



université
PARIS-SACLAY

Université d'Evry-Val d'Essonne

UFR Sciences et Technologies

Mention : E3A

Parcours : Systèmes Automatiques Mobiles

Master 2

Année universitaire

2019/2020

Développement d'un réseau de capteurs connectés à l'échelle du paysage agricole



Réalisé par : Aghiles BEN SIDER

Encadrant du stage :

M. François REBAUDO

Référant universitaire :

M^{me}. Naima AIT OUFROUKH

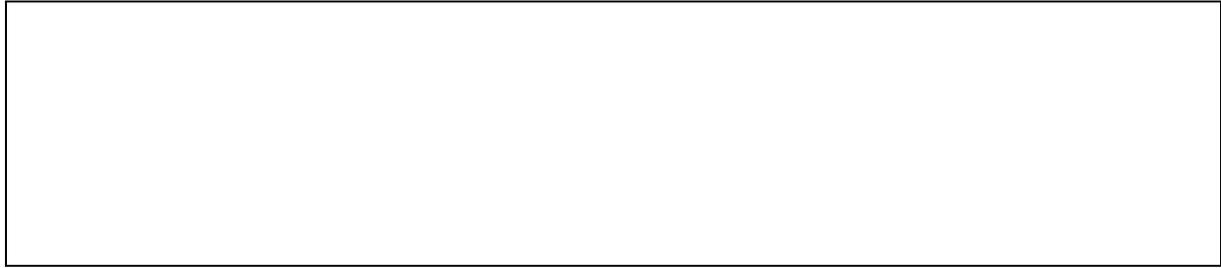
Fiche de Situation - 2019-2020

Suite à la période de confinement et déconfinement associée sur l'année 2020, les apprentis ont dû respecter les consignes de travail et de réorganisation du temps de travail de l'entreprise avec laquelle ils sont en contrat sur l'année 2019-2020. Cette fiche de situation permet de faire état de cette réorganisation sur la période :

du 16/03/2020 à la date de rendu du rapport le 8 Juin ou de la soutenance pour la mise à jour

Statut	M2 Apprenti(e) ou M2 Etudiant(e) en Formation Initiale (Enlever le statut inutile)			
NOM	BEN SIDER			
Prénom	Aghiles			
Filière	Niveau : M2	Mention : E3A	Parcours : SAM	
Entreprise	Institut de recherche pour le développement (IRD)			
Date de début de contrat	Le 02/03/2020			
Périodes de travail en présence physique après 16/03/20	Périodes de télétravail	Périodes de suspension de contrat	Périodes de chômage partiel	Date d'arrêt définitif du contrat
Du 01/07/20 Au 31/08/20	Du 13/03/20 Au 01/07/20	Du au	Du au	Le 31/08/2020
Du au	Du au	Du au	Du au	
Du au	Du au	Du au	Du au	
Du au	Du au	Du au	Du au	
Du au	Du au	Du au	Du au	
Autres				

Complément d'information :



NOTA :

Cette fiche de situation devra être utilisée si possible comme suit :

- Insérée immédiatement après la page de garde du mémoire du rapport (ou fichier pdf).
- Mise à jour et Fournie au jury de soutenance avec la présentation de la soutenance la veille de la soutenance.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde reconnaissance à mon maitre de stage M. François REBAUDO de m'avoir accordé sa confiance dans ce projet et pour toute l'aide qu'il m'a apportée afin de me permettre de mieux cerner le travail durant ces 6 mois de stage.

De même, je remercie ma tutrice pédagogique Mme Naima AIT OUFROUKH, Maitre de conférences à l'Université d'Evry val d'Essonne, pour son suivi et son soutien au cours de ce stage.

Je remercie l'institut convergence *Changement climatique et usage des terres* (CLAND ; IA-16-CONV-0003) pour leur financement des gratifications de stage et le projet *Prédire la Phénologie des insectes Ravageurs : calibration des modèles de laboratoire à partir de la surveillance des agroécosystèmes* (PI2P ; ANR-19-CE32-0001) pour le financement des frais de fonctionnement.

J'exprime ma profonde gratitude à tous les enseignants de l'Université d'Evry, pour leurs conseils, leurs encouragements et leurs implications tout au long de mes trois années d'études à l'université d'Evry val d'Essonne.

Je remercie également l'ensemble du personnel du pôle écologie de l'UMR EGCE pour leur accueil et leur bonne humeur.

Table des matières

I. Introduction.....	1
I.1. Structure d'accueil	1
1. UMR EGCE.....	1
2. Pôle écologie.....	2
I.2. Contexte et problématique	3
1. L'agriculture et les ravageurs des cultures.....	3
2. Le besoin de faire des modèles de prédictions	3
3. L'importance de la température dans le développement des insectes	4
4. Le besoin d'avoir des mesures précises des variables de l'environnement	4
II. Synthèse bibliographique	4
II.1. Les capteurs.....	4
1. Les différents types de capteurs	5
2. Transmission d'information.....	5
3. Choix de capteurs	6
3.1.1. Définition	6
III. Développement du projet.....	24
III.1. Les Modèles qui seraient adaptés pour un usage extérieur pour les insectes	24
III.2 Capteur de vitesse du vent (anémomètre).....	24
III.2.1 Les différentes technologies de conception	25
III.3. Conception 3D des différents boîtiers de protection pour les capteurs	27
1. Logiciel de conception 3D SolidWorks	27
III.4. Montages et tests.....	34
IV. Conclusion	36
V. Annexes.....	37

Titre : Mise en place d'un réseau de capteurs connectés à l'échelle agricole.

Résumé :

Dans le cadre du Master 2 mention Systèmes Automatiques Mobiles, à l'université d'Evry val d'Essonne, Paris-Saclay, j'ai eu l'opportunité de réaliser un stage de six mois au sein du laboratoire de recherche EGCE à Gif-sur-Yvette au pôle écologie.

L'objectif de mon stage est de réaliser un réseau de capteurs connectés à l'échelle agricole. Passant par le choix des capteurs les plus adaptés au projet et la conception d'un capteur de vitesse du vent se rapprochant le plus d'un anémomètre professionnel. Le but du projet est de surveiller un environnement agricole afin d'avoir une information à temps réel des différentes variables de l'environnement qui correspondent à celles des insectes, ce qui va nous permettre de mener une lutte contre les ravageurs des cultures.

Mots-clés :

Capteurs, insectes ravageurs, conception, impression 3D, Arduino.

Summary :

As part of the Master 2 mention Automatic Mobile Systems, at the University of Evry Val d'Essonne, Paris-Saclay, I had the opportunity to do a Six-month internship in the EGCE research laboratory at Gif-Sur-Yvettes at the ecology center.

The objective of my internship is to create a network of sensors connected to the agricultural scale. Going through the choice of the most suitable sensors for the project and the design of a wind speed sensor closest to a professional anemometer. The goal of the project is to supervise an agricultural environment in order to have real-time information about environmental variables that correspond to those of insects, which will allow us to fight against crop pests.

Keywords :

Sensors, insect pests, design, 3D printing, Arduino.

I. Introduction

Une lourde perte agricole est causée chaque année par les insectes ravageurs qui sont des organismes qui dépendent des variables de l'environnement dans lequel ils évoluent (température, humidité relative, l'humidité du sol...) et c'est pour cela que connaître ces facteurs va nous permettre de prédire le développement de ces organismes et de mener une lutte contre ces derniers afin de préserver les cultures.

Les mesures effectuées par les stations météorologiques sont souvent différentes de celle prélevées dans les champs où vivent les insectes d'où l'objectif de ce stage qui est de développer un réseau de capteurs qui va nous permettre de collecter les données nécessaires pour la modélisation.

Dans un premier temps, on exposera des informations concernant l'organisme d'accueil (UMR EGCE), son organisation ainsi que son secteur d'activité.

Dans un second temps, on évoquera les capteurs, les différents types de capteurs et les capteurs les plus adaptés au projet.

La dernière partie fera le point sur la conception et l'impression tridimensionnelle puis, on enchainera avec le montage des différents capteurs sélectionnés pour la visualisation des données suivi d'une conclusion générale et perspectives afin de clôturer le travail

I.1. Structure d'accueil

1. UMR EGCE

EGCE (Évolution, Génome, Comportement et Écologie) est une unité mixte de recherche qui fonctionne sous la triple tutelle de l'Université Paris-Saclay, du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

L'EGCE contient des personnels scientifiques des organismes cités précédemment mais également des universités Paris Diderot (Paris 7), Pierre et Marie Curie (Paris6), Versailles Saint Quentin et de l'AgroParisTech. Ils ont des charges d'enseignements à tous les niveaux des cursus (Licence, Master ou supérieur) dans différents domaines liés à l'évolution ou à la diversité du vivant. Parmi ces domaines on peut citer la Biologie Animale, la Biologie du Développement, la Génétique, la Génétique des Populations, la Génomique, l'Évolution et l'Écologie, ce qui fait que l'EGCE est en contact avec beaucoup d'étudiants venant d'horizons différents. Par ailleurs, des chercheurs font des interventions pendant lesquelles ils enseignent des sujets proches de leurs travaux de recherche dans différents Masters 2.

EGCE est réparti en trois pôles : le pôle génome, le pôle comportement et le pôle écologie.

EGCE a été un élément moteur pour la création de l'Institut Diversité Écologie et Évolution du Vivant avec le laboratoire Écologie, Systématique, Évolution d'Orsay dirigé par Jane Lecomte et le laboratoire Le Moulon, Génétique Quantitative et Évolution dirigé par Olivier Martin. L'IDEEV, né officiellement en janvier 2010, réunit 20 équipes représentant 250 personnes travaillant dans le domaine de l'évolution sur le grand campus Gif-sur-Yvette/Orsay. Il a pour ambition de devenir un pôle scientifique reconnu à l'échelle nationale et internationale, visible

des étudiants et des instances, et capable de faire émerger de nouveaux thèmes d'interaction entre les équipes qui le constituent. A terme, dans le cadre du projet Grand Campus-Plateau de Saclay, cet Institut va se prolonger en un Institut avec ses propres locaux et un regroupement des UMRs sur le même site.

L'IDEEV fait partie de l'institut convergence CLAND, qui a été lancé en 2017 pour objectif d'étudier la vulnérabilité des écosystèmes cultivés face au changement climatique et le contrôle des émissions de gaz à effet dans l'agriculture. CLAND, financeur de ce stage, comporte dix équipes de recherche sur le plateau de Saclay avec une centaine de chercheurs, il est géré par l'université Paris Saclay et il a bénéficié d'un financement de la part de l'agence nationale de la recherche (ANR) d'un montant de 9.8M€ pendant dix ans.

2. Pôle écologie

Les différentes recherches effectuées dans ce pôle ont pour but de comprendre l'impact des changements globaux sur la diversité, l'abondance et l'écologie des insectes dans le contexte de la sécurité alimentaire et de la santé publique. Le travail est basé sur des modèles d'insectes ayant des résultats positifs sur le bien-être humain tels que les ennemis naturels des ravageurs des cultures, les insectes comestibles et les pollinisateurs, et aussi des résultats négatifs tels que les ravageurs des cultures et les vecteurs de parasites des mammifères. Les objectifs sont d'identifier les mécanismes qui sous-tendent les réponses des insectes aux pressions biotiques et abiotiques, et de prédire les impacts des changements globaux ultérieurs vers des perspectives appliquées dans la gestion de l'environnement et la conservation de la biodiversité. Les principaux sites d'étude sont situés en Europe continentale, en Afrique orientale et centrale ainsi qu'en Amérique latine. [egce.cnrs-gif.fr & uvsq.fr]

3. Organigramme

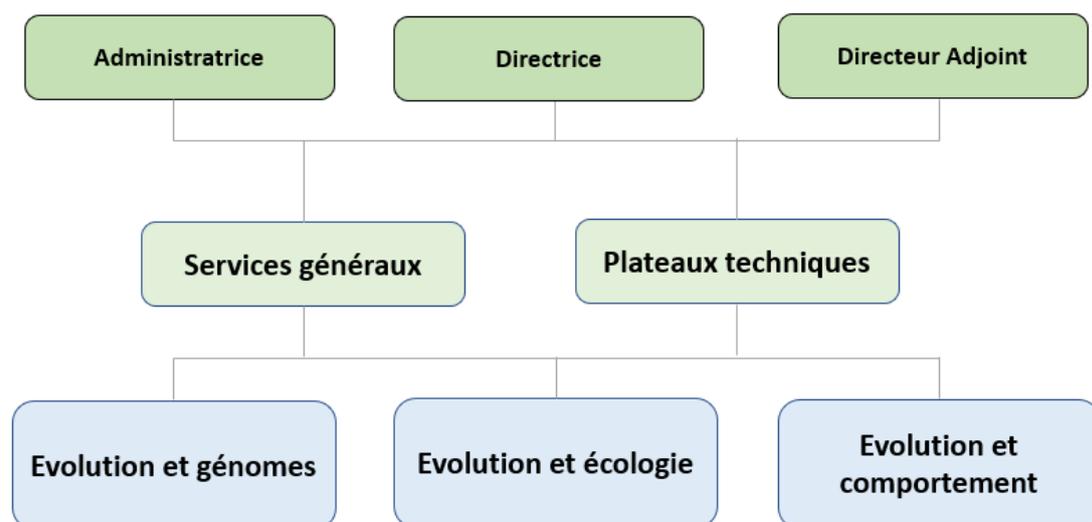


Figure01 : Organigramme de l'EGCE

I.2. Contexte et problématique

1. L'agriculture et les ravageurs des cultures

L'agriculture est définie comme étant l'ensemble des travaux développées par l'homme dans le milieu biologique et socio-économique donné, afin d'obtenir les produits végétaux et animaux qui lui sont utiles, particulièrement ceux destinés à son alimentation.

Dans le but d'obtenir de meilleurs rendements, les agricultures modernes adoptées dans la majorité des pays développés utilisent une quantité massive de pesticides de synthèse, engrais minéraux et autres appliqués sur des surfaces de plus en plus grandes. En termes de quantité de production, ce type d'agriculture a rempli parfaitement ses objectifs, néanmoins on remarque des effets secondaires considérable et ce à différentes échelles, on peut citer l'augmentation des phénomènes d'érosion, diminution de la fertilité naturelle des sols, pollution des eaux superficielles et souterraines et émission importante de gaz à effet de serre.

Les insectes, qui sont les principaux rivaux de l'homme, dévorent ses cultures et certaines de ses autres possessions. Ils sont porteurs de maladies frappant l'homme mais aussi ses animaux domestiques. Plus de 80% des animaux vivants sont des insectes, on connaît environ un million d'espèces d'insectes et chaque année environ 6000 espèces nouvelles sont découvertes. Comme l'a déclaré le professeur Wigglesworth « les insectes sont, à ce jour, et ont probablement toujours été à travers les siècles, les animaux terrestres s'adaptant le mieux à des changements de conditions alimentaires et climatique ». (R. KUMAR/ la lutte contre les insectes ravageurs)

Les ravageurs sont définis comme une source de gêne ou de destruction et d'un autre point de vue, un ravageur est tout insecte qui ne se trouve pas au bon endroit ce qui veut dire qu'un insecte peut être ravageur si certaines conditions sont réunies, mais ne plus l'être dans un contexte différent.

L'agriculture mondiale se caractérise par la diversité de ses cultures qui est dû aux conditions spécifiques liées à l'environnement des différentes parties de la planète. Ainsi des facteurs comme la température, les radiations solaires, l'humidité, la durée de la journée et les chutes de pluies auront un impact considérable sur le développement de ces ravageurs.

2. Le besoin de faire des modèles de prédictions

Les modèles de prédictions sont des représentations des relations qui caractérisent le développement de certains organismes vivants et qui dépendent directement du climat. Les simulations effectuées avec ces modèles ont pour but de faciliter la compréhension des mécanismes qui sont observés dans un milieu. Les modèles utilisent des paramètres météorologiques (température, humidité relative, précipitations) pour prédire le développement d'une culture, de ses ravageurs et des mauvaises herbes, l'apparition de certaines maladies ou d'autres phénomènes qui sont directement liés au climat.

3. L'importance de la température dans le développement des insectes

Les insectes sont des organismes poïkilothermes, c'est-à-dire des organismes dont la température est déterminée par celle du milieu dans lequel ils vivent. Durant toute leur existence, la température conditionne le déroulement de leurs processus vitaux comme la croissance, l'alimentation, la mobilité, le développement et la reproduction. La température est donc l'indicateur climatique le plus important pour les insectes.

4. Le besoin d'avoir des mesures précises des variables de l'environnement

Les mesures effectuées par les stations météorologiques traditionnelles sont différentes de celles que vivent les insectes dans les champs, d'où l'importance de mettre en place des capteurs connectés pour connaître les variables de l'environnement qui correspondent à celles des insectes et en temps réel. En parlant de « connecter » un objet, on parle systématiquement de la présence d'un capteur qui est capable d'enregistrer des données et de les envoyer sous forme numérique à un ordinateur ou un smartphone dans le but de répondre aux besoins d'une agriculture de précision, en permettant notamment de suivre régulièrement et en détail ses cultures.

II. Synthèse bibliographique

II.1. Les capteurs

Un capteur est un dispositif qui permet de transformer une grandeur physique observée en une grandeur utilisable telle qu'une tension électrique, une intensité ou la déviation d'une aiguille.

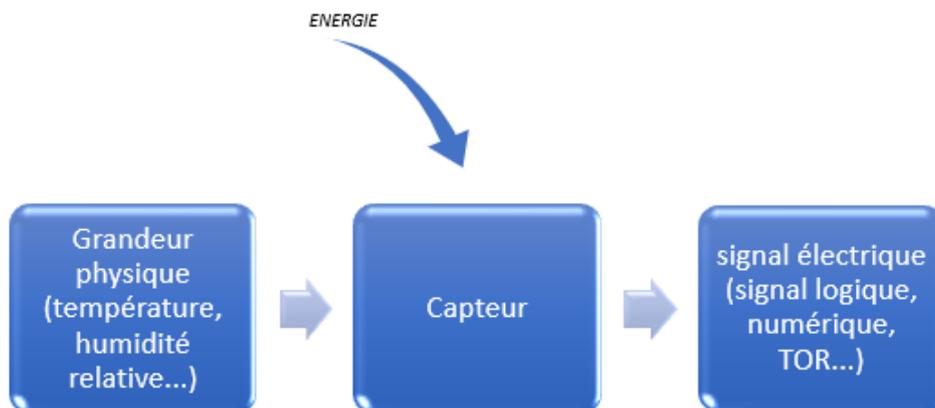


Figure 02 : Schéma fonctionnel d'un capteur

1. Les différents types de capteurs

Il existe deux types de capteurs :

- **Les capteurs actifs**

Ils sont directement générateurs d'une tension ou d'un courant à partir de la grandeur physique et nécessitent toujours une amplification par exemple les photodiodes, phototransistors et les thermocouples.

- **Les capteurs passifs**

On parle généralement d'une impédance (résistance, capacité, inductance) nécessitant parfois une amplification. On peut citer les thermistance, capteur de niveau capacitif et résistance à fil de platine.

Caractéristique	Actifs	Passifs
Besoin d'alimenter	Non	Oui
Générer une tension	Oui	Non
Nécessité d'amplifier	Oui	Parfois
Exemples	Phototransistor	Thermistance

Figure 03 : caractéristiques des capteurs selon le type d'énergie

2. Transmission d'information

La communication et l'échange d'informations entre les capteurs et les cartes d'acquisition se font à travers des bus de communication. De manière générique, les composants, ou les Arduino, sont appelés des nœuds et le bus réalise donc une connexion entre ces derniers. Le mot bus vient du latin omnibus qui veut dire utilisable par tous c'est-à-dire tous les nœuds.

- **Le bus I²C :**

Le bus I²C (inter-integrated circuit) : il a été développé au début des années 80 par Philips Semiconductors afin de relier facilement les différents circuits d'un téléviseur moderne à un microprocesseur.

Le bus I²c permet d'établir une communication entre les composants électroniques grâce à seulement trois fils (SDA pour le signal de données et SCL pour le signal horloge et enfin un signal de référence électrique.

- **Le bus one-wire :**

Le bus one-wire est un bus développé par Dallas Semiconductor, ce bus supporte une topologie série, parallèle ou en étoile et fonctionne selon le principe maître/esclave.

Ce bus permet d'utiliser 2 fils et non pas un seul comme son nom l'indique, un fil est réservé pour les données et un autre fil pour la masse, il est souvent utilisé pour des mesures de température mais il existe une gamme complète de composants compatibles.

3. Choix de capteurs

Les insectes sont des animaux ectothermes, c'est-à-dire que ce sont des animaux qui dépendent des sources extérieures de chaleur et ne produisent pas de chaleur interne. La température mais aussi d'autres variables telle que l'humidité relative et la durée du jour et de la nuit sont des facteurs importants dans le développement de ces insectes et connaître ces facteurs va nous permettre de mieux nous organiser afin de lutter contre les ravageurs de cultures.

Pour effectuer les mesures de ces variables de l'environnement on doit d'abord choisir des capteurs relevant des valeurs qui vont se rapprocher au mieux des valeurs ressenties par les insectes et cela en comparant les capteurs présents sur le marché afin de choisir les plus adaptés.

Pour choisir un capteur il faut tenir en compte des paramètres suivants :

- La sensibilité du capteur suivant l'utilisation souhaitée.
- La précision de la mesure.
- Le milieu d'utilisation par exemple une zone exposée à de fortes variations thermiques.
- La résistance au changement de température.
- Le système de régulation mis en place.

3.1. Capteur de température

3.1.1. Définition

Qualitativement, la température d'un objet définit la sensation de chaud ou de froid ressenti au contact de cet objet. Plus précisément, la température est la mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules d'un échantillon de matière qui est exprimée en unités de degrés sur une échelle standard.

Les capteurs sont constitués d'un élément extrêmement sensible, isolé électriquement et protégé par une gaine.

Une mesure de température a pour but de surveiller (simple visualisation), réguler la puissance des systèmes chauffants et veiller sur la sécurité de ses derniers.

3.1.2. Les différents types de capteurs

On peut mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements, le temps de réponse ainsi que la précision.

Les types les plus courants de capteurs de température sont les thermocouples, les sondes RTD (Resistance Temperature Detectors - capteurs de température à résistance) et les thermistances.

- **Les Thermocouples**

Les thermocouples sont les capteurs les plus utilisés pour mesurer la température car ils sont à la fois moins coûteux, plus précis et peuvent fonctionner sur une large gamme de températures.

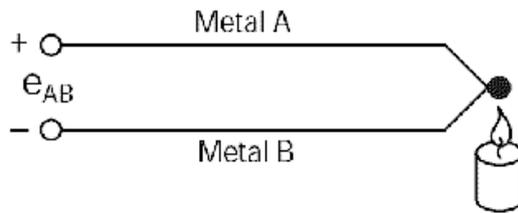


Figure 04 : principe d'un thermocouple [schéma relevé du site web aviatechno]

Lorsque le conducteur est soumis à une variation de température il génère une tension que l'on appelle Seebeck. La mesure de cette tension nécessite l'utilisation d'un second matériau conducteur qui génère une tension différente pour une même variation de température.

- **Les sondes RTD**

Populaires pour leur stabilité, le signal présenté par les RTD est le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température. Cependant, ils coûtent souvent plus cher que d'autres types de capteurs à cause de leur construction plus compliquée et l'utilisation du platine.

Les RTD présentent également un temps de réponse lent et par une faible sensibilité. Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C.

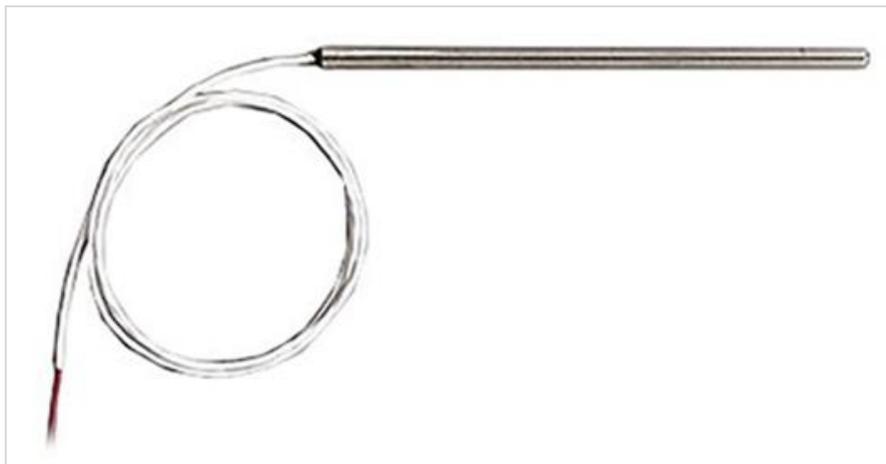


Figure 05 : Exemple d'une sonde RTD [relevé du site Omega Engineering]

Les RTD fonctionnent sur le principe des variations de résistance électrique des métaux purs et se caractérisent par une modification positive linéaire de la résistance en fonction de la

température. Les éléments utilisés pour les RTD incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est le plus utilisé, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa stabilité et de sa précision. Faire passer le courant à travers une sonde RTD génère une tension à travers cette dernière et en mesurant cette tension, on peut déduire sa résistance et donc, sa température.

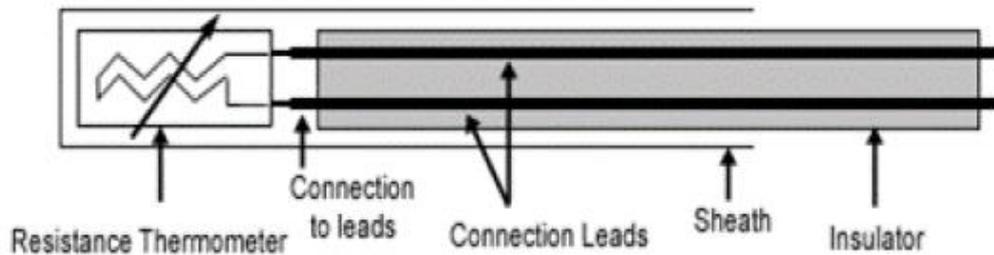


Figure 06 : Architecture interne d'une RTD [relevé du site officiel de National Instrument (NI)]

▪ Les thermistances

Une thermistance est un ensemble d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par pression exercée à température très élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000 °C. Une thermistance est composée de :

- Fe₂O₃ (oxyde ferrique)
- MgAl₂O₄ (aluminat de magnésium)
- Zn₂TiO₄ (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est extrêmement sensible à la température. On peut citer deux types de thermistance, les CTN et les CTP qui sont respectivement le coefficient de température négatif et coefficient de température positif.

La sensibilité de mesure des thermistances est très élevée (environ 200 Ω/°C), ce qui les rend très sensibles aux variations de températures. Malgré le fait qu'elles présentent un taux de réponse de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une marge de températures ne dépassant pas 300 °C.

L'avantage des thermistances c'est leur faible encombrement. Elles sont conçues sous forme de petits cylindres (d = 1 à 12 mm, L = 5 à 50 mm) de disques, de perles.

La résistance des thermistances varie selon les matériaux utilisés. Leur domaine d'utilisation va de -80°C à +700°C avec une précision de 0,1 à 0,5 °C. Les thermistances ne présentent pas le phénomène de polarisation et peuvent être traversées indifféremment par un courant continu ou alternatif.

L'emploi des thermistances a donc des avantages de sensibilité et de faible encombrement, mais on observe une forme non linéaire sur la variation de la résistance en fonction de la température.



Figure 07 : Exemple d'une thermistance [relevé du site french aolittel]

Les thermistances, comme les RTD sont des conducteurs thermosensibles dont la résistance varie avec la température mais la différence entre les deux, c'est que les thermistances présentent souvent des valeurs de résistance nominale plus élevées que les RTD (entre 2 000 Ω et 10 000 Ω) et peuvent également être utilisées pour des courants plus faibles.

3.1.3. Les différents modèles de capteurs de température

Dans cette partie nous allons illustrer les différents modèles de capteurs de température existant afin de définir le modèle nécessaire pour la réalisation de notre application.

- Capteur de température DS18B20

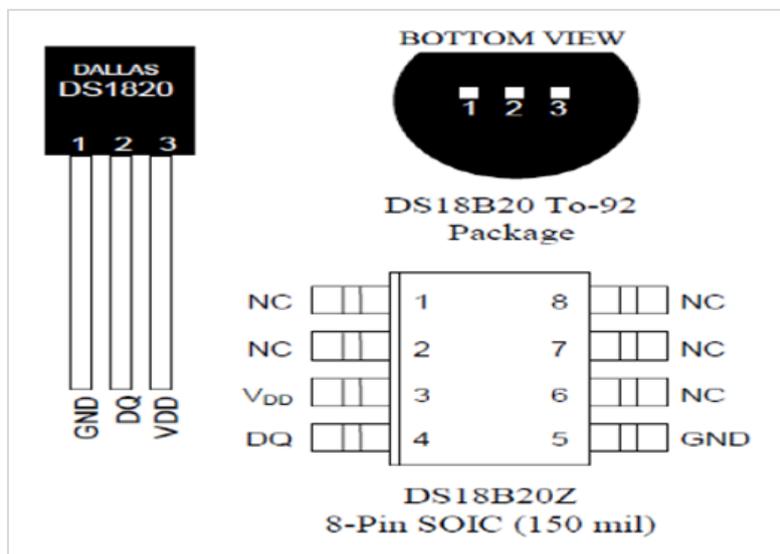


Figure 08 : Capteur de température Ds18B20

Le capteur DS18B20 est un capteur numérique de type thermistance qui permet de mesurer la température sur la plage de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$ et son équivalente fahrenheit -67°F à $+257^{\circ}\text{F}$ avec une précision de 0.5°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) et la plage d'alimentation est entre 3.0V et 5.5V.

Le capteur de température DS1820 utilise le protocole One-wire pour communiquer avec le microcontrôleur et sa résolution est programmable de 9 bits à 12 bits.

La description des broches est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	GND	La masse
2	DQ	Data in/out
3	VDD	Source de tension

Tableau 1: signification des broches du capteur

▪ Le capteur DHT11

Le DHT11 est un capteur numérique basique de température et très économique (5.46 euros sur digikey), il utilise une thermistance pour mesurer la température ambiante et aucune broche d'entrée analogique n'est nécessaire. D'après le site Adafruit (<https://www.adafruit.com/>) Il utilise une communication en single-wire (un seul bus de communication de données) et il n'est pas compatible avec Dallas one-wire, ceci dit, si on veut l'associer avec autre capteur de ce genre chacun devra avoir sa propre broche de données. L'inconvénient de ce capteur est qu'on ne peut pas obtenir de nouvelles données qu'une fois toutes les 2 secondes, la précision qui fait default ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) ainsi que l'incapacité de mesurer des température négative, d'où l'incompatibilité de ce capteur avec notre projet, vu que les températures de notre milieu expérimental chutent souvent jusqu'à atteindre le négatif et sa marge d'erreur trop grande pour les insectes.

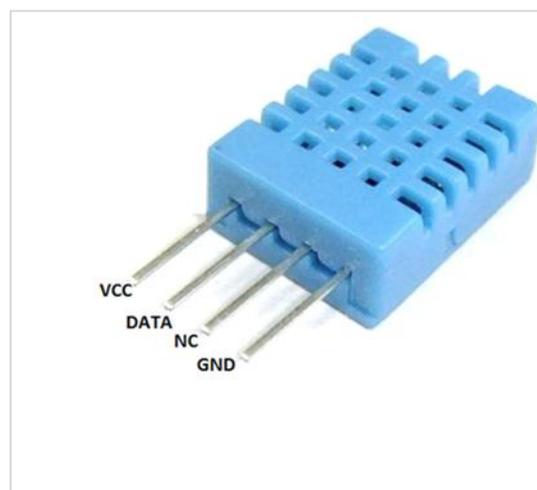


Figure 09 : Capteur DHT11

Description des broches du capteur est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VCC	Source de tension
2	DATA	Data in/out
3	NC	Non connecté/relié à la masse selon certaines datasheet
4	GND	La masse

Tableau 2: signification des broches du capteur

▪ Le capteur DHT22

Grand frère du DHT11, il est plus précis ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), plus gros et plus cher (10.87 euros sur digikey). Il est de type thermistance et peut mesurer des température négative (plage de mesure entre -40°C et 80°C). Il propose également une résolution à une décimale. D'après toujours adafruit (<https://www.adafruit.com/>) Même s'il utilise une communication en single-wire au même titre que le DHT11, Il n'est pas compatible avec Dallas one-wire, ceci dit, si on veut l'associer avec autre capteur de ce genre chacun devra avoir sa propre broche de données car one-wire est une technologie propre à Dallas Semi-conductors.

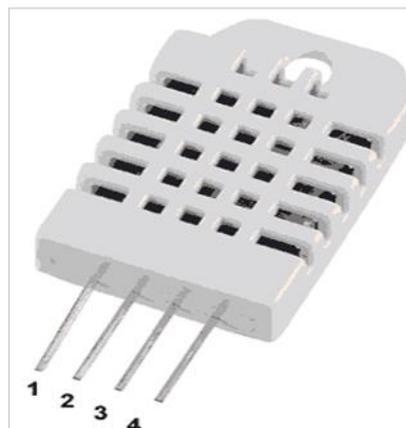


Figure 10 : capteur DHT22

Description des broches du capteur est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VCC	Source de tension
2	DATA	DATA in/out

3	NC	Non connecté/reliée à la masse selon certaines datasheet
4	GND	Masse

Tableau 3: signification des broches du capteur

▪ **Le capteur BMP280**

Capteur développé par la compagnie Bosch qui a l'avantage de proposer un câblage simple avec une liaison I2C, un prix qui est abordable (7.25 euros sur Digikey) et Il permet également de mesurer la température sur une plage de -40°C à 85 °C. L'inconvénient de ce capteur c'est sa précision qui est de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ et selon Adafruit (<https://www.adafruit.com/>) sa résistance augmente au fil du temps avec un auto réchauffement d'où le besoin de le calibrer à chaque fois. Il est souvent monté et soudé sur un PCB (circuit imprimé ou de l'anglais *printed circuit board*) pour faciliter son utilisation.

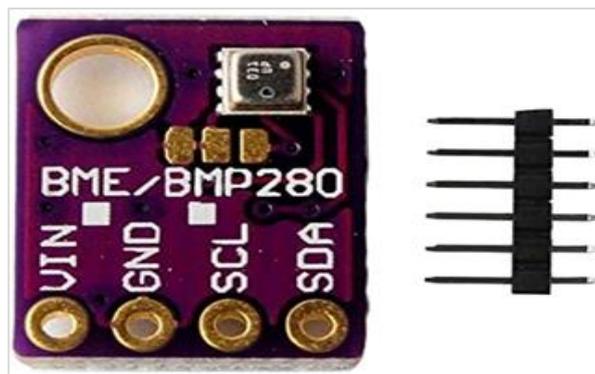


Figure 11: capteur BMP280 monté sur PCB

La description des broches du capteur est donnée par le tableau ci-dessous :

Broche	Signification
Vin	Source de tension
GND	Masse
SCL	Horloge
SDA	Data in/out

Tableau 4: Signification des broches du capteur BMP280

▪ **Le capteur AM2320**

Ce capteur ressemble beaucoup aux capteurs DHT (11/22) mais contrairement à ces derniers il a une interface I2C qui rend son utilisation plus facile. Il est proposé à un cout réduit (4.44 euros sur digikey), il permet de mesurer la température sur une plage de -40°C à 80°C. D'après Adafruit (<https://www.adafruit.com/>), le problème avec ce capteur c'est qu'il n'est pas bien documenté comme les autres capteurs de température. En effet, la fiche technique mentionne une précision de température de 0.5°C mais bien que ce capteur semble fonctionner, il n'est pas recommandé lorsqu'on se soucie de la précision car il présente probablement une marge d'erreur de 2°C à 3°C.

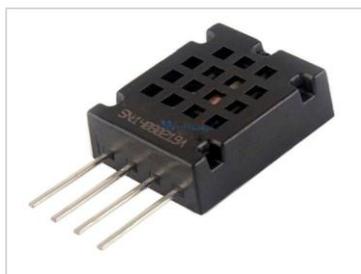


Figure 12 : Capteur AM2320

La description des broches du capteur est donnée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VDD	Source de tension
2	SDA	DATA in/out
3	GND	Masse
4	SCL	Horloge

Tableau 5: signification des broches du capteur AM2320

A partir des comparaisons entre les différents capteurs de température présents sur le marché, on constate que certains capteurs sont plus utilisables et adaptés à ce projet que peuvent l'être d'autres.

Capteur	Mesure	Borne Inf	Borne Sup	Précision	Communication	Fournisseurs
DS18B20	Température	-55°C	125°C	0,5°C	One-wire	Digikey: 2,00€
DHT11	Température	0°C	50°C	2°C	Single-wire	Digikey : 5,46€
DHT22	Température	-40°C	80°C	0,5°C	Single-wire	Digikey : 10,87€
BME280	Température	-40°C	85°C	1°C	I2C	Digikey :7,25€

SI7021	Température	-10°C	85°C	0,3°C	I2C	Gotronic 8,25€ ;
SHT1x	Température	-40°C	128°C	0,3°C	I2C	VS-ELEC : 12,99€
AM2320	Température	-40°C	80°C	0,5°C	I2C	Digikey :4,44€
DS18B20(sonde)	Température	-55°C	125°C	0.5°C	One-wire	Gotronic :12.90€ ;

Tableau 6: Comparaison de quelques capteurs présents sur le marché

Modèles qui seraient adaptés pour un usage extérieur pour les insectes :

▪ **Le capteur de température DS18B20**

Ce capteur existe en version étanche (sonde) pour un usage extérieur et ne nécessite pas de protection particulière contre les insectes comme c'est le cas des autres capteurs de température ou il faudra les protéger par exemple avec un boîtier et couvrir le tout d'une grille fine afin que les insectes ne puissent pas s'y installer. Il a également une bonne tolérance au câblage long.

En plus de ces avantages Le Ds18B20 est un composant peu cher (2 euros model classique et 12.90 euros pour la version sonde étanche) qui possède une interface de connexion Unique One-wire qui nécessite un seul port pour la communication et il n'y a pas de composant externe qui est requis sauf en cas de son utilisation sur une carte Arduino ou une résistance pull-up est requise car les pull-up interne ne fonctionne pas sur Arduino.

Une résistance pull-up ou dite de tirage permet de réduire le bruit, éliminer les broches flottantes et établir deux états électriques distincts à savoir, un état haut (High) et un état bas (Low).

3.2. Capteur d'humidité

3.2.1. Définitions et propriétés

Nous allons dans un premier temps faire une synthèse sur les propriétés de l'aire humide et de l'air sec et par la suite définir la pression de saturation, l'humidité spécifique, l'humidité relative, l'humidité du sol et le point de rosée. Nous présenterons également les différents modes de détection d'humidité en fonction des applications auxquelles elles seront destinées et faire un comparatif des différents capteurs d'humidité pour pouvoir choisir les plus adaptés à notre projet.

D'après l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI), l'air sec est défini par les caractéristiques suivantes :

- L'air est considéré comme étant un gaz parfait.
- Les constantes de l'air sont : Masse molaire est égale à 28,9644kg/kmol.
- Pression atmosphérique au niveau de la mer : 101,325 kPa.
- Masse volumique au niveau de la mer : 1.225kg/m3.
- Température au niveau de la mer : 15°C.

- Constante universelle des gaz parfaits : 8314,42 J/K kmol.
- L'humidité est négligée.

L'air sec comprend 78,09% d'azote, 20,95% d'oxygène, 0,93% d'argon, 0,003% de CO₂ et de faibles particules de néon, krypton, xénon, radon, ozone, hélium et d'hydrogène.

Par contre, l'eau joue un rôle particulier dans l'atmosphère où elle existe sous trois états : solide, liquide, et gazeux. A l'état gazeux, la vapeur d'eau intervient dans des proportions pouvant atteindre 0,1% en Sibérie à 5% dans les régions maritimes équatoriales. D'un point de vue thermodynamique, l'air atmosphérique est considéré comme étant un mélange de deux gaz à savoir, l'air sec et la vapeur d'eau.

▪ Air humide

L'humidité présente un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dans l'air ambiant. En général, le fait de parler de mesure d'humidité, on fait allusion au taux d'humidité exprimé en pourcentage qui est en fait l'humidité relative. La détermination de cette mesure est assez complexe, car elle est étroitement liée à des grandeurs physiques telles que la température et la pression.

On considère un volume V d'air humide à la température T . La masse m d'air humide présente dans ce volume est la somme de la masse m_a d'air sec et celle de la vapeur d'eau m_v .

$$m = m_a + m_v \quad (1)$$

La pression totale p ou pression barométrique, est égale à la somme des pressions partielles p_a de l'air sec et celle de la vapeur d'eau p_v .

$$p = p_a + p_v \quad (2)$$

Le rapport du mélange r est le rapport de la masse m_v de vapeur d'eau à la masse m_a d'air sec à laquelle cette vapeur d'eau est mélangée.

La grandeur de référence en humidité est :

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (3)$$

$P_s(T)$, la pression de vapeur saturante est la pression de vapeur dans un état d'équilibre avec l'eau liquide à une température T , c'est la valeur maximale qui peut atteindre la pression partielle p_v de la vapeur à la température T , au-delà on parle de condensation.

▪ Humidité spécifique

L'humidité spécifique est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume V d'air humide sur la masse d'air sec contenue dans le même volume. L'humidité spécifique est également appelée teneur en eau.

$$H_s = \frac{p_v}{p} \quad (4)$$

▪ Degré hygrométrique

Le degré d'hygrométrie est le rapport de la masse d'eau qui est contenue dans un volume d'air humide à la masse maximale d'eau que peut contenir ce volume à saturation. A température et volume déterminés, ce rapport peut être exprimé en fonction des pressions :

$$d_h = \frac{p_v}{p_{s,\theta}} \quad (5)$$

▪ Humidité relative

$$HR = 100 \times d_h = 100 \frac{p_v}{p_{s,\theta}} \quad (6)$$

L'humidité relative est le degré d'hygrométrie mais exprimé en pourcentage. Si θ est supérieure à 0°C, $P_s = P_{s,e}$, sinon, si θ est inférieure à 0°C, $P_s = P_{s,g}$. On dit dans ce cas qu'il s'agit d'une humidité relative par rapport à la glace. Une humidité relative de 50 % signifie que l'air est à la moitié de sa saturation en eau. Quand l'hygrométrie est à 0 %, l'air est parfaitement sec, ce qui veut dire qu'il ne contient pas de molécules d'eau et quand il est à 100 %, l'air est saturé en eau et toute quantité d'eau que l'on y ajouterait précipitera sous forme de nuages et tombera sous forme de pluie ou de neige.

▪ Humidité du sol

L'humidité du sol (eau contenue dans le sol) détermine essentiellement la variation des caractéristiques de différents matériaux ou sols. En effet, le taux d'humidité d'un sol va déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques concernent non seulement les intrants solides mais aussi liquides qui vont pénétrer dans le sol.

Il existe différentes techniques pour mesurer de l'humidité du sol :

✚ Méthode gravimétrique

Cette méthode consiste à sécher un échantillon de sol en le passant dans un four à 105 °C et connaître ensuite par pesée finale le poids d'eau contenu par l'échantillon. C'est une méthode efficace, mais longue et coûteuse.

✚ Méthode par sonde à neutrons

Cette méthode est efficace mais particulièrement chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil) pour être utilisée par un simple opérateur.

Méthode par mesure de la conductivité électrique

Cette méthode est peu coûteuse mais malheureusement peu précise, elle est aussi influencée d'une manière directe par la nature du sol et la salinité de ce dernier.

✚ Méthode capacitive

Méthode électromagnétique en mesurant la permittivité diélectrique. Cette méthode est économique, mais au volume d'influence limité (entre 1 et 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, sa température et sa salinité.

Cette méthode est adaptée seulement aux petits volumes de sol, avec un bon rapport qualité/prix.

Méthode TDR

Le principe de cette méthode est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique tout le long d'une électrode placée dans le sol.

Son volume d'influence est par ailleurs supérieur à celui des méthodes capacitives et la mesure est faiblement influencée par la température, la salinité ainsi que le type de sol. Cette méthode permet des mesures précises à un tarif qui est maintenant plus abordable qu'il y a quelques années.

Le point de rosée

L'air contient une quantité d'eau sous forme de vapeur et cette quantité dépend de la température de l'air c'est-à-dire que plus l'air est chaud, plus il peut contenir de l'humidité. Néanmoins, le soir, on constate que l'air se refroidit dès le coucher du soleil. Lorsque ce refroidissement arrive à un niveau critique au-dessous duquel l'humidité n'est pas capable de rester sous forme de vapeur, cette dernière se condense sur toutes les surfaces qu'elle rencontre à savoir, le sol, en premier lieu. Cependant on parle souvent de rosée du matin mais en réalité, la rosée se forme dès le soir. D'une manière générale ce phénomène peut se produire à tout moment, quand un corps froid est situé dans un air ambiant contenant de la vapeur d'eau. La température à laquelle l'humidité se condense, elle est appelée « point de rosée » qui peut être assez élevé en été (jusqu'à 15 degrés) car l'air est très humide, et en hiver, il avoisine les 0 degrés.

3.2.2. Domaines d'utilisation des capteurs d'humidité

Le taux d'humidité, avec la température compte parmi les variables de l'environnement les plus souvent mesurées, de par l'influence de ces paramètres sur le fonctionnement des systèmes. Ces capteurs comprennent de nombreuses applications :

La pharmaceutique : le taux d'humidité des médicaments sous forme de poudre doit être étroitement contrôlée.

L'industrie gazière : En effet, lorsqu'un gaz se détend à l'entrée d'une usine par exemple, l'apparition d'hydrates à cause des phénomènes de condensation, peut bloquer les détendeurs et donc interrompre la distribution de gaz, avec des conséquences catastrophiques pour les industries.

L'agroalimentaire : l'humidité joue un rôle important dans l'altération de stocks ainsi que le développement de moisissure ce qui occasionne des pertes c'est pour cela que chaque étape de production nécessite donc des conditions spécifiques.

L'**agriculture** et les biotechnologies : -l'humidité de l'air est un paramètre primordial pour le développement des cultures et la prévision des risques de **développement des insectes ravageurs**.

3.2.3. Les différentes technologies pour la mesure d'humidité

Dans cette partie nous allons présenter les différentes techniques pour la mesure d'humidité.

- **Les capteurs d'humidité à base d'un électrolyte**

Les électrolytes sont des conducteurs ayant la propriété de conduire le courant électrique par transport simultané vers les électrodes. L'application de cette technologie est dominante dans les batteries de haute-énergie, les dispositifs d'affichage électro-chromique et les cellules de carburant. Selon les travaux de M. Matsuguchi, les poly-électrolytes sont des matières de base excellentes pour les capteurs d'humidité résistives, car leur conductivité électrique varie avec l'absorption des molécules d'eaux. Ce type de capteur souffre cependant de l'instabilité à taux élevé d'humidité.

- **Les capteurs d'humidité à base de céramique**

La grande partie des travaux de recherche concernant la détection d'humidité se sont focalisés sur l'utilisation de céramique comme matériau de base pour développer des capteurs commerciaux dus à la possibilité d'intégrer et miniaturiser dans des composants électroniques. Ces matériaux montrent quelques supériorités dans la performance à cause de leurs faibles coûts, leurs stabilités thermiques, leurs résistances élevées à l'attaque chimique et à la contrainte mécanique, leurs réponses rapides aux changements d'humidité et leurs résistances à la corrosion. Cependant, ce type de sonde présente des inconvénients liés à la faible sensibilité et le manque de la réversibilité dû à l'absorption chimique des molécules d'eau.

- **Les capteurs d'humidité à base de polymère organique**

Les chercheurs se sont tournés ces dernières années vers les capteurs d'humidité à base de polymère organique pour développer des capteurs commerciaux : vu le faible prix, la haute sensibilité, la facilité de fabrication et la possibilité de montage sur les appareils électroniques. De plus ces matériaux peuvent être adaptés à de différentes technologies de transducteurs, à cause de leurs caractéristiques hors du commun telles que la facilité de mise en œuvre, l'adhésion à une grande variété de substrats (Verre, métal, ...) ainsi qu'une bonne stabilité thermique et mécanique.

- **Capteurs résistifs et capteurs capacitifs**

Les capteurs d'humidité sont classés en deux catégories à savoir résistifs et capacitifs et cela en fonction de la variation des propriétés électrique des capteurs par rapport aux molécules d'eaux. On peut concevoir un capteur à partir de deux électrodes recouvertes d'une couche de matériau sensible à l'humidité. Ce type de structure est comparable à une résistance en parallèle avec une capacité. Par définition, la capacité augmente quand l'humidité croît contrairement à la résistance qui diminue. Dès lors qu'un peu d'eau pénètre dans le matériau, la constante diélectrique de la structure s'élève de manière considérable. De son côté la résistance diminue car la présence de l'eau favorise la conduction des électrons dans le matériau. Ce matériau peut

être soit une céramique, un électrolyte ou un polymère. Les capteurs d'humidité qui sont commercialisés sont principalement faits à base de films du polymère ou de céramique poreuse. Un matériau qui permet d'avoir une bonne structure capacitive est souvent un mauvais conducteur, ce qui veut dire que sa résistance sera trop importante ($>10^7 \Omega$).

▪ Capteurs d'humidité résistifs

Parmi les différents types de capteurs d'humidité qui sont développés, les capteurs résistifs ont reçu beaucoup d'attention vu leurs avantages tels que la haute sensibilité, la réponse rapide, la facilité de préparation et leur faible coût. De plus, ces capteurs d'humidité résistifs sont des composants qui convertissent l'humidité de l'air par un changement d'impédance. Cela peut être mesuré par un courant, une tension ou une résistance. Les recherches sur les capteurs sont basées principalement pour former des films sensibles afin d'améliorer leur durabilité ainsi que leur stabilité sous un environnement humide.

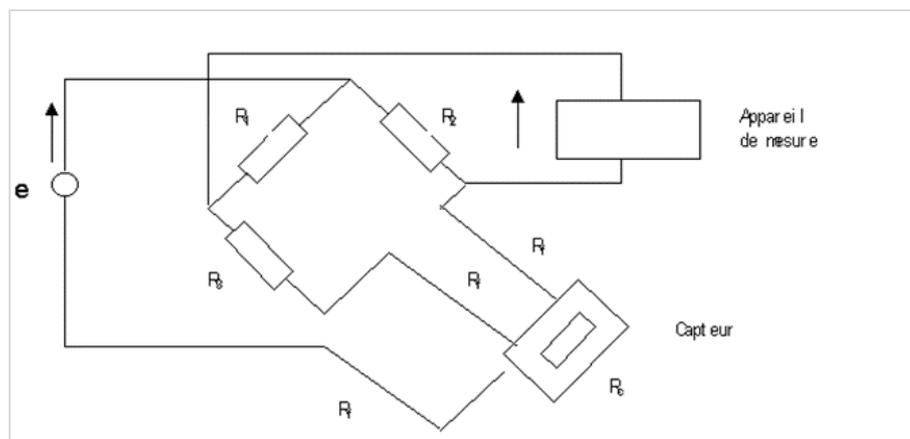


Figure 13 : Exemple de schéma d'un capteur résistif [relevé du site produ.chez.com]

▪ Capteurs d'humidité capacitifs

A cause de la forte permittivité de l'eau, l'humidité présente dans l'air ambiant est un interférent important pour les capteurs de types capacitifs. Pour cela, la plus grande partie des capteurs d'humidité commercialisés sont des capteurs capacitifs. De plus, la plupart des capteurs d'humidité capacitifs sont conçus à base d'une couche sensible de polymère, à cause de la faible constante diélectrique relative à celle de l'eau.

Les principaux avantages des capteurs capacitifs sont :

- Leur faible coût de conception.
- Une simple mise en œuvre de leurs interfaces électroniques.
- Leur possibilité de miniaturisation.

- Leur défaut est le manque de sélectivité, qui induit un manque de précision sur les mesures, en plus de l'instabilité pour les températures élevées.

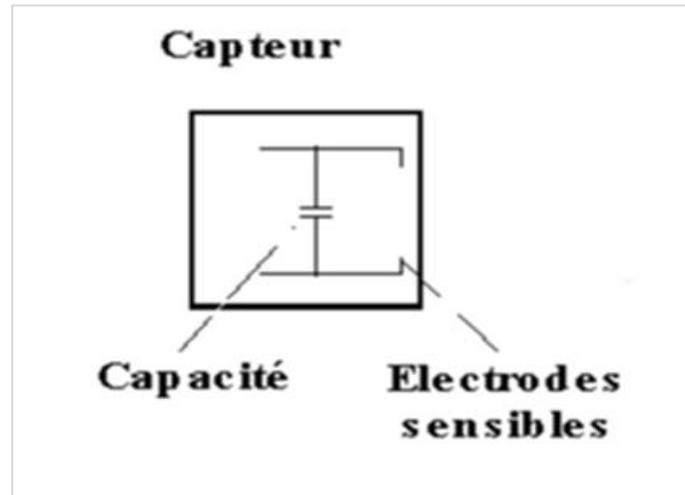


Figure 14 : Exemple d'un schéma d'un capteur capacitif [relevé du site "philippe.berger2.free.fr"]

3.2.4. Les différents modèles de capteur d'humidité

a) - Les différents capteurs de mesure d'humidité relative

- **Le capteur DHT11**

En plus des caractéristiques décrites précédemment sur la mesure de température, ce capteur peut également effectuer des mesures d'humidité relative. En effet, le capteur comprend une technologie basée sur la méthode de mesure capacitive. Néanmoins, ce capteur propose une plage de mesure (20% à 90%) et une précision de mesure ($\pm 5\%$) qui ne sont pas adaptés au projet.

- **Le capteur DHT22**

Au même titre que le DHT11, le DHT22 permet de mesurer l'humidité relative en plus de la température en utilisant également la méthode capacitive. Il possède une plage de mesure (0% à 100%) et une précision ($\pm 2\%$) intéressante, ce qui explique son prix qui est deux fois plus cher que le DHT11.

- **Le capteur BMP280**

Ce capteur développé par Bosch permet de mesurer l'humidité relative de 0% à 100% avec une précision de $\pm 3\%$ mais doit être recalibré à chaque mesure à cause de sa résistance qui augmente au fil du temps. Ceci dit, ce capteur n'est pas privilégié pour des utilisations où la fiabilité et la précision sont des facteurs clés comme c'est le cas dans ce projet.

b) - Les différents capteurs de mesure d'humidité du sol

- **Le capteur YL-69**

C'est un capteur résistif qui utilise **la méthode par mesure de la conductivité électrique** entre les deux sondes du capteur. Ce capteur est très économique (3,54 euros sur VS-ELEC) qui utilise une interface à 4 broches, il est utilisé pour déterminer si le sol est suffisamment humide ou en déficit d'eau, il possède un comparateur basé sur un LM393 avec 2 sortie analogique et numérique, cette dernière est plus précise. Ce module comprend aussi 2 indicateurs de tension (led rouge pour la sortie analogique A0 et led verte pour la sortie numérique D0), il permet aussi de régler la sensibilité du capteur à l'aide d'un potentiomètre. Cependant ce capteur présente quelques défaillances, à savoir les sondes qui s'oxydent après quelques semaines d'utilisation ce qui peut affecter la stabilité des mesures et le temps de réponse qui est très long et varie très fortement.

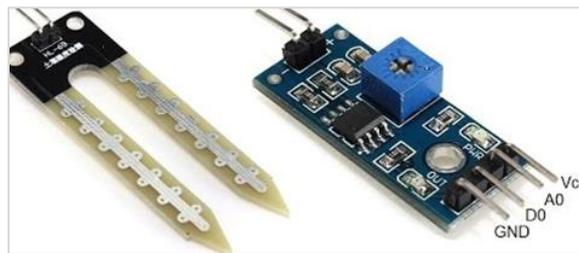


Figure 15 : image du capteur YL-69 [relevé du site VS-ELEC]

Description des broches du capteur est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VCC	Source de tension
2	A0	Sortie analogique
3	D0	Sortie numérique
4	GND	La masse

Tableau 7: signification des broches du capteur YL-69

- **Le capteur SEN0193**

Ce capteur capacitif d'humidité du sol se distingue de la majorité des capteurs résistifs présent sur le marché et utilise **la méthode capacitive** pour détecter l'humidité du sol. Le problème que présente le capteur résistif (facilement corrodé) est évité, ainsi sa durée de vie est considérablement prolongée. Ce capteur possède un module qui se raccorde sur une entrée analogique d'une carte compatible Arduino ou directement sur le shield d'expansion E/S via le cordon inclus et ce en utilisant une communication plug and play (PnP) qui signifie « brancher et utiliser » qui permet aux systèmes de reconnaître facilement et automatiquement les périphériques compatibles avec cette technologie dès le branchement.



Figure 16 : image du capteur SEN0193 [relevé du site commercial Farnell]

Description des broches du capteur est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VCC	Source de tension
2	GND	La masse
3	A0	Sortie analogique

Tableau 8: signification des broches du capteur SEN0193

c) - Les différents types de capteurs de rosée

Plusieurs insectes s'abreuvent de la rosée à l'image des abeilles d'où l'importance d'avoir l'information sur la rosée pour pouvoir prévenir le développement des insectes ravageurs et mener notre lutte contre ces derniers. Pour cela on va mettre en place un capteur de pluie/rosée qu'on va placer près des feuilles de plantes qui déterminera la présence ou non de gouttelettes d'eau.

- **Le capteur de pluie/rosée octopus Brick**

Le capteur Octopus Brick utilise une interface de communication avec 3 fils (Sortie analogique, tension d'alimentation et masse) et peut être directement connecté à une extension d'Entrées/Sorties Arduino qui prend en charge la connexion directe du capteur. La tension de sortie du capteur augmente lorsque l'humidité de la surface du capteur augmente, ceci dit quand la surface du capteur est en contact avec une gouttelette d'eau (rosée), une tension est générée pour indiquer la présence d'eau. Ce capteur n'est pas couteux (2 euros sur le site Gotronic), néanmoins, il n'est pas étanche, le connecteur ne doit pas être en contact avec l'eau, ainsi pour envisager son utilisation dans un milieu extérieur on doit impérativement mettre en place un boîtier de protection.

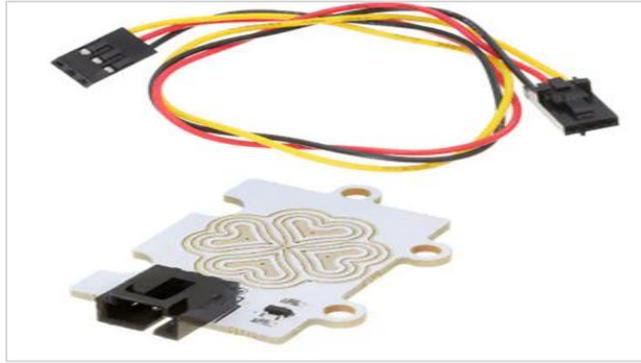


Figure 17 : image du capteur octopus rain/steam sensor [relevé du site Pi supply]

Description des broches du capteur est représentée par le tableau ci-dessous :

N°	Broche	Signification
1	VCC (rouge)	Source de tension
2	GND (noir)	La masse
3	A0 (jaune)	Sortie analogique

- **Capteur de pluie/rosée seedstudio**

Le capteur de pluie/rosée de seedstudio peut fonctionner en mode analogique ou en tout ou rien (numérique), très économique (3.05 euros sur gotronic) et utilise une communication PnP. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du capteur octopus, de même pour l'utilisation dans le milieu extérieur.



Figure 18 : image du capteur de pluie/rosée de seedstudio [relevé du site gotronic]

Description des broches :

N°	Broche	Signification
1	VCC	Source de tension
2	GND	La masse
3	A0	Sortie analogique
4	A1	Sortie numérique

III. Développement du projet

III.1. Les Modèles qui seraient adaptés pour un usage extérieur pour les insectes

a) - Humidité relative : Depuis la comparaison des différents capteurs mesurant l'humidité relatives le capteur le plus adapté pour le projet est le DHT22. Néanmoins, on devra obligatoirement protéger le capteur qui n'est pas vraiment étanche.

b) - Humidité du sol : Après comparaison des 2 types de capteurs à savoir, capacitif (SEN0193) et résistif (YL-69), on constate bien que le capteur capacitif est de bien meilleure qualité et possède une longue durée de vie avec une meilleure précision ce qui nous mène à opter pour ce type de capteur.

c) - Rosée : Le capteur Octopus Brick et le Seedstudio ont beaucoup de point en communs mais on choisit toutefois le seedstudio par rapport à sa flexibilité d'utilisation à savoir, en numérique ou en analogique selon le besoin.

III.2 Capteur de vitesse du vent (anémomètre)

Le vent est une variable très importante dans la surveillance d'un environnement agricole notamment par son influence directe sur l'assèchement des terres et ce, en réduisant la réserve en eau utile ce qui provoque une baisse considérable de rendement dans les cultures qui ne sont pas protégées (eap.mcgill.ca).

Un anémomètre est un dispositif qui permet de mesurer cette variable (la vitesse du vent), c'est une partie importante d'une station météo. Les anémomètres professionnels sont assez robustes et sont équipés d'un connecteur étanche, par contre ils sont coûteux (53,94 euros sur la boutique semageek), ce qui n'est pas adapté au projet.

Pour mesurer la vitesse du vent toute en minimisant les couts on va concevoir un modèle qui se rapproche le plus de l'anémomètre professionnel en utilisant des composants les moins coûteux possibles et consommant le moins d'Énergie possible.



Figure 19 : exemple d'un anémomètre professionnel [relevé de la boutique semageek]

III.2.1 Les différentes technologies de conception

a) - Systèmes à base de LED et capteur photosensible

Ce système consiste à utiliser une LED allumée au-dessus d'un disque tournant troué dans 2 côtés opposés (afin d'équilibrer le disque) et un capteur de lumière au-dessous du disque qui détectera lors de la rotation une alternance ombre/lumière sous forme de signal qui sera envoyé vers un microcontrôleur qui se chargera du calcul de la vitesse du vent.

Le principal inconvénient de cette technologie reste l'utilisation de la LED qui sera constamment allumée et donc une forte consommation de courant. (Bentek.fr)

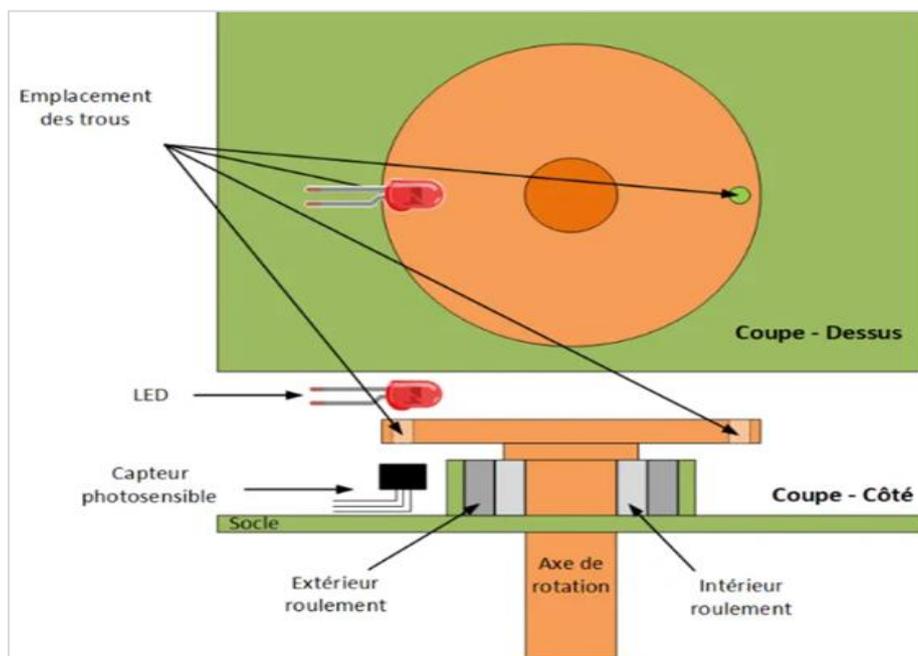


Figure 20 : mesure de vitesse de rotation à l'aide d'une LED et un capteur lumineux (bentek.fr)

b) - Système à base d'un capteur à effet hall

Ce système consiste à utiliser un capteur à effet hall qui va détecter la présence ou pas des aimants placés dans les 2 trous du disque tournant. Cependant, le signal reçu doit être filtré car le capteur est très sensible au bruit et on devra utiliser une carte d'adaptation qui va nous sortir un signal tout ou rien (présence d'aimant/ absence d'aimant). (Bentek.fr)

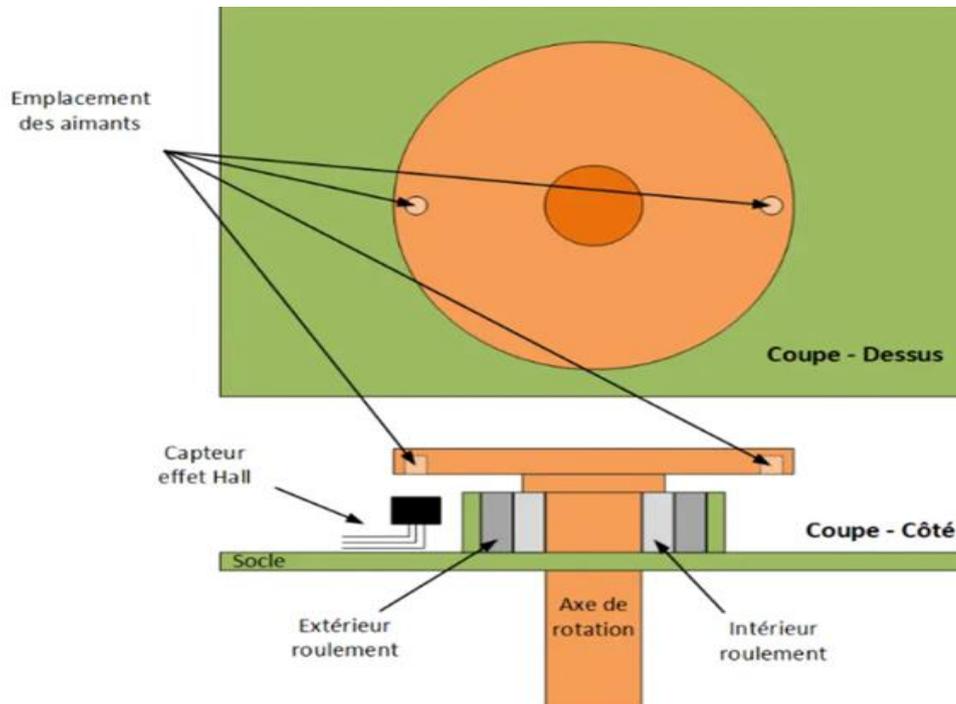


Figure 21 : mesure de vitesse du vent à l'aide d'un capteur à effet hall (bentek.fr)

c) - Système à base à base d'un moteur à courant continue

Ce système consiste à fixer l'arbre d'un moteur sur l'axe tournant de l'anémomètre qui va tourner lors de la présence du vent ce qui va générer une différence de tension aux bornes du moteur qu'on va mesurer à l'aide d'un microcontrôleur et à partir de là, on va étalonner ce capteur (anémomètre) de façon à trouver la relation entre la différence de tension et la vitesse du vent appropriée. Les différentes pièces de l'anémomètre seront modélisées avec un logiciel de modélisation 3D, par la suite elles seront imprimées à l'aide d'une imprimante 3D (en prenant en compte les contraintes d'impression).

L'avantage que présente ce système c'est qu'il est très économique avec une faible consommation d'énergie ce qui nous pousse à privilégier cette technologie.

▪ Choix du moteur à courant continu

Pour choisir un moteur avec une vitesse de rotation (V_{R0}) qui correspond à notre système on doit tenir en compte de la valeur maximale de la vitesse du vent (V_a) qui sera supportée par le moteur, ainsi que le rayon de l'hélice de l'anémomètre (R_H).

$$V_a = V_{R0} \times 2\pi \times R_H \quad (1)$$

$$V_{R0} = \frac{V_a}{2\pi \times R_H} \quad (2)$$

On fixe une vitesse maximale que le vent ne va pas dépasser dans notre zone d'expérimentation à savoir 160 km/h.

$$V_{R0} = \frac{160000}{60 \times 2\pi \times 0.06}$$

$$V_{R0} = 7077 \text{ RPM}$$

On choisit donc un moteur avec une vitesse de rotation qui avoisine les 7077 RPM afin de minimiser l'erreur et ainsi avoir une meilleure précision.

V_a : vitesse du vent en mètres/secondes

V_{R0} : vitesse de rotation du moteur en tours/minutes

R_H : rayon de l'hélice en mètres

▪ Etalonnage du capteur de vitesse du vent

L'étalonnage est une technique qui établit une relation entre les valeurs et ses incertitudes de mesures associées. Pour les capteurs industriels prêts à l'emploi, leurs fournisseurs proposent des relations d'étalonnage après avoir effectué de multitudes mesures ainsi que leur expérience de leur matériel.

L'anémomètre ne sera pas fourni par un fournisseur donc on devra nous-même effectuer ces multitudes mesures pour relever la relation qui existe entre la différence de tension générée aux bornes du moteur et la vitesse du vent.

III.3. Conception 3D des différents boîtiers de protection pour les capteurs

Les différents capteurs sélectionnés ne sont pas totalement étanches et ont souvent besoin d'être protégés contre les insectes pour éviter leur endommagement, d'où l'importance de faire des conceptions 3D des différents boîtiers de protection et les imprimer par la suite à l'aide d'une imprimante 3D.

1. Logiciel de conception 3D SolidWorks

La modélisation de ces différents boîtiers se fera à l'aide du modèleur 3D SolidWorks qui est un logiciel de conception assistée par ordinateur développé par la société Dassault. Il utilise le principe de la conception paramétrique en définissant une entité par des paramètres qui peuvent être facilement modifiables, ces paramètres peuvent être de plusieurs types : cartésiens (coordonnées par rapport à un repère), intrinsèques (longueurs, angles), situationnels (distance, angle entre 2 éléments). Il génère trois types de fichiers qui sont liés : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan et toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres.

▪ **La pièce**

La conception d'une pièce nécessite un passage par plusieurs fonctions volumiques, et ces fonctions sont rappelées sur l'arbre de construction. Parmi les fonctions génératrices il existe :

Bossage : C'est l'un des passages obligatoires pour créer une géométrie 3D, elle permet de passer d'une esquisse à un corps volumique.

Enlèvement de matière extrudé : A partir d'une esquisse, elle permet d'enlever la matière souhaitée, l'esquisse est souvent dessinée directement sur le modèle 3D.

Révolution : Elles fonctionnent de la même façon que l'extrusion, elle permet de déplacer une section droite suivant un cercle ou un arc de cercle.

Congé et chanfrein : Permet de réaliser des congés et des chanfreins directement en sélectionnant l'arête souhaitée.

Symétrie : Il existe 2 fonctions de symétrie, une pour l'esquisse et une autre pour les fonctions. C'est une fonction qui permet d'utiliser les propriétés géométriques du modèle pour réaliser le modèle avec le moins d'opération possible.

▪ **L'assemblage**

Un système est composé de plusieurs pièces, SolidWorks permet de réaliser ces systèmes appelés "assemblages" en partant de plusieurs pièces. Pour cela, il existe des fonctions appelées "Contraintes" permettant de lier ces pièces entre elles. Parmi les contraintes les plus utilisées dans un assemblage, il existe :

Contrainte de coaxialité : Elle permet d'assembler deux pièces généralement cylindriques en liant les deux axes de chaque pièce formant un seul axe. Cette contrainte supprime 4 des 6 degrés de libertés des pièces pour ne laisser que la rotation et la translation selon l'axe du cylindre.

Contrainte de coïncidence : Elle est généralement utilisée sur des surfaces planes, elle permet de contraindre deux surfaces à se positionner dans le même plan, elle élimine alors 4 des 6 degrés de libertés pour ne laisser que la translation sur ce plan de coïncidence.

Contrainte tangente : Elle fonctionne de la même façon que la contrainte de coïncidence, mais elle est généralement utilisée dans le cas d'un contact Cylindre/Plan.

▪ **La mise en plan**

La dernière étape de la conception est la mise en plan des pièces et/ou des assemblages. Il s'agit d'une projection du modèle sur un plan 2D. Sur ce plan on retrouve les cotations dimensionnelles et géométriques. C'est ces plans, qui serviront par la suite à la fabrication de la pièce.

▪ **Impression 3D**

Principe de fonctionnement

Le principe d'impression 3D est basé sur la modélisation de l'objet virtuel 3D en couches 2D de très fines épaisseurs. Ces fines couches sont par la suite déposées l'une après l'autre en les fixant sur les précédentes, ce qui reconstitue l'objet réel. Le déplacement des buses des imprimantes se fait généralement suivant 3 axes (3 translations d'espace (X, Y, Z)). Certaines imprimantes 3D, plus sophistiquées, possèdent également 2 rotations sur la tête de buse facilitant ainsi la conception des supports nécessaires à certaines pièces mais ce type d'imprimante reste excessivement cher et destinée à des conceptions complexes.

En 2019 apparaît une nouvelle technologie permettant d'éviter l'impression d'un objet par couches successives et cela en polymérisant point par point le volume d'une résine contenue dans un récipient. (*Tiré de wikipedia.org*).

▪ **Limites**

La maîtrise du logiciel : Le véritable intérêt des imprimantes 3D réside dans la possibilité de créer des objets sur mesure. Néanmoins, la fabrication de tels objets nécessite la maîtrise de logiciels de modélisation 3D.

▪ **Matériaux, tailles et formes**

Les imprimantes 3D généralement commercialisées ne sont pas capables de fabriquer que des objets en plastique. En effet, le plastique nécessite une température de fusion de 130°, alors que le métal nécessite une température de fusion de plus de 1000°, ce qui présente une différence de technologie des imprimantes 3D. Cependant, l'imprimante 3D présente également des limites en ce qui concerne la taille des objets fabriqués (environ 20cm*20*15). Néanmoins, on peut contourner cette limitation en imprimant un objet de grande taille en plusieurs parties. La forme d'un objet est aussi limitée car on ne peut pas imprimer une forme complexe systématiquement avec une imprimante 3D à filament.

▪ **Impact sur l'environnement**

Les imprimantes 3D fonctionnent généralement avec des filaments de types ABS qui est un plastique issu principalement du pétrole constituant la majorité des objets de grande consommation. Le PLA (dérivé d'amidon de maïs), est également très utilisé avec l'avantage qu'il présente d'être à terme biodégradable et qui fait de lui le plastique d'origine naturelle le plus utilisé en impression 3D. Cependant, avec les données actuelles on ne peut pas évaluer le niveau de toxicité réel des émissions lors des impressions 3D. En effet, d'après des données disponibles venant des recherches qui ont évalué les particules ultrafines liées à l'impression 3D, préconisent la prudence lors de l'utilisation après les résultats obtenus. Néanmoins, De nombreuses solutions sont en train d'émerger, on pourra citer celle développée par l'agence Emerging Objects d'imprimer à base d'argile, de boue ainsi que de pulpe de bois. (*Tiré de danydanfree.free.fr*)

▪ **Avantages**

La fabrication de toutes sortes d'objets

- Le principal atout d'une imprimante 3D est permettre aux amateurs et aux professionnels de l'impression 3D de concevoir des objets propres à eux. En effet, l'imprimante 3D possède une certaine précision pour permettre de concevoir des objets

relativement techniques, ce qui fait d'elle un excellent moyen de développer la créativité.

Minimiser les coûts de développement

- L'imprimante 3D permet de réduire le coût habituel de prototypage et permet d'éviter l'achat de produits prêts à l'emploi qui sont souvent excessivement chers. (Tiré de *danydanfree.free.fr*)

Conception mécanique de l'anémomètre

L'anémomètre est constitué de 9 pièces à imprimer en 3D et assembler à la fin pour en faire un objet monobloc. Les différentes pièces sont :

- Les coupelles de l'anémomètre (3 pièces)
- Axe de rotation de l'anémomètre (3 pièces)
- Support de l'Axe et du roulement (3 pièces)

▪ Les coupelles

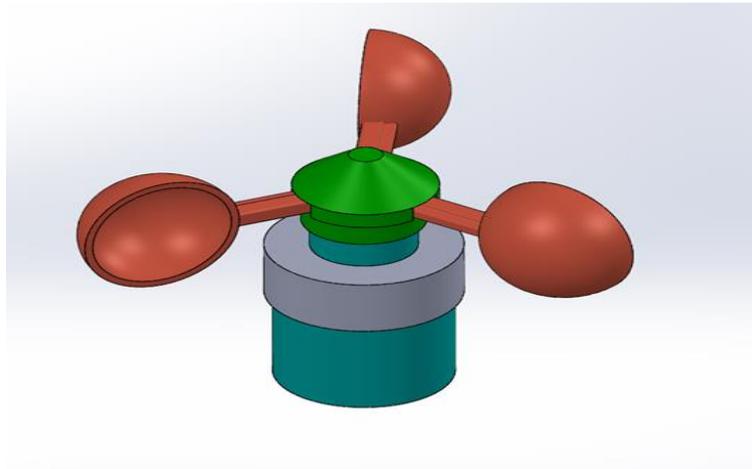


Figure 22 : Vue tridimensionnelle de l'anémomètre modélisé avec SolidWorks

La coupelle modélisée est une demi-coquille de diamètre intérieur de 35mm, de diamètre extérieur de 39mm et d'une épaisseur de 2mm avec également un bras horizontal de 23mm fixé sur un axe vertical (Axe de rotation) à l'aide d'une languette modélisée en forme de « T » pour assurer une bonne fixation.

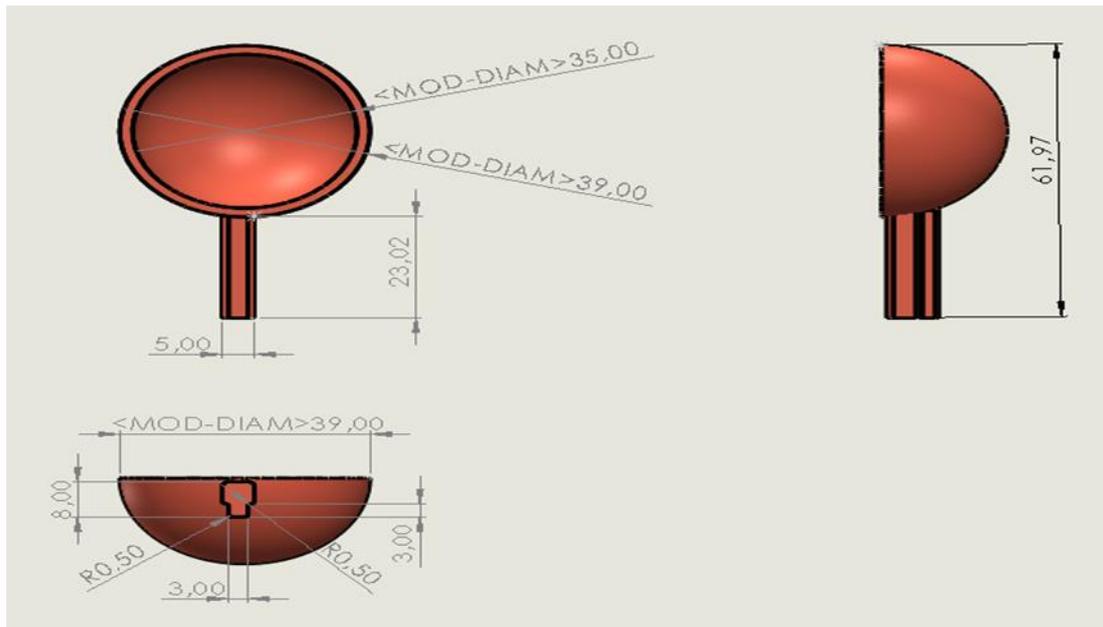


Figure 23 : Conception et dimension des coupelles de l'anémomètre

▪ **Axe de rotation et couvercle**

L'Axe de rotation contient des rainures de mêmes dimensions que les languettes des coupelles pour pouvoir effectuer une insertion forcée et ainsi, assurer une bonne fixation. Une tige de 8mm de diamètre sera fixée sur le couvercle et sera insérée dans le roulement à billes afin de guider l'assemblage en rotation. Enfin, un trou de 2mm de diamètre a été modélisé au bout de la tige pour fixer cette dernière sur l'arbre du moteur choisi.

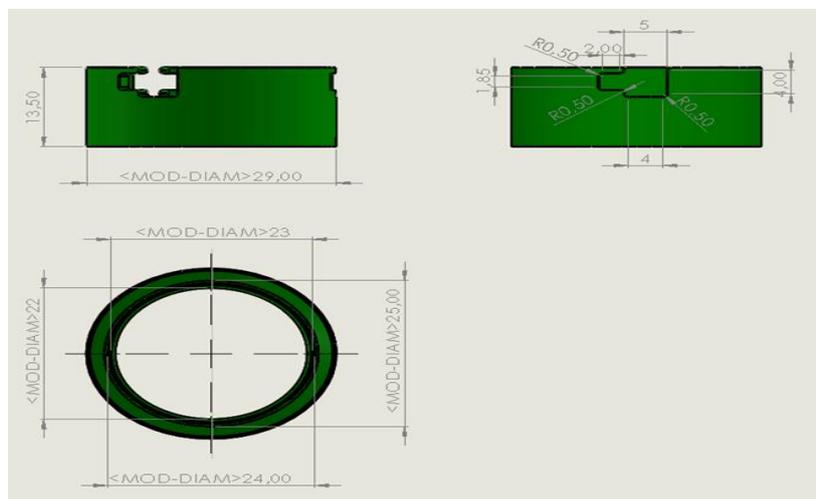


Figure 24 : Axe de rotation et logement du roulement

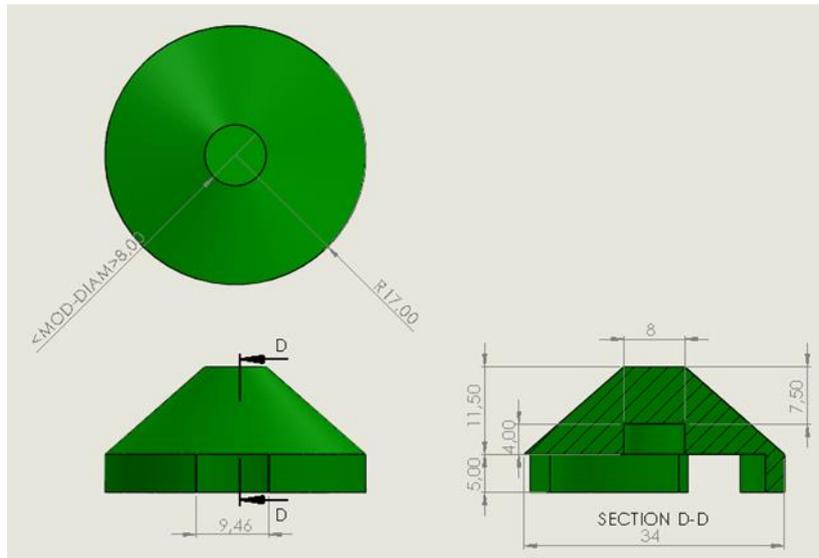


Figure 25 : Couvercle de l'anémomètre

- **Support de l'Axe**

Dans un premier temps le support a été modélisé en une seule pièce mais pour des contraintes d'impression nous avons divisé la pièce en 3 parties qui seront assemblées à la fin afin de reconstituer la pièce initiale. Ce Support permet de fixer l'axe tournant de l'anémomètre, recouvre le moteur à courant continu et contient également un logement de roulement de dimensions 8*22*7mm .

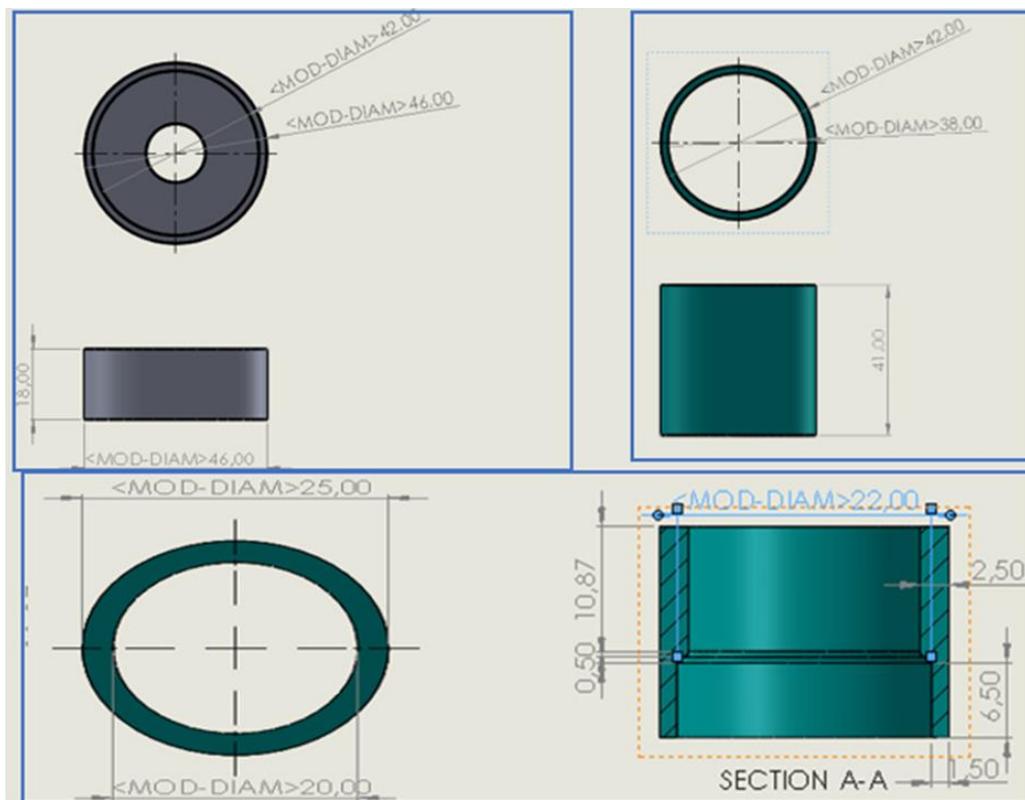


Figure 26 : Les différentes pièces du support

- **Le moteur à courant continu**

Le moteur qui sera monté sur le dispositif modélisé est un moteur à courant continu avec une vitesse de rotation de 9600 tr/min, une tension d'alimentation entre 3V et 6V et le diamètre de l'arbre qui est de 2mm, avec sa disponibilité à prix réduit (2,09 euros sur le site Farnell.com).



Figure 27 : Moteur CC qui sera monté sur le dispositif modélisé [tiré du site farnell.com]

- **Type de roulement**

En mécanique, un roulement est un système qui a pour but de guider un assemblage en rotation selon un axe de rotation bien défini. Il est composé principalement d'une bague extérieure, une bague intérieure, billes en acier et d'une cage en métal, plastique... etc. (wikipedia.org, largus.fr).

L'anémomètre 3D a été modélisé par rapport à un roulement à billes 608-2RS de dimensions 8*22*7mm.



Figure 28 : Roulement à billes 608-2RS relevé du site 123Roulement.com

III.4. Montages et tests

Une fois les différents capteurs choisis on va mettre en place un montage reliant ces capteurs à un microcontrôleur (Arduino Nano), pour pouvoir lire et traiter les données des capteurs.

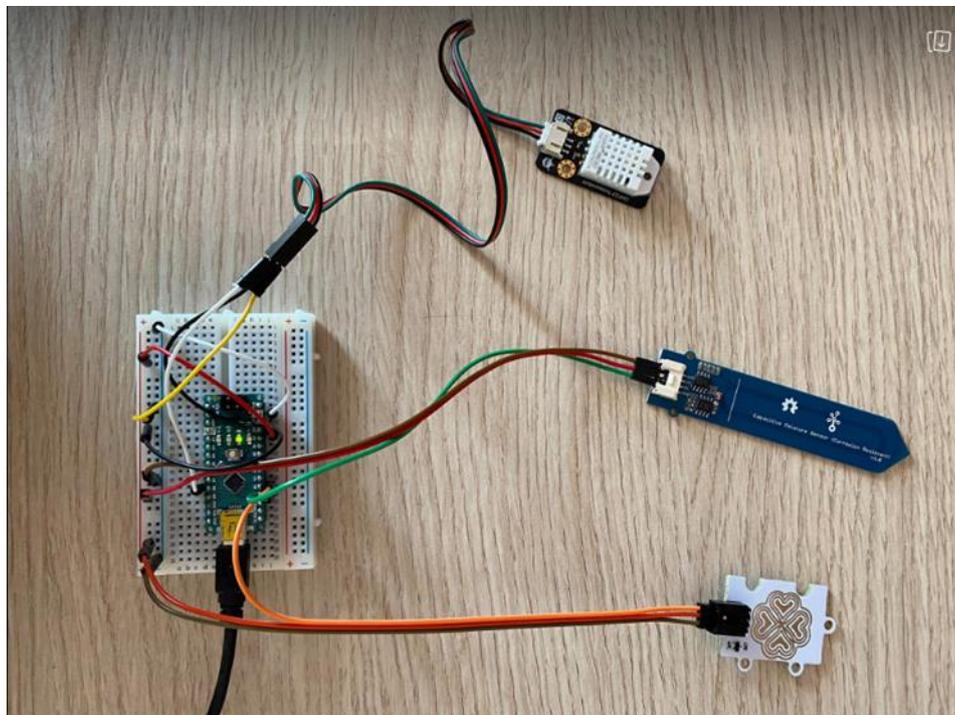


Figure 29 : montage des capteurs d'humidité relative, température, humidité du sol et rosée avec un Arduino Nano

Une fois le montage réalisé on va mettre en place un programme Arduino qu'on va téléverser vers la carte Arduino Nano qui va nous permettre de récupérer les données des différents capteurs.

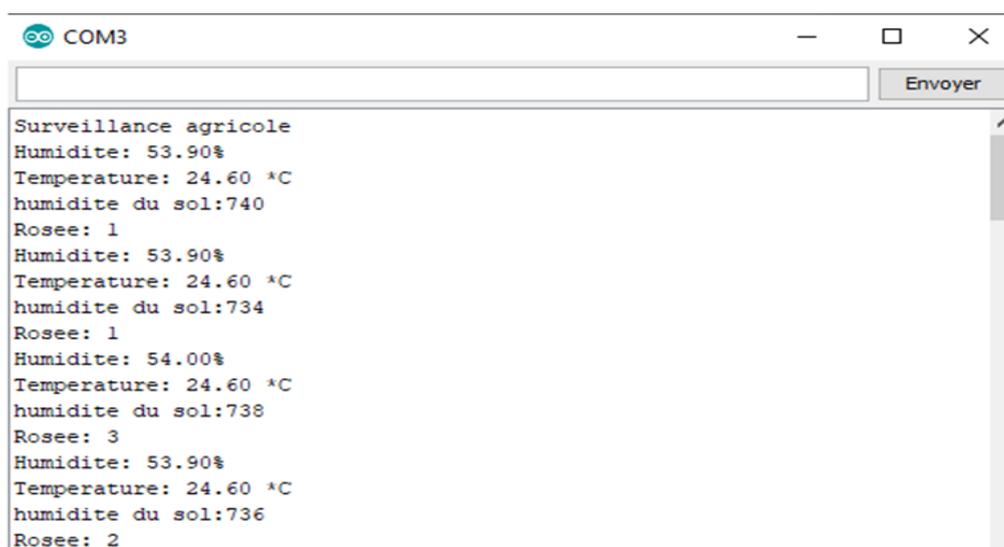


Figure 30 : Lectures de données des différents capteurs

▪ Comparaison entre différents capteurs d'humidité du sol

Les caractéristiques techniques des capteurs d'humidité du sol que l'on trouve sur internet ou sur leur datasheet sont insuffisantes pour choisir le capteur le plus adapté au projet et c'est pour cela qu'il faudra impérativement effectuer des tests de :

- Visualisation et comparaison de la vitesse de réponse de chaque capteur lors du changement brutal du taux d'humidité (cas d'un orage).
- Vérification de la stabilité des mesures.

En plus de ces tests et vu que notre dispositif sera alimenté par des batteries (de type AA) on devra également calibrer le signal analogique pour différents états de charge de la batterie (en multipliant les mesure jusqu'à la décharge définitive de la batterie) et ce pour estimer le taux d'humidité du sol et voir si le signal est linéaire ou non.

Les tests et les mesures seront effectués de façon à simuler différents états du sol (sec, moitié humide, humide) et en utilisant 3 différents types de capteurs à savoir le capteur octopus Brick, le capteur capacitif anti corrosion V1.0 et le capteur Kitronik moisture.

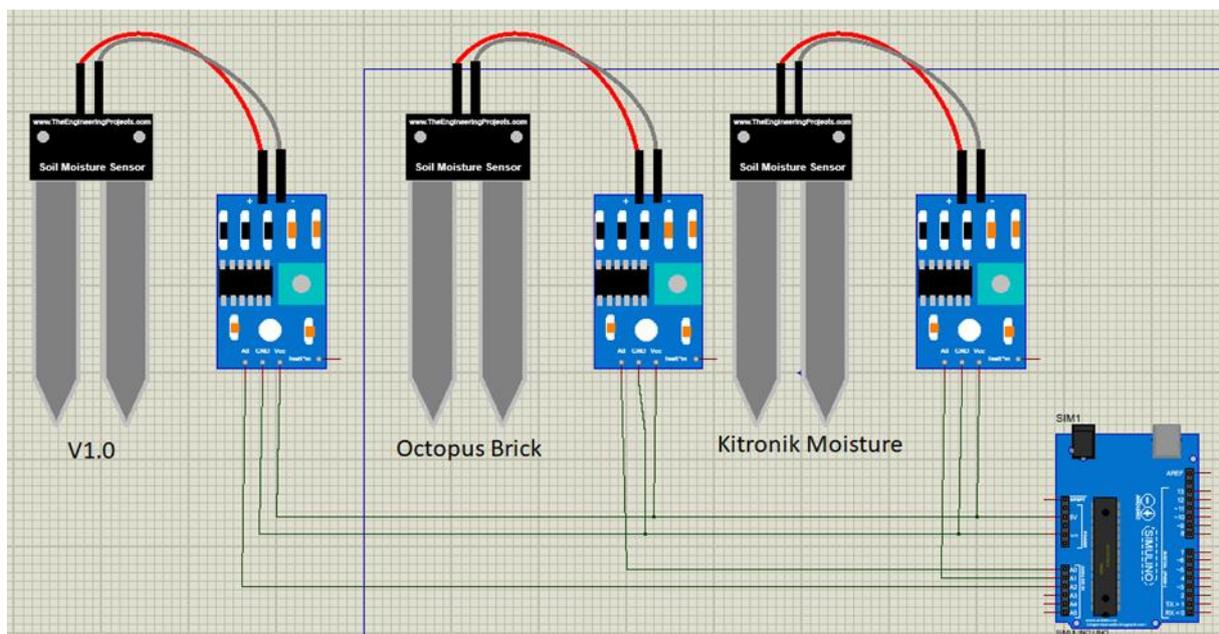


Figure 31 : Simulation du montage avec Proteus

IV. Conclusion

Dans un premier temps, la phase initiale du projet était une étude de l'état de l'art où on devait choisir les capteurs les plus adaptés au projet pour les différentes variables de l'environnement à savoir, la température, l'humidité relative, l'humidité du sol, la rosée et ce, à partir d'une comparaison des caractéristiques techniques des capteurs disponibles sur le marché de façon à choisir ceux qui sont les plus adaptés pour un usage extérieur et de façon aussi à minimiser les coûts.

Dans un second temps, on a décidé d'intégrer la variable de vitesse du vent au projet mais la contrainte de minimalisation des coûts posait problème vu que les anémomètres professionnels sont considérablement chers, et c'est pour cela qu'on s'est penché sur l'idée de concevoir un anémomètre qui va se rapprocher le plus d'un modèle professionnel. Les différentes pièces constituant de l'anémomètre ont été réalisées avec un logiciel de conception 3D (SolidWorks) et la partie électronique s'est basée sur l'étude des différentes technologies permettant d'interpréter la vitesse du vent.

Une fois les différentes pièces imprimées et pour que l'anémomètre soit prêt à l'emploi on devra passer par la phase d'étalonnage afin d'établir une relation entre la vitesse du vent et la sortie du signal.

On a constaté également que les caractéristiques techniques des capteurs d'humidité du sol décrites sur leur datasheet ou par leurs fournisseurs ne sont pas vraiment fiables et c'est pour cela qu'il faudra tester plusieurs modèles pour étudier la réponse de chaque capteur et dans différentes conditions afin de tirer nos propres conclusions.

En conclusion, ce stage a été très enrichissant pour moi car il m'a permis d'acquérir de nombreuses compétences notamment dans les réseaux de capteurs, programmation (Arduino) ainsi que la conception assistée par ordinateur.

Ce stage m'a permis également de développer d'une manière générale mes qualités en tant qu'ingénieur et notamment dans la gestion de projets et du travail en équipe pour une bonne insertion dans le milieu professionnel.

Enfin, j'ai pu aussi découvrir dans le détail, la vie au quotidien du laboratoire de recherche EGCE et aller à l'encontre des différents secteurs d'activités dans lesquels je peux évoluer et apporter ma contribution en tant qu'ingénieur.

V. Annexes

1. Program du capteur de rosée Octopus Brick

```
// Capteur de Rosée octopus Brick
// Aghiles le 05/08/2020
const int waterSens = A1; //déclaration du capteur de rosée
int waterVal; //déclaration de la valeur du capteur de rosée
void setup() {
  pinMode(waterSens, INPUT); //programmation du capteur de rosée comme entrée
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  waterVal = analogRead(waterSens); //lecture de la valeur donnée par le capteur de rosée
  Serial.println(waterVal); //affichage de la valeur sur le moniteur série
  delay(2000);
}
```

2. Program du capteur d'humidité du sol V1.0

```
// Capteur d'humidité du sol V1.0
// Aghiles le 05/08/2020
// Vcc to 5V ; Gnd to ground ; S to analog pin 0
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0);
  Serial.println(sensorValue);
  delay(2000); // delais entre les lectures
}
```

3. Program du capteur DHT 22

```
// Capteur de température et d'humidité relative DHT22
// Aghiles le 05/08/2020
// Vcc to 5V ; Gnd to ground ; S to digital pin 8
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 8 // branchement du capteur sur la broche 8
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //déclaration du capteur

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("DHT22");
  dht.begin();
}
```

```

}
void loop()
{
  delay(2000);

  float h = dht.readHumidity();//Lecture de l'hygrometrie.
  float t = dht.readTemperature();//Lecture de la temperature en celsius.

  // si la lecture a echoue, on quitte la boucle pour recommencer.
  if (isnan(h) || isnan(t))
  {
    Serial.println("impossible de lire les valeurs");
    return;
  }

  //Affichages :
  Serial.print("Humidite: ");
  Serial.print(h);
  Serial.print(" %\t");
  Serial.print("Temperature: ");
  Serial.print(t);
  Serial.print(" *C ");

}

```

4. Code général

```

// CAPTEUR DHT22, CAPTEUR V1.0 SOIL MOISTURE, CAPTEUR ROSEE OCTOPUS BRICK
// AGHILES le 06/08/2020
// [1] Vcc to 5V ; Gnd to ground ; S to Digital pin 8 ;
// [2] Vcc to 5V ; Gnd to ground ; S to Analog pin 0
// [3] Vcc to 5V ; Gnd to ground ; S to Analog pin 1

#include "DHT.h"
#define DHTPIN 8 // broche ou l'on a branche le capteur DHT22
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);//déclaration du capteur DHT22

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Surveillance agricole");
  dht.begin();
}

```

```

void loop()
{
  delay(2000); // La lecture du capteur prend 2s
  int H = analogRead(A0); // lecture de la valeur du capteur d'humidité du sol sur la broche A0
  int R = analogRead(A1); // lecture de la valeur du capteur de rosée sur la broche A1

  float h = dht.readHumidity(); // on lit l'hygrométrie
  float t = dht.readTemperature(); // on lit la température en celsius (par défaut)

  // On vérifie si la lecture a échoué, si c'est le cas on quitte la boucle afin de recommencer.
  if (isnan(h) || isnan(t))
  {
    Serial.println("impossible de lire les valeurs");
    return;
  }
  // Affichages :
  Serial.print("Humidité: ");
  Serial.print(h);
  Serial.println("%\t");
  Serial.print("Température: ");
  Serial.print(t);
  Serial.println(" *C ");
  Serial.print("humidité du sol:");
  Serial.print(H);
  Serial.println("");
  Serial.print("Rosée: ");
  Serial.print(R);
  Serial.println("");
}

```