

Rapport

PROJET INDUSTRIEL

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE MESURE POUR MIEUX CARACTERISER LA QUALITE BIOLOGIQUE DES SOLS

TOSCANO Raphaël
POURCHET Noémie

Tuteurs école :

DENOUAL Matthieu
DESCAMPS Phillipe

Tuteur entreprise :

TRINSOUTROT-GATTIN Isabelle
isabelle.gattin@unilasalle.fr

HOUNGBO Mahugnon Ezékiel
ezeziel.houngbo@unilasalle.fr



TABLE DES MATIERES

1. PRESENTATION DU PROJET	4
1.1. UniLaSalle	4
1.2. Mise en contexte	4
2. ETAT DE L'ART	7
3. DEVELOPPEMENT DU CAPTEUR	9
3.1. Design et principe du prototype	9
3.2. Conception et tests	12
4. PERSPECTIVES	18

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes et organisations qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, nous souhaitons remercier Matthieu Denoual et Philippe Descamps pour leur soutien, leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce projet. Leur disponibilité a grandement enrichi nos réflexions et notre travail. Nous adressons également nos remerciements chaleureux à Isabelle Trinsoutrot-Gattin et Mahugnon Ezékiel Houngbo pour leurs contributions significatives tout au long de ce processus et pour avoir mis à notre disposition les ressources nécessaires ainsi que pour nous avoir accueilli dans les locaux d'UniLaSalle. Enfin nos remerciements s'étendent aux membres de l'Alliance Harvest ainsi qu'à l'ENSICAEN.

DEVELOPPEMENT CAPTEUR : CARACTERISER LA QUALITE BIOLOGIQUE DES SOLS

1. Présentation du projet

1.1. UniLaSalle

UniLaSalle est un Institut Polytechnique issu de la fusion de cinq écoles d'ingénieurs et de la création d'une école vétérinaire. Au cœur des enjeux de transition, il regroupe des Grandes Ecoles unies dans les sciences du Vivant, de la Terre, de l'Environnement et de l'Energie aux Sciences industrielles et dans les technologies du numérique. UniLaSalle forme des ingénieurs capables de relever les défis environnementaux et agricoles mondiaux.

Le projet s'inscrit dans un climat où les systèmes agricoles et alimentaires font aujourd'hui l'objet de nouveaux enjeux et sont en lien avec de nombreux facteurs tels que le changement climatique, la réduction du nombre d'agriculteurs, la raréfaction des ressources naturelles, les nouvelles attentes sur la durabilité et la traçabilité des modes de production...

Ainsi, un partenariat entre des spécialistes du numérique et des experts des filières agricoles tels qu'UniLaSalle, a été créé en 2023 avec l'Alliance Harvest afin d'aider à relever les défis du monde agricole en utilisant le numérique. L'objectif de cette alliance est de promouvoir des pratiques durables, de développer des solutions innovantes pour la sécurité alimentaire, et de répondre aux enjeux liés au changement climatique.

1.2. Mise en contexte

Les sols abritent une immense biodiversité constituée à 25 % des espèces terrestres connues qui remplissent des fonctions essentielles au maintien du sol, et qui dépendent les uns des autres. Les différents organismes vivants sont ainsi

classés par taille, allant des micro-organismes (<0,2mm) aux macrofaunes (>4mm) (Figure 1). Cependant dans notre étude, nous nous sommes uniquement focalisés sur les micro-organismes qui jouent un rôle majeur dans le cycle de la décomposition de la matière organique. Les bactéries, elles, sont essentielles pour la fixation de l'azote atmosphérique, de la minéralisation du phosphore ou encore de la dégradation des polluants comme les pesticides, tandis que les champignons jouent un rôle crucial dans l'agrégation des sols et sa stabilité structurale.

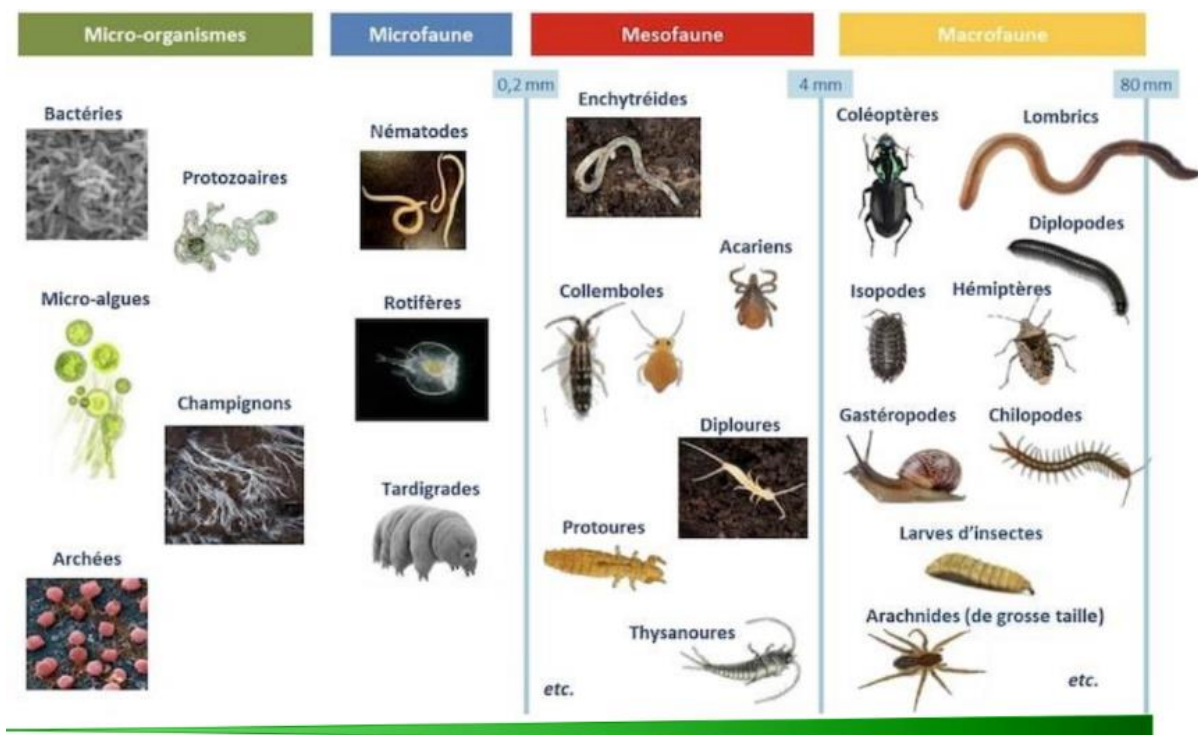


Figure 1 : Schéma des différents groupes de la biodiversité du sol classés par taille (Source : Quentin VINCENT – Étude des paramètres abiotiques, biotiques et fonctionnels, et de leurs interactions dans des sols délaissés. Thèse de doctorat – Université de Lorraine – <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01896274/document>)

Les micro-organismes jouent aussi un rôle clé dans le cycle du carbone ou de l'azote par exemple (Figure 2). Les bactéries fixatrices capturent l'azote atmosphérique (N_2) et le transforment en ammoniac (NH_3) assimilable par les plantes. Les micro-organismes décomposeurs réalisent l'ammonification, minéralisant en ammonium la matière organique fraîche, apportée par les fertilisants, les résidus de cultures ou issu de l'humus du sol. Enfin, les bactéries dénitrifiantes sont responsables de la dénitrification lorsque l'azote retourne à l'atmosphère sous forme de diazote, avec, comme produit secondaire, du dioxyde

de carbone et de l'oxyde d'azote. Ce processus est essentiel pour recycler les nutriments et maintenir la fertilité des sols. Ainsi, une forte diversité microbienne est associée à une meilleure décomposition de la matière organique et à une meilleure résilience des écosystèmes face aux stress, comme les perturbations thermiques ou les pratiques agricoles intensives [1].

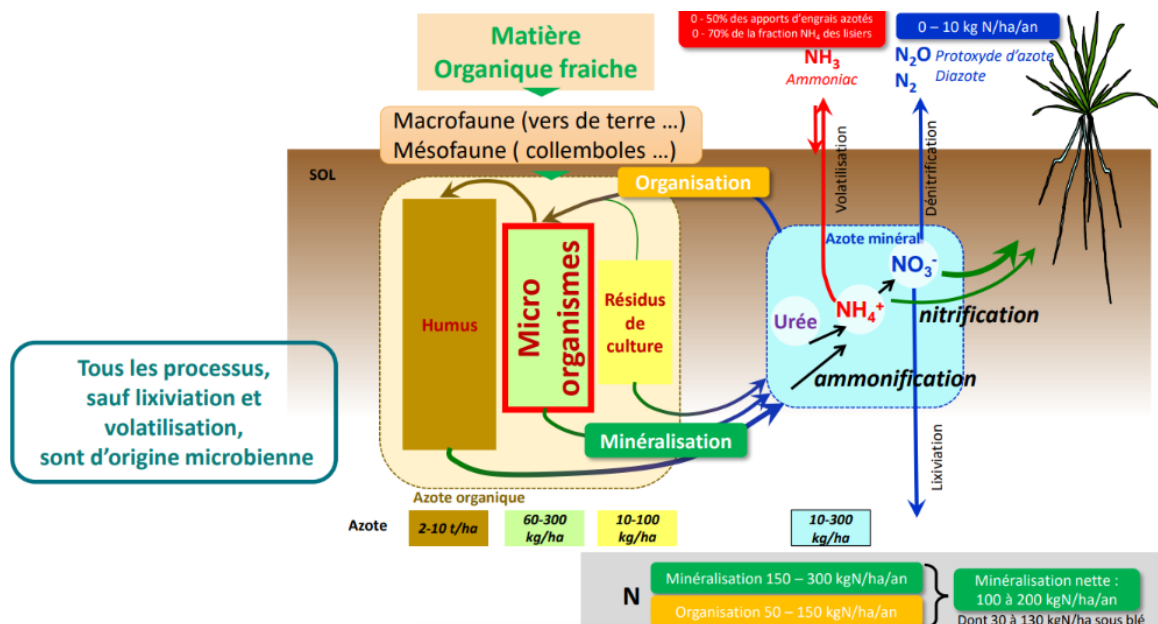


Figure 2 : Cycle de l'azote (Source : Wassila RIAH-ANGLET - Support de cours " Fertilité biologique des sols : lien entre la biodiversité, les fonctions et les systèmes de culture")

De plus, cette faune peut être décrite par son abondance et sa diversité, c'est-à-dire la quantité et le nombre d'individus et d'espèces présentes dans ce sol. Le projet s'est donc davantage tourné vers la caractérisation de ces deux paramètres. C'est pourquoi nous avons passé en revue les capteurs existants et proposons un moyen d'identifier des signaux à l'aide d'un nouveau capteur.

2. Etat de l'art

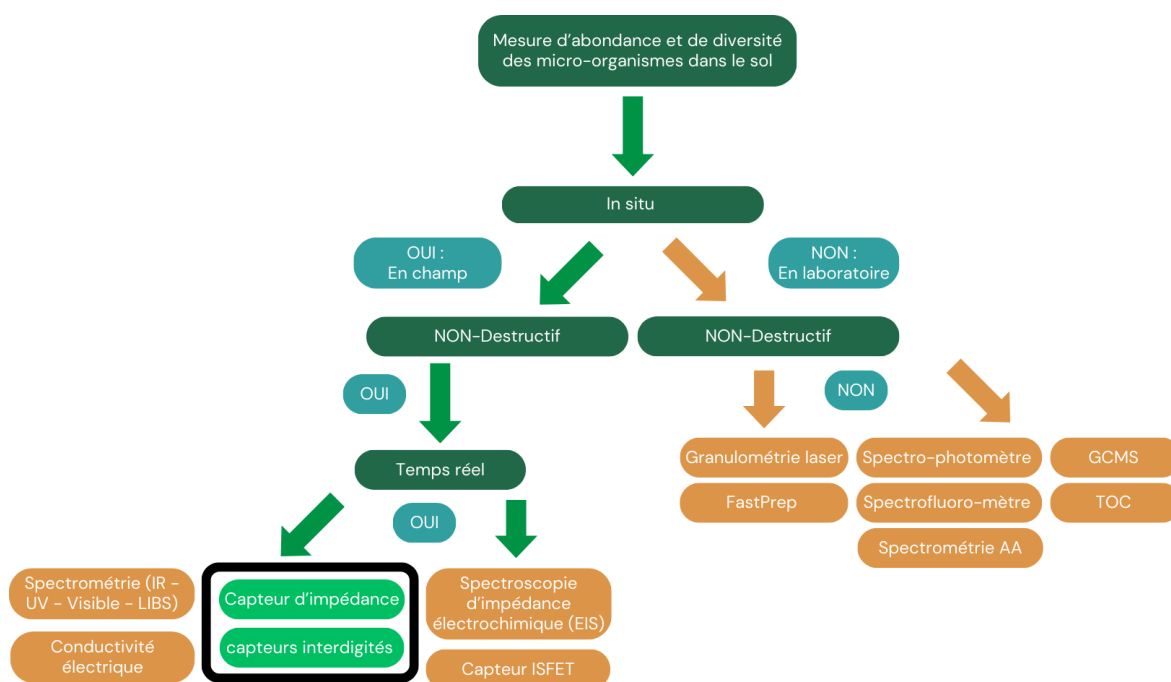


Figure 3 : Arbre des choix pour le développement du capteur de biodiversité

Pour étudier les sols, il existe une multitude d'indicateurs, et donc un grand nombre de capteurs pour les mesurer. Que ce soit des indicateurs physico-chimiques ou biologiques, il est important de connaître l'ensemble des solutions disponibles sur le marché pour les mesurer (Figure 3). Tout d'abord, il y a deux grandes façons de réaliser les mesures des indicateurs de l'état du sol : *In situ*, c'est-à-dire sur le terrain, dans les champs directement, et en laboratoire après prélèvements d'échantillons.

Lorsque la mesure est en laboratoire, elle est souvent destructive et il est généralement nécessaire de sécher la terre pour enlever l'humidité présente dans les échantillons. L'analyse correspond donc à l'instant de prélèvement de ces derniers. Cependant elle permet d'obtenir beaucoup d'informations différentes, notamment avec des analyses d'ADN. Le système FastPrep, par exemple, présent dans le laboratoire d'UniLaSalle, est un appareil utilisé pour la lyse mécanique des cellules afin d'extraire de l'ADN, de l'ARN ou des protéines rapidement. Le laboratoire possède également des spectrophotomètres et spectrofluoromètres qui mesurent des activités enzymatiques et qui, couplés à un indicateur de couleur, permettent de connaître la proportion d'enzymes dans le sol par émissions d'une certaine longueur d'onde caractérisant son ADN. La chromatographie gazeuse-

spectrométrie de masse (GCMS) peut détecter l'abondance et la diversité des micro-organismes via la mesure d'acide gras, de même que le TOC (Total Organic Carbon) qui mesure la quantité totale de carbone organique dans un échantillon pour évaluer la quantité de micro-organismes présents dans le sol. La spectrométrie d'absorption atomique, quant à elle, est utile pour la mesure de contaminants tandis que la granulométrie laser étudie la texture du sol (limon, sable, argile...). D'autres systèmes du laboratoire d'UniLaSalle comptent les bactéries, ou étudient la capacité métabolique de ces dernières.

Lorsque la mesure est *in situ*, elle est très souvent non-destructive et en temps réel. En effet, les différentes techniques de spectrométrie (UV, Visible, Infrarouge, LIBS) permettent de mesurer directement le contenu en matière organique, azote, carbonate, nitrate, potassium, et d'autres éléments chimiques, ainsi que la texture du sol ou l'humidité [2], [3]. De la même manière, les capteurs ISFET (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor) analysent chimiquement certains nutriments (Potassium, Nitrate, Phosphate) et le pH en fonction de la membrane ionosensible utilisée [4], [5]. De plus, il existe une technique de spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) qui met en œuvre une « Pile à combustible microbienne » (microbial fuel cell - MFC) pour mesurer la résistance ohmique du sol et remonter à sa conductivité électrique *in situ* [6]. D'autres capteurs, mesurant la conductivité électrique du sol peuvent être utilisés pour quantifier la salinité et la teneur en eau [2], [3].

Dans un contexte médical, en toxicologie et pharmacologie, il existe des capteurs multi-électrodes pour la surveillance cellulaire qui permettent une cartographie d'impédance pour surveiller en continu et de manière quantitative l'adhésion, la prolifération et la migration cellulaire, ainsi que les changements structuraux et métaboliques liés à la fatigue musculaire [7], [8]. De plus, des capteurs interdigités fabriqués par impression sur substrats souples offrent aussi une méthode pour suivre des processus cellulaires similaires, notamment dans des modèles de peau artificielle, pour des processus liés à la régénération tissulaire [9]. Cependant, bien que ces techniques s'appliquent uniquement dans le domaine médical, il serait intéressant et pertinent de l'adapter au monde des micro-organismes, qui est aussi un monde d'agrégats de cellules, similaires à ceux utilisées dans les études de suivis de processus cellulaires.

3. Développement du capteur

3.1. Design et principe du prototype

Notre ambition est donc de développer un capteur utilisable directement sur le terrain, facile à manipuler et capable de quantifier, analyser, et identifier les micro-organismes présents dans le sol, quelle que soit sa composition. Dans cette optique, un capteur innovant a été pensé, dessiné et conçu pour répondre à ces exigences spécifiques. Afin de garantir sa facilité d'utilisation, le design de « carotte » (Figure 4) a été envisagé afin de planter le capteur directement dans le sol pendant un certain temps tout en laissant la possibilité de prélever des échantillons si nécessaire. Elle serait longue d'au moins 20 centimètres pour atteindre les couches d'intérêts de la terre, et d'un diamètre suffisamment large pour contenir l'électronique du système, bien que cette dernière puisse être aussi au-dessus de la carotte dans un boîtier dédié. La structure en elle-même serait en plastique pour faciliter son impression en 3D, réduire ses coûts de production et faciliter son remplacement.



Figure 4 : Schéma 3D de l'extérieur du capteur

De plus, plusieurs étapes clés ont jalonné son développement. Tout d'abord, une phase d'analyse des paramètres à caractériser tels que l'abondance et la diversité ont permis de sélectionner la grandeur physique adaptée à mesurer : l'impédance. En effet, la mesure d'impédance permet d'analyser les propriétés électriques du milieu, comme la conductivité et la permittivité, qui varient en fonction de la composition chimique et biologique du sol. Cela consiste à déterminer la manière dont le circuit s'oppose au passage d'un courant, en mesurant son amplitude et le déphasage entre la tension et le courant, ce qui permet de caractériser ses propriétés résistives et réactives. Ainsi, le capteur a été conçu sous la forme d'un peigne interdigité, pouvant être modélisé par un réseau de condensateurs et de résistances avec le *modèle Cole-Cole* de cellules biologiques. Le passage et le

dépôt de micro-organismes sur ces peignes modifieraient alors l'impédance créée par l'ensemble. Le capteur peut donc être utilisé *in situ* (Figure 5).



Figure 5 : Modélisation électrique Cole-Cole du peigne avec micro-organismes

Ce capteur d'impédance (Figure 6) repose sur deux principes fondamentaux en instrumentation : la mesure différentielle (Figure 7) et la détection synchrone (Figure 8), qui permettent de conditionner des signaux de données. La mesure différentielle permet de mesurer la grandeur d'intérêt en s'affranchissant des grandeurs secondaires (comme la température, la pression, l'humidité, le bruit...) en faisant la différence de deux signaux. Une séparation en deux compartiments est donc réalisée par une paroi imperméable empêchant toutes particules de passer d'un compartiment à l'autre. Il y a donc, pour chaque compartiment, un signal distinct, permettant cette soustraction.

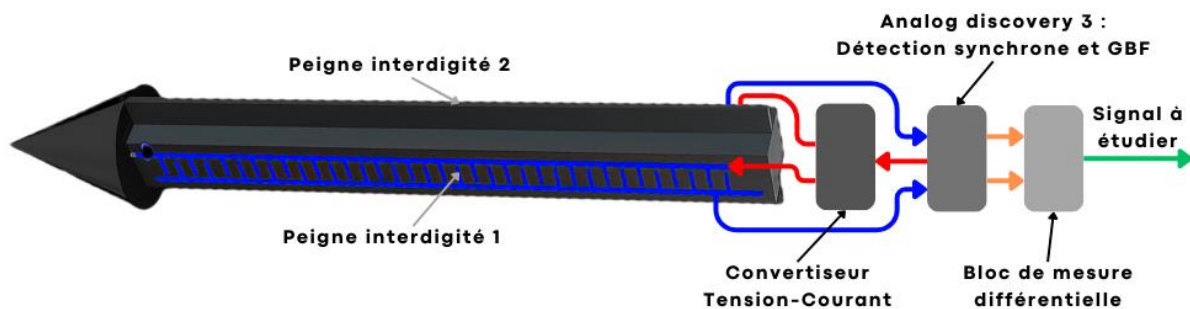


Figure 6 : Schéma de principe de l'ensemble du système de mesure

L'enveloppe externe du capteur, appelée « carotte », est perforée sur l'ensemble de sa surface pour faciliter le passage des micro-organismes ainsi que des particules plus petites, comme celles de l'eau (Figure 4). Dans ce contexte, la mesure différentielle joue un rôle clé : d'un côté, les perforations sont recouvertes d'un tissu qui ne laisse passer que les particules plus petites que les micro-organismes, permettant ainsi de mesurer l'humidité du sol et les autres paramètres d'influence. De l'autre côté, les perforations sont recouvertes d'un tissu perméable

aux micro-organismes. En comparant électroniquement les signaux obtenus de chaque côté, il est possible d'isoler et d'extraire le signal spécifique aux micro-organismes en éliminant les bruits et variations inutiles (Figure 7).

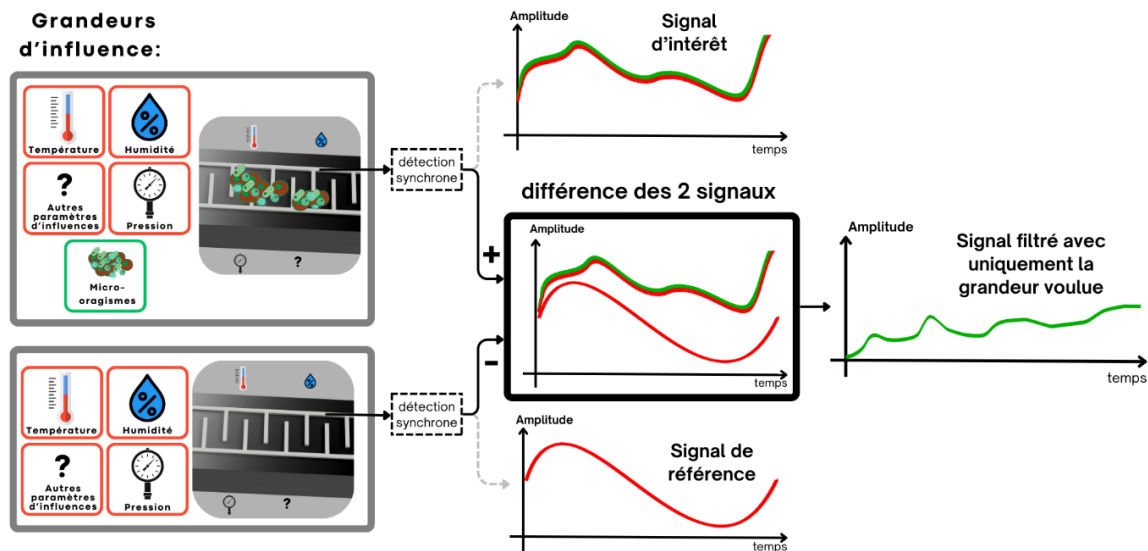


Figure 7 : Schéma de principe de la mesure différentielle

La détection synchrone (Figure 8) est une technique de traitement du signal qui repose sur l'analyse d'un signal mesuré en le corrélant avec un signal de référence, parfaitement synchronisé en fréquence et en phase. Elle permet d'extraire l'information utile tout en supprimant efficacement le bruit et les interférences qui ne sont pas en phase avec le signal de référence. Dans le contexte de détection de micro-organismes dans le sol, cette méthode améliore significativement le rapport signal sur bruit en amplifiant les faibles variations d'impédance souvent noyées dans le bruit de fond ou perturbées par des interférences électromagnétiques provenant de l'environnement extérieur.

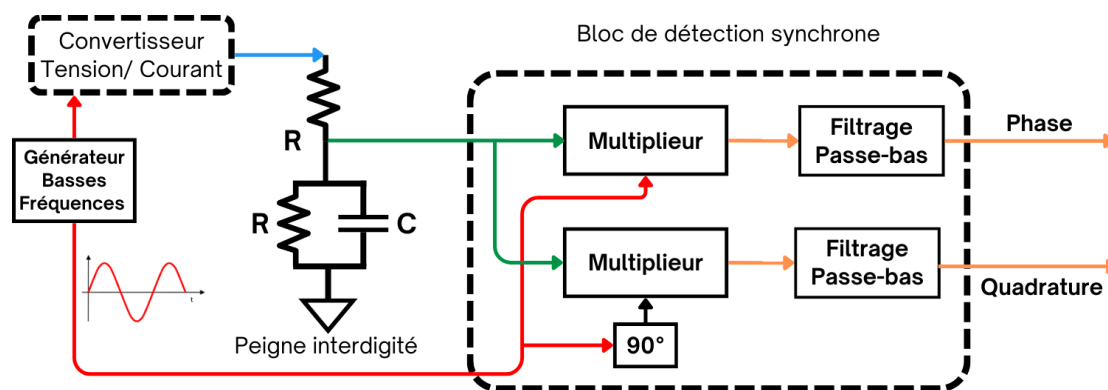


Figure 8 : Schéma de principe de la détection synchrone

3.2.Conception et tests

Tout d'abord, pour effectuer une mesure d'impédance, il est nécessaire d'injecter un courant dans les peignes interdigités. Comme nous disposons d'une source de tension, il était donc nécessaire d'intégrer un convertisseur Tension-Courant au système. En réalité, deux convertisseurs sont requis : l'un pour alimenter le peigne de référence et l'autre pour le peigne de mesure, permettant une mesure différentielle par la suite. Nous avons ainsi conçu un circuit électronique à l'aide du logiciel Eagle, réalisé son routage, puis procédé à son impression sur un PCB (Annexe 1).

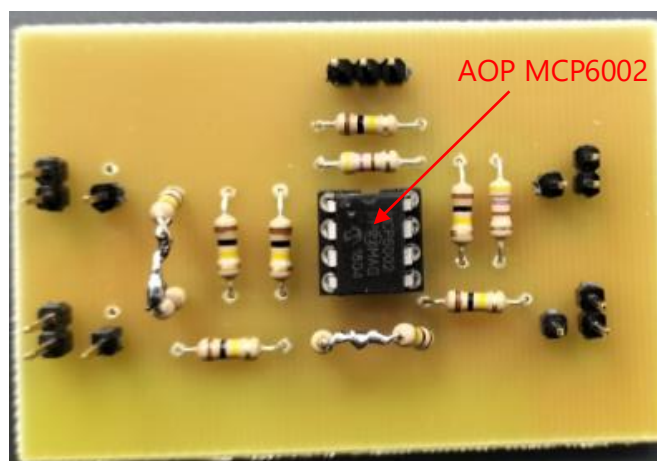


Figure 9 : Carte électronique du convertisseur Tension-Courant

Après avoir soudé les différents composants sur la carte (Figure 9) en suivant une simulation LTSpice (Annexe 2), nous avons caractérisé ce convertisseur en mesurant sa courbe Tension-Courant (Figure 10) ainsi que sa réponse en fréquence (Figure 11). Nous avons testé différentes valeurs de résistances afin de vérifier la

validité de la relation $U = R \times I$. Les résultats obtenus montrent que la courbe théorique correspond parfaitement aux points de mesure et on remarque aussi que l'amplificateur opérationnel arrive à saturation pour des grandes valeurs de résistances.

De plus, le diagramme de Bode obtenu permet d'affirmer que le convertisseur Tension-Courant est un passe-bas c'est-à-dire qu'il fonctionne en basse fréquence. Sa fréquence de coupure à -3dB est autour de 50kHz , c'est pourquoi il faudrait que la réponse au niveau des peignes soit en dessous de 50kHz pour rester dans la plage de fonctionnement de ces convertisseurs. Concernant le gain en régime statique, il est approximativement de -20 dB et le système suit un ordre 2 (chute de -40 dB/décade après la fréquence de coupure).

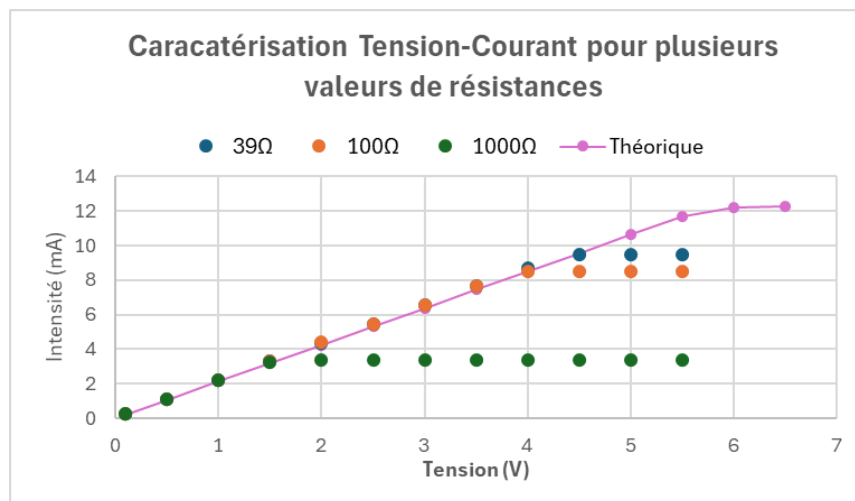


Figure 10 : Caractéristique Tension-Courant

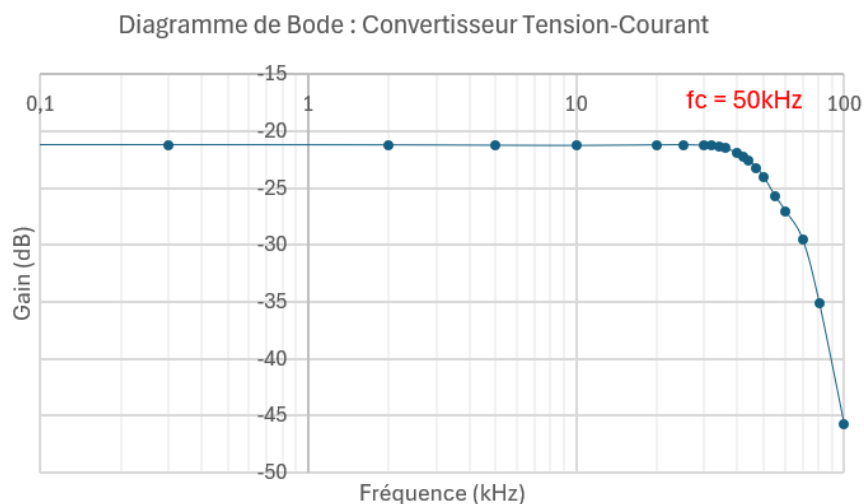


Figure 11 : Réponse en fréquence : Diagramme de Bode du convertisseur

Ensuite, pour mettre en place la détection synchrone, nous avons, dans un premier temps, testé le montage électrique (Figure 12), tout en modélisant les peignes interdigités par un ensemble de résistances et de capacités (Figure 5). Nous avons vérifié cette détection avec le module « Analog Discovery 3 », qui est un appareil de test et de mesure portable et polyvalent qui peut être utilisé comme oscilloscope, générateur de forme d'onde, analyseur logique, etc. et possède un module de détection synchrone. Nous envoyons un signal sinusoïdal (en bleu sur la courbe Figure 13) dans l'ensemble Condensateur-Résistances modélisant le peigne interdigité et les micro-organismes. Nous obtenons en sortie un autre signal sinusoïdal (en vert sur la courbe Figure 13) légèrement déphasé par l'action capacitive du condensateur pouvant s'interpréter comme la présence de micro-organismes et donc comme un changement d'impédance, vu précédemment dans la partie théorique. On voit également l'action du filtre passe bas à 100Hz de la détection synchrone avec le signal continue (en orange sur la courbe Figure 13) qui traduit l'impédance du circuit. En effectuant une simulation du même montage sur LTSpice (Figure 12), on retrouve bien des résultats similaires (Annexe 2).

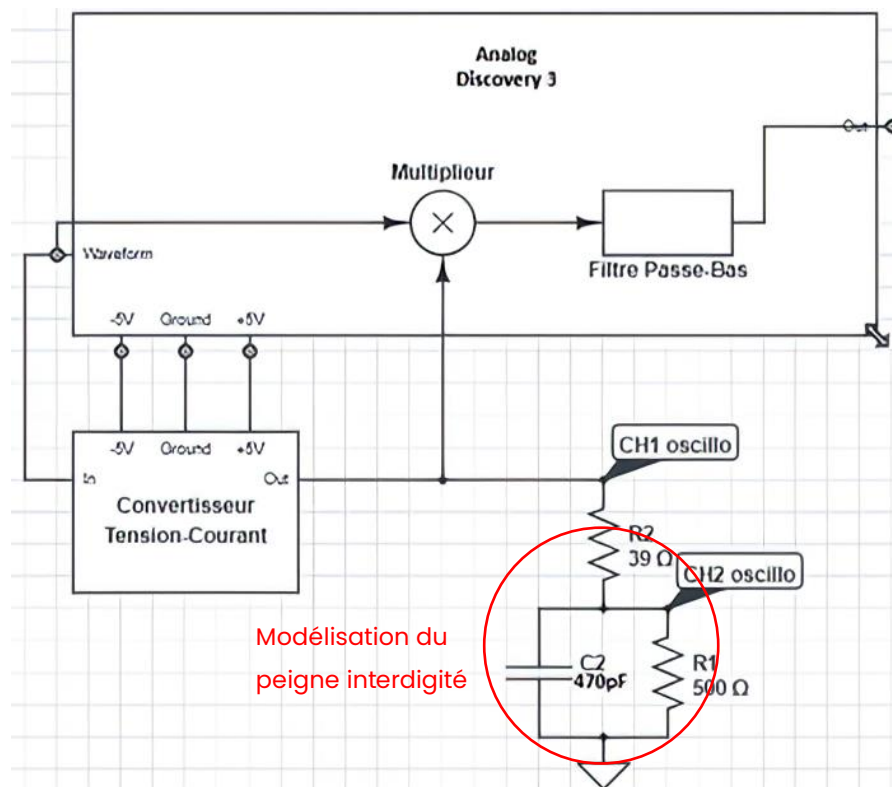


Figure 12 : Schéma du montage de détection synchrone

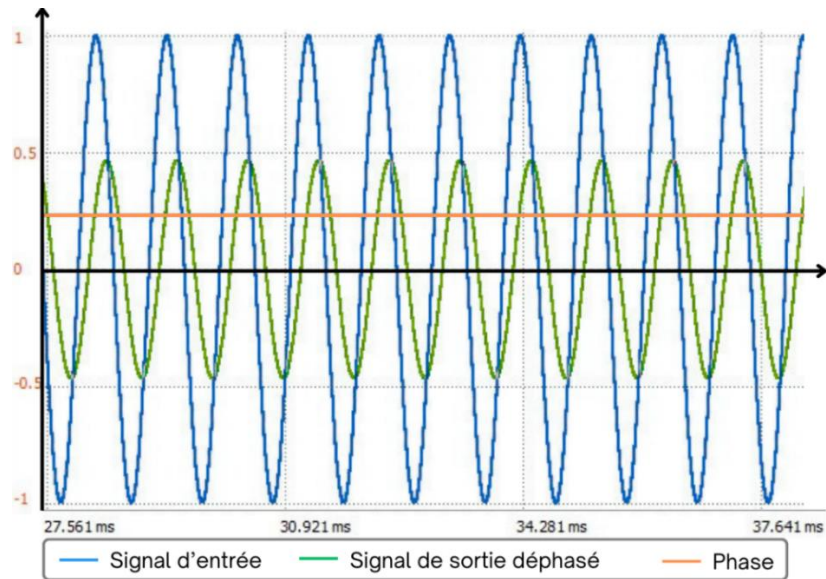


Figure 13 : Signaux du module « Analog Discovery 3 » en détection synchrone

Par la suite, nous nous sommes rendus en salle blanche pour réaliser le premier prototype du peigne interdigité, en suivant des étapes précises et méthodiques. En effet, le peigne est créé sur une base de silicium recouverte d'une fine couche d'oxyde de silicium, qui agit comme un isolant électrique. Après un nettoyage initial (Figure 14) dans un bain d'eau distillée, d'ammoniac (NH_4OH) et d'eau oxygénée (H_2O_2), chauffé à 70°C , nous l'avons métallisée, sous vide, avec un dépôt d'aluminium (Annexe 3). Puis, un second nettoyage réalisé à l'acétone suivi de rinçages à l'éthanol puis à l'eau, a été nécessaire pour éliminer les résidus de colle utilisée lors de la métallisation afin de fixer la plaque de silicium dans la machine.



Figure 14 : Nettoyage initial de la plaque recouverte d'oxyde de Silicium

Vient ensuite l'étape de photolithographie : après un dépôt de résine organique et photosensible sur l'ensemble de la surface d'aluminium suivi d'un chauffage à 120°C (avec un système de centrifugation pour homogénéiser le dépôt), un laser UV vient dessiner la forme du peigne interdigité sur la résine. Puis, cette dernière va disparaître pour ne laisser que la forme du peigne sur l'aluminium avec une solution chimique adéquate. À ce stade, nous avons donc une plaque d'oxyde de silicium entièrement recouverte d'aluminium, avec un peigne en résine qui protège l'aluminium qui se trouve en dessous. La dernière étape, réalisée grâce à un nettoyage à l'acétone suivi de rinçages à l'éthanol et à l'eau, consiste à attaquer l'aluminium non protégé par le masque de résine à l'aide d'un acide, afin de ne conserver que le peigne. Finalement, nous avons réalisé une inspection optique au microscope à la fin du processus pour vérifier la qualité du peigne interdigité (Figure 15).

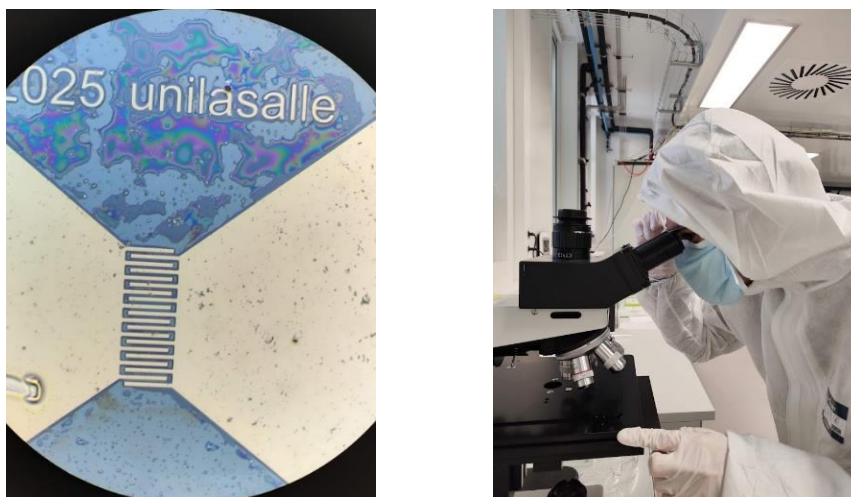


Figure 15 : Contrôle au microscope du peigne interdigité

À la suite de la conception du peigne interdigité en salle blanche, nous l'avons caractérisé pour vérifier si les résultats attendus, tels qu'une variation d'impédance lors d'un dépôt d'eau à sa surface, étaient obtenus. Pour cela, nous avons appliqué une tension dans le peigne, successivement de 1 Volt puis de 4 Volts (Figure 16), afin de connaître sa réponse en fréquence. Ensuite, nous avons déposé une goutte d'eau distillée puis une goutte d'eau du robinet afin de simuler le dépôt de micro-organismes sur le capteur et observer une différence en fréquence.

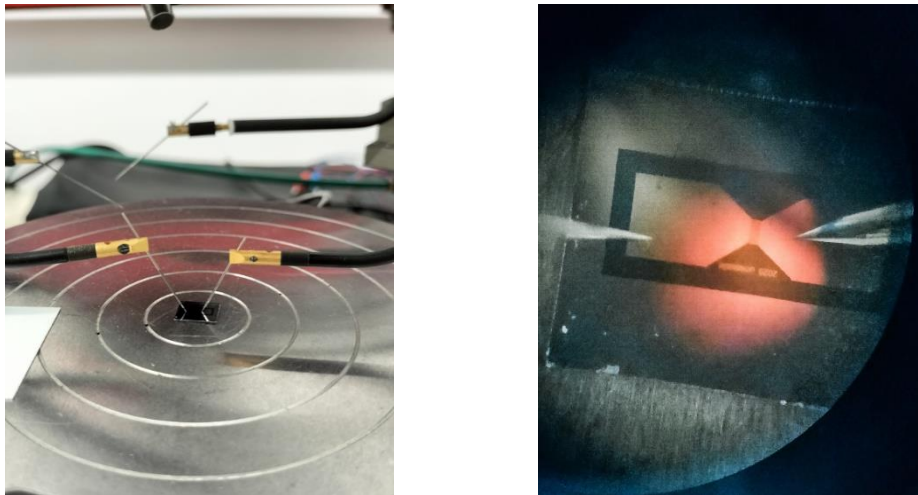


Figure 16 : Test du peigne interdigité

Ainsi, nous obtenons le diagramme de fréquences pour chaque expérience. La courbe résultante prend la forme d'un passe-bas (encadré de la Figure 17). Toutefois, nous obtenons un changement notable uniquement dans les hautes fréquences. L'analyse de la phase (Figure 18) montre également que les résultats varient dans les hautes fréquences, quelle que soit l'expérience menée. En conclusion, il serait d'abord nécessaire d'estimer un ordre de grandeur des quantités à mesurer (notamment des impédances équivalentes des micro-organismes). Cela permettrait de dimensionner un capteur à peigne interdigité en conséquence en ciblant la fréquence appropriée pour optimiser le rapport signal/bruit et enfin d'obtenir des variations détectables de l'impédance dans les basses fréquences.

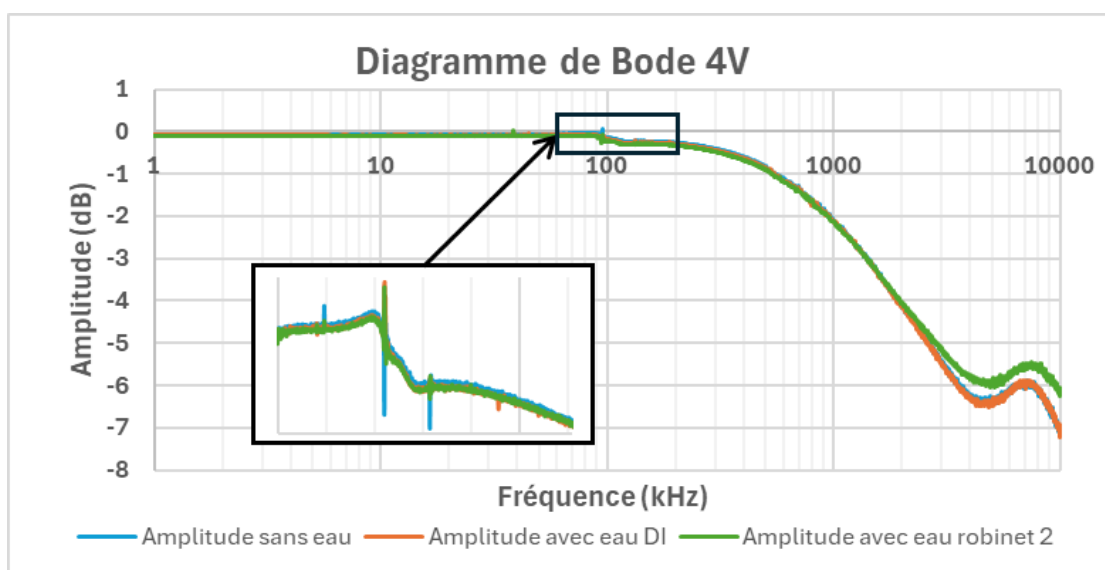


Figure 17 : Diagramme de Bode pour une tension de 4V

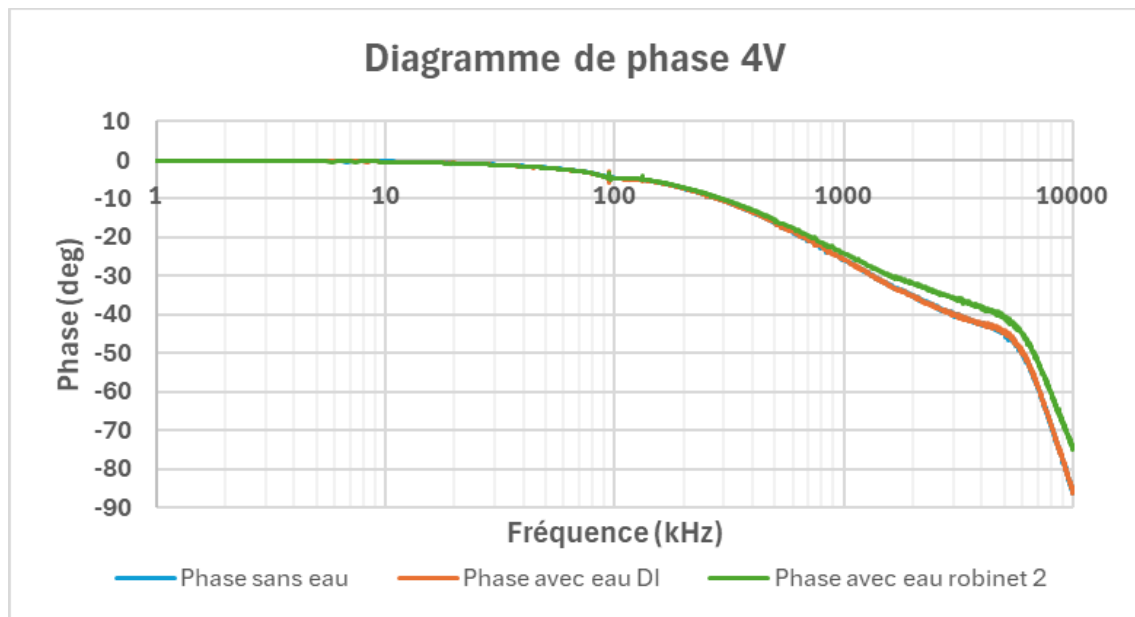


Figure 18 : Diagramme de phase pour une tension de 4V

4. Perspectives

Ce projet de capteur de sol présente plusieurs opportunités d'amélioration. Tout d'abord, l'intégration d'un panneau photovoltaïque pour un apport d'énergie et la transmission des données via Bluetooth ou Wifi permettraient de rendre le système entièrement autonome, facilitant son utilisation sur le terrain (Figure 19). En parallèle, l'ajout de mesures à hautes fréquences pourrait ouvrir la voie à des détections en surface, offrant une analyse complémentaire des micro-organismes présents dans les couches superficielles du sol.

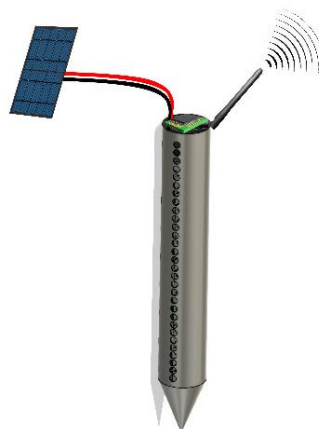


Figure 19 : Modélisation 3D du prototype final du capteur

Une autre perspective intéressante réside dans l'introduction de substrats spécifiques, tels que sur des lamina-baits (Figure 20), directement sur le capteur. Cette innovation permettrait de comparer les micro-organismes en fonction de leur profondeur, fournissant ainsi une cartographie plus détaillée et stratifiée des populations microbiennes. De la même manière, si l'on réalise une multitude de peignes interdigités, l'un en dessous de l'autre, on pourrait également avoir une mesure de l'impédance d'un point de vue spatial puisqu'on aurait ces données pour chaque peigne, et donc à différentes profondeurs. Par ailleurs, le capteur pourrait être équipé d'une lame de verre permettant de récupérer les micro-organismes détectés pour une observation directe au microscope. Cette démarche faciliterait la corrélation entre les données électriques d'impédances obtenues par le capteur et les études biologiques des micro-organismes.

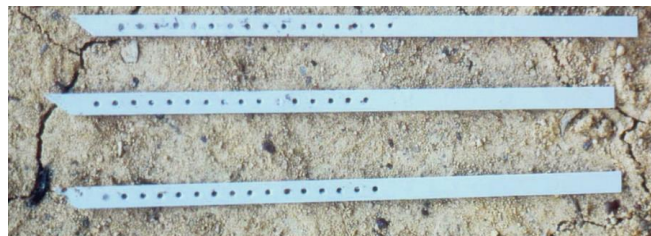


Figure 20 : Photo de lamina-baits

Enfin, il reste à finaliser la conception de la structure complète du capteur, notamment à travers l'utilisation de l'impression 3D. Cette étape permettra de créer un prototype fonctionnel, optimisant la configuration du capteur pour répondre aux exigences spécifiques de l'application tout en réduisant les coûts de fabrication (Figure 19). D'un point de vue plus technique, il serait pertinent d'améliorer les dimensions des peignes pour qu'ils aient une meilleure réponse des micro-organismes en fréquence et en gain. De la même manière, un ajustement conséquent de la bande-passante et du gain des convertisseurs Tension-Courant permettrait de les utiliser dans la plage de réponse plus adaptée.

Finalement, bien que des travaux restent à mener, le projet a permis d'établir une vision globale d'un nouveau capteur basé sur des mesures d'impédance, en intégrant des aspects essentiels tels que le principe différentiel, la mesure par détection synchrone et la structure en « carotte ». Ces avancées constituent ainsi une base solide pour les développements futurs du système.

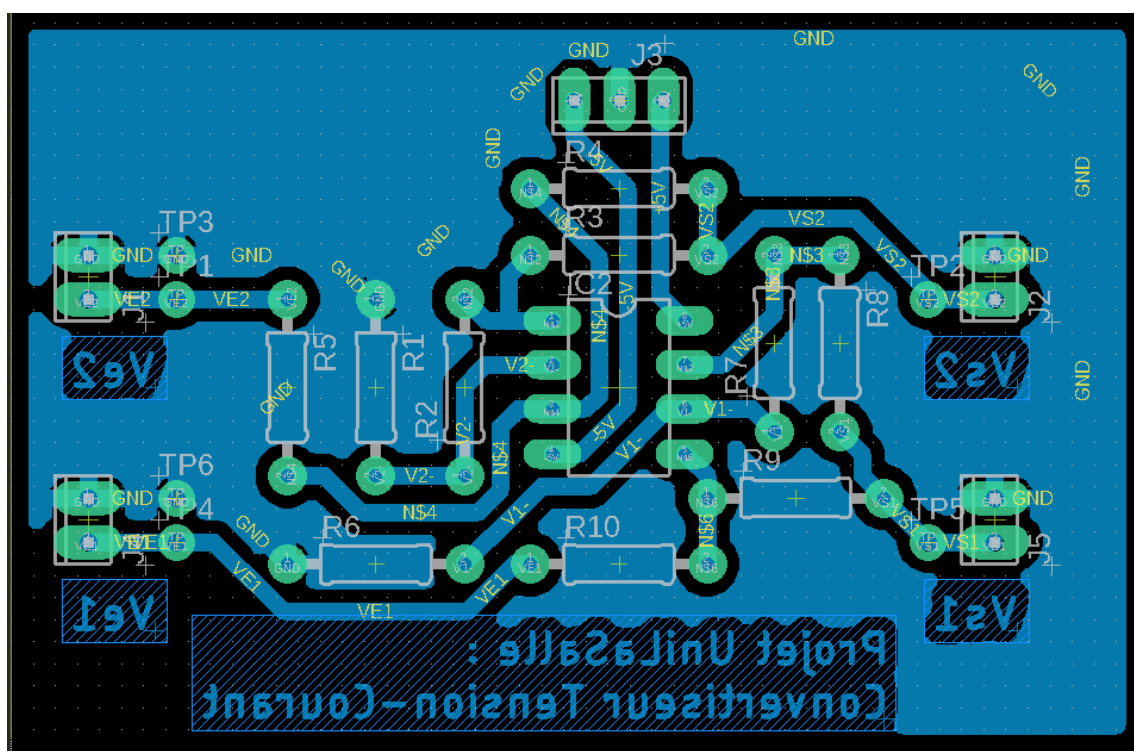
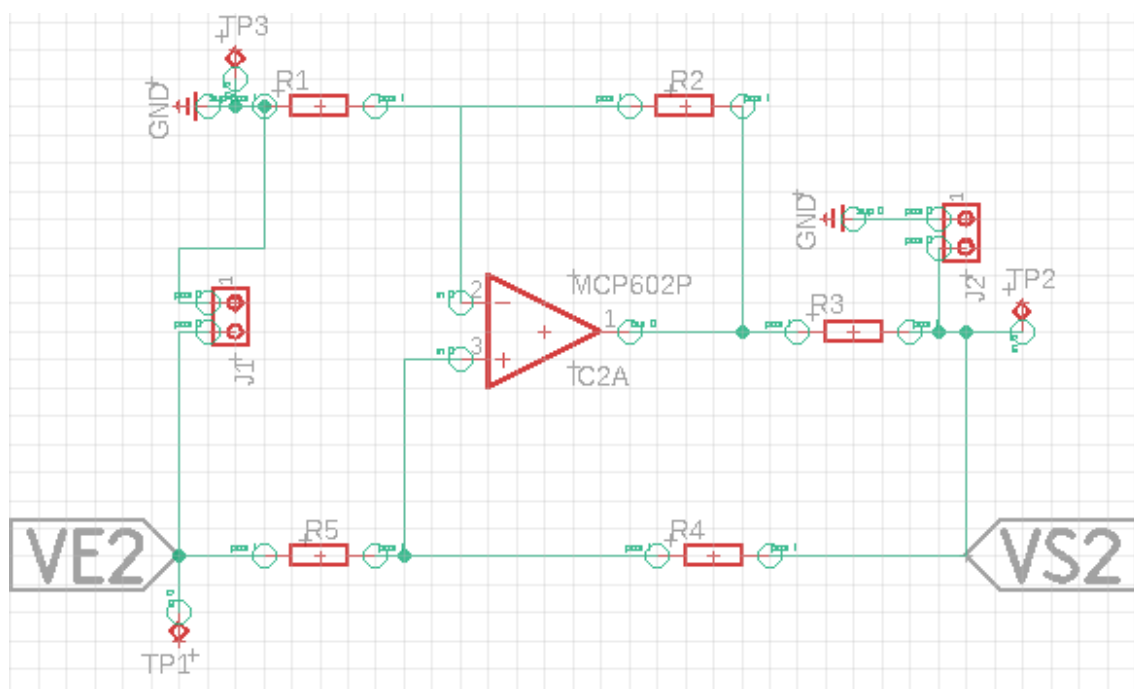
TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma des différents groupes de la biodiversité du sol classés par taille (Source : Quentin VINCENT – Étude des paramètres abiotiques, biotiques et fonctionnels, et de leurs interactions dans des sols délaissés. Thèse de doctorat – Université de Lorraine – https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01896274/document)	5
Figure 2 : Cycle de l'azote (Source : Wassila RIAH-ANGLET – Support de cours "Fertilité biologique des sols : lien entre la biodiversité, les fonctions et les systèmes de culture")	6
Figure 3 : Arbre des choix pour le développement du capteur de biodiversité	7
Figure 4 : Schéma 3D de l'extérieur du capteur	9
Figure 5 : Modélisation électrique Cole-Cole du peigne avec micro-organismes	10
Figure 6 : Schéma de principe de l'ensemble du système de mesure	10
Figure 7 : Schéma de principe de la mesure différentielle	11
Figure 8 : Schéma de principe de la détection synchrone	12
Figure 9 : Carte électronique du convertisseur Tension-Courant	12
Figure 10 : Caractéristique Tension-Courant	13
Figure 11 : Réponse en fréquence : Diagramme de Bode du convertisseur	13
Figure 12 : Schéma du montage de détection synchrone	14
Figure 13 : Signaux du module « Analog Discovery 3 » en détection synchrone	15
Figure 14 : Nettoyage initial de la plaque recouverte d'oxyde de Silicium	15
Figure 15 : Contrôle au microscope du peigne interdigité	16
Figure 16 : Test du peigne interdigité	17
Figure 17 : Diagramme de Bode pour une tension de 4V	17
Figure 18 : Diagramme de phase pour une tension de 4V	18
Figure 19 : Modélisation 3D du prototype final du capteur	18
Figure 20 : Photo de lamina-baits	19

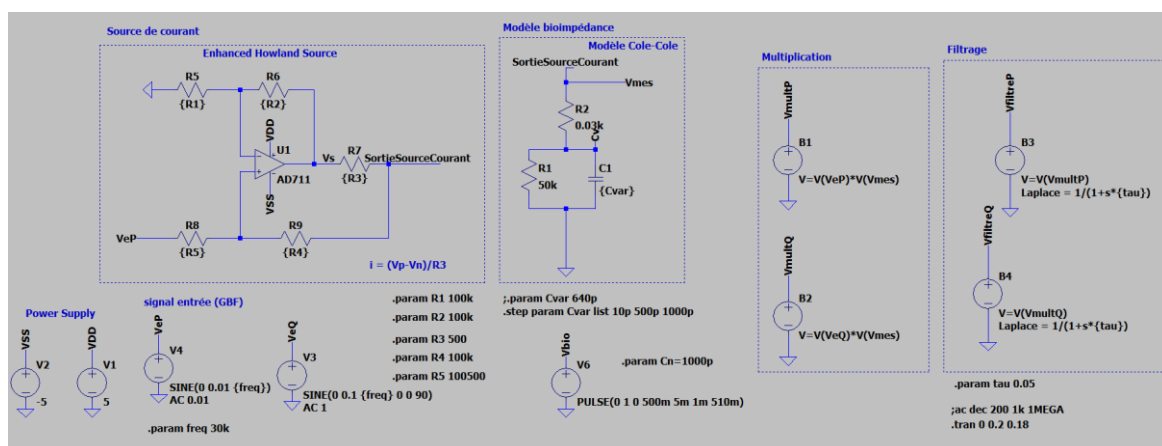
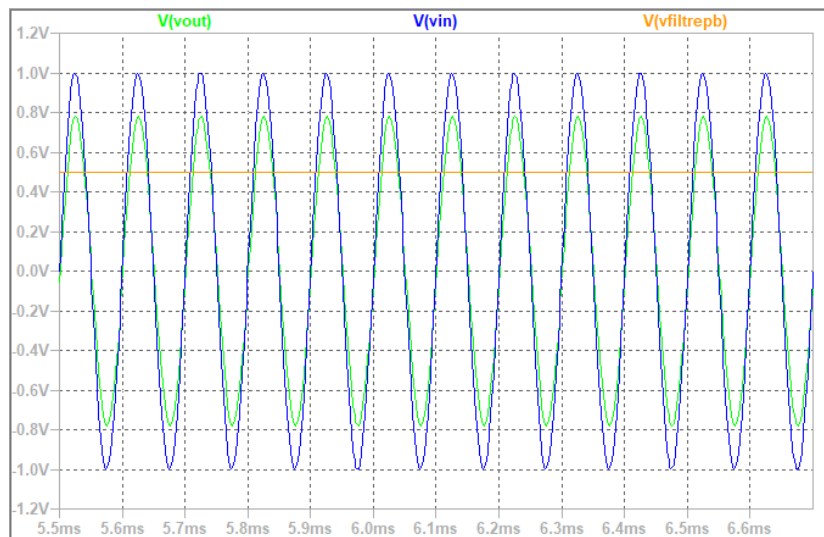
ANNEXES

Annexe 1 : Schéma électrique Eagle du premier convertisseur de Tension-Courant, et routage de l'ensemble des deux convertisseurs	21
Annexe 2 : Simulation LTSpice de la détection synchrone	22
Annexe 3 : Préparation pour le dépôt d'aluminium	22

ANNEXES



Annexe 1 : Schéma électrique Eagle du premier convertisseur de Tension-Courant, et routage de l'ensemble des deux convertisseurs



Annexe 2 : Simulation LTSpice de la détection synchrone



Annexe 3 : Préparation pour le dépôt d'aluminium

REFERENCES

- [1] P.-A. Bourque, «Le cycle de l'azote - Le cycle du carbone,» 2 août 2010. [En ligne]. Available: http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html. [Accès le 2025].
- [2] B. Kuang, H. S. Mahmood, M. Z. Quraishi, W. B. Hoogmoed, A. M. Mouazen et E. J. van Henten, «Sensing Soil Properties in the Laboratory, In Situ, and On-Line : A Review,» *Advances in Agronomy*, vol. 114, pp. 155-223, 2012.
- [3] R. Viscarra Rossel, V. Adamchuk, K. Sudduth, N. McKenzie et C. Lobsey, «Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time,» *Advances in Agronomy*, vol. 113, pp. 243-291, 2011.
- [4] S. Hamimed, Y. Mahjoubi, N. Abdeljelil, A. Abdeljelil, A. Othmani, A. Barhoum et A. Chatti, «Chemical sensors and biosensors for soil analysis: principles, challenges, and emerging applications,» *Advanced Sensor Technology*, n° 118, pp. 669-698, 2023.
- [5] G. Archbold, C. Parra, H. Carrillo et A. M. Mouazen, «Toward the implementation of ISFET sensors or in-situ and real-time chemical analyses in soils : A practical review,» *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023.
- [6] X. Li, X. Wang , Q. Zhao, Y. Zhang et Q. Zhou, «In Situ Representation of Soil/Sediment Conductivity Using Electrochemical Impedance Spectroscopy,» *Sensors*, vol. 16, n° 1625, 2016.
- [7] A. R. A. Rahman, J. Register, G. Vuppala et S. Bhansali, «Cell culture monitoring by impedance mapping using a multielectrode scanning impedance spectroscopy system (CellMap),» *PHYSIOLOGICAL MEASUREMENT*, n° 129, p. 227–239, 2008.
- [8] A. Bailleul, J. Claudel, F. Poullétier de Gannes, G. N'kaoua, F. Kolbl, F. Soulier, N. Lewis , S. Bernard et S. Renaud, «In vitro impedance spectroscopy: A MEA-based measurement bench for myoblasts cultures monitoring,» 2021.
- [9] D. Mojena-Medina, M. Hubl, M. Bäuscher, J. L. Jorcano, H.-D. Ngo et P. Acedo, «Real-Time Impedance Monitoring of Epithelial Cultures with Inkjet-Printed Interdigitated-Electrode Sensors,» *Sensors*, vol. XX, n° 15711, 2020.



Ecole Publique d'ingénieures et d'ingénieurs en 3 ans

6 boulevard Maréchal Juin, CS 45053
14050 CAEN cedex 04

