
Le KTY2000

Capteur de contrainte low-tech à base de graphite

Caractéristiques générales

Ce capteur low-tech présente de nombreuses caractéristiques et divers atouts le rendant attractif et unique en son genre. En alliant une simple feuille de papier naturellement poreuse et les propriétés mécaniques et électriques du carbone graphite, il est possible de réaliser diverses expériences, participant au développement et l'amélioration de nombreux dispositifs.

- facile à manipuler et utiliser
- aucun impact négatif sur l'environnement
- très peu cher
- ultra léger
- faible consommation énergétique
- forte sensibilité
- réutilisable

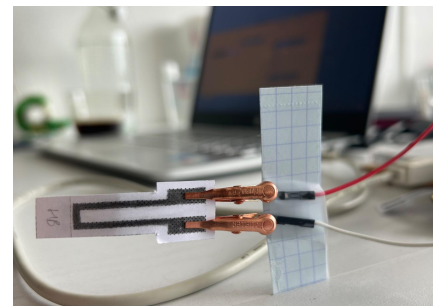


Figure 1 - Le KTY2000

Description générale

Le KTY2000, capteur de contrainte low-tech à base de graphite, s'inspire du travail que plusieurs scientifiques ont mené afin de révéler les nombreux avantages de travailler avec du carbone graphite (1). L'électronique à base de papier attire de plus en plus les ingénieurs de par sa facilité d'approvisionnement, de fabrication et son faible coût. Il suffit à l'utilisateur de venir déposer une fine couche de graphite sur le substrat naturellement poreux pour former la base du capteur. Les mines de crayon sont constituées de réseaux percolés de fines poudres de graphite liées entre elles par des argiles, permettant d'obtenir après dépôt de fins films conducteurs non fabriqués en laboratoire.

Le système à l'étude est granulaire autrement dit il existe une dépendance entre la conductivité électrique et l'espace moyen entre les nanoparticules de graphite. Ainsi, une déformation de la feuille de papier va modifier la conductivité globale de la couche de graphite, induisant des changements de résistances réversibles lors des déformations en compression ou en traction : un parallèle direct est réalisé avec l'appellation de jauge de contrainte.

L'expérience est réalisée avec différentes duretés de mine de crayon (2H, HB, 2B). La mesure de résistance pour chacun d'eux en fonction de différents rayons de courbure (soit la déformation) ou bien directement de l'angle de flexion permet une caractérisation complète de chaque type de crayon.

Les traces de crayon sont connectées à un système de mesures externe via des pinces crocodiles reliées à un PCB comprenant un amplificateur transimpédance, branché sur une carte Arduino Uno. Un écran OLED a été également ajouté permettant l'affichage en temps réel de la résistance du capteur KTY2000 mais aussi celle d'un flex sensor de chez Spectra Symbol. Les données stockées dans la mémoire arduino sont ensuite récupérées sur un ordinateur via une connexion USB puis traitées et affichées sur une interface graphique codée en python.

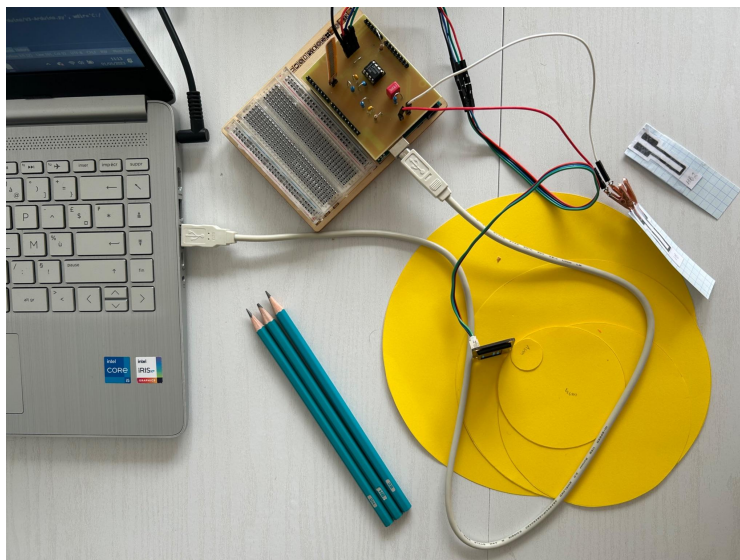
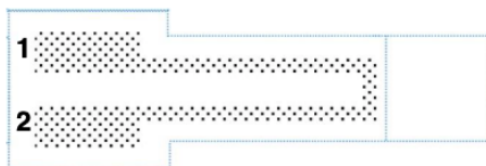


Figure 2 - Setup complet comprenant le KTY2000 et le banc de test

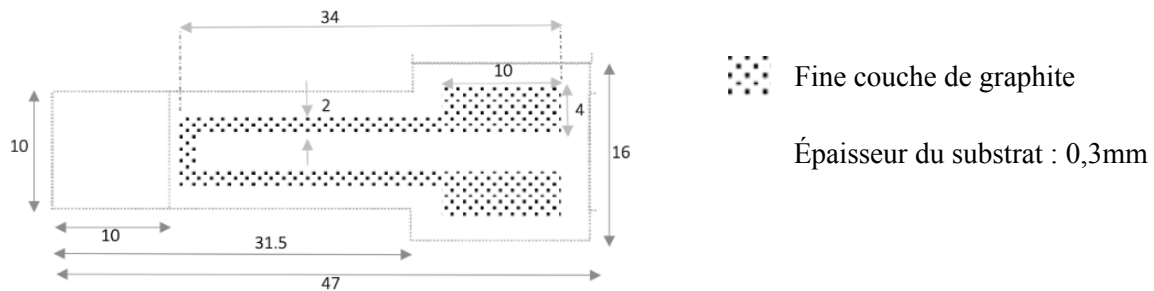
Description des pins



Le **pin 1** permet une liaison à $+V_{in}$ via une des pinces crocodile, directement reliée sur le PCB tandis que le **pin 2** correspond à une connexion à $+V_{cc}$.

Figure 3 - Connexions pin du KTY2000

Dimensions



Le motif en porte-à-faux est en forme de U relié à deux rectangles pleins. La partie U est utilisée comme faisceau de détection actif tandis que les deux rectangles servent en tant qu'électrodes de contact.

Spécifications

Type de capteur	Jauge de contrainte
Matériel utilisé	Substrat papier Crayon graphite 2H, HB, 2B Pincettes crocodiles métalliques PCB Arduino Uno Connexion USB vers ordinateur Distribution libre & open source Anaconda
Type de capteur	Passif (système d'alimentation externe requis)
Tension d'alimentation	+5V
Nature du signal de sortie	Analogique
Mesurande	Tension
Temps de réponse	<500 ms
Application typique	Évaluation de la déformation (compression ou traction)

Rayon de courbure maximum	1 cm
----------------------------------	------

Conditions standards d'utilisation

Le KTY2000 s'utilise à température ambiante, autour de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, dans une pièce à $60 \pm 10\%$ d'humidité, d'après les moyennes.

Caractéristiques électriques

Le signal de sortie récupéré est une tension évoluant entre 0 et 5 V. La formule permettant la conversion tension / résistance figure dans le code arduino. Étant donné de toutes les résistances mesurées sont de l'ordre du MOhm, le résultat a été volontairement multiplié par 10^{-6} pour des soucis de lisibilité sur l'écran OLED et l'interface graphite python.

	Unité	Valeurs		
		Min	Typique	Max
Crayon 2H	MOhm	150	300	400
Crayon HB	MOhm	25	50	70
Crayon 2B	MOhm	30	40	50

Caractéristiques spécifiques du capteur de contrainte

Le capteur KTY2000 est basé sur le dépôt de films conducteurs extra fins de nanoparticules de graphite. Ses caractéristiques propres sont déterminées en mesurant sa résistance sous l'effet de flexion (compression ou traction). Afin d'obtenir une meilleure fiabilité des mesures, les variations de résistances recueillies seront tracées en fonction directement de l'angle de flexion ou alors de la déformation du capteur, elle-même calculée selon les différents rayons de courbure de notre banc de test.



Figure 5 - Banc de test comprenant des disques de différents rayons de courbure (10, 8, 6, 4, 2 et 1 cm)

La déformation du capteur est calculée selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{e}{2 \times R_{\text{courbure}}}$$

Il est important d'avertir l'utilisateur sur certains éléments qui pourrait venir altérer l'expérience et fausser les résultats. En effet, il est difficile d'obtenir une expérience reproductible à 100% identique à chaque mesure. La quantité de graphite diminue avec le temps pour plusieurs raisons :

- Les pinces métalliques crocodile frottant le papier.
- Le contact de la feuille de papier avec les doigts.
- La quantité variable de graphite déposée sur chaque échantillon. Il est difficile d'appréhender exactement la même quantité de graphite entre les différents dépôts des crayons graphite testés et ce de manière uniforme. On réalisera donc cette hypothèse.

Pour résumer, les graphiques ci-dessous montrent pour chacun des crayons utilisés (2H, HB, 2B), leur variation (relative ou pas) de résistance en fonction de l'angle de flexion et de la déformation du capteur. R0 correspond à la résistance du capteur quand ce dernier n'est soumis à aucune contrainte mécanique. Les mesures sont à la fois faites pour une déformation en traction et en compression.

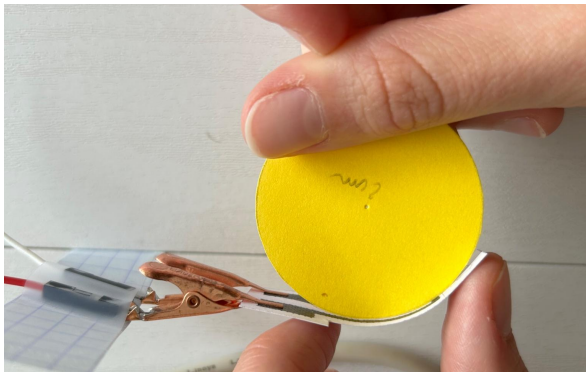
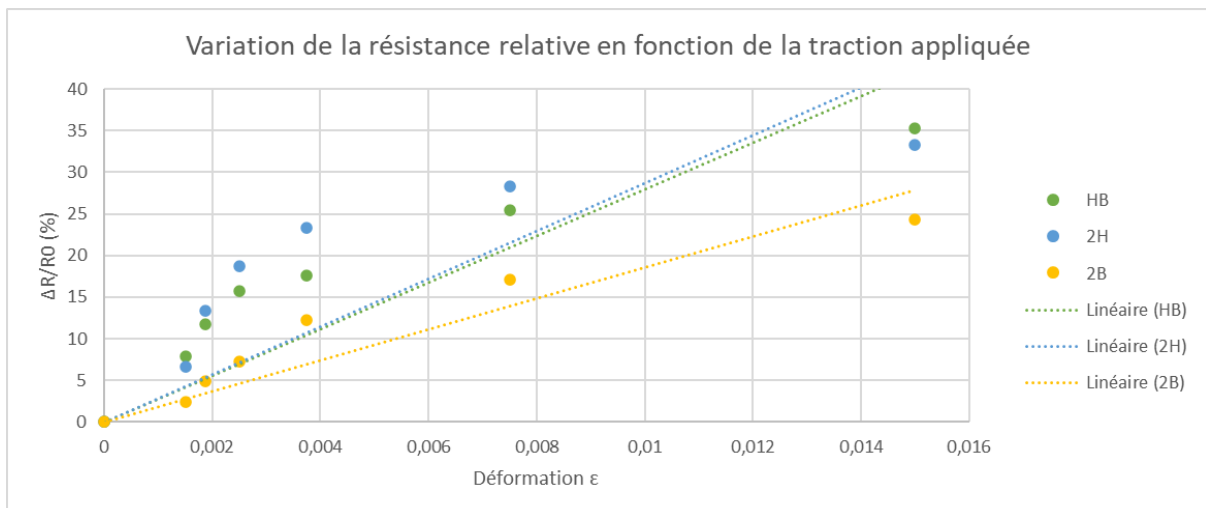
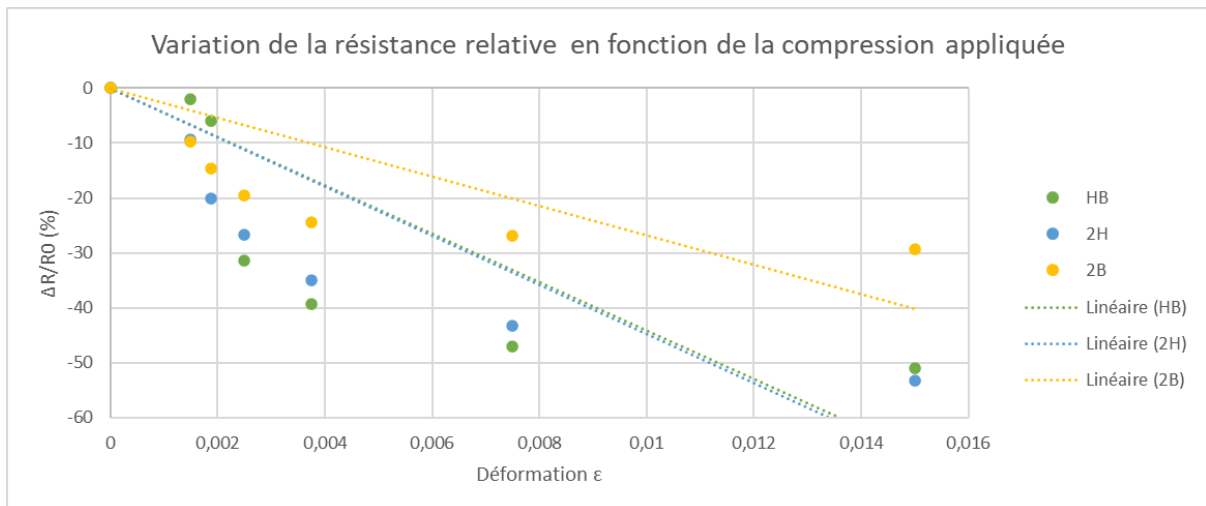


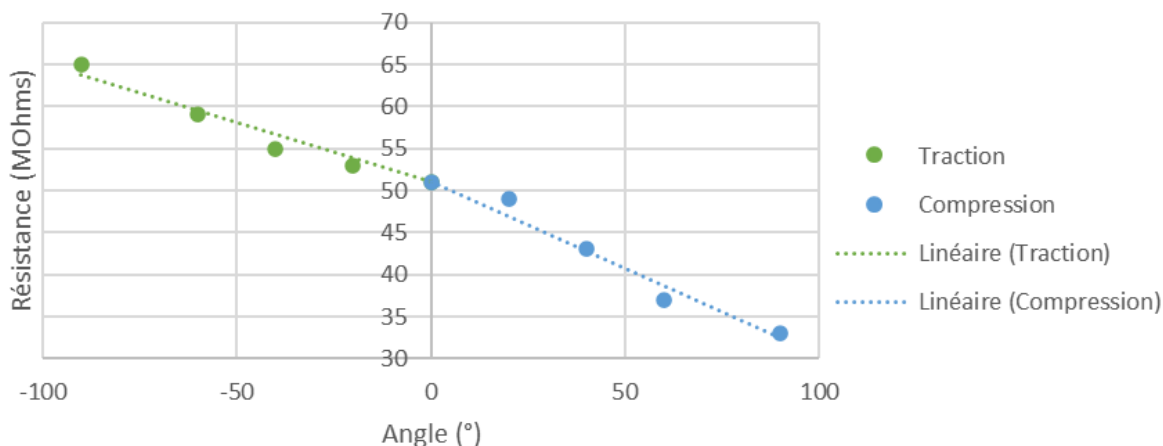
Figure 6 - Capteur en compression



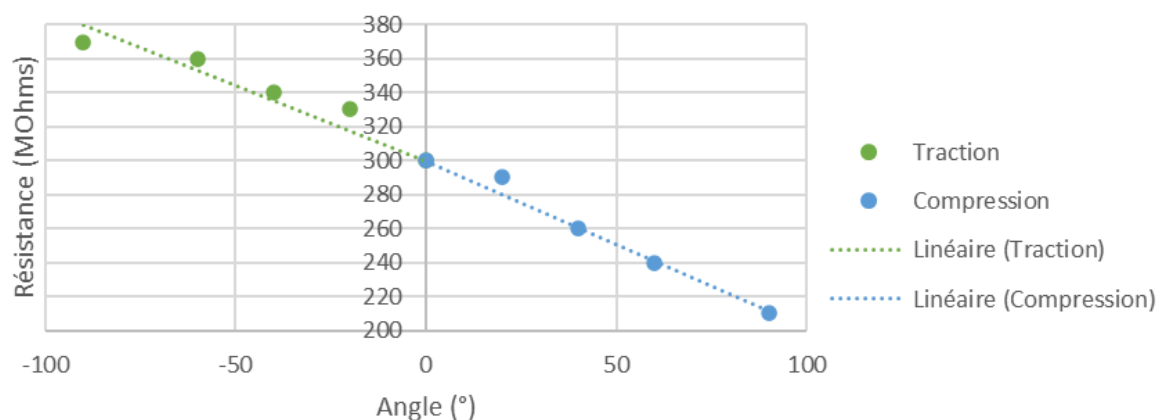
Figure 7 - Capteur en traction



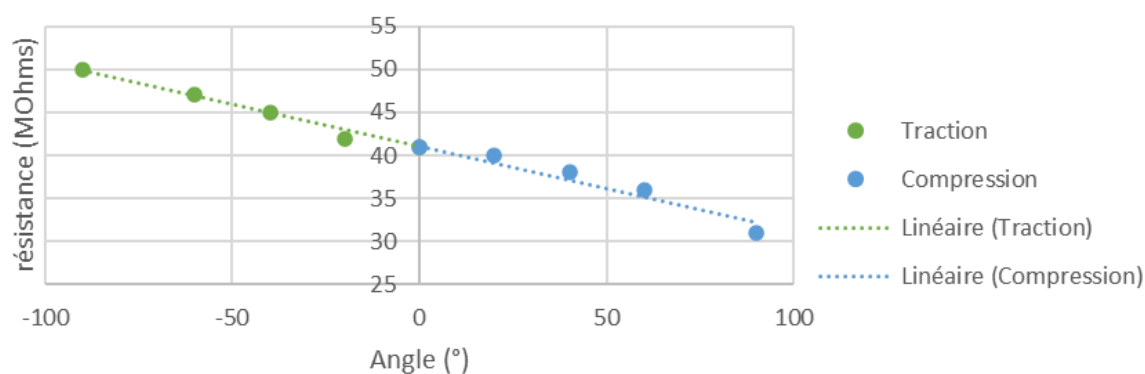
Variation de la résistance en fonction de l'angle de flexion
pour le crayon HB



Variation de la résistance en fonction de l'angle de flexion
pour le crayon 2H



Variation de la résistance en fonction de l'angle de flexion
pour le crayon 2B



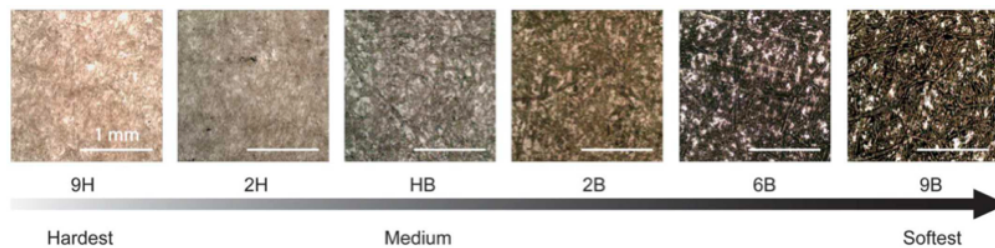


Figure 8 - Les différents crayons classés selon leur dureté

Les spectres normalisés de rayons X confirment que les mines de crayon les plus tendres, qui tendent vers le 9B, contiennent une proportion plus élevée de particules de graphite. C'est donc pour cette raison que les traces de ce type de crayon paraissent plus foncées sur le papier. A l'inverse, les mines les plus dures, tendant vers le 9H, contiennent beaucoup de liants argileux et apparaissent plus claires.

Cette caractéristique est illustrée à travers la variation relative de résistance en fonction de la déformation du capteur. En effet, un crayon qui contient moins de particules de graphite comme le 2H va naturellement déposer moins de graphite sur le substrat. Les variations de résistance sont donc plus significatives comme beaucoup de chemins de percolations sont créés ou rompus contrairement au 2B où les déformations n'induisent que de faibles variations relatives de résistance.

Pour ce qui est de la résistance, les mines de crayon les plus tendres présentent des valeurs plus faibles que les mines de crayon les plus dures.

Sous la traction, les particules de graphite sont davantage écartées les unes des autres favorisant la déconnexion des voies de conduction : le courant est donc minime, la résistance quant à elle augmente. À l'inverse, sous compression, les particules de graphite contenues dans la trace de crayon se rapprochent, facilitant la conduction du courant à travers le réseau de percolation : la résistance s'abaisse naturellement.

Il est important de souligner la variabilité des conditions expérimentales. Entre chaque relevé de points et malgré le fait que les pinces crocodiles sans dents étaient bien fixées, il se peut que l'attache du capteur ait bougé. Les résultats sont imprécis et pour certains discutables au vu de la qualité du montage mais suivent la tendance expliquée ci-dessus en respectant les lois physiques.

Application typique

Pour revenir plus en détail sur le circuit imprimé utilisé comprenant le capteur KTY2000, voici une représentation sur le logiciel de simulation LTSpice.

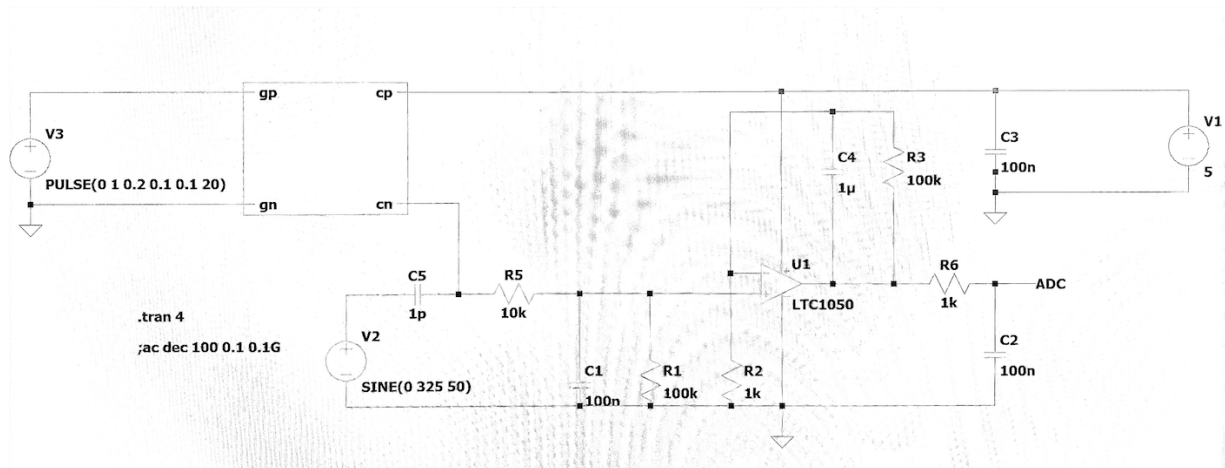


Figure 9 : Logiciel de simulation LTSpice du circuit comprenant le capteur KTY2000

Le capteur fonctionne de paire avec un amplificateur transimpédance (AO) LTC-5010 ainsi qu'un filtre basse-bas. Le condensateur C1 et la résistance R1 constituent un filtre pour le bruit de courant. Pour ce qui est de R5 et C1, il s'agit d'un filtre pour le bruit de tension afin de protéger l'AO des décharges électrostatiques. Ce dernier permet l'amplification du signal qui passe ensuite à travers le filtre actif composé de C4 et R3 et du filtre formé par C2 et R6. Le condensateur C5 permet de filtrer le bruit sur l'alimentation.

La tension résultante peut ensuite être connectée à un ADC 5V, ici la carte Arduino. Le montage présenté ci-dessus permet d'éviter un excès de bruit à l'entrée du CAN, qui pourrait l'amener à saturation.

Comme expliqué précédemment, à partir de la valeur de tension récupérée sur la carte Arduino, il est possible de convertir aux basses fréquences cette tension V_{lue} pour en récupérer la valeur de résistance du capteur avec la formule ci-dessous :

$$\text{Résistance finale} = \frac{V_{cc}}{V_{lue} \times \frac{5}{1024}} \times \frac{R1}{R2} \times (R2 + R3) - (R5 + R1)$$

Références

- (1) Lin, Cheng-Wei, Zhibo Zhao, Jaemyung Kim, et Jiaxing Huang. « Pencil Drawn Strain Gauges and Chemiresistors on Paper ». *Scientific Reports* 4, n° 1 (22 janvier 2014): 3812. <https://doi.org/10.1038/srep03812>.