



MASTER OF SCIENCE
IN ENGINEERING

Hes·SO

Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Fachhochschule Westschweiz

University of Applied Sciences and Arts
Western Switzerland

Master of Science HES-SO in Engineering
Av. de Provence 6
CH-1007 Lausanne

Master of Science HES-SO in Engineering

Orientation : Electrical Engineering (EIE)

Leaf Wetness Sensor

Fait par

Nathan Miéville

Sous la direction de

Prof. Marizio Tognolini

Dans le groupe de recherche Systèmes embarqués communicants de la HES-SO Valais

Lausanne, HES-SO Master, 2022

Accepté par la HES-SO Master (Suisse, Lausanne) sur proposition de
Professeur Prof. Marizio Tognolini, conseiller du projet d'approfondissement

Lausanne, le 29 mai 2023

Prof. Marizio Tognolini
Conseiller du PA

Philippe Barrade
Responsable de la filière Electrical Engineering

Remerciements

...

Table des matières

1	Introduction	6
2	Etat de l'art	7
3	Analyse fonctionnel	9
3.1	Besoin	9
3.2	Fonction principale et contrainte	9
3.3	Architecture du système	12
4	Conception	14
4.1	Circuit	14
4.2	Dipôle	15
5	Simulation	16
5.1	Création du modèle	16
5.1.1	Géométrie	16
5.1.2	Physique	17
5.1.3	Maillage	17
5.2	Exploitation	18
5.2.1	20 pistes	18
5.2.2	5 et 10 pistes	21
5.2.3	Plan de cuivre	22
6	Measure	24
6.1	Conception	24
6.2	Measure capacitive par filtre RC	25
6.3	Convertisseur Capacitif	27
7	Conclusion	30
8	Bibliographie	31

1 Introduction

L'Agriculture doit évoluer pour faire face aux défis de notre époque. De nombreuses solutions sont en développement pour aider les agriculteurs à produire durablement, en respect avec la nature et en utilisant le moins de ressource possible tout en gardant une production suffisante pour atteindre la souveraineté alimentaire. L'agriculture de précision est une des solutions à toutes ces problématiques. L'objectif est d'utiliser la technologie pour produire mieux. En observant et en mesurant le plus de variable possible nous sommes capables, grâce à des modèles, de prévoir les besoins d'une plantation et ainsi mieux optimiser la production en consommant moins de ressource tel que l'eau, les engrais ou les pesticides.

Pour répondre à cette demande, JDC Electronic s'est lancé le défi de proposer une solution complète, facilement déployable par les agriculteurs. Nous voulons proposer un assortiment de capteur centralisé sur une seule plateforme. Cette plateforme embarquera plusieurs modèles pour différents aspects de la production. L'interface sera facilement lisible pour un agriculteur et donnera des indications claires en temps réel sur les moyens d'optimisations. Un projet innovant a été lancé en 2021 en collaboration avec Agroscope et l'institut IICT de l'heig-vd. Il portait essentiellement sur la mesure et l'analyse du diamètre d'un fruit au cours de sa croissance en fonction de son arrosage. L'objectif est d'avoir un meilleur contrôle sur l'eau. Ce projet a permis le développement de l'écosystème des capteurs et de la plateforme et a abouti à des mesures en conditions réelles dans des plantations de professionnels. Les étapes suivantes sont l'agrandissement de la gamme de capteur, la mise en production puis la commercialisation.

Une des voies que JDC Electronic aimerait développer est la prévention des maladies agricoles. Les plantations sont les proies de nombreuses maladies qui peuvent être dévastatrices. Des modèles existent pour aider les agriculteurs à traiter au bon moment et éviter de devoir retraiter de nombreuses fois ou même de perdre leur production. L'un des modèles les plus utilisés [1] se base sur la durée d'humectation. C'est-à-dire sur le temps que les gouttes créées par la rosée ou la pluie restent sur la feuille. Un capteur d'humectation permet d'obtenir cette grandeur.

L'objectif de ce travail sera d'effectuer une pré-étude afin de déterminer la faisabilité d'un tel capteur, de définir un cahier des charges et de fournir une preuve de concept. Nous commencerons par étudier ce qui se fait déjà avec un état de l'art. Les premières pistes nous permettront d'effectuer une analyse fonctionnelle afin de définir clairement nos besoins et nos contraintes et ainsi être sûr de ne rien oublier. Le cahier des charges sera défini. Dans une partie conception nous mettrons en pratique ce que nous avons appris de notre analyse afin d'obtenir une vue concrète de notre capteur. Nous pourrions mettre en place une simulation afin de définir les dernières variables. Et enfin, nous effectuerons des mesures sur une collection de configurations choisies avec la simulation afin de présenter une preuve de concept.

2 Etat de l'art

Pour la mesure de l'humectation, deux grandes familles de capteurs existent. Les capteurs résistifs fonctionnent à l'aide de deux électrodes en peigne. Lorsqu'une goutte se forme entre deux doigts du peigne la résistance mesurée change. Cette technique est simple et peu coûteuse mais les gouttes doivent être suffisamment grosses pour toucher deux doigts du peigne. Pour contrer ce problème une peinture ou un papier absorbant est posé sur les électrodes. Ce procédé ajoute un problème de faux positif. La couche absorbe aussi l'humidité de l'air et le point de transition entre une feuille humide ou sèche est mal définie. Ces capteurs demandent une attention toute particulière à la calibration. Les couches absorbantes s'abîment vite et doivent être changées périodiquement. Davis[2], SPECTRUM Technologies Inc.[3] et Caipos GmbH [4] proposent ce type de capteur. Metos propose un capteur un peu similaire. A la place d'un peigne sous une surface absorbante il n'a que deux électrodes à chaque extrémité de la surface. Le principe reste le même que pour les autres et souffrent des mêmes inconvénients.



FIGURE 1 – Capteur Résistif Davis [2]

La deuxième famille sont les capteurs capacitifs. Ils sont beaucoup moins répandus car plus complexes et plus chers. Un seul constructeur commercialise. Meter [5] anciennement DECAGON produit le PHYTOS31. Ce même capteur est repris par plusieurs revendeurs qui l'intègrent dans leur écosystème. C'est par exemple le cas de EVVOS [6].



FIGURE 2 – Capteur capacitifs PHYTOS31 [6]

Un capteur capacitif utilise aussi deux électrodes en peigne mais elles ne sont pas en contact direct

avec l'eau. Elles sont protégées par une couche de résine imperméable qui reproduit la surface d'une feuille. La capacité est mesurée entre les deux électrodes. La mesure utilise les propriétés diélectriques de l'eau et sa permittivité relative de 80. Lorsqu'une goutte se pose, la capacité augmente. Ce type de capteur n'a pas les désavantages des capteurs résistifs. Il n'a pas besoin d'être calibré à l'installation. Il est, par contre, plus complexe à développer avec une mesure de capacité. L'université polytechnique de Catalogne en Espagne a sorti un papier[7] dans lequel il développe un tel capteur avec comme objectif de créer une alternative bon marché. Ils ont réussi à obtenir un prototype convaincant.

Durant ce projet nous nous concentrerons sur les capteurs capacitifs. Ces avantages surpassent le fait qu'il soit plus complexe et plus coûteux à mettre en place. La mesure de capacité est très utilisée dans pleins d'autre type de capteurs. Les capteurs tactiles s'approchent par leur conception de ce que nous cherchons à atteindre. Ces capteurs utilisent le fait que le corps humain, dont les doigts, sont composé en majorité d'eau. Une variation de capacité est mesuré quand l'utilisateur pose son doigt sur un diélectrique. Plusieurs circuits intégrés sont utilisés par les capteurs tactiles par ex FDC1004 [8],AD7745 [9],AD7150 [10]. Ils mesurent la capacité en excitant un pôle et en mesurant l'autre à l'aide d'un convertisseur sigma delta du deuxième ordre. la capacité est ensuite converti en valeur numérique. Ces circuits sont une possibilité pour notre application.

3 Analyse fonctionnel

3.1 Besoin

Afin d'être sûre de commencer dans la bonne direction nous devons définir clairement les besoins auquel notre capteur devra répondre. Comme décrit précédemment, le besoin principal est la prévention du développement de maladie. Il existe des modèles empiriques qui se basent sur le temps d'humidité sur la feuille. Cette variable est difficile à déterminer par les données météo classique (humidité, température, vents etc). Le recours à un capteur d'humectation est utile dans ce cas là. Un autre besoin est pour l'aide aux traitements. La plupart des traitements chimiques d'une plantation doivent être effectués lorsque les feuilles sont sèches. Un capteur d'humectation doit permettre de fournir cette information rapidement.

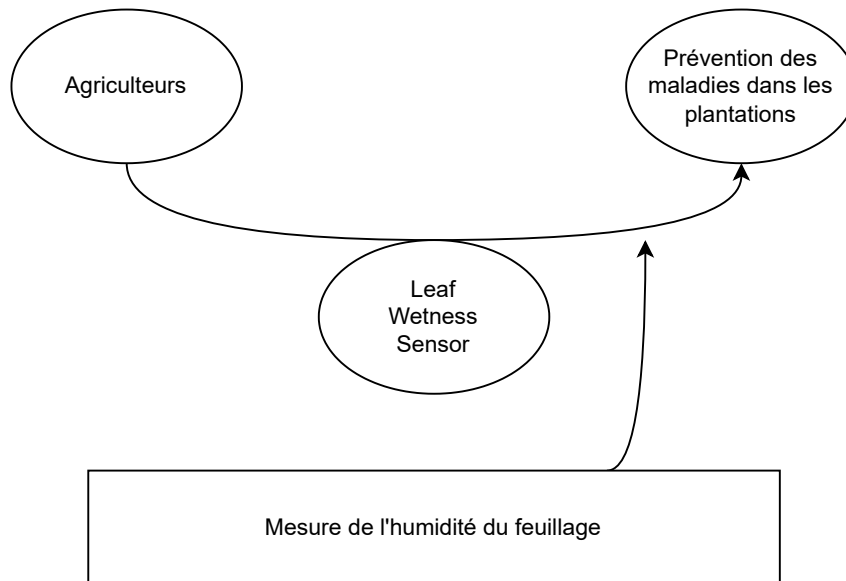


FIGURE 3 – Le besoin principale exprimé sous la forme d'un diagramme bête à cornes.

3.2 Fonction principale et contrainte

Pour répondre aux besoins, la fonction principale sera de mesurer l'humectation des feuilles. Cette fonction s'accompagne de plusieurs contraintes apportées par l'environnement dans lequel s'inscrit le capteur. Pour être sûre de n'en oublier aucune, nous nous aidons d'un diagramme pieuvre.

- FC1** Il est développé dans le cadre du projet JDC Smart Farming. Il devra être compatible avec le système déjà créé.
- FC2** Il sera déployé dans des plantations avec une batterie comme source d'énergie. La consommation doit être contrôlée.
- FC3** En extérieur la météo peut faire varier l'environnement du capteur. Il devra être robuste à ces changements pour qu'il n'influence pas les mesures.
- FC4** Les intempéries que subira le capteur ne doivent pas l'endommager ou compromettre les mesures.
- FC5** Dans les plantations, il y a régulièrement des tracteurs et des machines qui passent entre les plantes. Le capteur ne doit pas gêner ou être gêner par ces passages. Sa taille doit être contrôlée.
- FC6** L'installation et la maintenance pourra être faite par des agriculteur sans formation technique. Le capteur doit être simple d'installation et de maintenance.
- FC7** Le capteur est développé pour être commercialisé. Il doit répondre aux norme et être certifié.

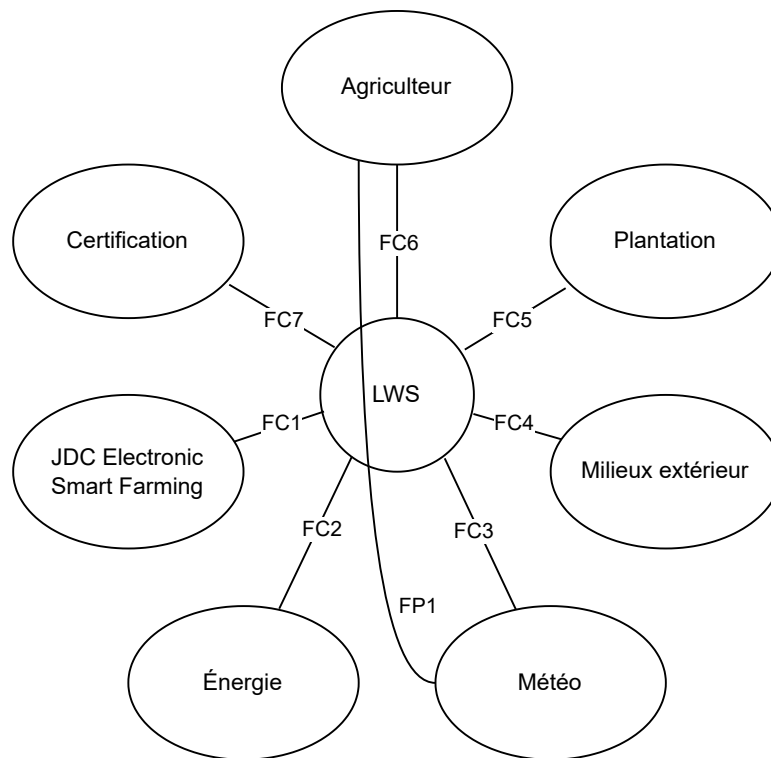


FIGURE 4 – Fonctions principales et contraintes sous la forme d'un diagramme pieuvre

Après avoir énoncé la fonction principale et toutes les contraintes nous pouvons définir des critères pour chacune d'elles ainsi que des niveaux qui répondent à ces critères. Cela nous permet de construire le cahier des charges auquel nous nous référons pour la conception.

FP1 La mesure d'humectation des feuilles se fera au travers d'une mesure de l'humidité relative d'une surface. Elle se donne en pourcentage tel que 0% correspond à une feuille totalement sèche et 100% la feuille est entièrement recouverte d'eau. Puisque nous ne connaissons pas encore les performances de notre capteur nous utiliserons la résolution maximale qu'autorise la structure de registre de JDC pour ce type de capteur. La valeur sera stockée sur 1 octet non signé avec une résolution de 0.5%. La précision est calquée sur la résolution et donne une valeur de 0.25%. Ces valeurs sont très optimistes et nous nous réservons le droit de les changer après une évaluation des performances du capteur plus tard dans le développement.

FC1 L'environnement Smart Farming JDC se compose d'un émetteur LoRa auxquels sont reliés plusieurs capteurs au travers d'un bus I2C. Pour que notre capteur soit compatible, il doit impérativement répondre à plusieurs critères. L'interface de sortie doit être évidemment un I2C. La structure des registres accessibles est normalisée pour que l'émetteur puisse lire correctement les valeurs afin de les transmettre. Un temps maximal de mesure est défini. Il représente le temps entre le démarrage du capteur jusqu'à que les valeurs de la mesure soit prêtes. Le capteur devra être câblé sur le connecteur commun à tous les capteurs JDC. Pour finir, l'alimentation fournie par l'émetteur est de 3.3V le capteur devra fonctionner à cette tension.

FC2 La source d'alimentation du capteur sera une batterie située au niveau de l'émetteur. Tous les capteurs d'un même émetteur partagent donc la même source. Les capteurs ne sont pas alimentés entre deux mesures. Nous n'avons pas besoin de nous préoccuper de la consommation au repos. En marche, le courant, que nous prendrons comme critère, ne doit pas dépasser 1mA. Ce chiffre avait été calculé par rapport au nombre maximal de capteurs, la capacité de la batterie et l'autonomie souhaitée.

FC3 Le facteur météorologique qui pourra le plus fausser nos mesures est l'humidité de l'air. Si l'air est chargée en eau, sa constante diélectrique changera et pourra impliquer une augmentation de la capacité alors que la surface est complètement sèche. Pour que ce phénomène n'influence en aucun cas nos mesures,

le delta de capacité doit être inférieur à la précision. Cette variation devra être contrôlé et mesurée car elle pourrait dégrader la précision du capteur.

FC4 L'utilisation extérieur du capteur nécessite qu'il soit étanche aux intempéries. Avec la norme IP65 comme objectif, le capteur sera suffisamment protéger des plus grosses pluies ainsi que des traitements pulvérisés sur les cultures.

FC5 Pour s'intégrer aux mieux dans les plantations le capteur ne devra pas être trop volumineux. Nous prendrons arbitrairement une envergure maximum de 20 cm. Cela correspond à une moyenne des capteurs existant sur le marché.

FC6 La facilité d'installation a déjà été pensée et est garantie par la contrainte **FC1**.

FC7 Pour être proposé sur le marché le capteur doit être certifié. Il doit posséder le CE pour être distribué en Europe et une certification de compatibilité électromagnétique pour garantir que le capteur respecte les normes en vigueur.

Le cahier des charges résume tous les critères et leur niveau pour chaque contrainte.

	Fonctions	Critères	Niveaux
FP1	Mesurer l'humectation des feuilles	Mesure d'humidité relative d'une surface	RH de 0% à 100% résolution de 0.5% précision +/- 0.25%
FC1	S'intégrer dans l'environnement Smart Farming JDC	Interface de sortie I2C	Baud rate 100KHz. Adresse configurable
		Structure de registre normalisé,	(voir doc JDC)
		Démarrage de la mesure et acquisition après un temps.	50ms pour la capture de la mesure
		Connecteur JDC	Sortie 4 fil avec VCC,GND,SDA,SCL
FC2	Consommer peu d'énergie	Alimentation normalisée	Tension 3.3V
FC3	Eviter les faux positifs dus à la météorologie	Courant maximum établi en fonctionnement	1 mA
FC4	Résister aux milieux extérieurs	L'humidité de l'air ne doit pas influencer la mesure	L'incidence de RH de l'air < précision (0.25%)
FC5	S'intégrer dans les plantations	Le capteur est protégé des intempéries et supporte une utilisation extérieure	Étanche IP65
FC6	Être facile d'installation	La taille du capteur ne doit pas gêner l'exploitation des plantations	Envergure maximum de 20cm
FC7	Être Certifié	Le capteur doit pouvoir être installé par des agriculteurs sans formation technique	Système d'attache et un seul connecteur à brancher
		Le capteur doit être certifié pour être proposé sur le marché	Certification EMC,CE

TABLE 1 – Cahier des charges

3.3 Architecture du système

En nous basant sur le cahier des charges, nous pouvons commencer à concevoir l'architecture de notre capteur. Pour nous aider dans cette tâche nous utiliserons un diagramme FAST. Il nous permettra méthodiquement de faire la liste de tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement du capteur.

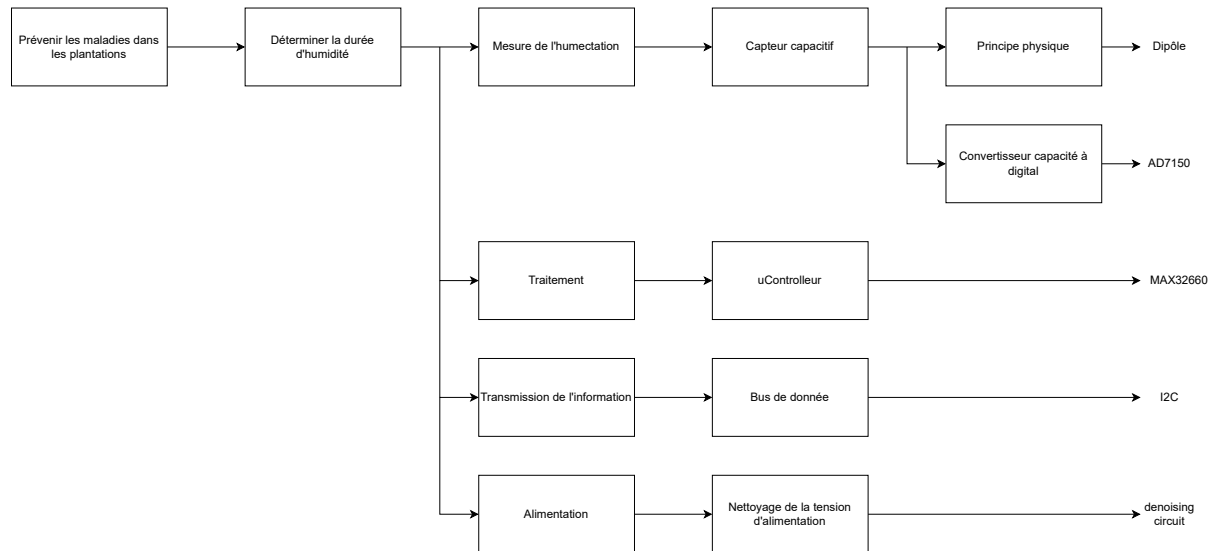


FIGURE 5 – Diagramme FAST

Plusieurs choix techniques ont été fait pendant cette phase d'architecture. Le MAX32660 a été choisi comme micro-contrôleur. JDC l'utilise déjà dans ses capteurs. Plusieurs librairies ont déjà été créés pour intégrer le capteur dans l'environnement JDC ce qui facilitera le développement. Le micro-contrôleur a tous les périphériques que nous avons besoin et est prévu pour la faible consommation. Il ira très bien dans notre application.

L'AD7150 a été choisi parmi les différents convertisseurs capacitifs présentés pendant l'état de l'art. La sélection c'est fait sur la consommation des circuits intégrés. L'AD7745 et le FDC1004 ont une consommation en travail de $900\mu\text{A}$. C'est beaucoup trop si on prends en compte le fait qu'un micro-contrôleur s'ajoute à la consommation. Nous serions au-dessus des 1mA . L'AD7150 consomme $100\mu\text{A}$ ce qui nous laisse plus de marge. Une carte de développement est disponible à l'achat pour réaliser nos premières mesures. A ce stade il est trop difficile d'estimer la capacité que nous auront à mesurer. Nous prendrons les bornes de ce capteur comme référence pour la création du dipôle. Si nous observons que nous sommes complètement en dehors, nous réévaluerons le choix du convertisseur.

L'alimentation provient du transmetteur et elle est transporté à travers un câble. Pour une mesure correcte, l'alimentation doit être le plus propre possible. Un nettoyage de la tension d'alimentation devra être fait. Nous n'aurons pas l'occasion d'étudier ce circuit dans ce travail car nous utiliserons pour les mesures des cartes de développement qui embarquent leur propre alimentation. Néanmoins, cette partie ne doit pas être négligé pendant la suite du développement.

Nous pouvons dès à présent mettre tous nos choix bout à bout pour établir un Schéma block sur lequel nous nous baserons pour la conception. Une recherche dans la datasheet du circuit de mesure de la capacité nous apprend les bornes exacte ainsi que la résolution numérique de la valeur mesurée. Nous pouvons alors tracer la chaîne complète de mesure de notre capteur.

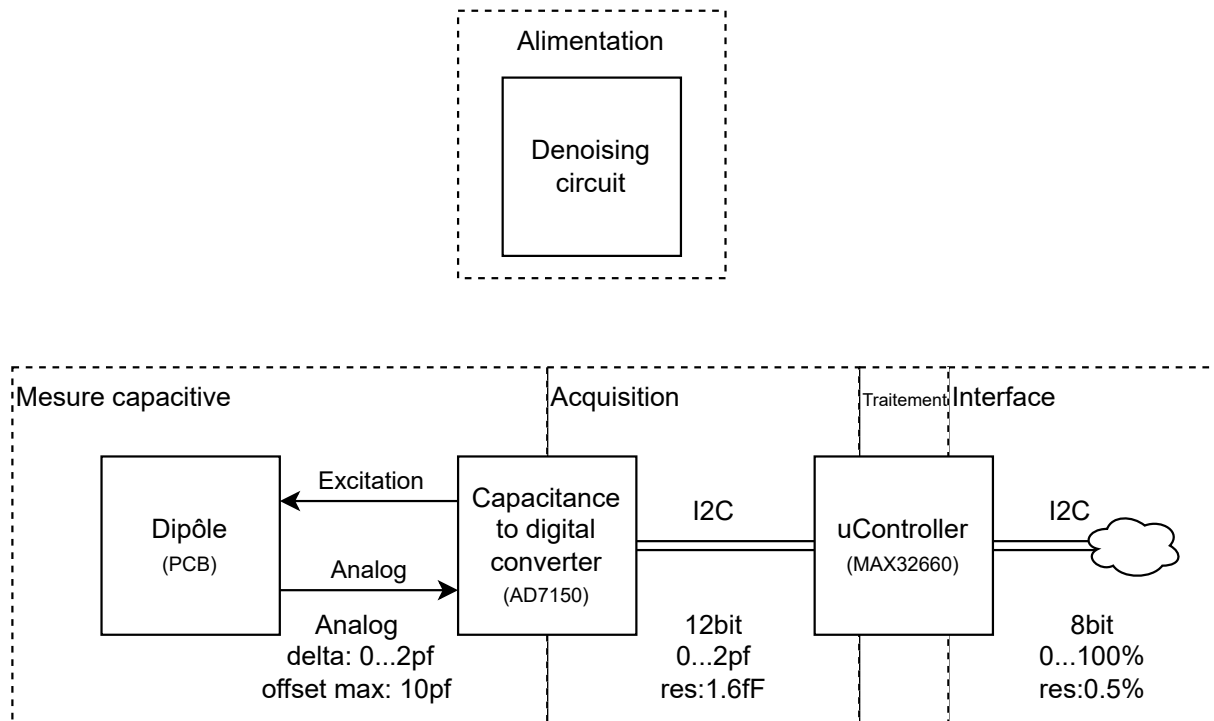


FIGURE 6 – Schéma Block

4 Conception

4.1 Circuit

L'objectif de ce travail est d'analyser et de valider le principe physique de notre capteur. Nous nous contrerons principalement sur le dipôle. Nous établissons un schéma électrique du capteur pour nous aider lors du câblage des cartes de développement. Ce schéma ne comporte pas la gestion de l'alimentation car ce qui nous intéresse est la chaîne de mesure.

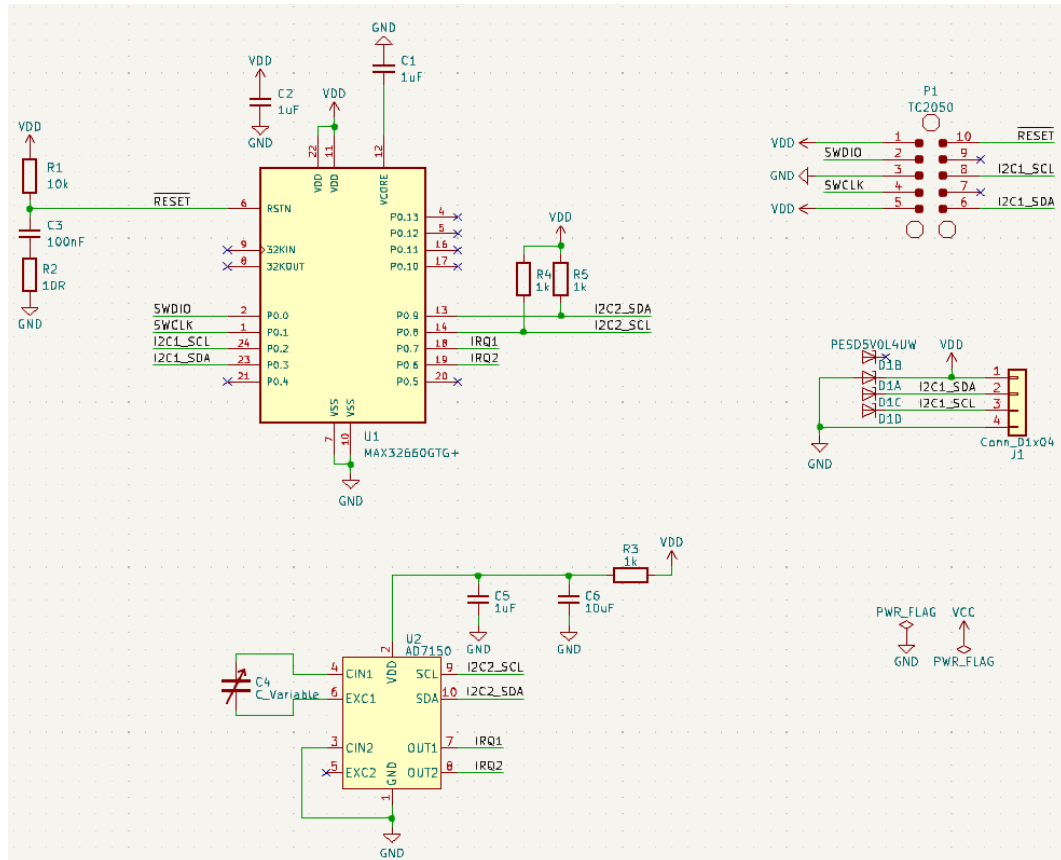


FIGURE 7 – Schéma électrique

Sur ce schéma C4 représente le dipôle. Il est connecter sur le premier port du convertisseur. Un pôle est connecter sur la pin d'excitation et l'autre sur l'entrée analogique. La conversion est faites en excitant d'un côté et en mesurant la charge de l'autre. La valeur est stocké dans un registre prête à être lu par l'I2C. Un filtre conseillé par la datasheet est câblé sur l'alimentation de l'AD7150. Le micro-contrôleur est connecter aux convertisseur par les deux pin de l'I2C, clock et donnée. On utilise le deuxième I2C pour le convertisseur et le premier pour l'interface extérieure. Les pull-up obligatoire sont connecter sur le deuxième I2C mais pas sur le premier car elle se trouve déjà aux niveau de l'émetteur. Les deux sortie numérique sont aussi connecter au micro-contrôleur. Nous ne les utiliserons pas tout de suite mais nous nous en laissons la possibilité. Le connecteur P1 est un tag pour flasher le micro. Il est relié aux pin nécessaire pour sa tâche et à l'I2C d'interface à des fin de debug. Et finalement le connecteur J1 permet de sortir l'interface I2C et apporte l'alimentation. Des diode protège le circuit contre les surtensions.

4.2 Dipôle

Le dipôle est la partie de notre capteur qui transforme une variable physique en un paramètre électrique. Dans notre cas il transforme une quantité d'eau sur la surface en une variation de capacité. Pour comprendre comment cela fonctionne il faut comprendre ce qu'est une capacité électrique. $C = \frac{Q}{U}$ définit la capacité (C) comme la charge (Q) stocké par rapport à une tension (U) donné. La capacité d'un dipôle est influencé par trois paramètres. La surface du conducteur l'augmente. La distance entre deux pôle la diminue. Et enfin, Une plus grande permittivité relative du milieu augmentera le milieu. L'eau fera varier ce dernier paramètres ce qui nous laisse les deux autres à définir.

Le dipôle sera d'abord simulé puis mesuré. La simulation se fera avec le logiciel Flux d'Altair. Pour simplifié la simulation nous l'exécuterons en 2 dimension. Ce premier dipôle devra être conçu pour qu'une coupe 2d puisse être utilisé dans la simulation. Nous choisiront un peigne droit en longueur.

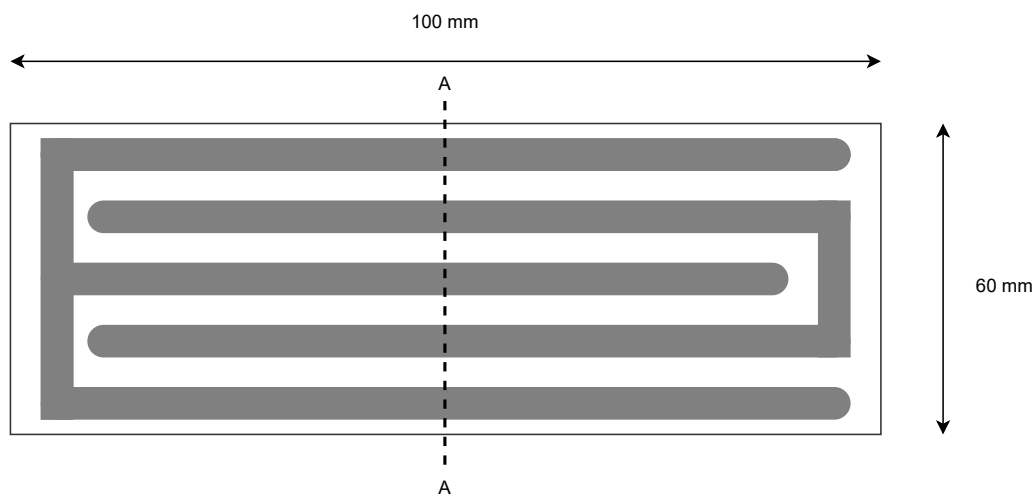


FIGURE 8 – Plan mécanique du dipôle

Nous avons défini arbitrairement une longueur de 100mm et une largeur de 60mm. Cette taille nous donne un bon compromis entre l'espace disponible sur la carte et le prix de production.

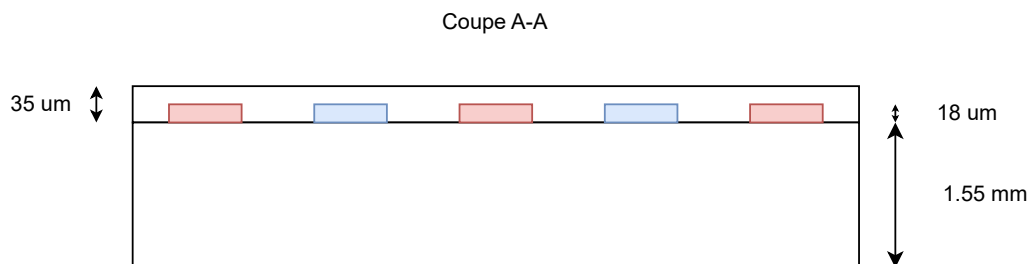


FIGURE 9 – Plan mécanique de coupe du dipôle

Les différentes épaisseurs des couches, du PCB, du cuivre et du masque sont récupéré à partir des dimension de carte standard. C'est cette coupe que nous simulerons dans le logiciel. Cependant nous ajouterons une couche de résine supplémentaire de 0.5 mm d'épaisseur. Elle permettra sur le capteur final de protéger le circuit et d'offrir à l'eau une surface proche de celle de l'eau en terme d'étanchéité et de rugosité. Cette couche ne sera pas présente pour nos première mesures. Mais doit être pris en compte pendant la simulation. Nous évaluerons aussi l'utilisation d'un plan conducteur pour concentré le champs en direction de la surface mesuré et éviter que le capteur soit influencé par ce qui se passe en dessous. Nous prendrons la décision de garder ou non cette couche après l'avoir simulé et étudié.

Le nombre, l'épaisseur, et l'écart des pistes sont des valeurs que nous laissons libre pour la simulation. La coupe ne représente que la partie centrale du PCB. Pour un question de simplicité nous négligerons les extrémité pour les simulations.

5 Simulation

5.1 Création du modèle

Pour simuler notre dipôle nous utiliserons Flux2D d'Altair. La simulation se fait par element fini. Cela consiste à dessiner notre géométrie pour la diviser en plusieurs points grâce à un maillage. Le logiciel résous en chaque point une équation différentiel dérivé des équations de Maxwell pour une application donné. Pour mesurer une capacité nous simulerons dans le domaine de l'électrostatique. Nous nous intéresserons aux charge et aux champs électrique.

5.1.1 Géométrie

Flux nous permet de faire du dessin paramétrique. Nous pourrons ainsi, pendant la simulation, faire varier nos paramètre géométrique. Nous créons des paramètres pour toutes nos grandeurs : épaisseur et largeur. La profondeur est entré à la création du modèle. Le logiciel intègre le fait que nous dessinons une coupe et utilisera la profondeur pour les calcul qui concerne l'ensemble du système comme par exemple l'énergie total. Nous utilisons les valeurs défini pendant la conception, figure 8 et 9. Dans l'intérêt de la simulation nous ajoutons une couche d'eau. Nous ne pouvons pas simulé une goutte en deux dimensions. Nous étudierons un cas sans eau notre 0% et un cas avec une couche continue notre 100%.

Le nombre de piste ne peut pas être paramétrisé car il créer des surfaces supplémentaire, ce qui n'est pas géré en simulation par Flux2D. Nous créerons trois projet pour trois nombre de piste : 20,10,5. Puisque la largeur du circuit et le nombre de pistes est fixe la somme distance et largeur de piste sera fixe aussi. Elle vaudra $S_{piste} = \frac{L_{pcb}}{N_{piste}}$. Si nous changeons la largeur des pistes nous devrons changer la distance. Nous utilisons alors un seul paramètre qui fera varié les deux. Il représente le rapport entre largeur et distance $F_{dist,larg} = \frac{L_{piste}}{D_{piste}}$. Nous pouvons définir largeur et distance en fonction de nos deux nouveau paramètre : $D_{piste} = \frac{S_{piste}}{F_{dist,larg}+1}$, $L_{piste} = S_{piste} - \frac{S_{piste}}{F_{dist,larg}+1}$. C'est ces deux expressions que nous insérons dans le logiciel. Une fois tous les paramètre rentré nous construisons avec ceux-ci toute notre géométrie. On crée d'abord les points. Puis on les relie pour former les lignes.

Paramètre	valeur [mm]
EP_CIBLE	2.7
EP_CUIVRE	0.018
EP_MASQUE	0.035
EP_PCB	1.55
EP_RESINE	0.5
LARG_PCB	60
NBR_PISTE	20,10,5
FACTOR_DIST_LARG_PISTE	variable
SUM_DIST_LARG_PISTE	LARG_PCB/NBR_PISTE
LARG_PISTE	$SUM_DIST_LARG_PISTE - (SUM_DIST_LARG_PISTE / (FACTOR_DIST_LARG_PISTE + 1))$
DIST_PISTE	$SUM_DIST_LARG_PISTE / (FACTOR_DIST_LARG_PISTE + 1)$

TABLE 2 – Liste des paramètre



FIGURE 10 – Géométrie du modèle entier

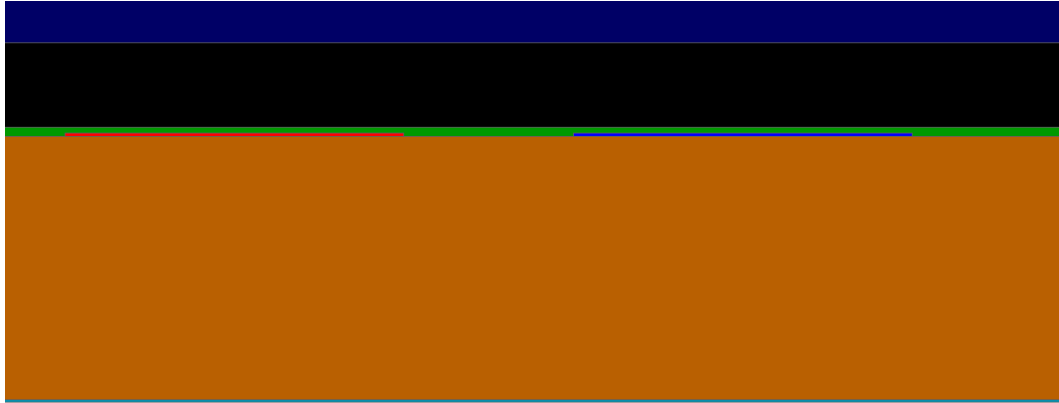


FIGURE 11 – Géométrie du modèle, zoom sur les pistes

Bleu Foncé : couche cible (eau)

Noir : Résine

Vert : Masque de soudure

Rouge : Piste pôle 1

Bleu claire : Piste pôle 2

Brun : PCB

Turquoise : Plan cuivre

Une dernière surface devra être créée pour représenter l'infini. Flux2d fonctionne en appliquant des conditions aux limites sur une sphère définie par l'utilisateur entourant notre modèle. Ces conditions permettent de simuler un environnement infini dans une zone finie.

5.1.2 Physique

Une fois la géométrie terminée, nous pouvons ajouter des contraintes physiques à notre modèle. Cela consiste à assigner des matériaux à nos surfaces. La résine, le masque et le PCB sont des isolants avec une certaine constante diélectrique. Le cuivre sera considéré comme un conducteur parfait. Une tension sera appliquée sur les deux pôles. Nous fixerons une tension de 3.3V et une autre de 1.65V. Cela nous donnera une différence de 1.65V. Nous l'enregistrerons dans un paramètre physique qui pourra être utilisé plus tard dans les calculs. Le plan de cuivre restera flottant. L'eau sera aussi considérée comme un isolant avec une constante diélectrique. La cible, le plan et la résine pourront être remplacés par de l'air au besoin de la simulation.

Surface	Matériau	μ_r	Potentiel
Cible	eau	80	-
Résine	résine	4	-
Masque	résine	4	-
Piste P1	conducteur parfait	-	3.3 V
Piste P2	conducteur parfait	-	1.65 V
PCB	FR4	4.4	-
Plan	conducteur parfait	-	flottant

TABLE 3 – Caractéristiques physiques

5.1.3 Maillage

Le maillage est une partie importante de la création d'un modèle de simulation par éléments finis. Un compromis doit être trouvé entre le temps de calcul et la résolution de la simulation. Quelques règles assez simples permettent d'obtenir des résultats convenables. Plus le champ est intense à un endroit, plus le maillage doit être fin. Il faut aussi être fin aux intersections entre deux matériaux. Les grandes surfaces peuvent être plus relâchées au centre. En suivant ces recommandations, j'obtiens un maillage satisfaisant.

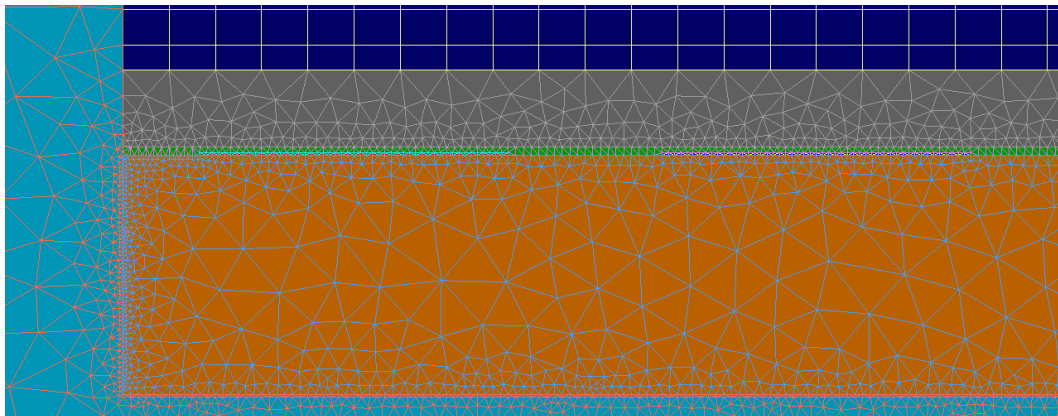


FIGURE 12 – Maillage du modèle

5.2 Exploitation

5.2.1 20 pistes

Nous pouvons à présent démarrer les simulations. Nous commencerons avec 20 piste et un rapport entre largeur et distance de 2 (largeur des pistes = 2mm, distance entre piste = 1mm). La cible sera de l'air ainsi que le plan. Une fois la simulation terminée nous pouvons afficher le champs magnétique ainsi que les lignes du potentiel électrique pour analysé le résultat et vérifié que la simulation c'est bien passé.

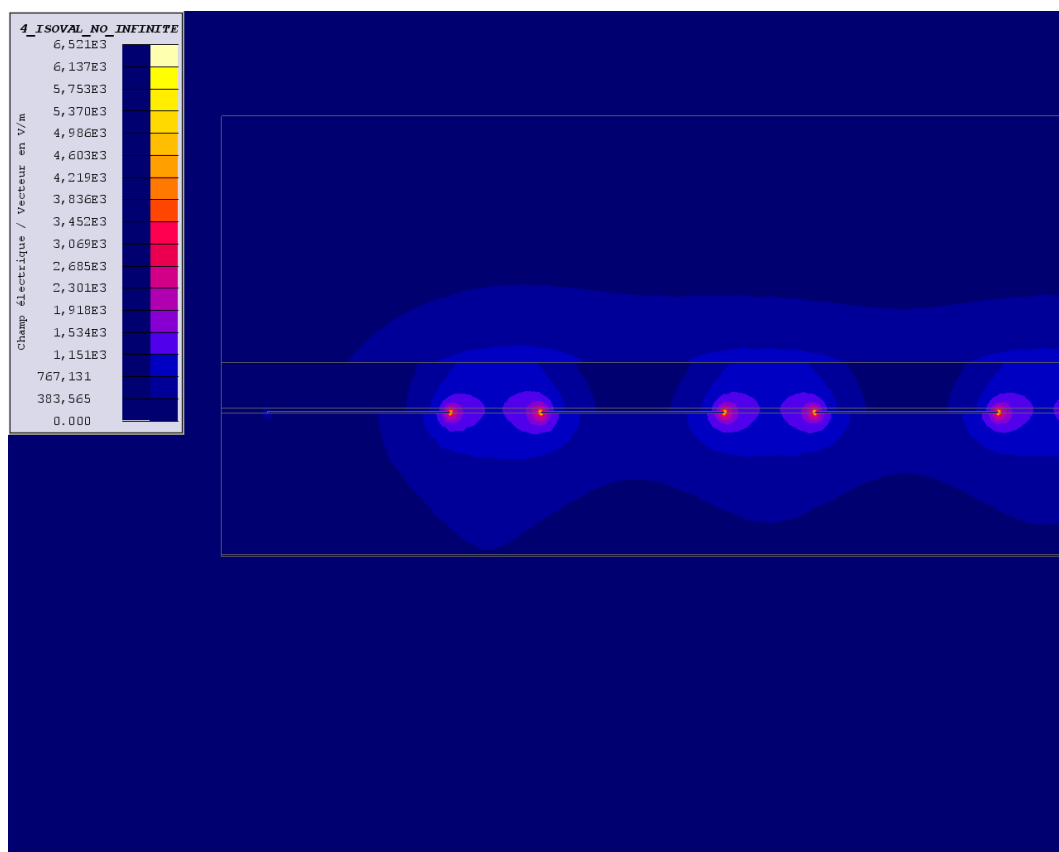


FIGURE 13 – Champs électrique 20 pistes

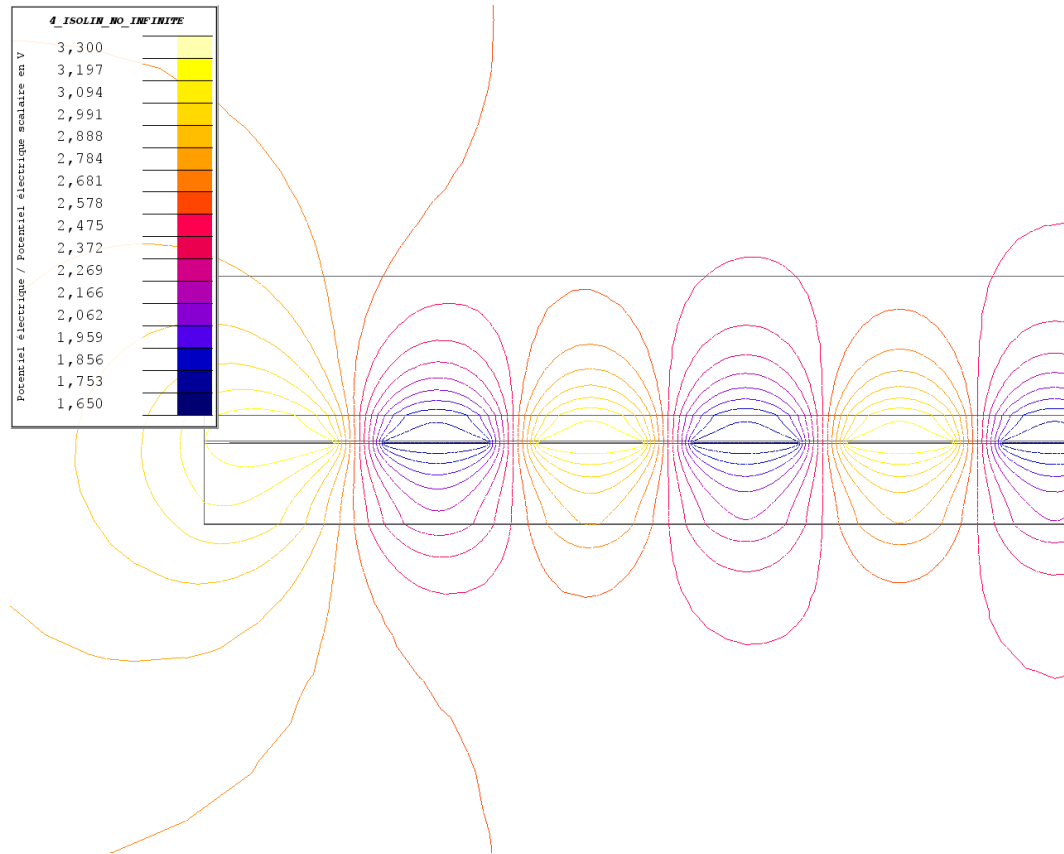


FIGURE 14 – Lignes de potentiel électrique 20 pistes

On remarque premièrement sur ces graphiques que le maillage est correct. Les lignes sont bien continue même très proche des conducteurs. Les coupure des niveau du champs magnétique sont du à la transition d'un milieu à un autre et sont tout à fait normal. La deuxième information que nous fournis ces figures sont le fait que le champs est bien présent dans l'espace de la cible. Cela veut dire qu'un changement de caractéristique à ce niveau aura une influence sur le champs et donc la capacité. C'est positif pour la viabilité de notre capteur.

Nous pouvons calculé dans cette simulation la capacité de notre système. Nous utilisons pour cela la définition de la capacité qui dépends de l'énergie $C = \frac{2W}{U^2}$. Flux2d intègre tout les point pour calculer l'énergie électrique de tous le modèle en prenant en compte la profondeur spécifié ultérieurement. Nous utilisons notre tension que nous avons mis en paramètre pour attribué notre expressions de la capacité dans un paramètre qu'on appellera C_total . Ce paramètre sera disponible pour nos prochaine simulation afin d'obtenir directement la valeur et tracer des graphiques. Pour cette première simulation C vaut 78.98 pF. Nous somme au dessus de l'offset maximal de notre convertisseur qui est de 10pF. Nous somme cependant dans le bonne ordre de grandeurs et il ne sera pas dure de diminuer la capacité.

Nous pouvons jouer avec le rapport distance et largeur de piste afin d'observer comment la capacité varie. Nous créons pour cela un scénario de simulation pour faire varier notre paramètre de 0.5 à 2 sur 10 pas. On remarque bien une diminution de la capacité mais ce n'est pas suffisant. Nous observeront comment elle diminue encore en réduisant le nombre de piste.

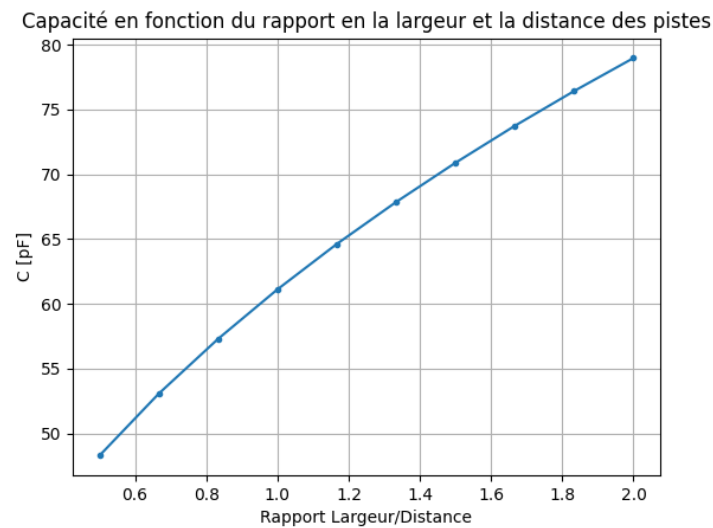


FIGURE 15 – Capacité en fonction du rapport distance/largeur

Nous allons à présent changer la cible en eau afin d'observer si nous arrivons à la mesurer.

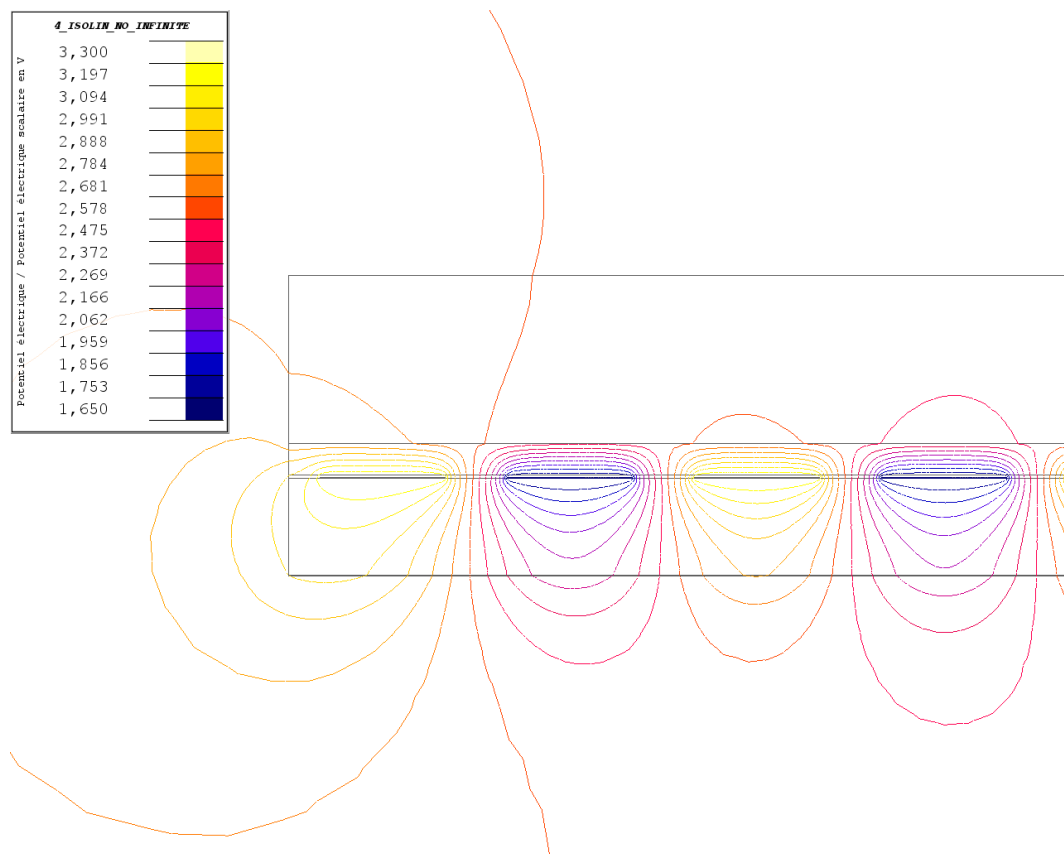


FIGURE 16 – Lignes de potentiel électrique 20 pistes avec eau

L'eau modifie bien le champ électrique. On voit sur la figure 16 que le champ est comprimé. L'effet de l'eau sur la capacité est tout aussi visible. La capacité augmente de près d'un demi de sa valeur. Un fait intéressant est que la différence évolue plus vite que l'offset de capacité. Cela veut dire que si on diminue trop le rapport pour faire diminuer la capacité d'offset on risque de réduire beaucoup trop la sensibilité, bien que nous sommes toujours au dessus du seuil de notre convertisseur.

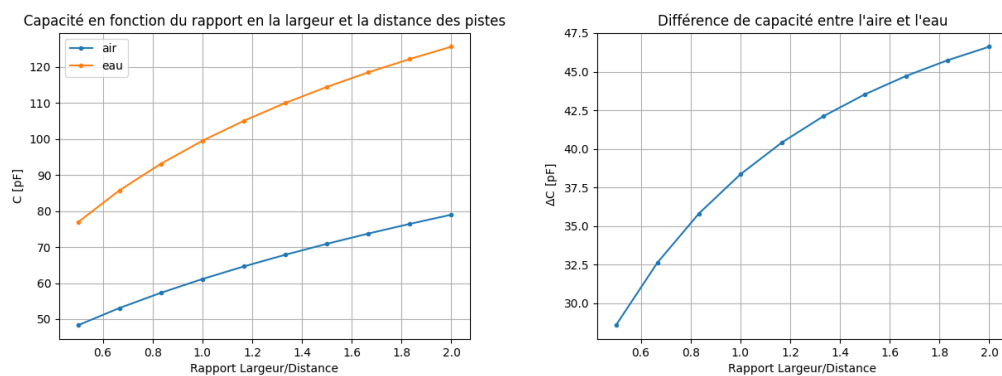


FIGURE 17 – Comparaison des capacité avec et sans eau pour 20 pistes

5.2.2 5 et 10 pistes

Nous effectuons une simulation avec 5 et 10 piste sur la carte. Nous utilisons toujours le même scénario avec et sans eau.

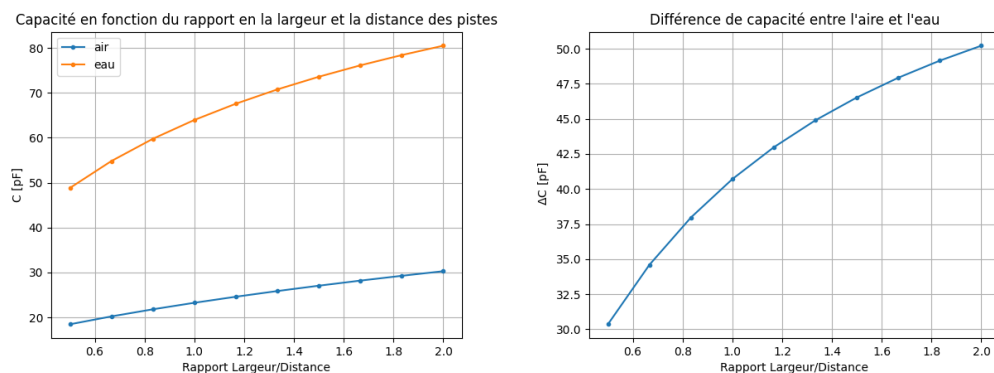


FIGURE 18 – Comparaison des capacité avec et sans eau pour 10 pistes

Cette nouvelle configuration est meilleur que la première. la capacité d'offset à été divisé par deux tout en gardant un bon delta. Nous sommes à présent plus proche des caractéristique du convertisseur.

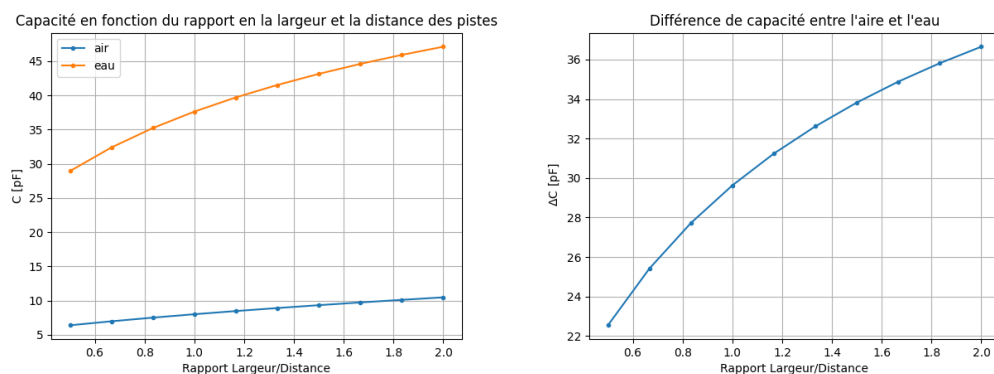


FIGURE 19 – Comparaison des capacité avec et sans eau pour 5 pistes

Grâce à 5 piste nous atteignons enfin la capacité d'offset cherché. La différence de capacité a diminué mais est toujours très élevée si on la compare à l'offset. Ces résultats sont à bien considérer car le modèle ne nous permet pas de simuler de fine goutte entre les lignes. Il est donc difficile de prévoir si une carte avec moins de ligne peut capter toutes les gouttes. Seul les mesures permettront de nous le dire.

5.2.3 Plan de cuivre

L'utilisation d'un plan de cuivre a été pensée pour concentrer la mesure à la surface haute de la carte. Nous appliqueront donc un conducteur parfait à la couche sous le pcb. Nous allons simuler l'effet d'un plan seulement sur le modèle à 5 lignes. Ce sera suffisant pour comprendre son effet. Nous lancerons le même scénario avec et sans eau pour que nous puissions comparer.

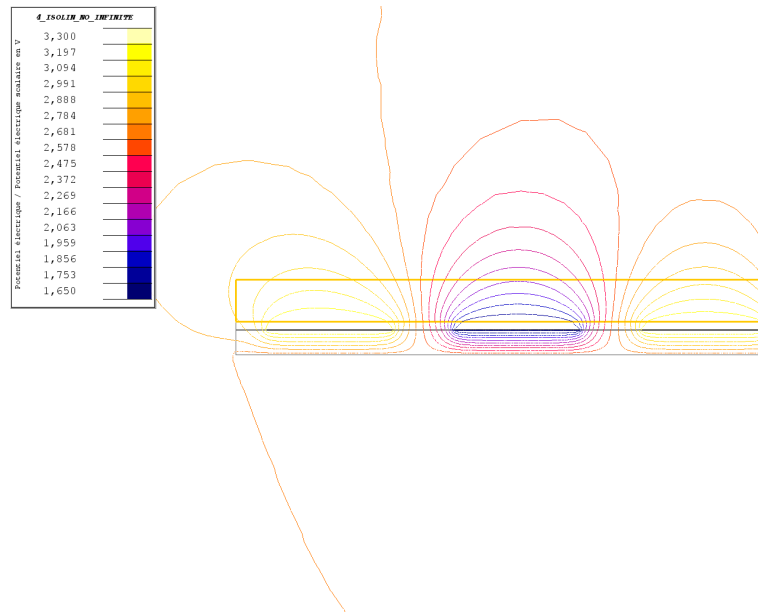


FIGURE 20 – Lignes de potentiel électrique, avec plan, avec eau pour 5 pistes

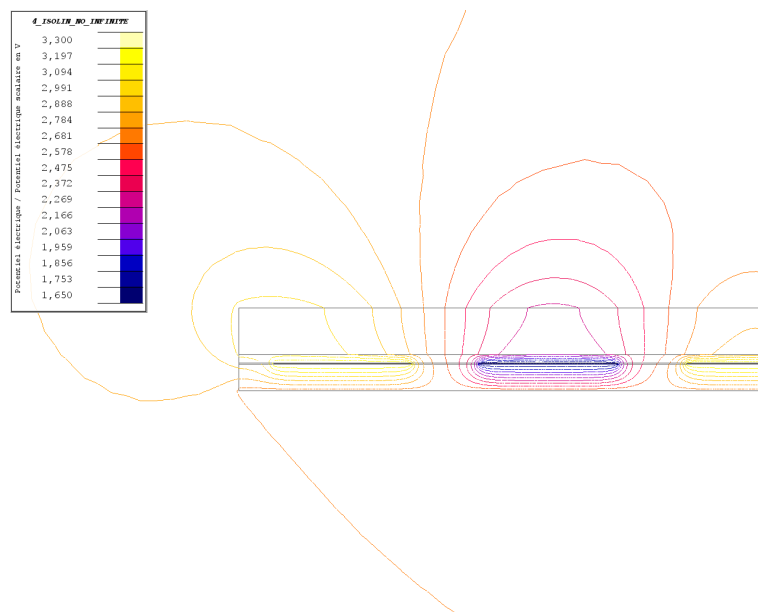


FIGURE 21 – Lignes de potentiel électrique, avec plan, sans eau pour 5 pistes

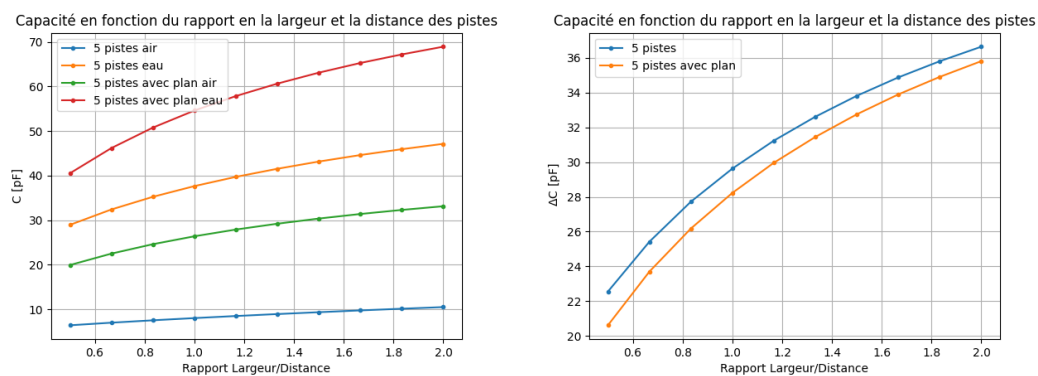


FIGURE 22 – Comparaison des capacité, avec plan, avec et sans eau pour 5 pistes

L'ajout d'un plan augmente l'offset et diminue le delta ce qui n'est pas très intéressant pour nous. Cependant on voit sur la figure 20 et 21 que les ligne de potentiel ne sorte plus par dessous. On en déduit que comme prévu tout ce qui se passe en dessous n'influencera plus notre capteur.

6 Measure

6.1 Conception

Afin de valider nos simulation nous allons procédé aux mesures de quelque configuration choisi. 6 PCB seront fabriqué. Nous avons choisi de représenter un nombre de piste de 10 et 5. Car nos simulation de 20 piste nous donne une capacité beaucoup trop élever. Pour chaque nombre de piste nous prenons deux rapport largeur et distance déjà simulé plus un plus faible pour étudié la possibilité de détecté de petite goutte. Le plan de cuivre du dessous est gardé pour tous. Pour les mesures les carte seront posé à plat nous ne voulons pas que ce qui se trouve en dessous aie une influence. Chaque PCB se verra attribué une lettre pour faciliter, par la suite, le nommage.

PCB	Nb piste	rapport larg/dist	Largeur de piste [mm]	distance entre piste [mm]
A	10	2	4	2
B	10	0.5	2	4
C	10	0.22	1.1	4.9
D	5	1	6	6
E	5	0.5	4	8
F	5	0.1	1.1	10.9

TABLE 4 – Liste des configurations sélectionné

Le pcb est construit en suivant le plan mécanique de la figure 8. Nous avons ajouté deux connecteurs SMB pour le relié à la carte de développement du convertisseur. Ils ont ensuite été pannélisé afin de les produire en une commande.

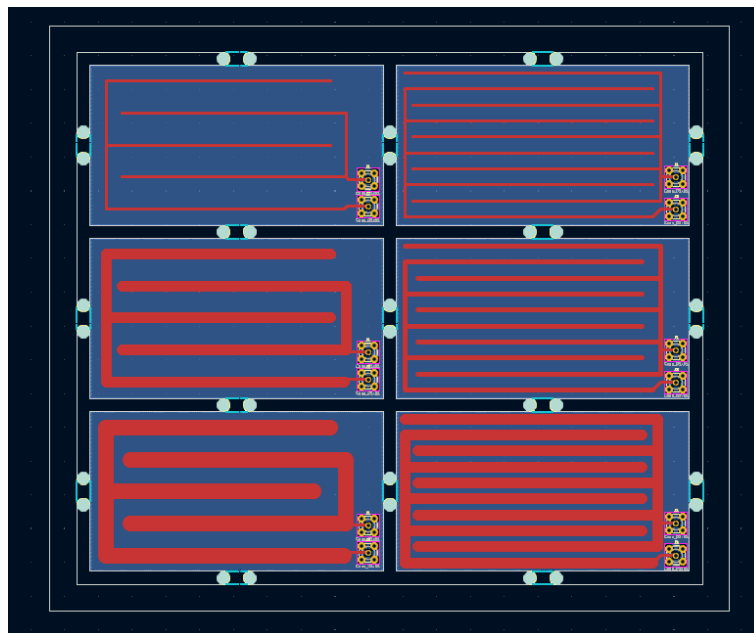
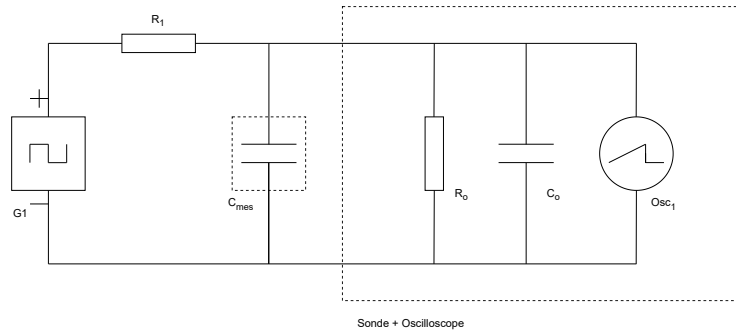


FIGURE 23 – Pannel prêt à la production

6.2 Mesure capacitive par filtre RC

Avant de brancher nos cartes sur le convertisseur, nous allons effectuer une première mesure de la capacité afin de s'assurer si nous sommes ou non à l'intérieur des bornes. Nous n'avons pas à notre disposition un analyseur d'impédance capable de mesurer de si faible capacité. Nous placerons la capacité à mesurer dans un filtre RC et déterminerons son temps de charge. Nous utiliserons un microcontrôleur pour générer un signal carré. Il faudra prendre en compte l'impédance et la capacité de la sonde d'oscilloscope car nous sommes dans le même ordre de grandeur.



G1 uController STM32 signal 3.3V

R1 1 M ohm

C_{mes} PCB A,B,C,D,E,F

R_o 10 M ohm

C_o TBD

Osc₁ Picoscope 6043CD

FIGURE 24 – Schéma de mesure du filtre RC

L'impédance de la sonde et de l'oscilloscope est fournie mais la capacité est variable par la calibration de la sonde. Nous allons effectuer une première mesure à vide sans C_{mes} afin de déterminer C_o .

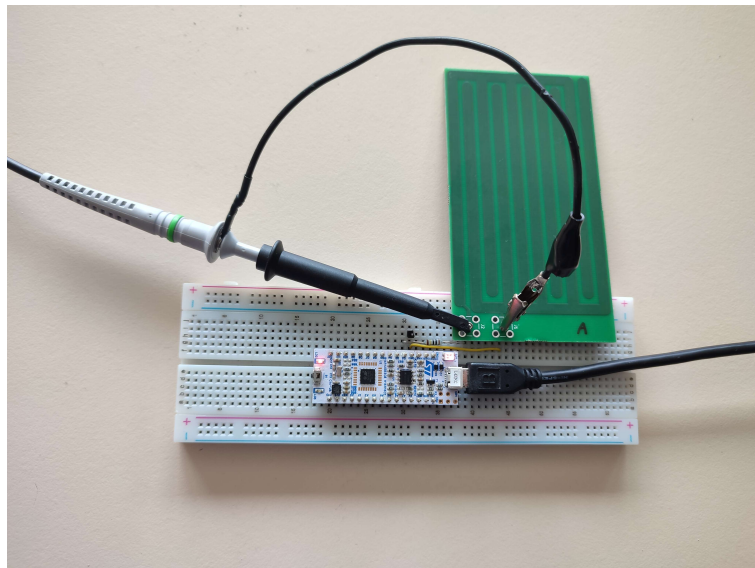


FIGURE 25 – Photo de la mesure RC

Pour déterminer la constante de temps nous utilisons le résultat de la résolution de l'équation différentiel d'un circuit RC :

$$U_c(t) = U_{in} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

On pose $t = RC$

$$\frac{U_c(RC)}{U_{in}} = 1 - e^{-1} = 1 - 0.37 = 0.63 \quad (2)$$

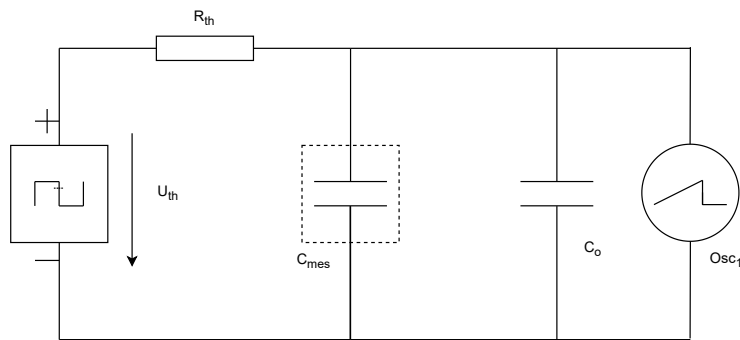
U_c vaudra 63% de U_{in}

Si on prend en compte la sonde et l'oscilloscope le circuit de mesure n'est pas un simple RC. Nous le simplifions par un schéma équivalent grâce à Thévenin.

$$R_{th} = R_1 // R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_o}} = 909[k\Omega] \quad (3)$$

$$U_{th} = U_{G1} * \frac{R_o}{R_1 + R_o} = 3[V] \quad (4)$$

Le schéma équivalent que nous utiliserons pour les calculs est le suivant :



$$R_{th} \ 909[k\Omega]$$

$$U_{th} \ 3[V]$$

FIGURE 26 – Schéma équivalent Thévenin de mesure du filtre RC

C_{mes} et C_o se combine. En laissant vide C_{mes} nous pouvons déterminer C_o . Nous le soustrairons aux prochaines mesures pour déterminer C_{mes} .

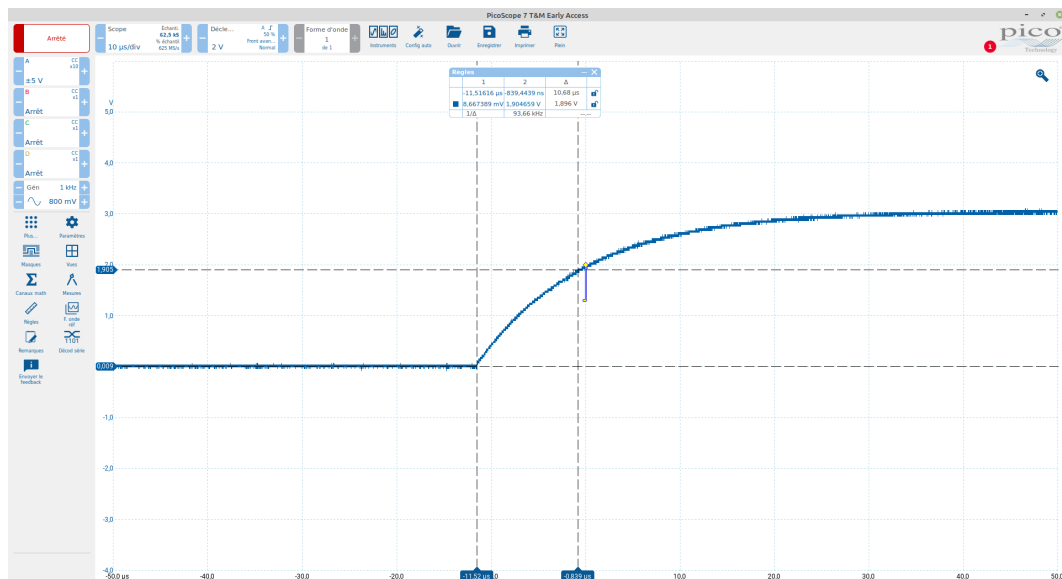


FIGURE 27 – Oscillogramme sans plaque

A 63% de U_{th} c'est à dire à 1.89 V nous observons un temps de $10.68\mu s$ ce qui correspond à une capacité de $C_o = \frac{\tau}{R_{th}} = 11.75 pF$. Nous pouvons à présent mesurer tous nos cartes la même technique de mesure et en utilisant l'expression suivante :

$$C_{mes} = \frac{\tau}{R_{th}} - C_o \quad (5)$$

Nous pouvons aussi comparer, lorsque cela est possible, ces mesures à nos simulations.

PCB	Mesure RC [pF]	Simulation [pF]
A	47.3	×
B	29.9	×
C	23.2	×
D	29.9	26.4
E	23.2	19.9
F	11.9	×

TABLE 5 – Résumé des mesures et de la simulation pour chaque carte

Les mesures sont proche de la simulation, on note une différence de 10% à 20%. Cette variation peut s'expliquer par plusieurs choses. D'une part la simulation prenais en compte une coupe mais sur nos carte des pistes supplémentaires sont présente aux extrémité pour connecter les lignes. Le connecteur peut aussi ajouter une capacité non négligeable. De plus notre mesure n'est pas parfaite et nous avons simplifié l'effet que peut avoir la sonde et l'oscilloscope. Nous sommes dans un ordre de grandeur avec de très faible courant. La mesure est facilement influençable par des grandeur parasite que nous négligeons habituellement.

Ces mesures nous donne une certaine confiance dans nos simulation. Nous pourrions en refaire de plus complexe dans une suite du projet tout en ayant une idée de comment les résultat se traduit dans la réalité.

6.3 Convertisseur Capacitif

Nous pouvons à présent essayer le convertisseur AD7150. Nous utiliserons sa carte de développement EVAL-AD7150. La carte est fourni avec un logiciel pour configurer et effectuer directement des mesures. Nous pouvons nous passer de microcontrôleur pour l'instant. s

Nous allons commencer par mesurer la carte F. C'est la seule qui rentre dans les borne du convertisseur et pourra être mesuré directement.

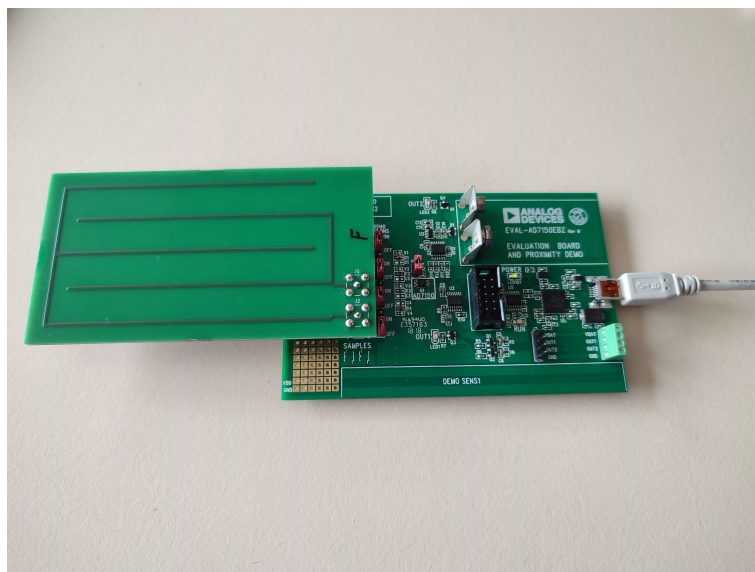


FIGURE 28 – Photo de la mesure de F avec EVAL-AD7150

Pour cette première mesure le convertisseur est configuré avec une sensibilité de 2pF. Le CapDAC qui est l'offset est trouvé en le modifiant jusqu'à que la mesure ne sature plus.

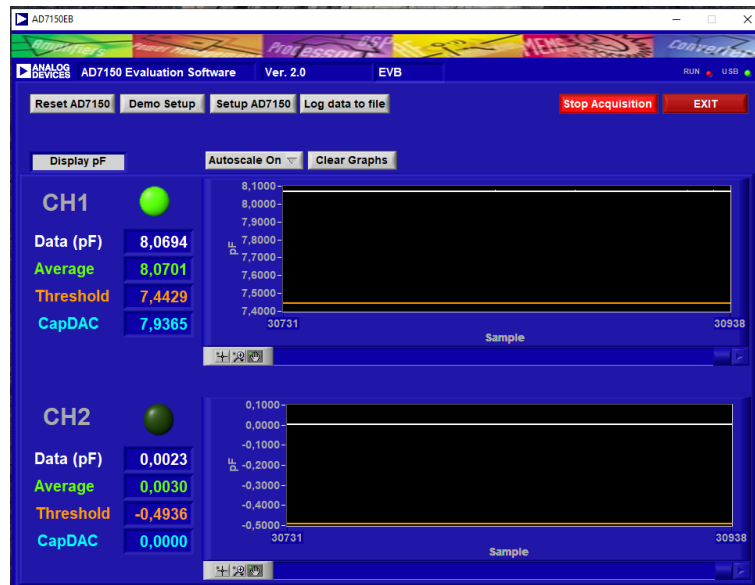


FIGURE 29 – Mesure de la carte F avec l'interface de la carte de développement de l'AD7150

Nous mesurons une capacité de 8.1 pF pour 11.9 pF mesuré par RC. Cette différence s'explique d'une part par la précision d'une mesure RC expliqué précédemment et d'une autre par problème propre au convertisseur AD7150.

Nous avons remarqué lors de nos mesure que lorsque nous approchons la main de la carte la capacité mesuré diminue fortement ce qui ne se produisait pas avec le filtre RC. Cela viens de l'influence de la capacité parasite à la masse. Aucun des deux pôle de la carte ne sont relié à la masse. Si une capacité apparaît entre un des pôle et la masse des charge seront perdue et ne seront pas mesuré par le convertisseur ce qui diminuera la capacité observé. Même si nous sommes éloigner du capteur une capacité parasite est présente en partie à cause du plan de masse de la carte de développement. Nous ne pourrions malheureusement pas mesurer correctement la capacité absolue de nos cartes.

Nous pouvons cependant commencer à détecter à titre indicatif des gouttes d'eau.

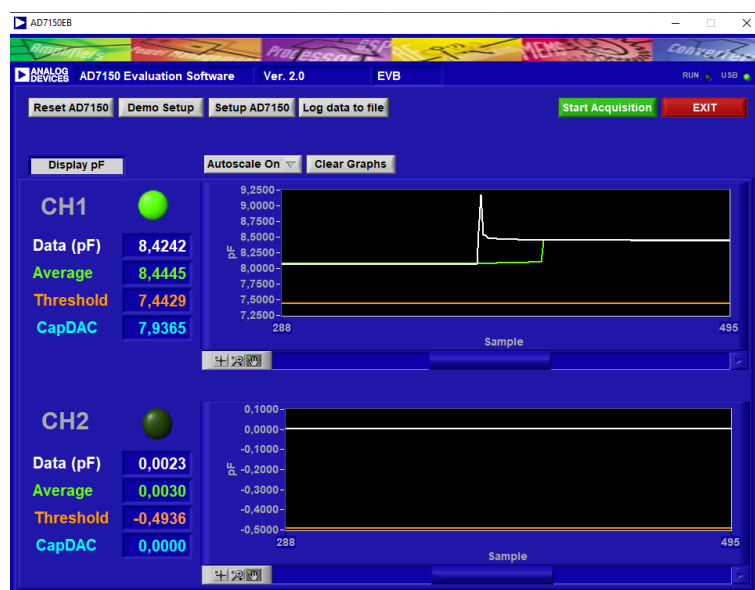


FIGURE 30 – Mesure de la carte F en faisant tomber une goutte d'eau

Ces mesures ne permettent pas de sortir des chiffre précis mais nous introduis le comportement de l'eau sur notre capteur. Pour pouvoir essayer les autre carte malgré qu'elles soient hors borne nous avons mis une capacité de 10pF en série avec notre dipôle. Sur la carte de développement nous remplaçons par notre capacité une résistance de 0 ohm qui fait le pont entre le convertisseur et le connecteur. La capacité parasite de masse est trop compliqué à calculé dans cette configuration. Nous prendrons pas en compte la valeur absolue de la mesure mais seulement l'influence de l'eau. Il apparaît clairement qu'avec des pistes plus serré les gouttes son plus facilement détecter malgré la perte de sensibilité du à l'ajout d'une capacité en série. La taille et la position de la goutte influence beaucoup la détection de celle-ci. Un travail supplémentaire devra être effectué pour optimiser le peigne. La simulation en 2 dimension ne suffira pas pour représenté la géométrie et le placement d'une goutte d'eau.

7 Conclusion

8 Bibliographie

Références

- [1] T. ROWLANDSON, M. GLEASON, P. SENTELHAS, T. GILLESPIE, C. THOMAS et B. HORNBuckle, “Reconsidering Leaf Wetness Duration Determination for Plant Disease Management,” *Plant Disease*, t. 99, n° 3, p. 310-319, 2015, PMID : 30699706. DOI : 10.1094/PDIS-05-14-0529-FE. eprint : <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>. adresse : <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>.
- [2] DAVIS. “Capteur d’humectation du feuillage, Vantage Pro / Pro2 sans fil.” (), adresse : <http://www.davis-meteo.com/6420.php> (visité le 13/05/2023).
- [3] S. T. INC. “Leaf Wetness Sensor.” (2022), adresse : <https://www.specmeters.com/store/leaf-wetness-sensor> (visité le 13/05/2023).
- [4] A. EXPO. “Leaf wetness sensor CaiposLW.” (), adresse : <https://www.agriexpo.online/prod/caipos-gmbh/product-168642-14500.html> (visité le 13/05/2023).
- [5] METER. “PHYTOS 31 Leaf Wetness Sensor.” (), adresse : <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/phytos-31-leaf-wetness-sensor> (visité le 14/05/2023).
- [6] EVVOS. “Leaf Wetness Sensor.” (), adresse : <https://www.evvos.com/product/leaf-wetness-sensor/> (visité le 14/05/2023).
- [7] G. HORNERO, J. E. GAITÁN-PITRE, E. SERRANO-FINETTI, O. CASAS et R. PALLAS-ARENY, “A novel low-cost smart leaf wetness sensor,” *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 143, p. 286-292, 2017, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.001>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917305197>.
- [8] T. INSTRUMENTS. “FDC1004.” (), adresse : <https://www.ti.com/product/FDC1004> (visité le 16/05/2023).
- [9] A. DEVICES. “AD7745.” (), adresse : <https://www.analog.com/en/products/ad7745.html> (visité le 16/05/2023).
- [10] A. DEVICES. “AD7150.” (), adresse : <https://www.analog.com/en/products/ad7150.html> (visité le 16/05/2023).