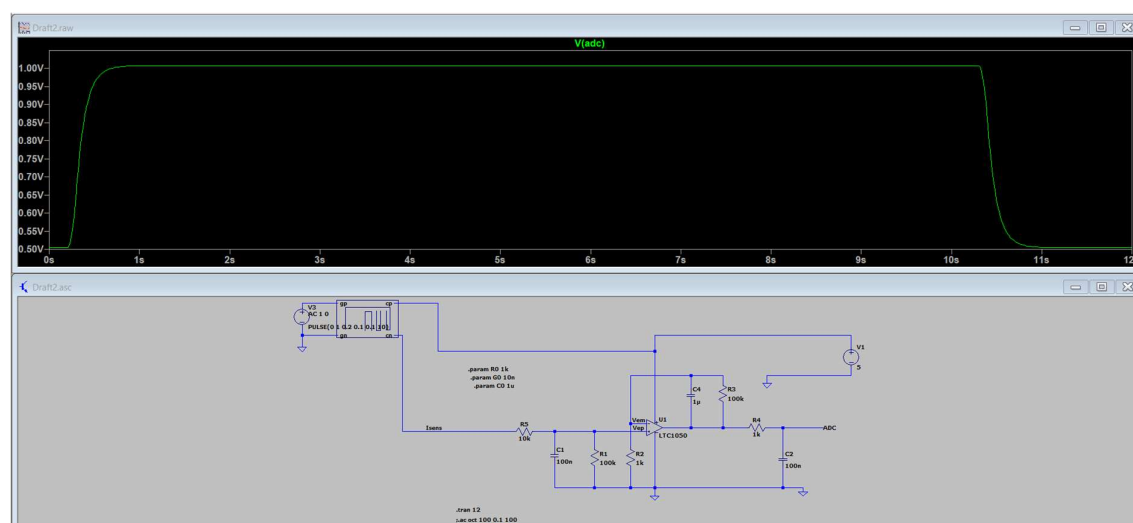


Durant ce projet, nous avons fabriqué un capteur en graphite, et pour récupérer la valeur de sa résistance et nous avons élaboré un circuit électronique autour, contenant un amplificateur transimpédance. L'utilité de cet amplificateur s'explique par la valeur très faible de tension étant récupérée à la sortie du capteur. En effet, la résistance de celui-ci se trouvant aux alentours de 50M Ohms, et la tension d'alimentation étant de 5 Volts, le courant en sortie du capteur est d'environ 100nA. Ainsi, il est trop faible pour être capté par la carte Arduino et il nous faut donc amplifier ce courant, avec les risques que cela comporte. Dans ce document, nous allons voir ce qui a été mis en place pour une utilisation optimale de l'amplificateur et pour éviter les éventuels problèmes liés à son utilisation.

Nous commençons par vérifier la fonctionnalité dans les conditions nominales, et pour ce faire, nous avons fait une simulation transient (.tran) d'une durée de 12 secondes, qui a fait fonctionner le circuit de manière normale, selon les composants présents. De cette manière, nous pouvons vérifier que le signal est bel et bien amplifié en sortie de montage (VADC) jusqu'à une valeur mesurable pour la carte Arduino, et c'est bien ce que l'on voit sur le graphique puisque la tension de sortie de montage monte à 1 Volt. Le circuit fonctionne donc bien dans les conditions nominales.



Simulation du fonctionnement du circuit dans les conditions nominales

Puisque nous incluons dans notre circuit un amplificateur transimpédance, il nous faut vérifier que ses caractéristiques intrinsèques ne risquent pas de fausser nos mesures, et vérifier qu'il convient pour le circuit. Nous allons commencer par nous intéresser à l'incidence de la tension d'offset de l'amplificateur, puis nous nous intéresserons à l'incidence du courant d'offset.

La datasheet de l'amplificateur transimpédance nous permet de récupérer deux informations essentielles pour répondre à cette première interrogation : le maximum offset voltage qui est de  $5\mu\text{V}$ , et le maximum offset voltage drift qui est de  $0.05\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , à  $20^\circ\text{C}$  on a donc  $0.1\mu\text{V}$  d'offset. Il faut comparer ces valeurs avec la valeur de tension mesurée.

On peut facilement calculer le gain de l'étage de l'amplificateur à partir du schéma du circuit :  $(R2+R3)/R2 = (1k+500k)/1k = 501$ . Les caractéristiques de notre circuit nous imposent de choisir un amplificateur avec un faible courant d'entrée, et un encore plus faible offset de tension. De plus, comme le courant  $I_{\text{sens}}$  est d'environ 100nA, on a alors une tension mesurée d'environ 10mV. En effet, comme la résistance  $R3$  vaut 100kOhms, on a alors  $U = R \cdot I = 100k \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 10 \text{ mV}$ . On a alors, avec le gain de l'étage amplificateur, une tension d'environ 5V au niveau de l'ADC ( $501 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 5\text{V}$ ).

On peut donc faire la comparaison entre les deux valeurs :  $10\text{mV} \gg 5\mu\text{V}$ . Cette valeur est donc bien supérieure à celle de l'offset de l'amplificateur, et l'incidence est donc négligeable, soit

acceptable. On mentionnera toutefois que le drift est lui aussi amplifié par l'amplificateur, et il faut donc prendre garde à ce que cela ne devienne pas un problème, même si ce n'est pas le cas ici.

En ce qui concerne le courant d'offset, on suit un raisonnement à peu près similaire à précédemment. D'après la datasheet de l'amplificateur LTC1050C, le courant d'entrée maximum est de  $\pm 200\text{pA}$ , et le courant mesuré dans le circuit est d'environ  $100\text{nA}$  comme nous l'avons vu précédemment. Ainsi, la valeur du courant d'entrée maximum est très inférieure ( $10^E-3$ ) à la valeur mesurée de courant, et elle est donc négligeable, on peut donc considérer que son incidence est acceptable.

Il nous faut maintenant nous intéresser aux bruits et à leurs filtrages. En effet, plusieurs sources de bruits sont présentes et risquent de polluer notre signal de sortie, il nous a donc fallu les filtrées grâce à trois étages de filtre passe-bas, que nous allons analyser ici. Nous préciserons le bruit qu'ils filtrent et leur fréquence de coupure.

Nous avons introduit trois filtres passe-bas dans le circuit, chacun étant destiné à atténuer le bruit d'une source, nous allons ici les expliciter, en précisant de quelle source provient le bruit qu'ils diminuent, et leur fréquence de coupure respective. Leur fréquence de coupure est mesurée lorsqu'on constate une chute de 3dB par rapport au bruit originel qui se situe aux alentours de 140dB. Nous avons réalisé des simulations (.ac) afin d'accéder au diagramme de Bode de la sortie, modifiée en fonction du filtre passe-bas utilisé, en ne laissant actif seul l'étage de filtre nous intéressant à chaque fois, afin de trouver les fréquences de coupures de chaque étage.

Le premier filtre passe-bas se situe au niveau de l'entrée inverse de l'amplificateur. Il permet de réduire le bruit dû à l'alimentation 5V du circuit. Sa fréquence de coupure se situe à environ 1.6Hz.

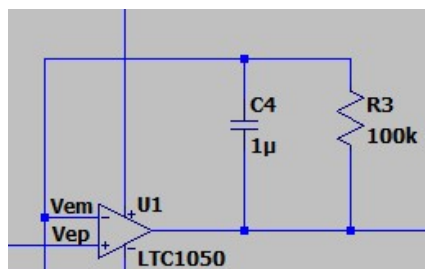


Schéma du premier étage de filtre passe-bas dans le circuit (réalisé sur LTSpice).

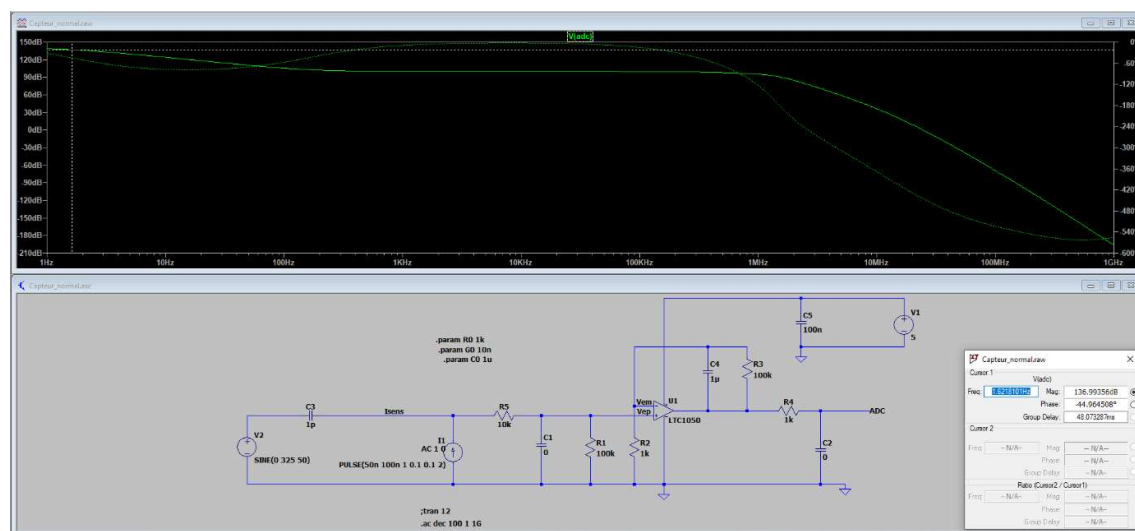


Diagramme de Bode associé au premier étage de filtre passe-bas et mesure de sa fréquence de coupure.

Le second filtre passe-bas a été placé en sortie de la résistance en graphène, afin de réduire le bruit du signal récupéré en sortie de celle-ci. Sa fréquence de coupure se situe aux alentours de 16 Hz.

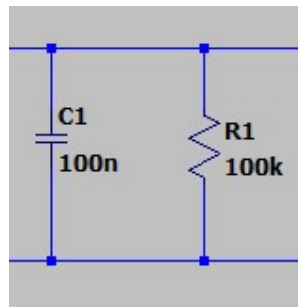


Schéma du second étage de filtre passe-bas dans le circuit (réalisé sur LTSpice)

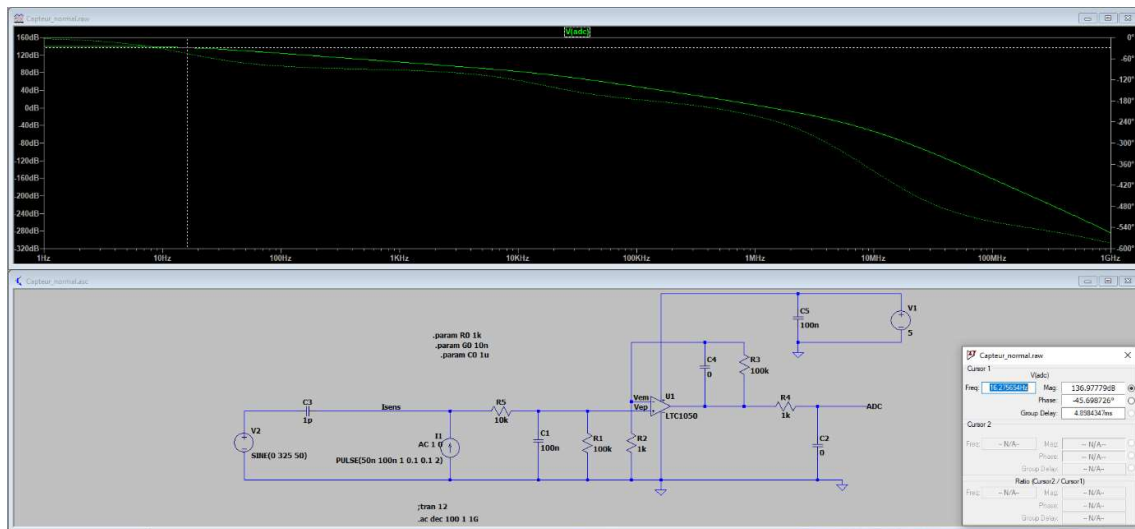


Diagramme de Bode associé au second étage de filtre passe-bas et mesure de sa fréquence de coupure.

Enfin, le troisième filtre passe-bas se situe en sortie de l'amplificateur opérationnel, afin de récupérer un signal le plus clair possible pour la mesure de VADC. Sa fréquence de coupure se situe à environ 1.6kHz.

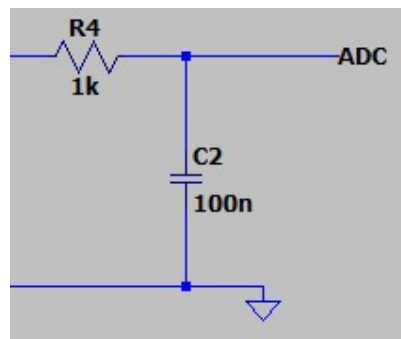


Schéma du troisième étage de filtre passe-bas dans le circuit (réalisé sur LTSpice)

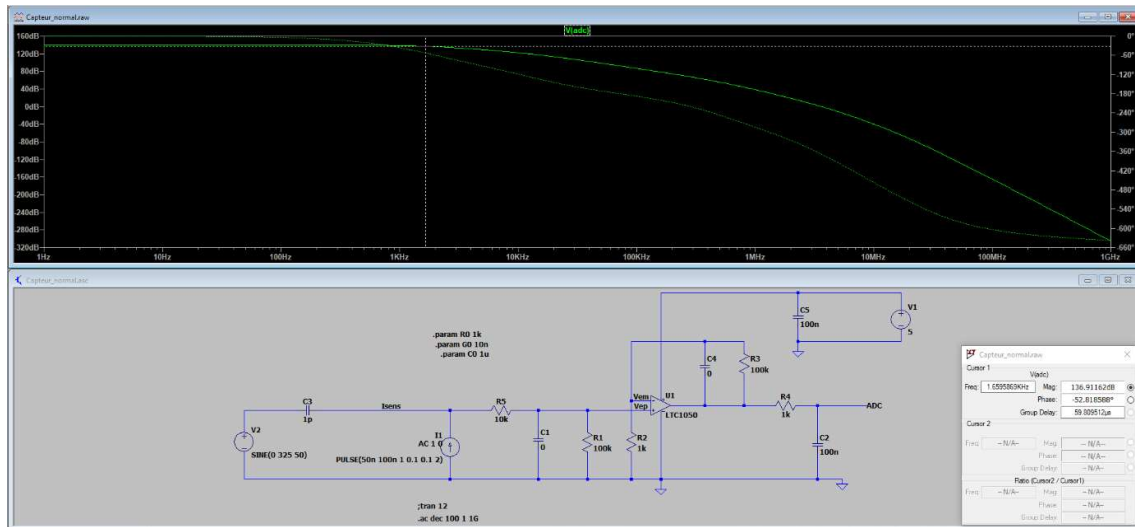


Diagramme de Bode associé au troisième étage de filtre passe-bas et mesure de sa fréquence de coupure.

Puisque nous avons mis en place des filtrages de bruit, il serait intéressant de vérifier leur efficacité, et nous allons donc vérifier ici le filtrage d'un bruit en courant de 50Hz, et le filtrage d'un bruit à la fréquence limite de repliement.

Comme précisé auparavant, nous avons ajouté dans le circuit trois étages de filtre passe-bas afin de contrecarrer les effets des différents bruits pouvant affecter le circuit. Ici, nous allons voir l'atténuation du bruit en courant de 50Hz dû au couplage capacitif avec le réseau 230V.

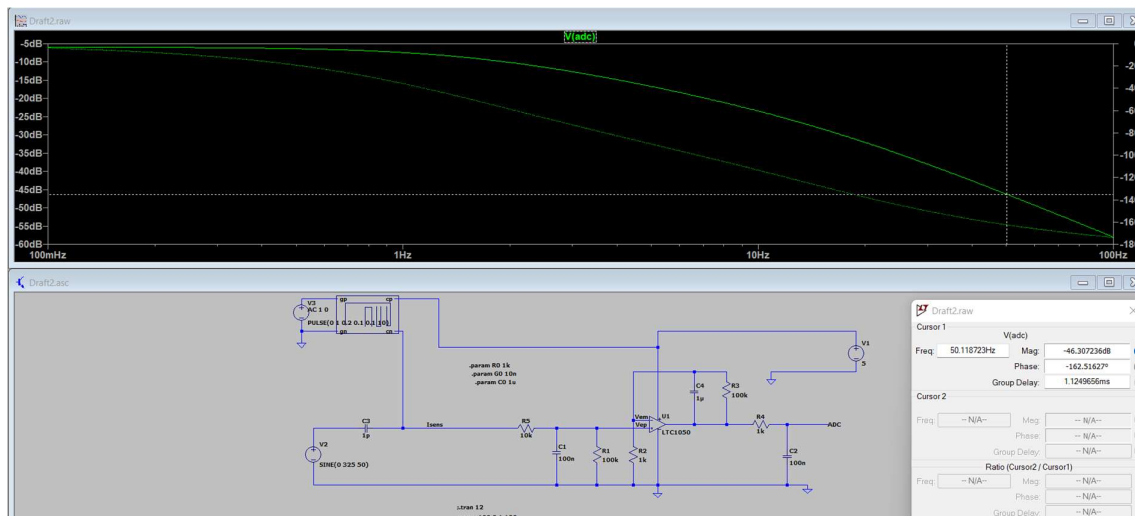


Diagramme de Bode du circuit avec tous les filtres pour calcul de l'atténuation d'un bruit en courant de 50Hz.

On réalise donc une simulation en courant alternatif (.ac) sur le circuit dans lequel nous avons incorporé un bruit à la fréquence de 50Hz afin d'avoir accès au diagramme de Bode de la sortie, ce qui nous permettra de retrouver l'atténuation. Comme on peut le voir ici, à 50 Hz, nous sommes à -46dB, et comme le diagramme débute à -7dB, nous avons donc une atténuation globale de 39dB pour un bruit en courant de 50 Hz. Le filtrage est donc efficace et il était utile de mettre en place cet étage de filtre passe-bas.

Dans le cas de la carte de l'Arduino Uno, la plus grande fréquence d'échantillonnage utilisable sans perte de qualité est de 15.4kHz. Nous avons intérêt à faire fonctionner l'ADC à cette fréquence car elle permet de faciliter le filtrage anti-repliement (dernier étage de filtre passe-bas). La fréquence limite de repliement, ou fréquence de Nyquist, est la fréquence maximale que doit contenir un signal pour permettre sa description non ambiguë (donc sans perte de qualité) par un échantillonnage à intervalles réguliers, et elle est égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. On a donc une fréquence limite de repliement égale à 7.7 kHz, et nous allons simuler un bruit à cette fréquence pour déterminer l'atténuation globale d'un bruit un courant à la fréquence limite de repliement.

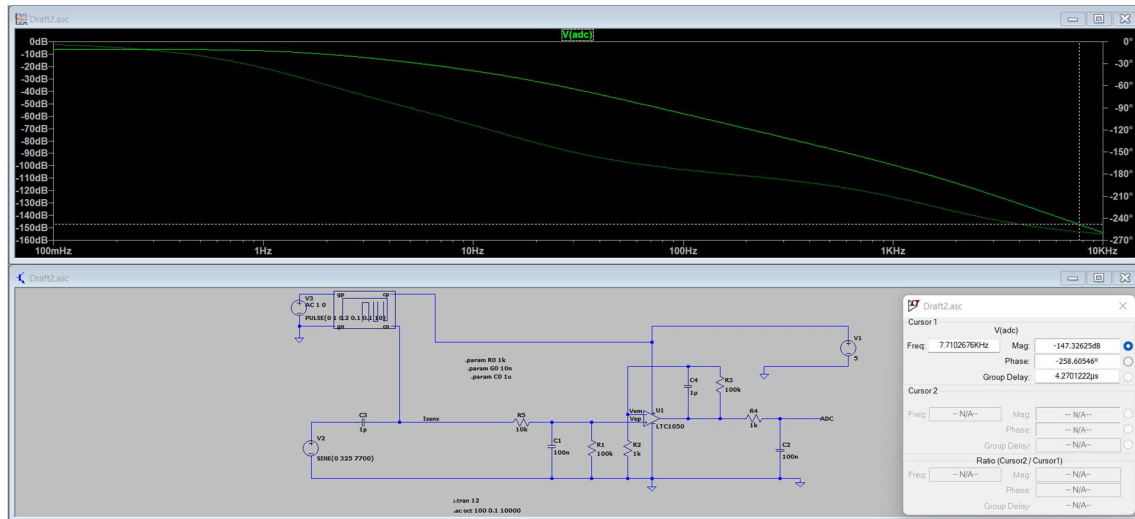


Diagramme de Bode de la sortie circuit complet pour calcul de l'atténuation d'un bruit à la fréquence limite de repliement.

Ici aussi nous avons réalisé une simulation de courant alternatif (.ac) sur le circuit afin de récupérer le diagramme de Bode de la sortie du circuit. On constate qu'à la fréquence limite de repliement, l'atténuation est de 140dB puisqu'on le diagramme indique -7dB à la fréquence de 0.1Hz et -147dB à 7.7kHz. C'est un indicateur que notre filtrage fonctionne bien, puisque le bruit est complètement atténué en sortie de circuit.

Ces simulations sur LTSpice nous ont donc permis de vérifier le bon fonctionnement de notre circuit et de comprendre l'utilité de chaque élément présent, en plus de vérifier leur bon fonctionnement.