

## 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

Une société désire réaliser un appareil capable de monitorer l'accélération d'un avion à 20 endroits simultanément. L'objectif est d'en déduire non seulement son accélération en tout point mais aussi de détecter des défauts potentiels (vibrations qui laissent entrevoir un début de rupture avant que celle-ci ne se produise). Le système de monitoring est muni de 20 d'accéléromètres répartis sur l'ensemble de l'avion.

Les spécifications des accéléromètres sont les suivantes :

- Amplitude maximum du signal à la sortie du capteur :  $\pm 10\text{mV}$
- Offset de  $\pm 1\text{V}$
- Bruit à la sortie du capteur inférieur à  $50 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
- $R_{\text{source}} = 200\Omega$
- Bande passante du capteur :  $0\text{Hz} - 1\text{MHz}$

Le cahier des charges est le suivant :

- Alimentation du circuit en  $\pm 5\text{V}$
- Bruit à l'entrée inférieur à  $15\mu\text{V}_{\text{RMS}}$  (capteur compris)
- Bande passante du signal d'entrée :  $100\text{Hz} - 1\text{kHz}$
- Résolution minimum de  $2\mu\text{V}$  sur le signal d'entrée

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 réaliser la chaîne d'acquisition respectant le cahier des charges, de préciser son architecture (en vous aidant d'un schéma block), les composants choisis et de justifier vos choix.

Amplificateurs:

	Bruit $E_n$	Bruit $I_n$	Slew rate
Ampli 1	$0.01 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$10 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$200\text{V/ms}$
Ampli 2	$0.05 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$10 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$2\text{V}/\mu\text{s}$
Ampli 3	$0.1 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$1 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$200\text{V/ms}$

Filtre passe-haut:

	Bruit $E_n$	Bruit $I_n$	$F_{\text{coupure}}$	Gain
Filtre PH	$2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$2 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	A déterminer	1

Filtre passe-bas:

	Bruit $E_n$	Bruit $I_n$	$F_{\text{coupure}}$	Gain
Filtre PB	$2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$2 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	A déterminer	1

Convertisseurs analogique-numérique ( $V_{\text{entrée}} = \pm 5V$ , pas de bruit en courant):

	Bruit $E_n$	$F_{\text{sampling max}}$	Nombre de bits
CAN 1	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	12
CAN 2	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	14
CAN 3	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	50kHz	12
CAN 4	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	50kHz	14
CAN 5	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	12
CAN 6	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	14

Multiplexeurs (pas de bruit en courant):

	Bruit $E_n$	$F_{\text{switch max}}$	Nombre de canaux
MUX 1	$0.1 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	24
MUX 2	$1 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	24
MUX 3	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	24

### Choix du multiplexeur

Afin de minimiser le nombre de composants, il sera nécessaire de multiplexer les différents capteurs dès que possible. Ce choix doit toutefois se faire sous contrainte de respecter le cahier des charges, et en particulier la bande passante du signal.

Chaque capteur doit être échantillonné avec une fréquence minimum de  $2 \times f_{\max} = 2\text{kHz}$ . Comme il y a 20 capteurs en tout, la bande passante totale nécessaire est de 40kHz.

Afin de minimiser le nombre de composants, on ne prendra qu'un seul CAN, permettant une fréquence d'échantillonnage de 40kHz au moins, rejetant ainsi les CAN 1 et 2.

Nous devons alors choisir un multiplexeur d'au minimum 20 entrées. Tous conviennent.

### Gain

Gain total de la chaîne vaut 500 (=5V/10mV).

### Position des filtres et choix de la fréquence de coupure

Comme la bande passante voulue commence à 100Hz, et qu'il y a un offset important non désiré, le filtre passe-haut est nécessaire. En effet, sinon on aurait besoin d'un ADC de  $2\text{V}/2\mu\text{V}=1\text{M} \Rightarrow$  nombre de bits minimum = 20 bits ( $2^{20} \sim 1\text{M}$ ). Il doit être placé avant le multiplexeur.

Le filtre passe-bas est indispensable (anti-repliement) et doit être placé avant le multiplexeur. Sa fréquence de coupure devra être choisie de manière à :

- être supérieure à  $f_{\max} = 1\text{kHz}$
- couper suffisamment les hautes fréquences pour éviter le repliement spectral. Ici, la fréquence d'acquisition maximum par canal est de  $50\text{kHz}/20/2 = 1.25\text{kHz}$  ou  $100\text{kHz}/20/2 = 2.5\text{kHz}$ , suivant le CAN choisi. La bande d'arrêt est donc de minimum 1kHz et maximum de 1.25kHz ou 2.5kHz, suivant ce choix. Après, il s'agit d'un compromis entre l'ordre du filtre, les performances et le prix du CAN, la dynamique de l'ampli, ainsi que le bruit.

Afin de minimiser le nombre de composants, nous aimerions placer le multiplexeur dès que possible dans la chaîne. A priori, nous aimerions le mettre au tout début, juste après les filtres et avant l'amplificateur. On passerait alors de 20 amplis à seulement 1.

Le bruit du capteur vaut

$$En = 0.05 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{1\text{kHz} - 100\text{Hz}} = 1.5 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

Le bruit du filtre PH vaut :

$$en = \sqrt{\left(200\Omega * 2 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} = \sqrt{\left(400 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} \approx 0.4 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$En = 0.4 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{1\text{kHz} - 100\text{Hz}} = 12 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

Rsortie des filtres ou mux sont faibles ( $< 1\Omega$ ), donc c'est le bruit de tension qui va être prépondérant.

Le bruit du filtre PB vaut

$$En = 2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{1\text{kHz} - 100\text{Hz}} = 60 \text{nV}_{\text{RMS}}, \text{ et est donc négligeable.}$$

Le bruit du multiplexeur 1 (le moins bruyé) vaut

$$En = 0.1 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{1\text{kHz} - 100\text{Hz}} = 3 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

Nous ne pouvons pas prendre d'autres multiplexeurs, sinon sa contribution de bruit à lui seul ( $30\mu V_{rms}$  ou  $300\mu V_{rms}$ ) excéderait celle du cahier des charges.

Le bruit du CAN vaut:

$$En = 20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{1kHz - 100Hz} = 600\mu V_{RMS}$$

Référé à l'entrée =  $600\mu V_{rms}/500 = 1.2 \mu V_{rms}$

Tous les bruits des amplis sont négligeables.

Le bruit total référé à l'entrée vaut donc:

$$En = \sqrt{(1.5\mu V_{RMS})^2 + (12\mu V_{RMS})^2 + (3\mu V_{RMS})^2 + (1.2\mu V_{RMS})^2} = 12.5\mu V_{RMS}$$

Il est donc acceptable pour respecter le cahier des charges. Nous devons prendre le mux 1.

#### Choix de l'ampli ou des amplis

On se rend rapidement compte que la contribution du bruit de l'amplificateur, quel qu'il soit, est négligeable devant le bruit total.

Par contre, le slew rate est ici très important. L'amplificateur doit pouvoir soutenir un signal de 5Vpp maximum à sa sortie entre chaque échantillon. Dans le pire des cas, cela équivaut donc à passer de -5V à 5V entre 2 échantillons, soit  $10V \times 40kHz = 400V/ms$ .

Uniquement l'amplificateur 2 convient.

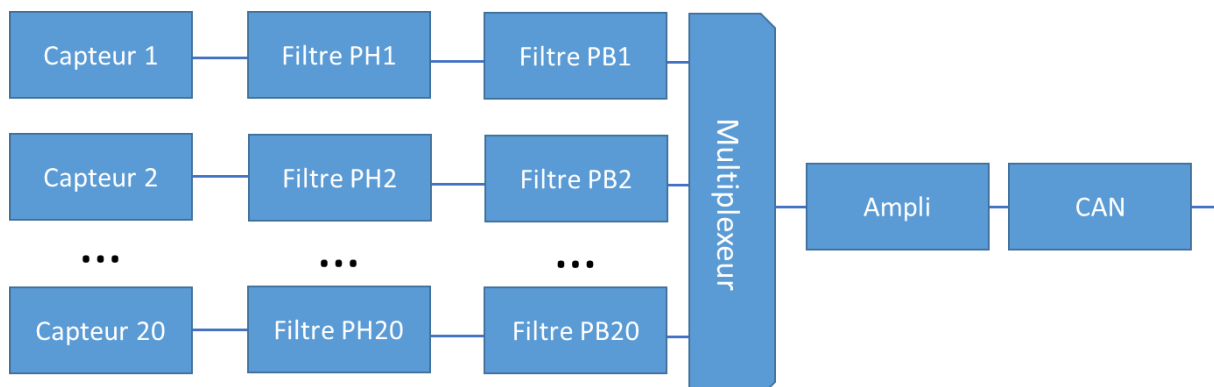
On note par la même occasion, que l'amplificateur permet une vitesse de multiplexage allant jusqu'à  $2000V/ms / 10V = 200kHz$ . Cela implique même le CAN le plus rapide (100kHz) à sa fréquence maximale peut être utilisé.

#### Choix du CAN

$20mV/2\mu V = 10000 \Rightarrow$  nombre de bits minimum = 14 bits ( $2^{14} = 16384$ )  $\Rightarrow$  seulement les CAN 2, 4, 6 conviennent. Fréquence d'échantillonnage de 40kHz au moins  $\Rightarrow$  pas le 1 ni le 2. Restent les CAN 4 et 6.

#### Architecture finale

NB. Le numéro du composant sert à indiquer le nombre total de composant nécessaire et leur place. Il ne s'agit pas du numéro servant à différencier les composants dans l'énoncé.



/10pt(s)

**Question 2**

**/ 10pts**

Soit le filtre à moyenne glissante décrit par l'équation :

$$y(n) = \frac{1}{N} \cdot (x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-(N-1)))$$

Déterminer la fonction de transfert de ce système.

La fonction de transfert du filtre à moyenne glissante est :

$$H(z) = \frac{1}{N} \cdot (1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(N-1)}) \quad \forall z$$

$$H(z) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} z^{-n} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}}$$

Quels sont les pôles et les zéros ? Déduisez-en la stabilité de ce système.

Ces systèmes possèdent :

- un pôle en  $z = 0$  (de multiplicité  $N - 1$ )
- un pôle en  $z = 1$
- des zéros en  $z = e^{jk\frac{2\pi}{N}} \quad k = 0 \dots N - 1$

Le pôle situé en  $z = 1$  étant compensé par un zéro en  $z = 1$ , le système est donc stable.

Ce système est-il récursif ? Justifiez.

Non, ce système n'est pas récursif. Sous la forme

$$H(z) = \frac{1}{N} \cdot (1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(N-1)})$$

Il n'y a pas de pôle. Sous la forme

$$= \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} z^{-n} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}}$$

Le pôle est compensé.

Donnez une équation de récurrence, permettant d'obtenir  $y(n)$  en fonction de  $y(n-1)$  et  $x$

Soit, via

$$y(n) = \frac{1}{N} \cdot (x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-(N-1)))$$

$$y(n-1) = \frac{1}{N} \cdot (x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + \dots + x(n-N))$$

$$y(n) - y(n-1) = \frac{1}{N} \cdot (x(n) - x(n-N))$$

Soit, via

$$H(z) = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}}$$

Que vaut la réponse en fréquence du système ? Que vaut le gain du système ?

Le cercle unité fait partie du domaine de convergence, la réponse en fréquence est :

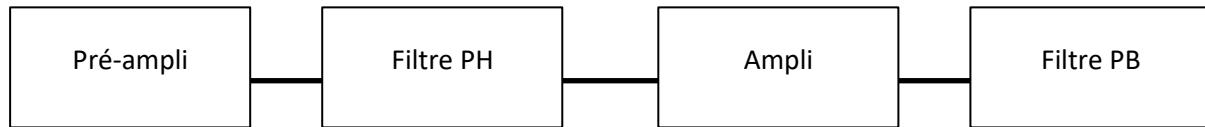
$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \cdot \frac{1 - e^{-j\omega N}}{1 - e^{-j\omega}} = \frac{e^{-j\omega N/2}}{e^{-j\omega/2}} \left( \frac{e^{j\omega N/2} - e^{-j\omega N/2}}{e^{j\omega/2} - e^{-j\omega/2}} \right)$$
$$= \frac{1}{N} \cdot e^{-j\omega(N-1)/2} \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)}$$

$$\Rightarrow |H(e^{j\omega})| = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \right|$$

**Question 3**

**/ 10pts**

Soit la chaîne d'acquisition classique suivante,



devant respecter le cahier des charges ci-dessous :

- Tension d'alimentation :  $-5V \rightarrow +5V$
- Plage du signal d'entrée utile :  $20\mu V_{pp}$
- Offset à l'entrée :  $40mV$
- Bande passante désirée :  $0.1Hz$  à  $10kHz$

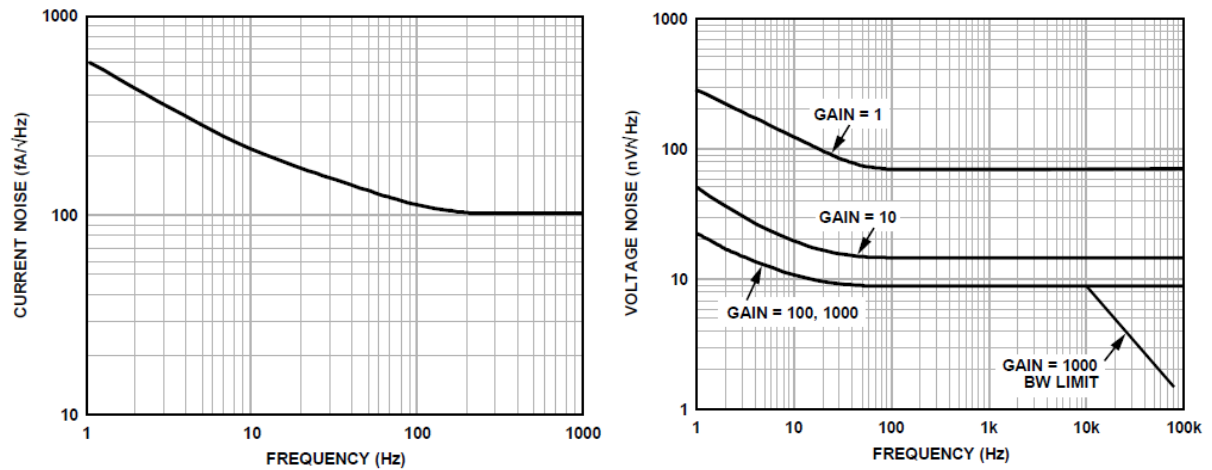
On désire sélectionner le pré-ampli minimisant le bruit sur le signal à l'entrée de cette chaîne d'acquisition. La résistance de source est de  $10k\Omega$ . Vous avez à votre disposition les 2 amplificateurs **AD622** et **AD8429**, dont les informations disponibles sont reprises ci-dessous.

- 1) Calculez le gain du pré-ampli et du second étage d'amplification
- 2) Calculez le bruit en tension et en courant des deux modèles proposés
- 3) Calculez le bruit total de chaque modèle et sélectionnez le meilleur amplificateur

**AD622 :**

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
DYNAMIC RESPONSE					
Small Signal –3 dB Bandwidth					
G = 1			1000		kHz
G = 10			800		kHz
G = 100			120		kHz
G = 1000			12		kHz
Slew Rate			1.2		V/μs
Settling Time to 0.1%	10 V step				
G = 1 to 100			10		μs
NOISE					
Voltage Noise, 1 kHz	Total RTI Noise = $\sqrt{(e_{ni}^2) + (e_{no}/G)^2}$				
Input Voltage Noise, $e_{ni}$			12		nV/√Hz
Output Voltage Noise, $e_{no}$			72		nV/√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz					
G = 1			4.0		μV p-p
G = 10			0.6		μV p-p
G = 100			0.3		μV p-p
Current Noise	f = 1 kHz		100		fA/√Hz
0.1 Hz to 10 Hz			10		pA p-p
REFERENCE INPUT					
$R_{IN}$	$V_{IN+}, V_{REF} = 0$		20		kΩ
$I_{IN}$			50	60	μA
Voltage Range		– $V_S + 1.6$		$+V_S - 1.6$	V
Gain to Output			1 ± 0.0015		
POWER SUPPLY					
Operating Range <sup>3</sup>	$V_S = \pm 2.6\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	±2.6		±18	V
Quiescent Current			0.9	1.3	mA
Over Temperature			1.1	1.5	mA
TEMPERATURE RANGE					
For Specified Performance			–40 to +85		°C





### AD8429 :

CURRENT NOISE				
Spectral Density: 1 kHz		1.5	1.5	pA/√Hz

Corner frequency of the current noise spectral density = 100Hz

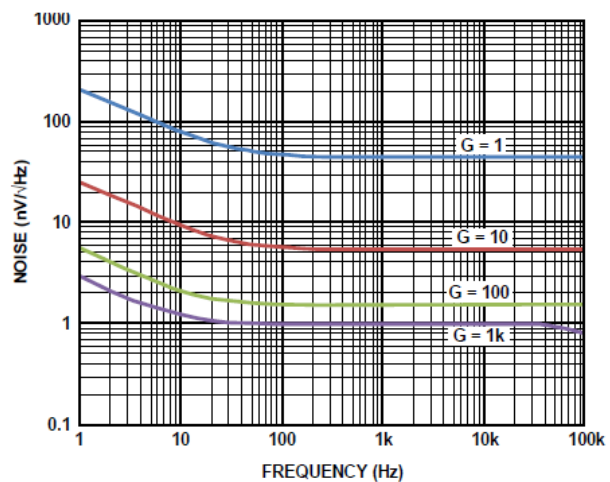


Figure 26. RTI Voltage Noise Spectral Density vs. Frequency

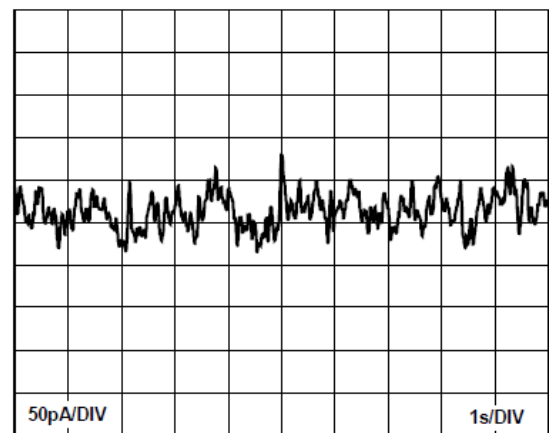


Figure 29. 0.1 Hz to 10 Hz Current Noise

1)

$$G_1 = \frac{5V}{40mV + 20\mu V} = 125$$

$$G_2 = \frac{5V}{20\mu V} * \frac{1}{G_1} = 2000$$

2)

On prendra les courbes autour de  $G = 100$

### AD622

Tension :

$e_n$  des tables est différent du  $e_n$  du graphe !

$$e_n(table) = \sqrt{e_{ni}^2 + \left(\frac{e_{no}}{100}\right)^2} = 12 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$$

$$e_n(graphe) = 9 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$$

$$En(0.1Hz-10Hz)_{modèle\_table} = 12nV/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10Hz - 0.1Hz + 10Hz * \ln(10Hz/0.1Hz)]} * 6.6 = 0.59 \mu V_{PP}$$

$$En(0.1Hz-20Hz)_{modèle\_graphe} = 9nV/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10Hz - 0.1Hz + 10Hz * \ln(10Hz/0.1Hz)]} * 6.6 = 0.44 \mu V_{PP}$$

➔ Le modèle basé sur le graphique est plus proche de  $0.3\mu V_{PP}$

« constructeur (0.1-10Hz) + modèle\_graphe (10-10kHz) »

$$\Rightarrow [(0.3\mu V_{PP})^2 + (9nV/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10kHz - 10Hz + 10Hz * \ln(10kHz/10Hz)]} * 6.6)^2]^{1/2} = 6\mu V_{PP}$$

Courant :

$$In(0.1Hz-10Hz)_{modèle} = 0.100pA/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10Hz - 0.1Hz + 50Hz * \ln(10Hz/0.1Hz)]} * 6.6 = 10 pA_{PP}$$

$$= In(0.1Hz-10Hz)_{constr}$$

Donc modèle ok sur toute la plage de fréquences :

$$In(0.1Hz-10kHz)_{modèle} = 0.100pA/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10kHz - 0.1Hz + 50Hz * \ln(10kHz/0.1Hz)]} * 6.6 = 68 pA_{PP}$$

### AD8429

Tension :

$$En(0.1Hz-10Hz)_{modèle} = 1.5nV/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10Hz - 0.1Hz + 10Hz * \ln(10Hz/0.1Hz)]} * 6.6 = 1 \mu V_{PP}$$

$$In(0.1Hz-10Hz)_{modèle} = 1.5pA/\sqrt{Hz} * \sqrt{[10Hz - 0.1Hz + 100Hz * \ln(10Hz/0.1Hz)]} * 6.6 = 215 pA_{PP}$$

$$>> In(0.1Hz-10Hz)_{constructeur} = 100pA_{PP}$$

Donc on utilise la valeur constructeur et on complète avec notre modèle de 10Hz à 10kHz

$$\left[ (100\text{pA}_{\text{PP}})^2 + (1.5\text{nA}/\sqrt{\text{Hz}} * \sqrt{[10\text{kHz} - 10\text{Hz} + 100\text{Hz} * \ln(10\text{kHz}/10\text{Hz})]} * 6.6)^2 \right]^{1/2} \\ = \mathbf{1.03\text{nA}_{\text{PP}}}$$

3)

$$\mathbf{N_{tot}(AD622) = (E_n^2 + (I_n * R_s)^2)^{1/2} = 6\mu V_{\text{PP}}}$$

$$\mathbf{N_{tot}(AD8429) = (E_n^2 + (I_n * R_s)^2)^{1/2} = 10\mu V_{\text{PP}}}$$

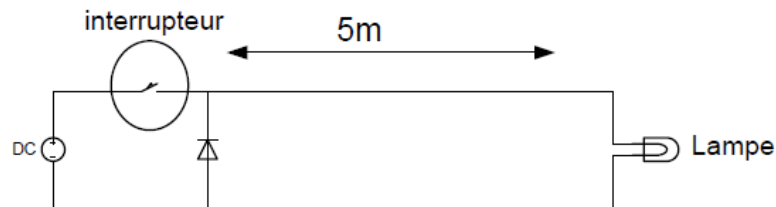
L'amplificateur qui minimise le bruit est le AD622

**/10pts**

**Question 4**

**/ 10pts**

Sur base du schéma ci-dessous, expliquer (sans calcul numérique) l'utilité d'une diode de roue libre en décrivant le problème survenant sans diode, et comment celle-ci le résout.



Un fil ayant une inductance intrinsèque, une transition très brève (de l'ordre de la nanoseconde) de l'interrupteur va entraîner une chute très rapide du courant, et donc une importante ddp le long du câble dû à la propriété des inductances ( $V=Ldi/dt$ )

Cela peut avoir pour conséquence de griller les composants sur ce câble, comme l'ampoule ici.

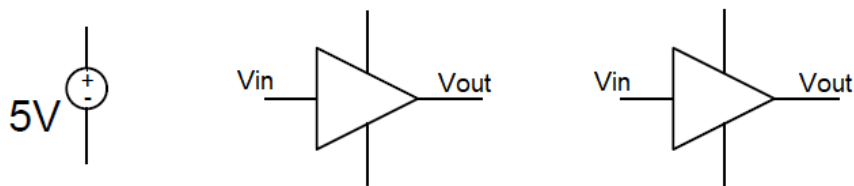
La diode de roue libre est placée de sorte à « laisser une échappatoire au courant » pour éviter que celui-ci passe de tout à rien trop rapidement.

Plus précisément, lorsque la ddp apparaît, la diode devient passante et laisse ce courant s'écouler etc... jusqu'à ce que toute l'énergie soit dissipée.

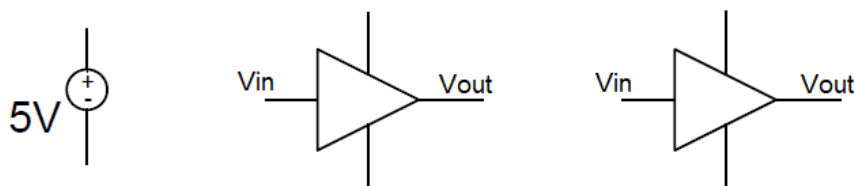
**/2pts**

Représentez schématiquement un câblage en cascade et un câblage en étoile.

**Cascade :**



**Etoile :**



**/2pts**

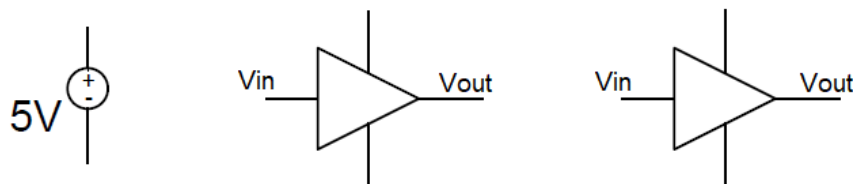
Lequel protégera mieux des parasites en cas d'une variation brusque de consommation ? Justifiez.

Le montage en étoile protégera mieux des parasites car la portion de câble commune est réduite à son minimum nécessaire.

/2pts

En pratique, quelle **autre** solution technique est utilisée pour minimiser les parasites ? Représentez-là sur le schéma ci-dessous.

La capacité de découplage, en parallèle avec l'alimentation proche des composants



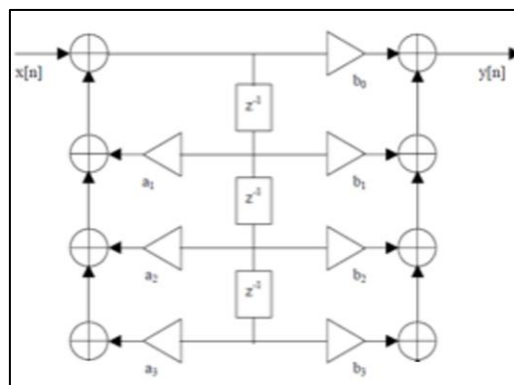
/1pts

Soit le filtre de fonction de transfert suivante : 
$$\frac{0.16 z^3 + 0.5 z^2 + 0.5 z + 0.16}{z^3 + 0.33 z}$$

Représentez la **structure directe canonique** permettant de réaliser ce filtre et donnez la valeur de chaque coefficient.

$$\frac{0.16 z^3 + 0.5 z^2 + 0.5 z + 0.16}{z^3 + 0.33 z} = \frac{(0.16 + 0.5 z^{-1} + 0.5 z^{-2} + 0.16 z^{-3})}{1 + 0.33 z^{-2}}$$

A1 = 0  
A2 = -0.33  
A3 = 0  
B0 = 0.16  
B1 = 0.5  
B2 = 0.5  
B3 = 0.16



/3pts