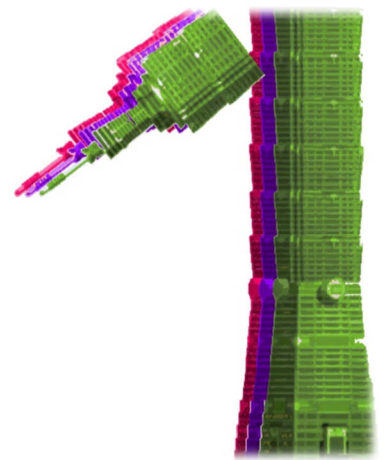
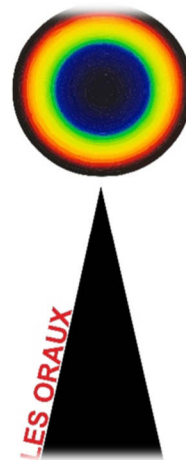




**TP QUATRIÈME SÉRIE
PRÉPARATION AUX ORAUX**



RÉSEAU OPTIQUE



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

1. RÉSEAU SOUS INCIDENCE NORMALE

Le réseau est une plaque transparente comportant un très grand nombre de traits fins, parallèles et équidistants.

On désigne par a la distance entre deux traits voisins et $n = 1/a$ le nombre de traits par unité de longueur.

Lorsque le réseau est éclairé par une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ sous l'angle d'incidence i , on observe par transmission un maximum principal de lumière à l'infini pour les directions repérées par l'angle i' .

Q.1) Démontrer la formule des réseaux $\sin i' = \sin i + k\lambda/a$, où $k \in \mathbf{Z}$ est l'ordre du spectre.

1.1 Mise en incidence normale

>>> Donner et mettre en œuvre un protocole pour que le réseau soit éclairé en incidence normale par la lumière issue du collimateur. Bloquer le plateau dans cette position.

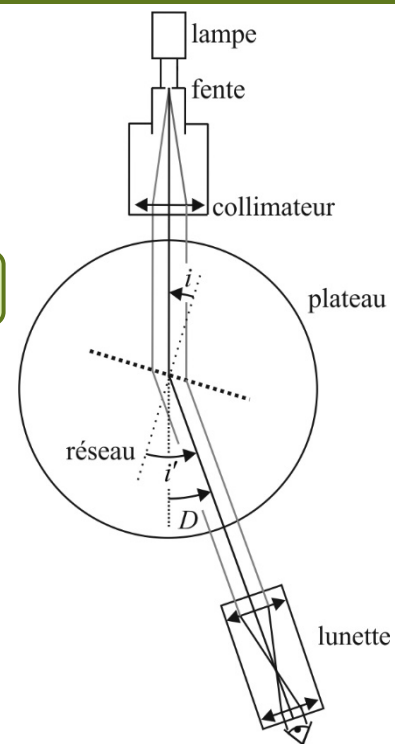
APPELER L'EXAMINATEUR

Le réglage précédent étant effectué, ne plus toucher à la vis de blocage du plateau, tant que l'on veut utiliser le réseau sous incidence normale, ni aux vis de réglage de l'horizontalité du plateau.

1.2 Mesure du nombre de traits par unité de longueur

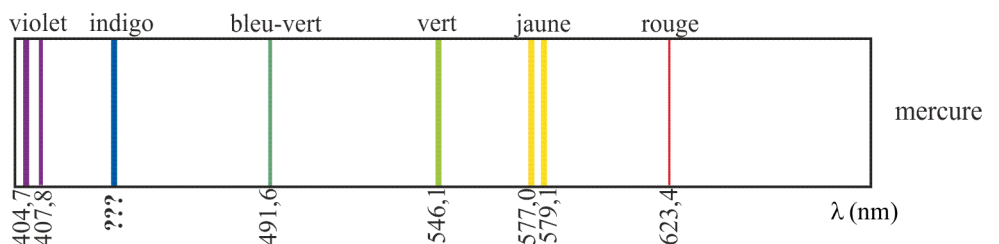
>>> Repérer les positions de quelques raies intenses de la lampe à vapeur de mercure dans le spectre d'ordre 1. En déduire la valeur moyenne du nombre de traits par unité de longueur du réseau utilisé (le réseau est indiqué à 570 traits par mm) :

$n =$ traits/mm



λ (nm)	couleur			
404,7	violet			
???	indigo			
546,1	vert			
577,0	jaune			
623,4	rouge (cadmium)			

Principales raies de la lampe à vapeur de mercure :



>>> On suppose que la tolérance sur la mesure d'angle sur le goniomètre est de 1'. En déduire $\sigma_{\text{angle}} = u(i)$.

Le fichier Python fourni permet de déterminer par la méthode de Monte-Carlo la pente et son incertitude-type pour un ajustement linéaire $Y = aX$.

>>> Justifier la formule utilisée pour calculer l'incertitude-type sur Y .

>>> Compléter le fichier avec les mesures effectuées et en déduire :

$n =$ traits/mm

$u(n) =$ traits/mm.

1.3 Détermination d'une longueur d'onde

On cherche à déterminer la longueur d'onde de la raie indigo du mercure ainsi que l'incertitude-type sur cette longueur d'onde par la méthode de Monte-Carlo à l'aide du fichier Python à compléter.

>>> Expliquer la méthode utilisée.

>>> Compléter le fichier avec les mesures effectuées et en déduire :

$\lambda =$ nm

$u(\lambda) =$ nm.

2. MÉTHODE DU MINIMUM DE DÉVIATION

On applique ici cette méthode pour mesurer des longueurs d'onde par comparaison

2.1 Manipulation avec la lampe à vapeur de mercure

>>> Débloquer le plateau. Faire tourner le plateau et suivre avec la lunette une raie donnée dans un spectre d'ordre donné : on prendra la raie de longueur d'onde $\lambda_0 = 577,0$ nm du doublet jaune du mercure **dans le spectre d'ordre 2**. Constater que l'angle de déviation $D = i' - i$ passe par un minimum D_{\min} .

APPELER L'EXAMINATEUR

Q.2) Montrer que pour ce minimum, on a $i' = -i$ et que $2 \sin \frac{D_{\min}}{2} = k \frac{\lambda}{a}$.

>>> Pointer dans le spectre d'ordre 2, la position de la lunette au minimum de déviation de la raie de longueur d'onde connue $\lambda_0 = 577,0$ nm du doublet jaune du mercure. Bloquer la position de la lunette pour ce minimum et faire tourner le plateau pour voir la raie suivie venir juste au niveau du fil du réticule au minimum de déviation, sinon ajuster la position de la lunette avec la vis micrométrique de déplacement latéral de la lunette (réglage fin).

En déduire la valeur minimale de l'angle de déviation, notée $D_{0\min}$.

2.2 Manipulation avec la lampe à vapeur de sodium

>>> Éteindre la lampe à vapeur de mercure et allumer celle à vapeur de sodium (**il faut attendre quelques minutes pour qu'elle émette des raies suffisamment intenses ; ne jamais chercher à rallumer une lampe qui vient d'être éteinte**).

>>> À partir de la valeur connue $\lambda_0 = 577,0$ nm d'une des raies jaunes du mercure, on peut recommencer les mesures, dans le spectre d'ordre 2, pour les deux raies jaunes du sodium. Déterminer D_{\min} pour les deux raies jaunes du sodium, et déterminer par comparaison, leurs longueurs d'onde λ_1 et λ_2 : $\lambda_1 =$ nm $\lambda_2 =$ nm

Comparer aux valeurs connues $\lambda_1 = 589,0$ nm et $\lambda_2 = 589,6$ nm.

Q.3) Déterminer l'incertitude de mesure sur λ . Commenter.

MESURE DE DISTANCES FOCALES DE LENTILLES MINCES



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

1. MANIPULATIONS DE BASE

On dispose d'une lentille, l'une convergente, l'autre divergente, avec les indications $f' = +20$ cm et $f' = -50$ cm ou -10 cm.

1.1 Identification du type de lentille

Vous devez seulement à ce stade déterminer quelle est la lentille convergente et quelle est la lentille divergente.

>>> Proposer une expérience consistant à regarder l'image d'un objet à travers la lentille et permettant d'affirmer que l'une des lentilles est convergente. Faire de même avec la lentille divergente. **Attention ! Chacune des expériences devra être accompagnée d'un schéma expliquant la marche des rayons dans la disposition retenue.**

>>> On peut aussi dans certains cas déterminer la nature convergente ou divergente d'une lentille par simple examen de son épaisseur. Que savez-vous à ce sujet ? Essayer avec les deux lentilles fournies et commenter.

Par la suite, on utilise le banc d'optique et les éléments classiques (source de lumière blanche, objets divers, miroir plan, écran...).

1.2 Détermination de la distance focale de la lentille convergente par autocollimation

>>> Expliquer cette méthode et l'appliquer à la lentille convergente. En déduire $f' =$ cm ; $u(f') =$ cm .

Q.1) Montrer qu'avec cette méthode le grandissement vaut $\gamma = -1$ à l'aide d'un simple schéma.

1.3 Détermination de la distance focale de la lentille convergente par la formule de conjugaison

La formule de conjugaison d'une lentille de centre optique O est $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$. $p = \overline{OA}$ et $p' = \overline{OA'}$ caractérisent la position

des points objet A et image A' . Il faut $p' > 0$: image réelle, pour l'observer sur l'écran. Le grandissement est $\gamma = p' / p$.

>>> L'objet reste fixe. En faisant varier la position de la lentille, donc de la distance entre l'objet et l'écran (7/8 valeurs différentes), déterminer les positions de l'image ainsi que de l'objet et l'incertitude-type sur la position de l'image.

Déterminer également à chaque fois la valeur du grandissement transversal, avec une évaluation de l'incertitude de ces mesures.

>>> Donner par la méthode analytique l'expression de l'incertitude-type sur la distance focale issue d'une mesure unique (on néglige l'incertitude sur la position de l'objet).

Donner, en utilisant la formule de conjugaison, la valeur mesurée de f' à l'aide du script Python fourni : $f' =$ cm .

Pour l'incertitude-type associée, comparer deux méthodes :

— Première méthode : on l'évalue à l'aide de la dispersion sur les différentes valeurs trouvées pour f' : $u(f') =$ cm .

— Deuxième méthode : on l'évalue à l'aide de la formule $f' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f'_i$: $u(f') = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(f'_i)}$ = cm .

1.4 Détermination de la distance focale de la lentille divergente par la formule de conjugaison

Q.2) Où doit se trouver l'objet d'une lentille divergente pour que celle-ci en forme une image réelle ?

>>> Utiliser la lentille convergente pour former sur l'écran un tel objet avec un grandissement transversal proche de -1 . Repérer **soigneusement** sa position puis reprendre la méthode du 1.3.

>>> En déduire à l'aide du script Python fourni la distance focale de la lentille divergente indiquée $f' = -50$ cm en utilisant la formule de conjugaison : $f' =$ cm ; $u(f') =$ cm (première méthode) ; $u(f') =$ cm (deuxième méthode)

APPELER L'EXAMINATEUR

2. UTILISATION D'UN VISEUR À FRONTALE FIXE

2.1 Utilisation d'une lunette de visée réglée à l'infini

Sans la bonnette (système de lentilles qui vient coiffer l'avant de la lunette), la lunette est une lunette de visée réglée à l'infini. Dans le cas d'un œil normal (emmétrope), la lunette est un système afocal à deux lentilles convergentes : l'objectif L_1 de distance focale f'_1 , et l'oculaire L_2 de distance focale $f'_2 < f'_1$. La lunette contient également dans un plan transversal un réticule ainsi qu'un ensemble de deux fils verticaux translatables grâce à un tambour rotatif permettant de repérer la position des fils à 1/10^{ème} de mm près. Ce réticule se trouve par construction dans le plan focal image de l'objectif : la lunette est réglée à l'infini.

Q.3) Faire le schéma de la lunette de visée, et construire la marche d'un faisceau de rayons inclinés par rapport à l'axe optique, provenant de l'infini, parvenant jusqu'à l'œil emmétrope d'un observateur situé derrière l'oculaire. Définir et calculer en fonction de f'_1 et f'_2 le grandissement angulaire algébrique.

>>> Sortir la lunette de visée du banc d'optique et l'emmenner dans la salle adjacente. Enlever la bonnette si celle-ci est en place. Régler l'oculaire de la lunette en mettant au point sur le réticule.

>>> Viser à travers la fenêtre un objet éloigné : on doit en voir une image nette et inversée ainsi que du réticule.

Q.4) Pourquoi cherche-t-on à ce que l'image soit à l'infini ? Pourquoi la position de l'oculaire par rapport au réticule n'est-elle pas figée comme pour celle de l'objectif par rapport au réticule ?

2.2 Principe d'un viseur à frontale fixe

>>> Coiffer la lunette réglée à l'infini de sa bonnette pour la transformer en viseur à frontale fixe. Ce système donne une image nette des objets situés à une distance finie d bien déterminée de la lentille frontale avec une profondeur de champ très faible.

Q.5) On assimile la bonnette à une lentille convergente L_0 . Faire un dessin et une construction des rayons provenant d'un objet AB situé à la distance d de la lentille frontale jusqu'à l'œil de l'observateur.

>>> Réaliser un montage permettant d'évaluer la latitude de mise au point du viseur à frontale fixe. L'objet est constitué d'un quadrillage dessiné sur une plaque en plastique transparent précédé d'un filtre vert pour ne pas être ébloui. Commenter.

Les viseurs à frontale fixe servent aux pointés longitudinaux : la distance de deux objets sur l'axe optique du système parallèle à l'axe du banc est mesurée par le déplacement du viseur dans les visées successives des deux images correspondantes.

2.3 Utilisation du viseur à frontale fixe pour la détermination d'une distance focale

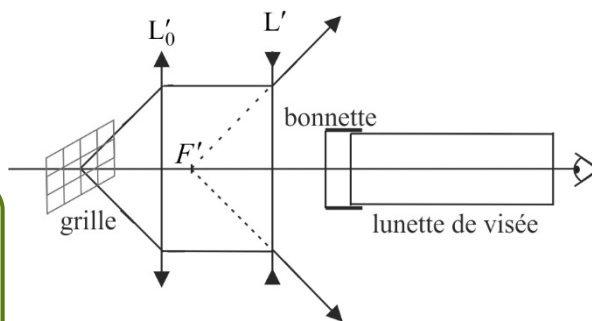
L'objet est toujours constitué du quadrillage précédé du filtre vert.

>>> Réaliser un faisceau incident de lumière parallèle pour tout point source en plaçant une lentille L'_0 de distance focale $f'_0 = 150$ mm derrière le quadrillage de façon à ce que celui-ci soit dans son plan focal objet. Ce réglage est effectué en utilisant la lunette réglée à l'infini.

Q.6) Expliquer le protocole permettant de placer le quadrillage dans le plan focal objet de L'_0 .

>>> Placer une lentille divergente L' dont on indique la focale « $f' = -100$ mm » sur le faisceau précédent. L' donne de l'image à l'infini du grillage une nouvelle image dans le plan focal image virtuel de cette lentille.

Q.7) Expliquer le protocole permettant de mesurer la distance focale de L' . On notera qu'il est possible de viser la lentille L' elle-même du fait de la présence de défauts (rayures, poussières) présents sur la surface du verre. Ce protocole aurait-il fonctionné avec la lentille divergente de la partie 1 ?



APPELER L'EXAMINATEUR

>>> **Mesures :** $f' =$ cm ; $u(f') =$ cm .

>>> Déterminer par la même méthode la distance focale de la lentille convergente de la partie 1. Il y a-t-il une limitation comme pour les lentilles divergentes ? $f' =$ cm ; $u(f') =$ cm .

>>> Compléter les mesures en encadrant la fréquence f_0 à l'aide de la méthode de la Q.1). Déterminer le gain pour la valeur centrale de cet intervalle, et en déduire la valeur du facteur de qualité : $Q =$.

>>> Tracer les diagrammes de Bode en complétant le fichier Python fourni, ainsi que les asymptotes en BF et HF dans le diagramme de Bode du gain. Pour cette dernière, on choisira par *slicing* les points expérimentaux utiles pour effectuer un ajustement affine en hautes fréquences. Mesurer les pentes des asymptotes :

$f \rightarrow 0$ pente : dB/décade $\varphi \rightarrow$
 $f \rightarrow \infty$ pente: dB/décade $\varphi \rightarrow$ (le code fournit la pente de la droite d'ajustement).

En déduire une nouvelle mesure de f_0 : $f_0 =$ Hz .

>>> Mesurer les valeurs du gain statique H_0 du système en expliquant la méthode retenue.

APPELER L'EXAMINATEUR

3. RÉPONSE INDICIELLE

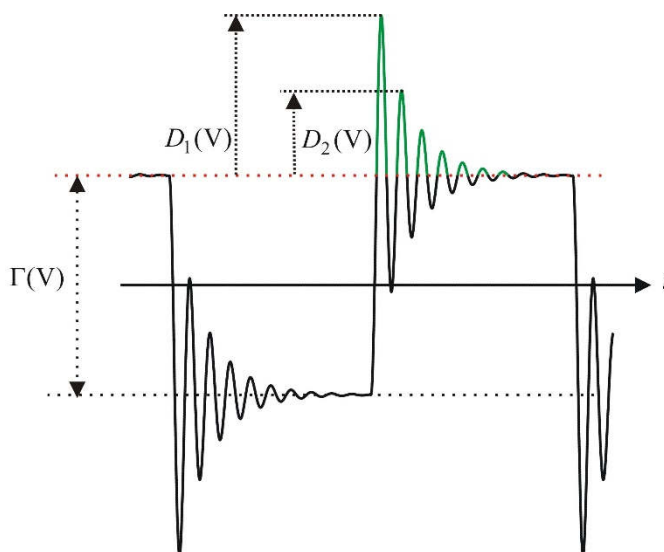
Dans le cas où $Q > \frac{1}{2}$, la réponse indicielle est pseudo-périodique : elle oscille périodiquement, mais les oscillations sont

amorties. Pour $t > 0$, elle s'écrit : $V_s(t) = H_0 E \left[1 - \frac{2Q}{\sqrt{4Q^2 - 1}} e^{-\frac{\omega_0}{2Q}t} \cos \left(\omega_0 t \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} + \psi \right) \right]$, avec $\psi = -\arctan \frac{1}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$.

3.1 Obtention de la réponse indicielle

Q.3) À quelle condition peut-on observer la réponse indicielle avec un signal d'entrée en créneaux ?

>>> Envoyer en entrée du filtre un signal créneaux de fréquence adaptée à l'étude des oscillations amorties.



>>> Effectuer des mesures permettant la détermination de H_0 : $H_0 =$.

3.2 Détermination du facteur de qualité

>>> Mesurer en utilisant les curseurs de l'oscilloscope le dépassement maximum D_1 ainsi que les dépassements suivants D_2 , D_3 , et D_4 .

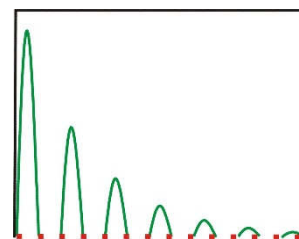
On cherchera à effectuer les mesures avec des incertitudes-type faibles.

$D_1 =$ V; $u(D_1) =$ V $D_2 =$ V
 $D_3 =$ V $D_4 =$ V

On définit le décrément logarithmique $\Lambda = \ln \frac{D_i}{D_{i+1}}$.

On note également Γ l'écart entre asymptotes et $\Delta = D_1 / \Gamma$ la valeur du premier dépassement en % de l'écart entre asymptotes.

$\Gamma =$ V; $u(\Gamma) =$ V .



Une fonction Python est disponible pour étudier la propagation des incertitudes par la méthode de Monte-Carlo :

>>> Expliquer le principe de la méthode et le code utilisé.

>>> En déduire $\Delta =$; $u(\Delta) =$

Q.4) On pose $\sigma = \frac{1}{2Q}$ et $r(t) = \frac{V_s(t)}{H_0 E} - 1 = -\frac{1}{\sqrt{1-\sigma^2}} e^{-\sigma\omega_0 t} \cos\left(\omega_0 t \sqrt{1-\sigma^2} - \arctan \frac{\sigma}{\sqrt{1-\sigma^2}}\right)$.

Calculer les instants $t_i > 0$, avec $i \in \mathbb{N}^*$, tels que r soit maximal, en fonction de i , σ et ω_0 , puis les valeurs des dépassements $\Delta_i > 0$ à ces instants.

En déduire les relations $Q = \frac{\sqrt{\pi^2 + (\ln \Delta)^2}}{2|\ln \Delta|}$ et $Q = \frac{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}}{2\Lambda}$, et $f_0 = \frac{2Q}{T\sqrt{4Q^2 - 1}}$, où T est la période des oscillations.

>>> Utiliser la fonction Python pour déterminer le facteur de qualité Q à l'aide de la relation $Q = \frac{\sqrt{\pi^2 + (\ln \Delta)^2}}{2|\ln \Delta|}$:

$Q =$; $u(Q) =$

>>> Calculer $\ln(D_1 / D_2) =$; $\ln(D_2 / D_3) =$; $\ln(D_3 / D_4) =$. La décroissance exponentielle des oscillations est-elle vérifiée ?

3.3 Détermination de f_0

>>> Effectuer une mesure supplémentaire permettant à l'aide de la valeur trouvée pour Q d'en déduire, à l'aide de la fonction

Python, la fréquence des oscillations non amorties $f_0 = \frac{2Q}{T\sqrt{4Q^2 - 1}}$ et son incertitude-type :

$f_0 =$ Hz ; $u(f_0) =$ Hz

APPELER L'EXAMINATEUR

>>> Expliquer ce qu'est le temps de montée et le protocole pour le mesurer. Effectuer la mesure : $t_m =$ μs et le comparer

à sa valeur théorique pour $Q = 5$: $t_m = \frac{0,175}{f_0} =$ μs .

Vérifier le résultat à l'aide de la fonction de l'oscilloscope permettant la mesure automatique de t_m : $t_m =$ μs .

4. ÉPILOGUE

>>> Comparer les études fréquentielle et temporelle dans le but d'identifier les paramètres d'un filtre : simplicité de la méthode, durée des manipulations, incertitudes de mesure...

>>> Visualiser la réponse à des créneaux de fréquences 1Hz, puis 1 kHz puis 10 kHz et interpréter les signaux obtenus. On s'aidera d'une analyse spectrale dans le cas $f = 1$ kHz .

La connaissance du montage permet ici de calculer la fonction de transfert théorique :

Q.5) Montrer que la fonction de transfert est bien celle donnée ci-dessus avec $H_0 = 1$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$ et

$Q = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}$. Faire l'application numérique pour $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$ et Q .

>>> Comparer les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques.

Matériel :

Plaque de connexion

1 A.L.I TL 081

Capacités de 1 nF et 100 nF

2 résistances de 1 k Ω ; 2 de 15 k Ω

PHÉNOMÈNES DIFFUSIFS À 1D, SIMULATION À L'AIDE DE CELLULES RC



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

L'objectif de ce TP consiste à étudier la réponse d'une ligne RC composée de 22 cellules en régime continu, puis en régime transitoire après une excitation en échelon, et enfin en régime sinusoïdal forcé.

Ces manipulations sont analogues aux expériences de diffusion thermique (ou de particules) que l'on peut faire avec une barre conductrice de la chaleur isolée latéralement. On fera autant que possible des rapprochements avec ce phénomène.

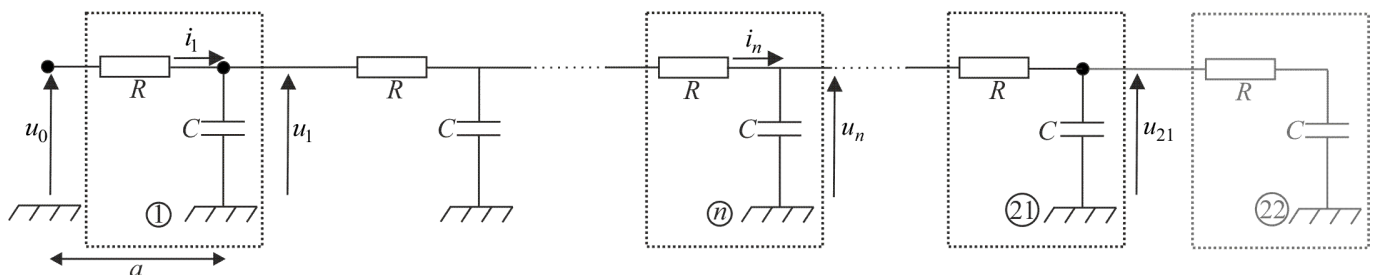
1. MONTAGE ÉTUDIÉ, ÉQUATION DE DIFFUSION

1.1 Montage étudié

Le montage, réalisé sur plaquette, est constitué de 22 cellules RC régulièrement espacées, avec $R = 1,0 \text{ k}\Omega$ et $C = 100 \text{ nF}$, et numérotées de $n = 1$ à $n = 22$. On appelle a la dimension d'une cellule.

Il est possible d'appliquer une tension u_0 en entrée de la ligne, et de mesurer u_1 aux bornes de la capacité de la première cellule, puis toutes les deux cellules les tensions u_3, u_5, \dots, u_{21} aux bornes des capacités des cellules $n = 3, n = 5, \dots, n = 21$.

Schéma électrique du dispositif expérimental :



1.2 Équation de diffusion

Q.1) Déterminer la relation entre u_n , u_{n+1} et u_{n-1} .

En faisant l'approximation des milieux continus, en déduire l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la tension $u(x, t)$ telle que $u(x = na, t) = u_n(t)$.

Exprimer le coefficient de diffusion D en fonction de a et de $\tau = RC$ puis vérifier l'homogénéité.

À quelle condition l'approximation précédente est-elle valable ?

2. RÉGIME STATIONNAIRE

>>> Appliquer une tension continue u_0 de l'ordre de 10 V (mesurée précisément avec un voltmètre) à l'entrée du montage et **court-circuiter l'autre extrémité** en $n = 21$.

À l'aide d'un voltmètre, mesurer les tensions u_n puis tracer sous Python la courbe $u_n = f(n)$. Commenter.

Déterminer l'intensité du courant débité par l'alimentation à l'aide d'un ampèremètre et en déduire la valeur de R . Comparer avec la valeur attendue.

Q.2) Quelle est la situation analogue pour la diffusion thermique ?

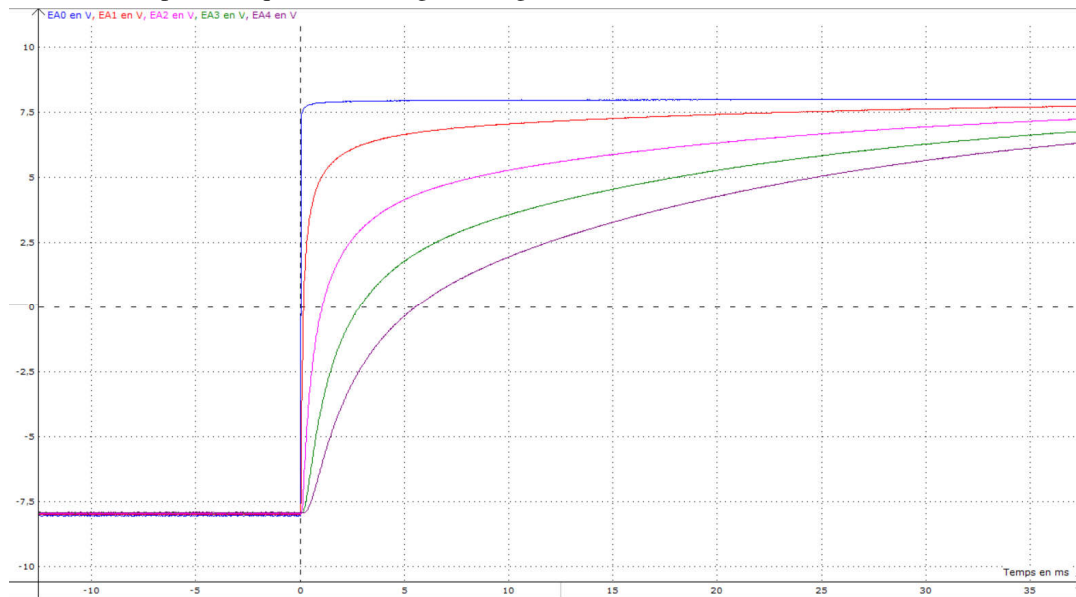
APPELER L'EXAMINATEUR

3. RÉPONSE À UN ÉCHELON DE TENSION

>>> Appliquer maintenant une tension $u_0(t)$ de forme créneau symétrique d'amplitude 8 V (donc variant de -8 V à +8 V) et de très basse fréquence (proche de 1 Hz). L'extrémité $n = 21$ n'est pas court-circuitée.

Acquérir les tensions $u_n(t)$ pour $n \leq 7$ comme sur l'exemple ci-dessous :

On justifiera les choix faits pour l'acquisition des signaux (signal de déclenchement, seuil de déclenchement...).



Q.3) Quel est dans ce cas la situation analogue pour la diffusion thermique ?

Q.4) On se propose de résoudre l'équation de diffusion en effectuant le changement de variable $\xi = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$. On a alors

$u(x, t) = f(\xi)$. Exprimer la tension $u_n(t)$ en utilisant la fonction erreur $\text{erf}(\xi)$ définie par $\text{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-X^2) dX$.

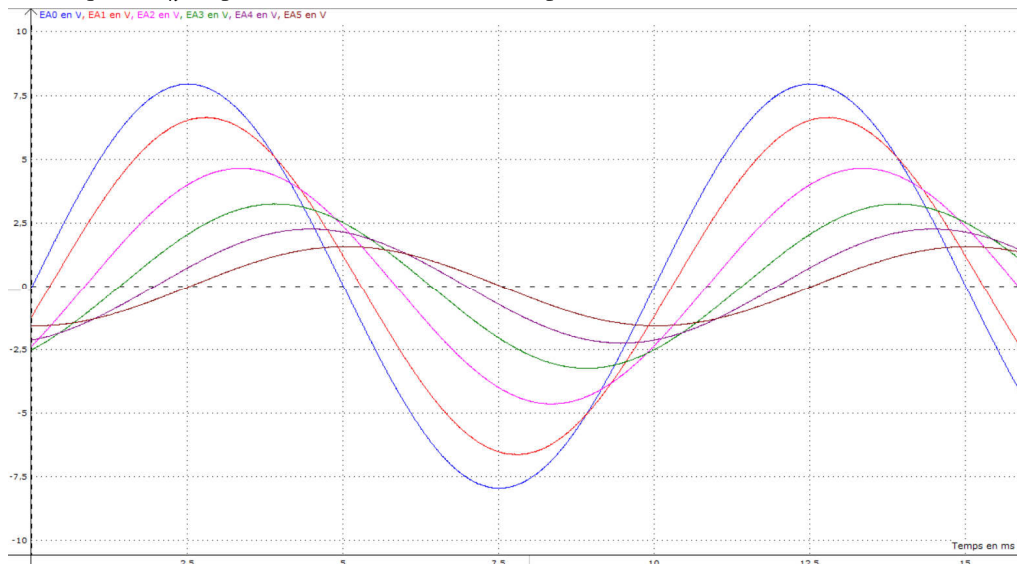
Vérifier qu'avec les conditions aux limites et les conditions initiales, la solution s'écrit $u_n(t) = E_0 \left(1 - \text{erf} \left(\frac{n}{2} \sqrt{\frac{\tau}{t}} \right) \right)$

>>> Sachant que $\text{erf}(0,47694) = 1/2$, déduire une évaluation de la constante de temps τ par une étude graphique. Comparer avec les données constructeur. Pourquoi doit-on se limiter aux valeurs $n \leq 7$?

APPELER L'EXAMINATEUR

4. RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ

>>> Appliquer une tension $u_0(t)$ sinusoïdale d'amplitude 8 V et de fréquence $f = 100$ Hz. L'extrémité $n = 21$ n'est toujours pas court-circuitée. Acquérir $u_n(t)$ pour $n \leq 9$ comme sur l'exemple ci-dessous :



On justifiera les choix faits pour l'acquisition des signaux (signal de déclenchement, seuil de déclenchement...).

Q.5) Quelle est la situation analogue en diffusion thermique ?

En déduire que la solution est de la forme $u_n(t) = U_0 e^{-n\sqrt{\frac{\omega\tau}{2}}} \cos\left(\omega t - n\sqrt{\frac{\omega\tau}{2}}\right)$.

4.1 Étude de l'amplitude

Déduire graphiquement la constante de temps τ . Comparer avec les données constructeur. Pourquoi se limite-t-on à ces valeurs de n ?

4.2 Étude du retard

Déduire graphiquement la constante de temps τ . Comparer avec les données constructeur.

Q.6) Exprimer la vitesse de phase de l'onde diffusive.

En déduire une condition pour que l'approximation des milieux continus soit valable, et vérifier si c'est bien le cas à la fréquence choisie.

Régression linéaire $Ly = a0*Lx + b0$ sous Python :

```
>>> p0 = np.polyfit(Lx, Ly, 1) # (ajustement polynomial de degré 1)
>>> a0,b0 = p0[0],p0[1]
```

Matériel :

Maquette de 22 cellules RC

FONCTIONNEMENT D'UN HACHEUR



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

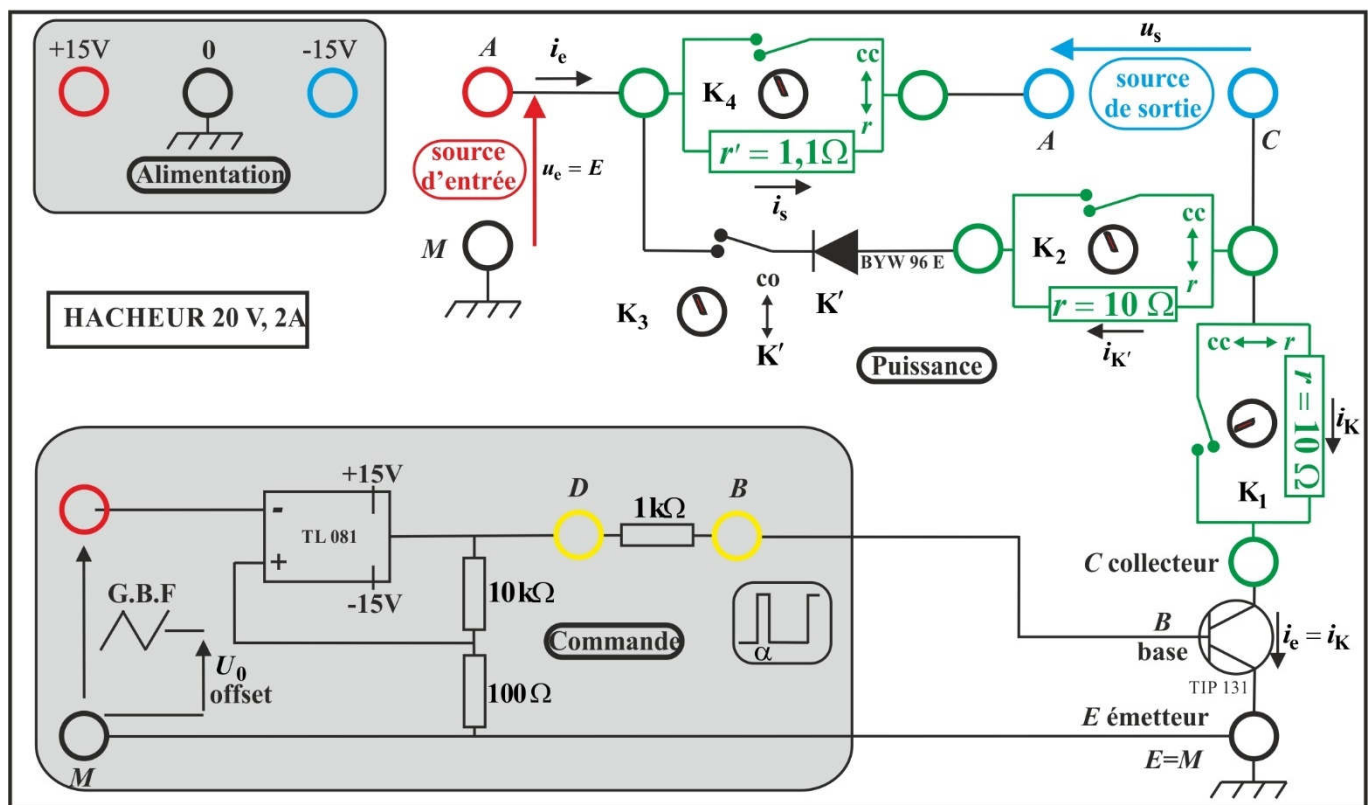
Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

1. COMMANDE DU HACHEUR

1.1 Description de la maquette utilisée

On donne ci-dessous le schéma de la maquette utilisée.



Le bloc « commande » du hacheur est représenté en grisé.

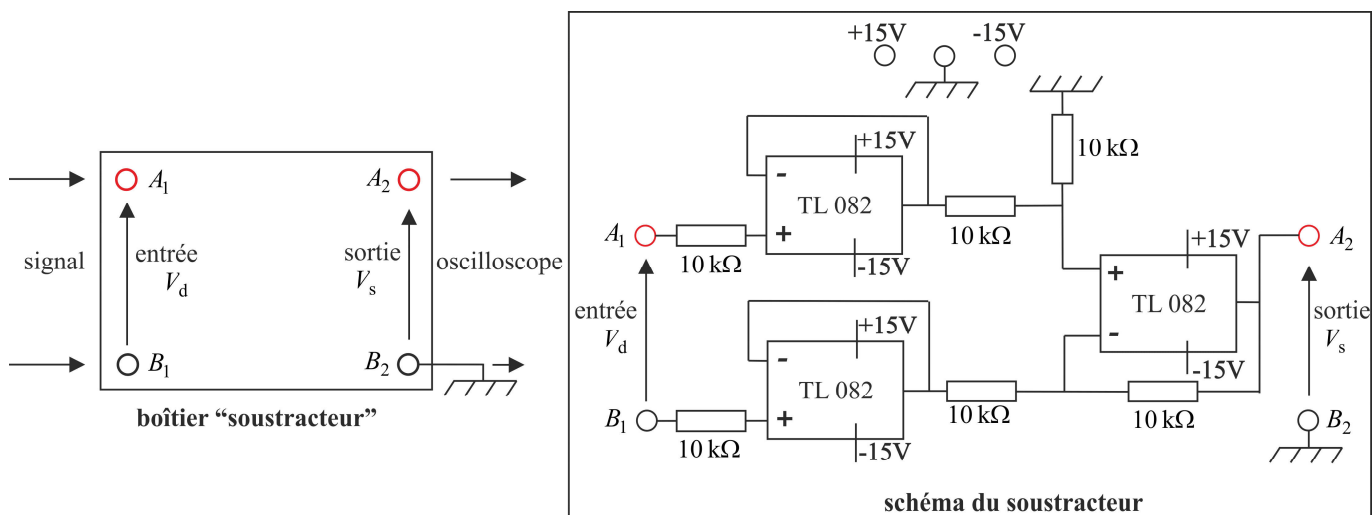
Les trois conducteurs ohmiques de résistance $r = 10 \Omega$ ou $r' = 1,1 \Omega$ permettent de visualiser à l'oscilloscope les courants $i_e = i_K$ (délivré par l'alimentation de puissance, et qui traverse le transistor K), $i_{K'}$ (qui traverse la diode de roue libre K') et i_s (qui traverse la charge). **Il est possible de court-circuiter ces conducteurs ohmiques avec les interrupteurs K_1 , K_2 et K_4 lorsque le hacheur est utilisé dans une application comme la commande d'un moteur où la présence des résistances fait chuter le rendement.**

En revanche, comme on visualisera i_s , la résistance de $r' = 1,1 \Omega$ aux bornes de K_4 ne sera pas court-circuitée, contrairement aux autres. Tout de passe comme si on avait ajouté $1,1 \Omega$ à la charge, ce dont on tiendra compte pour confronter les résultats expérimentaux à leur valeur théorique.

L'interrupteur K_3 permet de mettre en service la diode de roue libre K' (quand il est fermé) ou de la mettre hors service (quand il est ouvert : position circuit ouvert (co)).

>>> Vérifier à l'ohmmètre les valeurs de r et r' : $r = \quad \Omega$ et $r' = \quad \Omega$.

Pour prélever à l'oscilloscope les tensions aux bornes de ces résistances ou entre deux points quelconques de la maquette, on utilise un montage soustracteur déjà réalisé dans un boîtier (qui contient en fait deux soustracteurs indépendants) :



La masse du boîtier étant la même que celle de l'oscilloscope, on créerait en effet des courts-circuits en branchant directement l'oscilloscope entre deux points quelconques de la maquette.

L'oscilloscope est en SORTIE du boîtier soustracteur, les fils permettant de prélever une tension dans le circuit sont en ENTRÉE... Dans le cas inverse des signaux sont appliqués dans le montage et peuvent détruire les diodes ou le transistor de la maquette.

D'autre part, les montages à A.L.I pouvant présenter des tensions de décalage en sortie, on n'utilisera les tensions fournies par le soustracteur que pour mesurer des différences de tension. **Pour des valeurs moyennes de tension ou de courant, on utilisera un multimètre en mode DC.**

Q.1) Justifier que l'utilisation d'un soustracteur est nécessaire ici pour prélever des tensions dans le circuit de puissance. Pourrait-on également utiliser un transformateur d'isolement ?
 Montrer qu'avec le soustracteur, on a $V_{A_1} - V_{B_1} = V_{A_2} - V_{B_2}$ sans avoir $V_{A_1} = V_{A_2}$, ni $V_{B_1} = V_{B_2}$.

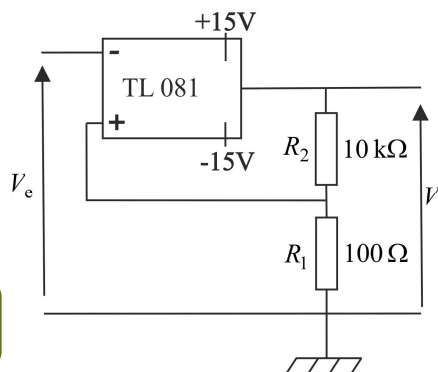
1.2 Fonctionnement de la commande

Document 1 : commande du rapport cyclique

La commande est obtenue avec un comparateur à hystérésis attaqué par des signaux triangulaires d'amplitude V_1 et de valeur moyenne U_0 (tension de décalage ou d'offset).

Q.2) Étudier les conditions de basculement du montage et tracer le cycle d'hystérésis donnant V_s en fonction de V_e . Calculer numériquement les valeurs $\pm V_{\text{basc.}}$ de V_e provoquant le basculement et commenter.

Q.3) Montrer que l'on peut en jouant sur U_0 obtenir pour V_s un signal en créneaux dont on peut faire varier le rapport cyclique α entre 0 et 1.



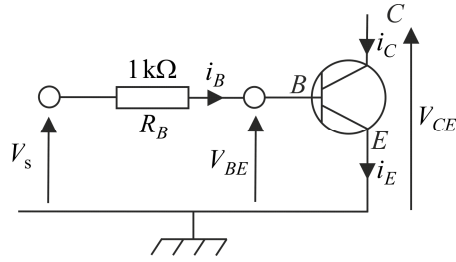
>>> Alimenter la commande du hacheur avec le G.B.F en signaux triangulaires de fréquence $f = 100 \text{ Hz}$ et d'amplitude $U_0 = 5 \text{ V}$ et visualiser les signaux d'entrée et de sortie du comparateur. Visualiser le cycle d'hystérésis.

>>> Ajouter une tension de décalage et observer que l'on peut bien régler le rapport cyclique à la valeur désirée entre 0 et 1.

APPELER L'EXAMINATEUR

Document 2 : commande du transistor

La tension de sortie V_s du comparateur est appliquée au montage contenant le transistor appelé « montage à émetteur commun » :



La caractéristique $i_B(V_{BE})$ est similaire à celle d'une diode que l'on supposera idéale (dont la caractéristique est représentée ci-contre).

On a donc :

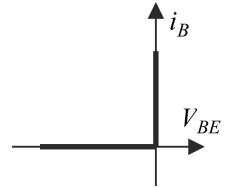
— quand $V_s = +V_{sat}$, $i_B > 0$ et $V_{BE} \approx 0$ donc $i_B = \frac{V_{sat}}{R_B} \approx 14 \text{ mA}$;

— quand $V_s = -V_{sat}$, $i_B = 0$ et $V_{BE} = -V_{sat}$.

i_B reste toujours faible : on a $i_E \approx i_C$. On peut considérer CE comme un dipôle commandé par i_B :

— si $i_B = 0$ on est en régime bloqué (non linéaire) : $i_C = 0$ et $V_{CE} > 0$.

— si $i_B > 0$, on est en régime saturé (non linéaire) : $i_C > 0$ et $V_{CE} \approx 0$.



Finalement, le transistor se comporte ici en interrupteur commandé par V_s :

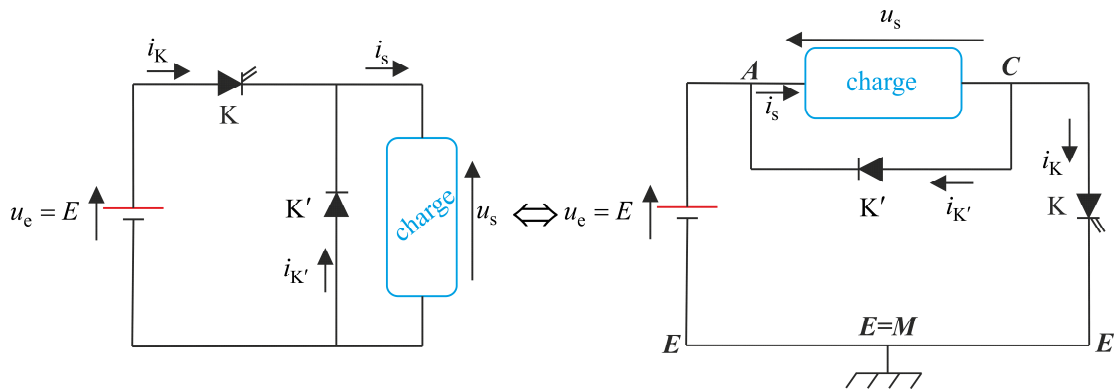
si $V_s = +V_{sat}$ (entre 0 et αT), $i_C > 0$ et $V_{CE} \approx 0$: interrupteur fermé

si $V_s = -V_{sat}$ (entre αT et T), $i_C = 0$ et $V_{CE} > 0$: interrupteur ouvert

2. HACHEUR SÉRIE (DÉVOLTEUR)

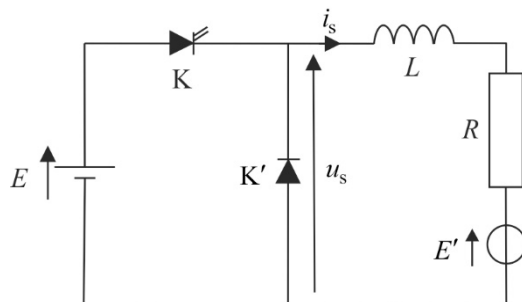
2.1 Branchements

Le hacheur série est constitué de la charge en parallèle avec une diode, en série avec l'alimentation de puissance (source de tension) et le transistor. On a donc ci-dessous deux montages équivalents : à gauche, le montage théorique, à droite, le montage expérimental réalisable avec la maquette disponible. On peut remarquer que seule la position du transistor (toujours en série avec la source de puissance) a changé.



>>> Connecter entre A et E (masse) l'alimentation de puissance Jeulin Evolution.

La charge sera du type R, L, E' (force contre-électromotrice). Elle est placée entre A et C.



Document 3 : conduction continue / discontinue

Conduction continue

Pour obtenir une tension réglable aux bornes de la charge, on hache la tension d'alimentation continue $E = 10\text{ V}$: le hacheur fournit une tension $u_s(t)$ T -périodique. T est supposée petite devant la constante de temps $\tau = L/R$ de la charge. On note $f = 1/T$ la fréquence de hachage. On a $u_s = E = 10\text{ V}$ pendant la durée αT et 0 le reste de la période T , soit une valeur moyenne $\langle u_s \rangle = \alpha E$ pendant T réglable grâce au rapport cyclique α .

Q.4) Justifier que la bobine se comporte comme une source de courant. En réalité, l'intensité i dans la charge fluctue faiblement autour de sa valeur moyenne $I_0 = \langle i_s \rangle$. Montrer que $I_0 = \frac{\alpha E - E'}{R}$ et que $\Delta i_s = i_{s\text{max}} - i_{s\text{min}} = \alpha(1 - \alpha) \frac{E}{L} T$.

Conduction discontinue

Tout ce qui précède n'est vrai que si le courant i_s ne s'annule pas entre αT et T (conduction continue). Dans le cas où il s'annule (conduction discontinue) à la date $\beta T < T$, la diode K' se bloque et on n'a plus $u_s = 0$ mais $i_s = 0$ entre βT et T . On doit donc reprendre les équations différentielles. On néglige toujours le terme Ri_s : $u_s = E' + L \frac{di_s}{dt}$.

Entre 0 et αT , $u_c = E$ et $\frac{di_s}{dt} = \frac{E - E'}{L} \Rightarrow i_s = \frac{E - E'}{L} t$ puisque $i_s(0) = 0$. On a donc $i_{s\text{max}} = \frac{E - E'}{L} \alpha T$.

Entre αT et βT , $u_s = 0$ et $\frac{di_s}{dt} = \frac{-E'}{L} \Rightarrow i_s = i_{s\text{max}} - \frac{E'}{L} (t - \alpha T)$.

i_s s'annule à $t = \beta T$. On a donc $\beta T = \alpha T + \frac{Li_{s\text{max}}}{E'} = \alpha T + \frac{E - E'}{E'} \alpha T$ et

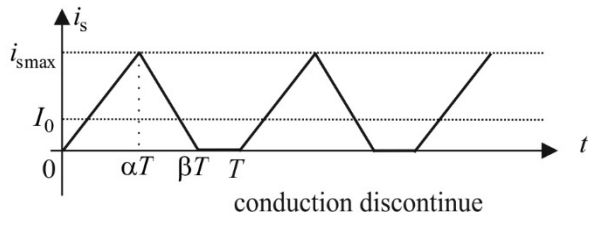
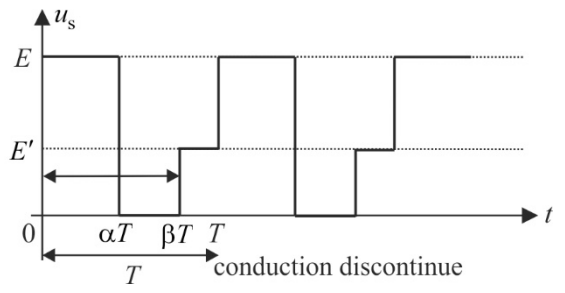
on en déduit $\beta = \frac{E}{E'} \alpha$. On est donc en régime discontinu quand $\beta < 1$, c'est-à-dire quand $\alpha < E'/E$. Entre βT et T , $i_s = 0$ et $u_s = E'$.

Entre 0 et βT , la valeur moyenne de i_s est $\frac{i_{s\text{max}}}{2} = \frac{E - E'}{2L} \alpha T$, donc

$$I_0 = \langle i_s \rangle = \frac{\beta T i_{s\text{max}} / 2 + (1 - \beta) T \cdot 0}{T} = \beta \frac{i_{s\text{max}}}{2} = \frac{E}{E'} \alpha \frac{E - E'}{2L} \alpha T, \text{ soit :}$$

$$I_0 = \frac{E(E - E') \alpha^2 T}{E' 2L}. \text{ La valeur moyenne de } u_s \text{ vaut maintenant :}$$

$$\langle u_s \rangle = \frac{\alpha T E + (\beta - \alpha) T \cdot 0 + (1 - \beta) T E'}{T} = \alpha E + (1 - \frac{E}{E'} \alpha) E' = E'.$$



2.2 Fonctionnement sur une charge (R', L)

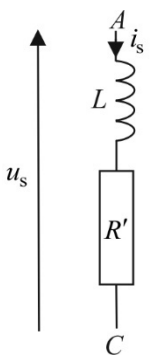
La charge est constituée par l'association série entre une bobine d'inductance maximale $L = L_{\text{max}} \approx 1,4\text{ H}$ (on règle sa valeur en déplaçant un noyau de fer doux dans la bobine) et un conducteur ohmique monté sur plaquette de bois, et qui peut être associé avec une pile placée sur la même plaquette. **R' est donc l'association série de la résistance de la bobine et de la résistance 50Ω du conducteur ohmique** (qui supporte des intensités supérieures à celles utilisées en électronique des signaux). Ne pas utiliser d'autres résistances !

Avant de connecter la charge au hacheur, effectuer les mesures suivantes :

>>> Mesurer à l'ohmmètre la valeur de **R'** : **R' = Ω**.

>>> Insérer la bobine dans un montage permettant de mesurer la valeur de L_{max} : **L_max = H**. On détaillera le protocole retenu.

>>> Placer la charge entre A et C. Amener E à 10 V.



Systématiquement ramener à 0 V la tension de l'alimentation avant d'ouvrir le circuit de puissance. Sans cette précaution, la présence de bobinages provoque à l'ouverture du circuit une étincelle de rupture qui peut l'endommager.

Puisque $E' = 0$, seul le régime de conduction continue intervient dans cette partie.

>>> Régler la fréquence de hachage à **f = 100 Hz** et le rapport cyclique **α = 0,80**

>>> Mettre en service la diode de roue libre et relever sur un même graphe u_s , i_s , i_K et $i_{K'}$. Comparer aux courbes théoriques et commenter.

>>> Mettre hors service la diode de roue libre et relever les allures de u_s et i_s . Justifier le rôle de la diode.

>>> Remettre en service la diode de roue libre pour toute la suite du T.P. Diminuer la valeur de L en sortant progressivement le noyau de fer doux de la bobine. Observer les variations de u_s , i_s et $I_0 = \langle i_s \rangle$. Interpréter, puis revenir à L_{\max} .

>>> On cherche à vérifier, en traçant des régressions linéaires à l'aide du fichier Python fourni, la relation $I_{0th} = \langle i_s \rangle = \alpha E / R$ (en effectuant les mesures à l'ampèremètre en mode DC), ainsi que la relation $\Delta i_{s,th} = i_{s,max} - i_{s,min} = \alpha(1-\alpha)ET / L$, lu crête-à-crête à l'oscilloscope (en prenant des moyennes grâce au menu **Acquérir**, car le signal visualisé, $r'i_s$, est très faible donc très bruité, puis en plaçant *manuellement* des curseurs d'amplitude). Dans ce but, on fait varier une des grandeurs parmi α , E et f :
 $E = 10 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$

α	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
I_{0exp} (mA)							
$\Delta i_{s,exp}$ (mA)							

Déduire de ces mesures la valeur de R , que l'on utilisera par la suite : $R = \Omega$. La comparer à R' . Commenter.

Calculer la valeur numérique de $\tau = L / R$, la comparer à T et commenter.

$\alpha = 0,5$, $f = 100 \text{ Hz}$

E (V)	0	2	4	6	8	10
I_{0exp} (mA)						
$\Delta i_{s,exp}$ (mA)						

$\alpha = 0,5$, $E = 10 \text{ V}$

f (Hz)	100	200	300	400
I_{0exp} (mA)				
$\Delta i_{s,exp}$ (mA)				

APPELER L'EXAMINATEUR

2.3 Fonctionnement sur une charge (R' , L , force contre-électromotrice E')

La charge est cette fois-ci constituée par l'ensemble série R' , $L = L_{\max}$ et la pile de f.e.m E' placée en **opposition** au courant d'intensité i_s . L'ensemble est alors équivalent à l'induit d'un moteur à courant continu.

>>> Mesurer au voltmètre la valeur de E' : $E' = \text{V}$.

>>> Ramener à 0 la tension de l'alimentation de puissance. Placer la charge entre A et C. Ramener E à 10 V.

Conduction continue

>>> Régler la fréquence de hachage à $f = 100 \text{ Hz}$ et le rapport cyclique α à 0,80. Observer u_s et i_s . Leur forme est-elle modifiée par la présence de la pile ?

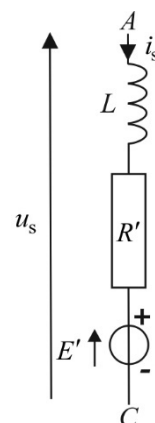
>>> Vérifier sous Python la formule $I_0 = \frac{\alpha E - E'}{R}$ en faisant varier E tout en gardant une conduction continue.

$\alpha = 0,80$, $f = 100 \text{ Hz}$.

E (V)	10	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5
I_{0exp} (mA)								

Conduction discontinue

>>> Régler la fréquence de hachage à $f = 100 \text{ Hz}$ et le rapport cyclique α à 0,2. Relever sur un même graphe u_s et i_s . Interpréter les allures observées.



Régression linéaire $Ly = a_0 * Lx + b_0$ sous Python :

```
>>> p0 = np.polyfit(Lx, Ly, 1) # (ajustement polynomial de degré 1)
```

```
>>> a0,b0 = p0[0],p0[1]
```

Matériel :

Maquette hacheur
 Alimentation Jeulin Evolution
 Boîte soustracteur
 Multimètre Voltcraft
 Bobine de 1,4 H avec fer doux mobile
 Plaquette en bois avec résistance de 50Ω et pile plate 4,5 V

FILTRE INTÉGRATEUR



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

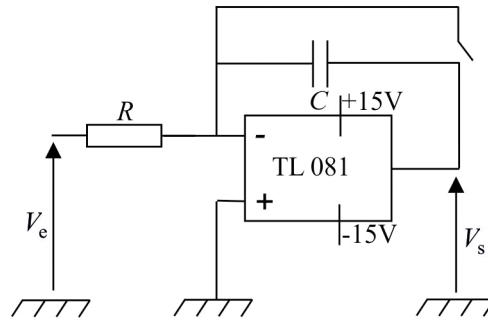
L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

Q.1) Quel est l'intérêt de réaliser un montage permettant d'intégrer un signal ? Connaissez-vous des exemples concrets où un intégrateur est utilisé ?

1. INTÉGRATEUR DE MILLER

1.1 Montage à réaliser

>>> Réaliser le montage suivant :



On prend $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 47 \text{ nF}$. L'A.L.I est un TL 081 (courants de polarisation faibles).

1.2 Manipulation

>>> Envoyer à l'aide du G.B.F une tension V_e sinusoïdale de fréquence $f = 1 \text{ kHz}$.

Qu'observe-t-on en sortie à l'oscilloscope en mode DC (on remet à zéro en déchargeant le condensateur dans un court-circuit à l'aide d'un fil) ?

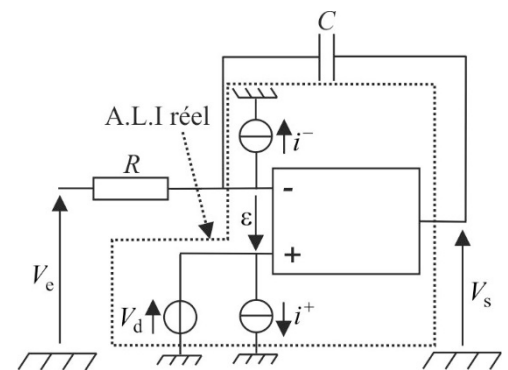
Caractériser le phénomène observé à l'aide d'une durée caractéristique à évaluer : $\theta =$ s .

1.3 Étude théorique

On tient compte de la présence de courants d'entrée non nuls (courants de polarisation i^+ et i^- sensiblement constants) et d'une tension de décalage ramenée à l'entrée (V_d , également sensiblement constante). Les défauts de l'A.L.I réel sont pris en compte dans le montage équivalent ci-contre, faisant intervenir un A.L.I idéal.

Q.2) Montrer que la réponse à un signal $V_e(t)$ appliqué à partir de $t = 0$ est :

$$V_s(t) = -\int_0^t \frac{V_e(t)}{RC} dt + \frac{i^-}{C} t + V_d \left[1 + \frac{t}{RC} \right].$$

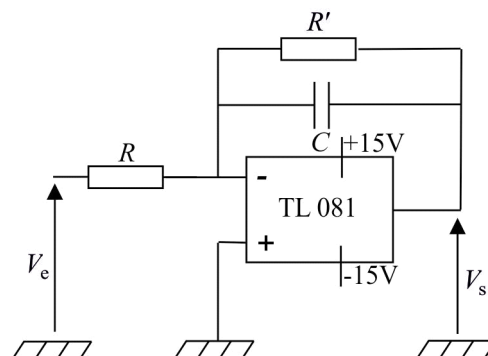


En déduire une estimation de $i^- + \frac{V_d}{R} \approx$ nA .

2. MONTAGE PSEUDO - INTÉGRATEUR

2.1 Amélioration du montage

>>> Rajouter un conducteur ohmique de résistance $R' = 330\text{ k}\Omega$ en parallèle avec le condensateur.



2.2 Manipulation

>>> Montrer, en utilisant diverses formes de signaux d'entrée, que l'on n'a plus qu'un pseudo-intégrateur qui n'intègre que des signaux « hautes fréquences ».

Q.3) Donner un exemple de montage passif pouvant aussi se comporter comme un intégrateur. Quel est l'intérêt d'utiliser un montage actif ?

APPELER L'EXAMINATEUR

2.3 Étude théorique

Q.4) Montrer que même en présence des défauts précédents, on a simplement une tension de décalage en sortie :

$$V_0 = R'i^- + V_d \left[1 + \frac{R'}{R} \right].$$

Montrer qu'en régime établi, la partie fluctuante \tilde{V}_s de V_s est liée à V_e par $\tilde{V}_s = -\frac{V_e}{[1 + jR'C\omega] \cdot R / R'}$.

Justifier alors le comportement du montage.

2.4 Gain statique

>>> Mesurer à l'aide d'un voltmètre électronique le gain statique $A_{0\text{exp}}$ du filtre ainsi obtenu. On expliquera la méthode utilisée afin de s'affranchir de l'existence d'une tension de décalage en sortie. **On ne doit pas avoir de saturation en tension de sortie.** Comparer $A_{0\text{exp}}$ à sa valeur théorique $A_{0\text{th}}$ à l'aide d'un Z-score (une fonction Python permettant le calcul de propagation d'incertitudes par la méthode de Monte-Carlo est fournie). Les valeurs des résistances sont mesurées à l'ohmmètre. Chaque valeur de A_0 sera assortie de son incertitude-type.

2.5 Diagramme de Bode

>>> Effectuer les mesures de gain pour des fréquences judicieusement choisies, et tracer à l'aide du script Python fourni le diagramme de Bode du gain ainsi que ses asymptotes. Les mesures sont effectuées à l'oscilloscope, crête-à-crête, en mode automatique.

Q.5) Justifier l'utilisation du mode DC et pas AC à 50 Hz.

f (Hz)	0													
V _{ecc} (V)														
V _{scc} (V)														

APPELER L'EXAMINATEUR

En déduire la fréquence de coupure et la pente dans la bande de fréquences coupée :

$f_c =$ Hz pente pour $f \rightarrow \infty$ $p =$ dB/décade

Q.6) Commenter le diagramme obtenu dans l'optique de la réalisation d'un montage intégrateur.

Matériel :

- Plaquette de connexion
- 1 A.L.I TL 081
- Capacité de 47 nF, 1 résistance de 10 kΩ ; 1 de 330 kΩ

MESURE D'UNE VITESSE GRÂCE À L'EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

1. ÉTUDE DES TRANSDUCTEURS

On utilise des ondes ultrasonores générées par un émetteur piézoélectrique soumis à une tension sinusoïdale de 40 kHz. Un récepteur piézoélectrique est fixe, et placé face à l'émetteur. Ces transducteurs sont positionnés sur un banc muni d'une courroie et d'un moteur afin de déplacer l'émetteur.

>>> Placer émetteur et récepteur l'un face à l'autre à faible distance. Balayer rapidement en fréquence en se concentrant sur le pic de résonance (une dizaine de points) afin d'obtenir le diagramme de Bode du gain. Les mesures sont effectuées à l'**oscilloscope**, en utilisant la fonction de mesure rapide d'amplitude crête-à-crête des signaux d'entrée (reçu par l'émetteur) et de sortie (émis par le récepteur), notées V_{ecc} et V_{scc} . Le fichier Python fourni permet de tracer ce diagramme.

f (kHz)						$f_0 =$					
V_{ecc} (V)											
V_{scc} (V)											

Tracer le diagramme de Bode. En déduire la fréquence de résonance f_0 et le facteur de qualité Q .

Revenir à un signal sinusoïdal de fréquence $f = 40,0$ kHz.

2. MESURE DE LA VITESSE DU SON

Q.1) La vitesse du son dans un milieu de masse volumique ρ_0 et de compressibilité isentropique χ_S est $c = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 \chi_S}}$. En déduire

c pour de l'air de masse molaire $M = 29,0$ g · mol⁻¹ et de coefficient $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,40$, à la température T_0 .

>>> Mesurer la vitesse du son en indiquant le protocole retenu.

$$c_{exp} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ; u(c_{exp}) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

>>> Comparer à sa valeur théorique, en tenant compte de la température sur la pailleuse, mesurée par un thermomètre électronique. Un Z-score est attendu.

$$\text{Température } T_0 = \quad \text{K} ; u(T_0) = \quad \text{K}$$

$$c_{th} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ; u(c_{th}) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Z =$$

3. MESURE DE LA VITESSE DE L'ÉMETTEUR

Le moteur est alimenté par une alimentation continue dont on règle la tension à 6 V, **ne plus la modifier par la suite**. Les bornes de connexion du moteur à l'alimentation se trouvent sur le côté du banc.

On appliquera et coupera cette tension en débranchant l'un des fils de l'alimentation. On inversera le sens du moteur en inversant les fils au niveau de l'alimentation.

>>> Mesurer *au chronomètre* la durée pour laquelle le chariot se déplace d'une trentaine de cm.

>>> En déduire la vitesse de déplacement de l'émetteur.

$$v_{\text{chronom}} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ; u(v_{\text{chronom}}) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

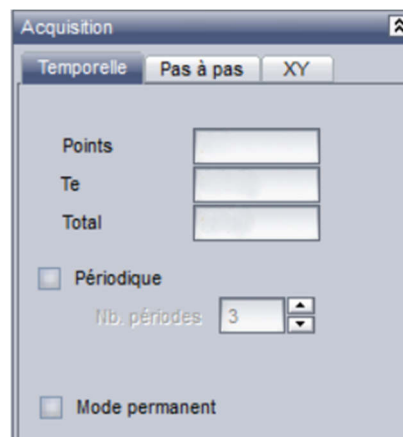
4. UTILISATION DE L'EFFET DOPPLER

Q.2) Montrer que la vitesse v_{Dopp} de l'émetteur est reliée à la vitesse c_{exp} du son dans l'air, à la fréquence f , et à l'écart Doppler

$$\Delta f \text{ entre les fréquences reçue et émise par la relation } v_{\text{Dopp}} = c_{\text{exp}} \frac{\Delta f}{f}.$$

>>> Acquérir grâce au boîtier Sysam, au lieu de la tension émise par le capteur optique, une tension permettant d'obtenir la vitesse de l'émetteur grâce à l'effet Doppler Δf , lorsque ce dernier se rapproche du récepteur (la tension de l'alimentation du moteur étant toujours de 10 V).

Point central de ce T.P : le protocole (paramètres d'acquisition) devra être soigneusement détaillé et justifié (Points ? Te ? Total ?)



Si besoin, on pourra, en le justifiant, utiliser des composants parmi les boîtiers de résistance et de capacité variable, un suiveur, un multiplieur...

Mesures

$$\Delta f = \quad \text{Hz} ; u(\Delta f) = \quad \text{Hz}.$$

$$v_{\text{Dopp}} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ; u(v_{\text{Dopp}}) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Matériel :

Banc doppler du secondaire (capteur optique non utilisé).

Interrupteur (« inverseur 2 A »)

Ensemble {émetteur, récepteur d'ondes ultrasonores}.

Alimentation de puissance.

2 ramettes de fil.

Suiveur, multiplieur, filtres passe-bande, passe-bas : à demander à l'examineur si besoin !

DISPERSION ET ABSORPTION DANS UN CÂBLE COAXIAL



Avant l'épreuve, l'examineur donne quelques explications sur le déroulement du TP, sur le matériel et éventuellement les consignes de sécurité.

Le compte-rendu doit être complet pour se suffire à lui-même : objectifs, description des expériences et conditions expérimentales non décrites dans l'énoncé, mesures brutes, incertitudes-types, observations, traitement des résultats (courbes), interprétation. Soignez sa présentation !

Aujourd'hui, la durée de l'épreuve est de 2h30 (3h à Centrale et ENS Paris Saclay, 3h30 aux Mines, hors tirage au sort, contrôle d'identité et explications).

L'épreuve comporte 2 appels à l'examineur qui permettront un bref échange.

1. PRÉSENTATION

Document 1 : Description du câble utilisé

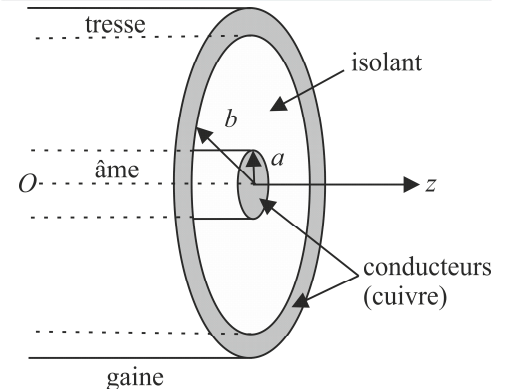
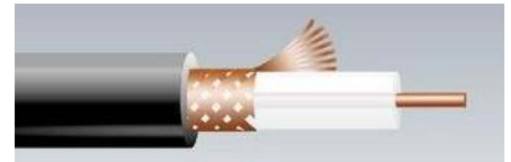
Le câble est constitué d'un conducteur central cylindrique de rayon a (« l'âme »), d'un conducteur périphérique coaxial au premier (« tresse » ou « blindage », de rayon intérieur b).

L'espace entre les deux conducteurs est rempli d'un matériau diélectrique, c'est-à-dire isolant.

Le câble utilisé RG 58 est de longueur $L=100\text{m}$, le diélectrique est du polyéthylène de permittivité relative $\epsilon_r = 2,25$. Le tout est protégé par une gaine en plastique.

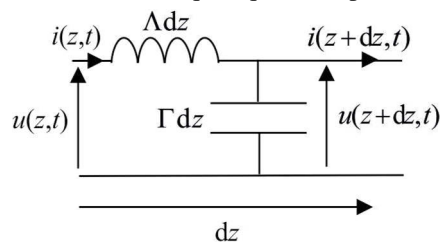
On réalise ainsi un guide d'onde électromagnétique, pour lequel plusieurs structures du champ électromagnétique sont possibles (on les appelle « modes de propagation » du guide d'onde).

Aux fréquences auxquelles nous travaillerons (moins de 20 MHz), on peut montrer que le seul mode de propagation solution des équations de Maxwell dans le câble est un mode transverse électromagnétique « TEM » : les champs \vec{E} et \vec{B} sont perpendiculaires à la direction de propagation.



1.1 Étude théorique

Pour le mode de propagation étudié, le schéma électrocinétique équivalent pour une tranche de câble $[z, z + dz]$ est le suivant :



Le modèle s'appelle « modèle de la constante répartie ». On néglige pour le moment toute absorption : aucun élément résistif ne figure dans le schéma.

Q.1) Montrer que dans un tel câble, une onde progressive de tension et de courant se propage à la célérité : $c = \frac{1}{\sqrt{\Lambda\Gamma}}$ et que

l'on a $Z_c = \frac{u(z,t)}{i(z,t)} = \sqrt{\frac{\Lambda}{\Gamma}}$, où Z_c est l'impédance itérative, ou caractéristique du câble.

Q.2) Montrer que le coefficient de réflexion en tension à l'extrémité $z=0$ du câble vaut $\rho = \frac{u_r(0,t)}{u_i(0,t)} = \frac{R - Z_c}{R + Z_c}$ quand on le branche sur une résistance de charge R .

1.2 Présentation de la maquette

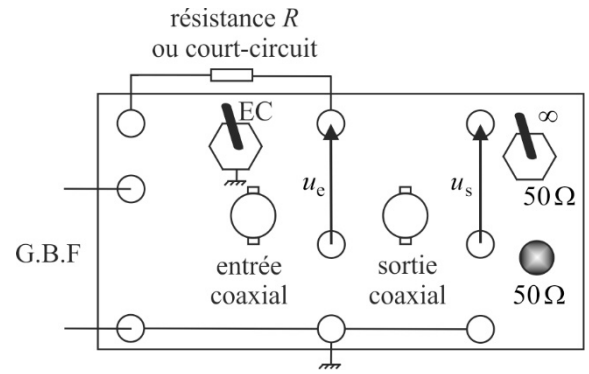
Le câble coaxial de 100 m est connecté entre l'entrée coaxial et la sortie coaxial. La maquette permet d'observer les signaux à l'entrée et à la sortie du câble.

La maquette permet d'appliquer le signal d'un G.B.F à l'entrée du câble coaxial, en ajoutant éventuellement entre les deux bornes prévues à cet effet une résistance R à la résistance de sortie $R_s = 50\Omega$ du G.B.F.

Quand on n'utilise pas cette possibilité, il faut court-circuiter ces deux bornes.

La sortie du câble est soit ouverte (placer le commutateur sur « ∞ »), soit une impédance de 50Ω (placer le commutateur sur « 50Ω »), soit court-circuitée en plaçant un fil entre les deux bornes de sortie.

Toutes les mesures sont faites à l'oscilloscope.



2. PROPAGATION D'IMPULSIONS DE TENSION

2.1 Signal envoyé

>>> Relier l'entrée du câble à un générateur d'impulsions.

Q.3) Donner la condition sur la fréquence des impulsions permettant à l'impulsion réfléchie de revenir en entrée du câble avant que ne soit émise l'impulsion suivante. On prend $f = 200\text{kHz}$, commenter ce choix.

>>> On observe le signal à l'entrée du câble. Ajuster la durée des impulsions de sorte qu'elles apparaissent bien séparées.

2.2 Ligne à sortie ouverte

>>> On laisse l'extrémité libre du câble en circuit ouvert ($R \rightarrow \infty$). Qu'observez-vous ? Reproduire les signaux observés. Interpréter.

Mesurer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le diélectrique.

Mesures : $c = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $u(c) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.3 Ligne à sortie court-circuitée

>>> On court-circuite maintenant l'extrémité libre du câble ($R = 0$). Qu'observez-vous ? Reproduire les signaux observés. Interpréter.

Mesurer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le diélectrique.

Mesures : $c = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $u(c) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.4 Ligne adaptée en sortie

>>> On branche maintenant à l'extrémité du câble un conducteur ohmique de résistance $R = 50\Omega$. Qu'observez-vous ? Reproduire les signaux observés. Interpréter.

Mesurer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le diélectrique.

Mesures : $c = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $u(c) = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. DISPERSION ET ABSORPTION DES O.P.P.H DANS LE CÂBLE

>>> Connecter maintenant en entrée du câble le G.B.F qui peut délivrer des signaux jusqu'à 20 MHz. Lui faire délivrer un signal **sinusoïdal** dont la fréquence variera de 200 kHz à 20 MHz.

>>> Utiliser la sortie du câble permettant d'obtenir une tension $u(z,t) = U(z) \cos[\omega t - k(\omega)z]$. Justifier.

>>> Établir et mettre en œuvre un protocole permettant de mesurer, avec une incertitude-type minimale, les fréquences f_n pour lesquelles la tension de sortie du câble est déphasée par rapport à la tension d'entrée de $\varphi = -n\pi$, avec $n = 2p + 1$ et $p \in \mathbb{N}$.

Mesurer pour ces fréquences f_n les amplitudes crête-à-crête des tensions de sortie et d'entrée à l'aide des fonctions automatiques de l'oscilloscope :

n	1	3	5	7	9	11	13	15
f_n (kHz)								
V_{scc} (V)								
V_{ecc} (V)								

La plage Δf_n de valeurs de fréquences telles que les mesures fournissent $\varphi = -n\pi$ est de l'ordre de quelques kHz. Déterminer Δf_{15} et en déduire l'incertitude-type $u(f_{15})$. On pourra considérer que $u(f_n)$ varie très peu avec n .

L'incertitude-type sur $G = \frac{V_{scc}}{V_{ecc}}$ est liée à celle sur V_{scc} et V_{ecc} .

Déterminer, pour $n = 15$, les incertitudes-types sur V_{scc} et V_{ecc} en expliquant comment elles sont obtenues.

On en déduit celle sur G : $u(G) = G \cdot \sqrt{\left(\frac{u(V_{ecc})}{V_{ecc}}\right)^2 + \left(\frac{u(V_{scc})}{V_{scc}}\right)^2}$.

Q.4) Exprimer la vitesse de phase c_n de l'O.P.P.H de fréquence f_n en fonction de f_n , L , et de n .

Quelle relation lie f_n à n si on suppose $c_n = c = Cte$?

>>> Tracer sous Python la courbe représentative de f_n en fonction de n et effectuer un ajustement linéaire. L'examen des résidus permet-il de valider que le câble est non dispersif ?

La tension dans le câble est de la forme $u(z,t) = U(z) \cos[\omega t - k(\omega)z]$. La puissance moyenne absorbée est supposée être proportionnelle à la puissance moyenne incidente et à l'épaisseur dz de la tranche : $dP_a = \alpha P(z) dz$.

Q.5) Effectuer un bilan de puissance **moyenne** sur la tranche $[z, z + dz]$ du câble. En déduire la loi $P(z)$ et montrer que

$U(z) = U(z=0)e^{-\frac{\alpha}{2}z}$. En déduire la relation entre α et G .

Q.6) Les conducteurs du câble ne sont pas parfaits. Quel est le phénomène physique responsable de l'atténuation de l'onde ?

Document 2 : Dispersion et absorption

Un modèle théorique prenant en compte le fait que les conducteurs du câble ne sont pas parfaits amène à la loi $\alpha = 2A\sqrt{\omega}$.

Le constructeur annonce une perte de 4,5 dB par 100 m de câble à 10 MHz.

Les deux phénomènes, dispersion et absorption, sont liés : on montre que la loi $\alpha = A\sqrt{\omega}$ implique que la relation de dispersion

dans le câble est de la forme $k = \frac{\omega}{c_\infty} + A\sqrt{\omega}$.

Q.7) Exprimer la vitesse de phase $c(\omega)$ en fonction de ω et justifier la notation c_∞ .

On pose $X = \frac{1}{\sqrt{\omega}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi f}}$ et $Y = \frac{1}{c}$.

>>> Évaluer l'incertitude-type sur Y . Utiliser l'ajustement affine du programme Python fourni : `AjustAff_MC(X, Y, u_Y)`, où u_Y est l'incertitude-type sur Y , afin d'obtenir les valeurs de A et c_∞ , et leurs incertitudes-types. Le programme affiche également les résidus normalisés.

Commenter les résultats obtenus.

>>> Déterminer une autre valeur de A en étudiant l'absorption à l'aide d'un ajustement affine.

Commenter les résultats obtenus.

Matériel :

Câble coaxial de 100 m

Maquette de connexion au G.BF et à l'impédance de sortie