'intensité lumineuse s'effectue sous 8 bits (soit 256 niveaux). Cela donne une précision limitée (mais encore convenable) lorsqu'on compare des intensités très différentes (par exemple le pic central et le premier maximum secondaire d'une figure de diffraction par une fente).

Réaliser les branchements :

- le capteur sur le boîtier de commande
- le boîtier sur le port parallèle du PC (à la place de l'imprimante)
- éventuellement un oscilloscope de contrôle sur le boîtier

Lancer le logiciel CALIENS

1 - Figures de diffraction avec CALIENS

Il est préférable d'utiliser une diode Laser). En diffraction de Fresnel, on peut utiliser un HeNe muni d'épurateur et d'élargisseur mais il est bien préférable de travailler en lumière blanche (voir paragraphe 4) à cause du « speckle » du laser.

En diffraction de Fraunhofer, régler la lentille de sortie de la diode Laser pour obtenir un point sur l'écran. Placer l'objet diffractant (1 ou n fentes) sur le faisceau et observer la figure de diffraction.

Remplacer l'écran par CALIENS. Positionner le capteur verticalement en vérifiant directement sur le PC en mode **acquisition en temps réel**. Toutes les mesures peuvent se faire en lumière ambiante ou en petite pénombre (surtout avec le filtre absorbant).

Faire tourner le polariseur pour se placer en limite de saturation sur le pic central (l'analyseur est inutile car la diode Laser est déjà polarisée rectilignement).

Faire l'acquisition par **F8**.

On peut améliorer en réglant le filtrage et le moyennage (paramètres) :

- le filtrage est en fait un lissage sur les pixels voisins. Si l'on augmente trop l'ordre du filtrage, on risque d'atténuer les variations rapides d'intensité. Commencer par prendre 5 par exemple. En mode temps réel, on voit l'effet par action sur l'icône
- Le moyennage est une méthode de réduction de bruit par accumulation de plusieurs acquisitions. Ce nombre est réglable jusqu'à 49 : en lançant l'acquisition (F8), on voit le déroulement des n acquisitions (si l'icône Σ est activée).

Il est possible de faire des mesures de largeur et d'intensité dans CALIENS avec les curseurs mais on ne dispose pas de loupe verticale. Une exploitation intéressante peut être faite en exportant le tableau de valeur en format .TXT Excel ou Synchronie (Fichier – Exporter – Synchronie).

Exploitation avec Synchronie

Lancer Synchronie

Ouvrir le fichier de type .TXT (il se trouve par défaut dans Program Files – Ulice - Caliens - courbes).

On retrouve le tracé précédent, les variables étant position et intensité.

Pour vérifier qu'une figure de diffraction par une fente seule possède un profil en $[\sin(x)/x]^2$, il faut effectuer un changement de variable (feuille de calcul) sachant que le centre de la figure (situé en d_0) correspond à $x = 0$ et que le premier minimum (en d_1) correspond à $x = \pi$ (utiliser le réticule pour noter ces valeurs)

$$x = \pi(\text{position} - d_0)/(d_1 - d_0)$$

Ensuite, si I est l'intensité au sommet du maximum central, on fait calculer et tracer

$$I_{th} = I [\sin(x)/x]^2$$

S'il y a un petit décalage vertical, on peut l'introduire dans la feuille de calcul.

Remarque : si le tracé fait apparaître un point d'intensité nulle au centre, c'est que Synchronie gère mal la fonction $\sin(x)/x$ pour $x = 0$. Pour éviter cet « accident », mettre une décimale de plus sur d_0 .

Il serait même possible d'ajuster par modélisation par fonction utilisateur du type

$$a * (\sin(b * (\text{position} - c)) / (b * (\text{position} - c)))^2 + d$$

Il faut entrer des valeurs initiales convenables (a : hauteur du pic ; b : $\pi/(d_1 - d_0)$; c : d_0 ; d : décalage par rapport à 0). Par précaution, lancer le calcul en désactivant les ajustements : si la courbe tracée est assez proche de la réalité, on peut rendre actives les variables a, b, c, d.

2 – Spectrométrie

On procède comme pour une projection sur un écran. On remplace ensuite l'écran par CALIENS. La taille du détecteur est de 29 mm seulement (mais la résolution spatiale excellente : 14 μm) : il faut donc adapter la région étudiée du spectre à cette dimension.

Si l'on s'intéresse à une région limitée (par exemple le doublet jaune du Hg) on peut utiliser un réseau assez dispersif (600 t/mm). Si l'on veut le spectre entre 400 et 600 nm, il faut utiliser un réseau moins dispersif et/ou faire une projection plus rapprochée.

Les lampes spectrales sont généralement alimentées en alternatif : la luminosité est variable de période 50 ou 100 Hz. Les sensibilités 2, 6 10 ou 14 permettent de minimiser ces fluctuations (le temps d'intégration étant un multiple de la période).

Dans le logiciel, sélectionner (éventuellement) l'onglet **spectrométrie**.

Comme en 1, visualiser en temps réel pour régler la position et l'atténuation (garder seulement polariseur-analyseur). Il est préférable d'assombrir la pièce.

Spectre

Si l'on observe plusieurs raies du spectre (Hg ou Hg-Cd), il est possible de calibrer avec 2 (ou plus) raies de longueurs d'onde connues (par exemple la raie violette à 405 nm et une des raies du doublet jaune 577-579 nm).

On peut réaliser cette calibration dans Caliens mais la procédure n'est pas très commode et il est préférable d'exporter le fichier dans Synchronie où l'opération est plus évidente.

On note avec le curseur les positions d_1 et d_2 des raies λ_1 et λ_2 .

Dans la feuille de calcul, on calcule

$$a = (\lambda_2 - \lambda_1) / (d_2 - d_1)$$

$$b = \lambda_1 - a d_1$$

$$\lambda = a * \text{position} + b$$

On trace alors le spectre en fonction de λ

Quelques commentaires liés à des montages particuliers (extraits de rapports de concours).

Montage 1 : « 2008 : Les lois relatives à la dynamique de rotation sont souvent mal maîtrisées, l'exploitation des mesures faites est donc parfois erronée. »

« 2006 : Ne pas oublier de traiter la dynamique des solides en rotation. »

« 2005 : Il est souhaitable de s'intéresser à la rotation des solides (pendules, cylindres entraînés, éventuellement gyroscope...). Si l'on se limite au point matériel en rotation, on se contente de vérifier l'expression de la force centrifuge. »

Montage 2 : « 2006 : Ce montage doit permettre de faire des mesures quantitatives, par exemple de chaleur latente. Le tracé et la numérisation des tracés des isothermes de SF6 peuvent donner lieu dans certains domaines à des comparaisons avec des modèles : gaz parfaits... »

« 2005 : L'étude du temps de réponse des capteurs thermométriques est souvent faussée par leur conditionnement matériel. »

Montage 3 : « 2006 : Toutes les ondes acoustiques ne sont pas sinusoïdales, et elles peuvent se propager dans d'autres milieux que l'air. Il serait intéressant de mettre en évidence la nature de la grandeur propagée, ainsi que son caractère longitudinal (dans les fluides). »

Montage 4 : « 2007 : L'aspect qualitatif est important mais le jury attend aussi des mesures. Les limitations dues à la diffraction sont rarement abordées. »

« 2005 : Le montage doit explicitement répondre à la question : qu'est-ce qu'une image ? »

Montage 5 : « 2006 : Le candidat aura tout intérêt à utiliser deux goniomètres : un préréglé pendant la préparation, et avec lequel il effectuera les mesures précises que peut permettre un tel appareil, et un autre à l'aide duquel il démontrera les différentes étapes du réglage, et leur incidence sur les mesures. »

Montage 6 : « 2007 : A l'issue d'une mesure de longueur d'onde, la détermination de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur tabulée n'est pas suffisante, il est nécessaire d'évaluer l'erreur commise sur l'évaluation expérimentale. A l'occasion de l'utilisation du Michelson, le candidat doit être en mesure de justifier les conditions expérimentales choisies : conditions d'éclairage, choix et positions des lentilles... »

Montage 7 : « 2008 : Il est préférable d'utiliser un capteur linéaire pour conduire la vérification expérimentale de la loi de Malus. L'utilisation des lames $\lambda/2$ et $\lambda/4$ pose problème aux candidats ; il faut faire preuve de méthode dans la détermination des axes de la lame puis dans la succession des expériences présentées. »

« 2007 : L'étude ne doit pas se limiter à la polarisation rectiligne. L'utilisation des lames optiquement actives est souhaitée. »

« 2005 : La mesure de capacités ne doit pas se limiter à l'exploitation d'un régime transitoire de charge ou décharge ; les mesures usuelles en régime harmonique et les ponts de mesure peuvent être utilisés ; le principe des capacimètres peut être illustré. Enfin, les caractéristiques d'un condensateur ne se réduisent pas à la seule capacité. »

Montage 8 : « 2007 : L'étude énergétique d'un condensateur est rarement conduite. Les caractéristiques et les défauts d'un condensateur réel sont aussi importants. »

Montage 9 : « 2008 : Souignons, vu l'intérêt, qu'il faut conduire une étude du rendement du transformateur et de sa variation en fonction des conditions d'utilisation. »

« 2007 : L'étude du transformateur peut ne pas se limiter à des essais à vide et en court-circuit. »

« 2006 : Une bobine n'est malheureusement jamais une inductance pure : il est intéressant de mettre en évidence sa résistance (variable avec la fréquence) et sa capacité parasite. L'étude des transformateurs ne se fait pas forcément sous une tension efficace de 220V. On peut utiliser des transformateurs d'adaptation d'impédance pour haut-parleur ou de téléphone.)

« 2005 : Les phénomènes énergétiques mis en jeu dans un transformateur à noyau doivent être connus. Des essais à vide et en court-circuit permettent d'évaluer les pertes, par exemple avec wattmètre... Le rendement en charge devient accessible, soit par mesure directe, soit par « séparation des pertes ». Par ailleurs il est parfois souhaitable de caractériser les transformateurs d'isolement introduits dans les expériences. »

Montage 10 : « 2007 : Les caractéristiques métrologiques des capteurs (temps de réponse, sensibilité spectrale) sont rarement abordées, elles sont pourtant déterminantes dans le choix d'un capteur. »

« 2006 : On peut choisir plusieurs approches, la plus répandue est l'approche « industrielle » où l'on étudie les caractéristiques techniques d'un ou plusieurs capteurs (éviter le catalogue). Il faut alors s'attacher à illustrer l'importance et le rôle de ces caractéristiques : est-il vraiment important qu'un capteur soit linéaire par exemple ? Il est dommage que la question des sources de bruit qui limite la résolution du capteur soit presque toujours ignorée. »

« 2005 : Il faut éviter de présenter un catalogue de capteurs pour lesquels on effectue (ou fait effectuer ?) des mesures répétitives nombreuses mais non exploitées complètement. Les principales caractéristiques (sensibilité, résolution,...) d'un capteur doivent être illustrées. Un étalonnage et la réalisation d'un système de mesure complet peuvent être proposés. »

Montage 11 : « 2005 : Les conditions permettant de manipuler en toute sécurité doivent être connues et respectées. Pour « voir » aisément le phénomène d'induction créé par un aimant dans une bobine, le galvanomètre à cadre mobile est mieux adapté que l'oscilloscope. Enfin, il est peu admissible d'occulter les aspects énergétiques. »

Montage 12 : « 2005 : Il faut réaliser une mesure de champ élevé (quelques dixièmes de tesla) et donc utiliser un électroaimant. On peut s'intéresser aux champs variables, et même présenter le principe des moteurs triphasés. Il n'est pas inutile, par ailleurs, de connaître quelques caractéristiques des moteurs à courant continu, comme par exemple l'allure de la carte du champ à l'intérieur. »

Montage 13 : « 2006 : Contrairement à ce qui est prétendu dans certain ouvrage, tous les transducteurs ne sont pas réversibles (il existe par exemple des transducteurs piézo-résistifs). La mesure du rendement est plus facile et plus utile avec un moteur qu'avec un haut-parleur. »

Montage 14 : « 2008 : Il peut être pertinent de procéder à quelques acquisitions pendant la

présentation du montage. »

« 2007 : Le jury demande aux candidats de faire attention aux choix des voies de synchronisation lors des acquisitions de données. Il est souhaitable de ne pas se limiter à la réponse d'un système linéaire à un échelon de tension. »

« 2005 : Il est souhaitable de montrer et d'enregistrer (système d'acquisition, oscilloscope à mémoire) un signal véritablement transitoire. Attention par ailleurs aux conditions d'utilisation des oscilloscopes, dont le comportement sur les vois AC et DC n'est pas identique. »

Montage 15 : « 2008 : L'intérêt des filtres mérite d'être largement illustré. Il ne faut pas se limiter à l'utilisation du dB-mètre et du phasemètre. Il est indispensable d'utiliser un oscilloscope pour vérifier en particulier que les mesures se font toujours en régime linéaire. »

« 2007 : Le montage ne doit pas se limiter à l'étude des fonctions de transfert. Les applications de ces montages sont les bienvenues. »

« 2006 : Il est facile de faire de nombreuses mesures, qui ne sont utiles que si on les confronte sérieusement à un modèle, lui aussi généralement facile à établir (cf. remarque générale sur le traitement des données). Il faut montrer que le filtre, comme son nom l'indique, filtre, et donner des exemples où c'est utile. »

Montage 17 : « 2005 : Si l'on utilise une maquette toute préparée pour illustrer l'amplificateur de puissance, il faut être à même d'en expliquer le principe de fonctionnement et les améliorations apportées par des composants supplémentaires au schéma initial de principe, présents sur la maquette ; les mesures de rendement, qui peuvent être comparées aux prévisions théoriques, sont alors souhaitables. Dans le cas d'un montage amplificateur de tension effectué à partir d'un amplificateur opérationnel, les limites de fonctionnement du composant intégré doivent être exhibées : valeur maximale de l'intensité de sortie, bande passante « petits signaux », temps de commutation... Si l'on utilise un multimètre, il faut en maîtriser l'usage et les performances, y compris pour la fonction dBmètre. Enfin, il existe sur le marché d'autres composants que l'amplificateur opérationnel idéal. »

Montage 18 : « 2005 : Il est souhaitable de s'intéresser aussi à l'amplitude des oscillations observées, et pas seulement à leur fréquence. »

Montage 19 : « 2008 : Le critère de Shannon est souvent évoqué mais sa signification et son utilisation ne sont pas toujours comprises. Nous rappelons qu'il ne suffit pas que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure à deux fois la fréquence du fondamental mais à deux fois la fréquence de l'harmonique que l'on souhaite détecter. Les logiciels qui proposent l'analyse harmonique d'un signal réalisent une FFT et fonctionnent correctement avec un nombre de points égal à une puissance entière de 2. Le plus judicieux est d'utiliser l'ensemble des points acquis (compte tenu de la première remarque on choisira, par exemple, 2048 plutôt que 2000). »

« 2007 : L'analyse de Fourier de signaux périodiques à l'aide d'un logiciel demande des connaissances élémentaires sur les limites de résolution de la transformée de Fourier Rapide (FFT). »

« 2005 : L'outil informatique est peu contournable, mais il va de soi que la présence d'un montage expérimental d'analyse est pleinement justifiée. Il ne convient pas de développer à

l'excès l'étude de montages oscillateurs (à relaxation, quasi-sinusoidaux...). Pour la synthèse, on peut utiliser des dispositifs analogiques mettant en œuvre des fonctions non linéaires. »

Montage 20 : « 2008 : L'étude expérimentale des spectres des signaux après modulation et après démodulation est rarement bien conduite. »

« 2005 : L'utilisation du « multiplieur analogique » peut être précédée d'une phase préalable de caractérisation de ce composant. Il est possible d'envisager de présenter un dispositif à modulation d'amplitude, avec ou sans porteuse. Dans le montage illustrant la démodulation d'enveloppe, attention au choix de la constante de temps. Pour la modulation de fréquence, il est regrettable de se limiter à une approche qualitative, sans observer les caractéristiques des constituants du montage. Présenter une application liée aux télécommunications est encouragé.

Par ailleurs, l'acquisition, la visualisation, le traitement des signaux par des systèmes numérisés fait partie intégrante de ce montage. »

Montage 21 : « 2008 : Le choix des composants doit être explicité en fonction des fréquences de coupures désirées et par d'éventuelles considérations d'adaptation d'impédance. La plage d'acquisition des points expérimentaux doit être suffisamment étalée de part et d'autre des fréquences remarquables.

Dans ce montage le candidat n'est pas obligé de se restreindre à l'étude des filtres passifs. »

Montage 25 : « 2006 : Ce montage qui peut donner lieu à de belles expériences doit montrer l'existence des interférences, en dégager les propriétés et les conditions d'obtention, à cette occasion il est d'ailleurs utile d'illustrer la notion de cohérence. Mais il faut aussi montrer des exemples d'utilisation des interférences, par exemple en métrologie des longueurs. »

Montage 27 : « 2005 : Pour visualiser la diffraction, et de façon plus générale dans les montages d'optique, il est souhaitable de ne pas se limiter aux sources laser. Par ailleurs, le grandissement de montages doit permettre une observation non confidentielle et une exploitation aisée des figures observées. Le jury apprécie que soient présentés des aspects positifs de la diffraction, comme les expériences de striaoscopie. Enfin, les limites apportées par la diffraction aux performances d'un instrument d'optique doivent être étudiées, le cas échéant sur un montage très simple. »

Montage 28 : « 2006 : Il ne faut pas se limiter à des ondes sonores ou ultrasonores. On peut mesurer un taux d'ondes stationnaires. »

Montage 29 : « 2007 : Le jury attend au moins le tracé expérimental d'une courbe de résonance, le candidat ne peut se limiter à la mesure de la fréquence de résonance. »

« 2005 : Il est souhaitable d'évoquer le facteur de qualité. »

Montage 30 : « 2007 : Les mesures de vitesse de propagation (du son dans l'air ou dans l'eau par exemple) doivent être mises en perspective avec les valeurs tabulées qu'il est indispensable de connaître. Les éventuels désaccords observés sont à analyser avec méthode en analysant les causes d'erreur. »

Bibliographie

Ouvrages généraux.

La connaissance des programmes de Lycée est absolument **indispensable**.

Pensez à consulter systématiquement les Manuels des classes de Seconde, de première S et Terminales S, y compris l'enseignement de Spécialité. Quand il existe, consulter également le livre du Professeur. Pour quelques sujets, les manuels de Terminales STI Génie Electronique et génie Electrotechnique sont utiles.

Tout enseignant de Physique doit connaître et consulter le BUP (Bulletin de l'UdPPC Union des Professeurs de Physique-Chimie). C'est une mine d'informations, de propositions d'expériences, d'exemples de réalisation de dispositifs expérimentaux et de discussions sur les démarches pédagogiques pratiquées dans les classes. On peut consulter librement sur Internet (**BupDoc sur la Toile** accessible à partir du serveur national de recherche de l'UdPPC <http://www.udppc.asso.fr>) les articles complets (avec logiciel de recherche documentaire) jusqu'en 2000 et les sommaires des articles plus récents.

Ouvrages propres à la préparation de l'épreuve du montage de Physique.

- **Montages d'Electroniques à l'Agrégation** ; R. Duffait et J.-P. Lièvre ; Editions Bréal (1999)
- **Montages d'Optique à l'Agrégation** ; R. Duffait ; Editions Bréal (1997)
- **Expériences de Physique, Capes de Sciences Physiques**, R. Duffait ; 3^{ème} Edition Bréal (2008)
- **Les oscillateurs électriques et mécaniques**, J.-P. Lièvre ; CRDP Lyon (1996)
- **Lumière, son optique, télécommunication**, J.-P. Lièvre ; CRDP Lyon (1995)
- **Electronique Expérimentale**, M. Krob ; Editions Ellipses (2002)
- **Dictionnaire de Physique Expérimentale** ; Y. Quaranta et al ; Editions Pierron ; 4 volumes : Mécanique (2002) ; Thermodynamique (1997) ; Electronique (1992) ; Electricité (2004).
- **Travaux Pratiques d'Electronique** ; M. Vauchelles ; Editions Ellipses (1997)
- **Optique Expérimentale**, Sextant (collectif d'auteurs) ; Editions Hermann (1997)
- **Principes d'Electronique**, Malvino ; Editions Mac Graw-Hill (1988)
- **Le traité d'electronique analogique et numérique**, Horowitz et Hill, tomes 1 et 2 ; Editions Elektor
- **Montages de Physiques au Capes** ; J.-P. Bellier, C. Bouloy et D. Guéant, tomes 1 et 2 ; Editions Dunod (2004)
- **Nouvelles Expériences de Physique** ; D. Beaufils ; Editions Ellipses (2007)
- **Travaux Pratiques de Physique** ; R. Journeaux ; Editions de Boeck (1998)
- **Montages de Physique**, P. Charmont ; Editions Dunod (1999)

Ouvrages de culture générale en Physique.

- **Dictionnaire de Physique** ; J.-L. Basdevant et co-auteurs ; Editions Nathan (2007)
- **Atlas de la Physique** ; H. Breuer ; Le livre de Poche.

Le montage de physique de l'Agrégation Interne : conseils généraux.

Objectifs.

La physique se distinguant clairement des mathématiques par son aspect expérimental, il est bien naturel que le montage de physique soit une épreuve significative aux concours de recrutement des professeurs de sciences physiques en général, et au concours de l'agrégation interne en particulier.

L'expérience montre que de nombreux candidats abordent cette épreuve en s'en faisant une idée fautive. D'où de cruelles désillusions, en dépit d'un travail souvent important et sérieux... Il convient donc que vous vous y prépariez au mieux :

- dans l'optique du concours d'une part, car un candidat non préparé peut voir sa note basculer en dessous de 5/20, tandis qu'avec un tant soit peu de maîtrise et d'entraînement une note tout à fait honorable est à la portée de tous,
- dans l'optique de votre pratique pédagogique quotidienne d'autre part : il semble clair que notre enseignement doit devenir moins théorique et doit s'appuyer davantage sur le concret ; des expériences attrayantes et bien conduites sont une nécessité.

L'objectif de ces quelques pages est de vous donner des conseils généraux sur la manière de vous préparer à l'épreuve de montage en cours d'année, sur la manière de présenter le jour du concours de l'agrégation interne, ainsi que d'essayer de cataloguer les principales erreurs commises...

Quelques rappels « techniques ».

Au tout début des épreuves de l'oral, les admissibles sont convoqués à une séance publique où le Président leur donne un certain nombre de consignes d'une part, et procède à un tirage au sort d'autre part. Chaque candidat tire donc un numéro. Ce numéro détermine les horaires de passage des épreuves et s'il s'agit d'une leçon de Physique et d'un montage de Chimie, ou l'inverse. Le candidat a le choix entre deux montages tandis que la leçon est imposée, sans choix possible.

A l'issue de cette séance :

- n'oubliez pas de visiter la collection du matériel dont vous disposerez le jour de votre montage.
- Un candidat peut toujours demander qu'une maquette d'expérience réalisée en cours d'année figure dans cette collection. Elle doit alors être accompagnée d'une notice explicative qui en donne les principes de mise en œuvre et de fonctionnement, en sorte que tout autre candidat du Concours puisse l'utiliser sans difficultés particulière. Le Jury se réserve le droit de refuser un matériel « non classique », en particulier s'il estime que des candidats seraient manifestement favorisés.

La préparation des expériences se fait en 4 heures et vous êtes assisté d'un agent de laboratoire qui vous apporte le matériel et le met en place. Vous pouvez lui demander de réaliser un montage, à condition de lui en donner un schéma précis et détaillé ; vous pouvez aussi lui demander d'exécuter une série de mesures selon une procédure que vous lui aurez indiquée avec précision. Par contre, vous ne pouvez pas lui demander de faire des réglages à votre place, et encore moins de choisir des appareils ou des expériences à votre place.

A l'issue de votre préparation, vous êtes à la disposition du Jury pour une durée de 1 h 20. N'oubliez pas de présenter vos papiers d'identité, votre convocation, et votre papier de tirage au sort. Vous présentez vos expériences pendant une cinquantaine de minutes, puis vous répondez aux questions qui vous sont posées à propos de votre montage.

1. Sur la préparation au montage en cours d'année.

Un entraînement régulier et méthodique est absolument nécessaire. Il faut vous ménager une tranche horaire hebdomadaire pendant laquelle vous effectuerez vos manipulations selon une progression réfléchie.

Même si vous n'avez pas la chance de pouvoir fréquenter le laboratoire d'une préparation à l'Agrégation, bien des choses sont possibles dans le cadre d'un Lycée ou d'un Collège : on apprend également beaucoup en se débrouillant avec peu de matériel, en électronique tout particulièrement ; essayez de vous réserver un « coin expériences » où vous votre montage pourra rester à demeure le temps que vous arriviez à le maîtriser. Cela vous évitera les pertes de temps des montages, démontages, rangements et remontages la semaine suivante. S'il y a un Lycée avec des CPGE près de chez vous, essayez de vous introduire dans les séances de travaux pratiques, tout particulièrement d'une classe de type PC/PC* : le matériel y est très représentatif de celui qui sera mis à votre disposition le jour du concours.

Il est essentiel que vous conserviez votre sens critique, aussi bien en cours d'année que le jour du montage :

- vous devez absolument maîtriser votre montage afin de l'adapter à vos montage à vos moyens en matériel, à vos capacités d'expérimentateur, à vos capacités d'interprétation ainsi qu'à votre auditoire (par exemple, si vous n'avez pas manipulé de Michelson depuis 10 ans, il est inutile d'essayer de s'en servir le jour du Concours).
- vous devez aussi penser à moderniser la présentation de telle ou telle expérience ancienne mais fondamentale. Le plus souvent, à notre niveau, il s'agit d'utiliser des capteurs, d'introduire de l'électronique voire même un ordinateur, de manière à rendre les mesures plus faciles et plus rapides à exploiter. Consulter les nombreux articles de M. Moreau dans le BUP, ce sont de bons exemples de ce qu'il convient de faire en ce domaine.
- Vous devez constamment vous comporter en « physicien » et/ou « chimiste », c'est à dire constamment penser au contenu scientifique de votre montage. Une série de mesures, même parfaitement exécutée, n'est d'aucune valeur si elle n'est pas interprétée et exploitée et si la physique sous-jacente est ignorée.

Enfin, vous devez également penser à la présentation de vos expériences : vous devez en aucun cas laisser votre auditoire (élèves ou Jury). Vous éviterez donc à votre auditoire les longues séries de mesures : vous les aurez faites à l'avance en cours de préparation, et vous vérifierez deux ou trois points devant le Jury. Evidemment, si vous avez pu automatiser la saisie des mesures ainsi que leur exploitation à l'aide d'un ordinateur et d'une carte d'acquisition, vous êtes dans une situation idéale...

Quelques exemples, pour illustrer le propos :

- s'il s'agit de mesurer une résistance, on prendra un ohmmètre numérique. On se gardera bien de mesurer 10 fois V et I, puis de calculer V/I en achevant l'auditoire

avec une bonne discussion sur la longue et la courte dérivation sans oublier les incertitudes.

- mais s'il s'agit de vérifier la loi d'Ohm, là, bien entendu une série de mesures est absolument nécessaire. Mesures que vous aurez déjà faites en préparation (et reportées sur un graphe), en utilisant un voltmètre et un ampèremètre de qualités telles que vous n'avez pas à exécuter des corrections de courte et de longue dérivation.

Si nécessaire, on s'aide de montage à amplificateurs opérationnels judicieusement choisis. Toutefois, vous devez impérativement valider ce travail de préparation en effectuant au moins une mesure soignée devant le Jury, et en la reportant sur le graphe préparé ; bien entendu, vous n'oubliez pas d'expliquer en quelques mots pourquoi les corrections d'appareils sont effectivement négligeables, et comment vous vous y êtes pris pour évaluer les incertitudes !(vous devez montrer au Jury que les mesures ne sont pas bidon).

En résumé :

- lire les rapports de Jury
- manipuler régulièrement pour progresser
- moderniser la présentation des expériences (électronique, informatique)
- démontrer et convaincre sans être ennuyeux
- exploiter les mesures dans le cadre d'un montage construit.

Essayer de toujours travailler en y pensant en cours d'année, en sorte que cela devienne une sorte de réflexe.

2. Sur la préparation du montage le jour de l'épreuve. (durée : 4 h)

-Vous choisissez votre sujet parmi les deux qui correspondent au numéro de votre tirage au sort. N'en changez plus au bout de quelques minutes, malgré les doutes éventuels. Le Jury ignorera le sujet que vous rejetez.

- Combattez la tendance naturelle à l'affolement fébrile.
- Dressez schématiquement un premier plan de montage, et une première liste des expériences que vous vous sentez capable de réaliser et d'exploiter (inutile de demander un oscilloscope numérique si vous n'en avez jamais manipulé de votre vie). Liste établie de mémoire, ainsi qu'en consultant quelques ouvrages.

Cette phase ne doit pas vous occuper plus de 20 minutes. Vous ne devez en aucun cas passer deux heures à faire de la bibliographie : ce n'est pas le jour. Les livres ne doivent servir qu'à redonner les schémas de montages et les valeurs d'éléments que l'on n'a pas en mémoire, mais dont on sait qu'ils se trouvent « là », parce qu'on les a déjà vus en cours d'année.

-Vous commencez alors le travail manuel proprement dit... sans cesser de penser à la manière dont vous présenterez votre expérience et à la manière dont vous exploiterez les mesures :

- dressez la liste du matériel et des produits nécessaires
- demandez à votre agent de laboratoire de vous rassembler tout cela, et de faire la mise en place selon les indications que vous lui fournissez.

Vous ne devez pas hésiter à lui demander de faire pour vous tous les travaux « élémentaires » : le jour du concours, vous n'êtes pas là pour ça. Par exemple : monter des supports, des bancs d'optique, réaliser le montage électrique dont vous lui donnez le schéma avec les valeurs des éléments, niveler la table à coussin d'air, surveiller le chauffage de votre

bain d'huile « jusqu'à ce que » . En revanche, vous n'avez pas le droit de lui dire : « montez-moi un montage intégrateur à A.O. qui fonctionne » ou encore « réglez-moi le Michelson avec un spectroscopie, et projetez le spectre cannelé ». Demandez les notices des appareils que vous utilisez : vous devez connaître leurs caractéristiques essentielles afin de les utiliser à bon escient...

-Vous effectuez vos mesures, et vous dressez vos tableaux de mesures, les graphes correspondants (soit sur transparents à projeter, soit sur de grandes feuilles de papier millimétré (de 60 cm sur 60 cm au moins). N'oubliez pas de graduer les axes (vous aurez choisi une échelle simple), d'indiquer les unités, les incertitudes évaluées.

- Trente minutes avant la fin de votre préparation, donc du début de votre présentation, vous écrivez au tableau le plan définitif de votre montage, en indiquant les schémas des expériences réalisées. Ce plan doit être construit de manière logique pour illustrer le phénomène physique de votre sujet.

Enfin, prenez cinq bonnes minutes pour faire un peu de rangement, mettre vos papiers en ordre, reprendre des forces et vous détendre (petits gâteaux, chocolat, café, thé, etc...)

3. Sur la présentation du montage le jour de l'Agrégation.

a) Quelques détails d'ordre matériel.

- Vous avez inscrit votre nom sur le tableau.
- S'il s'agit d'expériences nécessitant l'obscurité de la salle, vous avez demandé à l'agent d'installer un éclairage pour le Jury qui doit pouvoir continuer à prendre des notes. Vous disposez d'une petite lampe de poche qui vous permettra de peaufiner vos réglages d'optique sans avoir à rallumer la salle à tout bout de champ.
- Vous avez disposé un réveil électronique (pas de tic-tac ni de sonnerie intempestives SVP), bien visible par vous seulement, afin de pouvoir surveiller la durée de votre prestation.
- Vous avez remis de l'eau dans votre bain, de la glace dans votre mélange réfrigérant, de l'azote liquide dans votre Dewar, etc... il faut que cela « tienne » pendant 80 min.

A partir de là, vous êtes à la disposition du Jury pour 1h 20. Vous ne devez en aucun cas essayer de dépasser ce temps : vous seriez impitoyablement arrêté (la bonne marche du concours et le respect des autres candidats). Cela signifie que pendant tout ce temps vous présentez vos expériences et vous répondez aux questions qui vous sont posées sur votre sujet. Le Jury intervient ponctuellement et brièvement en cours de présentation, et pose ses questions à la fin.

b) Présentation de votre montage.

Rappelez-vous que vous serez jugé, non seulement sur la qualité de vos mesures, mais aussi sur la qualité de la présentation de vos expériences ainsi que sur la qualité de vos interprétations.

- Le montage n'est pas une leçon ! (non, ce n'est pas une lapalissade). Vous devez éviter de trop parler. Les ¾ de votre temps doivent être utilisés à faire des mesures, et non à faire des digressions. Vos commentaires et vos explications sont absolument nécessaires, mais doivent rester brefs et précis ; en particulier- contrairement à ce qui se passe devant une vraie classe- vous n'avez pas à répéter les choses sous deux ou trois formes différentes, même s'il s'agit de notions difficiles...

- Les expériences quantitatives doivent toujours être préférées aux expériences qualitatives. On ne doit retenir une expérience qualitative que quand elle est vraiment démonstrative et spectaculaire.
 - Vos expériences doivent être visibles de toute la salle : vous êtes supposé travailler devant toute une classe. (toutefois, des exceptions notables sont admises ; par exemple, pour des franges d'Young qu'il est très difficile de rendre visibles pour tout un amphithéâtre, n'hésitez pas à demander au Jury de se déplacer et de venir observer les franges, lire un vernier, etc...)
- Vous ne devez donc pas hésiter à utiliser le rétroprojecteur, le paper-board, et les projections. En électronique, évitez de vous placer entre le Jury et l'oscilloscope ; placez-vous de côté, ce qui exige seulement de penser à mettre l'oscilloscope en bout de table ; certains utilisent très habilement un miroir sans tain.

Au cours du montage...

- Ne perdez pas de vue que l'on attend de vous un ensemble cohérent d'expériences, de préférence quantitatives et modernes, dans le but d'illustrer et d'interpréter le phénomène physique, objet de votre montage. Vous devez donc montrer que vous maîtrisez constamment la physique du montage, et vous devez toujours exploiter vos mesures de manière claire, mais concise.
- Comme déjà dit, vous éviterez d'être trop fastidieux et ennuyeux :
 - les tableaux de mesures sont déjà prêts (les unités sont indiquées),
 - les courbes sont soit tracées, soit prêtes à l'être (les axes sont gradués, avec des échelles simples)
 - vous effectuez une ou deux mesures de validation devant le Jury
 - la manière dont vous évaluez les incertitudes est exposée brièvement
 - vous interprétez vos résultats.

Et quand - hélas- le point obtenu devant le Jury est grossièrement en dehors de la courbe tracée en préparation ?

Eh oui, cela arrive, environ... une fois tous les deux ou trois montages ! Le Jury est donc parfaitement au point de ce côté-là, et il attend votre réaction !

- A éviter absolument : bafouiller et raconter n'importe quoi. Par exemple : « aux erreurs d'expériences près, je considère que la loi est vérifiée ». Ou encore : « Je vous certifie qu'en préparation tout avait bien marché »
- Alors que faire ?
 - Garder son calme. Eliminer d'éventuelles erreurs triviales : de calcul, de manipulation. Cela arrive à tout le monde, et ce n'est pas grave, en tout cas infiniment moins que de laisser les choses en l'état.
 - Dans certains cas, il est normal de ne pas retomber sur la courbe obtenue en préparation. Cela se produit en particulier pour les caractéristiques de transistor, très sensibles aux variations de température, ainsi qu'au changement de spécimen. De même, pour les amplificateurs opérationnels, non seulement les courants de polarisation et les tensions de décalage dépendent de la température et des (mauvais) traitements subis, mais en plus, ces paramètres évoluent dans le temps. Des variations de 30 à 50 % ne sont pas exceptionnelles.

En pareil cas, il suffit de l'expliquer au Jury. Il en sera très satisfait.

Et quand le montage refuse absolument de fonctionner devant le Jury ?

Malheureusement, cela arrive aussi, tout particulièrement en électricité et en électronique où, selon une boutade célèbre, tout montage n'est qu'une suite de faux contacts...

Cherchez à débusquer le faux contact, à retrouver la manœuvre inopportune pendant 2 ou 3 minutes tout au plus. Ne passez surtout pas le reste de votre montage à rechercher l'erreur : ce qui compte, c'est ce que vous aurez montré, pas ce que vous auriez pu, ou voulu, montrer. A l'issue de ces quelques minutes de recherche, expliquez au Jury que vous ne trouvez pas l'erreur, mais que vous avez d'autres expériences à montrer et que vous vous proposez de revenir sur cette expérience à la fin du montage s'il vous reste du temps.

- Donc, en principe, ne démontez pas votre expérience en partant et laissez vos appareils branchés : il est probable que pendant sa délibération le Jury essaiera de vérifier s'il s'agit bien d'un faux contact ou d'une erreur de votre part.
- Enfin, quel que soit le niveau de votre prestation, de toutes les façons gardez votre dignité ; vous ferez mieux la prochaine fois, voilà tout.

4. Quelques maladresses parmi les plus fréquentes, dans diverses matières.

a) En électronique, électricité.

- Une fréquence se mesure avec un fréquencemètre, rarement à l'oscilloscope.
- Une phase se mesure avec un phasemètre (apprendre à utiliser cet appareil prend moins de temps qu'il n'en faut pour faire une mesure à l'oscilloscope).
- Une résistance se mesure avec un ohmmètre digital (et rarement par U/I)
- Dans 98% des cas, on utilise l'entrée DC de l'oscilloscope, et non l'entrée AC, même pour des signaux alternatifs. En effet, l'entrée AC élimine la composante continue du signal- ce qui peut vous induire en erreur-, en introduisant un condensateur de liaison en série avec le signal ; de plus, ce condensateur de liaison déforme les signaux en basse fréquence (en particulier les signaux carrés), et perturbe parfois le circuit étudié. Même en entrée DC, l'oscilloscope présente une capacité, de l'ordre de 30 pF (en parallèle sur son entrée cette fois) ; pour $f = 500 \text{ kHz}$, $Z = 1/C\omega = 10,6 \text{ k}\Omega$. Voilà qui shunte sérieusement le $M\Omega$ de l'impédance d'entrée de l'oscilloscope ! Pratiquement, tout montage d'électronique doit systématiquement comporter un oscilloscope pour contrôler constamment la forme des signaux, et un fréquencemètre- le plus souvent branché en parallèle sur la sortie TTL ou synchro externe du générateur basse fréquence. D'ailleurs il est souvent très pratique d'utiliser cette même sortie synchro du BF pour assurer la synchronisation externe de l'oscilloscope : ainsi, la base de temps reste constamment bien synchronisée sans avoir à retoucher les réglages de synchronisation encours de manipulation.
- Quand un montage à transistor(s) ne fonctionne pas, dans 90% des cas c'est parce que la polarisation est mauvaise/. Vérifier que la ddp entre la base et l'émetteur est bien comprise entre 0,5 et 0,7 V environ, et que la ddp entre collecteur et émetteur est de l'ordre de la moitié de la tension d'alimentation pour un fonctionnement classique en classe A des transistors bipolaires.
- Pour les amplificateurs opérationnels, ne cherchez pas les difficultés. S'il s'agit d'en montrer les défauts, prenez un 741 car ses défauts sont suffisamment importants pour être assez faciles à mettre en évidence. Pour le même motif, s'il s'agit de montrer le

bon fonctionnement des montages à AO, prenez un modèle plus performant, par ex TL 081, TL 71, etc...

- Ne vous livrez pas à de fastidieuses corrections si votre voltmètre a une résistance d'entrée insuffisante ; prenez-en un plus performant, ou bien utilisez un montage suiveur avec un TL081.
- Un voltmètre magnéto-électrique ne donne pas la tension efficace d'une tension si cette dernière n'est pas sinusoïdale.

Efforcez-vous d'utiliser les appareils dans leurs conditions nominales. Ainsi, ne vous contentez pas de faire débiter quelques milliampères à une dynamo de puissance nominale 1kW. Ou encore : dans le montage « amplification de puissance », ne vous contentez pas d'un montage fournissant péniblement quelques microwatts !

b) En optique.

- Les lentilles doivent être correctement alignées.
- Les empreintes digitales sur les lentilles sont à proscrire.
- Les projections doivent être de bonne qualité. Donc :
 - L'arc électrique est une source de lumière remarquable et parfois incontournable. Mais on peut souvent le remplacer par une lampe quartz-iode, beaucoup plus pratique d'emploi.
 - Sachez placer un diaphragme de champ. Utilisez la réflexion pour placer les différents éléments du montage (lentilles, lames à faces parallèles, filtres, etc...) bien perpendiculairement à l'axe du faisceau. Pensez à toujours placer la face la plus bombée de la lentille du côté du faisceau le moins convergent (réduction des aberrations).
- A propos des courbes de réponse spectrale, ne pas confondre : la courbe spectrale d'émission de la source, la courbe de transmission des différents verres traversés par la lumière, et enfin la courbe de réponse spectrale du détecteur (photodiode, thermopile, œil, etc...). Le plus souvent, les mesures « brutes » ne fournissent guère que la résultante des trois.

c) En thermodynamique. Mesures de température

- Le thermocouple (comme le thermomètre d'ailleurs) ne donne une indication correcte que s'il est suffisamment immergé dans le bain, pendant un temps suffisant.
- Rappelons que l'on peut se fabriquer un thermocouple tout à fait suffisant pour nos besoins en quelques minutes.
- Il faut agiter le bain afin que sa température soit homogène. Ces précautions sont souvent négligées par environ 1 candidat sur 2 ! De ce fait, on a souvent « vu » l'eau bouillir à ... 87°C !
- Assimiler la différence entre température thermodynamique, température absolue, température de l'EIP, température centésimale et température Celsius.

d) En mécanique.

Durant les dernières décennies, l'enseignement de la mécanique dans les Lycées a mis l'accent sur la table et le banc à coussin d'air. Il s'agit certainement d'instruments pédagogiquement remarquables. Toutefois, réduire les expériences de mécanique à la seule utilisation de la table ou du banc à coussin d'air est certainement une erreur.

- Au plan théorique d'une part :
 - Parce que le mobile n'est pas isolé, mais pseudo-isolé,
 - Parce que cela peut induire des idées fausses. Par exemple, dans le cas de la mécanique du solide, la matrice d'inertie introduit des couplages entre les degrés de rotation par ses termes non diagonaux, couplages totalement éliminés dans le cas du banc.
- Au plan de la précision d'autre part, qui dépasse rarement quelques % particulièrement dans les bilans énergétiques.
- En d'autres termes, si vous n'utilisez que la table à coussin d'air dans votre montage de mécanique, il est probable que votre note vous décevra....

En résumé :

Présentez des expériences : MODERNES,
QUANTITATIVES,
ASSEZ BREVES.
Exploitez-les de manière rationnelle, suivant une progression logique.

5. Sur les questions posées par le Jury.

Elles visent essentiellement à s'assurer que vous comprenez correctement les expériences que vous présentez, et que votre culture scientifique va au-delà de ce qui a été présenté. Les questions restent sur le sujet du montage. Les questions restent centrées sur le sujet du montage.

Soyez assurés que le Jury cherche bien plus à vous mettre en valeur qu'à vous « démolir ».... bien que certains candidats puissent avoir l'impression contraire, de par la nature même de l'épreuve : pour vous mettre votre note maximale, il faut bien vous pousser dans vos derniers retranchements. Une situation inconfortable, bien sûr ; une situation que nous faisons d'ailleurs subir à nos élèves !....

Autrement dit, ne pas répondre à toutes les questions posées est absolument normal et ne compromet en rien la possibilité d'obtenir une excellente note ! Donc, pas de panique quand vous ne savez pas, et surtout, n'allez pas répondre quoi en pareil cas : avouez plutôt votre ignorance.

Et si le Jury semble ne pas vous écouter... Oui, cela peut vous arriver ! Mais vous serez bien surpris quand il vous signalera les erreurs que vous avez commises aux moments où, justement, vous avez cru qu'il ne vous écoutait pas ! Acceptez l'idée que dans tout exposé il y a des passages qui vont de soi (des passages que vous devez néanmoins traiter avec soin). Le Jury n'a alors pas besoin de mobiliser toute sa sagacité d'attention pour vous suivre ; à l'inverse, il connaît les passages délicats et là, le réflexe professionnel joue : il vous écoute...

En guise de conclusion.

De ce catalogue à la Prévert peut naître un sentiment de découragement chez certains d'entre vous : « je n'y arriverai jamais ». Ce serait une erreur (de plus), et sans doute la plus grave ! répétez-vous que bien d'autres y sont arrivés et qu'entre ce qu'il est souhaitable de savoir faire et ce qui est accepté en pratique, il y a une marge certaine.... Il s'agit seulement de travailler sérieusement afin d'améliorer son niveau de base, car, bien sûr, seul un effort soutenu et méthodique permet de progresser.

Liste de matériels disponibles le jour du concours.

(Liste non exhaustive du matériel de physique disponible lors de la session 2008)

ELECTRONIQUE

- GBF Hameg HM 8130 10 MHz (avec balayage en fréquence réglable et génération d'impulsions)
- GBF Schlumberger/ Sefram 4430 20MHz (avec composante continue indépendante)
- Oscilloscope Hewlett Packard 45603B 60 MHz numérique avec FFT et mesures automatique ou par curseurs. Sortie parallèle vers imprimante ou RS 232 vert PC (logiciel SYNCHRONIE),
- Oscilloscope Métrix 8020 (analogique), Meffix 8050 (analogique et numérique), Tektronix TDS 1002 (numérique avec FFT) et TDS 2002B (numérique avec FFT et 2 voies couleurs différentes)
- Alimentation symétrique -15V; +15V.
- Composants électroniques courants:
 - Résistors de 10Ω à 1MΩ.
 - Condensateurs de lnF à 47μF.
 - Bobines de 1mH à 90mH.
 - Diodes de redressement 1N4007.
 - Diodes Zener (3,3V; 6,2V; 9,1V).
 - Ampli.Op. UA741, TL 81, TL 71.
 - Plaquettes d'essai (pour composants non montés).
 - Platines (pour composants montés sur supports munis de bornes)
 - Boites A.O.I.P x1Ω, x 10Ω, x 100Ω, x 1000Ω, x10000Ω, x 100000Ω
 - Diodes électroluminescente;
 - Photo résistances à CTN.
 - Thermistances à CTN.
 - Photodiodes.
 - Transistors divers
 - Pont de Graetz
- Maquette Jacquard pour redressement et filtrage.
- Maquette pour conversion alternatif continu et inversement.
- Onduleur PIERRON.
- Plaquette MATELCO pour multivibrateur astable à portes logiques.
- Maquette pour amplification en classe B.
- Maquette pour modulation-démodulation (en fréquence).
- Plaquettes multi-radar PHYTEX (avec multiplieurs, filtre passe-bas, convertisseur tension-intensité, déphaseur, etc) .
- Quartz de fréquence de résonance 100 kHz (**montés** sur support avec bornes électriques).
- Transducteurs piézoélectriques,
- Jauge de contrainte.
- Multimètres Métrix MX54, Métrix MX53,
- Pont RLC Wavetek LCR55.
- Table traçante SEFRAM à deux voies.

- Enregistreur de tension à deux voies SEFRAM 8210.
- Hacheur à 1 quadrant à transistor 30V, 5A (Didalab)

ELECTRICITE et ELECTROMAGNETISME

- Rhéostat 23Ω, 100Ω.
- Alimentation stabilisée PHILIPS PE1535 (40V, 500mA).
- Alimentation stabilisée Ele (30V, 10A).
- Alternostat (0-240V)
- Transformateur démontable LANGLOIS,
- Transformateur d'isolement.
- Plaquette DMS pour étude du ferromagnétisme (avec transformateur torique).
- Wattmètres FEEDBACK EW604 et CHAUVIN ARNOUX(analogiques).
- Wattmètre numérique les ISW8000.
- Pince ampérométrique à effet Hall (20A max).
- Pince ampérométrique à induction (1000A max) CHAUVIN ARNOUX F2 1.
- Balance de Cotton.
- Boussole des tangentes.
- Solénoïde double (JEULIN) L= 40cm
- Bobines d'HELMHOLTZ.
- Fluxmètre
- Galvanomètre.
- Banc de moteur-génératrice DMS 120W à courant continu
- Rigole circulaire pour chauffage à induction.
- Emetteur-récepteur avec accessoires pour étude des ondes centimétriques dans l'air.
- Guide d'ondes en hyperfréquences.
- Roue de Barlow
- Expérience de Laplace
- Haut-parleur 25W, 8Ω (f = 80Hz) avec accessoires pour mesures,
- Haut-parleurs 2W, 8Ω et 2W, 50Ω.
- Micros divers (dont diamètre-7mm).
- Bobine de Faraday JEULIN).
- Bobine de Ruhmkorff.
- Teslamètre PHYTEX 602 à lecture directe de 0,01 mT à 60mT, à sortie analogique
- Bobine à noyau de fer d'inductance variable de 0,1 H à 1 H .
- Bobine à flux maximal.
- Freinage par courants de Foucault.
- Déflectron (étude de la déviation d'un faisceau d'électrons par E et B).
- Machines de Wimshurst.
- Electroscope.
- Electromètre Phylab ES 90504.
- Condensateur à plateaux d'écartement réglable.

OPTIQUE

- Lasers He- Ne rouges 5 mW et 10 mW
- Laser jaune
- Séparateur de faisceaux pour interférences.
- Objectifs de microscope : x 100, x 32, x25, x16, x10
- Polariseurs
- Polariseurs croisés montés côte à côte pour expérience de FRESNEL-ARAGO.
- Lames $\lambda/4$ et $\lambda/2$ pour laser rouge $\lambda= 632,8$ nm
- Lames $\lambda/4$ et $\lambda/2$ pour lumière monochromatique verte $\lambda= 546$ nm
- Lentille boule $f = 5$ mm
- Lentilles convergentes et divergentes diverses ($C = + 10, +8, +5$ D ; $C = -5, -4, -3$ D)
- Lunette astronomique JEULIN
- Microscope
- Lunette à l'infini – viseur.
- Lunette auto-collimatrice pour réglage Michelson
- Collimateur
- Miroirs plans, convexes et concaves
- Fentes simples, doubles, triples pour diffraction
- Réseau pour étude de la diffraction (100 traits par cm)
- Diaphragme à iris
- Lampe 15 W, 30W, 75 W et 250 W.
- Lampes à Na, Hg et Hg-Cd
- Lampes de balme
- Interféromètre de Michelson SOPRA (muni de moteur lent) et DIDALAB
- Goniomètre BOUTY (précision : 1' d'angle)
- Réseaux pour spectrométrie (nb de traits par mm : 79, 100, 158, 300, 315, 1181)
- Spectromètre à fibre optique
- Lame de mica de 30 μ m pour spectre cannelé
- Lame de mica 100 μ m (détermination de son épaisseur à l'aide du Michelson)
- Interféromètre de Fabry-Pérot
- Bilente de Billet
- Miroirs de Fresnel
- Dispositif pour étude des anneaux de Newton
- Prisme de 60° et 30°
- Prisme à vision directe
- Canons de quartz épais pour polarisation rotatoire
- Oculaire de Fresnel
- Fentes réglables.
- Filtres interférentiels verts ($\lambda= 546$ nm), rouges ($\lambda= 633$ nm) et jaunes ($\lambda= 577$ nm)
- Filtres colorés divers
- Lampes stroboscopiques.
- Ensemble Jeulin pour transmission d'un signal électrique par fibre optique.
- Luxmètres analogiques et numériques.
- Cellules photoélectriques Leybold
- Cellule solaire
- Moteur solaire
- Capteur CCD avec logiciel Caliens
- Barrettes CCD Electrome
- Boitier 3 diodes laser pour mesure de e/h
- Diodes laser modulables (Melles Griot et Jeulin)
- Bancs d'optique prismatiques.

ACOUSTIQUE

- Synthétiseurs Jeulin (Créa-Sons) et Electrome (Harmon 220)
- Banc d'étude des ondes ultra-sonores (Jeulin, Moduson)
- Banc à ultra-sons pour étude des interférences; et de la diffraction (Jeulin, Onduson)
- Ensemble d'étude des ondes sonores dans l'air (DMS)
- Emetteur d'ultra-sons par salves et récepteur (Jeulin). On dispose aussi de générateurs réglables produisant une tension discontinue permettant d'obtenir des trains d'ondes.
- Emetteur-Recepteur d'ultra-sons dans une cuve à eau
- Résonateurs d'HELMHOLTZ sphériques en laiton.
- Résonateurs d'HELMHOLTZ cylindriques en plastique avec col de longueur variable que l'on peut coupler.
- Tube de KUNDT avec micro mobile intégré.
- Trombone de KOENIG
- Sonomètre (mesure de l'intensité sonore)
- Sonomètre à cordes (étude du son émis par une corde métallique de tension, longueur et masse linéique variables)
- Tuyaux sonores

MECANIQUE

- Système d'étude de la chute libre avec enregistrement sur ordinateur et traitement par le logiciel Magnum.
- Système d'étude des oscillations d'un pendule au de deux pendules couplés, en régime libre, en régime forcé, avec amortissement éventuel. Enregistrement sur ordinateur et traitement par le logiciel Régressi (système Pendulor fabriqué par Mirelec)
- Pendules couplés (système DMS)
- Système d'étude des oscillations à une dimension d'un mobile sur coussin d'air fixe à chacune de ses deux à un ressort, en régime libre, on régime forcé, avec amortissement éventuel. Enregistrement sur ordinateur et traitement par Régressi (fabrication Mirelec)
- Vibreux
- Corde de Melde.
- Cuve à ondes
- Echelle de perroquet
- Mobiles autoporteurs Jeulin
- Pendule de torsion.
- Pendule de Pohl.
- Gyroscope.

THERMODYNAMIQUE

- Manoscope à eau
- Sonde de température (-25°, + 125°C) délivrant une tension enregistrable sur l'ordinateur par l'intermédiaire de la carte d'acquisition SYSAM SP5.
- Sonde de température à thermocouple K universelle (0°C-1000°C) à affichage numérique et sortie analogique.
- Capteur de température USB capto-thermo permettant le transfert sur ordinateur (Mirelec).
- Thermocouple à deux soudures à étalonner.
- Thermomètre à sonde HANNA TH 302
- Capteur de pression Phytex permettant le transfert sur ordinateur.
- Pressiomètre à affichage en hPa et sortie analogique.
- Calorimètre avec résistances chauffantes de 2 à 4 Ω
- Appareil à SF6 permettant le tracé des courbes de pression de vapeur saturante, le tracé des isothermes et l'étude du point critique.
- Cloche avec pompe à faire le vide.
- Bains thermostatés
- Barrreau de gadolinium pour transition ferro-paramagnétique.
- Cellule CO2 à densité critique
- Flacon étanche pour mesure de pression et température (loi de CHARLES)
- Tube étanche muni d'un piston à vis pour étude de la loi de MARIOTTE.

INFORMATIQUE

- Ordinateurs divers avec Windows XP
- Cartes d'acquisition ORPHY, FASTLAB, SYSAM SP5
- Logiciels REGRESSI, SYNCHRONIE 2000, EXEL, LATIDPRO (spécifique à SYSAM SP5)
- Webcam 90 images par secondes avec logiciel d'acquisition
- Interface Phytex Vamp2
- Imprimante Brother HL-5140, HL-5240, HL-1440, HL-2040 et HP 5650
- câbles parallèles, RS232, USB

DIVERS

- Appareil photo numérique
- Caméra flexible avec liaison sur écran TV, vidéoprojecteur ou PC et arrêt sur image
- Vidéoprojecteur
- Rétroprojecteur.

N.B : Cette liste n'est pas exhaustive. Certains matériels très courants (tels que balances, ressorts, masses marquées, etc...) n'ont pas été indiqués.