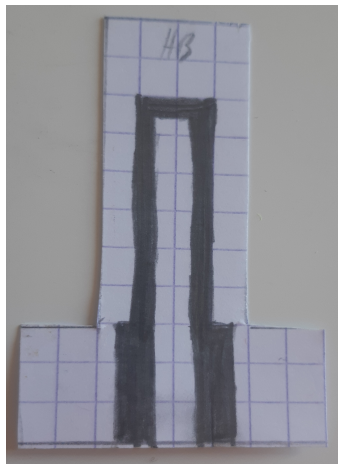

Jauge de déformation "low-tech" en papier et graphite



Caractéristiques principales

- Piezo-résistif
- Mesure d'extensométrie
- Transportable
- Respectueux de l'environnement
- Très peu cher (de l'ordre du centime d'euro)
- Low-tech

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 intra-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.

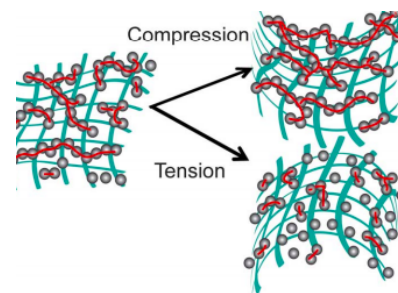


FIGURE 1 – Modification du réseau percolé des particules de graphites sous l'effet d'une déformation

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.

1 Dimensions

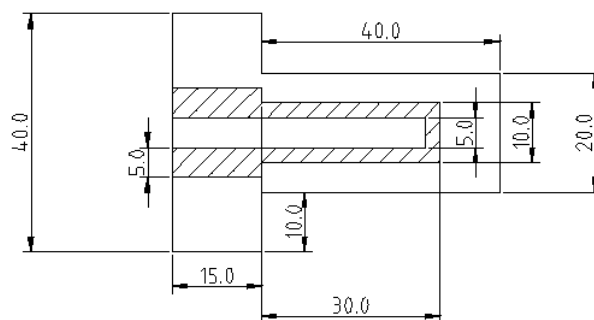


FIGURE 2 – Jauge de type1, la partie hachurée est la couche de graphite. Les cotations sont en millimètres.

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
Applications	Mesures d'extensométrie, balance, capteur de force

Spécifications techniques

	Unité	Min	Typ	Max
Range	Ω	$3 * 10^5$	$1 * 10^6$	$50 * 10^6$
Temps de réponse	s	-	< 1	-
Temps de stabilisation	s	2	5	50
Température	°C	-	21	-
Poids	g	-	< 1	-
Sensibilité	-	5±2	15±2	70±5

Conditionneur (Amplificateur transimpédance)

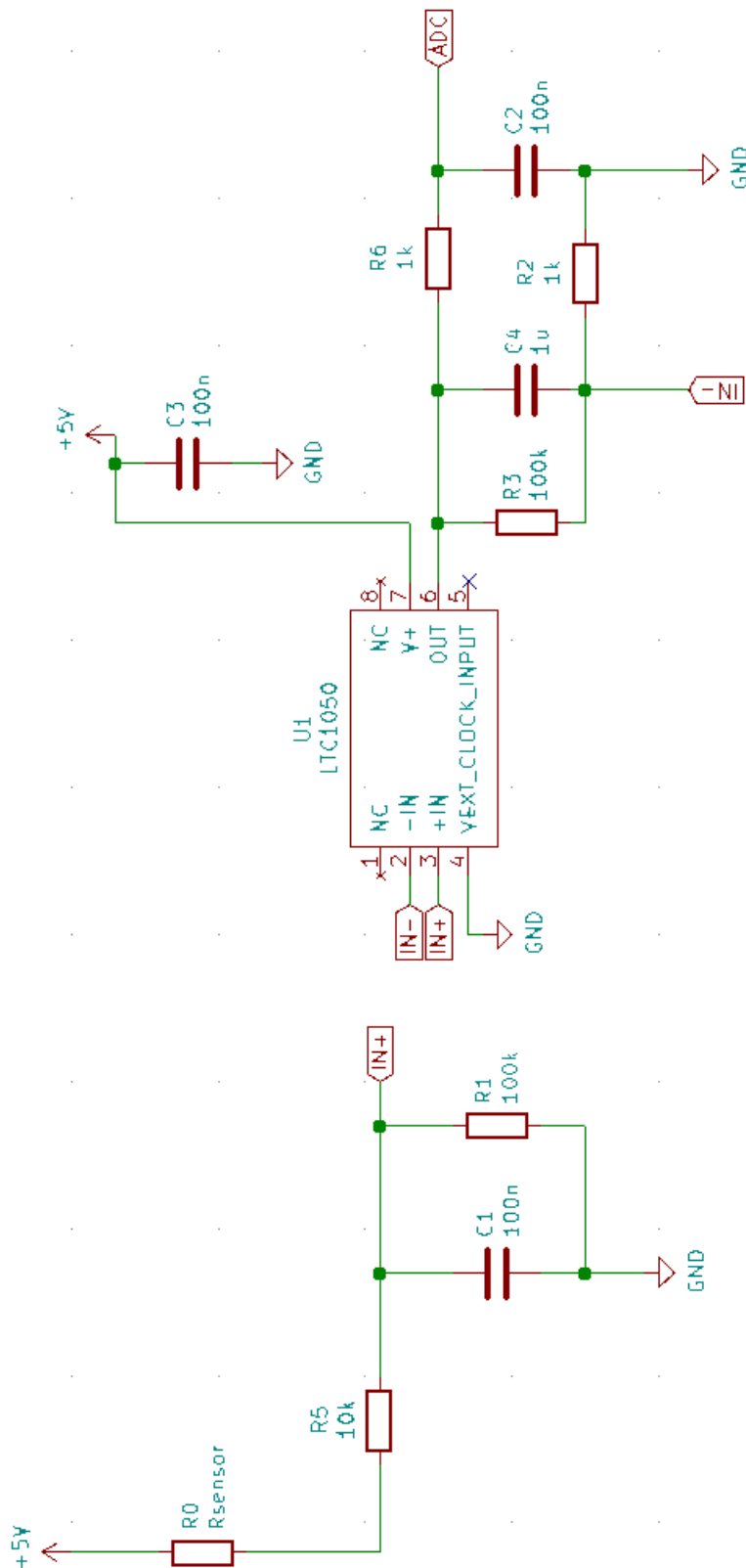


FIGURE 3 – Schéma électrique du conditionneur

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

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

R2 Ohm	R_max Ohm	R_min Ohm
1k	50M	9,99M
10k	5,4M	990k
100k	90k	890k
1M	0	440k
10M	0	395k

FIGURE 4 – Influence de R2 sur la plage de résistance mesurable

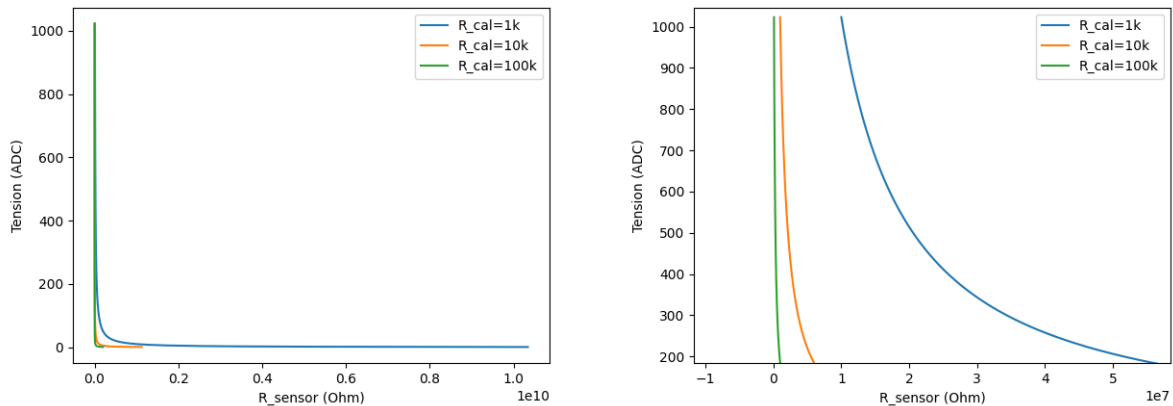


FIGURE 5 – Variation de la tension à la sortie de l'amplificateur (codée sur 10bits) en fonction de la résistance du capteur et pour différentes valeurs de R2.

Influence de la résistance R2

La résistance R2 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 a 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 (tableau 4).

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

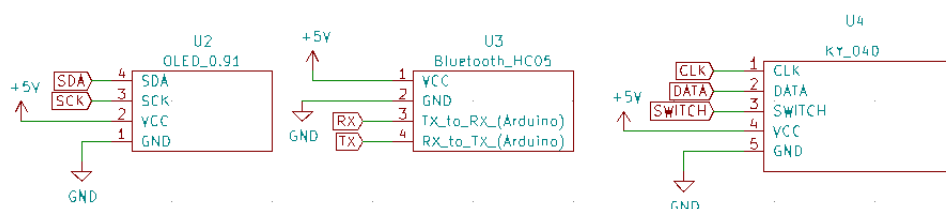


FIGURE 6 – Schéma électrique des modules additionnel. De gauche à droite, écran OLED, module Bluetooth HC05, encodeur rotatoire KY40.

Un shield 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.

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 déflexion de 2cm sous peine de déformer le capteur de manière irréversible. En effet, la force appliquée à l'extrémité du capteur entraîne une déflexion (m) :

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

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 calcul 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 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 entraient 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 effectué 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.

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 soi-même, et il semble nécessaire de compléter les mesures entamées afin de confirmer et préciser cette relation.

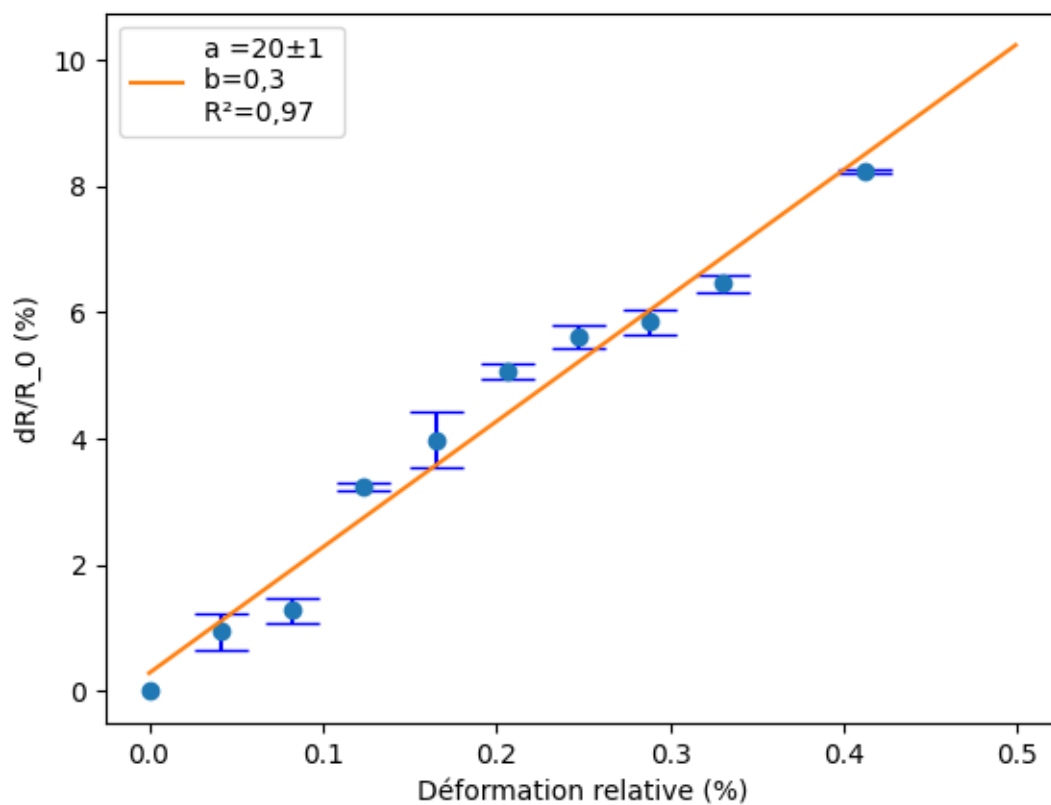
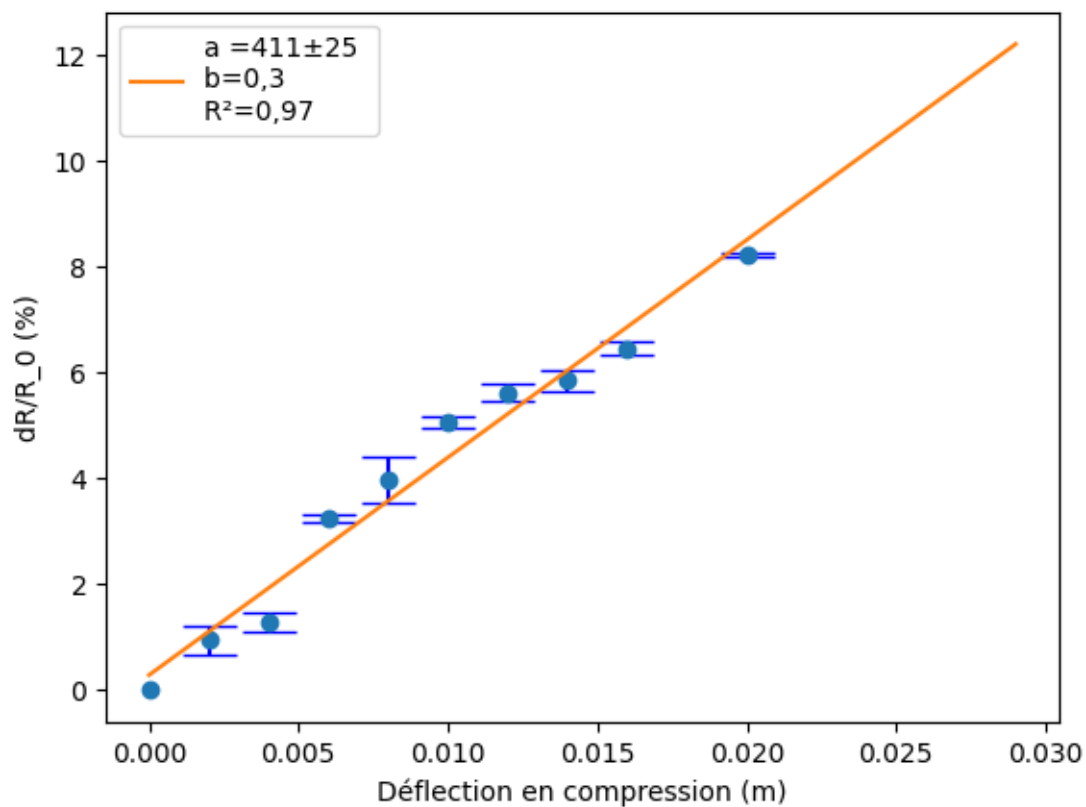


FIGURE 7 – Exemple de courbes d'étalonnages. Capteur de type 1, graphite HB et papier Bristol 205g.

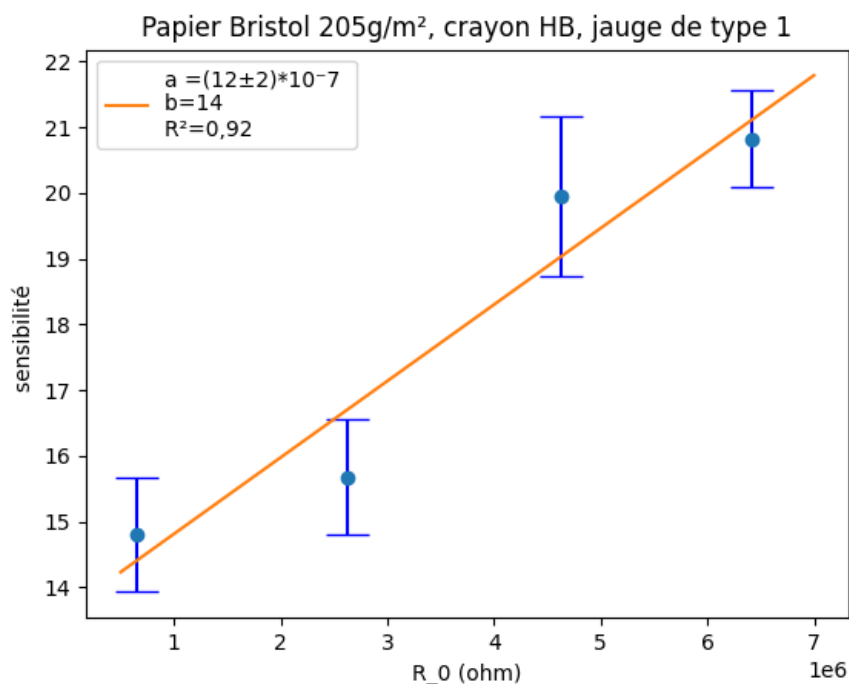


FIGURE 8 – Variation de la sensibilité du capteur en fonction de sa résistance au repos.

Influence des types de graphites

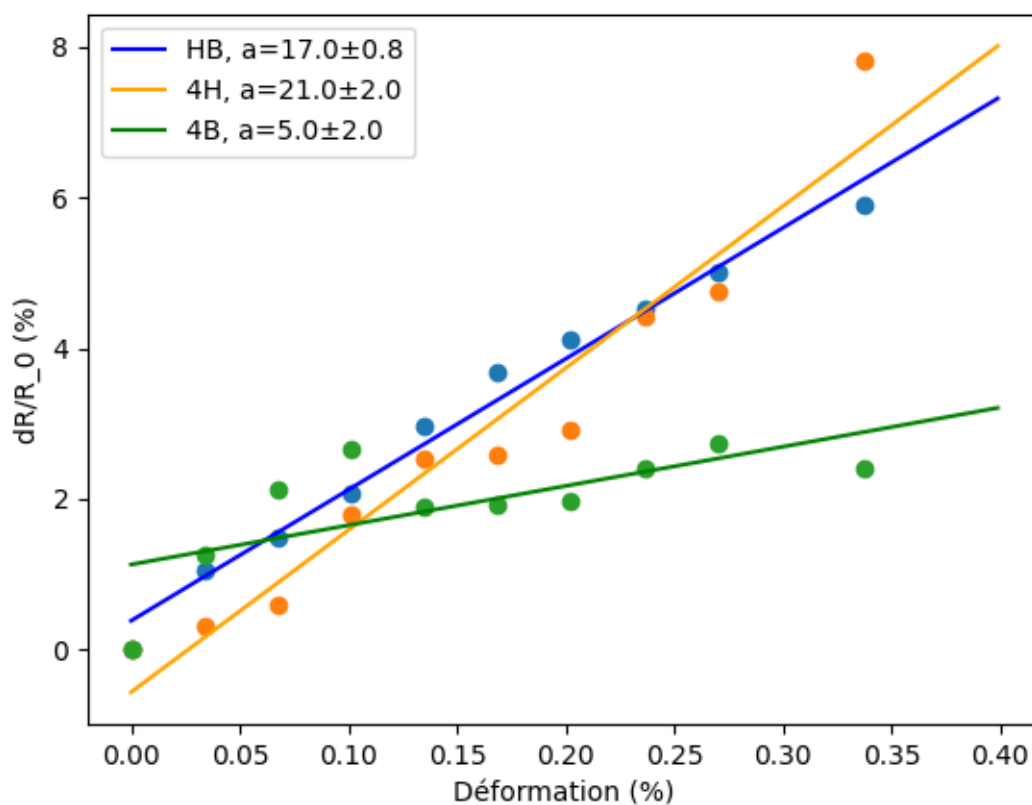


FIGURE 9 – Comportement des jauges (type1) en fonction du type de graphite, papier Canson 180g/m². (Les barres d'erreur n'apparaissent pas pour des raisons de visibilité).

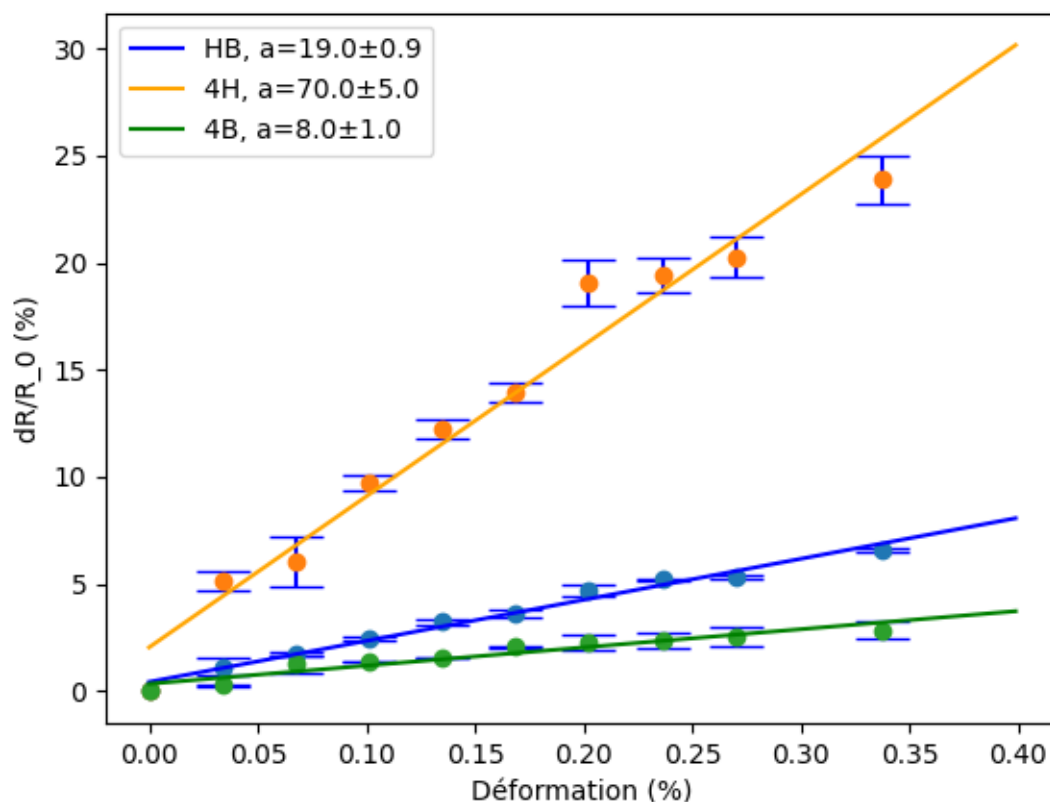


FIGURE 10 – Comportement des jauges (type1) en fonction du type de graphite, papier Bristol 205g/m².

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

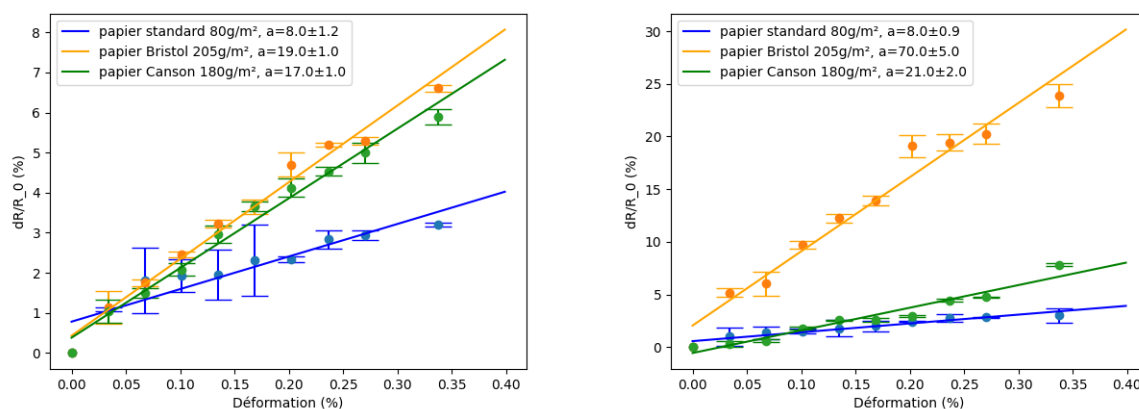


FIGURE 11 – Comportement des jauges (type1) en fonction du type de support. A gauche avec HB, et à droite avec 4H

Influence du motif de graphite

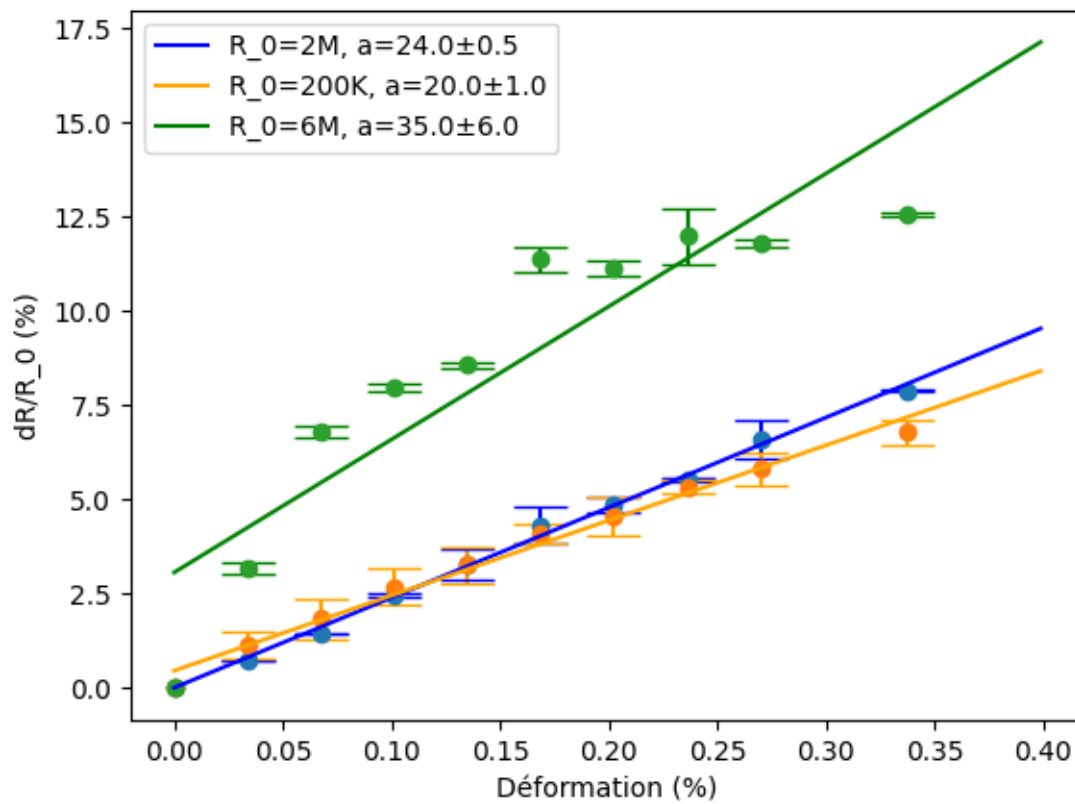


FIGURE 12 – Sensibilité de la jauge de graphite avec le motif de type 2.

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

APK