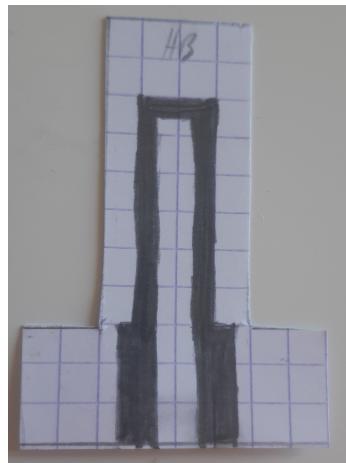

Jauge de déformation "low-tech" en papier et graphite



Victor Grau

2020-2021

Caractéristiques principales

- Piezo-résistif
- Mesure d'extensométrie
- Transportable
- Respectueux de l'environnement
- Très peu cher (de l'ordre du centime d'euro)
- Low-tech
- Temps de fabrication très court (10 min)

Description générale

Ce capteur de déformation repose sur les principes de la physique des systèmes granulaires. La composition extrêmement simple de ce capteur, un dépôt de couches de graphite sur un support en papier, permet d'exploiter le comportement des réseaux de percolation des nano-particules de graphite lorsque ceux-ci sont contraints.

En effet, la résistance de la couche de graphite réside principalement en la résistance inter-grain, directement liée au réseau percolé. Toute modification de ce réseau entraîne une variation de résistance. Le phénomène exploité par ce capteur est la variation linéaire de cette résistance en fonction de la déformation du capteur soumis à une certaine contrainte.

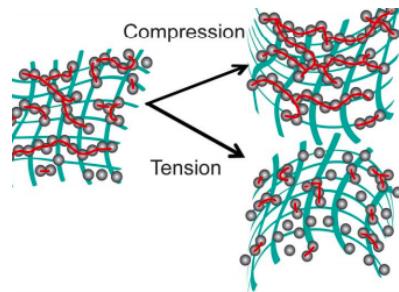


FIGURE 1 – Modification du réseau percolé des particules de graphites sous l'effet d'une déformation

La résistance de la couche de graphite pouvant être élevée, ce document sera accompagné d'une description détaillée d'un circuit d'amplification transimpédance, développé afin de pouvoir utiliser le capteur dans des conditions optimales.

Dimensions

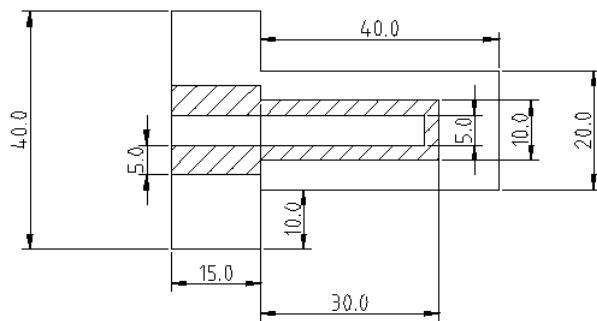


FIGURE 2 – Jauge de type 2, la partie hachurée est la couche de graphite. Les cotations sont en millimètre.

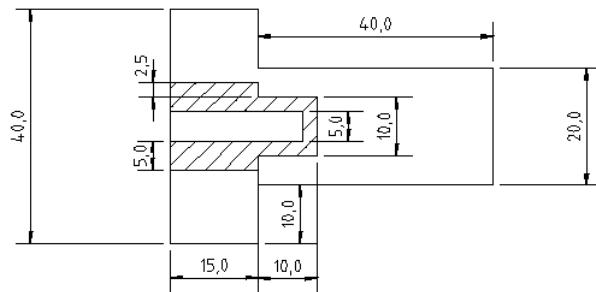
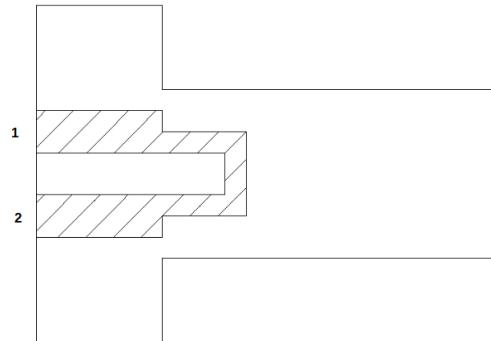


FIGURE 3 – Jauge de type 2, la partie hachurée est la couche de graphite. Les cotations sont en millimètre.

Points de contact

Point de contact	
1	Alimentation 5V V_{cc}
2	Entrée du circuit analogique V_{in}



Spécifications générales

Type	Jauge de déformation
Principe	Piézo-résistif, effet tunnel, physique granulaire
Matériaux	Graphite (4H pour le moins gras), fibres cellulosiques végétales
Type de capteur	Passif
Mesurande	Résistance
Fixation	scotch ou colle (attention à l'humidité)
Applications	Mesures d'extensométrie, balance, capteur de force

Spécifications techniques

	Unité	Min	Typ	Max
Range	Ω	$3 * 10^5$	$1 * 10^6$	$50 * 10^6$
Alimentation	V	-	5	-
Temps de réponse	s	-	< 1	-
Temps de stabilisation	s	2	5	50
Poids	g	-	< 1	-
Sensibilité	-	5 ± 2	15 ± 2	70 ± 5

Conditions d'utilisation

	Unité	Typ
Température	°C	22±2
Humidité	%	60±5
Pression atmosphérique	hPa	1

Conditionneur (Amplificateur transimpédance)

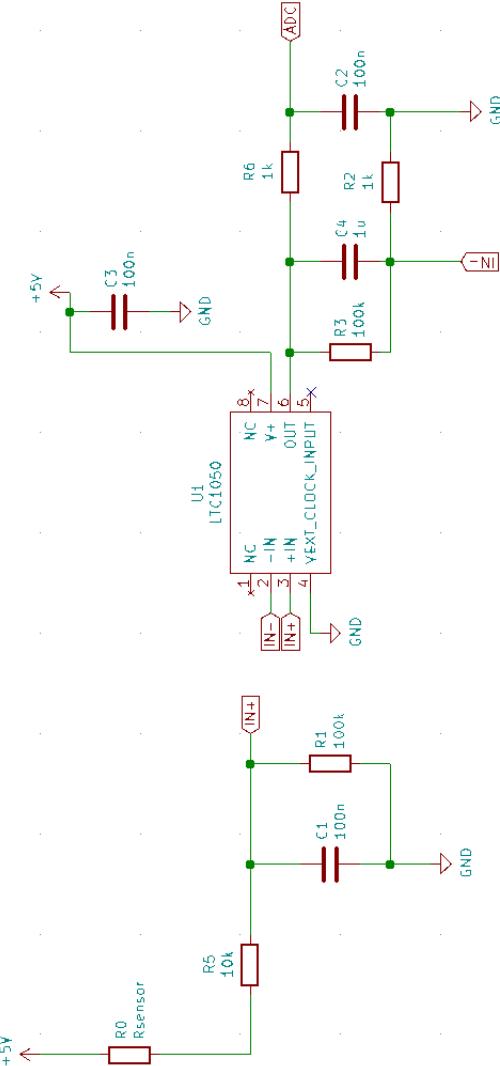


FIGURE 4 – Schéma électrique du conditionneur

$$R_{sensor} = (1 + (R_3/R_{cal})) * R_1 * V_{cc}/V - R_1 - R_5 \quad (1)$$

Avec $R_{cal} = R_2$, $V_{cc} = 5V$ et $V = V_{ADC}$, la valeur de la tension à la sortie du circuit.

Influence de la résistance R2

La résistance R_2 est la résistance de calibration du gain de l'amplificateur. Elle va ainsi définir la plage de mesure de la résistance du capteur. En se plaçant dans le cas d'une utilisation avec une carte Arduino Uno, on une résolution en tension de 0,005V. En prenant $V_{max} = 5V$ et $V_{min} = 0,005V$ on peut calculer les plages de résistances mesurables en fonction de la résistance de calibration.

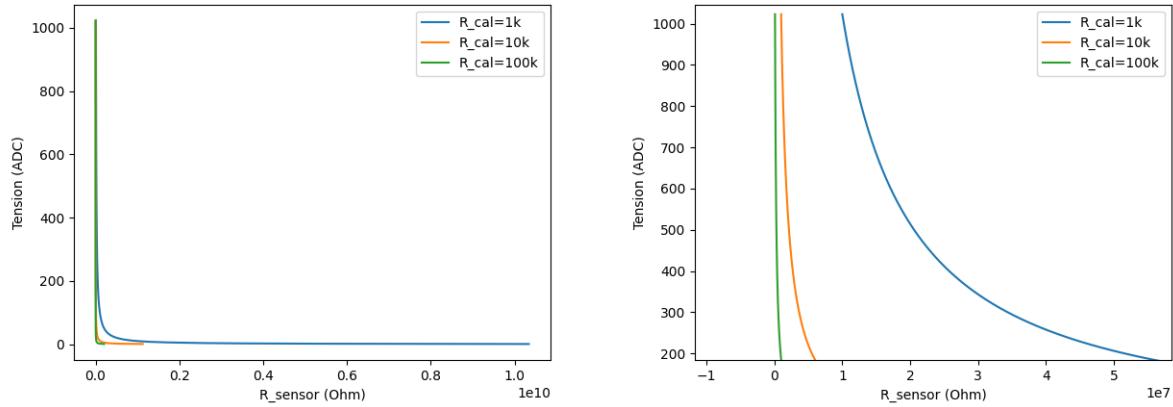


FIGURE 5 – Variation de la tension à la sortie de l'amplificateur (codée sur 10bits) en fonction de la résistance du capteur et pour différentes valeurs de R2.

R_2 Ohm	R_{lin} Ohm	R_{max} Ohm
1K	50M	9,99M
10K	5,4M	990K
100K	90K	890K
1M	0	440K
10M	0	395K

Il est important d'avoir conscience de la variation de la tension à la sortie du circuit du conditionneur en fonction de la résistance que l'on souhaite mesurer. En effet on se rend compte avec la figure 5 que pour les valeurs de résistance les plus faibles, de petites variations de résistances entraînent de grandes variations de tensions et une mesure optimale. C'est d'autant plus vrai que la résistance de calibration est importante. Il est donc nécessaire d'ajuster la résistance de calibration afin de travailler dans la zone de fonctionnement voulue.

Modules additionnels

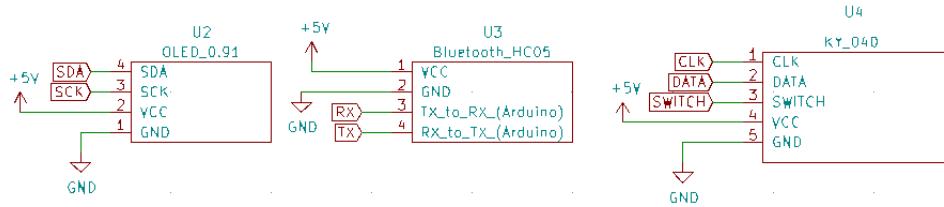


FIGURE 6 – Schéma électrique des modules additionnel. De gauche à droite, écran OLED, module Bluetooth HC05, encodeur rotatoire KY40.

Un shiled pouvant s'enficher sur une carte Arduino Uno et constitué du circuit de conditionnement, ainsi que des modules complémentaires (figure 6 a été développé. La tension de sortie est comprise en 0 et 5V et est convertie par la carte Arduino sur 10 bits.

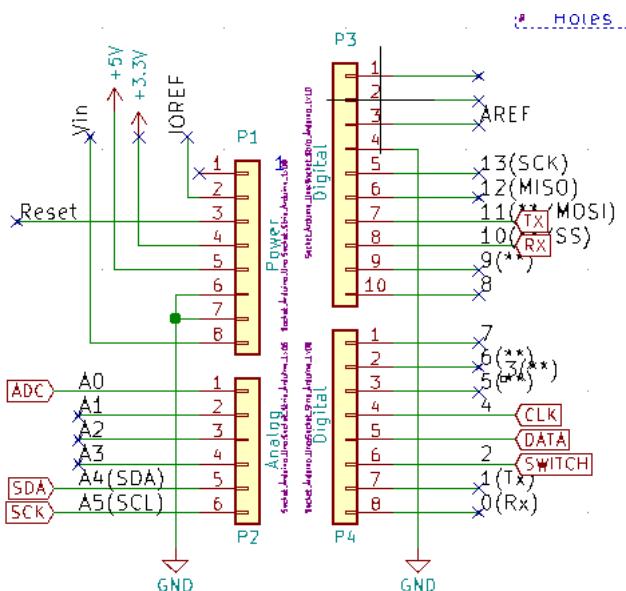


FIGURE 7 – Branchement du shield sur la carte Arduino

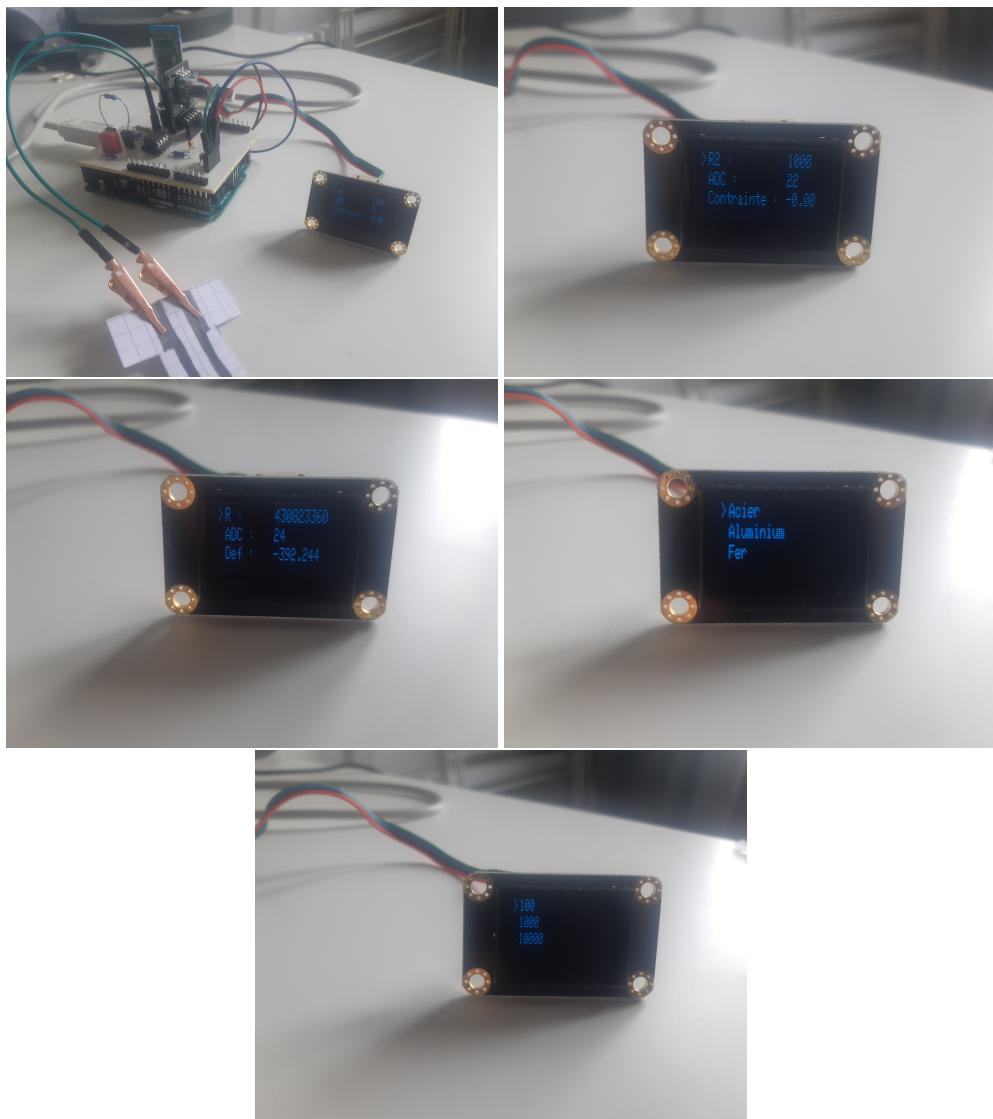


FIGURE 8 – De haut en bas et de gauche à droite : shield enfiché sur une carte Arduino - écran Oled avec menu principal contenant 3 sous menus, 1) choix de R2 2) choix de la mesure à afficher 3) choix du matériaux afin de calculer la contrainte correspondant à la déformation - Menu "mesure" comprenant 1) La mesure de la résistance en ohm du capteur 2) La mesure de la tension ADC à la sortie du conditionneur 3) La mesure de la déformation longitudinale relative en % - Menu permettant de choisir la résistance de calibration, les valeurs sont en ohm.

La navigation à travers les différents menus s'effectue avec l'encodeur rotatoire.

Étalonnage du capteur

Les propriétés physiques du capteur sont très sensibles à l'environnement extérieur, et se retrouvent facilement modifiées. Il est donc conseillé d'effectuer un étalonnage régulier du capteur, juste avant et pendant son utilisation.

L'étalonnage consiste à trouver le facteur de jauge k tel que,

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta l}{l}$$

Il existe plusieurs moyen de déterminer ce facteur, comme par exemple en utilisant la théorie des poutres.

En appliquant une force à l'extrémité du capteur tout en fixant l'autre, et en restant dans un contexte de petites déformations, il est facile de remonter à la déformation en assimilant le capteur à une poutre. Il est conseillé de ne pas dépasser une déflection de 2cm sous peine de déformer le capteur de manière irréversible. En effet, la force appliquée à l'extrémité du capteur entraîne une déflection (δ) :

$$\delta = \frac{F * l^3}{3 * E * I} \quad (2)$$

Avec, F la force appliquée (N), l la longueur du capteur (m), E le module de Young du support (Pa) , et I le moment quadratique du capteur (m^4) selon l'axe perpendiculaire à la normale du capteur.

$$I = \frac{L * e^3}{12} \quad (3)$$

Avec L la largeur du capteur (m), et e l'épaisseur (m).

En combinant 2 et 3 on obtient,

$$\delta = \frac{4 * F * L^3}{E * L * e^3}$$

Puis en utilisant la loi de Hook,

$$\sigma = \epsilon * E$$

et la contrainte uniaxiale dirigée dans le sens de la longueur sous une force F appliquée à l'extrémité du capteur,

$$\sigma = \frac{l * F * 6}{L * e^2}$$

on établit :

$$\epsilon = \frac{3 * e}{2 * l^2} * \delta$$

La déformation mentionnée ici est la déformation longitudinale à la base du capteur, il est possible de calculer la déformation en tout autre point x en modifiant légèrement le calcule de la contrainte.

Les points ont été obtenus à l'aide de l'application Android développé afin de faciliter l'étalonnage et l'utilisation du capteur. Ainsi, chaque point correspond à la moyenne faite sur une acquisition de 5s à une fréquence d'acquisition de 5Hz. Les barres d'erreur correspondent à l'écart type de chaque acquisition.

Il est important de noter que la sensibilité de ne dépend pas seulement du type de graphite et du type de papier. Nous avons pu constater durant les nombreux tests que d'autres paramètres rentraient en jeu, comme la forme du motif de graphite, les dimensions de la jauge, l'homogénéité de la couche de graphite ou encore la quantité de graphite déposé. La quantité de graphite semble jouer un rôle important sur la résistance nominale du capteur. Nous avons donc effectuer plusieurs mesures afin d'évaluer l'impact de R_0 sur la sensibilité du capteur. Pour ce faire nous avons essayé de laisser constante et la plus petite et homogène possible la résistance des points de contact du capteur afin de limiter leur influence sur la mesure.

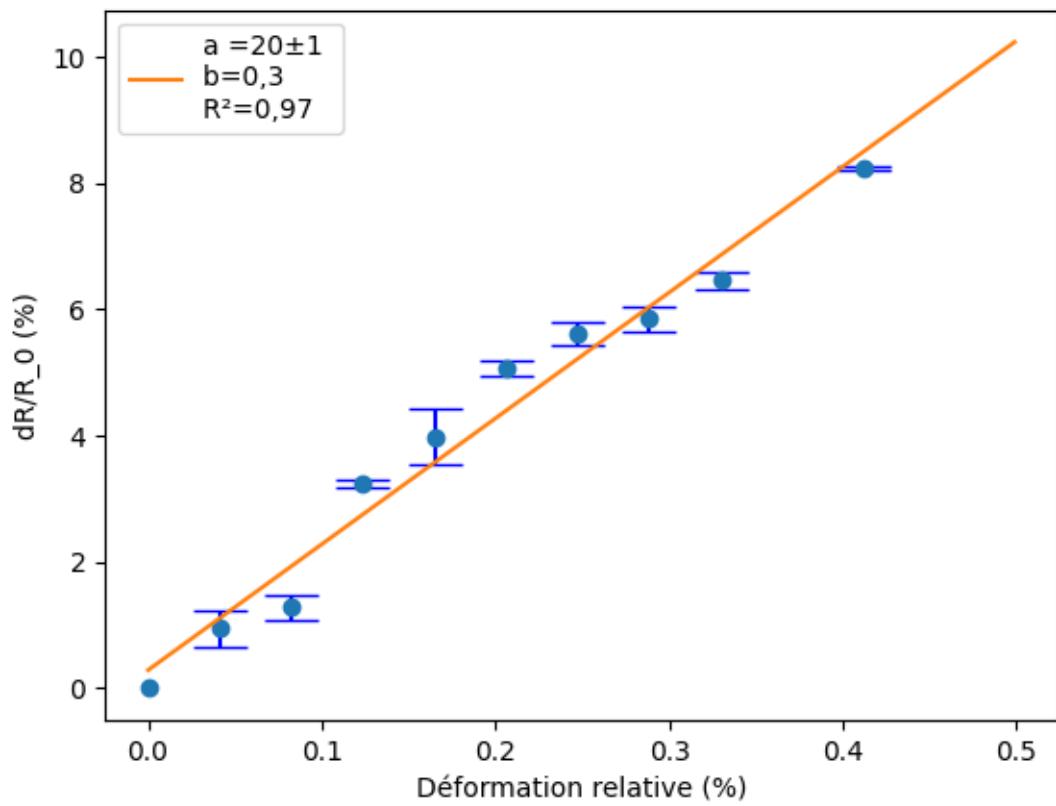
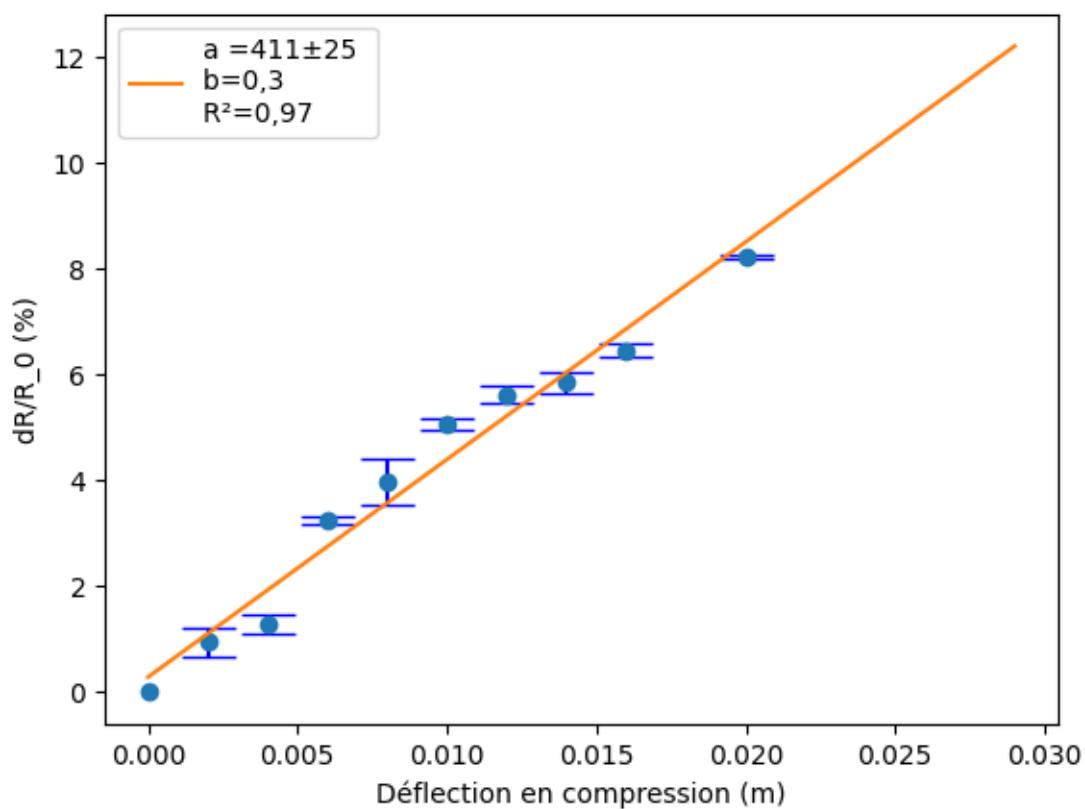


FIGURE 9 – Exemple de courbes d'étalonnages. Capteur de type 1, graphite HB et papier Bristol 205g.

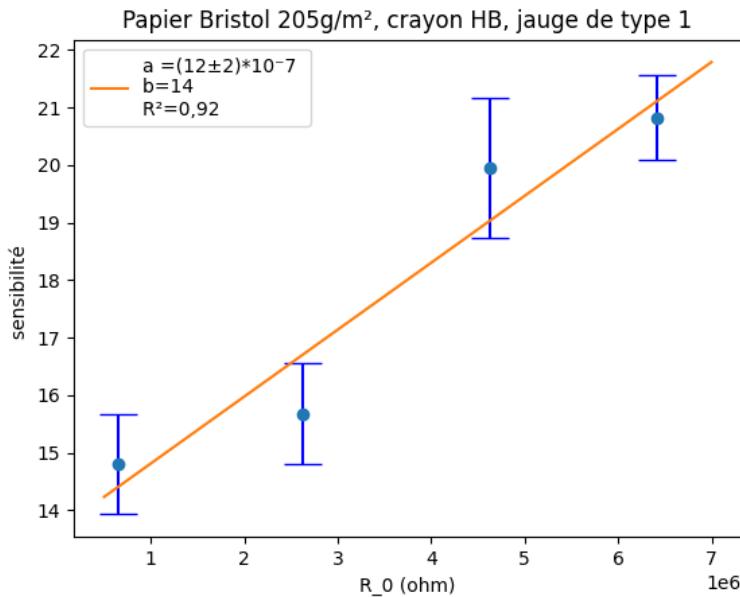


FIGURE 10 – Variation de la sensibilité du capteur en fonction de sa résistance au repos.

Nous avons ainsi une relation affine entre la sensibilité et la résistance nominale. Cette relation peut être utilisée pour étalonner le capteur rapidement, notamment avec un capteur ayant la particularité d'avoir une résistance nominale qui fluctuent très facilement et souvent. Cependant il est conseillé de faire l'étalonnage sois-même, et il semble nécessaire de compléter les mesures entamées afin de confirmer et préciser cette relation.

Influence des types de graphites

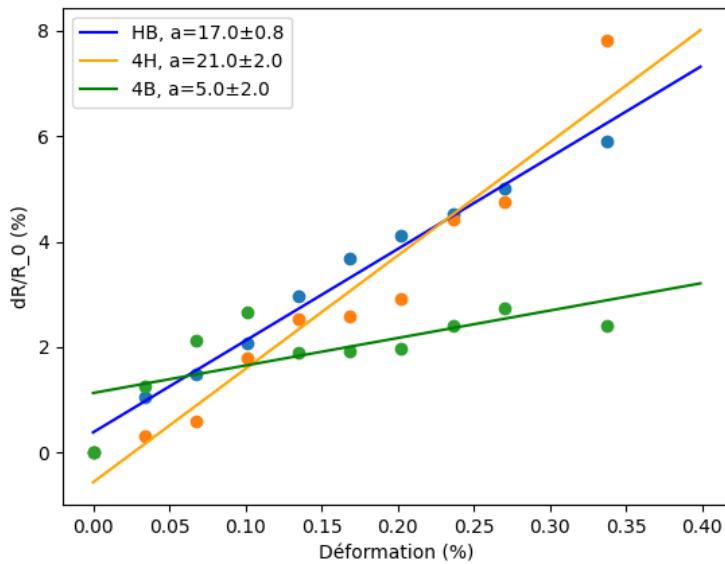


FIGURE 11 – Comportement des jauge (type1) en fonction du type de graphite, papier Canson 180g/m². (Les barres d'erreur n'apparaissent pas pour des raisons de visibilité).

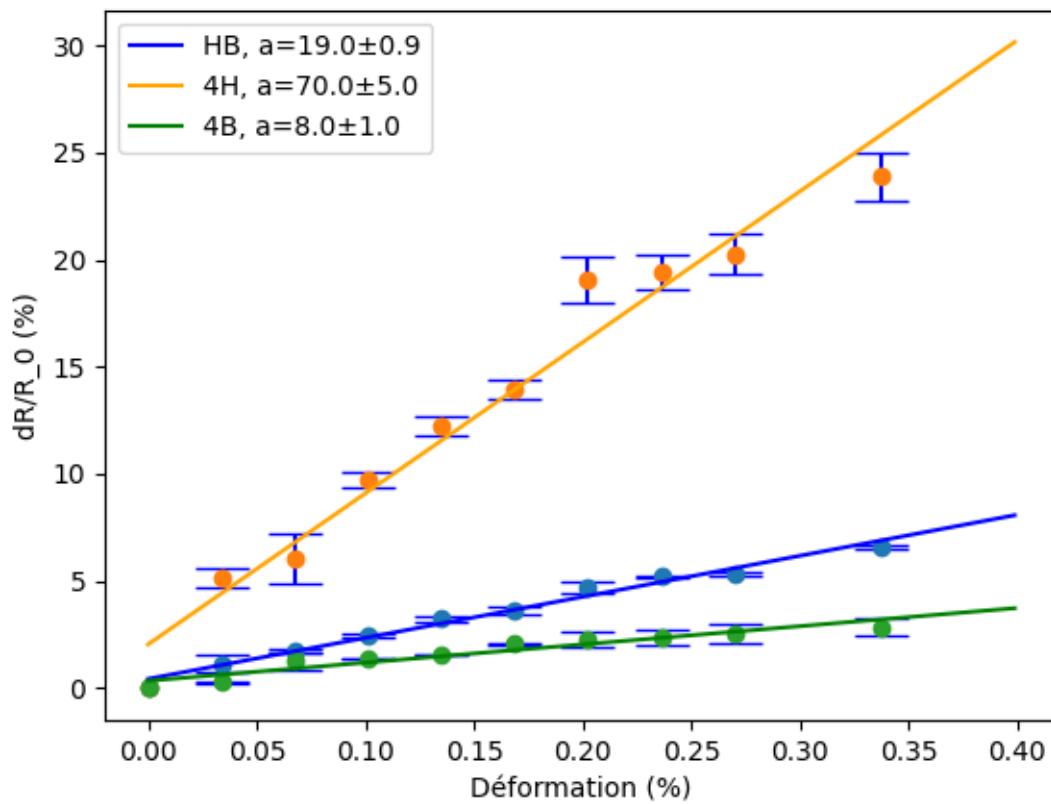


FIGURE 12 – Comportement des jauge (type1) en fonction du type de graphite, papier Bristol 205g/m².

Afin d'avoir une meilleure sensibilité, on préconise d'utiliser le graphite le moins gras possible. Durant les tests nous avons réussi à faire des mesures avec du graphite 4H, pour le moins gras. A partir du 4H nous n'arrivons plus à mesurer de résistance.

Influence du type de papier

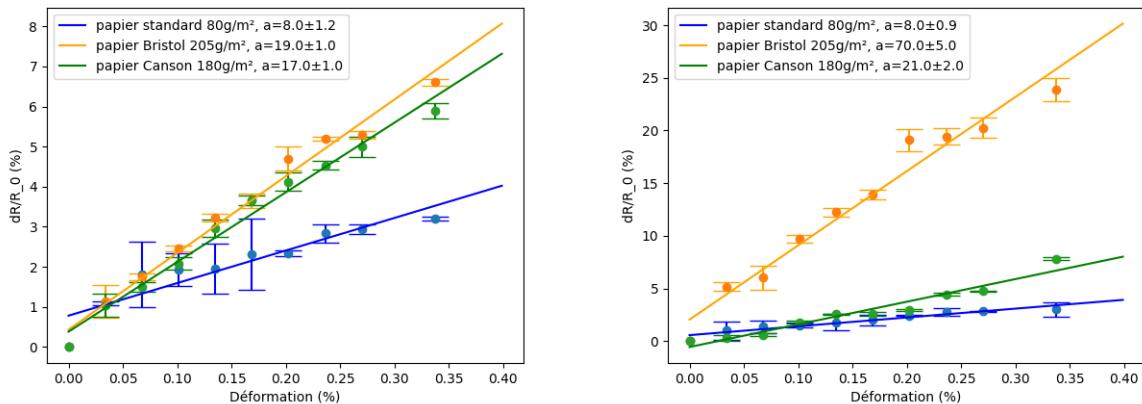


FIGURE 13 – Comportement des jauge (type1) en fonction du type de support. A gauche avec HB, et à droite avec 4H

La sensibilité du capteur augmente avec la rigidité du papier.

Influence du motif de graphite

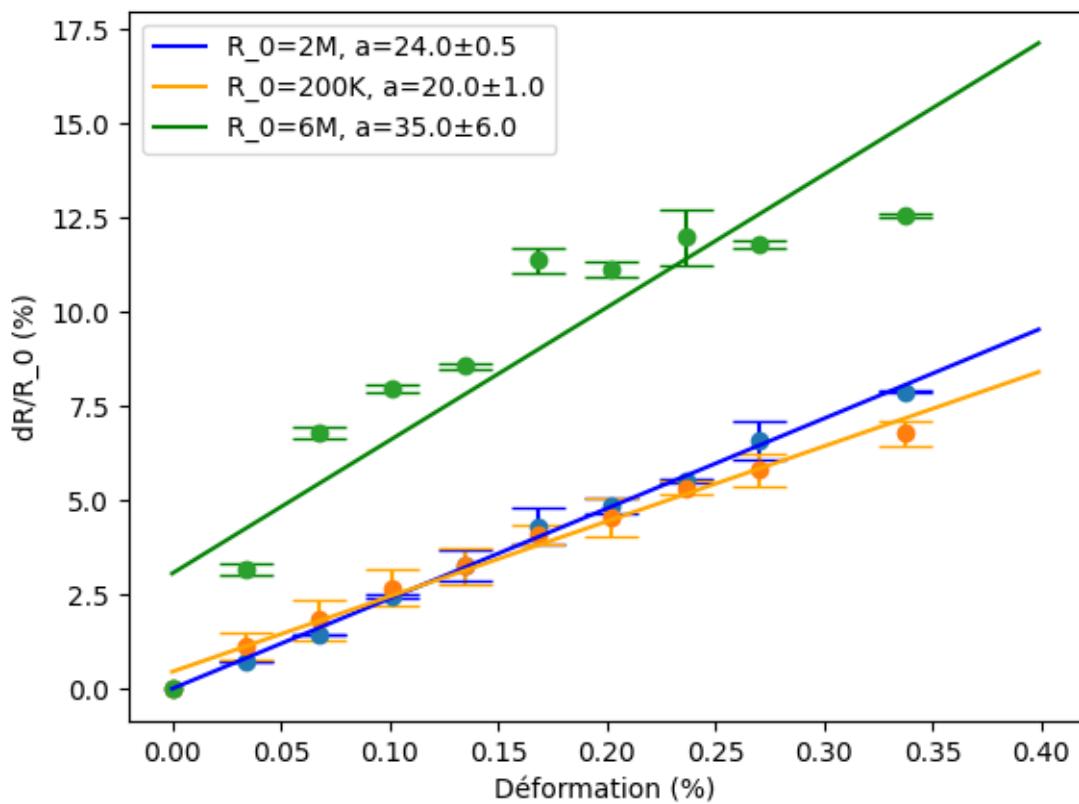


FIGURE 14 – Sensibilité de la jauge de graphite avec le motif de type 2.

La jauge de type 2 est plus sensible que la jauge de type 1.

APK

Une application Android a été développée afin d'augmenter les fonctionnalités du capteur et faciliter son utilisation.

La plupart des paramètres comme la fréquence d'échantillonnage sont ajustables à partir des codes Arduino et de l'application, disponibles en open source.

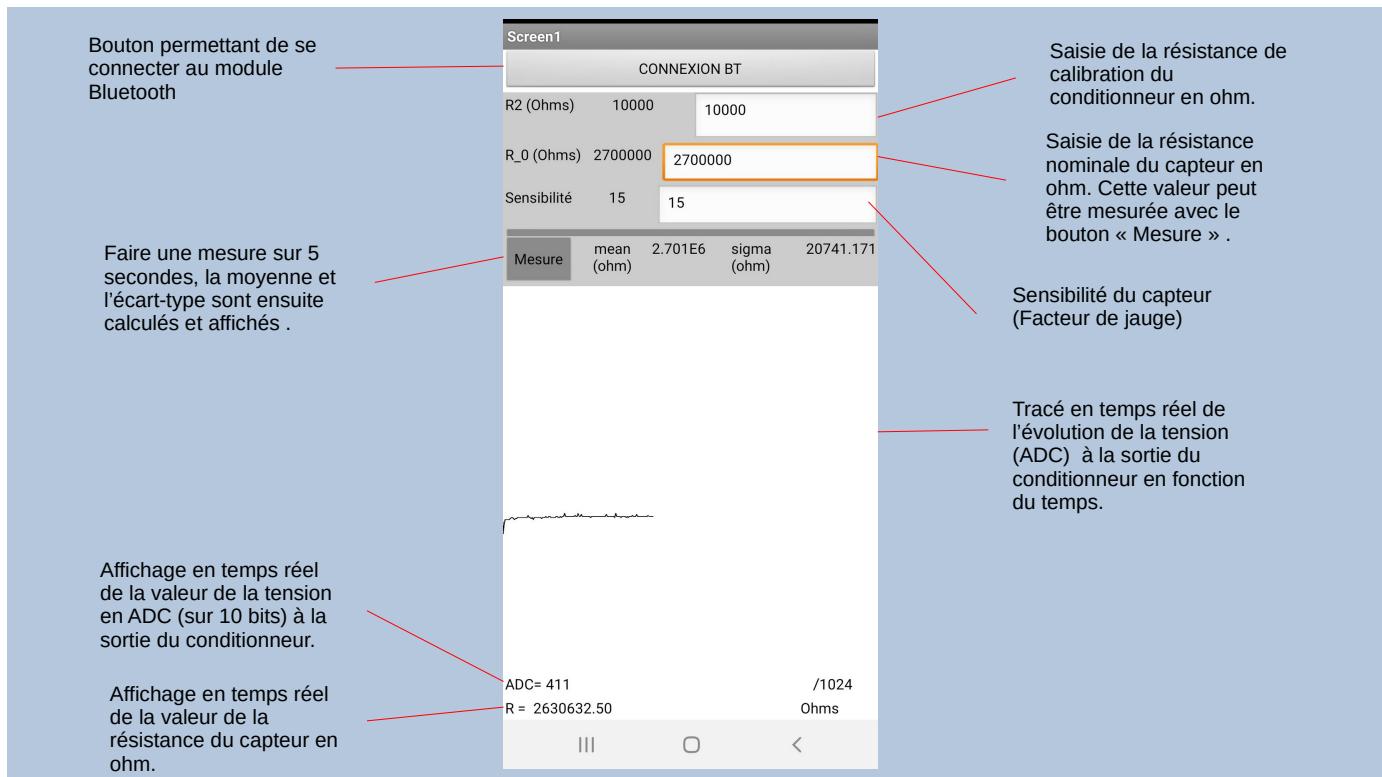


FIGURE 15 – Description de l'interface graphique de l'application Android.

Remarques générales

- Un capteur constitué d'un support rigide et d'une couche de graphite peu grasse offrira une meilleure réponse.
- La résolution du capteur est très variable, nous conseillons d'effectuer un étalonnage régulier de celui-ci. Une des causes que nous avons pu observer est une déformation importante ($>0,20\%$) ou alors une variation de déformation en fonction du temps trop importante.
- Nous avons également remarqué une grande instabilité de la valeur de résistance du capteur, notamment après une certaine déformation, la résistance peut mettre plusieurs secondes à retrouver sa résistance nominale.
- Le capteur doit être manipuler délicatement. La couche de graphite doit être toucher le moins possible pour ne pas modifier les propriétés du capteur, sinon il est nécessaire de reproduire l'étalonnage.
- La prise de contact des électrodes est également un facteur impactant la mesure. Une fois le capteur étalonné la prise de contact doit rester la même tout au long de la mesure pour ne pas avoir de biais.
- La zone de prise de contact doit être fixe tout au long de la mesure.