****



***Par:***

**Éléonore GAICH**

**Calvin STEPHEN**

**Datasheet du jauge de déformation**

**à base de feuillets de graphite**

**fournie avec son conditionneur**

**TABLE DES MATIERES**

[**Numéro de référence :** 1](#_Toc70608460)

[**Schéma du capteur** 1](#_Toc70608461)

[**Matériel nécessaire pour la création du capteur** 1](#_Toc70608462)

[**Caractéristiques générales du capteur** 1](#_Toc70608463)

[**Remarques** 1](#_Toc70608464)

[**Description du fonctionnement du capteur** 2](#_Toc70608465)

[**Configuration des points de contact** 3](#_Toc70608466)

[**Spécifications du capteur** 3](#_Toc70608467)

[**Conditions d’utilisation standard** 3](#_Toc70608468)

[**Conditionneur de notre capteur passif** 4](#_Toc70608469)

[**Caractéristiques électroniques** 6](#_Toc70608470)

[**Banc de test utilisé pour réaliser les caractéristiques du capteur** 6](#_Toc70608471)

[**Caractéristiques du capteur** 7](#_Toc70608472)

[***1.*** *Influence des dimensions du capteur sur la mesure de la résistance* 7](#_Toc70608473)

[***2.*** *Zone de détérioration du capteur* 9](#_Toc70608474)

[***3.*** *Influence du type de crayon utilisé* 9](#_Toc70608475)

[***4.*** *Influence du type de papier* 9](#_Toc70608476)

[**Conclusion sur l’utilisation du capteur** 9](#_Toc70608477)

[**Suggestions/Remarques** 9](#_Toc70608478)

[***1.*** *Pourquoi obtient-on Vadc = 0 ?* 9](#_Toc70608479)

[***2.*** *Mesure de l’épaisseur de la couche de graphite déposée* 10](#_Toc70608480)

|  |
| --- |
| **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

# **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 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 de nanoparticule de graphite.

La conductance totale du capteur est la somme de la conductance intragrain[[3]](#footnote-3) et de la conductance tunnel ou intergrain[[4]](#footnote-4). 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 influera une variation positive ou négative de la résistance relative de ce dernier. Nous pourrons donc mesurer cette variation résistive afin de déterminer la déformation subie par le capteur (rôle d’un extensomètre). Cependant, elle est très petite et le capteur est passif. Un conditionneur de signal, dans notre cas un amplificateur de transimpédance, est nécessaire.

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

# **Configuration des points de contact**

Point de contact n°2

Point de contact n°1

*Figure n°2 : Empreinte du capteur*

|  |  |
| --- | --- |
| **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[[5]](#footnote-5) de graphite (carbone)  Ion argileux (C,Mg,Al,Si)  Fibres cellulosiques végétales (papier) |
| **Quantité des matériaux sur le capteur** | Non évaluable[[6]](#footnote-6) |
| **Type de capteur** | Passif, nécessitant donc un conditionneur[[7]](#footnote-7) |
| **Type de graphite utilisable** | 3H, 2H, H, HB, B, 2B, 3B |
| **Nature de la mesure** | Mesure résistive |
| **Dimensions** | Variables en fonction des expériences[[8]](#footnote-8) |
| **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 |

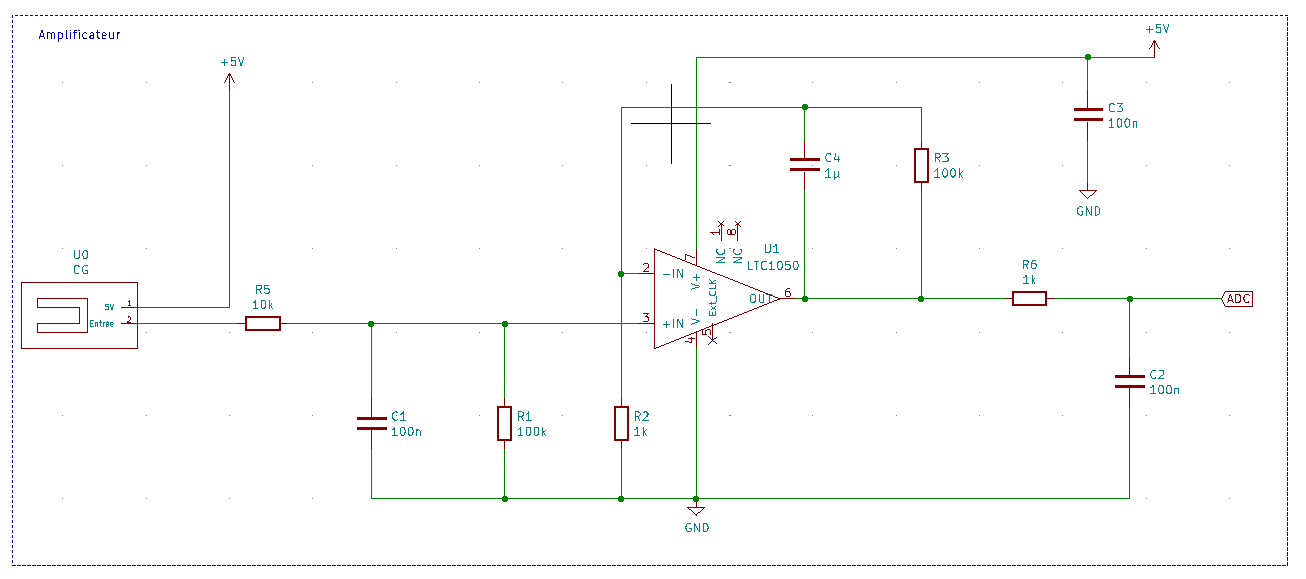
# **Conditions d’utilisation standard**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **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°3 : Schéma du circuit analogique utilisé comme conditionneur de notre capteur*

Il s’agit d’un amplificateur transimpédance deux étages. Le courant traversant notre capteur passe à travers R5, résistance en entrée du montage protégeant l’amplificateur opérationnel contre les décharges électrostatiques. De nombreux filtres sont présents afin de limiter les bruits :

* Filtre R5-C1 pour les bruits en tension.
* Filtre C1-R1 pour le bruit en courant causant de la distorsion dans les étages d’entrée.
* Filtre actif C4-R3 permettant d’atteindre un maximum d’efficacité de l’amplificateur opérationnel.
* Filtre passif en fin de chaine R6-C2
* Capacité C3 filtrant le bruit d’alimentation.

La résistance R2 est modifiable et permet une adaptation du calibre de l’amplificateur (montage non inverseur). L’amplificateur LTC1050 est utilisé dans ce montage.

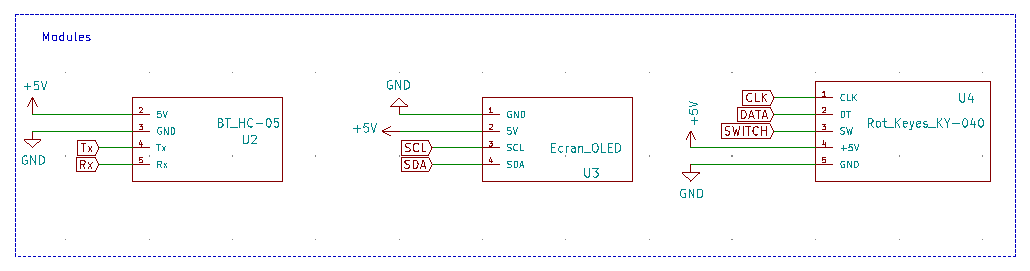
Enfin, la tension de sortie du montage Vadc est récupérée par une carte Arduino UNO sur une broche analogique.

A basse fréquence, la résistance du capteur est égale à

**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

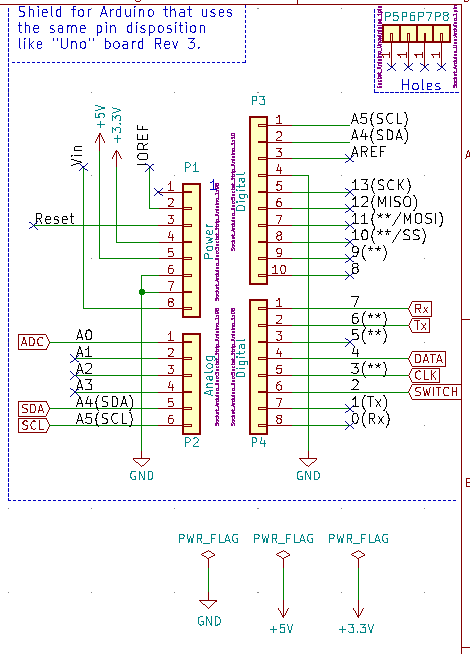
* **Modules additionnels au conditionneur**

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° 4 : 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° 5 : 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)

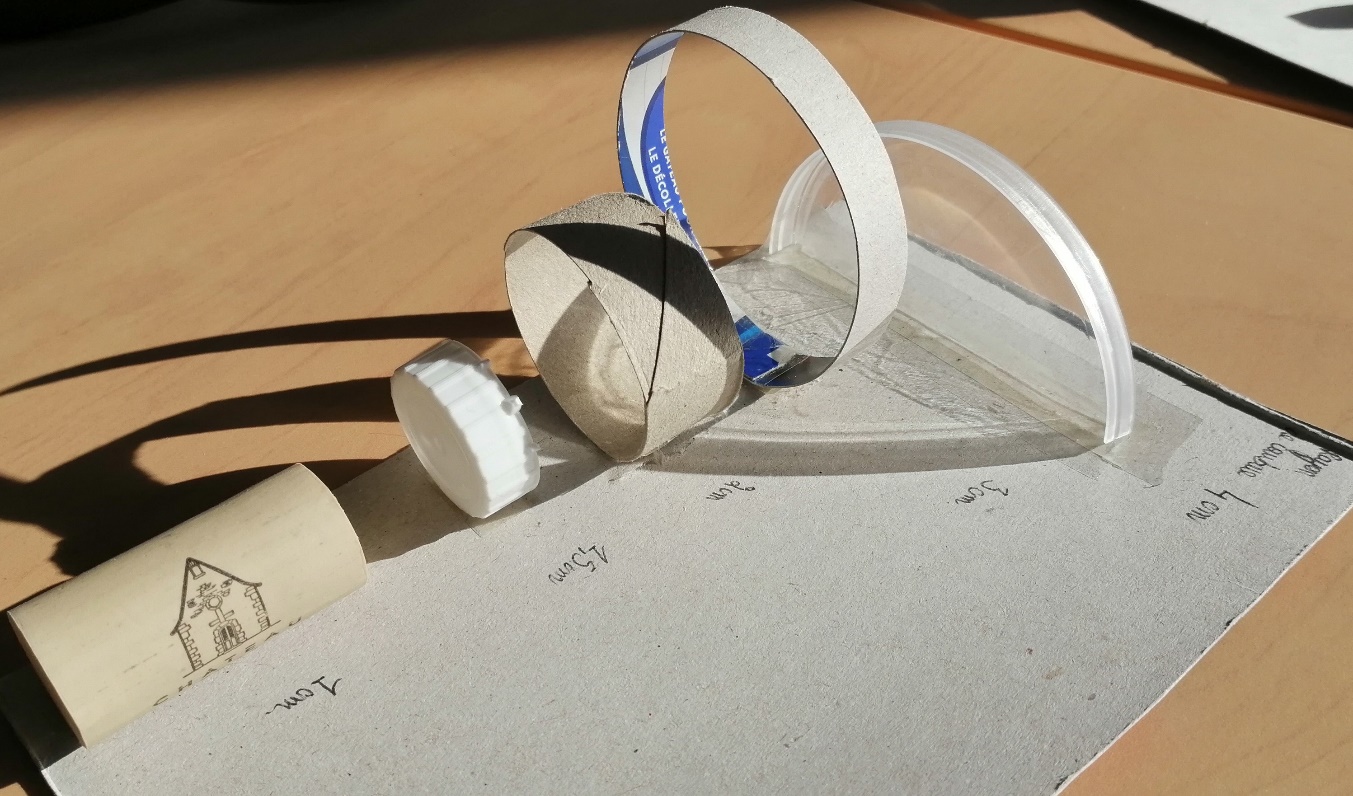
# **Caractéristiques électroniques**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Unités** | **Valeurs** | | |
| **Min** | **Typique** | **Max** |
| **Tension Vadc mesurée** | V | 0.01[[9]](#footnote-9) | / | 5.00 |
| **Résistance du capteur** | MΩ | 9.99 | / | 5 050 |

# **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.



*Figure n°6 : Banc de test « low-tech » n°1\_ récupération de déchets divers*

*Une image contenant texte

Description générée automatiquement*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

*Figure n° 7 : Banc de test « low-tech » n°2 \_ carton*

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.

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**

## *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 nos expériences. Un biais de mesure, soit des paramètres expérimentaux que nous ne maitrisons pas, est observable (grande variabilité des résultats Vadc). Nous pouvons supposer que le nombre de feuillets de graphite déposé et la manière de colorier influencent fortement la mesure de la résistance initiale de notre capteur. Nous avons pu remarquer cette influence sur les mesures des autres sections.

De plus, très souvent, nous avons obtenu des valeurs nulles de Vadc (pas visible sur les résultats que nous avons mis sur la datasheet mais consultez ce [document](https://github.com/MOSH-Insa-Toulouse/2020-2021_GAICH_STEPHEN_Capteur_Graphite/blob/bd30b66165ddde75881d0ac7740d650ffe0249c1/Banc%20de%20test/Plan%20d'exp%C3%A9rience_meilleures_dimensions.xlsx) pour plus d’informations). Nous avons supposé qu’il fallait déposer plus de feuillets de graphite pour diminuer la résistance de notre capteur car nous avons émis l’hypothèse que les pinces crocodiles avaient une impédance négligeable par rapport à celle du capteur et que la prise de contact était bonne. Des améliorations pourraient être apportées : voir sections suggestions/améliorations.

Au travers de ces expériences, nous avons donc pu montrer que le procédé de fabrication de notre capteur avait un impact conséquent sur la résistance initiale. Cela s’explique par le dépôt de feuillets de graphite qui n’est pas identique entre deux coloriages. Il fait donc varier les propriétés de conductivité que nous avons détaillées précédemment dans la section « description du capteur ». De plus, le point de contact a aussi une influence sur la résistance totale du capteur. Nous ne savons pas encore comment assurer la répétabilité de nos capteurs. Les conditions de coloriage (force, sens) et les prises de contact (où ? comment ?) devraient être les mêmes. Nous avons quelques suggestions pour améliorer ce point-là : voir sections « suggestions/remarques ».

Avec l’outil DROITEREG du classeur Excel, nous avons pu analyser les résultats obtenus afin de déterminer quels étaient les dimensions du capteur qui avaient un impact sur la résistance initiale. Il semblerait que les paramètres C, D et E soient plus importants que les autres et liés à la longueur du capteur (D) ainsi que sa section (C, E, nombre de feuillets déposés). Cela vérifie la définition de la résistance d’un conducteur (loi de Pouillet : R, L : longueur et S : section du conducteur). Nous n’avons pas pu mesurer l’épaisseur de la couche de graphite déposé. Cependant, plusieurs idées d’expériences sont développées dans la partie Suggestions/remarques.

En conclusion, avec ce plan d’expérience, nous avons pu identifier la réalité expérimentale (variables aléatoires de mesure) et tenter d’expliquer puis de maitriser au mieux les paramètres ayant un impact sur la résistance de notre capteur. Nous n’assurons pas que tous les paramètres influents furent identifiés. Elles ont aussi permis de vérifier que la résistance de notre capteur suivait la loi de Pouillet et donc la loi d’Ohm.

## *Zone de détérioration du capteur*

La zone de détérioration définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur. Lors des tests que nous avons effectués, après chaque rayon de courbure, nous avons noté la valeur de la tension du capteur au repos (non déformé).

Nous avons remarqué que lorsque le capteur est soumis à une tension, la valeur de la résistance du capteur ne revient plus à sa valeur initiale quand le capteur est plat à partir du rayon de 3cm. Nous avons également pu observer que cette valeur n’est pas la même lorsque le capteur est soumis à une compression. En compression, la zone de la détérioration commence à partir du rayon de 2cm en moyenne.

D’après les tests que nous avons pu effectuer, nous pouvons donc conclure que la zone de détérioration de ce capteur se situe entre les rayons de 2cm et 3cm ou de manière équivalente entre une déformation de 3.13E-03 et 4.70E-03.

## 

## *Influence du type de crayon utilisé*

Le type de crayon utilisé pour colorier le capteur influence la réponse de ce dernier. La composition des mines de crayon varie selon le type de crayon. Ces mines sont composées de la poudre de graphite et d'un liant. Le liant peut être un polymère organique on parle alors de mine polymère ou d'argile. L’analyse par spectrométrie à dispersion en énergie montre que la teneur en carbone du crayon est inversement proportionnelle à la dureté de la mine de crayon. Ainsi, la mine de crayon le plus dure (9H) a la teneur en carbone la plus basse alors que la mine de crayon le plus tendre a la teneur en carbone la plus élevé (9B). En conséquence, la trace du crayon 9B apparait plus foncé que la trace du crayon 9H. La résistance du crayon diminue donc de 9H à 9B.



Teneur en carbone le plus élevé

Teneur en carbone le moins élevé

Tendre

Dure

Nous avons utilisé les crayons 3H, 2H, H, HB, B, 2B, et 3B successivement pour colorier notre capteur et avons effectué les tests de déformation sur ces capteurs pour enregistrer leur réponse pour les différents rayons de courbure de notre banc de test. Nous avons reporté ces informations dans les graphs ci-dessous.

D’après les graphs, nous pouvons observer que le crayon 3H donne le capteur le plus sensible. En effet la variation relative de la résistance ΔR/Ro est la plus grande pour le capteur colorié avec le crayon 3H. Cependant, en effectuant plusieurs mesures sur ce crayon, nous observons une large variabilité de la réponse. Ceci est probablement dû au fait que le conditionneur n’est pas adapté à mesurer une résistance aussi faible.

Pour les crayons 2H, H, HB, B, 2B et 3B, nous observons un comportement linéaire du capteur. La sensibilité se définit comme le rapport entre sa valeur de sortie et sa valeur d'entrée. Pour le capteur en tension et en compression, nous observons que la sensibilité du capteur augmente avec la dureté du crayon utilisé. En l’occurrence, le capteur colorié avec le crayon 3H est le plus sensible et le capteur colorié avec le crayon 3B est le moins sensible.

## *Influence du type de papier*

*Hypothèse*

Nous avons émis l’hypothèse que le type du papier a une influence sur la réponse du capteur. Nous avons donc effectué des test en utilisant différent types de papiers. Nous avons utilisé :

* Papier normal (70 gsm)
* Papier canson (300 gsm)
* Papier fournie (188 gsm)

*Observations et explications*

Nous avons observé que pour le papier normal (70gsm), en maintenant tous les autre paramètres constant la valeur de la résistance est trop basse pour être mesuré par notre conditionneur. La valeur de la tension Vadc est donc en saturation. Ceci implique qu’il existe une corrélation entre l’épaisseur du papier utilisé et la réponse du capteur.

Pour expliquer cette observation, nous pourrons nous baser sur la structure du papier. Le papier est un matériau constitué principalement de fibres de cellulose (feuillus, résineux). Le papier plus épais présente donc plus de fibre de cellulose que le papier moins épais. Ces fibres de cellulose pourraient être un frein sur la propagation du courant dans les feuillets de graphite. En effet, ces fibres de de cellulose pourraient être considéré comme une impureté dans les feuillets de graphite. Ainsi, le papier moins épais, présentant moins d’impuretés diminue la résistance effective des feuillets de graphite déposé sur le capteur. Cette explication est spéculative. Pour confirmer cette explication, une étude exhaustive doit être mené sur la microstructure du papier. Le papier doit être observé sous un MEB ou MET pour mieux visualiser sa microstructure.

En nous basant sur cette proposition d’explication, nous pouvons également expliquer l’existence de la zone de détérioration. Pour des valeurs de déformation elevé (3.13E-03 et 4.70E-03), les fibres de cellulose du papier se rompent causant ainsi une modification permanente de la microstructure du papier. La valeur de la résistance ne revient donc plus à sa valeur initiale.

Pour pallier ce problème, nous avons essayé de renforce le papier en enveloppant le capteur avec du ruban d’adhésif sans couvrir les pads du capteur pour la prise du contact des pinces crocodile. Le ruban adhésif est composé d’un film support transparent ou coloré et d’une colle qui permet l’adhérence de celui-ci sur tous types de surfaces. Le film support est soit en PVC soit en polypropylène (PP). Plus le film support est épais, plus il résistera facilement à la déchirure et au cisaillement. Cela est notamment pratique lors de la pose d’un ruban adhésif sur les angles d’une caisse carton. Il existe trois types de colles différents permettant une adhérence plus ou moins forte du ruban adhésif sur une surface : la colle solvant, la colle acrylique et la colle Hot Melt. La colle solvant est à base de caoutchouc naturelle dissous dans un solvant. Son pouvoir d’adhésion est instantané y compris sur les matières plastiques. Elle résiste au froid et est recommandée pour les longs stockages. La colle acrylique résiste parfaitement aux UV mais pas au froid. La colle Hot Melt est fabriquée à base d’eau. Elle résiste aux grandes fluctuations de températures et à l’humidité. Grâce à une légère pression lors de la pose, vous pouvez améliorer l’adhérence de ce ruban adhésif.

En effectuant plusieurs tests sur le capteur, nous avons observé que la tendance d'augmentation de la résistance lorsque nous diminuons le rayon de courbure est bien visible. Cependant, nous pouvons observer une augmentation initiale de la résistance entre la présence de scotch ou pas sur le même capteur. Nous n’avons pas observé une amélioration de la zone de détérioration et dans certains cas nous observons une dégradation de la zone de détérioration.

Une explication possible se base sur la structure du ruban adhésif détaillé précédemment. La colle du ruban adhésif introduit des particules étrangers et agglomérés dans les feuillets de graphite déposé sur le capteur. La couche de colle du ruban adhésif modifie donc localement la microstructure des feuillets de graphite. Ceci empêche la propagation du courant dans le capteur. Ceci peut également expliquer l’augmentation de la résistance du capteur au repos après avoir englobé le capteur avec le ruban adhésif.

# **Conclusion sur l’utilisation du capteur**

Nous pouvons donc conclure que ce capteur est utilisable pour les déformations inférieures à 3.13E-03 en compression et en tension. Le capteur reste linéaire et précis dans ce domaine. Au-delà de ce domaine, ce capteur entre dans une zone de détérioration où la valeur initiale de la résistance de revient pas à la valeur initiale. Ce capteur est donc optimisé pour des faibles déformations.

# **Suggestions/Remarques**

## *Pourquoi obtient-on Vadc = 0 ?*

Lors de nos expériences, nous avons supposé que le nombre de feuillets de graphite déposé n’était pas assez important. La résistance était alors trop importante. Cependant, lors de plusieurs essais, en déposant « une couche » de coloriage de plus, la mesure passait de 0V à 5V (overload). Il semble donc qu’un autre paramètre puisse entrer en jeu : la prise de contact ou la sensibilité de la mesure. Deux expériences pourraient donc être réalisés. La première serait de trouver des électrodes permettant de prendre le contact sur le capteur de manière plus précise. La deuxième serait d’étalonner la sensibilité de la mesure en utilisant des résistances étalons en vérifiant la précision.

## *Mesure de l’épaisseur de la couche de graphite déposée*

Notre capteur dépend énormément de la couche de graphite déposé. Il faudrait donc pouvoir contrôler ce paramètre ou le mesurer pour le prendre en compte. La première expérience consisterait à utiliser un profilomètre comme celui de l’AIME afin de mesurer la marche entre le papier et le dépôt de graphite sur le papier. Malheureusement, cette méthode est destructive et nous ne pourrons donc pas utiliser le capteur pour faire des mesures. En revanche, cela pourrait servir si nous avions la possibilité d’utiliser un system de dépôt de couche de graphite pour colorier le capteur afin d’avoir une épaisseur identique et uniforme.

Nous pourrions aussi utiliser l’ellipsométrie, « méthode de caractérisation optique, basée sur l’analyse de l’état de polarisation (souvent elliptique) d’une lumière initialement polarisée après sa réflexion sur une surface ». Nous avons ici trois interfaces : air/graphite, graphite/papier et papier/air.

Enfin, une autre méthode détaillée sur ce [site](http://wiki.scienceamusante.net/index.php/Estimer_l%27%C3%A9paisseur_d%27un_trait_de_crayon_%C3%A0_papier) et utilisant une balance de précision pourrait être essayée.

1. Renforcement du papier

Le renforcement du papier est nécessaire pour améliorer éventuellement la zone de détérioration ainsi élargissant la zone de fonctionnement nominal de ce capteur. Un des tests qui pourrait être fait est de mettre de ruban adhésif uniquement sur la face arrière du capteur (face non coloriée). Ceci évitera l’introduction des particules étrangers dans les feuillets de graphite du capteur. Une autre suggestion est d’englober en premier le capteur par un matériau inerte qui n’interfèrent pas avec la propagation du courant dans les feuillets de graphite et d’englober le capteur et le matériau inerte avec du ruban d’adhésif.

Nous pourrions également utiliser un papier plus épais. Cependant, une étude complète doit être menée pour confirmer le bon fonctionnement du capteur avec les différents types de crayons.

**ATTENTION :** **Aucune de ces méthodes n’a pu être essayée. Nous ne pouvons donc pas vous assurer la faisabilité, ni les résultats obtenus. Ce ne sont que des suggestions possibles. Si jamais vous les réalisez, nous serions curieux de connaître les résultats. Vous pouvez 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)**.**

1. Aussi appelé point de contact du capteur [↑](#footnote-ref-1)
2. Low-Tech : définition [ici](https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech) [↑](#footnote-ref-2)
3. Conductance intragrain go = avec δ l’espacement moyen des niveaux d’énergie et Eth l’énergie de Thouless [↑](#footnote-ref-3)
4. Conductance intergrain : [↑](#footnote-ref-4)
5. Feuillets ou réseau de nanoparticules [↑](#footnote-ref-5)
6. Explications : Suggestions/remarques [↑](#footnote-ref-6)
7. Détails dans la partie « Conditionneur » [↑](#footnote-ref-7)
8. Suivant les paramètres étudiés \_ dimensions spécifiées dans chaque partie de la caractérisation de notre capteur. Le modèle utilise le plus souvent avait pour dimension en cm : A = 0.45 ; B = 1.05 ; C = 0.3 ; D = 2.35 ; E = 0.2 [↑](#footnote-ref-8)
9. Lorsque Vaadc = 0.00V, 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-9)