

Examen d'instrumentation

Consignes

- Indiquez immédiatement vos nom, prénom et section en bas de CHAQUE page
- Documents et calculatrices graphiques ou avec mémoire **NE SONT PAS AUTORISES**.
- L'examen dure **3h00**
- L'examen est coté au total sur 40 points (ramené ensuite sur 20 points)
- Répondez directement dans les cases prévues à cet effet
- Décrivez le **raisonnement** qui a conduit à chaque réponse (**la longueur de l'emplacement prévu pour la réponse vous indique approximativement la longueur du développement attendu**)
- Efforcez-vous d'écrire le plus clairement et le plus lisiblement possible

NOM :

PRENOM :

SECTION :

Question 1

/ 10pts

Vous êtes engagé en tant qu'ingénieur dans une société développant des neurostimulateurs, pour des patients souffrant d'épilepsie, qui stimulent le nerf vague quand une crise d'épilepsie survient, en vue de l'arrêter. L'implant est muni d'une chaîne d'acquisition permettant de monitorer l'activité du nerf vague, et ainsi de détecter l'occurrence d'une crise. Les spécifications de cette chaîne d'acquisition vous sont fournies :

- Le signal d'entrée est
 - inclus entre -2mV et 2mV,
 - présent dans une bande passante de 20Hz-20kHz
 - superposé à un offset non désiré allant jusque +/- 0.02mV
- On désire
 - une résolution sur le signal d'entrée de 0.1μV minimum
 - un bruit total de 0.2μV_{RMS} maximum référé à l'entrée
- Le système est alimenté en +/- 5V

Pour réaliser cette chaîne, vous avez à votre disposition différents composants (vous pouvez prendre plusieurs fois le même composant si nécessaire). Vous avez aussi à disposition tous les composants numériques que vous pourriez désirer. Pour des raisons économiques, vous désirez minimiser le nombre total de composants utilisés.

Il vous est demandé de dimensionner la chaîne d'acquisition respectant le cahier des charges. Veuillez préciser son architecture (en vous aidant d'un schéma block) et, pour chaque composant, discuter son utilité (est-il nécessaire de l'inclure dans la chaîne ?), sa position dans la chaîne et la manière dont il est utilisé (quelle(s) amplification(s) pour le(s) amplificateur(s) ? quelle(s) fréquence(s) de coupure pour le(s) filtre(s) ?). Veuillez calculer la contribution en bruit de chaque composant ainsi que le bruit total, référé à l'entrée, de la chaîne. Si plusieurs possibilités sont offertes (par exemple, plus d'un composant possible ou plus d'une valeur possible), veuillez le noter.

Amplificateurs :

Nom	Plage de signal d'entrée (V)	Plage de signal de sortie (V)	Produit Gain Bande passante (MHz)	Bruit en tension à l'entrée du composant (nV/√Hz)
Ampli I	+/-5	+/-5	1	0.1
Ampli II	+/-5	+/-5	10	1
Ampli III	+/-5	+/-5	100	1

Convertisseur analogique-numérique :

Nom	Plage de signal d'entrée (V)	Fréquence d'échantillonnage (kHz)	Résolution (bits)	Bruit en tension à l'entrée du composant (nV/√Hz)
CAN I	+/-5	10	10	100
CAN II	+/-5	10	14	100
CAN III	+/-5	10	18	100
CAN IV	+/-5	100	10	100
CAN V	+/-5	100	14	100
CAN VI	+/-5	100	18	100

Filtres

Nom	Plage de signal d'entrée (V)	Plage de signal de sortie (V)	Fréquence de coupure (kHz)	Gain (V/V)	Bruit en tension à l'entrée du composant (μV/√Hz)
Filtre passe-haut	+/-5	+/-5	A déterminer	1	2
Filtre passe-bas	+/-5	+/-5	A déterminer	1	2

Gain

Pour utiliser toute la plage du CAN, il faut que le signal maximum (+/-2mV) soit amplifié de manière à couvrir les +/-5V du CAN.

$$G_{tot} = 5V/2mV = 2500$$

Bien que l'offset soit non désiré, il est négligeable par rapport au signal. Il pourra donc être filtré numériquement.

Pour les puristes, le gain est plus précisément de

$$G_{tot} = 5V/2.02mV = 2475$$

L'amplification pourrait être réalisée en un seul étage (de manière à minimiser le nombre total de composants utilisés), si le produit gain bande passante est suffisant et le bruit total admissible.

$$\text{Gain} = 2500$$

$$\text{Bande passante} = 20\text{kHz}$$

$$\text{Produit Gain Bande passante} = 50\text{MHz}$$

=> Uniquement l'ampli III

Le bruit total doit être évalué pour voir s'il est admissible avec un seul amplificateur.

Bruit

Vérifions si l'architecture Capteur - Amp – PB – CAN donne un bruit admissible. La densité spectrale de bruit vaut :

$$e_{tot} = \sqrt{(G_{amp}E_{amp})^2 + E_{Fpb}^2 + E_{CAN}^2}$$

$$e_{tot} = \sqrt{(2500 \cdot 1nV/\sqrt{Hz})^2 + (2000nV/\sqrt{Hz})^2 + (100nV/\sqrt{Hz})^2} = 3.2\mu V/\sqrt{Hz}$$

$$E_{tot} = 3.2\mu \frac{V}{\sqrt{Hz}} \cdot \sqrt{20kHz - 20Hz} = 0.45mV_{RMS}$$

$$\text{Référé à l'entrée, le bruit vaut : } E_{tot,in} = 0.45mV_{RMS}/2500 = 0.18\mu V_{RMS}$$

Le Bruit est donc admissible.

CAN

Signal inclus entre -2mV et 2mV

Résolution sur le signal d'entrée de 0.1μV minimum

=> Minimum 4mV/0.1μV = 40000 pas au CAN, soit 16bits minimum

$$\text{Fréquence d'échantillonnage minimum} = 2 \times 20\text{kHz} = 40\text{kHz}$$

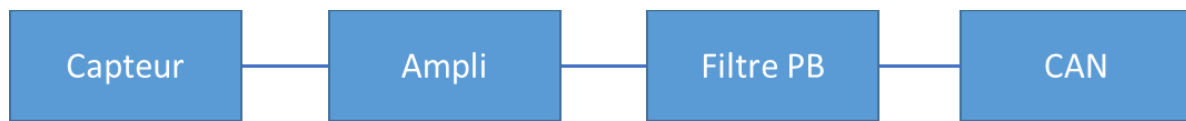
Le CAN VI convient

Fréquence de coupure du filtre PB

Sa fréquence de coupure devra être choisie de manière à :

- être supérieure à $f_{max} = 20\text{kHz}$
- couper suffisamment les hautes fréquences pour éviter le repliement spectral. Ici, la fréquence d'acquisition maximum par canal est de 100kHz. La bande d'arrêt est donc à partir de 50kHz, suivant ce choix. Après, il s'agit d'un compromis entre l'ordre du filtre, les performances et le prix du CAN, ainsi que le bruit.

Architecture

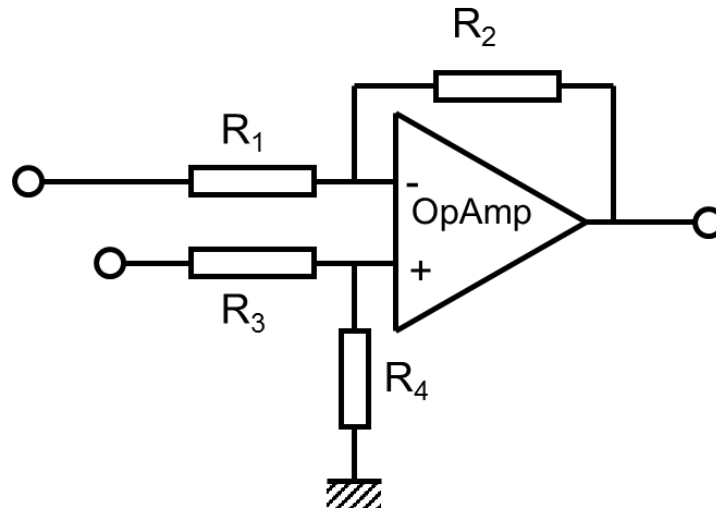


/10pt(s)

Question 2

/ 10pts

Soit le montage d'amplificateur différentiel à un amplificateur opérationnel ci-dessous.



Que vaut V_{out} en fonction de V_1 et V_2 ? Démontrez.

$$V_o = V_{in+} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2 + R_1}{R_1} - V_{in-} \frac{R_2}{R_1}$$

Que vaut le gain en mode commun ? Démontrez.

$$V_{in+} = V_{in-} = V_{cm}$$

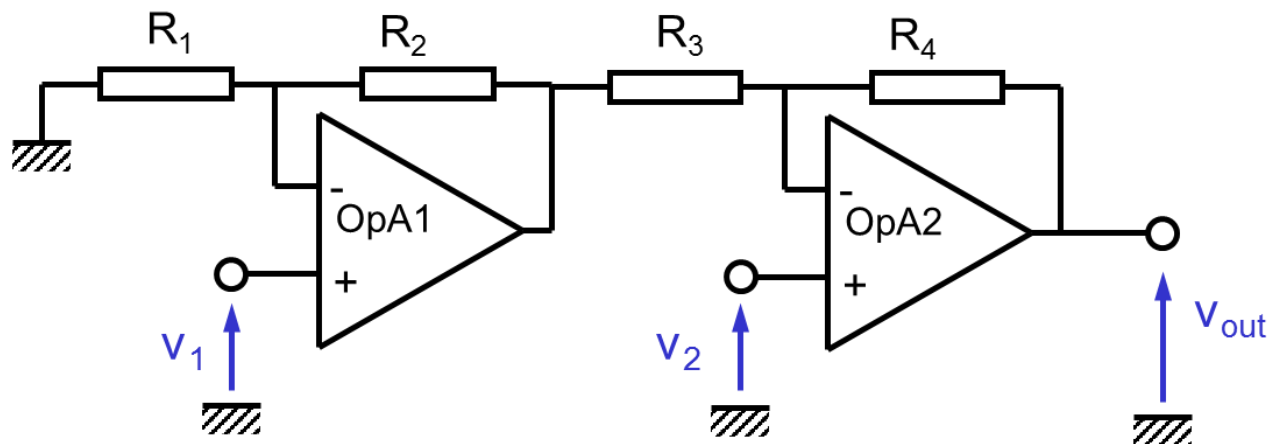
$$V_o = V_{cm} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2 + R_1}{R_1} - V_{cm} \frac{R_2}{R_1}$$

$$G_{cm} = V_o / V_{cm} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2 + R_1}{R_1} - \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

Sous quelle(s) condition(s) le gain en mode commun est-il nul ?

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Soit le montage d'amplificateur différentiel à deux amplificateurs opérationnels ci-dessous.



Que vaut V_{out} en fonction de V_1 et V_2 ? Démontrez.

$$V_x = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

$$\Rightarrow V_{out} = -\frac{R_4}{R_3} \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_2$$

Que vaut le gain en mode commun ? Démontrez.

$$V_1 = V_2 = V_{MC}$$

$$\Rightarrow G_{MC} = \frac{V_{out}}{V_{MC}} = \frac{R_1 R_3 + R_1 R_4 - R_1 R_4 - R_2 R_4}{R_1 R_3} = 1 - \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

Quelles sont les avantages et inconvénients par rapport au montage précédent ?

- + impédance d'entrée élevée
- cout (un ampli op en plus)
- délai de propagation différent entre les entrées + et - et la sortie.

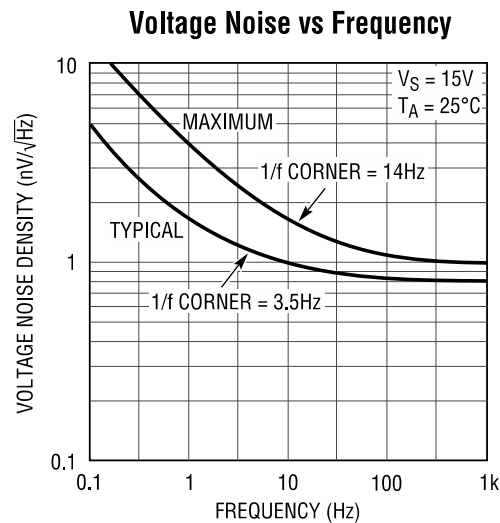
Question 3

/ 10pts

On désire choisir parmi les amplificateurs proposés ci-dessous, l'amplificateur induisant le bruit minimum pour réaliser une chaîne d'acquisition. La bande passante désirée va de 0.1Hz à 50kHz et la résistance de source avant l'amplificateur est négligeable. Vous n'avez à votre disposition que les amplificateurs suivants. De plus, seuls certains extraits de leurs datasheets sont disponibles.

LT1028 : Ultralow Noise Precision High Speed Op Amp

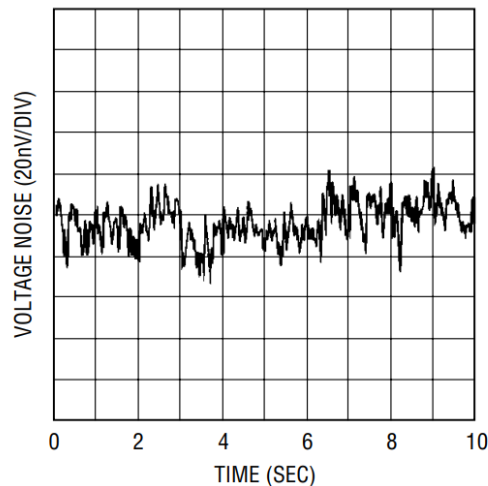
Vous n'avez à disposition que le graphe suivant :



LT1007 : Low Noise, High Speed Precision Operational Amplifier

Le constructeur vous garantit : $4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 10Hz et $3.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ à 1kHz. Vous avez également à disposition le graphe suivant :

0.1Hz to 10Hz Noise



LT1722 : Single, Dual, Quad 200MHz Low Noise Precision Op Amps

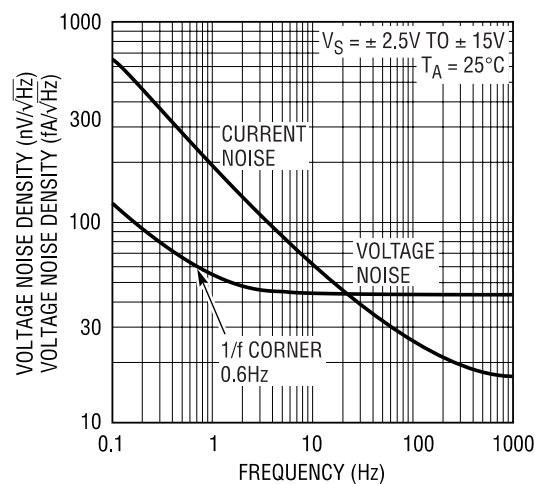
Vous n'avez à disposition que l'extrait suivant de la datasheet :

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_{OS}	Input Offset Voltage	(Note 6) LT1722 SOT-23 and LT1723 MS8		100 150	400 650	μV μV
I_{OS}	Input Offset Current			40	300	nA
I_B	Input Bias Current			40	300	nA
e_n	Input Noise Voltage	$f = 10\text{kHz}$		3.8		nV/\sqrt{Hz}
i_n	Input Noise Current	$f = 10\text{kHz}$		1.2		pA/\sqrt{Hz}

LT1101AM : Precision MicroPower, Single Supply Instrumentation Amplifier (Fixed Gain = 10 or 100)

Vous avez à disposition le graphe suivant ainsi qu'un extrait de la datasheet.

Noise Spectrum



$V_S = \pm 15V$, $V_{CM} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$, Gain = 10 or 100, unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LT1101AM/AI/AC			LT1101M/I/C			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
G_E	Gain Error	$G = 100$, $V_O = \pm 10V$, $R_L = 50k$ $G = 100$, $V_O = \pm 10V$, $R_L = 2k$ $G = 100$, $V_O = \pm 10V$, $R_L = 50k$ or $2k$		0.008 0.011 0.008	0.040 0.055 0.040		0.009 0.012 0.009	0.060 0.070 0.060	% % %
G_{NL}	Gain Nonlinearity	$G = 100$, $R_L = 50k$ $G = 100$, $R_L = 2k$ $G = 10$, $R_L = 50k$ or $2k$		7 24 3	16 45 8		8 25 3	20 60 9	ppm ppm ppm
V_{OS}	Input Offset Voltage	LT1101SW		50	160		60 250	220 600	μV μV
I_{OS}	Input Offset Current			0.13	0.60		0.15	0.90	nA
I_B	Input Bias Current			6	8		6	10	nA
	Input Resistance	(Note 2)	4	7		3	7		$G\Omega$
	Common Mode	(Note 2)	7	12		5	12		$G\Omega$
e_n	Input Noise Voltage	0.1Hz to 10Hz (Note 3)		0.9	1.8		0.9		$\mu Vp-p$
	Input Noise Voltage Density	$f_0 = 10\text{Hz}$ (Note 3) $f_0 = 1000\text{Hz}$ (Note 3)		45 43	64 54		45 43		nV/\sqrt{Hz} nV/\sqrt{Hz}
i_n	Input Noise Current	0.1Hz to 10Hz (Note 3)		2.3	4.0		2.3		$pAp-p$
	Input Noise Current Density	$f_0 = 10\text{Hz}$ (Note 3) $f_0 = 1000\text{Hz}$		0.06 0.02	0.10		0.06 0.02		pA/\sqrt{Hz} pA/\sqrt{Hz}
	Input Voltage Range	$G = 100$ $G = 10$	13.0 -14.4 11.5 -13.0	13.8 -14.7 12.5 -13.3		13.0 -14.4 11.5 -13.0	13.8 -14.7 12.5 -13.3		V V V V

Choisissez parmi les amplificateurs proposés celui permettant d'obtenir le bruit le plus faible pour cette application. Justifier votre réponse et détailler ci-dessous les calculs qui vous ont permis ce choix.

Rappel :

$$N_{TOT} = e\omega_n \sqrt{(f_{high} - f_{low}) + f_c \ln \left(\frac{f_{high}}{f_{low}} \right)}$$

Bruit de courant sera négligeable car résistance de source négligeable.

LT1028 :

On n'a que les courbes théoriques donc on utilise la formule générale

Typ : 1,48uVp2p

Max : 1,18uVp2p

LT1007 :

Sur le graphe, on a environ 60nVp-p pour la basse fréquence. On peut soit utiliser le modèle dans toute la plage de fréquence soit se baser sur la valeur p-p et compléter avec le modèle mais on n'a pas la fréquence de corner.

On va utiliser le modèle pour calculer le bruit HF : $E_n \cdot \sqrt{50\text{kHz}} = 5,61\text{uVp2p}$. Si on veut compléter avec la partie BF, on se rend compte que celle-ci est négligeable.

LT1722 :

On n'a que la valeur à haute fréquence. On se limite à calculer $E_n \cdot \sqrt{50\text{kHz}} = 5,61\text{uVp2p}$.

LT1101 :

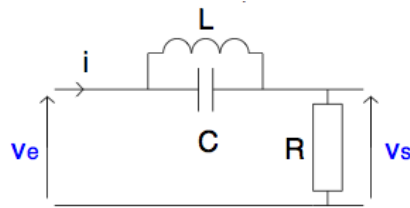
Fcorner disponible sur le graphe. On a une valeur p-p que l'on peut compléter avec la formule générale. On peut aussi vérifier si le modèle donne une valeur cohérente. Si on prend la valeur BF et qu'on complète avec le modèle, on obtient : 63,73uVp2p (typ) et 80,57uVp2p(max).

/10pt(s)

Question 4

/ 10pts

Soit le circuit suivant :



Calculez la fonction de transfert de ce circuit.

$$T(p) = \frac{p^2 + \frac{1}{CL}}{p^2 + \frac{p}{RC} + \frac{1}{CL}}$$

/3pts

Quelle fonction réalise ce filtre ? Justifiez brièvement et spécifiez sa fréquence d'intérêt.

$$T(jw) = \frac{-w^2 + \frac{1}{CL}}{-w^2 + \frac{jw}{RC} + \frac{1}{CL}}$$

La réponse en fréquence possède un zero en $w = 1/\sqrt{LC}$

Si w tend vers 0 $\Rightarrow T(jw) = 1$

Si w tend vers infini $\Rightarrow T(jw) = 1$

C'est un filtre réjecteur de fréquence (fréquence de réjection = $1/\sqrt{LC}$)

/3pts

Ce filtre peut aussi s'exprimer sous la forme :

$$T(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{q} + \omega_0^2}$$

Exprimer q en fonction de R , L et C et expliquer l'effet d'une augmentation de ce q sur le fonctionnement de ce filtre

$$Q = R \cdot \sqrt{C/L}$$

Augmenter q permet de réduire la largeur de la bande de réjection et donc de filtrer la fréquence de réjection en réduisant l'impact sur les fréquences voisines.

Ou encore, plus q est élevé, plus la transition bande passante vers bande coupante est rapide.

/2pts

Si l'on applique à l'entrée de ce circuit une tension de la forme :

$$V_e(t) = \sin(100t) + 0.1 \sin\left(1000t + \frac{\pi}{4}\right) + 0.3 \cos(100000t)$$

Quel sera le signal de sortie de ce filtre si $L = 1\text{mH}$, $C = 1\text{mF}$ et $R = 1\text{k}\Omega$?

$\omega = 1/\sqrt{LC}$ donc la seule pulsation rejetée est 1000rad/s, la sortie est donc égale à

$$V_s(t) = \sin(100t) + 0.3 \cos(100000t)$$

/2pts