



ELEC-H-313 – Instrumentation : Exercices de dimensionnement

Il vous est demandé de dimensionner une chaîne d'acquisition 'typique' dont le schéma block est donné ci-dessous.



Les spécifications de cette chaîne d'acquisition vous sont fournies:

- Le signal d'entrée est
 - inclus entre -1mV et 1mV,
 - présent dans une bande passante de 0.1kHz-10kHz
 - superposé à un offset non désiré allant jusque +/- 1V
- On désire une résolution sur le signal d'entrée de 2μV minimum
- Le système est alimenté en +/- 5V

Vous avez à votre disposition différents composants pour réaliser cette chaîne (vous pouvez prendre plusieurs fois le même composant si nécessaire) :

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	0.5	1
Ampli II	+/-5	+/-5	5	1
Ampli III	+/-5	+/-5	50	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	8	1000
CAN II	+/-5	10	10	1000
CAN III	+/-5	10	12	1000
CAN IV	+/-5	100	8	1000
CAN V	+/-5	100	10	1000
CAN VI	+/-5	100	12	1000

Les filtres vous sont **imposés** :

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 (nV/√Hz)
Filtre passe-haut	+/-5	+/-5	0.02	1	10
Filtre passe-bas	+/-5	+/-5	20	1	100



Quel gain total serait optimal pour cette chaîne d'acquisition? Quel est le gain de l'étage d'amplification 'Ampli A' ? Quel est le gain de l'étage d'amplification 'Ampli B' ?

Pour utiliser toute la plage du CAN, il faut que le signal maximum (+/-1mV) soit amplifié de manière à couvrir les +/-5V du CAN.

$$G_{\text{tot}} = 5V/1mV = 5000$$

Afin que l'offset ne fasse pas saturer l'ampli et le filtre passe-haut, le gain du premier étage d'amplification ne peut être supérieur à $5V/1V = 5$. Afin de minimiser l'impact du bruit de filtre passe haut, le gain de ce premier étage doit être maximum.

$$G_1 = 5$$

Le gain du 2° amplificateur est choisi de manière à obtenir le gain total

$$G_2 = G_{\text{tot}} / G_1 = 1000$$

Quel(s) amplificateur(s) peut (peuvent) convenir parmi ceux proposés pour l'ampli A? Quel(s) amplificateur(s) peut (peuvent) convenir parmi ceux proposés pour l'ampli B?

Amplificateur A

Gain = 5

Bande passante = 10kHz

Produit Gain Bande passante = 50kHz

=> Tous les amplificateurs conviennent

Amplificateur B

Gain = 1000

Bande passante = 10kHz

Produit Gain Bande passante = 10MHz

=> Uniquement l'ampli III

Quel(s) convertisseur(s) analogique-numérique peut (peuvent) convenir parmi ceux proposés?

Signal inclus entre -1mV et 1mV

Résolution sur le signal d'entrée de 2μV minimum

=> Minimum $2mV/2\mu V = 1000$ pas au CAN, soit 10bits minimum

Pour éviter tout repliement spectral, on considère tout signaux et parasites non coupés par le filtre passe bas, donc ceux compris pour des fréquences allant jusqu'à 20kHz. Fréquence d'échantillonnage minimum = $2 \times 20kHz = 40kHz$. Les CAN V et VI conviennent





Donner la densité spectrale de bruit totale de la chaîne (nb. une réponse sous forme d'une somme de termes numériques est suffisante). Quel étage présente la contribution la plus importante de bruit ?

$$E_{tot} = \sqrt{(G_{amA}G_{amB}E_{amA})^2 + (G_{amB}E_{Fph})^2 + (G_{amB}E_{amB})^2 + E_{Fpb}^2 + E_{CAN}^2}$$

$$E_{tot} = \sqrt{(5.1000.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (1000.10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (1000.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (100\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (1000\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2}$$

Le terme qui présente la contribution la plus importante de bruit est $(1000.10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2$, il correspond au filtre passe haut.



Une société désire réaliser un système d'analyse de la marche. L'objectif est de monitorer la marche d'un patient lors de ses déplacements sur un tapis de sol. Le tapis de sol est muni de 200 capteurs de force permettant d'estimer la position du pied et la pression qu'il exerce à chaque pas.

Les spécifications des capteurs de force sont les suivantes :

- Amplitude maximum du signal à la sortie du capteur: $\pm 10\text{mV}$
- Le signal à la sortie du capteur est nul si aucune force n'est appliquée
- Bruit à la sortie du capteur inférieur à $100 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
- $R_{\text{source}} = 10\text{k}\Omega$
- Bande passante du capteur : $0\text{Hz} - 20\text{kHz}$

Le cahier des charges est le suivant :

- Alimentation du circuit en $\pm 5\text{V}$
- Bruit à l'entrée inférieur à $60\mu\text{V}_{\text{RMS}}$
- Bande passante du signal d'entrée : $0\text{Hz} - 100\text{Hz}$
- Résolution minimum de 0.2mV 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	G.BP
Ampli 1	$10 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$300 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	50MHz
Ampli 2	$5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$3 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	1MHz
Ampli 3	$5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$300 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	200MHz

Filtre passe-haut:

	Bruit E_n	Bruit I_n	F_{coupure}	Gain
Filtre PH	$2 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$200 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	A déterminer	1

Filtre passe-bas:

	Bruit E_n	Bruit I_n	F_{coupure}	Gain
Filtre PB	$2 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$200 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	A déterminer	1



Convertisseurs analogique-numérique ($V_{\text{entrée}} = \pm 5V$):

	Bruit E_n	$F_{\text{sampling max}}$	Nombre de bits
CAN 1	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	8
CAN 2	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	10
CAN 3	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	12
CAN 4	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	30kHz	8
CAN 5	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	30kHz	10
CAN 6	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	30kHz	12

Multiplexeurs:

	Bruit E_n	$F_{\text{switch max}}$	Nombre de canaux
MUX 1	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	32
MUX 2	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	64
MUX 3	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	128

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 de force doit être échantillonné avec une fréquence minimum de $2 \times f_{\text{max}} = 200\text{Hz}$. Comme il y a 200 capteurs en tout, la bande passante totale nécessaire est de 40kHz.

Aucun des CAN proposés ne permet une telle cadence d'échantillonnage. Il faudra donc au minimum en prendre deux permettant une fréquence d'échantillonnage de 30kHz. Les deux CAN devront être orchestrés et les données synchronisées en aval par un système numérique. Heureusement, nous disposons de tous les composants numériques que nous pourrions désirer.

Nous devons alors choisir deux multiplexeurs d'au minimum 100 entrées (il est assez difficile de trouver des multiplexeurs avec autant d'entrées, mais c'est possible). Nous choisissons donc le MUX3.



Position des filtres et choix de la fréquence de coupure

Comme la bande passante voulue commence à 0Hz, le filtre passe-haut n'est pas nécessaire. Le filtre passe-bas, par contre, est indispensable et doit être placé avant le multiplexeur. Sa fréquence de coupure devra être choisie de manière à :

- être supérieure à $f_{\max} = 100\text{Hz}$
- couper suffisamment les hautes fréquences pour éviter le repliement spectral. Ici, la fréquence d'acquisition maximum par canal est de $30\text{kHz}/100 = 300\text{Hz}$. La bande d'arrêt est donc à partir de 150Hz .

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 le filtre PB et avant l'amplificateur. Toutefois, le bruit du filtre vaut :

$$en = \sqrt{\left(10k\Omega * 200 \frac{nA}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(2 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}\right)^2} = \sqrt{\left(2000 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(2 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}\right)^2} \approx 2 \frac{mV}{\sqrt{Hz}}$$

$$En = 2 \frac{mV}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{100Hz} = 20mV_{RMS} \gg 60\mu V_{RMS}$$

Il est donc trop important pour respecter le cahier des charges. Il sera donc obligatoire de commencer par un étage d'amplification propre à chaque canal.

Choix de l'ampli ou des amplis

$R_s = 10k\Omega$ donc c'est le bruit de courant qui va être prépondérant. La densité bruit de courant domine largement pour les trois amplis :

- pour l'ampli 1 : $10 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} < 10k\Omega * 300 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 3000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
- pour l'ampli 2 : $5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} < 10k\Omega * 3000 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 30000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
- pour l'ampli 3 : $5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} < 10k\Omega * 300000 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 3000000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$

C'est l'ampli 1 qui a le plus petit bruit en courant et qui minimise le bruit total. La densité spectrale de bruit, presque uniquement due au bruit en courant, vaut :

$$en = \sqrt{\left(10k\Omega * 300 \frac{pA}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(10 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2} = \sqrt{\left(3000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(10 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2} \approx 3000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$$

Le bruit total de l'ampli vaut :

$$En = 3 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{100Hz} = 30\mu V_{RMS}$$

Gain total de la chaîne vaut 500 ($=5V/10mV$). Il n'y a pas d'offset et donc il nous est possible d'amplifier le signal autant que possible. Le produit gain*BP nécessaire pour une amplification avec un





seul étage d'ampli vaut $500 \times 100\text{Hz} = 50\text{kHz}$. Tous les amplificateurs proposés peuvent largement réaliser cette amplification.

Attention que même si nous nous situons en amont du filtre, et donc avec des fréquences contenues dans le signal potentiellement jusqu'à 20kHz (cf. bande passante du capteur), nous ne demandons pas à l'amplificateur de suivre des modifications de signal à si haute fréquence. En effet, elles nous importent peu, vu qu'elles seront filtrées par la suite. Du coup, pour le produit gain*BP, la BP est bien de 100Hz .

Choix du CAN

$20\text{mV}/0.2\text{mV}=100 \Rightarrow$ nombre de bits minimum = 7 bits \Rightarrow tous les CAN conviennent.

Fréquence d'échantillonnage de $30\text{kHz} \Rightarrow$ uniquement les 4, 5 et 6.

Bruit total de la chaîne

Bruit dû au capteur : $E_s = 100 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{100\text{Hz}} = 1 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$

Bruit dû à l'amplificateur : $E_a = 3 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{100\text{Hz}} = 30 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$

Bruit dû au filtre : $E_{pb} = 2 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{100\text{Hz}} = 20 \mu\text{V}_{\text{RMS}} \Rightarrow$ référé à l'entrée $\frac{20\text{mV}_{\text{RMS}}}{500} = 0.04 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$

Bruit dû au MUX: $E_{mux} = 10 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{100\text{Hz}} = 100 \mu\text{V}_{\text{RMS}} \Rightarrow$ référé à l'entrée $\frac{100 \mu\text{V}_{\text{RMS}}}{500} = 200 \text{nV}_{\text{RMS}}$

Bruit dû au CAN : $E_{can} = 20 \frac{\mu\text{V}}{\sqrt{\text{Hz}}} * \sqrt{100\text{Hz}} = 200 \mu\text{V}_{\text{RMS}} \Rightarrow$ référé à l'entrée $\frac{200 \mu\text{V}_{\text{RMS}}}{500} = 400 \text{nV}_{\text{RMS}}$

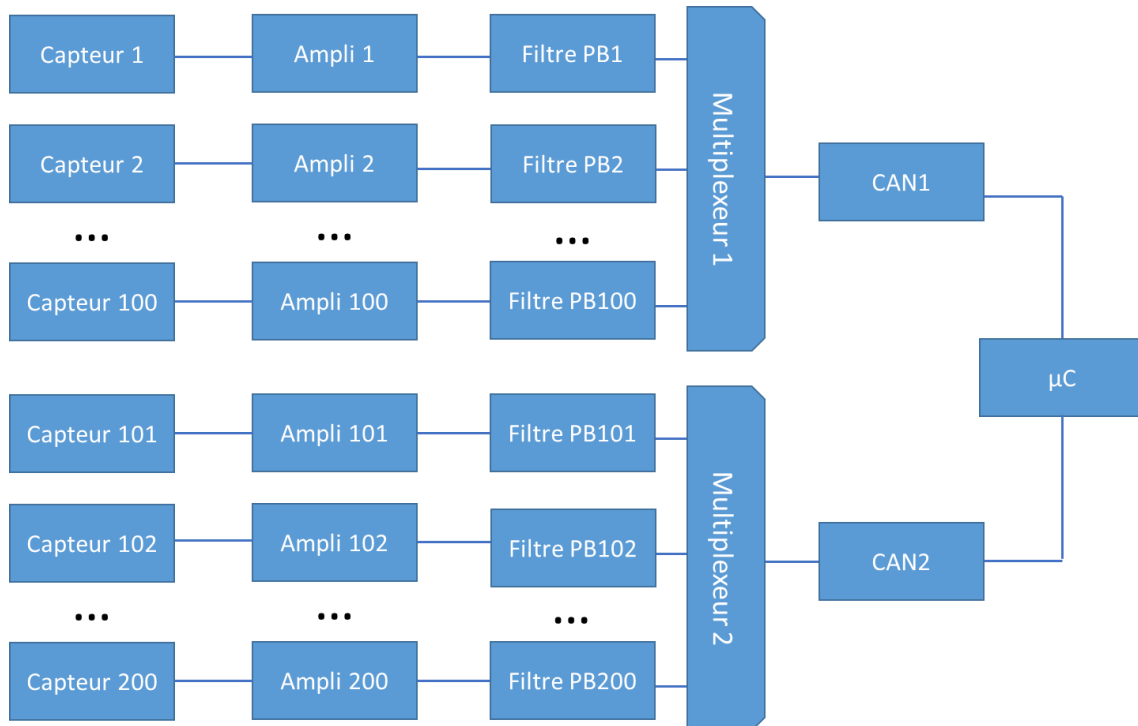
Le bruit total de la chaîne vaut :

$$E_{tot} = \sqrt{(1 \mu\text{V})^2 + (30 \mu\text{V})^2 + (0.04 \mu\text{V})^2 + (0.2 \mu\text{V})^2 + (0.4 \mu\text{V})^2} \approx \sqrt{(30 \mu\text{V})^2} = 30 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

C'est acceptable pour le cahier des charges.

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.





Une société désire réaliser un appareil capable de faire une cartographie de la température d'un PCB (Printed Circuit Board, ou circuit imprimé). L'objectif est de monitorer automatiquement chaque PCB lors de sa fabrication et de détecter les erreurs potentielles (principalement les courts-circuits) par l'élévation de température qu'ils produisent. Le système de monitoring est muni de 100 capteurs de température permettant d'estimer la température sur l'ensemble du PCB.

Les spécifications des capteurs de température sont les suivantes :

- Amplitude maximum du signal à la sortie du capteur: $\pm 100\text{mV}$
- Bruit à la sortie du capteur inférieur à $500 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
- $R_{\text{source}} = 10\Omega$
- Bande passante du capteur : $0\text{Hz} - 10\text{kHz}$

Le cahier des charges est le suivant :

- Alimentation du circuit en $\pm 5\text{V}$
- Bruit à l'entrée inférieur à $10\mu\text{V}_{\text{RMS}}$
- Bande passante du signal d'entrée : $0\text{Hz} - 10\text{Hz}$
- Résolution minimum de 0.2mV 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	$0.1 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$10 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	2V/ms
Ampli 2	$1 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$10 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	20V/ms
Ampli 3	$1 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$1 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	2V/ms

Filtre passe-haut:

	Bruit E_n	Bruit I_n	F_{coupure}	Gain
Filtre PH	$2 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$200 \frac{\text{nA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	A déterminer	1

Filtre passe-bas:

	Bruit E_n	Bruit I_n	F_{coupure}	Gain
--	-------------	-------------	----------------------	------



Filtre PB	$2 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	$200 \frac{nA}{\sqrt{Hz}}$	A déterminer	10
-----------	--------------------------	----------------------------	--------------	-----------

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	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	1kHz	8
CAN 2	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	1kHz	10
CAN 3	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	3kHz	12
CAN 4	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	3kHz	8
CAN 5	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	10
CAN 6	$20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	10kHz	12

Multiplexeurs (pas de bruit en courant):

	Bruit E_n	$F_{\text{switch max}}$	Nombre de canaux
MUX 1	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	32
MUX 2	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	64
MUX 3	$10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$	100kHz	128



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 de température doit être échantillonné avec une fréquence minimum de $2 \times f_{\max} = 20\text{Hz}$. Comme il y a 100 capteurs en tout, la bande passante totale nécessaire est de 2kHz.

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

Nous devons alors choisir un multiplexeur d'au minimum 100 entrées (il est assez difficile de trouver des multiplexeurs avec autant d'entrées, mais c'est possible). Nous choisissons donc le MUX3.

Une architecture sans amplificateur?

Il n'y a aucun élément qui nous permet de considérer que le signal sera limité en fréquence si on ne met pas de filtre PB. Au contraire, le capteur proposé a une passante allant jusqu'à 10kHz, et pourrait contenir des signaux proches de ou à 10kHz. Rien ne nous permet de dire que nous n'auront pas de parasites supplémentaires.

A ce stade, la chaîne qui minimise le nombre de composants est constituée d'un capteur, un filtre passe bas, un multiplexeur et un CAN. On essaye donc, à ce stade, une chaîne d'acquisition sans amplificateur.

La résolution minimum voulue est de 0.2mV sur le signal d'entrée. Le filtre PB a un gain de 10. Au niveau du CAN, une résolution (1 LSB) de $10 \times 0.2\text{mV} = 2\text{mV}$ est désirée. Si on prend le CAN avec le plus grand nombre de bit, ayant donc la meilleure résolution, on obtient une résolution de $(5\text{V} - -5\text{V})/2^{12} = 10\text{V}/4096 = 2.44\text{mV} > 2\text{mV}$. Cette solution n'est donc pas retenue. Un amplificateur sera nécessaire.

Gain

Gain total de la chaîne vaut 50 ($=5\text{V}/100\text{mV}$).

Position des filtres et choix de la fréquence de coupure

Comme la bande passante voulue commence à 0Hz, le filtre passe-haut n'est pas nécessaire. Le filtre passe-bas, par contre, est indispensable et doit être placé avant le multiplexeur. Sa fréquence de coupure devra être choisie de manière à :

- être supérieure à $f_{\max} = 10\text{Hz}$
- couper suffisamment les hautes fréquences pour éviter le repliement spectral. Ici, la fréquence d'acquisition maximum par canal est de $3\text{kHz}/100/2 = 15\text{Hz}$ ou $10\text{kHz}/100/2 = 50\text{Hz}$, suivant le CAN choisi. La bande d'arrêt est donc de minimum 10Hz et maximum de 15 ou 50Hz, 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 le filtre PB et avant l'amplificateur. On passerait alors de 100 amplis à seulement 1.

Le bruit du filtre vaut :

$$en = \sqrt{\left(10\Omega * 200 \frac{nA}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(2 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2} = \sqrt{\left(2000 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2 + \left(2 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}\right)^2} \approx 2 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$$





$$En = 2 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 6.32 \mu V_{RMS}$$

Le bruit du multiplexeur vaut

$$En = 10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 31.6 \mu V_{RMS}$$

Le bruit référé à l'entrée, dû au filtre et au mux vaut donc:

$$En = \sqrt{(6.2 \mu V_{RMS})^2 + (31.6 \mu V_{RMS}/10)^2} = 7 \mu V_{RMS}$$

Il est donc acceptable pour respecter le cahier des charges.

Choix de l'ampli ou des amplis

Rsortie des filtres ou mux sont faibles (~ 1Ω), donc c'est le bruit de tension qui va être prépondérant. La densité de bruit de tension domine largement pour les trois amplis :

- pour l'ampli 1 : $0.1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \gg 1\Omega * 10 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 10 \frac{pV}{\sqrt{Hz}}$
- pour l'ampli 2 : $1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \gg 1\Omega * 10 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 10 \frac{pV}{\sqrt{Hz}}$
- pour l'ampli 3 : $1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} \gg 1\Omega * 1 \frac{pA}{\sqrt{Hz}} = 1 \frac{pV}{\sqrt{Hz}}$

C'est l'ampli 1 qui a le plus petit bruit en tension et qui minimise le bruit total. Toutefois, on se rend rapidement compte que la contribution du bruit de l'amplificateur, quel qu'il soit, est négligeable devant le bruit du filtre. Même pour les amplificateurs 2 et 3, on a un bruit référé à l'entrée de:

$$En = 1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} * \frac{\sqrt{10Hz}}{10} = 0.31 nV_{RMS} \ll 7 \mu V_{RMS}$$

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 x 2kHz = 20V/ms.

Uniquement l'amplificateur 2 convient.

On note par la même occasion que l'amplificateur ne permet pas une vitesse de multiplexage plus importante que 2kHz. Cela implique que le multiplexeur et le CAN iront à une cadence de 2kHz et que la bande d'arrêt du filtre sera de 10Hz.

Choix du CAN

200mV/0.2mV=1000 => nombre de bits minimum = 10 bits => les CAN 1&4 ne conviennent pas. Fréquence d'échantillonnage égale à 2kHz => uniquement les 3, 5 et 6.

Bruit total de la chaine

$$\text{Bruit dû au capteur : } Es = 500 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 1.58 \mu V_{RMS}$$

$$\text{Bruit dû au filtre : } Epb = 2 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 6.2 \mu V_{RMS}$$

$$\text{Bruit dû au mux: } 10 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 31.6 \mu V_{RMS} \Rightarrow \text{référé à l'entrée } \frac{31.6 \mu V_{RMS}}{10} = 3.16 \mu V_{RMS}$$





Bruit dû à l'amplificateur : $E_a = 1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 3.1nV_{RMS} \Rightarrow$ référé à l'entrée $\frac{3.1nV_{RMS}}{10} = 0.31nV_{RMS}$

Bruit dû au CAN : $E_{can} = 20 \frac{\mu V}{\sqrt{Hz}} * \sqrt{10Hz} = 63\mu V_{RMS} \Rightarrow$ référé à l'entrée $\frac{63\mu V_{RMS}}{50} = 1.26\mu V_{RMS}$

Le bruit total de la chaine vaut :

$$E_{tot} = \sqrt{(1.58 \mu V)^2 + (6.2 \mu V)^2 + (3.16 \mu V)^2 + (0.00031 \mu V)^2 + (1.26 \mu V)^2} = 7.24\mu V_{RMS}$$

C'est acceptable pour le cahier des charges.

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.

