NOM : PRENOM :

Ce sujet de 6 pages est un unique problème qui traite de la conception et de la réalisation d'une ruche connectée. Le barème est donné à titre indicatif. Répondez directement sur les feuilles de l'énoncé dans les espaces laissés à cet effet. Pensez bien à justifier vos réponses. La calculatrice ainsi que tous les documents sont autorisés.

Afin de pouvoir estimer la santé des abeilles ou la quantité de miel, à distance, une ruche connectée est équipée de différents capteurs : poids, température, hygrométrie, vibration. . . . Nous nous intéresserons dans la suite uniquement à la mesure de la masse de la ruche. Cette dernière peut être comprise entre 10kg (pas de miel) et 100kg (production abondante de miel). Cette masse est mesurée à l'aide de plusieurs capteurs de type CZL635 dont la *datasheet* est donnée en annexe.

1 Capteur CZL635 - $\approx$ 40%

Cette première partie aborde la structure interne du capteur CZL635, structure interne qui n'est que partiellement décrite dans la *datasheet*.

Le capteur CZL635 est constitué de 4 jauges de contrainte **identiques** montées en Pont de Wheatstone (cf. figure 1). Les jauges sont disposées de telle matière que, lors d'un effort, 2 jauges subissent une compression et les 2 autres une extension.

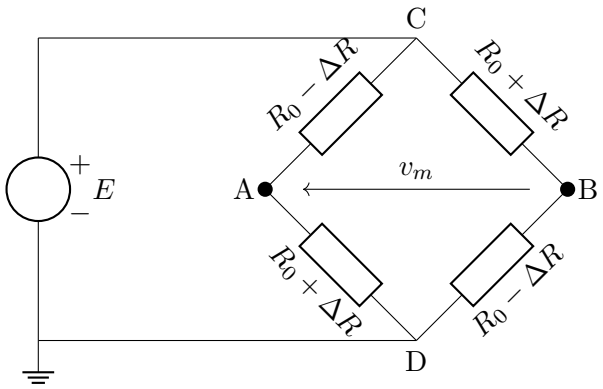

FIGURE 1 – Conditionnement en pont de Wheastone - capteur CZL635.

Une jauge de contrainte est un fil conducteur monté en zig-zag sur un support souple très fin et possédant une résistance $R = \frac{\rho.L}{S}$, avec ρ, la résistivité du fil ($\Omega.m$), L, la longueur du fil (m) et S, la section du fil (m^2). Ce support souple est ensuite collé sur la pièce pour connaitre les efforts exercés sur celle-ci. Une déformation mécanique de la pièce provoque une modification géométrique de la jauge en faisant varier sa longueur L principalement. La variation relative de résistance de la jauge est liée à la variation relative de longueur de cette dernière par un facteur de jauge k (proche de 2 pour les jauges métalliques) :

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R_0} = k\frac{\Delta L}{L_0}}$$

« Au repos », la résistance de la jauge est R_0 (Ω) et sa longueur L_0 (m).

1. Donner 2 différences entre un « capteur actif » et un « capteur passif ».
   De quel type est le capteur CZL635 ?
   Définir la notion de « capteur composite », à l'aide d'un schéma clair.
   Le capteur CZL635 est-il un capteur composite ? (Justifier votre réponse.)
   Un capteur actif est basé sur un effet physique qui assure la conversion de l'énergie du mesurande vers une énergie électrique. La grandeur de sortie est donc une grandeur électrique : tension, courant ou charge.
   Un capteur passif est une impédance dont l'un des paramètres est sensible au mesurande. Un capteur passif doit donc être alimenté et conditionné.
   Le capteur CZL635 est un capteur passif, d'après la figure 1.
   Un capteur composite est constitué d'un corps d'épreuve qui transforme le mesurande primaire m en un mesurande secondaire m' plus simple à mesurer. Il comprend aussi un capteur classique pour mesurer m' (cf. cours).
   Le capteur CZL635 est un capteur composite, car le mesurande primaire est le poids et le mesurande secondaire l'allongement ΔL des jauges.
2. On s'intéresse ici à différentes caractéristiques du capteur CZL635, explicitées dans sa *datasheet*.
   (a) Quelle est la masse maximale que le capteur peut mesurer, tout en gardant ses caractéristiques métrologiques ?
   (b) Quelle différence existe-t-il entre la plage *Safe Overload* et la plage *Ultimate Overload* ?
   (c) Quelle différence existe-t-il entre la plage *Compensated Temperature Range* et la plage *Operating Temperature Range* ?
   (d) Quelle est la tension d'alimentation nominale du capteur CZL635 ?

   Le capteur peut mesurer jusqu'à 120% de sa capacité (*safe overload*) donc 24kg.
   La plage *Ultimate Overload* indique que les caractéristiques métrologiques sont modifiées de manière irréversible. Un nouvel étalonnage est donc nécessaire. Le capteur est cependant toujours fonctionnel. Dans la plage *Safe Overload*, le capteur conserve ses caractéristiques métrologiques.
   Dans la plage *Compensated Temperature Range*, il existe un mécanisme passif ou actif qui « compense » l'effet de la température et les caractéristiques métrologiques sont donc garanties. Dans le plage *Operating Temperature Range*, il n'y a plus de compensation et le caractéristiques métrologiques ne sont plus garanties, même si elles ne vont varier que faiblement.
   La tension d'alimentation nominale est de 5V.
3. **On supposera dans la suite, que le capteur est alimenté sous une tension de 5V.**
   (a) Montrer que pour une masse de 20kg, la tension de sortie du capteur vaut : $\boxed{v_{out} = 5mV}$;
   (b) En faisant apparaitre les valeurs numériques importantes, tracer la caractéristique métrologique idéale du capteur pour m variant de 0 à 20kg ;
   (c) Montrer alors la tension de sortie v_{out} (V) peut s'exprimer par :

   $$\boxed{v_{out} = 25.10^{-5}m} \tag{1}$$

   où m (kg) est la masse à mesurer.

   La formule à utiliser est donnée dans le paragraphe *Calibration* : $1mV/V$ pour 20kg. La tension d'alimentation étant de 5V, on obtient $5mV$.
   Le capteur étant linéaire, la caractéristique idéale (sans tenir compte des défauts) est une droite passant par 0 et 5mV pour 20kg.
   Pour démontrer la formule, il suffit de chercher l'équation de la droite :

   $$v_{out} = \frac{5mV}{20kg}.m = 2,5.10^{-4}m = 25.10^{-5}m(kg)$$

4. Quelle est la tension de pleine échelle (*Full Scale*) de ce capteur ?
   Sans prendre en compte les effets de la température, faire un bilan des erreurs pouvant affecter la mesure. En déduire l'intervalle de confiance pour la mesure d'une masse de 20kg.
   La tension de pleine échelle est 5mV, car la sortie varie entre 0 et 5mV.
   Bilan des erreurs :
   (a) précision : 0,05%
   (b) non-linéarité : 0,05%
   (c) hystérésis : 0,05%
   (d) non-répétabilité : 0,05%
   (e) fluage (*creep*) : 0,1%
   (f) dérive du zéro : 1,5%
   (g) total = 1,8%
   Pour une masse de 20kg, le résultat sera donc $20kg \pm 0,36kg$
5. On s'intéresse à présent à la modélisation électrique du capteur, représentée sur la figure 1.
   (a) Calculer l'expression de la tension de sortie du pont $v_m = v_A - v_B$ et montrer que :

$$\boxed{v_m = k\frac{\Delta L}{L_0}.E} \tag{2}$$

   (b) A quelle condition cette équation est-elle cohérente avec l'équation 1 trouvée à la Q3 ?
   (c) Exprimer la tension de mode commun v_{mc}, en sortie du pont, en fonction de E.
   (d) Calculer la valeur numérique de cette tension.

$$v_A = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0}E \qquad v_B = \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0}E$$
$$v_m = v_A - v_B = \frac{\Delta R}{R_0}E = \frac{k\Delta L}{L_0}E$$

   Cette équation est cohérente avec la réponse de la Q3 si l'allongement des jauges ΔL varie linéairement avec la masse à mesurer m, afin d'obtenir $v_m = \alpha m$, avec α un facteur de proportionnalité.

$$v_{mc} = \frac{v_A + v_B}{2} = \frac{E}{2} = 2,5V$$

2 Conditionnement du capteur CZL635 - solution 1 - ≈ 35%

Pour conditionner la tension de sortie v_m de notre capteur, on choisit comme amplificateur un INA125 de chez *Burr-Brown* dont la *datasheet* est donnée en annexe.

1. Donner 2 différences entre un amplificateur d'instrumentation (AI) et un amplificateur opérationnel (AOp).
   L'INA 125 est-il un AI ou un AOp ?
   Définir la notion « d'amplificateur d'isolement ».
   L'INA 125 peut-il être classé comme amplificateur d'isolement ?
   Un amplificateur d'instrumentation est stable sans contre-réaction et le gain se règle par une simple résistance externe.

INA 125 est un AI.
Un amplificateur d'isolement est un AI comportant une barrière d'isolement pouvant supporter typiquement 100 ou 1000V. Cela implique qu'il y a une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur.
L'INA 125 n'est pas un amplificateur d'isolement. Il ne possède pas de procédé d'isolation galvanique.

2. Sur les différents schémas du composant (pages 1 ou 4) apparaissent plusieurs sorties V_{ref}.
   Quelle est l'utilité de ces sorties ? Pourra-t-on les utiliser dans le cadre des mesures effectuées sur notre ruche ?
   Détailler l'utilité de la broche 2 : $\overline{SLEEP}$.
   Les sorties V_{ref} fournissent plusieurs tensions de référence aptes à alimenter par exemple un pont de Wheatstone. La tension de référence 5V pourrait donc être utilisée dans le cadre de notre ruche.
   SLEEP permet une mise en veille du composant, si la broche est mise à l'état bas (tension inf. à 100mV). Le courant chute alors à $1\mu A$. Le réveil s'obtient si SLEEP passe au-dessus de 2,7V.
3. Quelle différence principale existe-t-il entre l'INA 125P et l'INA 125U ?
   Dans le cadre d'une solution industrielle, quel composant (parmi ces 2) choisiriez-vous ?
   Donner 2 raisons pour ce choix.
   L'INA 125P un un composant traversant (boitier DIP) alors que l'INA 125U est de type CMS (boitier SO-16).
   Dans le cadre d'une solution industrielle, on choisirait l'INA 125U.
   Voici quelques avantages des composants CMS vi-s-à-vis des composants traversants :
   - plus petits et plus légers ;
   - plus besoin de percer les circuits intégrés ;
   - automatisation de l'assemblage facilité ;
   - meilleures performances CEM ;
   - coût global moindre ;
   - meilleure tenue mécanique ;
4. Pour la mesure d'un poids de 20kg, on souhaite en sortie de l'INA 125 une tension de 5V.
   (a) Quel gain différentiel A_d faut-il donc choisir ?
   (b) Comment peut-on régler ce gain sur l'INA 125 ?

   On rappelle que la tension de mode commun en sortie du pont de Wheatstone vaut : $v_{mc} = 2,5V$.
   On souhaite en sortie de l'INA 125 une erreur due au mode commun inférieure ou égale à $5mV$.
   (a) Quel gain de mode commun A_{mc} faut-il donc choisir ?
   (b) Faire le calcul du TRMC correspondant.
   (c) L'amplificateur INA 125 est-il un bon choix ?
   5V en sortie de l'INA pour 5mV en entrée → G=1000
   Le gain se règle par une résistance externe à placer entre les broches 8 et 9 :

$$R_G = \frac{60k\Omega}{G-4} \approx 60,24\Omega$$

   La tension de mode commune V_{mc} est de 2,5V. On souhaite une tension de sortie inférieure à 5mV. Il faut donc un gain en mode commun de

$$A_c < \frac{5mV}{2,5V} = 2.10^{-3}$$

$$TRMC = 20log_{10}|\frac{Ad}{Ac}| > 112dB$$

Pour un gain entre 100 et 500, le TRMC typique est de 114dB. Le composant paraît donc bien choisi, d'autant plus que nos signaux d'entrée sont plutôt basse fréquence (le TRMC chute avec la fréquence).

3 Conditionnement du capteur CZL635 - solution 2 - $\approx$ 25%

Plutôt que d'utiliser l'INA 125 qui nécessite une numérisation *a posteriori* du signal, on choisit d'étudier le composant HX711 (*datasheet* en annexe), proposé avec le capteur lors de l'achat.

1. Le composant HX711 est construit autour d'un convertisseur analogique-numérique de type sigma-delta, de 24 bits.

   Quelle est la résolution de ce convertisseur, quand il est alimenté sous une tension de 5V ?

   Calculer alors la résolution de la chaîne d'acquisition, exprimée en mg/LSB, en supposant que le gain du composant HX711 est $G = 1$.

   Cette valeur pour paraît-elle cohérente avec les spécifications du projet de ruche connectée ? Justifier votre réponse.

   $$q = \frac{5V}{2^{24}} \approx 0,3\mu V$$

   Si le gain est de 1, la plus petite masse détectable est donc :

   $$m_{min} = \frac{q}{25.10^{-5}} \approx 1200mg/LSB$$

   Etant donné les masses en jeu (entre 10kg et 100kg), une résolution de l'ordre du gramme paraît « sur-dimensionné » pour le problème.

2. Quelle est l'utilité du multiplexeur situé en entrée du composant HX711 ?

   Comment est effectué le choix de l'entrée A ou B et du gain correspondant ?

   Le multiplexeur permet de choisir entre la voie A (gain programmable entre 64 et 128) et la voie B (gain fixe de 32).

   Le choix se fait par le nombre d'impulsions envoyées sur l'entrée PD_SCK :

   — 25 : A, 128
   — 26 : B, 32
   — 27 : A, 64

3. Dans les caractéristiques électriques du composant, que signifie le terme « output data rate » ?

   Quelles sont les valeurs minimales et maximales de ce paramètre dans le cas d'un oscillateur interne ? Même question pour un oscillateur externe.

   Comment indique-t-on au composant l'utilisation de l'oscillateur interne ?

   L'« output data rate » fixe la période de conversion et de transmission des données codées sur 24 bits.

   Pour un oscillateur interne : 10 ou 80 Hz

   Pour un oscillateur externe :

   $$\frac{1}{1105920} \approx 9.10^{-7}\text{Hz} \rightarrow \frac{20.10^6}{138240} \approx 145\text{Hz}$$

   Le composant détecte automatiquement l'utilisation d'un oscillateur externe.

4. Sur quelle broche du composant faut-il récupérer les données numériques ? Sous quel format ces données se présentent-elles ?

   Quelle procédure faut-il respecter pour récupérer ces données ?

   Que se passe-t-il si l'on applique 35 impulsions sur l'entrée *PD_SCK*, alors que la broche *DOUT* est à l'état haut ?

   Les données sont disponibles sur la broche DOUT, au format 24 bits signés (CC2).

   Il faut envoyer entre 25 et 27 impulsions de largeur 0,2 à 50μs, avec un temps à l'état bas compris entre 0,2 et 1μs. Cela peut par exemple être un signal PWM de rapport cyclique 50% et de fréquence 500kHz.

   Si 35 impulsions sont appliquées, il en résulte une erreur de communication.