|  |
| --- |
| **Jauge de déformation à base de feuillets de**  **graphite fournie avec son conditionneur** |

**Numéro de référence**: GPINSA2021-2494-5215

**Schéma du capteur**

A : Largeur du pad de connexion[[1]](#footnote-1)

B : Hauteur du pad de connexion

C : Ecartement entre les pads

D : Longueur du capteur

E : Epaisseur du capteur

**Matériel nécessaire pour la création du capteur**

* Crayons de graphite de différents types : 3H, 2H, H, HB, B, 2B, 3B
* Feuille de papier imprimé avec le modèle du capteur (grammage minimum160g/m²)

**Caractéristiques générales du capteur**

* « Low-tech »
* Facile à créer, transporter et utiliser
* Respectueux de l’environnement
* Bas coûts
* Feuillets de graphite déposés avec des crayons du 3H au 3B
* Faible consommation d’énergie
* Mesure de la résistance électrique traduisant une déformation de la pièce

**Applications possibles**

?

**Remarques**

Capteur réalisé dans le cadre d’un projet dans l’unité de formation « du capteur au banc de test » par des étudiants du Génie Physique de l’INSA Toulouse : Gaich Eléonore et Stephen Calvin au cours de l’année universitaire 2020-2021.

Pour toute informations complémentaires à la datasheet, veuillez consulter le github ci-dessous : ou nous envoyer un mail : [gaich@etud.insa-toulouse.fr](mailto:gaich@etud.insa-toulouse.fr) ou [stephen@etud.insa-toulouse.fr](mailto:stephen@etud.insa-toulouse.fr)

**Description du fonctionnement du capteur**

Notre capteur « low-tech[[2]](#footnote-2) » est une jauge de contrainte ou de déformation, aussi appelée extensomètre. Il exploite la théorie de la percolation au sein d’un système granulaire[[3]](#footnote-3) constitué de particules de graphite formant des feuillets. Une couche fine de ce matériau est déposée en forme de U sur un papier rectangulaire (voir le schéma ci-dessus) à l’aide d’un crayon de graphite. En observant la structure de cette couche à l’aide d’un microscope électronique à balayage (MEB), nous pouvons observer le dépôt de particules ultrafine de carbone formant un réseau percolé[[4]](#footnote-4) de nanoparticule de graphite.

La conductance totale du capteur est la somme de la conductance intragrain[[5]](#footnote-5) et de la conductance tunnel ou intergrain[[6]](#footnote-6). Dans un système granulaire ou régime isolant, le quanta de conductance est très inférieur à 1. La résistance tunnel est très importante. Ainsi, le transport des électrons, soit le courant passant à travers le système, est régi par l’effet tunnel. Le film de nanoparticules est modélisé par des conductances locales connectées. Elles dépendent de la barrière de potentiel à franchir (hauteur et largeur), de la distribution énergétique Ec et de la température, (agitation thermique) et la distance inter-particules. Le système percole à partir d’un certain seuil rendant le film conducteur.

Lorsque le papier est soumis à une tension, le taux de percolation des réseaux diminue. Ceci implique une augmentation de la résistance de la couche de graphite car la distance effective entre les particules augmente, ne permettant plus aux molécules d’être connectées pour que le courant circule. De même, lorsque le papier est soumis à une compression, le taux de percolation des réseaux augmente, expliquant une diminution de la résistance (distance entre les particules diminuant). En bref, une déformation du capteur ??

*Figure n°1 : Schéma représentant la notion de compression et tension du capteur [1]*

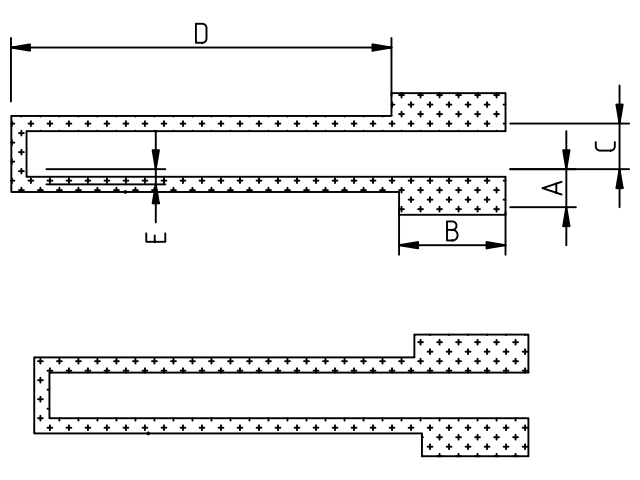
La variation de la résistance étant proportionnelle à la déformation du capteur permet d’en déduire la déformation subie. Cette variation de résistance est très petite et passif d’où la nécessité d’un conditionneur de signal qui est constitué d’un amplificateur de transimpédance.

Type de crayon à expliciter en fonction de la teneur en graphite

**Configuration des points de contact**

Point de contact n°2

Point de contact n°1

****

|  |  |
| --- | --- |
| **Numéro du point de contact** | **Usage** |
| 1 | Connecté à l’alimentation du circuit + Vcc = 5v |
| 2 | Connecté à l’entrée du circuit analogique Vin |

**Spécifications du capteur**

|  |  |
| --- | --- |
| **Type** | Jauge de contrainte/déformation à base de feuillets de graphite |
| **Effet théorique exploité** | Système granulaire  Résistance tunnel  Réseau de percolation |
| **Matériaux utilisés** | Feuillets[[7]](#footnote-7) de graphite (carbone)  Ion argileux (C,Mg,Al,Si)  Fibres cellulosiques végétales (papier) |
| **Quantité des matériaux sur le capteur** | Non évaluable[[8]](#footnote-8) |
| **Type de capteur** | Passif, nécessitant donc un conditionneur[[9]](#footnote-9) |
| **Type de graphite utilisable** | 3H, 2H, H, HB, B, 2B, 3B |
| **Nature de la mesure** | Mesure résistive |
| **Dimensions** | Variables en fonction des expériences[[10]](#footnote-10) |
| **Prise de contact** | Avec des pinces crocodiles sur les pads de connexion du capteur |
| **Temps de réponse** | Qq secondes pour que la valeur soit réellement stable |

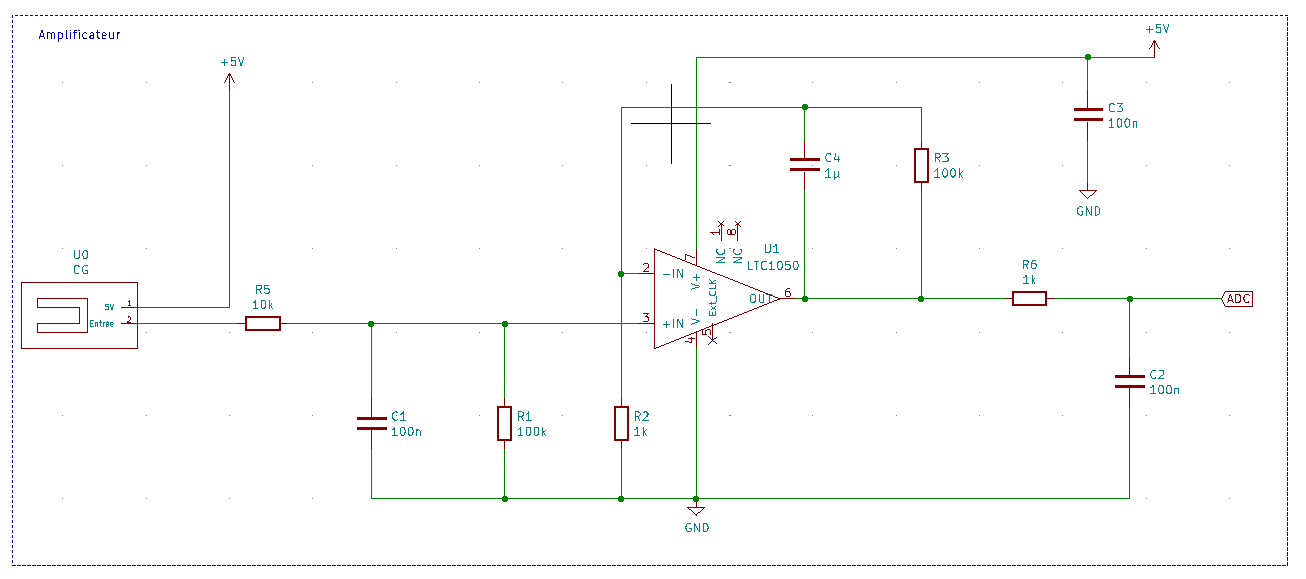
**Conditions d’utilisation standard**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Unité** | **Valeur typique** |
| Température | °C |  |

**Conditionneur de notre capteur passif**

* **Matériel nécessaire** 
  + Résistances R1 100kΩ ; R2 1kΩ ; R3 100kΩ ; R5 10kΩ ; R6 1kΩ
  + Capacités C1 100nF ; C2 100nF ; C3 100nF ; C4 1µF
  + Amplificateur LT1050
* ***Schéma du conditionneur***

Réalisé avec le logiciel opensource KiCad

****

*Figure n°2 : Schéma du circuit analogique utilisé comme conditionneur de notre capteur*

Commentaires

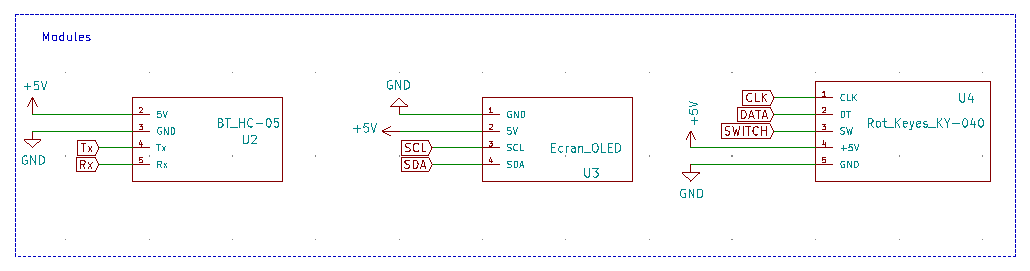
* **Schéma équivalent de Thévenin de notre conditionneur**

**A FAIRE**

**Attention :** Vadc est connecté à un pin digital donnant des valeurs de 0 à 1024, correspondant en tension à des valeurs entre 0 et 5V. Il faut donc convertir la valeur envoyée par le microcontrôleur

* **Modules additionnels au conditionneur**

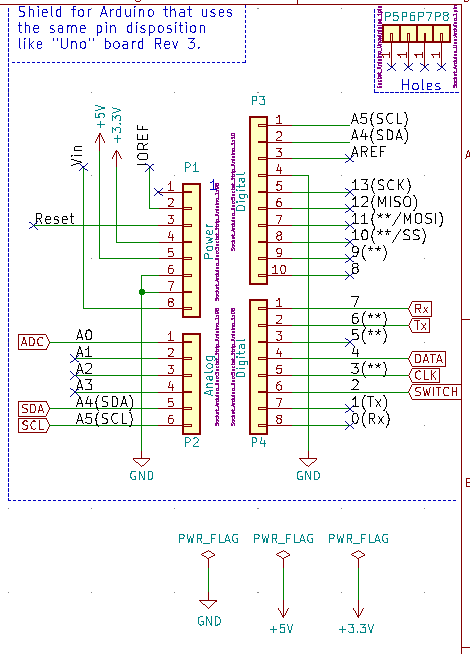
Afin de récupérer la valeur délivrée par notre amplificateur, nous avons utilisé un microcontrôleur Arduino UNO ainsi que des modules additionnels : un écran OLED, un module Bluetooth HC05 et un encodeur rotatoire Keyes KY 040.

****

*Figure n° ? : Schéma représentatif des différents modules additionnels*

*ainsi que leurs connexions aux broches de l’arduino.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Composant** | **Pins connectés de l’Arduino UNO** | **Pins composant** |
| Bluetooth HC05 | 5V | 5V |
| GND | GND |
| 6 | Tx |
| 7 | Rx |
| Ecran OLED | 5V | 5V |
| GND | GND |
| A4 | SDA |
| A5 | SCL |
| Encodeur rotatoire Keyes KY-040 | 5V | 5V |
| GND | GND |
| 3 | CLK |
| 4 | DATA |
| 2 | SWITCH |
| Jauge de contrainte + conditionneur | 5V | 5V |
| A0 | ADC |

* **Spécifications de la connexion des composants sur l’Arduino UNO**

*Figure n° ? : Connexions des pins de l’arduino UNO*

* **Création du PCB shield**

Après avoir réalisé le schéma électrique, le placement des composants et le routage de la carte PCB sur le logiciel KiCad, le typon du PCB est imprimé sur deux feuilles calques (voir github : ??) . Les deux transparents sont alors superposés et scotchés entre eux afin de diminuer le risque de microcoupure (encre trop pale). Le typon est disposé sur la glace de l’insoleuse ainsi que la plaque d’époxy dont la face cuivrée (60µm) photosensible est du côté du typon. Cette opération dure environ deux minutes et permet d’insoler la face photosensible. Le dessin du typon est alors visible sur la face cuivrée. La plaque est ensuite plongée dans un révélateur jusqu’à ce que le dessin apparaisse parfaitement (retire la résine non insolée). Après l’avoir rincé à l’eau, la plaque est alors prête pour la gravure. Le PCB est alors place dans un bain de perchlorure de fer rongeant tout le cuivre non protégé par la résine pendant sept minutes. Après l’avoir rincé à l’eau et vérifié le circuit, la résine est retirée avec de l’acétone. Le PCB sera ensuite percé et les composants seront soudés. Compléments d’informations sur notre github : [ici](https://github.com/MOSH-Insa-Toulouse/2020-2021_GAICH_STEPHEN_Capteur_Graphite.git)

**Caractéristiques électroniques**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Unités** | **Valeurs** | | |
| **Min** | **Typique** | **Max** |
| **Tension Vadc mesurée** | V | 0.00[[11]](#footnote-11) | / | 5.00 |
| **Résistance du capteur** | MΩ | 9.99 | / | + |

**Banc de test utilisé pour réaliser les caractéristiques du capteur**

Afin de réaliser les caractéristiques de notre capteur, nous avons crée un banc de test. Nous souhaitons le partager dans la datasheet afin que toute personne souhaitant comprendre notre procédure de mesure puisse avoir accès à toutes les étapes.

Pour rester dans une démarche « low-tech », nous avons décidé de réutiliser des matériaux provenant de déchets ménagers. Dans un premier temps, nous avons essayé de récupérer des déchets « sphériques » ayant un rayon de courbure exploitable : le bouchon de vin (1cm), le bouchon de lait (1.5cm), le bouchon protecteur des Pringles coupé par la moitié (4cm) etc.

PHOTO

Cependant, nous n’arrivions pas à trouver tous les rayons que nous souhaitions pour calibrer notre capteur. Nous avons alors opté pour faire des rayons de courbure de manière précise en prenant du carton d’une boite de céréales. Nous avons calculé le périmètre correspondant à un rayon de 1cm, 2cm, 3cm, 4cm et 5 cm.

|  |  |
| --- | --- |
| **Rayon de courbure souhaité** | **Périmètre du cercle** |
| 1cm | 2Π |
| 2cm | 4Π |
| 3cm | 6Π |
| 4cm | 8Π |
| 5cm | 10Π |

Nous avons découpé ensuite les bandes de cartons puis scotché les extrémités de la bande en réalisant le cercle souhaité.

1.5cm

Valeur du périmètre du cercle souhaité

Nous avons fait le choix de prendre 1.5cm de largeur afin de pouvoir accrocher le capteur avec une pince crocodile sur le cercle. Nous avons aussi créé des cercles ayant pour rayon ceux cités ci-dessus moins 2mm (épaisseur du carton) afin de maintenir les cercles crées avec les bandes de carton.

Nous avons scotché le tout sur une plaque de carton avec du ruban adhésif double face et noté les valeurs des différents rayons de courbure créés.

PHOTO

A l’aide de ce banc de test, nous avons pu étudier notre capteur et vous fournir des caractéristiques. Nous avons relevé la tension lue par l’arduino puis l’avons converti en résistance avec la formule [Equation\_R](#Equation_R).

**Caractéristiques du capteur**

1. *Influence des dimensions du capteur sur la mesure de la résistance*

Dans un premier temps, nous avons étudié l’influence de différents paramètres sur la mesure de la résistance initiale Ro afin d’essayer de déterminer les dimensions idéales de notre capteur. Les paramètres que nous avons pris en compte sont les différentes dimensions du capteur : A,B,C,D,E. Nous avons donc réalisé un plan d’expérience avec un modèle linéaire en prenant la matrice d’Hadamard (valeur minimum du paramètre : -1 et valeur maximale : 1) afin de faire le tri dans les paramètres.

Modèle supposé :

Y = a0 + a1\*A+a2\*B+a3\*C+a4\*D+a5\*E

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Paramètres** | **Valeur réelle (cm)** | **Valeur codée/normalisée** |
| A | 0.6 | -1 |
| 1 | 1 |
| B | 0.5 | -1 |
| 1.5 | 1 |
| C | 0.3 | -1 |
| 1 | 1 |
| D | 1 | -1 |
| 5 | 1 |
| E | 0.2 | -1 |
| 0.6 | 1 |

Les huit capteurs dont les dimensions ont été générées par la matrice d’Hadamard ont été réalisés sur QCAM. Vous pouvez les imprimer à partir de ce [fichier](https://github.com/MOSH-Insa-Toulouse/2020-2021_GAICH_STEPHEN_Capteur_Graphite/blob/f9f0d00c8f7f34b9dfb31d0f6151c54aaecc923c/Modelisation%20capteur/Capteurs_plan_experience.pdf).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N# | ***Cste*** | | ***A*** | ***B*** | | ***C*** | | ***D*** | ***E*** | | ***Vadc = Y*** | ***(Ŷ)*** | | ***Err*** | | ***Err²*** | |
| 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 2.63 | 3.1 | | -0.475 | | 0.2 | |
| 2 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | | 1 | -1 | | 3.19 | 2.9 | | 0.265 | | 0.1 | |
| 3 | 1 | | 1 | -1 | | -1 | | 1 | 1 | | 4.40 | 3.9 | | 0.475 | | 0.2 | |
| 4 | 1 | | -1 | -1 | | 1 | | 1 | -1 | | 0.34 | 0.6 | | -0.265 | | 0.1 | |
| 5 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | | -1 | -1 | | 0.33 | -0.1 | | 0.475 | | 0.2 | |
| 6 | 1 | | -1 | 1 | | -1 | | -1 | 1 | | 2.06 | 2.3 | | -0.265 | | 0.1 | |
| 7 | 1 | | 1 | -1 | | -1 | | -1 | -1 | | 0.20 | 0.7 | | -0.475 | | 0.2 | |
| 8 | 1 | | -1 | -1 | | 1 | | -1 | 1 | | 0.27 | 0.0 | | 0.265 | | 0.1 | |
|  | ∑col | | 0.0 | 0.0 | | 0.0 | | 0.0 | 0.0 | |  | ∑erreurs= | | 000.0E+0 | | **1.18** | |
|  |  | |  |  | |  | |  |  | |  |  | |  | | **5.92E-01** | |
|  |  | |  |  | |  | |  |  | |  |  | |  | | **0.76922** | |
|  | | | | | | | | | | |  |  | |  | |  | |
| Analyse avec la fonction DROITEREG | | | | | | | | | |  | | |  | |  | |
|  | | **E** | | | **D** | | **C** | | | **B** | | | **A** | | **Cste** | |
| ai→ | | 0.6625 | | | 0.9625 | | -0.7850 | | | 0.3750 | | | 0.2125 | | 1.6775 | |
| σai→ | | 0.2720 | | | 0.2720 | | 0.2720 | | | 0.2720 | | | 0.2720 | | 0.2720 | |
| R²→ | | 0.9361 | | | 0.7692 | | #N/A | | | #N/A | | | #N/A | | #N/A | |
|  | | 5.8606 | | | 2.0000 | | #N/A | | | #N/A | | | #N/A | | #N/A | |
| SCE→ | | 17.3386 | | | 1.1834 | | #N/A | | | #N/A | | | #N/A | | #N/A | |

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces expériences.

1. *Influence du type de crayon utilisé*
2. *Influence du type de papier*

**Zones de détérioration du capteur**

**Conclusion sur l’utilisation du capteur**

1. Aussi appelé point de contact du capteur [↑](#footnote-ref-1)
2. Low-Tech : ? [↑](#footnote-ref-2)
3. Système granulaire : ? [↑](#footnote-ref-3)
4. Percolé : [↑](#footnote-ref-4)
5. Conductance intragrain go = avec δ l’espacement moyen des niveaux d’énergie et Eth l’énergie de Thouless [↑](#footnote-ref-5)
6. Conductance intergrain : [↑](#footnote-ref-6)
7. Feuillets ou réseau de nanoparticules [↑](#footnote-ref-7)
8. Voir explication dans la partie « mesure de la couche de graphite » [↑](#footnote-ref-8)
9. Détails dans la partie « Conditionneur » [↑](#footnote-ref-9)
10. ??? [↑](#footnote-ref-10)
11. Lorsque cette valeur est obtenue, il faut déposer plus de graphite sur le capteur car la résistance du capteur est trop importante et aucun courant ne peut alors circuler. [↑](#footnote-ref-11)