

Modalité de l'examen d'instrumentation : Année 2024–2025

Vous serez convoqués par 10, vous travaillerez individuellement et l'interrogation dure 3h en deux phases.

• **La première phase** est expérimentale et dure 2h30. Elle sera notée sur 14 points. Vous devrez présenter des expériences relatives à un sujet, compris dans la liste des sujets expérimentaux donnée plus loin. Sur ces sujets proposés, il faudra réaliser une ou des expériences relatives au sujet posé **en rédigeant un compte rendu écrit**. Ce compte rendu doit faire apparaître

- une justification du choix des éléments employés quand c'est important.
- une présentation des expériences proposées (schéma et détails importants)
- les résultats de mesures bruts (les plus précis possibles, compte tenu du matériel disponible en justifiant les précautions prises pour faire les meilleures mesures possibles) présentés avec les incertitudes.
- une exploitation si nécessaire, une interprétation et des commentaires sur les résultats obtenus.

Pour cette partie de l'épreuve, le cours, les cahiers et les sujets de TP seront autorisés. Néanmoins, il faudra pouvoir répondre aux questions sans avoir à se plonger dans ses notes. Il faut noter que certains sujets ne sont pas une reprise directe d'une partie des TP faits dans l'année. Il faudra donc avoir réfléchi, au préalable, sur le choix des expériences et sur l'optique suivant laquelle on cherchera à les présenter.

• **La seconde phase** est plus théorique même si elle touche à des problèmes expérimentaux. Elle dure 30 minutes et sera notée sur 6 points. **Vous n'avez plus accès aux documents lors de cette partie.** Vous devrez répondre par écrit de façon précise et concise à deux des questions de la liste des questions donnée plus loin. Les deux questions auxquelles vous devrez répondre ne vous seront données qu'au début de cette partie de l'épreuve. Là encore, certaines questions ne vous ont pas été posées directement de la sorte en cours d'année. Cependant, vous avez les éléments de réponse dans les polycopiés, le cours ou les TP. Il faut donc reprendre toutes les questions une par une et réfléchir à la façon de formuler une réponse satisfaisante dans les délais qui vous sont imposés.

Liste des sujets expérimentaux (première partie – 2h30).

- Sujets A : Mesures des caractéristiques principales d'un oscilloscope numérique. Caractérisation d'un bruit de quantification.
- Sujet B : Obtention de la fonction de transfert d'un système par FFT de la réponse impulsionnelle, sur des exemples expérimentaux. Choix des caractéristiques de l'impulsion, de l'acquisition. Compromis entre le rapport signal sur bruit et d'éventuels effets non linéaires.
- Sujet C : On observe un signal modulé en fréquence avec une porteuse à 100kHz, une modulante sinus à 100Hz et une profondeur de modulation de 500 Hz. Proposez différentes techniques pour avoir une bonne résolution. Vérifier que l'encombrement spectral satisfait bien la règle de Carson.
- Sujet D : Amplification électronique d'un signal. Intérêt et limites sur quelques exemples de circuits.
- Sujet E : Illustration expérimentale du problème de la stabilité en fréquence d'un oscillateur électronique.
- Sujet F : Etude des caractéristiques du bruit thermique. Caractérisation de l'amplificateur associé.
- Sujet G : Caractéristiques d'une photodiode.
- Sujet H : Exemples d'applications de la translation de fréquence.
- Sujet I : Etude de la largeur spectrale occupée par un signal modulé en fréquence. Mise en oeuvre d'une démodulation de fréquence.
- Sujet J : Utilisation d'une carte Arduino : filtrage numérique et autres applications.
- Sujet K : Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu.
- Sujet L : Asservissement de fréquence : principe et application.
- Sujet M : Asservissement du flux lumineux émis par une photodiode.

Liste des questions : (seconde partie – 30 minutes)

Lors de la seconde partie de l'épreuve, vous serez interrogés sur 2 ou 3 exercices posés à la fin de chaque TP. Vous devrez répondre par écrit, en justifiant quantitativement vos réponses. Cette partie sera faite sans document.

Question 02-A : Expliquer le principe de la synchronisation ainsi que ses limites sur un oscilloscope analogique. Expliquer ce qui change quand on passe sur un appareil numérique.

Question 02-B : On observe à l'oscilloscope un signal continu puis un signal périodique en créneau à 0.1Hz. Que faut-il faire pour observer ces deux signaux correctement?

Question 02-C : On observe à l'oscilloscope un signal sinusoïdal d'environ 2V d'amplitude crête à crête, non bruité. Cet oscilloscope code la tension sur 8 bits et représente le signal sur 8 carreaux en amplitude.

Quand on cherche à mesurer la valeur crête à crête, quelle est l'erreur systématique sur le résultat final pour les échelles suivantes ? 500 mV/carreau ; 1 V/carreau ; 2 V/carreau ; 5 V/carreau ?

Question 02-D : Un oscilloscope a une capacité mémoire maximale de 4 Mpts sur une voie. La fréquence d'échantillonnage maximale, à l'acquisition est de 4GSa/s. Le signal est observé sur 10 carreaux en temporel. Pour les valeurs de base de temps suivantes, donnez la durée d'observation, le nombre de points en mémoire pour représenter le signal et la fréquence d'échantillonnage : 10s/carreau, 100ms/carreau, 1ms/carreau, 100µs/carreau, 1µs/carreau, 10ns/carreau

Question 02-E : On cherche à mesurer la vitesse de propagation d'une information dans un câble coaxial. On envoie une impulsion dans le câble de 10m dont l'extrémité est en court-circuit. Entre le générateur et le câble, on place un oscilloscope. Donnez des caractéristiques de l'impulsion (période, largeur) permettant de mener à bien cette expérience en justifiant quantitativement avec des ordres de grandeur réalistes.

Question 03-A : On cherche à observer un signal sinusoïdal à 3 kHz. La FFT est calculée à l'oscilloscope avec 16000 points. Est-il préférable de prendre une échelle de temps de 20ms/carreau, 200ms/carreau ou 2s/carreau ? Justifiez quantitativement votre réponse.

Question 03-B : On cherche à mesurer l'amplitude l'harmonique 3 d'un signal triangulaire symétrique de fréquence 1kHz. Le fondamental a une amplitude voisine de 0dB et le niveau de bruit est à -50dB. Quelle fréquence d'échantillonnage doit-on choisir pour éviter de voir ressortir des pics de repliement? Quel type de fenêtre de troncation choisir ?

Question 03-C : On cherche à déterminer précisément, par analyse spectrale, la différence de fréquence entre deux diapasons oscillants simultanément autour de 440Hz mais sur deux fréquences écartées de 1Hz environ. L'oscilloscope travaille avec 10000 pts en FFT. Chaque pic a une largeur de 5 points environ. Peut-on trouver une base de temps permettant de résoudre ? Proposez une valeur. Même question avec deux diapasons écartés de 0,1Hz environ.

Question 03-D : On considère un diapason de facteur de qualité 5000, oscillant autour de 440Hz. Calculez un nombre de points raisonnable à acquérir pour être capable d'obtenir les caractéristiques de sa fonction de transfert.

Question 03-E : On se propose d'étudier un filtre passe-bande avec une fréquence centrale de 10 kHz environ et une bande passante de 2 kHz. Pour ça, on choisit d'appliquer une impulsion en entrée, de récupérer la réponse de sortie et d'obtenir la fonction de transfert par le rapport des transformées de Fourier de la sortie et de l'entrée. Donnez les caractéristiques d'impulsion (forme, amplitude, largeur) ainsi que les conditions d'acquisition (durée) que vous choisiriez pour cette expérience. Justifiez quantitativement vos choix.

Question 04-A : On considère un amplificateur opérationnel dont le produit gain-bande passante vaut 3 MHz et le slew-rate 10 V/µs. On cherche à amplifier l'image électrique d'un signal audio avec un gain de 10. Pour un

niveau de signal d'entrée de 1V d'amplitude, l'amplificateur va-t-il altérer le spectre et faut-il s'attendre à des effets non linéaires. Justifiez quantitativement vos réponses.

Question 04-B : On étudie un oscillateur électronique oscillant à une fréquence moyenne de 10 kHz avec une stabilité relative en fréquence, sur la durée de l'expérience de 10^{-5} . Expliquer comment procéder, expérimentalement pour observer et quantifier temporellement cette instabilité de la fréquence avec un oscilloscope fonctionnant avec 1000 points. On donnera l'ordre de grandeur des paramètres importants associés au protocole de déclenchement qui permettent de faire l'observation demandée.

Question 04-C : Expliquer précisément pourquoi un oscillateur à pont de Wien a une fréquence d'oscillation qui dépend fortement du gain de l'élément amplificateur. Que faire pour qu'un oscillateur électronique soit plus stable en fréquence ? Sur quel élément du filtre doit-on agir ? Pourquoi ?

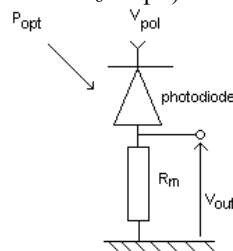
Question 04-D : On souhaite observer le filtre passe-bande actif utilisé pour réaliser un oscillateur. Ce filtre actif a une fréquence centrale de 30kHz, un facteur de qualité de 30. Donnez les caractéristiques de l'impulsion (amplitude, durée, forme) et de l'acquisition (durée) permettant d'obtenir cette fonction de transfert en justifiant ces valeurs.

Question 05-A : On observe un bruit gaussien, de valeur moyenne nulle et de valeur efficace 1,5V, blanc jusqu'à 30 MHz et coupant brutalement entre 30MHz et 40 MHz. L'oscilloscope utilisé comporte deux voies, échantillonne au maximum à 2 GSa/s et peut récupérer au maximum 4.10^6 points par voie. Il échantillonne sur 8 bits et représente le signal sur 8 carreaux en amplitude. On va chercher à faire une acquisition temporelle afin de faire un histogramme des échantillons obtenus et d'obtenir la densité spectrale de puissance de ce bruit. Donner, en les justifiant, les paramètres d'acquisition (base de temps, échelle en amplitude) qui permettent d'étudier, au mieux, ce bruit, sur cet oscilloscope. Concernant l'histogramme, donner les paramètres de calcul de l'histogramme (valeur minimale, pas, nombre de pas) permettant une observation correcte de la distribution des valeurs.

Question 05-B : Calculer la densité spectrale de puissance de bruit thermique pour une résistance de $1k\Omega$ à $25^\circ C$ (on donne $k=1.38.10^{-23} \text{ m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Si on amplifie ce bruit par un amplificateur de tension de gain G_0 dont la bande équivalente de bruit vaut 3MHz, quel gain G_0 prendre pour obtenir une valeur efficace de bruit en sortie de 200mV ? Donner une procédure pour mesurer la densité spectrale de puissance de bruit thermique d'entrée, en justifiant notamment les paramètres d'acquisition du bruit de sortie de l'amplificateur.

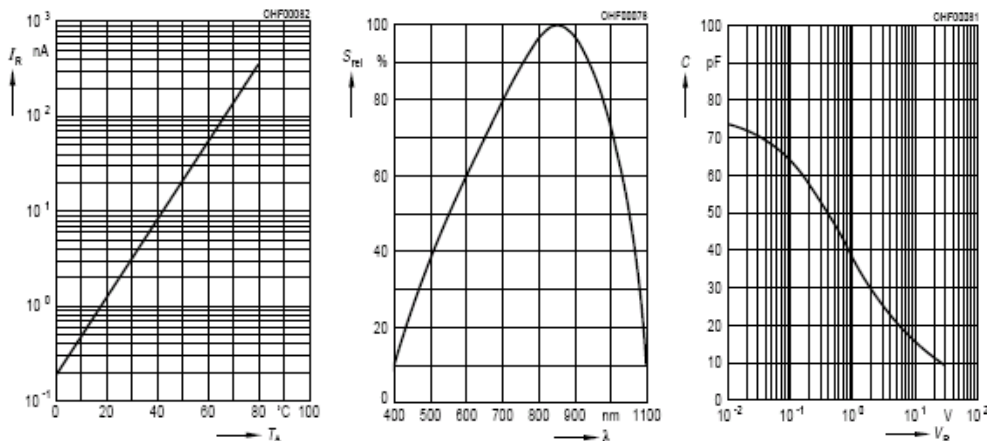
Question 05-C : On doit caractériser un amplificateur passe-bande avec une fréquence centrale voisine de 1MHz, un gain proche de 150, et une bande passante proche de 1MHz. Donnez les caractéristiques de l'impulsion (amplitude, forme, largeur) et de l'acquisition (durée) permettant d'obtenir la réponse fréquentielle de ce filtre par TF de réponse impulsionnelle. On justifiera quantitativement le résultat obtenu

Question 06-A : On observe la tension V_{out} aux bornes de la résistance R_m de $30 \text{ k}\Omega$ avec un oscilloscope dont on adoptera le modèle au premier ordre ($R_o = 1M\Omega$ et $C_o=12pF$).



Le flux lumineux incident présente une fluctuation sinusoïdale de fréquence 1kHz, 10 kHz puis 500kHz. Est-il nécessaire d'utiliser une sonde d'oscilloscope pour éviter que la chaîne de mesure ne modifie le photocourant de plus de 4% de sa valeur ?

Question 06-B : On met en œuvre une photodiode BPW34 dans le circuit électrique de structure précédente. On donne les caractéristiques suivantes pour une photodiode BPW34:



La première courbe donne le courant d'obscurité en fonction de la température, la seconde donne la sensibilité spectrale de la photodiode en fonction de la longueur d'onde en pourcentage de la valeur maximale (cette dernière sera supposée égale à 0.5A/W) et la troisième donne la capacité de jonction de la photodiode en fonction de sa tension inverse de polarisation.

La résistance R_m vaut $30k\Omega$. La puissance optique incidente provient d'une LED qui émet autour de 525nm et elle est modulée. Elle est la somme d'une puissance moyenne de $200\mu W$ et d'une fluctuation sinusoïdale d'amplitude crête à crête $20\mu W$. L'expérience est réalisée à $30^\circ C$. Le courant d'obscurité a-t-il une incidence importante sur la réponse de sortie (justifier) ? A quelle valeur minimale doit-on porter V_{pol} pour que la photodiode reste polarisée en inverse ? On polarise finalement avec $V_{pol}=10V$. Jusqu'à quelle valeur peut porter la fréquence pour que la photodiode et son circuit associé restent dans leur bande passante ?

Question 06-C : On souhaite observer la réponse en fréquence d'une chaîne optoélectronique avec une LED associée à une source de courant commandée en tension pour émetteur et une photodiode avec son circuit transconductance comme récepteur. Ce système est un passe-bas résonant. Quand on change la polarisation de la photodiode, on observe une fréquence de résonance qui évolue environ entre 150kHz et 400kHz. Afin d'observer en temps réel l'effet de la polarisation de la photodiode sur la réponse fréquentielle de la chaîne, proposez les caractéristiques de l'impulsion (amplitude, forme, largeur) à appliquer en entrée de la source de courant, et les caractéristiques d'acquisition (durée) pour observer cette réponse par TF de réponse impulsionnelle.

Question 07-A : On applique en entrée de cette boucle à verrouillage de phase un signal modulé dont l'amplitude est de $6V_{pp}$, la porteuse 100kHz, la profondeur de modulation 2kHz, la fréquence modulante 1 kHz (la modulante est supposée sinusoïdale). Donner la bande de Carson de ce signal modulé.

On réalise une boucle de verrouillage de phase avec un multiplieur (« gain » = 1/10), un filtre passe bas (circuit RC) dont la fréquence de coupure est 1 kHz et un VCO de gain de 10kHz/V et réglé sur une fréquence centrale f_0 de 100kHz. L'amplitude du signal de sortie du VCO est $6V_{pp}$. Donner la plage de verrouillage de la boucle quand on lui applique le signal modulé que nous venons de décrire?

Dans ces conditions, la boucle peut-elle démoduler correctement ? Justifiez quantitativement votre réponse.

Question 07-B : On dispose d'un signal modulé en amplitude avec une fréquence porteuse 100kHz. La modulante est sinusoïdale de fréquence 100Hz. On échantillonne en temporel sur 1000 points à $F_e=5,1$ kHz pour calculer le spectre. Quelle est la durée d'acquisition ? Quelle est la plage d'analyse spectrale? Décrire quantitativement ce que l'on va observer dans cette plage. Respecte-t-on le critère de Shannon ? La forme du spectre est-elle correcte ? Redéfinir le critère de Shannon en fonction de ces observations.

Question 07-C : : On cherche à analyser un signal modulé en fréquence dont la porteuse est à 100kHz, la profondeur de modulation 1kHz, la fréquence modulante 100Hz (la modulante est supposée sinusoïdale). On travaille avec une fréquence d'échantillonnage de 250kHz. Respecte-t-on le critère de Shannon ? Décrire les caractéristiques du spectre obtenue si on travaille sur 1000 points puis 500000 points. Décrire dans chaque cas le spectre (encombrement spectral attendu, écartement entre les pics, pas de calcul en fréquence). Finalement, que faut-il faire sur l'acquisition quand on veut améliorer la résolution d'une analyse spectrale ? Quel est le prix à payer pour améliorer l'analyse ?

Question 08-A : On dispose d'un signal modulé en amplitude avec une fréquence porteuse 100kHz. La modulante est sinusoïdale de fréquence 100Hz. On échantillonne en temporel sur 1000 points avec une fréquence d'échantillonnage $F_c = 250\text{kHz}$. Quelle est la durée d'acquisition ? Quelle est la plage d'analyse spectrale? Décrire ce que l'on va observer dans cette plage. Quelle est la forme du spectre attendu ? Pourra-t-on observer les pics attendus ? Même question si on échantillonne à 5,1kHz (on pensera à l'effet du sous-échantillonnage). Peut-on observer plus correctement certains détails du spectre dans ce cas ?

Question 08-B : On applique, en entrée d'une détection synchrone un signal sinusoïdal de 20,00 mV efficace noyé dans un bruit de densité spectrale $0,49 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2/\text{Hz}$. Si on observe ce signal avec un oscilloscope de bande passante 100MHz, calculer le rapport signal sur bruit pour le signal d'entrée. A quoi ressemble un tel signal ?

Expliquez pourquoi on commence par passer ce signal dans un filtre passe-bande avant de le multiplier par un signal à la fréquence de référence pour traiter le produit avec le filtre passe-bas de sortie.

On suppose que la bande équivalente de bruit du filtre passe-bas de sortie de la détection synchrone, de constante de temps τ_c s'exprime de la façon suivante : $B_{\text{eq}} = 1/(4 \cdot \tau_c)$. On supposera que le gain qui permet de passer de la valeur efficace d'entrée à la composante continue de sortie vue par la détection synchrone vaut 10. Ce filtre peut présenter des temps caractéristiques τ_c de 3s, 1s, 0.1s et 0.01secondes. Si on veut un affichage du résultat final recherché le plus rapide possible mais avec un rapport signal sur bruit supérieur à 100, quelle valeur de τ_c doit-on choisir ?

Question 08-C : On réalise une bobine de flux avec 5 spires de diamètre 3mm ? Quel est l'intérêt de travailler avec une si faible section et aussi peu de spires ? Quel problème peuvent poser ces caractéristiques ? Le champ magnétique appliqué à notre capteur a une fréquence de 1kHz. Le signal du capteur est amplifié au moyen d'un amplificateur de produit gain*bande passante de 10MHz. Quelle valeur limite de gain peut-on se permettre d'appliquer ? Expliquer d'intérêt de récupérer le signal au moyen d'une détection synchrone et le problème que poserait une mesure directe de la tension au multimètre pour les faibles valeurs de champ ?

Question 09-A : On réalise le même système qu'à la question précédente avec une boucle fermée sans erreur statique. Le gain de la dynamo tachymétrique est de 6V pour 1000 tours/min. La commande du hacheur donne un rapport cyclique qui évolue linéairement entre 0 et 1 en fonction de la tension, pour une tension d'entrée comprise entre 0 et 10V. Le hacheur découpe une tension continue de 30V. On supposera que le moteur tourne à 2000 tours par minute pour une tension d'entrée de 40V. On supposera que cette tension et la vitesse évoluent pratiquement linéairement. On supposera qu'il n'y a pas de saturation en courant sur l'alimentation. Calculez la plage de tension d'entrée sur laquelle la sortie du système asservi suit, sans erreur, une consigne constante d'entrée.

Question 09-B : De quoi dépend la plage de réponse des deux systèmes asservis dans le TP : le contrôle de vitesse du moteur et le contrôle du flux émis par la LED ? Expliquez les causes du décrochage de l'asservissement dans les deux cas quand le signal d'ordre appliqué en entrée sort de cette plage.

Question 10-A : Expliquez pourquoi avec une carte Arduino codant sur 10 bits une tension comprise entre 0 et 5V, on va amplifier avec un gain en tension de 10 le signal de sortie d'un capteur LM35 ($10\text{mV}/^\circ\text{C}$).

Question 10-B : Expliquez le principe de fonctionnement d'un convertisseur numérique analogique de type PWM. Expliquez comment choisir le filtre analogique de sortie par rapport au pas d'échantillonnage et par rapport au temps caractéristique d'évolution de la tension de sortie à convertir.

Question 10-C : Calculer la relation de récurrence permettant de réaliser numériquement (pas d'échantillonnage T_c) un filtre passe-bas du premier ordre (gain G_0 et fréquence de coupure f_c).

Question 10-D : Calculer la relation de récurrence permettant de réaliser numériquement (pas d'échantillonnage T_c) un correcteur proportionnel intégral dont on rappelle la fonction de transfert analogique

$$C(p) = K_c \cdot (1 + 1/(\tau_c \cdot p))$$