

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par : BENIKHLEF Meriem et BENOTMANE Ikram

Sujet

Conception et réalisation d'un système d'acquisition de données d'un capteur ultrasons HC-SR04 en utilisant un algorithme de filtre de Kalman

Soutenu publiquement, **24/06/2019**, devant le jury composé de :

Mr R.MERZOUGUI	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
Mr M.HADJILA	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr H.E.ADARDOUR	Maître Assistants	Univ. Chlef	Co-Directeur de mémoire
Mr S.H.IRID	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

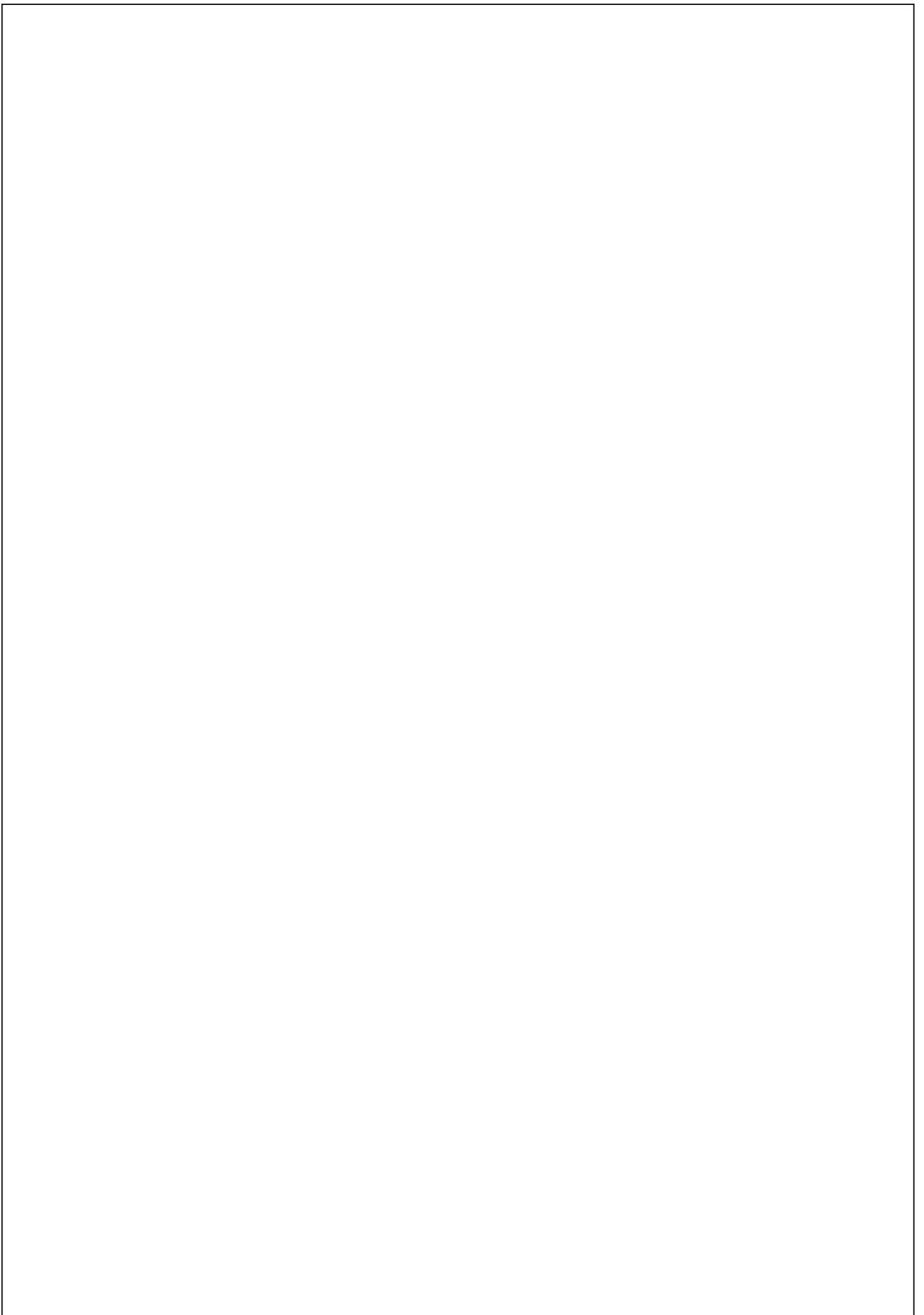
Par : BENIKHLEF Meriem et BENOTMANE Ikram

Sujet

Conception et réalisation d'un système d'acquisition de données d'un capteur ultrasons HC-SR04 en utilisant un algorithme de filtre de Kalman

Soutenu publiquement, **24/06/2019**, devant le jury composé de :

Mr R.MERZOUGUI	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
Mr M.HADJILA	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr H.E.ADARDOUR	Maître Assistants	Univ. Chlef	Co-Directeur de mémoire
Mr S.H.IRID	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur



Dédicaces

À mes chers parents : TAYEB ET KARIMA

Sources de mes joies, secrets de ma force

Vous serez toujours le modèle

Papa, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté.

Maman, dans ta bonté, ta patience et ton dévouement pour nous.

Merci pour tous vos sacrifices pour que vos enfants grandissent et prospèrent

Merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de la vie

Au bien être de vos enfants

Merci d'être tout simplement mes parents

C'est à vous que je dois cette réussite

Et je suis fière de vous l'offrir.

À ma deuxième mère AMRA

« Qui m'a toujours encouragée et soutenue »

À mes chers frères ABDELHAK, OTMANE ET MON PETIT ANGE MOHAMMED BOUMADIENNE.

A ma chère sœur ASMAA et son mari IBRAHIM

À ma belle-sœur ASMA

À M. Adardour Haroun Errachid

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

À mes grands-parents : BOUMEDIENNE ET MOBARKA, MOHAMMED ET HALIMA.

À tous mes oncles et tantes

À tous mes cousins et cousines

À tous les membres de la famille BENIKHLEF ET BOUCHEKIF petits et grands

Un merci à celle qui a partagé avec moi les moments les plus beaux et les plus durs de ces années, à mon binôme BENOTMANE IKRAM et sa famille.

À tous mes amis (e)... À toi NAWAL ET NADRA.

À toute autre personne que je n'ai pas citée et dont l'aide m'a été précieuse.

Meriem

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu clément, on a pu réaliser ce modeste mémoire qui est le fruit d'un long et
dure travail.

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude
à :

Mes chers parents : ABDELLAH ET SAADIA

Qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs conseils
judicieux. J'espère qu'un jour, je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi,
que dieu leur prête bonheur et longue vie.

Mon cher frère MOHAMED CHIHEB EDDIN

Ma chère sœur IBTISSEM et son mari MOHAMED

Mes sœurs NORIA, DALAL et MALAK

Qui m'ont prodigué des conseils et les techniques nécessaires dans mon cheminement.

À ma grande mère FATANA

Qui m'a toujours encouragée et soutenue

Je tiens de dédier aussi ce travail à toute ma grande formidable famille, **BENOTMANE et
BENDJAFER**, ainsi mes amies, **NADIA, ZINEB ET SARA** pour leur soutien moral.

Je dédie Spécialement ce travail à ma chère binôme **BENIKHLEF MERIEM.**

À tous ceux qui ont su m'apporter aide et soutient aux moments propices.

IKRAM

Remerciements

Ce travail du Projet de Fin d'Etudes a été effectué au sein du laboratoire des Systèmes et Technologies de l'information et de la Communication (STIC) de la Faculté de Technologie à l'Université Abou-Bekr Belkaïd Tlemcen.

On voudrait tout d'abord remercier sincèrement notre Encadrant Monsieur Mourad HADJILA, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, non seulement pour son encadrement actif mais aussi pour sa grande disponibilité, sa patience, ainsi que pour la générosité avec laquelle il a su partager ses connaissances et conseils.

Au terme de ce projet, on tient à remercier Monsieur Haroun Errachid ADARDOUR, Maître Assistants classe B à l'Université de Chlef, pour la qualité de son Co-encadrement, son soutien et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur Rachid MERZOUGUI, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider le jury de ce Mémoire.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Sidi Mohammed Hadj IRID, Maître de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et de juger les travaux de ce Mémoire.

Enfin, que nos parents, nos familles et nos amis trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de notre profonde gratitude pour leur soutien et leurs encouragements de tous les instants. On vous en remercie chaleureusement.

Résumé

Dans ce projet, une étude empirique sur les mesures de distance pour un obstacle à détecter existe dans une chambre de mesure inter-modale à l'aide d'un système hybride en utilisant deux capteurs à la fois, à savoir : un capteur de température LM35 et un capteur à ultrasons HC-SR04, plus une carte Arduino UNO pour l'acquisition des données. Selon la théorie des ultrasons, nous avons constaté que la vitesse du son pour les ondes sonores varie en fonction de la température. De ce fait, nous avons proposé un système hybride intelligent permettant de mesurer les distances d'un obstacle à détecter sur la base de la température de l'environnement. Lors de la mesure de distance, le bruit de mesure des capteurs se présente et peut avoir un impact sur la dégradation des performances du système proposé. Pour résoudre ce problème, le filtre du Kalman est proposé, et est mis en œuvre pour améliorer la stabilité de la mesure de distance. Les résultats du test obtenus montrent l'efficacité de l'algorithme FK dans la réduction du bruit de mesure des capteurs.

En outre, l'analyse a été exécutée sous l'environnement Arduino IDE et le logiciel Matlab. À la fin de cette étude, nous avons développé une application pour notre projet sur un smartphone via la plate-forme Blynk.

Mots clés : Capteur LM35, Capteur HC-SR04, Arduino UNO, Filtre du Kalman, Blynk.

Abstract

In this project, an empirical study on the distance measurements for an obstacle to be detected exists in an inter-modal measurement chamber using a hybrid system combined two sensors at a time, namely: an LM35 temperature sensor and an HC-SR04 ultrasonic sensor. However, the two sensors are connected with an Arduino UNO board for data acquisition. According to the ultrasound theory, we have found that the speed of sound for the sound waves varies versus the temperature. As a result, we have proposed a smart hybrid system based on the environment temperature, in order to measure the distances of an obstacle to be detected. During the distance measurement, the measurement noise is produced by the sensors and may have an impact on the performance degradation of the proposed system. To overcome this problem, the Kalman filter is proposed and is also implemented to improve the stability of the distance measurement. The test results obtained illustrate the effectiveness of the FK algorithm for reducing the measurement noise of the sensors.

In addition, the analysis of this study was performed under the Arduino IDE environment and the Matlab software. In the end, we developed an application for our project on a smartphone via the Blynk platform.

Key-words : LM35 sensor, HC-SR04 sensor, Arduino UNO, Kalman filter, Blynk.

ملخص

في هذا المشروع، توجد دراسة تجريبية حول قياس مسافات لحاجز يجب اكتشافه في غرفة قياس بين الوسائط باستخدام نظام هجين يجمع بمستشعرين في وقت واحد، وهما: مستشعر درجة حرارة ومستشعر بالموجات فوق الصوتية. ومع ذلك، يرتبط المستشعران بلوحة الكترونية نوع الأردوينو للحصول على البيانات. وفقاً لنظرية الموجات فوق الصوتية، وجدنا أن سرعة الصوت لموجات فوق الصوتية تختلف وفقاً لدرجة الحرارة البيئية. نتيجة لذلك، اقترحنا نظاماً هجيناً ذكياً يعتمد على درجة حرارة البيئة من أجل قياس مسافات حاجز المراد اكتشافه. أثناء قياس المسافة، قد ينتج ضوضاء القياس بواسطة أجهزة الاستشعار وقد يكون لها تأثير على تدهور أداء النظام المقترح. للتغلب على هذه المشكلة، لقد تم اقتراح مرشح كالمان، ولقد تم تنفيذه أيضاً لتحسين استقرار قياس المسافة. توضح نتائج

الاختبار التي تم الحصول عليها فعالية خوارزمية مرشح كالمان لتقليل ضوضاء القياس في أجهزة الاستشعار. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء تحليل هذه الدراسة تحت بيئة الأردوينو (ادي) وبرنامج الماتلاب. في النهاية، قمنا بتطوير تطبيق لمشروعنا على الهاتف الذكي عبر منصة بلينك.

الكلمات المفتاحية: مستشعر درجة حرارة، مستشعر بالموجات فوق الصوت، لوحة الالكترونية الأردوينو، مرشح كالمان، تطبيق بلينك.

Table des matières

Remerciement.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iv
Sigles et abréviations.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Introduction générale.....	2

Chapitre 1 : Les ondes ultrasonores

1.1 Introduction.....	4
1.2 RADAR.....	4
1.2.1 Historique.....	4
1.2.2 Définition.....	5
1.2.3 Principe du RADAR.....	5
1.3 Généralité sur les ondes acoustiques.....	9
1.4.1 C'est quoi une onde ultrasonore ?.....	9
1.4.2 Principe de production des ondes ultrasoniques.....	9
1.4.3 Caractéristiques des ondes ultrasonores.....	10
1.4.4 L'équation de l'onde ultrasonore.....	11
1.4.5 La propagation des ultrasons.....	11
1.5 Émission et réception de l'onde ultrasonore.....	12
1.5.1 Réflexion de l'onde ultrasonore.....	13
1.5.2 Réfraction de l'onde ultrasonore.....	13
1.6 Avantages et inconvénients du système RADAR à Ultrasons.....	13
1.7 L'influence des facteurs physiques sur le son.....	14
1.7.1 Dans l'air.....	14
1.7.2 Dans l'eau.....	15
1.7.3 Les milieux diphasiques.....	15
1.8 Détection d'obstacle.....	15

1.8.1 Détecteur ultrason	16
1.8.2 Principe de détection	16
1.8.3 Pourquoi le choix des capteurs ultrasons ?.....	16
1.9 Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Description du matériel de conception du projet

2.1 Introduction	18
2.2 Carte Arduino	18
2.3 Carte Arduino UNO	18
2.3.1 Avantages de la carte Arduino Uno	18
2.3.2 Caractéristiques de la carte Arduino Uno.....	19
2.3.3 Microcontrôleur ATmega328	20
2.3.4 Alimentations	20
2.3.5 Entrées et sorties.....	21
2.3.6 Broches analogiques.....	21
2.3.7 Communication	22
2.4 Capteur de Température LM35	22
2.4.1 Les différentes versions du capteur LM35	23
2.4.2 Caractéristiques du capteur LM35	23
2.4.3 Brochage du capteur LM35.....	23
2.5 Capteur ultrason HC-SR04.....	24
2.5.1 Caractéristiques du capteur HC-SR04.....	24
2.5.2 Broches de connexion	25
2.5.3 Spécifications et limites	25
2.5.4 Fonctionnement du capteur HC-SR04	25
2.5.5 Distance de l'objet	26
2.6 Plaque d'essai.....	26
2.7 Environnement de développement intégré (IDE).....	27
2.7.1 Structure d'un programme en Arduino	28
2.7.2 Les étapes de fonctionnement	29
2.8 Conclusion.....	29

Chapitre 3 : Application et Résultats

3.1 Introduction	31
3.2 Algorithme de Filtre de Kalman.....	31
3.3.1 Définition	32
3.3.2 Avantages du filtre de Kalman.....	32
3.3.3 Présentation du filtre de Kalman	32
3.3.4 Conception du filtre de Kalman pour capteur	34
3.3 Résultats	34
3.3.1 Mesurer la température de l'environnement dans lequel se propage l'ultrason	34
3.3.2 Mesurer la vitesse du son à l'aide d'un capteur à l'ultrason	37
3.3.3 Estimer la distance d'une cible dans un système hybride	39
3.3.4 Contrôler à distance le système hybride en utilisant l'application Blynk.....	42
3.4 Conclusion.....	49
Conclusion Générale	51
Références Bibliographiques	53

Sigles et abréviations

A

AREF Analog REFérence

AVR Advanced Virtual RISC

B

BLE Bluetooth Low Energy

C

CMS Composant Monté en Surface

D

DéOb Détection d'Obstacle

E

EEPROM Electrically Erasable Programmable Read Only

F

FK Filtre de Kalman

FTDI Future Technology Devices International

I

ICSP In-Circiut Serial Programming

IDE Integrated Development Environment

IDII Interaction Design Institute Ivera

I2C Inter-Integrated Circiut

L

LED Light Emitting Diode

M

MISO Master In Slave Out

MOSI Master Out Slave In

N

NRL Naval Research Laboratory

P

PWM Pulse Width Modulation

R

RADAR Radio Detection And Ranging

RX Receive

S

SCK Clock

SCL Serial Clock

SDA Serial Data Acces

SPI Interface Série Périphérique

SRAM Statc Random Access Memory

SS Slave Select

T

TTL Transistor-Transistor Logic

Chapitre 1

Figure 1.1. Bref bilan pour un système radar	6
Figure 1.2. La pression acoustique d'une onde en fonction du temps	7
Figure 1.3. La fréquence correspond au nombre de période par seconde	8
Figure 1.4. Représentation de la longueur d'onde d'une onde ultrasonore	8
Figure 1.5. Spectre fréquentiel des ultrasons.....	10
Figure 1.6. Classification des sons selon la fréquence utilisée.....	11
Figure 1.7. Propagation des ondes longitudinales	12
Figure 1.8. Propagation des ondes transversales	12
Figure 1.9. Émission et réception des ultrasons	13
Figure 1.10. Vitesse du son en fonction de l'altitude.....	15

Chapitre 2

Figure 2.1. Carte Arduino Uno.....	18
Figure 2.2. Microcontrôleur ATmega328	20
Figure 2.3. Constitution de la carte Arduino Uno	22
Figure 2.4. Capteur de température LM35	23
Figure 2.5. Brochage de LM35.....	24
Figure 2.6. Capteur ultrason HC-SR04	24
Figure 2.7. Broches de connexion du capteur HC-SR04.....	25
Figure 2.8. Fonctionnement du capteur HC-SR04	26
Figure 2.9. Plaque d'essai (Breadboard)	27
Figure 2.10. Interface de la plateforme Arduino	27
Figure 2.11. Barre de boutons Arduino	27
Figure 2.12. Les étapes de base du programme.....	28
Figure 2.13. Structure générale du programme sur IDE.....	28

Chapitre 3

Figure 3.1. Schéma conceptuel de notre projet	31
Figure 3.2. Diagramme de l'algorithme du filtre de Kalman.....	33
Figure 3.3. L'organigramme de programmation	34
Figure 3.4. Diagramme d'acquisition des données de température via un capteur.....	35
Figure 3.5. Connexion Arduino UNO et LM35	35
Figure 3.6. Valeurs de température mesurées et estimées.....	36
Figure 3.7. Valeurs de vitesse du son mesurées et estimées en utilisant LM35	36

Figure 3.8. Connexion Arduino UNO et HC-SR04	37
Figure 3.9. Diagramme d'acquisition des données de la vitesse du son via un capteur.....	38
Figure 3.10. Valeurs de vitesse du son mesurées et estimées en utilisant HC-SR04	38
Figure 3.11. Système hybride proposé. Le schéma a été fait avec le logiciel Fritzing.....	39
Figure 3.12. Diagramme d'acquisition des données pour un système hybride.....	40
Figure 3.13. Valeurs de distance mesurées et estimées en utilisant LM35 et HC-SR04.....	40
Figure 3.14. Temps de réponse vs Bruit de processus.....	41
Figure 3.15. Erreur estimée de la distance	41
Figure 3.16. Valeurs pour # distances estimées en utilisant LM35 et HC-SR04	42
Figure 3.17. Architecture Blynk.....	43
Figure 3.18. Créer un compte Blynk	44
Figure 3.19. Créer un nouveau projet.....	44
Figure 3.20. Nom, modèle de hardware, et périphérique de connexion du projet.....	45
Figure 3.21. Jeton d'Authentification via e-mail.....	45
Figure 3.22. Cliquez sur le bouton "Create".	46
Figure 3.23. Grille du projet et liste des widgets.....	46
Figure 3.24. Widgets utilisées	47
Figure 3.25. Paramètre des Widgets.....	48
Figure 3.26. Application Blynk finale.....	48
Figure 3.27. Résultats finals	49

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 La vitesse de propagation du son dans des différents milieux.....	8
Tableau 1.2 Vitesse d'une onde sonore en fonction de la température dans l'air	14

Chapitre 2

Tableau 2.1 Caractéristiques d'une carte Arduino Uno	19
Tableau 2.2 Les broches entrées/sorties numériques de la carte Arduino Uno	21
Tableau 2.3 Caractéristiques du capteur HC-SR04.....	24
Tableau 2.4 Spécifications et limites du capteur	25

Introduction générale

Aujourd'hui, les détecteurs à ultrasons représentent la manière la plus simple de détecter des obstacles par ultrasons. L'émetteur et le récepteur sont intégrés dans un boîtier. Les ultrasons sont directement réfléchis vers le récepteur par l'obstacle à détecter. La plupart des détecteurs à ultrasons reposent sur le principe de la mesure du parcours du son entre l'émission et la réception. Le temps qui s'écoule jusqu'au retour d'un éventuel écho est proportionnel à la distance entre le détecteur à ultrasons et l'obstacle à détecter. Dans ce projet, nous allons proposer un système hybride intelligent (DéOb) basé sur un capteur LM35 et un capteur HC-SR04, pouvant détecter des obstacles, afin de mesurer la distance entre le DéOb et l'obstacle. Le problème le plus courant lors de la mesure d'un paramètre via un capteur est le bruit de mesure. Les objectifs principaux pour annuler l'influence du bruit de mesure sur les performances du système proposé dans notre projet, sont comme suit :

- L'estimation de la température de la chambre de mesure en utilisant le capteur LM35 et le filtre du Kalman ;
- La vitesse du son pour les ondes sonores a une relation à la température, donc, nous pouvons prédire la vitesse du son à base de la température estimée, nous allons utiliser un capteur LM35 et la méthode d'interpolation linéaire ;
- L'estimation de la vitesse du son qui nous permettra de mesurer la distance d'un obstacle à détecter en utilisant un capteur HC-SR04 et le filtre du Kalman ;
- À partir des trois objectifs précédents, le dernier objectif vise à estimer des distances mesurées entre l'obstacle et le DéOb en utilisant la méthode d'interpolation linéaire et le filtre du Kalman.

Les performances du système proposé ont été étudiées et analysées via la plate-forme Arduino IDE et le logiciel Matlab. À la fin de cette étude, nous allons développer une application pour notre projet sur un smartphone via la plate-forme Blynk. Toute cette étude a été organisée dans un document comportant trois chapitres, en plus d'une introduction générale, d'une conclusion générale, des perspectives et une bibliographie récente.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une description générale sur la technologie radar et son fonctionnement. La présentation du radar dans ce chapitre nous aidera à comprendre les technologies de détection par ultrasons. Par la suite, nous allons évoquer en détail la théorie des ondes ultrasonores. Enfin, nous allons présenter l'application de la détection des obstacles via la technologie des ondes ultrasonores.

Le deuxième chapitre de ce document présente une description générale sur les principaux composants dédiés à la conception du système hybride proposé dans ce projet. En première partie, nous décrirons les composants, qui sont les suivants :

- Carte Arduino UNO ;
- Capteur de Température LM35 ;
- Capteur Ultrason HC-SR04.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons l'environnement de développement intégré (IDE) de l'Arduino, afin d'exploiter les ressources d'une carte d'acquisition, type Arduino UNO.

La partie de la conception et de la simulation du système proposée sera présentée au troisième chapitre. Selon l'étude que nous avons fait pendant les deux chapitres précédents, nous allons proposer un schéma conceptuel pour accomplir le système hybride intelligent (DéOb), afin d'obtenir les résultats désirés de ce projet via une application installée sur un Smartphone.

Enfin, ce document se termine par une conclusion générale résumant le bilan des travaux effectués et l'ouverture aux travaux futurs.

CHAPITRE 1

Les ondes ultrasonores

1.1 Introduction

Les systèmes de radar ont été conçus pour détecter des cibles pouvant présenter un intérêt stratégique ou un danger potentiel. De tels systèmes émettent des ondes radiofréquences vers leur environnement, puis analysent les échos produits par les réflecteurs présents. Le traitement de ces échos permet de détecter les cibles renvoyant des échos suffisamment forts, et de déterminer leurs distances par rapport au radar après avoir mesuré le temps de propagation [1].

Tout au long de ce chapitre, nous allons présenter une grande partie théorique qui inclut tout ce qui concerne les ondes ultrasonores.

1.2 RADAR

1.2.1 Historique

En 1886, Heinrich Hertz démontra la similitude entre les ondes lumineuses et les ondes radio, toutes deux électromagnétiques. Leur différence essentielle est que la longueur d'onde de ces dernières est beaucoup plus grande que celle des ondes lumineuses. En outre, Hertz montra que les ondes radios peuvent également être réfléchies par les corps métalliques et diélectriques.

Dès 1904, l'Allemand Christian Hülsmeier décrivait un appareil de projection et de réception d'ondes hertziennes pour donner l'alarme en présence d'un corps métallique tel qu'un navire ou un train situé dans le faisceau du projecteur. Cette possibilité était vérifiée expérimentalement de façon plus ou moins complète de 1922 à 1927 par un certain nombre de chercheurs parmi lesquels on peut citer : les Américains A. H. Taylor et L. C. Young du Laboratoire de recherche navale (Naval Research Laboratory : NRL), utilisant une longueur d'onde de 5 mètres, les Français M. Mesny et P. David, se servant d'une longueur d'onde de 1,8 m, et M. Pierret et C. Gutton, employant une longueur d'onde de 0,16 m. Bien que peu écoutés et disposant de faibles moyens, ces chercheurs restèrent à l'affût.

En juin 1930, l'Américain L. A. Hyland obtint une détection accidentelle d'un avion passant dans un faisceau d'onde radio de 9 mètres de longueur d'onde. À partir de là, le NRL (A. H. Taylor, L. C. Young et L. A. Hyland) expérimenta de 1930 à 1934 un premier système de détection d'objets par radio en ondes métriques (environ 5 m de longueur d'onde) permettant des détections d'avions distants de quelque 80 kilomètres. En revanche, le Français P. David du Laboratoire national de radioélectricité expérimentait à la même époque un système analogue (barrage David), obtenant au Bourget, en 1934, des détections d'avions à environ 10 kilomètres. De plus, la Compagnie générale de télégraphie sans fil (C.S.F.), avec, entre autres, M. Ponte et C. Gutton, déposait le 20 juillet 1934 un brevet français qui concernait un nouveau système de repérage d'obstacles et ses applications employant des longueurs d'onde beaucoup plus courtes (0,16 m).

Les Allemands, dans la même période, travaillaient avec des ondes de 0.50 m et parvenaient en 1934, avec un système Gema, à détecter des bateaux distants d'environ 10 kilomètres. Tous ces systèmes utilisaient des ondes continues, ce qui rendait la mesure de distance très peu commode ; ceux qui avaient choisi des longueurs d'onde de plusieurs mètres obtenaient immédiatement des détections d'avions avec des portées assez surprenantes, alors que ceux qui travaillaient avec des longueurs d'onde inférieures au mètre avaient plus de difficultés, les puissances dont ils disposaient étant plus faibles et la technologie des longueurs d'onde courtes étant très embryonnaire.

En 1935, à la suite de deux célèbres mémorandums de Robert Watson-Watt, les Britanniques, dans l'expectative jusqu'alors, mirent dans leur jeu, outre d'importants apports financiers, les deux atouts techniques essentiels : signaux en ondes métriques et signaux en impulsions. Ils purent de ce fait très vite obtenir de grandes portées de détection sur les avions et des mesures directes de distances.

De tels résultats encourageaient de nouveaux investissements financiers, ce processus conduisant les Anglo-saxons (les États-Unis avaient décidé au milieu de 1940 d'unir leurs efforts à ceux des Britanniques), pendant la seconde Guerre mondiale, à des performances toujours très supérieures à celles des Allemands, de sorte qu'à la fin du conflit les premiers disposaient d'une panoplie complète de radars de toute nature fonctionnant sur les longueurs d'ondes comprises entre 10 mètres et 1 centimètre.

Les Allemands, dont les premiers résultats avaient été moins spectaculaires, n'avaient poursuivi que très lentement leurs recherches, privés qu'ils étaient de la foi des dirigeants et du nerf de la guerre, et leur catalogue était en qualité et en quantité bien moins complet que celui des Anglo-saxons à la fin des hostilités.

Quant aux Français, pour des raisons analogues, et bien sûr, à partir de 1940, pour d'autres plus évidentes, leur retard était considérable à la fin du conflit. Pourtant, au début des hostilités, le barrage David était installé de façon continue de la frontière belge aux Alpes et détectait tout passage d'avion. Dès 1940, la France disposait, du reste, d'un certain nombre de radars prototypes à impulsions en ondes métriques ayant détecté des avions jusqu'à plus de 100 kilomètres de distance. Entre 1940 et 1944, les navires Richelieu, Strasbourg, Algérie, Jean-Bart et Colbert étaient progressivement équipés sur la possibilité d'obtenir des impulsions puissantes en longueurs d'ondes décimétriques (0.16 m par exemple), ayant pour ce faire l'idée d'utiliser dans les tubes émetteurs de ce type (dits magnétrons) une source particulière d'électrons, la cathode à oxyde. Un tel tube ainsi équipé fut remis le 8 mai 1940 aux chercheurs anglais, et selon les propos du docteur E.C.S. Megaw de l'Admiralty Signal Establishment, « ce fut le point de départ de l'emploi de la cathode à oxyde pratiquement dans tous les émetteurs à impulsions, et en conséquence, ce fut une contribution importante au radar » [2].

1.2.2 Définition

Comme son nom l'indique, un radar (Radio Detection And Ranging) est un système utilisant des ondes électromagnétiques (radio) pour détecter la présence des cibles et les localiser en distance, vitesse, angles. Les systèmes de radar sont généralement utilisés pour la surveillance de domaines, aérien, terrestre, ou maritime, car ils sont opérationnels à tout moment, et insensibles à la luminosité [3].

La cible est tout objet qui interfère avec l'onde émise, et réfléchit une partie de l'énergie vers le Radar, elle se comporte comme une antenne de forme complexe. L'énergie émise dans la direction du Radar est fortement fluctuante et dépend énormément de l'orientation de la cible par rapport au Radar.

1.2.3 Principe du RADAR

Selon la définition précédente, le système radar peut être résumé en quatre parties principales et sont comme suit : l'émission et la propagation d'une onde électromagnétique, la rétrodiffusion de cette onde par une cible sous forme d'écho de l'onde, la réception et l'analyse du signal reçu par le radar.

Après une brève explication sur un système radar, nous allons maintenant présenter deux paramètres importants pour un système radar, à savoir :

a. Mesure de distance

L'onde émise par le radar parcourt la distance (radar \leftrightarrow cible, R_0) à la célérité de la lumière c . Elle est rétrodiffusée par la cible dans tout l'espace. L'onde rétrodiffusée parcourt une nouvelle fois la distance R_0 et une partie de l'onde est recueillie par le radar. La détection de l'écho reçu et la mesure du temps de propagation de l'onde nous informe sur la présence et la distance de la cible R_0 . L'onde reçue par le radar est une version atténuée et retardée de l'onde émise d'un retard qui s'exprime comme suit :

$$\tau = \frac{2 \cdot R_0}{c} \quad (1.1)$$

La mesure de ce retard τ permet alors de déterminer la distance R_0 de la cible.

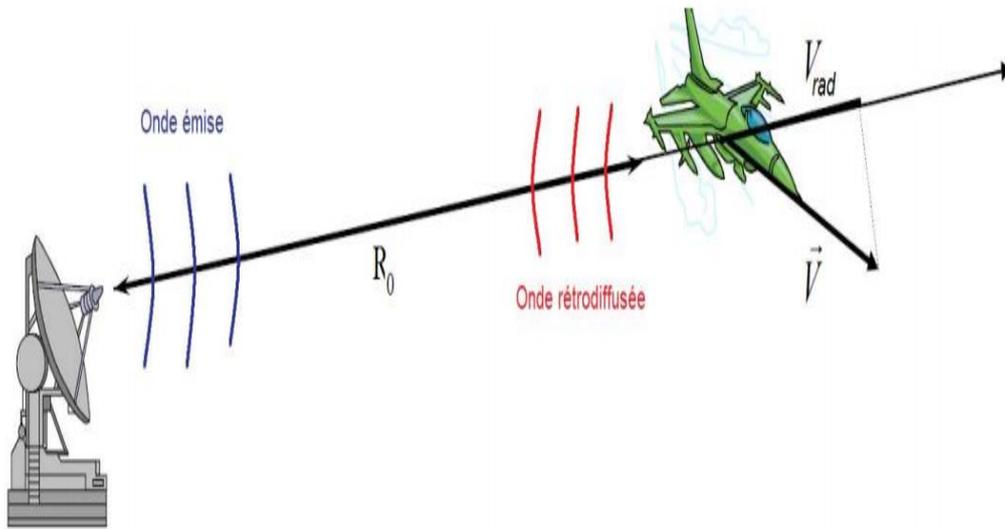


Figure 1.1. Bref bilan pour un système radar.

b. L'effet Doppler

Lorsque la cible est mobile par rapport au radar, son retard évolue au cours du temps et s'exprime comme suit :

$$\tau = \frac{2 \cdot R(t)}{c} = \frac{2 \cdot (R_0 + v_{rad} \cdot t)}{c} \quad (1.2)$$

Où, v_{rad} représente la vitesse radiale de la cible.

L'onde reçue par le radar et issue d'une cible mobile comme montrée sur la figure 1.1, arrive en avance ou en retard par rapport à celle d'une cible fixe. Lorsque v_{rad} est très petite devant la célérité de la lumière c , ce décalage de temps d'arrivée se traduit sur l'onde reçue par un décalage sur la fréquence porteuse f_0 de l'onde. Ce phénomène porte le nom d'effet Doppler. Le décalage en fréquence sur la porteuse est appelé fréquence Doppler. Elle s'exprime comme suit :

$$f_D = \frac{2 \cdot v_{rad}}{\lambda} \quad (1.3)$$

Où, λ est la longueur d'onde du radar.

La mesure de f_D permet de déterminer la vitesse radiale de la cible (v_{rad}) [1].

1.3 Généralité sur les ondes acoustiques

Puisque notre projet repose sur les ondes ultrasonores, nous devons dans ce cas introduire une petite introduction sur les ondes acoustiques. Vous pouvez donc trouver plus de détails ci-dessous.

L'acoustique est la discipline qui traite des aspects physiques de la production et de la transmission des sons et des bruits [4].

Une onde acoustique est la propagation de proche en proche d'une perturbation caractérisée par une vibration des molécules du milieu autour de leurs positions d'équilibre ou état de repos.

En effet, suite à une perturbation, créée à l'origine par une source mécanique, les molécules subissent de faibles variations de pression acoustique ; elles s'entrechoquent entre elles pour

transmettre la déformation (perturbation) subissant ainsi de micro-déplacements. Ces molécules reviennent à leur position initiale une fois la perturbation passée ; c'est une propagation d'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière [5].

Les ondes acoustiques perceptibles par l'oreille humaine s'étagent en fréquence entre 20 Hz et 20 kHz, ces bornes sont évidemment des moyennes, variables d'une personne à une autre, variables avec l'âge (une oreille jeune - du moins si elle n'a pas abusé de sons trop forts perçoit une gamme de fréquences plus étendue qu'une oreille âgée). L'étendue très large des fréquences perceptibles par l'oreille est à comparer à celle de la vision : il n'existe qu'un facteur deux entre les fréquences extrêmes du spectre visible [6].

L'onde acoustique est caractérisée par plusieurs facteurs, à savoir : la période, la fréquence et la longueur d'onde, etc.

Ils peuvent être classés comme suit :

Tout d'abord, la période est notée (T), est l'intervalle de temps séparant deux états vibratoires identiques et successifs d'un point du milieu dans lequel l'onde se propage.

La courbe ci-dessous (voir la figure 1.2) illustre les variations de pression acoustique d'une onde pour une durée d'une seconde. La période est l'intervalle de temps entre deux points successifs ayant la même amplitude, par exemple, sur le graphe entre le 2^{ème} et le 3^{ème} maximum la période est de 0,1 seconde.

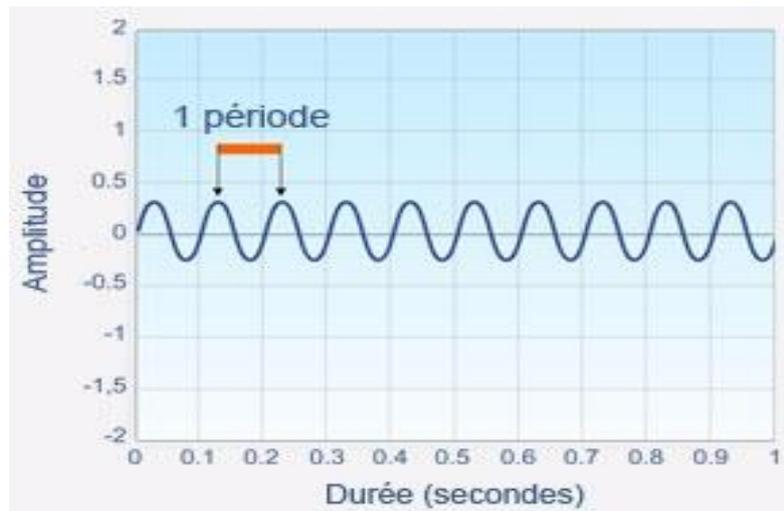


Figure 1.2. La pression acoustique d'une onde en fonction du temps.

Ensuite, la fréquence c'est le nombre de périodes par unité de temps ce qui correspond à l'inverse de la période, s'écrit :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

Où, f représente la fréquence en Hertz (Hz ou s^{-1}).

Dans l'exemple choisi, la sinusoïde possède une période de 0,1 seconde. La fréquence correspond au nombre de périodes par seconde, c'est-à-dire le nombre de fois que le motif se répète, soit 10 fois. La fréquence est donc de 10 Hz.

En plus, la longueur d'onde, c'est la distance séparant deux molécules successives dans le même état vibratoire (même pression et vitesse acoustique) ou encore la distance parcourue par l'onde pendant une période.

De plus, la longueur d'onde peut être représentée comme la distance séparant deux maximums de compression (traits gras successifs) dans cet exemple ; à l'instant t , chaque molécule séparée de la longueur d'onde est soumise à une pression et une vitesse acoustiques identiques [5].



Figure 1.3. La fréquence correspond au nombre de période par seconde.

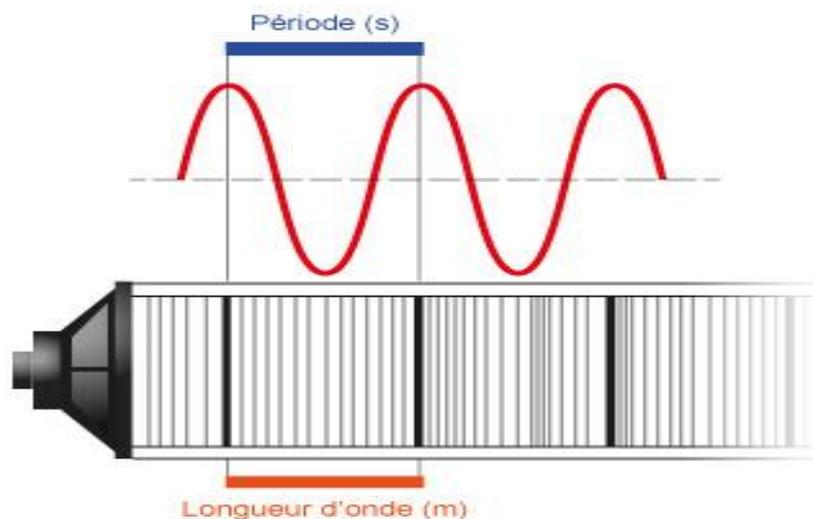


Figure 1.4. Représentation de la longueur d'onde d'une onde ultrasonore.

Enfin, la vitesse de propagation du son dépend de la nature, de la température et de la pression du milieu dans lequel l'onde acoustique se propage. Au cas d'une propagation dans un gaz parfait, la vitesse diminue lorsque la densité et/ou la compressibilité du gaz augmente [7]. Généralement, l'onde se propage plus vite dans les liquides ou les solides que dans les gaz. Le tableau ci-dessous récapitule la vitesse de propagation du son dans des différents milieux avec des conditions normales de température et de pression.

Milieu	Vitesse de propagation (m/s)
Air	340
Hélium	970
Hydrogène	1300
Eau douce	1440
Eau de mer	1560
Acier	5000

Tableau 1.1. La vitesse de propagation du son dans des différents milieux [8].

1.4 Les ondes ultrasonores

Cependant, les signaux ultrasonores sont des ondes de pression mécanique de fréquences supérieures à celles qui sont audibles par l'oreille humaine. D'une façon générale, la bande de fréquence se situe entre [20 kHz à 1 GHz]. Cette dernière couvre une grande variété d'applications. En effet, la bande de fréquence 20 kHz à 1 GHz peut être subdivisée en trois grandes parties, qui sont définies comme suit :

La première plage de fréquence située entre [20 kHz à 300 kHz] est principalement utilisée par les sonars et par les animaux pour l'écholocation. La deuxième plage de fréquence située entre [800 kHz à 15 MHz] est dédiée pour les applications d'imagerie médicale et industrielle non-destructive. Finalement, la troisième plage de fréquence située entre [12 MHz à 1 GHz] est exploitée pour les applications de microscopie acoustique [9].

1.4.1 C'est quoi une onde ultrasonore ?

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques représentatives d'un déplacement particulaire. Ces ondes se propagent dans un milieu fluide ou solide, mais ne peuvent être transmises dans le vide comme les ondes électromagnétiques. On peut observer plusieurs modes de propagation suivant la nature du milieu. Les ondes ultrasonores, concentrées sous forme de faisceaux vont interagir avec la matière qu'elles traversent. L'amplitude de ces ondes décroît au cours de la propagation, car les liaisons entre atomes ou entre molécules ne sont pas purement élastiques. Plusieurs phénomènes se produisent qui aboutissent à leur atténuation, à savoir :

- une absorption dans les milieux homogènes, lorsque l'onde ultrasonore se propage, elle cède une partie de son énergie au milieu.
- des réflexions, réfractions et diffusions aux changements de milieux (interface acoustique) [10].

1.4.2 Principe de production des ondes ultrasoniques

Il y a plusieurs systèmes susceptibles de produire des ultrasons. Généralement, un appareil produisant des ultrasons est communément appelé transducteur ou convertisseur d'ultrasons. La technologie des transducteurs peut être basée sur des générateurs pneumatiques Il y a plusieurs systèmes susceptibles de produire des ultrasons, électrodynamiques (haut-parleur) ou électrique. Dans ce dernier cas, on utilisera les propriétés des matériaux magnétostrictifs ou piézoélectriques pour convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique ultrasonore.

Actuellement, les matériaux les plus couramment utilisés sont les matériaux piézoélectriques. Ces matériaux se présentent sous la forme d'un disque ou d'un anneau sur les faces duquel sont disposées deux électrodes métallisées.

Lorsqu'une tension électrique est appliquée sur ces deux électrodes, le matériau se dilate ou se comprime selon l'orientation de la tension par rapport à la polarisation de la céramique. Inversement, en appliquant une force sur le matériau, il se produira l'effet inverse, une tension apparaîtra aux bornes des électrodes, permettant de produire l'énergie ultrasonique.

Les amplitudes de déplacement ou de vibration de ces céramiques sont très faibles (environ quelques microns). Pour créer des effets intéressants sur la matière, l'amplitude de vibration de l'outil en contact avec le milieu doit être de plusieurs dizaines de microns. Pour obtenir ce résultat, on empile généralement plusieurs céramiques l'une sur l'autre qui seront maintenues en pression entre deux masses métalliques. Le choix du matériau constituant ces masses et celui de la section de ces dernières permet de favoriser la vibration dans une direction privilégiée (plan de coupe). Les transducteurs ainsi constitués développent un déplacement maximal à certaines fréquences particulières qui dépendent de

la géométrie du transducteur lui-même, on nomme ces fréquences, fréquences de résonance. L'utilisation de ces transducteurs est généralement limitée à ces fréquences particulières. Pour fournir une onde ultrasonique, le principe consiste à fournir aux systèmes ultrasons une tension électrique dont la fréquence est égale à leur fréquence de résonance. Le spectre des ultrasons a été élargi suivant le progrès technologique et est présenté dans la figure 1.5 ci-dessous.

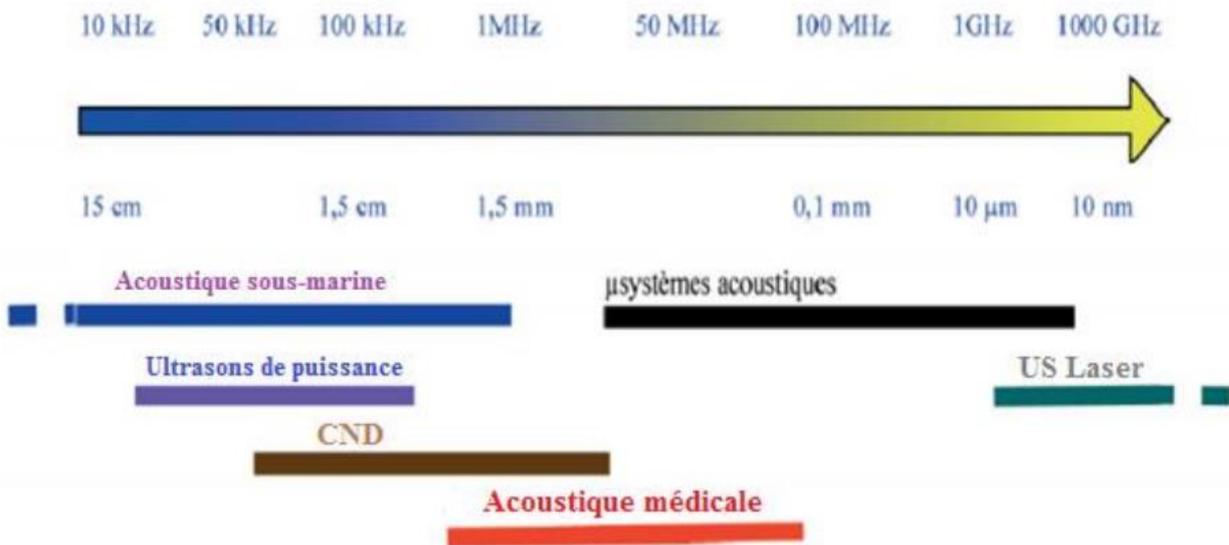


Figure 1.5. Spectre fréquentiel des ultrasons.

Pour fournir une onde ultrasonore, le principe consiste à fournir aux systèmes ultrasons une tension électrique dont la fréquence est égale à leur fréquence de résonance. Un générateur électrique doit être utilisé pour transformer la tension secteur (220 V - 50/60 Hz) en une tension alternative à la fréquence de résonance du système ultrasons (par exemple 20 kHz - 100 V.). Un contrôle permanent des conditions de résonance est nécessaire pour corriger les déviations entre la fréquence fournie par le générateur électronique et la fréquence de résonance ultrason, ceci afin d'éviter une mauvaise transmission de la puissance [11].

1.4.3 Caractéristiques des ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores peuvent caractériser par plusieurs éléments bien précis, sont comme suit :

a. L'impédance acoustique Z

Le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique Z . Elle est définie par la formule suivante :

$$Z = \frac{P}{v} \quad (1.5)$$

Où, P indique la pression acoustique (c'est à dire la pression engendrée par le passage de l'onde) et v représente la vitesse de déplacement des particules. L'impédance représente la caractéristique du milieu de propagation. Elle s'exprime en Rayleigh ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

b. Célérité de l'onde acoustique

La célérité (voir l'équation ci-dessous) est la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un environnement sonore. La célérité de l'onde ultrasonore dépend de la nature et de l'état du milieu dans lequel se propage.

$$c = \lambda * f \quad (1.6)$$

Où, λ représente la longueur d'onde en mètre (m) et f est la fréquence de la source sonore en hertz (Hz).

c. La fréquence

En effet, il existe quatre types de sons différents suivant une fréquence donnée.

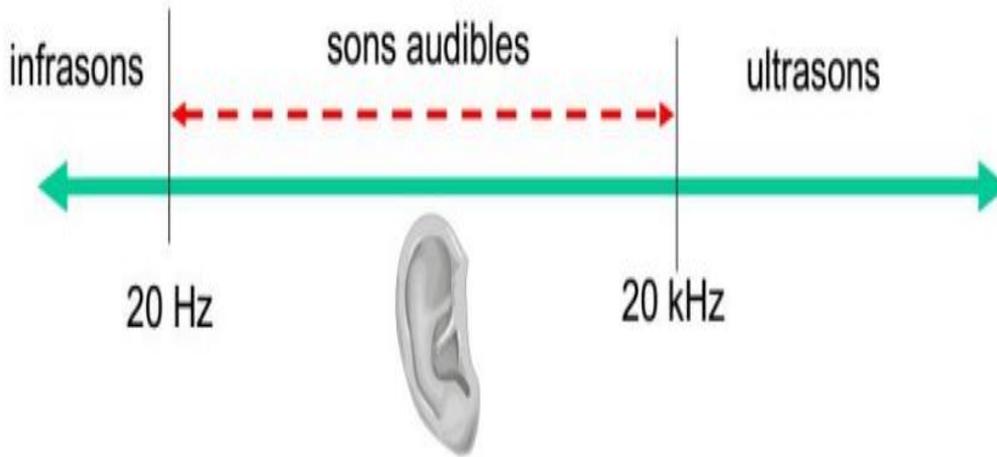


Figure 1.6. Classification des sons selon la fréquence utilisée [12].

d. La longueur d'onde

Grâce à la célérité et à la fréquence, on peut déterminer la longueur d'onde λ via l'équation (1.6).

e. La pression

À chaque point, la pression acoustique P varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée au milieu dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires.

f. Intensité

L'intensité des ultrasonores représente l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface durant l'unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la relation suivante :

$$I = \frac{P^2}{2 * \rho * c} \quad (1.7)$$

Où, P indique la pression acoustique, elle est exprimée en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, ρ représente la masse volumique en kg.m^{-3} et I représente l'intensité des ultrasonores [12].

1.4.4 L'équation de l'onde ultrasonore

L'équation d'onde ultrasonore plane dans un milieu peut s'exprimer sous la forme suivante [14,15] :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{\rho}{E_y} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (1.8)$$

Où, E_y représente le module de Young en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

1.4.5 La propagation des ultrasons

Pour permettre la propagation des ondes, il faut d'une part que le milieu environnant de la source permette la propagation de l'onde, par exemple les ondes sonores ne se propagent pas dans le vide. D'autre part, il faut que la source soit dans un état vibratoire.

En effet, les ondes ultrasonores sont émises par une source. À partir de celle-ci, ils sont propagés et se déplacent dans toutes les directions possibles dans un milieu élastique. La propriété du milieu élastique est que la pression varie (d'où les ultrasons sont des ondes de pression) et les ultrasons se déplacent sous forme d'ondes mécaniques. Celles-ci sont caractérisées par une propagation d'énergie et ne peuvent se propager que dans ce milieu élastique.

Il existe donc deux types de propagation des ondes à travers les milieux. On peut donc comparer le premier type d'ondes à un ressort, car il est soumis à une succession de surpressions et de dépressions et ses particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de va-et-vient dans l'axe de déplacement des ultrasons, de type sinusoïdal. Ce premier type correspond aux « ondes longitudinales » ou de compression, qui sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Cependant, celles-ci ont une particularité, elles ne se propagent que dans les solides et dans les liquides.

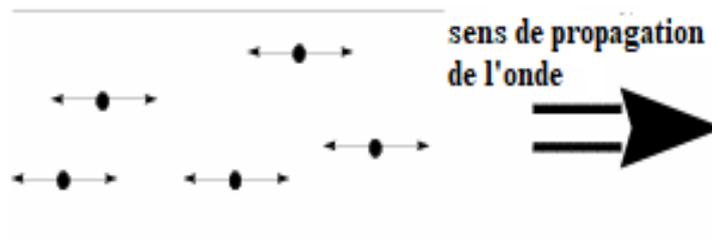


Figure 1.7. Propagation des ondes longitudinales.

Le second type de propagation est « les ondes transversales » dites de cisaillement (on assimile ces ondes par exemple à une corde de guitare). Elles sont caractérisées par le fait qu'elles se déplacent perpendiculairement à la direction de la propagation. Ces ondes ne se propagent que dans les solides et les liquides. Mais on sait qu'en général les ultrasons ne se déplacent que dans les solides et liquides seulement très visqueux. Par contre les ultrasons ne se déplacent pas dans le vide.

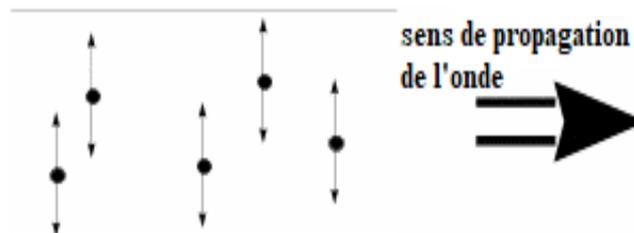


Figure 1.8. Propagation des ondes transversales [13].

1.5 Émission et réception de l'onde ultrasonore

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans les différents milieux s'atténue le long de son parcours. Plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation telle que l'absorption, la réfraction, la réflexion et la diffusion. L'émission d'impulsions ultrasoniques dans un solide produit deux effets : un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans le milieu et un effet mécanique qui est la transmission [16,17].

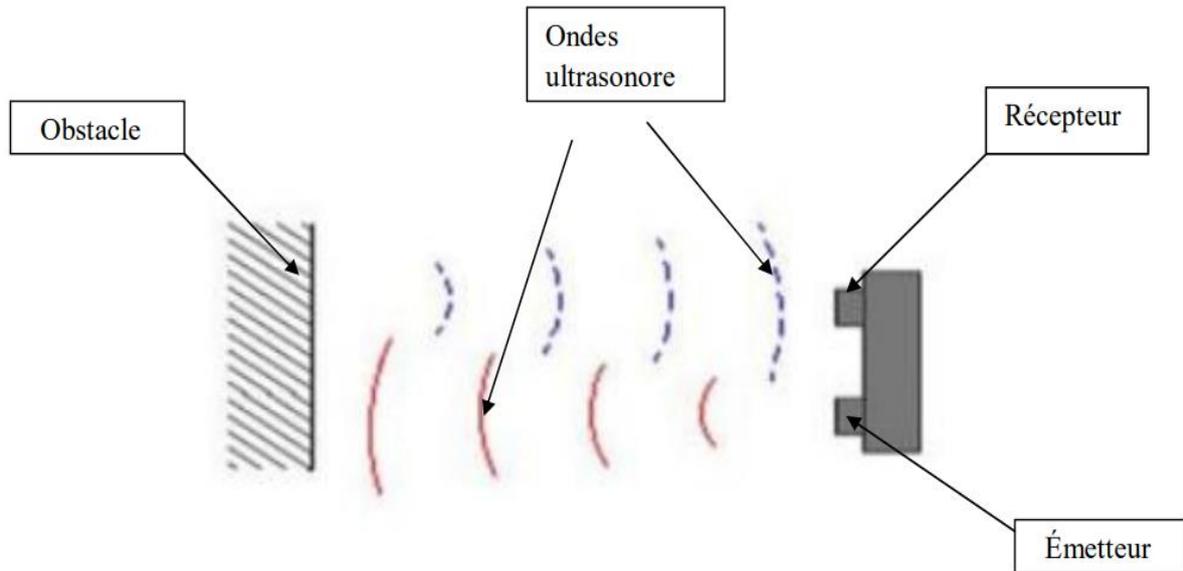


Figure 1.9. Émission et réception des ultrasons.

1.5.1 Réflexion de l'onde ultrasonore

Si l'incidence est directement perpendiculaire à l'interface (atteint perpendiculairement l'interface), la transmission se fait dans la même direction et le même sens que l'onde sonore, tandis que la réflexion se fait dans la même direction et dans le sens inverse. Soit un angle critique d'incidence $i_{critique}$ tel que :

$$\sin(i_{critique}) = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.9)$$

Pour une incidence normale ($i_{critique} = 0^\circ$) le coefficient de réflexion est donné par la formule suivante :

$$R_{réflexion} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \quad (1.10)$$

À la traversée d'une interface entre un milieu 1 et un milieu 2 et pour une incidence normale le coefficient de réflexion $R_{réflexion}$ ne dépend que de l'impédance acoustique des 2 milieux.

1.5.2 Réfraction de l'onde ultrasonore

La réfraction correspond à une déviation de l'onde ultrasonore lorsqu'elle traverse un milieu ayant des propriétés acoustiques différentes. La réfraction survient seulement si l'incidence n'est pas perpendiculaire à l'interface. L'onde transmise subit une déviation, c'est la réfraction. L'angle de l'onde transmise est donné par la loi de Snell-Descartes :

$$c_1 * \sin i = c_2 * \sin(j) \quad (1.11)$$

Où, i représente l'angle de l'onde incidence, j indique l'angle de l'onde transmise, c_1 et c_2 la vitesse de l'onde dans les milieux 1 et 2, respectivement [12].

1.6 Avantages et inconvénients du système RADAR à Ultrasons

Les principaux avantages sont que le système RADAR à ultrasons peut être utilisé en mode stationnaire ou en mode déplacement. Il a deux modes directionnels et l'étalement du faisceau peut

incorporer de nombreuses cibles. Il peut souvent sélectionner la cible la plus rapide ou la meilleure réflexion. C'est très fiable.

L'inconvénient principal étant que la minuterie radar peut prendre jusqu'à 2 secondes pour se verrouiller. Le radar a un faisceau plus large. Sa portée est égale seulement 200 pieds. Bien rangé. Il ne peut pas détecter si la décélération est supérieure à un [18].

1.7 L'influence des facteurs physiques sur le son

Les facteurs physiques influant sur le son sont différents selon les matériaux de propagation. Dans ce cas, nous allons présenter trois parties distinctes :

1.7.1 Dans l'air

La vitesse de propagation du son (la célérité) dépend de la nature, de la température et de la pression du milieu. Comme l'air est proche d'un gaz parfait, la pression a très peu d'influence sur la vitesse du son.

La célérité du son diminue lorsque la densité du gaz augmente (effet d'inertie) et lorsque sa compressibilité (son aptitude à changer de volume sous l'effet de la pression) augmente. Quand il s'agit de l'atmosphère, il convient de connaître en plus la structure thermique de la masse d'air traversée ainsi que la direction du vent car :

- Le son se propage moins bien à l'horizontale que sous des angles montants à cause du changement de densité (cette propriété est prise en compte dans la conception des théâtres en plein air depuis l'antiquité).
- Le son peut être littéralement « porté » par le vent. À titre d'exemple, une personne (A) est postée à 5 km d'une voie ferrée, alors qu'une autre (B) est postée à la même distance de celle-ci, mais du côté opposé de la voie ferrée à (A). Le vent souffle de (B) vers (A). Lorsqu'un train passe, (A) a entendu le train car le son a été « porté » par le vent, alors que (B) ne l'a pas entendu du fait que le son se propageait dans sa direction contrairement au sens du vent.

Le tableau (1.2) ci-dessous récapitule la vitesse d'une onde sonore en fonction de la température (T) dans l'air.

T (°C)	c (m.s ⁻¹)
-10	325.4
-5	328.5
0	331.5
+5	334.5
+10	337.5
+15	340.5
+20	343.4
+25	346.3
+30	349.2

Tableau 1.2. Vitesse d'une onde sonore en fonction de la température dans l'air [19].

La vitesse de propagation du son dans l'air sec à une température de 0 °C est de 331.5 m/s ; la vitesse du son augmente lorsque la température augmente, à titre d'exemple, à 20 °C, la vitesse du son est de 343.4 m/s. La variation de pression dans un milieu de densité constante, ne fait pas varier la vitesse de propagation. Mais par contre, la vitesse est dépendante de la densité du gaz traversé ; si les molécules du gaz sont très lourdes, elles auront du mal à se déplacer, le son se déplacera donc beaucoup moins vite. Or, nous nous savons que les variations de température qui font aussi varier la densité d'un gaz. La vitesse du son dans un gaz dépend donc de la température.

Sur la figure 1.10 ci-dessous, nous trouvons que la vitesse des ondes sonores peut être représentée en fonction de l'altitude.

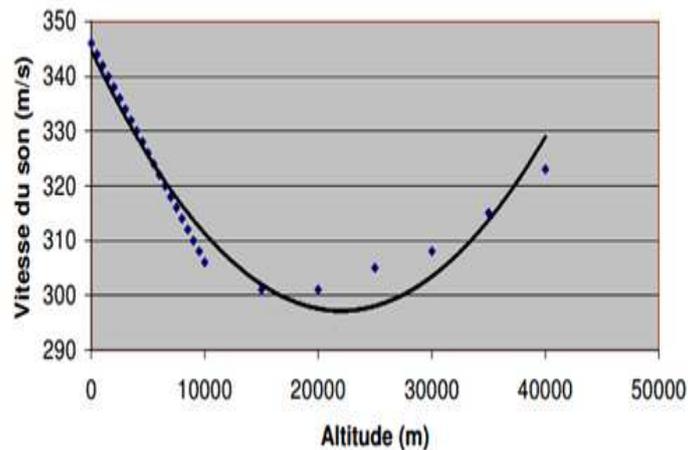


Figure 1.10. Vitesse du son en fonction de l'altitude.

1.7.2 Dans l'eau

Les longueurs d'onde couramment rencontrées dans l'océan s'étendent du millimètre à environ 50 mètres. La vitesse du son dans l'eau étant approximativement égale à 1500 m/s, cela correspond à des fréquences de 30 Hz à 1,5 MHz (la limite audible pour l'homme est de 20 kHz).

La célérité des sons dans l'eau est en fonction de la température, la pression et la salinité.

Dans l'eau, les ondes sonores se déplacent dans toutes les directions, sa vitesse dépend beaucoup de la nature de l'eau. Or, nous savons que la mer comporte de nombreuses variations de pression et de salinité qui engendrent une trajectoire irrégulière.

1.7.3 Les milieux diphasiques

Le changement de milieux soudain comme les milieux diphasiques influent radicalement sur la vitesse du son. La vitesse du son de ce mélange est bien inférieure à la plus petite des deux. À titre d'exemple, pour un mélange eau/vapeur, la vitesse du son est autour de 30 m/s. Cela s'explique en considérant la masse volumique moyenne du mélange, qui est comprise entre celle de l'eau et celle de la vapeur, et la compressibilité (ou la constante d'élasticité moyenne) qui est elle aussi comprise entre celle de l'eau et celle de la vapeur. En introduisant les bulles de vapeur dans l'eau, on a tout à la fois diminué la masse volumique moyenne du milieu (cette modification, seule, tend à augmenter la vitesse du son) et augmenté sa compressibilité (cette modification, seule, diminue la vitesse du son). Mais, on a beaucoup plus augmenté la constante élastique, que diminuer la masse volumique. C'est pourquoi on a obtenu une vitesse du son plus faible dans ce mélange que dans l'eau pure [19].

1.8 Détection d'obstacle

Les principes de la détection d'obstacles incluent la présence humaine, et d'un autre côté, sur l'utilisation des dispositifs de détection sur des véhicules industriels.

Les principes de détection de présence humaine ou d'objets sont nombreux : à base d'ultrason, de détecteurs capacitifs, de détecteurs à infrarouge, de radars micro-ondes, et d'autres.

L'utilisation des détecteurs, que ce soit à base d'ultrason ou autres, est présente aussi dans plusieurs domaines ; on peut citer la sécurité, les systèmes antivols ou en robotique.

1.8.1 Détecteur ultrason

L'ultrason est un son dont la fréquence est supérieure à 20 kHz. Le nom vient du fait que leur fréquence est trop élevée pour être audible pour l'homme. Deux principes physiques sont utilisables pour constituer le capteur : par effet électronique ou par effet piézoélectrique. Ces capteurs utilisent l'air comme milieu de propagation. L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui est réfléchi sur l'objet (ou le travailleur) à détecter et ensuite revient à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. La distance trouvée doit être divisée par deux, car le signal aura franchi le double de la distance pour revenir à l'émetteur. La capacité de détection de ce type de capteur va de quelques centimètres à environ 10 mètres.

a. Les avantages

Les capteurs ultrasonores ont de nombreux avantages :

- ils ont une large gamme d'utilisation ;
- facile à mettre en œuvre ;
- l'utilisation des ultrasons est pratiquement sans danger sur la santé humaine.

b. Les inconvénients

Par contre, les détecteurs ultrasonores présentent les inconvénients suivants :

- la vitesse de propagation des ultrasons peut être influencée de façon sensible par une variation de température. Par exemple, un écart de 30°C peut causer une erreur de 30 cm sur une mesure de 11 m ;
- la propagation de l'onde sonore peut aussi être influencée par l'humidité ;
- la lecture des capteurs peut être influencée par le bruit environnant et par le signal émis par d'autres capteurs sur le même système.

1.8.2 Principe de détection

Le principe du calcul de la distance est simple : il faut émettre une trame d'impulsion ultrasonore, et compter le temps d'attente à la réception. Étant donné que la vitesse du son est connue, on aura :

$$d = \frac{c*t}{2} \quad (1.12)$$

Remarque : divisé par deux, car le temps correspond à un aller - retour.

1.8.3 Pourquoi le choix des capteurs ultrasons ?

En général, la problématique commune à tous les systèmes de détection d'obstacles demeure celle de la réduction des fausses alarmes.

Le choix du capteur utilisé est fait après avoir effectué une étude bibliographique sur les dispositifs de détection et leurs utilisations sur les véhicules industriels ou de transport en général.

Les avantages majeurs des capteurs à ultrason sont leur faible prix de revient et leur simplicité d'implantation, aussi la détection par ultrason est parfaitement efficace pour de courtes distances [20].

1.9 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons résumé une grande généralité, à savoir : le principe du Radars, les ondes acoustiques et les ondes ultrasonores et le principe de détection en utilisant le capteur à ultrasons. Le chapitre suivant sera consacré sur le matériel hardware et software nécessaires pour la réalisation de notre projet.

CHAPITRE 2

Description du matériel de conception du projet

2.1 Introduction

Avec le développement de la technologie, le microcontrôleur est devenu un système qui ressemble à un ordinateur, et cela, grâce à ses caractéristiques, tels que : une mémoire, un processeur et aussi des interfaces qui sont configurés pour contacter le monde extérieur. Les microcontrôleurs ont des performances réduites, mais sont de faible taille et ils présentent une faible consommation d'énergie, les rendant indispensables dans toute solution d'électronique embarquée, tels que : la voiture, une porte de garage et un système robotique. La carte Arduino n'est pas le microcontrôleur le plus puissant, mais son architecture a été publiée en open-source, et toute sa philosophie s'appuie sur le monde du libre, au sens large [21]. C'est pour cela elle est très utile.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le matériel nécessaire pour effectuer notre projet, et cela, à partir d'une carte Arduino et les périphériques appropriés afin de réaliser un radar de détection d'un objet en utilisant le filtre du Kalman.

2.2 Carte Arduino

Arduino a commencé en Italie, chez Interaction Design Institute Ivera (IDII), est une école spécialisée en design qui se focalise sur la manière dont nous interagissons avec les produits, les systèmes et les environnements numériques.

La carte Arduino est un circuit imprimé spécifiquement conçu pour héberger un microcontrôleur (architecture Atmel AVR) et donner accès à toutes ses entrées et sorties. Elle comprend aussi quelques autres composants électroniques qui permettent de faire fonctionner le microcontrôleur ou d'en étendre les fonctionnalités [22].

2.3 Carte Arduino Uno

La carte Arduino Uno (voir la figure 2.1) est l'une des cartes les plus populaires de la famille Arduino dont le cœur est un microcontrôleur de références ATmega328. Il possède 14 broches d'entrée/sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sorties PWM), 6 entrées analogiques, un quartz de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour prendre en charge le microcontrôleur.



Figure 2.1. Carte Arduino Uno.

2.3.1 Avantages de la carte Arduino Uno

Il y a beaucoup de cartes électroniques disponibles qui possèdent des plateformes basées sur un microcontrôleur pour l'électronique programmable. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. De la même

façon, le système Arduino simplifie la façon de fonctionner avec les microcontrôleurs tout en offrant à personnes intéressées plusieurs avantages cités comme suit :

- **le prix (réduits)** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.
- **multi plateforme** : le logiciel Arduino, écrit en JAVA, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- **un environnement de programmation clair et simple** : l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino IDE) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- **logiciel Open Source et extensible** : le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complétés par des programmeurs expérimentés. Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application JAVA multi plateformes (fonctionnant sur tout système d'exploitation), servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le programme au travers de la liaison série (RS232, Bluetooth ou USB selon le module).
- **matériel Open source et extensible** : les cartes Arduino sont basées sur les Microcontrôleurs Atmel ATmegaA8, ATmega168, ATMege328, les schémas des modules sont publiés sous une licence créative Commons, et les concepteurs des circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dont le but est de comprendre comment elle fonctionne pour économiser le coût [23].
- **site** : un site en anglais arduino.cc et un autre en français arduino.cc/fr où on trouve tout de la référence Arduino, le matériel, des exemples d'utilisations, de l'aide pour débiter, des explications sur le logiciel et le matériel.

2.3.2 Caractéristiques de la carte Arduino Uno

Le tableau 2.1 ci-dessous récapitule les caractéristiques essentielles d'une carte Arduino UNO :

Microcontrôleur	ATMega328
Tension de fonctionnement	5 V
Tension d'alimentation - entrée - (recommandée)	7-12 V
Tension d'alimentation -entrée- (limite)	6-20 V
Entrées/Sorties numériques	14 (dont 6 peuvent être utilisées en sortie PWM)
Entrées analogiques	6
Courant DC nécessaire pour les broches entrée/sortie	40 mA
Mémoire FLASH	32 KB (dont 0.5 KB utilisé par le boot loader)
Mémoire SRAM	2 KB
Mémoire EEPROM	1Kb
Fréquence d'horloge	16 Mhz
Longueur	68.6 mm
Largeur	53.4 mm

Tableau 2.1. Caractéristiques d'une carte Arduino Uno.

2.3.3 Microcontrôleur ATmega328

Un microcontrôleur ATmega328 est un circuit intégré qui associe plusieurs composants complexes dans un espace réduit au temps des pionniers de l'électronique. Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants ; tels que les transistors ; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. La figure 2.2 ci-dessous montre l'image d'un microcontrôleur ATmega328 qu'on le trouve souvent dans une carte Arduino.

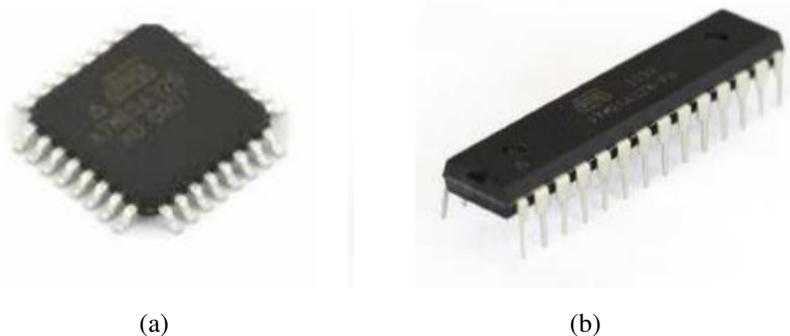


Figure 2.2. Microcontrôleur ATmega328
 (a) le composant CMS
 (b) le composant classique

De plus, le microcontrôleur ATmega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur. En général, l'architecture interne du circuit programmable comprend via les éléments clés suivants :

- **la mémoire Flash** : c'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et réinscriptible mémoire programme de 32Ko (dont boot loader de 0.5 ko).
- **RAM** : c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile", car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur. Sa capacité est 2 ko.
- **EEPROM** : c'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme.

2.3.4 Alimentations

La carte Arduino Uno peut être alimentée soit par une alimentation interne via la connexion USB ou par une alimentation externe (non-USB), cette dernière peut provenir d'un adaptateur secteur ou d'une batterie. La source d'alimentation est automatiquement sélectionnée par la carte.

Les broches d'alimentation sont les suivantes :

- **VIN** : la tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5 V de la connexion USB ou autre source (5 V) régulée). On peut alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.
- **5 V** : la tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (Pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le (5 V) régulé fourni par cette broche peut

donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5 V régulé) ou de toute autre source d'alimentation régulée.

- **3.3 V** : une alimentation de 3.3 V fournit par le circuit intégré FTDI (Circuit Intégré Faisant l'Adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte, est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5 V).
- **GND** : broche de masse (0 V).

2.3.5 Entrées et sorties

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotées de 0 à 13) peuvent être utilisées soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions `pinMode(broche,OUTPUT)` pour la sortie et `pinMode(broche,INPUT)` pour l'entrée du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V, chacune fournit ou reçoit un maximum de 40 mA de l'intensité. De plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

Communication Série	Broches 0 (RX) et 1 (TX) sont utilisées pour recevoir (RX) et transmettre (TX) les données séries au niveau TTL. Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega8U2 programmé en convertisseur USB-vers-série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur.
Interruptions Externes	Broches 2 et 3 peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.
Impulsion PWM	Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11 fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction <code>analogWrite()</code>
SPI (Interface Série Périphérique)	Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) et 13 (SCK) supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible avec la librairie pour communication SPI.
I2C	Broches 4 (SDA) et 5 (SCL) supportent les communications de protocole I2C ou interface TWI (Two-Wire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie <code>Wire/I2C</code> (ou <code>TWI - Two-Wire Interface - Interface "2 fils"</code>).
LED	Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche 13 est au niveau haut, la LED est allumée, lorsque la broche 13 est au niveau bas, la LED est éteinte.

Tableau 2.2. Les broches entrées/sorties numériques de la carte Arduino Uno [24].

2.3.6 Broches analogiques

La carte Arduino UNO contient 6 entrées analogiques numérotées de 0 à 5, chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c'est-à-dire sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead()` du langage Arduino. Ces broches mesurent entre le 0 V (valeur 0) et le 5 V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction `analogReference()` du langage Arduino. Elles peuvent être utilisées en tant que broches numériques : elles sont numérotées en tant que broches numériques de 14 à 19.

Dans une carte Arduino d'autres broches sont disponibles :

- **ARFF** : tension de référence pour les entrées analogiques utilisées avec `analogReference`.
- **RESET** : tension basse pour réinitialiser l'Arduino.

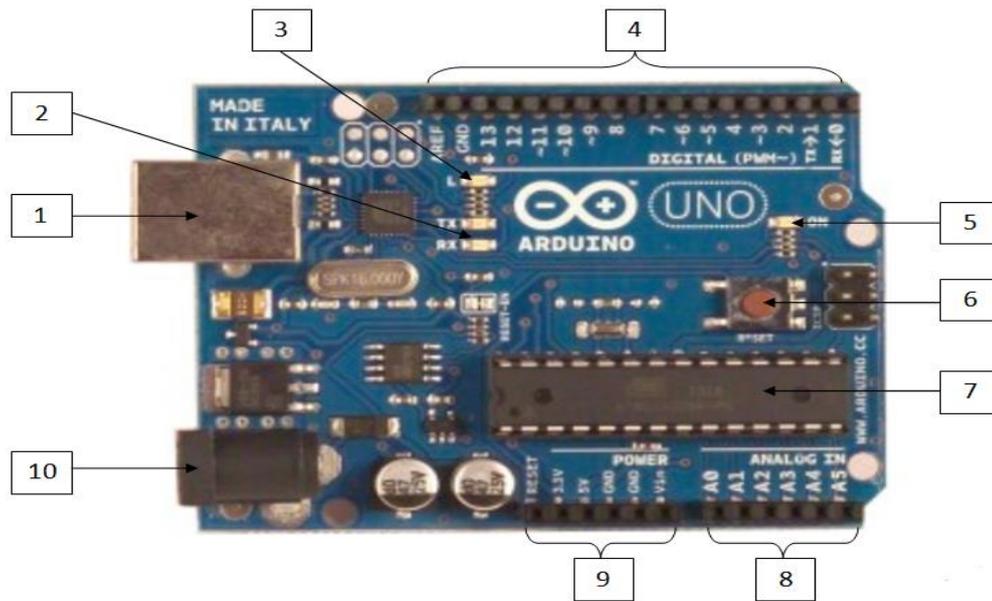


Figure 2.3. Constitution de la carte Arduino Uno.

1. le port USB sert à la fois à l'alimentation et au transport des données ;
2. 2 x LED montrent l'activation de Rx et Tx ;
3. LED de test de la broche 13 ;
4. les entrées/sorties numériques ;
5. LED témoin d'alimentation ;
6. bouton de réinitialisation ;
7. le microcontrôleur ATmega328 ;
8. les entrées analogiques ;
9. la broche d'alimentation ;
10. le port d'alimentation externe.

2.3.7 Communication

La carte Arduino offre plusieurs possibilités pour communiquer avec un ordinateur, une autre carte Arduino, ou un autre microcontrôleur. L'ATmega328 dispose d'une UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter ou émetteur-récepteur asynchrone universel) pour la communication série de niveau TTL (5 V) et qui est disponible sur les broches 0 (RX) et 1 (TX). Un circuit intégré ATmega8U2 sur la carte assure la connexion entre la communication série vers le port USB de l'ordinateur, et elle apparaît comme un port COM virtuel pour les logiciels de l'ordinateur. Le code utilisé pour programmer l'ATmega8U2 utilise le driver standard USB COM, et aucun autre driver externe n'est nécessaire. Cependant, sous Windows, un fichier .inf est requis. Le logiciel Arduino inclut une fenêtre terminal série (ou moniteur série) sur l'ordinateur qui permet d'envoyer des textes simples depuis et vers la carte Arduino. Les LEDs RX et TX sur la carte clignotent lorsque les données sont transmises via le circuit intégré USB-vers-série et la connexion USB vers l'ordinateur (mais pas pour les communications série sur les broches 0 et 1) [23,24].

2.4 Capteur de Température LM35

Le LM35 permet de transformer l'effet du réchauffement ou du refroidissement en signal électrique. Il délivre en sortie une tension proportionnelle à la température mesurée. Ce capteur est fabriqué par TEXAS INSTRUMENTS et est très utilisée dans le domaine industriel, il est précis et fiable avec un coût réduit. Le LM35 ne nécessite aucun étalonnage externe pour fournir des précisions

2.5.2 Broches de connexion

Le capteur possède les 4 broches suivantes :

- la broche V_{CC} du capteur est connectée au +5 V DC délivrée par l'Arduino ;
- la broche GND du capteur est placée à la masse de l'alimentation ;
- la broche Écho du capteur est placée sur un pin digital de l'Arduino qui sera défini en sortie de mesure donnée en écho (Echo output) ;
- la broche Trigger du capteur est placée sur un pin digital de l'Arduino qui sera défini en entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input).



Figure 2.7. Broches de connexion du capteur HC-SR04 [29].

2.5.3 Spécifications et limites

Le tableau 2.4 ci-dessous récapitule les spécifications et les limites du capteur HC-SR04 :

Paramètres	Min	Type	Max	Unité
Tension d'alimentation	4.5	5.0	5.5	V
Courant de repos	1.5	2.0	2.5	mA
Courant de fonctionnement	10	15	20	mA
Fréquence d'ultrason	-	40	-	kHz

Tableau 2.4. Spécifications et limites du capteur.

N.B : la borne GND doit être connectée en premier, avant l'alimentation sur V_{CC} [27].

2.5.4 Fonctionnement du capteur HC-SR04

Le principe de fonctionnement du capteur est entièrement basé sur la vitesse du son et la prise de mesure se passe comme suit :

- on envoie une impulsion HIGH de $10\mu s$ sur la broche TRIGGER du capteur ;
- le capteur envoie alors une série de 8 impulsions ultrasoniques à 40 kHz ;
- les ultrasons se propagent dans l'air jusqu'à toucher un obstacle et retournent dans l'autre sens vers le capteur ;
- afin de clôturer la prise de mesure, le capteur doit détecter l'écho.
- le signal sur la broche ECHO du capteur reste à HIGH durant les étapes 3 et 4, ce qui permet de mesurer la durée de l'aller-retour des ultrasons et donc de déterminer la distance.

N.B : il y a toujours un silence de durée fixe après l'émission des ultrasons pour éviter de recevoir prématurément un écho en provenance directement du capteur [30].

2.5.5 Distance de l'objet

La distance parcourue par un son se calcule en multipliant la vitesse du son, environ 340 m/s (ou 34 000 cm/1 000 000 μ s) par le temps de propagation, soit :

$$d = v * t \quad (2.1)$$

Où, d représente la distance, v est la vitesse du son et t représente le temps de propagation.

Le HC-SR04 donne une durée d'impulsion en dizaines de μ s. Il faut donc multiplier la valeur obtenue par 10 μ s pour obtenir le temps t. On sait aussi que le son fait un aller-retour. La distance vaut donc la moitié.

$$d = \frac{34000 \text{ cm}}{1000000 \mu\text{s}} * \frac{10 \mu\text{s} * \text{valeur}}{2} \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) peut être présentée comme suit :

$$d = \frac{170000 \text{ cm}}{1000000} * \text{valeur} \quad (2.3)$$

Finalement, l'équation (2.3) est simplifiée comme suit :

$$d = \frac{17 \text{ cm}}{100} * \text{valeur} \quad (2.4)$$

La formule $d = \text{durée}/58 \text{ cm}$ figure aussi dans le manuel d'utilisation du HC-SR04 car la fraction 17/1000 est égale à 1/58.8235. Elle donne cependant des résultats moins précis.

N.B : À grande distance, la surface de l'objet à détecter doit mesurer au moins 0.5 m² [27].

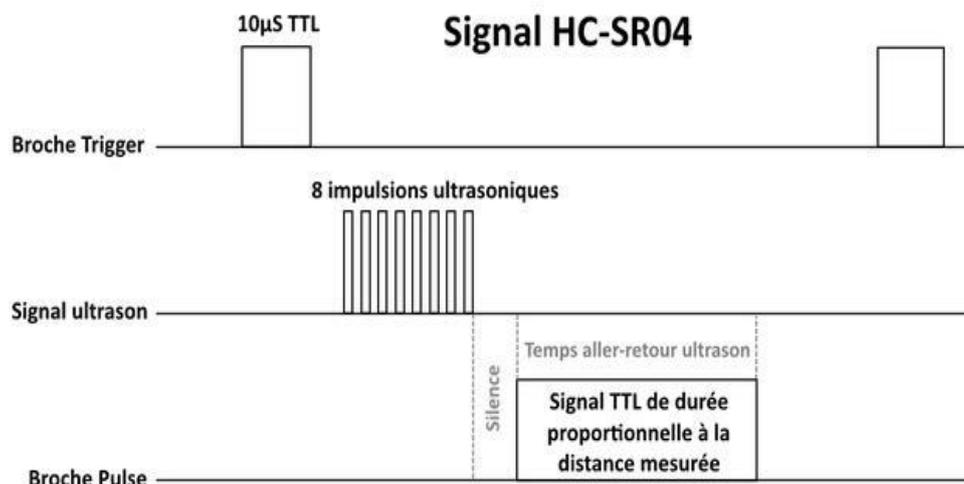


Figure 2.8. Fonctionnement du capteur HC-SR04.

2.6 Plaque d'essai

La plaque d'essai (voir la figure 2.9) sans soudure nous permet de réaliser rapidement un montage électronique en insérant les pattes des composants et les fils dans les trous.

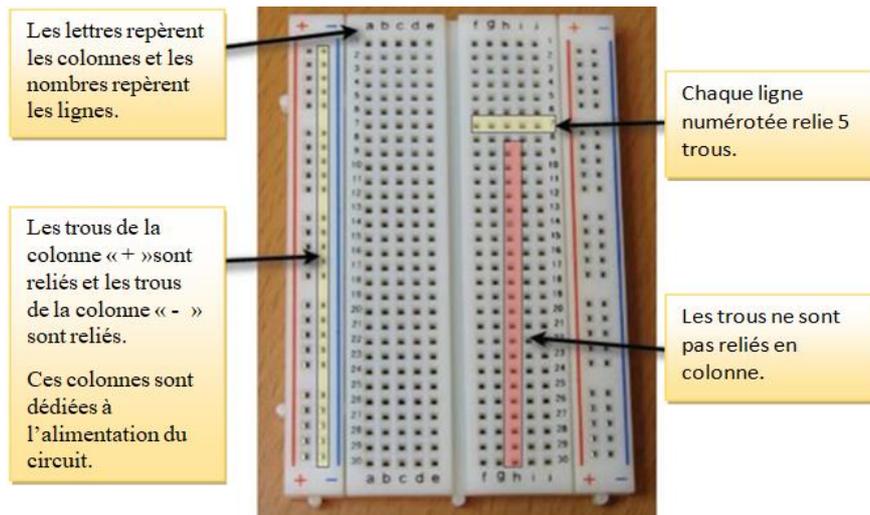


Figure 2.9. Plaque d'essai (Breadboard) [31].

2.7 Environnement de développement intégré (IDE)

Le logiciel de programmation des cartes Arduino présente une application java, libre et multi-plates-formes, servant d'éditeur de code et de compilateur qui peut transférer le programme (croquis ou sketch) au travers de la liaison série asynchrone (RS-232, Bluetooth ou USB selon la carte). Il est également possible de se passer de l'interface Arduino, et de compiler et uploader les programmes via l'interface en ligne de commande. Le langage de programmation Arduino est basé sur les langages c/c++ adaptés à la carte et ses entrées/sorties [32]. On peut décrire l'environnement de développement intégré via les deux figures 2.10 et 2.11.

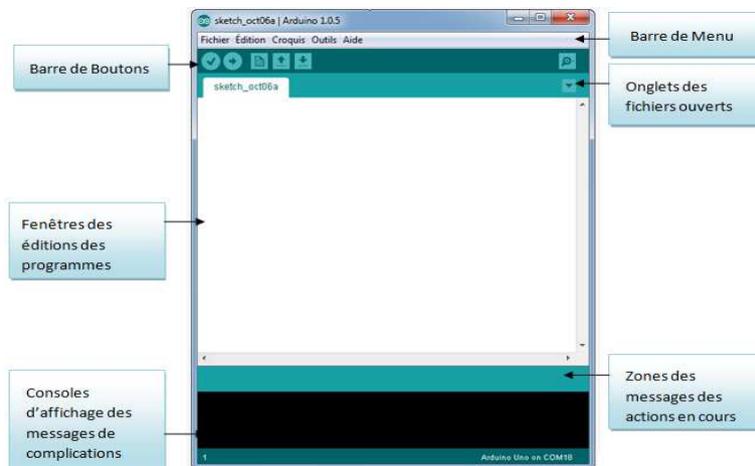


Figure 2.10. Interface de la plateforme Arduino.

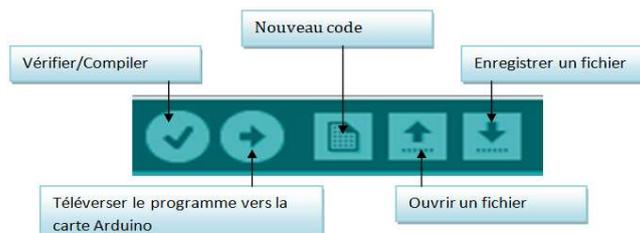


Figure 2.11. Barre de boutons Arduino.

Une fois chargé dans le microcontrôleur, le programme s'exécute.

La fonction « setup () » contiendra toutes les opérations nécessaires à la configuration de la carte (directions des entrées-sorties, débits de communications série, etc.).

La fonction « loop () » est exécutée en boucle après l'exécution de la fonction setup. Elle continuera de boucler tant que la carte n'est pas mise hors tension, redémarrée (par le bouton reset). Cette boucle est absolument nécessaire sur les microcontrôleurs étant donné qu'ils n'ont pas de système d'exploitation. En effet, si l'on omettrait cette boucle, à la fin du code produit, il sera impossible de reprendre la main sur la carte Arduino qui exécuterait alors du code aléatoire [21]. Le fonctionnement de la structure de base du programme est bien montré sur la figure 2.12.

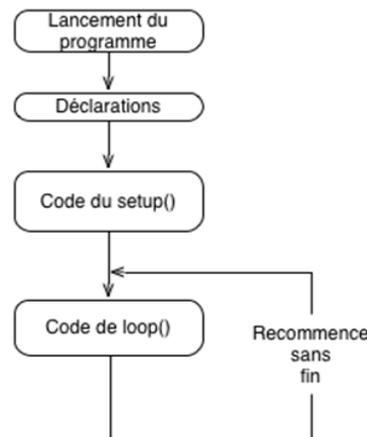


Figure 2.12. Les étapes de base du programme.

2.7.1 Structure d'un programme en Arduino

Le programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code. La structure d'écriture d'un programme sous Arduino est illustrée dans la figure 2.13.

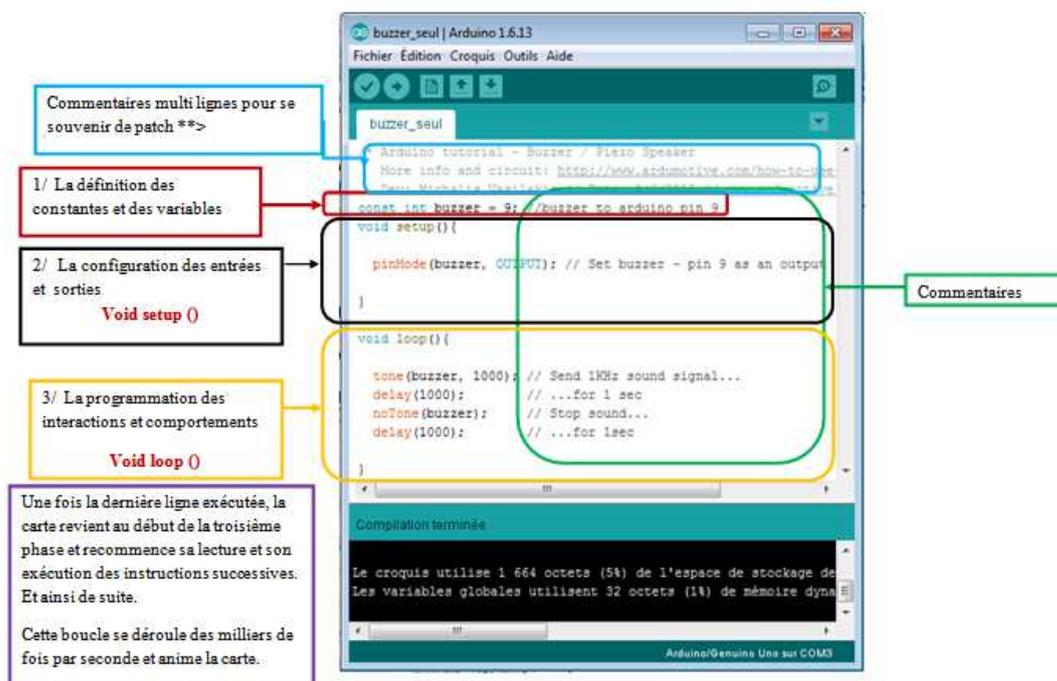


Figure 2.13. Structure générale du programme sur IDE [33].

2.7.2 Les étapes de fonctionnement

- on conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel Arduino ;
- on vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation) ;
- si des erreurs sont signalées, on modifie le programme ;
- on charge le programme sur la carte ;
- on câble le montage électronique ;
- l'exécution de programme est automatique après quelques secondes ;
- on alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (pile 9 volts par exemple) ;
- on vérifie que notre montage fonctionne [31].

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les composants de base qui sont utilisés dans ce travail à partir d'une carte d'acquisition qui est l'Arduino ainsi que les raisons pour lesquelles on l'a choisie, ensuite quelques descriptions théoriques sur le capteur de température LM35 et le capteur ultrasonique HC-SR04. À la fin de ce chapitre, la partie de programmation sur l'environnement de développement intégré (IDE) a été illustrée. Le prochain chapitre présentera les méthodologies utilisées pour atteindre les résultats désirés de notre projet.

CHAPITRE 3

Application et Résultats

3.1 Introduction

Avec le développement rapide des systèmes avancés d'aide à la conduite et des véhicules intelligents, il existe divers types des capteurs qui ont été utilisés pour détecter l'environnement de trafic autour des véhicules tout-terrain, tels que les radars de 79 GHz ou 24 GHz, les capteurs à infra-rouge, les capteurs à laser, etc. Avec les percées technologiques dans ces domaines, le capteur à ultrasons est de plus en plus utilisé, car il améliore les performances et donne des meilleurs résultats par rapport à d'autres capteurs. De plus, le capteur à ultrasons présente, à certains égards, des avantages uniques en matière de mesure de distance, tels que la détection de niveau, l'évitement d'obstacles par un robot, etc. Il présente aussi des avantages uniques dans les environnements encombrés. Selon les parties théoriques mentionnées dans les deux chapitres précédents, le présent chapitre se concentre sur le développement d'un dispositif capable de détecter des obstacles et de mesurer des distances à l'intérieur d'une chambre inter-modale en utilisant un capteur de température, et un capteur à ultrason. Le plus important dans cette partie est l'intégration du filtre de Kalman pour augmenter la précision de mesure et de détection. À la fin, nous allons présenter les résultats obtenus sur une application mobile en utilisant la plate-forme Blynk. La méthodologie utilisée pour obtenir de meilleurs résultats repose sur le schéma conceptuel suivant :

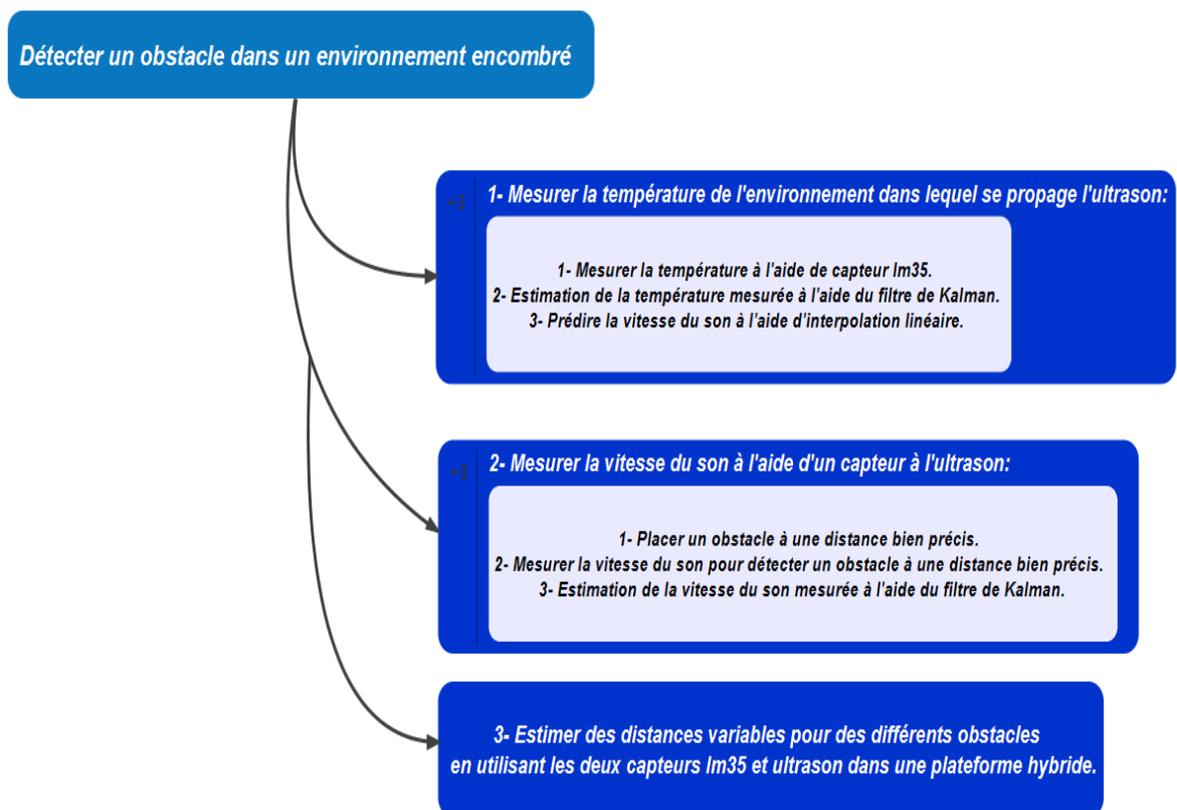


Figure 3.1. Schéma conceptuel de notre projet.

3.2 Algorithme de Filtre de Kalman

Le filtre de kalman est une méthode mathématique développée par le professeur RUDOLF KALMAN en 1960. Ce filtre a été proposé pour résoudre les problèmes de poursuite de trajectoire dans la préparation des missions Apollo. Il est devenu un algorithme indispensable pour le traitement des trajectoires dans les systèmes radars modernes.

3.2.1 Définition

Le filtre de Kalman (FK) est un filtre récursif, qui utilise une approche temporelle. Il permet d'estimer l'état (cet état correspond à l'information utile) d'un système dynamique à partir d'une information, à priori, sur l'évolution de cet état (modèle) et de mesure réelle. L'utilisation de ce filtre est particulièrement recommandée lorsque l'imprécision sur les données traitées peut être interprétée comme un bruit aléatoire, dont la distribution est connue à priori [34].

3.2.2 Avantages du filtre de Kalman

Les avantages de l'algorithme FK sont comme suit :

- la procuration de l'erreur de prédiction qui présente en soit un indicateur de précision.
- son algorithme travaille dans le domaine temporel avec une nature récursive et dispose d'un estimateur optimal dans le sens des moindres carrés.
- un autre aspect de son optimalité est l'incorporation de toute l'information disponible sur le système, les mesures et les erreurs, dans un opérateur adaptatif qui est recalé à chaque fois qu'une nouvelle mesure devient disponible.
- le gros avantage de la méthode est de fournir à chaque itération une estimation des matrices de covariance d'erreur de mesure et d'analyse. Il faut toutefois initialiser correctement ces matrices à l'instant t_0 , et avoir une estimation des matrices de covariance d'erreur modèle et d'erreur d'observation [34].

3.2.3 Présentation du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un algorithme mathématique capable d'effectuer une estimation récursive de l'état du comportement dynamique d'un système. Cela signifie que pour estimer l'état courant d'un système, l'estimation de l'état précédent et des mesures actuelles sont nécessaires. Il est également capable d'estimer l'état lorsque les modèles de systèmes dynamiques ne sont pas bien connus. Le principe d'un tel filtre repose sur un modèle à variables d'état basé sur deux équations [35,36] :

- l'équation récursive de modélisation du processus aléatoire (vecteur d'état) discret, dite équation d'état ou équation de transition.
- l'équation d'observation (ou équation de mesure) du processus (vecteur de mesure).

La formulation de l'algorithme KF est conçue sous forme de temps discret pour estimer l'état et mesurer le modèle dynamique présenté comme suit :

$$\begin{cases} x_{k+1} = F_k x_k + B_k u_k + w_k, & w_k \rightarrow N(0, Q_k^w) \\ z_k = H_k x_k + v_k, & v_k \rightarrow N(0, R_k^v) \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec

x_k : vecteur d'état à l'instant k qui inclut les quantités à estimer, $x_k \in \mathbb{R}^n$;

F_k : matrice de transition. Elle décrit l'évolution du vecteur d'état de l'instant $k-1$ à l'instant k , $F_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$;

B_k : matrice de commande à l'instant k ; elle dépend de la modélisation du système, $B_k \in \mathbb{R}^{n \times l}$;

H_k : matrice d'observation (mesure). Elle est en fait le lien entre les paramètres du système et les mesures. $H_k \in \mathbb{R}^{m \times n}$;

u_k : vecteur représentant les commandes appliquées au système à l'instant k , $u_k \in \mathbb{R}^l$;

w_k : bruit de modélisation lié à l'incertitude que l'on a sur le modèle de processus ; $w_k \in \mathbb{R}^n$

Q_k^w : matrice de covariances du bruit du processus à l'instant k.

z_k : vecteur de mesure à l'instant k, $z_k \in \mathbb{R}^m$;

v_k : bruit de mesure, $v_k \in \mathbb{R}^m$.

R_k^v : matrice de covariances du bruit de mesure à l'instant k.

L'algorithme KF comprend deux phases de traitement principales, à savoir la phase de prédiction et la phase de correction. En phase de prédiction, l'algorithme utilisé est vérifié par les équations suivantes :

$$\hat{x}_k^{(-)} = F_{k-1}\hat{x}_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \quad (3.2)$$

$$P_k^{(-)} = F_{k-1}P_{k-1}F_{k-1}^T + Q_k^w \quad (3.3)$$

Où, $\hat{x}_k^{(-)}$ représente l'état actuel (à priori) estimé pour l'état précédent (à posteriori) estimé \hat{x}_k et $P_k^{(-)}$ indique la matrice d'estimation actuelle de la covariance de l'erreur, tandis que Q_k^w est la matrice de covariance de bruit du processus. En revanche, dans la phase de correction, l'algorithme utilisé est vérifié par les équations suivantes :

$$K_k = P_k^{(-)}H_k^T (H_kP_k^{(-)}H_k^T + R_k^v)^{-1} \quad (3.4)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^{(-)} + K_k (z_k - H_k\hat{x}_k^{(-)}) \quad (3.5)$$

$$P_k = (I - KH_k)P_k^{(-)} \quad (3.6)$$

Où, K est le gain Kalman qui sert à minimiser l'erreur de la matrice de covariance de l'erreur (à posteriori) P_k , et R_k^v représente la matrice de covariance du bruit de mesure. La deuxième étape du processus de la conception du FK peut être formée dans un diagramme tel qu'illustré sur la figure 3.2. Ce diagramme montre que le processus de prédiction et de correction se produit en continu (appelé par le cycle de correction) pour générer l'estimation de la valeur mesurée. Par conséquent, le bruit de mesure qui apparaît dans le système de capteur peut être éliminé.

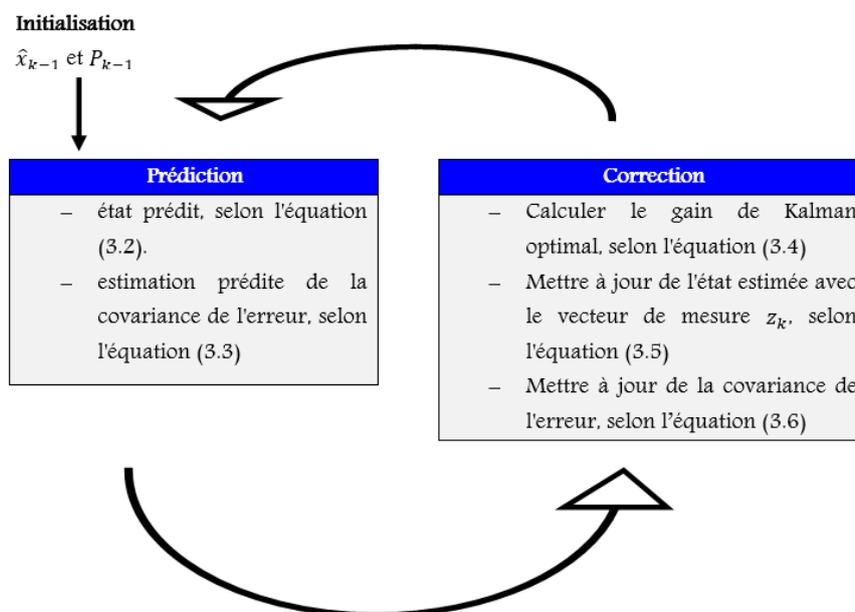


Figure 3.2. Diagramme de l'algorithme du filtre de Kalman.

3.2.4 Conception du filtre de Kalman pour capteur

Cette partie décrit la conception de l'algorithme du FK pour les deux capteurs LM35 et HC-SR04, dont nous avons utilisé pour estimer la température et la vitesse du son. Il est conçu conformément aux sous-équations (3.2) jusqu'à (3.6). Après des analyses et calculs, ces sous-équations sont appliquées en tant que langage de programmation sur le logiciel Arduino IDE. Plus spécifiquement, l'organigramme de la conception de la programmation est illustré sur la figure 3.3.

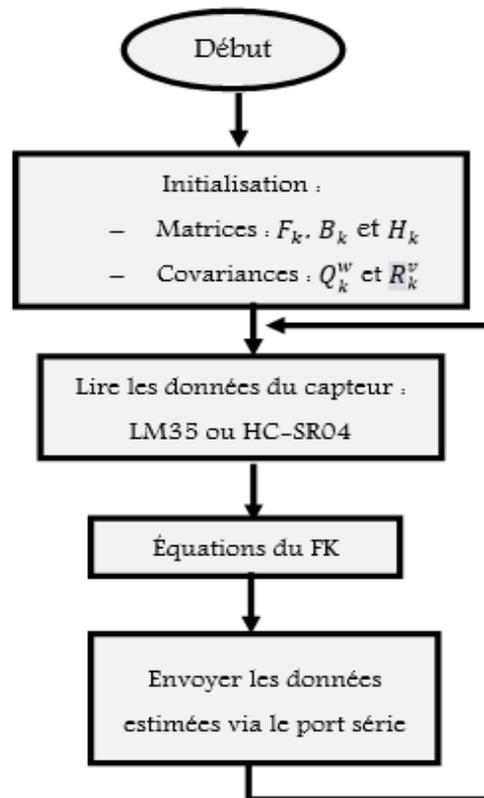


Figure 3.3. L'organigramme de programmation.

3.3 Résultats

3.3.1 Mesurer la température de l'environnement dans lequel se propage l'ultrason

Dans cette section, nous allons présenter la première étape du schéma conceptuel de la figure 3.1. L'objectif de cette étape est de mesurer la température de l'environnement dans lequel les ultrasons sont propagés en utilisant un capteur de température, afin de prédire la vitesse du son avec la méthode d'interpolation linéaire.

Cependant, la figure 3.4 illustre le diagramme proposé dont nous avons utilisé pour la surveillance de la température d'une chambre dans laquelle nous détecterons les obstacles. Sur la figure 3.4, nous nous appuyons sur deux plates-formes, à savoir : Arduino et MATLAB.

La plate-forme Arduino est devenue si polyvalente qu'elle a développé de nombreux logiciels pour prendre en charge de nombreuses applications différentes. Elle a également développé un logiciel de prise en charge de MATLAB, qui permet d'obtenir et de tracer des données en temps réel directement à partir de la fenêtre de commande MATLAB depuis Arduino. Ces données en temps réel peuvent être utilisées pour prédire la vitesse du son dans une chambre en fonction du comportement du capteur de température.

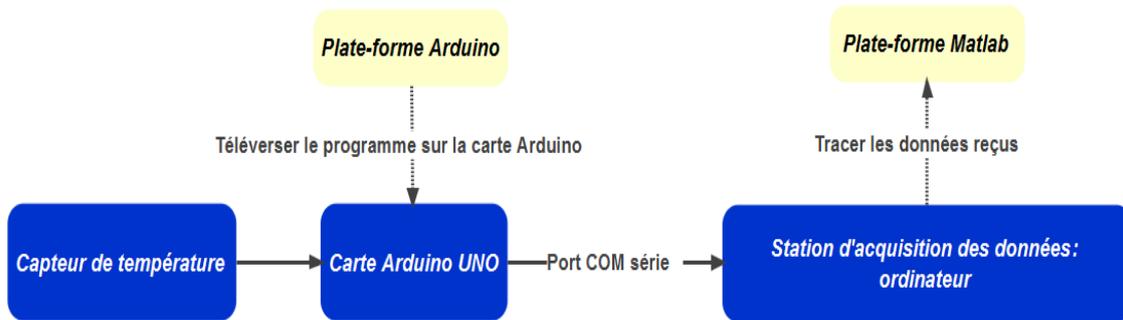


Figure 3.4. Diagramme d'acquisition des données de température via un capteur.

Cette partie est mise principalement sur l'automatisation et l'acquisition des données en temps réels. L'acquisition des données s'obtient par le biais de la plate-forme MATLAB, tous simplement par la programmation, sans utiliser la boîte d'outils ou la plate-forme Simulink, ce qui rendrait ainsi l'utilisation plus facile et constituerait un moyen moins coûteux d'acquérir des données en temps réel. En revanche, l'automatisation est obtenue à l'aide d'une carte Arduino UNO et de la plate-forme MATLAB, en reliant le LM35 (capteur de température) à l'Arduino.

Le capteur de température LM35 est sélectionné pour ce projet, plutôt que d'utiliser une thermistance, car grâce au LM35, nous pouvons mesurer la température plus précisément. Le circuit pour cette partie est très simple et est illustré dans la figure 3.5. Ce capteur est assez facile à utiliser. Pour le raccorder, nous prenons la broche V_{cc} du capteur LM35 et l'attachons à la broche Arduino 5 V. Nous prenons la broche GND du capteur LM35 et nous la connectons à Arduino GND. La broche V_{out} sur le capteur que nous prenons est connectée à la broche A_0 de l'arduino, voir la figure 3.5.

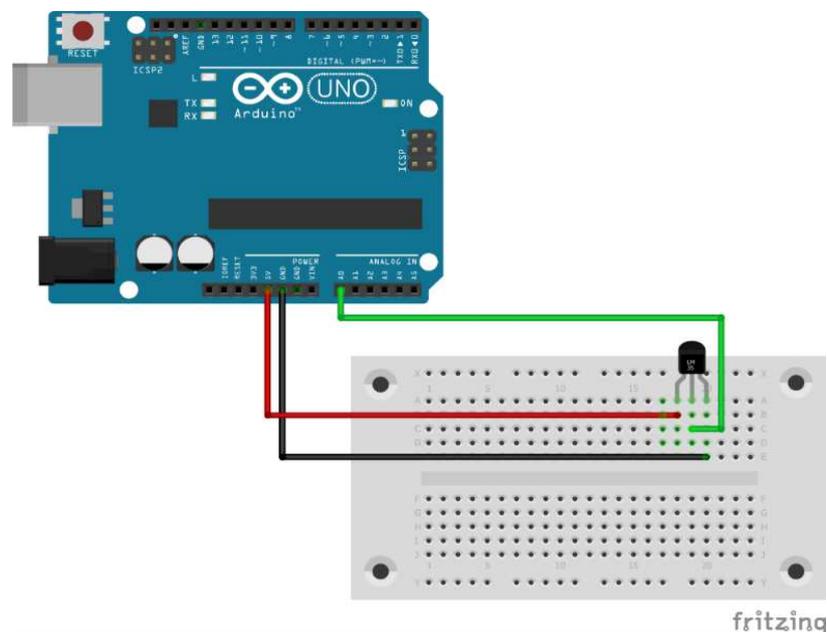


Figure 3.5. Connexion Arduino UNO et LM35.

Dans cette recherche, un graphique en temps réel du capteur de température a été obtenu, comme illustré à la figure 3.6. Sur le graphique, la température mesurée est tracée en bleu et la température estimée à l'aide du filtre de Kalman est tracée en rouge. La température est prise sur l'axe des ordonnées et son unité est le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$). D'après les résultats obtenus sur la figure 3.6, nous avons constaté que l'utilisation du filtre de Kalman pour estimer la température mesurée nous a bien fourni des valeurs plus stables en terme d'estimation, et en plus de ça, les valeurs estimées sont plus proches aux valeurs

réelles. À titre d'exemple, la valeur moyenne mesurée de la température est égale à 22.8667 °C, tandis que la valeur moyenne estimée de la température est égale à 22.8720 °C. Sur la base des résultats obtenus du test, il a été constaté que l'algorithme FK réduit le bruit de mesure et donne des meilleures performances en fonction de la valeur de la covariance du bruit du processus (voir la partie de l'algorithme) qu'a été sélectionné à 10^{-9} . En conclusion, l'erreur moyenne estimée de la température est égal à 0.0053 °C.

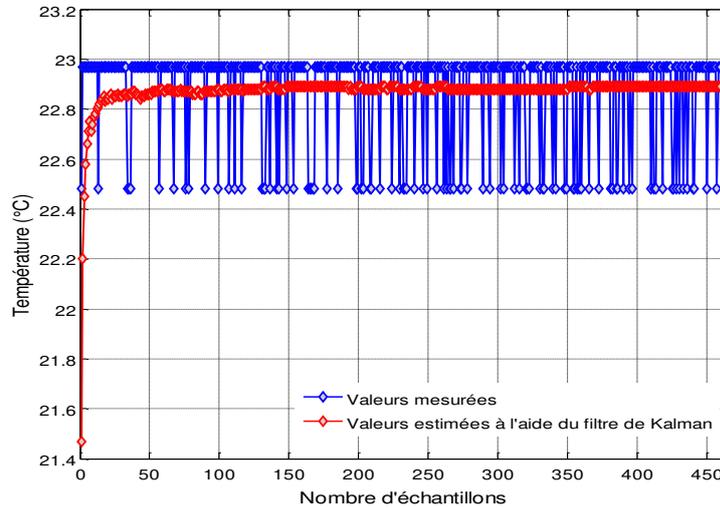


Figure 3.6. Valeurs de température mesurées et estimées.

D'après l'estimation de la température de la chambre dans laquelle nous espérons implémenter notre prototype pour détecter les obstacles et mesurer leurs distances, nous pouvons prédire la vitesse du son dans cette chambre en utilisant la méthode d'interpolation linéaire. Les valeurs prédictives seront calculées sur la base du tableau 1.2.

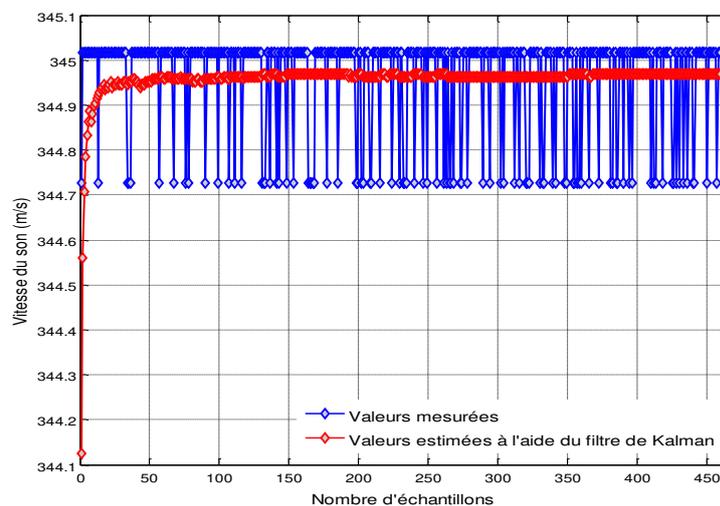


Figure 3.7. Valeurs de vitesse du son mesurées et estimées en utilisant LM35.

Cependant, la figure 3.7 illustre les résultats attendus de la vitesse du son dans la chambre de mesure. Nous avons clairement constaté que les valeurs de la vitesse du son prennent le même parcours par rapport aux résultats de la température mesurés précédemment, parce que théoriquement et pratiquement la vitesse du son est relativement liée à la température de l'environnement où les ondes ultrasons sont présentes. À titre d'exemple, la valeur moyenne mesurée de la vitesse du son est égale à

344.9557 m/s, tandis que la valeur moyenne estimée de la vitesse du son est égale à 344.9589 m/s. En conclusion, l'erreur moyenne estimée de la vitesse du son est égale à 0.0032 m/s.

3.3.2 Mesurer la vitesse du son à l'aide d'un capteur à l'ultrason

Après la prédiction de la vitesse du son dans un environnement bien spécifique à l'aide du capteur LM35 dans le premier scénario (voir la figure 3.5), nous allons mesurer, dans le deuxième scénario, la vitesse du son en utilisant un capteur à ultrasons, à savoir le capteur HC-SR04. Ce capteur mesure le temps qu'il faut à un ping d'un ultrason pour sortir, rebondir sur une cible et revenir. Le temps que prend le ping pour revenir au capteur dépend de la vitesse du son et de la distance qui le sépare de la cible. En outre, ce capteur fonctionne de la même manière qu'une chauve-souris qui utilise des tons aigus pour naviguer dans l'obscurité. C'est également le même principe utilisé dans le sonar sous-marin. Le circuit pour cette partie est très simple et est représenté dans la figure 3.8 ci-dessous.

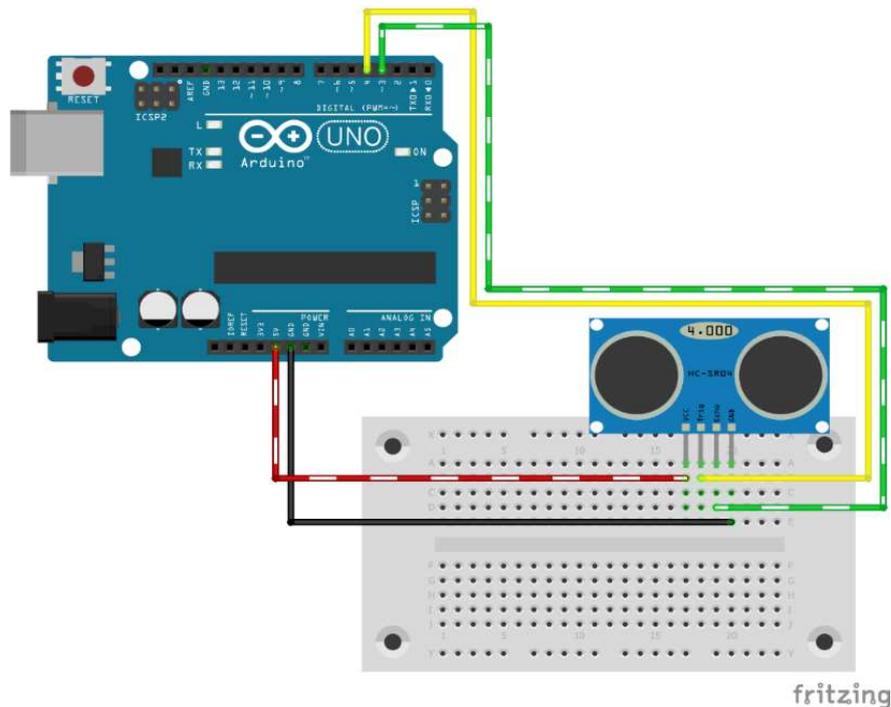


Figure 3.8. Connexion Arduino UNO et HC-SR04.

Cependant, ce capteur est assez facile à utiliser. Pour le raccorder, nous prenons la broche V_{cc} du capteur et l'attachons à la broche Arduino 5 V. Nous prenons la broche GND du capteur et nous la connectons à Arduino GND. La broche Trig sur le capteur que nous prenons est connectée à la broche 4 de l'Arduino et la broche Echo du capteur que nous connectons à la broche 3 de l'Arduino (voir la figure 3.8).

Le capteur fonctionne comme suit. Vous prenez la broche de déclenchement en bas avec une écriture numérique. Vous avez ensuite une pause, prenez la broche de déclenchement en haut, faites une pause, puis relâchez la broche de déclenchement en bas. Cette séquence bas-haut-bas crée une tonalité ultrasonore de haut niveau, ou ping, envoyée par le capteur. Ce ping va rebondir sur la première chose devant lui et rebondir sur le capteur. Le capteur émettra une impulsion haute sur sa broche d'écho et sa durée, en microsecondes, indique le temps qu'il a fallu au ping pour se rendre à la cible et revenir. Nous pouvons mesurer la durée de cette impulsion à l'aide de la commande `pulseIn` [37].

Une fois que vous avez effectué la mesure de la durée de l'impulsion et que vous savez combien du temps, il a fallu au ping pour se rendre à la cible et revenir, vous pouvez l'utiliser pour calculer la vitesse du son via l'équation (3.7) ci-dessous.

$$\text{distance} = \text{vitesse du son} * \text{temps} \quad (3.7)$$

La distance est la distance parcourue par le ping, le temps est le temps qu'il a fallu au ping pour se rendre à la cible et revenir. Avec cela, nous pouvons réorganiser l'équation à résoudre, ce qui serait la vitesse du son :

$$\text{vitesse du son} = \text{distance} / \text{temps} \quad (3.8)$$

La figure 3.9 montre le diagramme proposé dont nous avons utilisé pour mesurer la vitesse du son qui nous a permis de détecter un obstacle à 15 cm dans la même chambre où nous avons mesuré et estimé la température. En outre, nous nous appuyons toujours sur les deux plate-formes, à savoir : Arduino et Matlab.

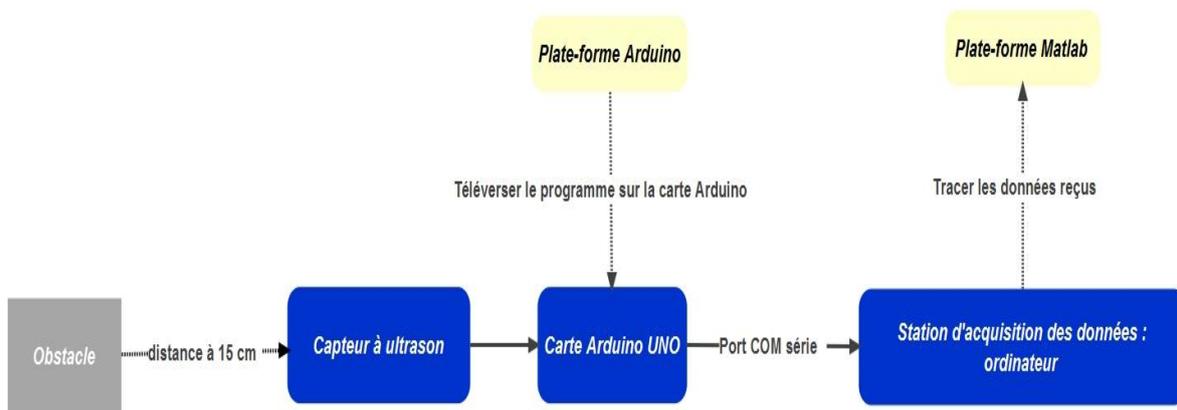


Figure 3.9. Diagramme d'acquisition des données de la vitesse du son via un capteur.

Dans ce scénario, le test a été effectué pour étudier les performances de mesure et d'estimation dans des conditions d'état stables. Le test a été effectué en plaçant le capteur devant un objet plat à une distance de 15 cm. Les résultats du test sont illustrés à la figure 3.10.

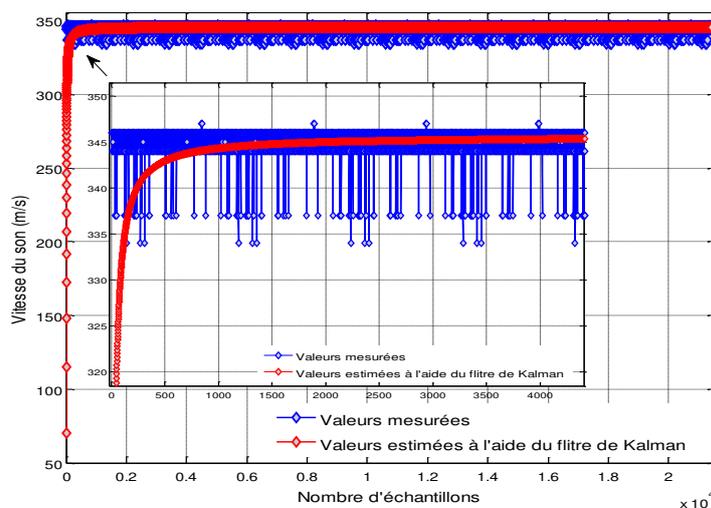


Figure 3.10. Valeurs de vitesse du son mesurées et estimées en utilisant HC-SR04.

Les valeurs mesurées de la vitesse du son en bleu et les valeurs estimées en rouge à l'aide du filtre de Kalman sont illustrées sur la figure 3.10. Comme prévues, les valeurs mesurées et estimées pour détecter un obstacle à une distance de 15 cm, sont pratiquement identiques, car le bruit de mesure a été réduit par le filtre de Kalman. De toute évidence, les valeurs estimées ont une courbe beaucoup plus lisse et une plage plus petite que les valeurs mesurées. Nous pouvons également voir clairement que le régime transitoire pour les valeurs estimées évolue rapidement vers un état stable. À titre d'exemple, la valeur moyenne mesurée de la vitesse du son est égale à 345.4064 m/s, tandis que la valeur moyenne estimée de la vitesse du son est égale à 345.1625 m/s. Sur la base des résultats du test obtenus, il a été constaté que l'application de l'algorithme FK avec le capteur ultrason permet aussi de réduire le bruit de mesure et donne des meilleures performances en fonction de la même valeur de la covariance du bruit du processus qui a été fixée à $Q = 1e-9$. En conclusion, l'erreur moyenne estimée de la vitesse du son est égale à 0.2439 m/s.

Comme conclusion finale des deux scénarios 1 et 2 concernant la mesure de la vitesse du son dans l'air, nous avons constaté que nous pouvons utiliser un capteur de température avec un capteur ultrason afin de détecter et mesurer la distance des obstacles dans un environnement encombré, et cela, d'après les résultats comparatifs qui ont été présentés dans les figures 3.7 et 3.10. Dans le scénario qui suit, nous avons utilisé un système hybride en utilisant les deux capteurs LM35 et HC-SR04 en même temps.

3.3.3 Estimer la distance d'une cible dans un système hybride

Cette partie portée sur l'étalonnage automatique d'un système hybride afin de réagir avec l'influence de la température (voir la figure 3.11) pour estimer des distances par rapport à une cible sans utiliser une vitesse du son fixe. La vitesse du son sera calculée et ajustée en fonction du capteur LM35.

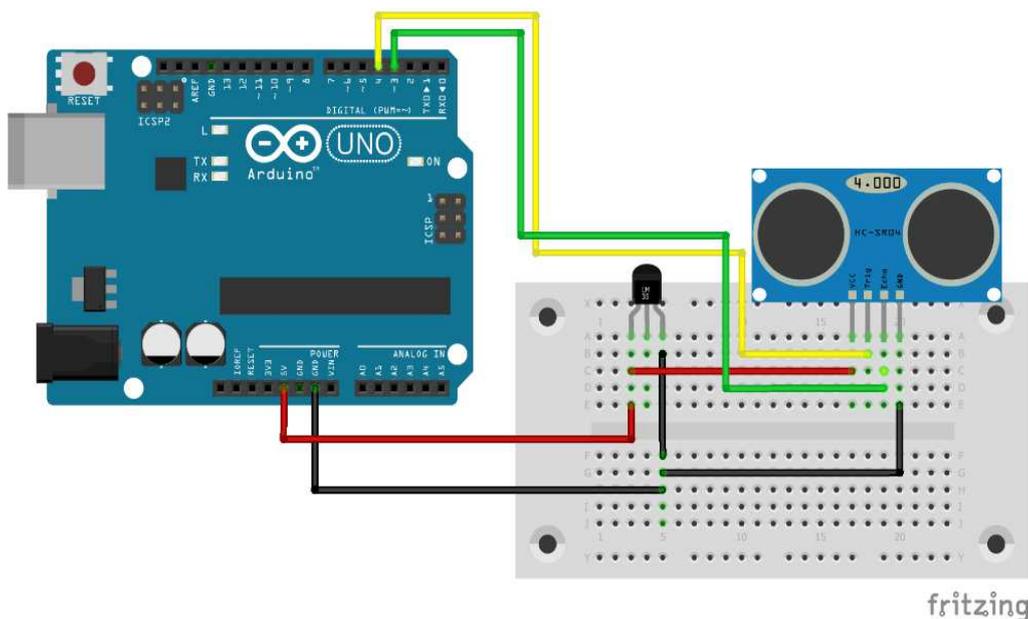


Figure 3.11. Système hybride proposé. Le schéma a été fait avec le logiciel Fritzing.

En outre, la figure 3.12 illustre le diagramme proposé dont nous avons utilisé pour estimer la distance d'une cible à 5 cm dans la même chambre où nous avons mesuré et estimé la température ou ailleurs. De plus, nous nous appuyons toujours sur les deux plates-formes Arduino et MATLAB.

Dans ce scénario, le test a été effectué pour étudier et évaluer les performances d'un système hybride dont le but d'estimer la distance par rapport à une cible. Le test a été effectué en plaçant le capteur HC-SR04 devant un objet plat à une distance de 5 cm et le capteur LM35 est utilisé pour prédire la vitesse

du son qui sera sélectionné afin de détecter l'obstacle à 5 cm. Les résultats du test sont montrés sur la figure 3.13.

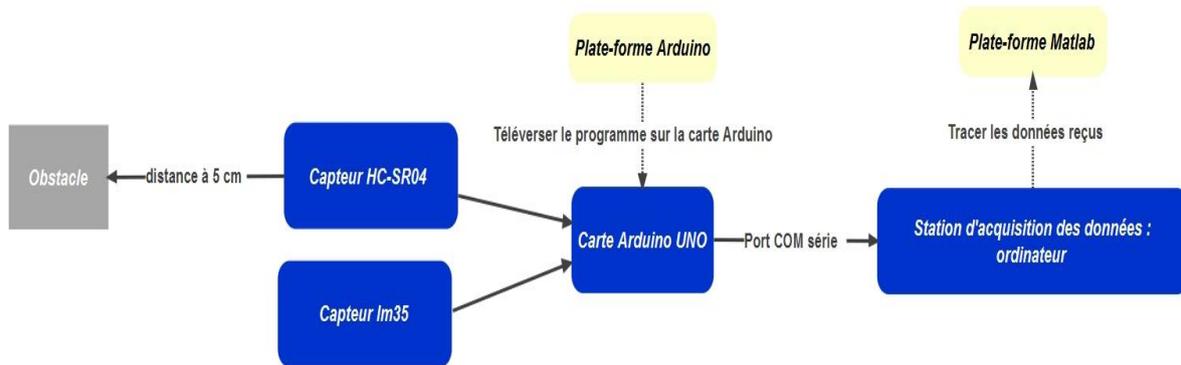


Figure 3.12. Diagramme d'acquisition des données pour un système hybride.

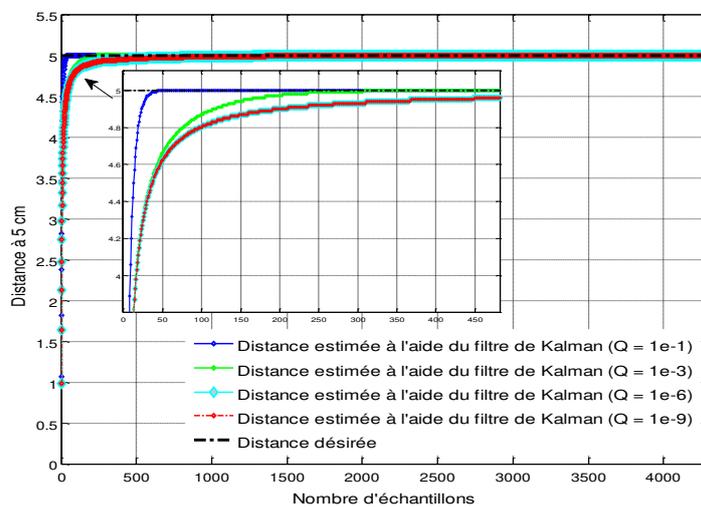


Figure 3.13. Valeurs des distances mesurées et estimées en utilisant LM35 et HC-SR04.

Dans le scénario précédent, nous avons sélectionné une valeur de la covariance du bruit du processus égale à $Q = 1e-9$. Par contre dans ce scénario, nous varions la valeur de la covariance du bruit de processus à $Q = 1e-1$, $Q = 1e-3$, $Q = 1e-6$ et $Q = 1e-9$, afin d'observer leur influence sur le temps de réponse du capteur lors du changement de distance de la cible.

À partir des résultats de test obtenus pour la distance estimée à 5 cm, il est apparu que le temps de réponse de la performance du système hybride en utilisant le filtre de Kalman était différent pour chaque valeur de la covariance du bruit du processus testé.

La covariance du bruit du processus de valeur $1e-1$ produit un temps de réponse plus rapide, 4.56 s, tandis que la covariance du bruit du processus de valeur $Q = 1e-9$ produit un temps de réponse plus lent, 423.6 s. Ainsi, nous pouvons conclure que si la valeur de la covariance du bruit du processus Q sélectionné est plus petite, le temps de réponse est plus lent et vice-versa (voir la figure 3.14). Aussi, nous avons constaté que l'erreur moyenne estimée est plus petite lorsque la valeur de la covariance de bruit du processus Q est plus grande (voir la figure 3.15). À titre d'exemple, les erreurs moyennes estimées pour chaque valeur de la covariance de bruit du processus Q sont respectivement : $5.6 \cdot 10^{-3}$ cm ($Q = 1e-1$), $1.58 \cdot 10^{-2}$ cm ($Q = 1e-3$), $3.07 \cdot 10^{-2}$ cm ($Q = 1e-6$) et $3.37 \cdot 10^{-2}$ cm ($Q = 1e-9$).

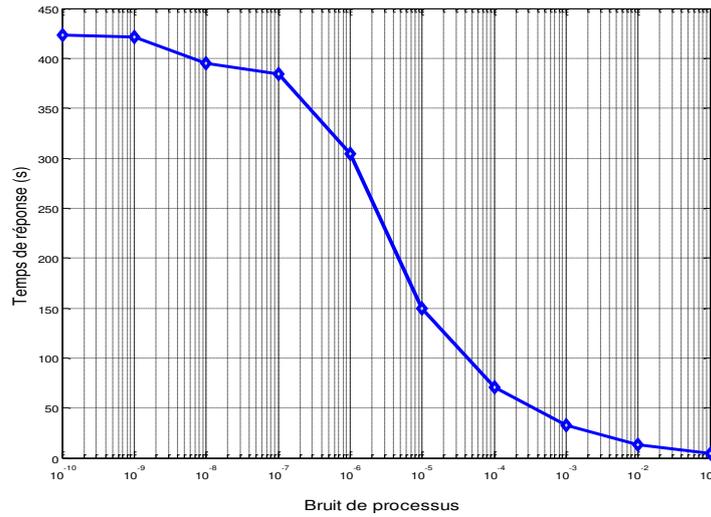


Figure 3.14. Temps de réponse vs Bruit de processus.

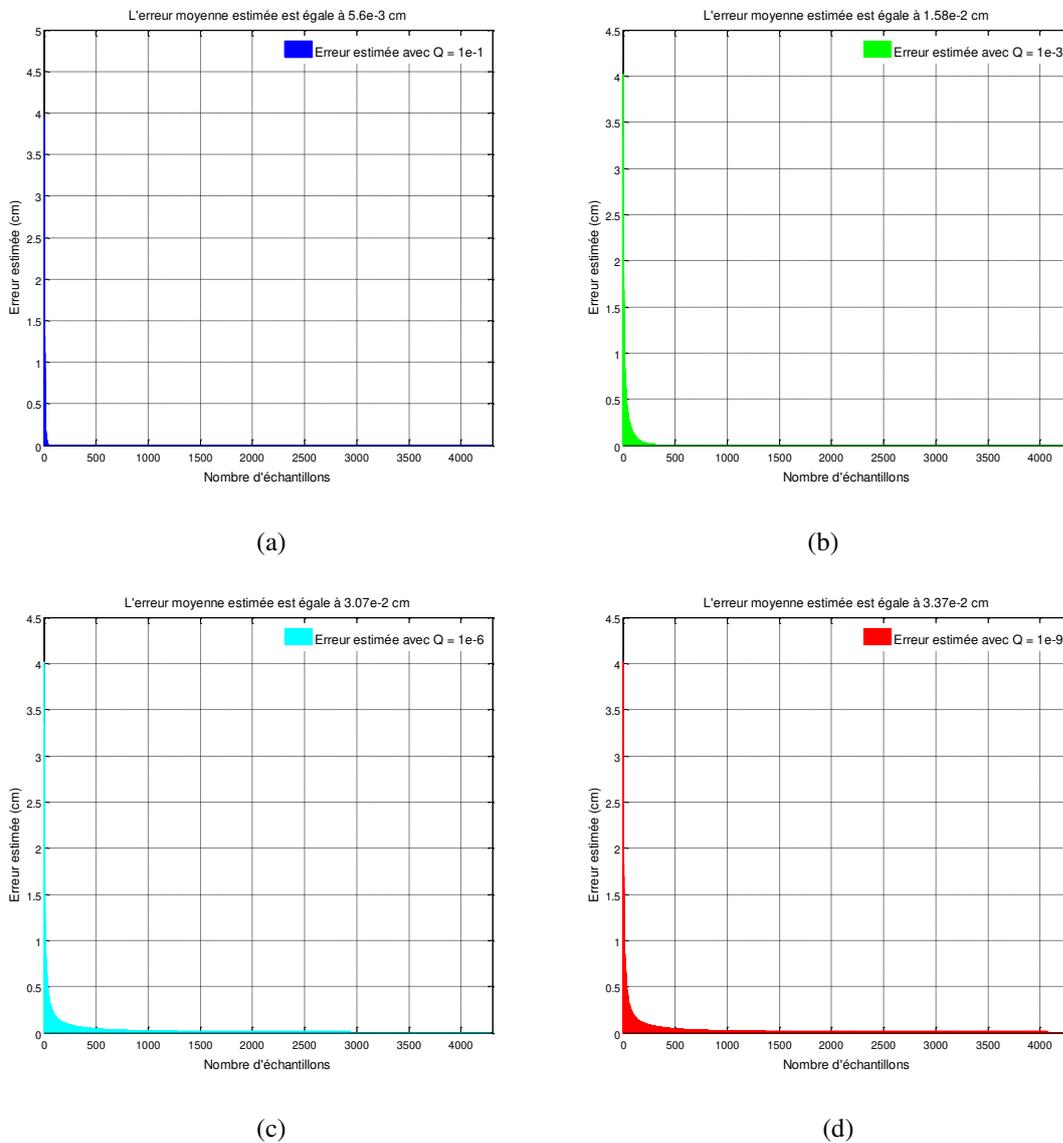


Figure 3.15. Erreur estimée de la distance :
(a) $Q = 1e-1$, (b) $Q = 1e-3$, (c) $Q = 1e-6$, et (d) $Q = 1e-9$.

Nous avons également testé la performance du système hybride avec des distances variables, à savoir 5 cm, 6 cm et 7 cm sur l'axe X, pour une valeur de la covariance de bruit du processus $Q = 1e-1$ (voir la figure 3.16).

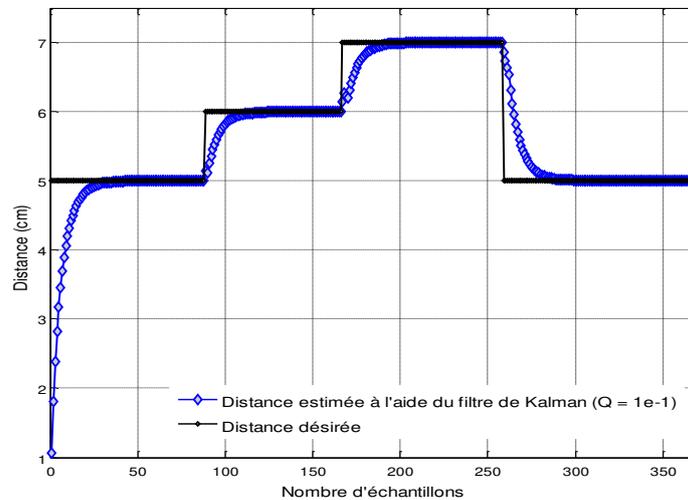


Figure 3.16. Valeurs pour # distances estimées en utilisant LM35 et HC-SR04.

3.3.4 Contrôler à distance le système hybride en utilisant l'application Blynk

Dans cette section, nous allons récapituler les résultats finaux de notre projet sur une application libre appelée Blynk. Dans la première partie, nous allons donner un aperçu sur Blynk, et en deuxième partie, nous allons afficher les résultats obtenus sur une application mobile en utilisant la plateforme Blynk.

a. Blynk

Cette partie vous aidera pour comprendre comment commencer à utiliser Blynk et vous récapitulera un aperçu compréhensible de toutes ses fonctionnalités.

Comment fonctionne Blynk ?

Blynk est conçu pour l'Internet des Objets. Il peut contrôler n'importe quel hardware à distance, il peut également afficher et stocker des données d'un capteur. La plateforme Blynk comporte trois éléments clé, à savoir :

1. **Application Blynk** permet de créer des interfaces pour vos projets en utilisant différents widgets.
2. **Serveur Blynk** est le responsable de toutes les communications entre le smartphone et le hardware. Vous pouvez utiliser le Cloud Blynk ou faire tourner le serveur privé Blynk localement. C'est open-source, ça peut facilement gérer des milliers de périphériques et peut même être démarré sur une carte Arduino. Dans notre cas, nous utilisons le Cloud Blynk pour acquérir les données. En outre,
3. **Bibliothèque Blynk** est disponible pour toutes les plateformes hardware existantes, elle active aussi la communication avec le serveur et peut traiter toutes les commandes entrantes et sortantes.

Blynk travaille via Internet. La seule et unique exigence est donc que votre matériel puisse communiquer avec Internet, voir l'architecture Blynk sur la figure 3.17. Certaines cartes, comme l'Arduino Uno, ont besoin d'un Shield Ethernet ou Wi-Fi pour communiquer, tandis que d'autres sont

déjà capables de communiquer avec Internet, comme NodeMCU/ESP8266, le Raspberry Pi avec le d'onglet Wi-Fi, le Particle Photon ou le SparkFun Blynk Boarf. Cependant, même si vous n'avez pas de Shield, vous pouvez le connecter à travers le port USB de votre ordinateur. Ce qui est intéressant, c'est que la liste des hardwares qui fonctionnent avec Blynk est immense et continue de grandir. En outre, l'application Blynk est une bâtisseuse d'interface bien conçue. Elle marche à la fois sur iOS et Android. De plus, la connexion au Cloud Blynk est via : l'Ethernet, le WiFi, le BLE et l'USB (Serial)... [38,39].

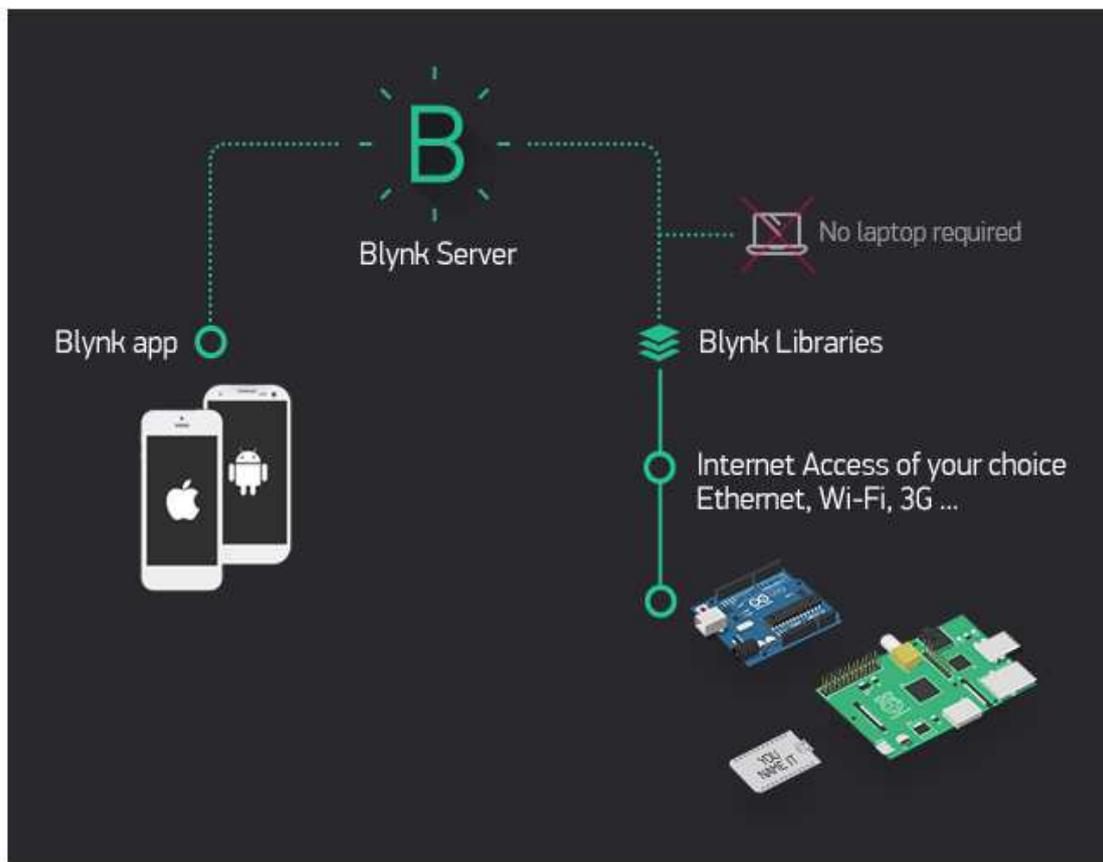


Figure 3.17. Architecture Blynk [37,38].

b. Résultats obtenus via l'application Blynk

Dans cette partie, nous allons décrire les étapes que nous avons prises pour accomplir notre système hybride sur une application mobile en utilisant Blynk. Le guide de démarrage de l'Application Blynk est comme suit :

Créer un compte Blynk :

Une fois, l'application Blynk est téléchargée et installée sur votre mobile, vous aurez besoin de créer un nouveau compte Blynk (voir la figure 3.18 (a)). Ce compte est séparé des comptes utilisés pour les Forums Blynk, au cas où vous en avez déjà un. De plus, un compte est nécessaire afin de sauvegarder vos projets et y avoir accès à partir de plusieurs périphériques et de n'importe où. C'est aussi une mesure de sécurité.

Nous recommandons d'utiliser une réelle adresse e-mail (voir la figure 3.18 (b)) parce que cela vous simplifiera les choses plus tard.

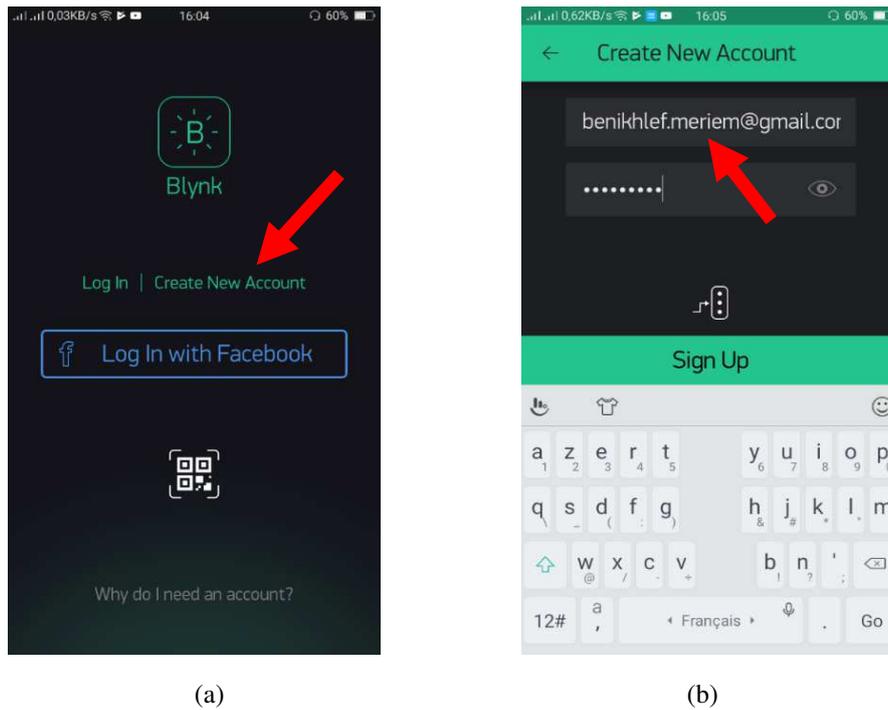


Figure 3.18. Créer un compte Blynk.

Créer un nouveau projet :

Après vous être correctement identifié avec votre compte, vous pouvez maintenant créer votre nouveau projet (voir la figure 3.19). Ensuite, donnez à votre projet un nom « DeObvia Blynk » (voir la figure 3.20 (a)). Après cela, sélectionnez le modèle de hardware que vous voulez utiliser. Dans notre cas, nous utilisons Arduino UNO (voir la figure 3.20 (b)). En outre, l'USB (serial) est utilisé comme périphérique de connexion (voir la figure 20 (c)).

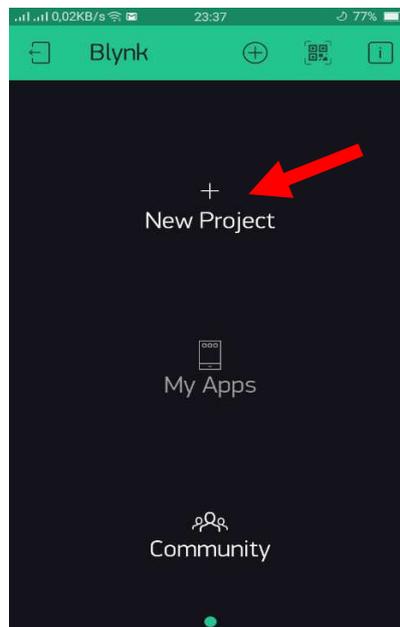


Figure 3.19. Créer un nouveau projet.

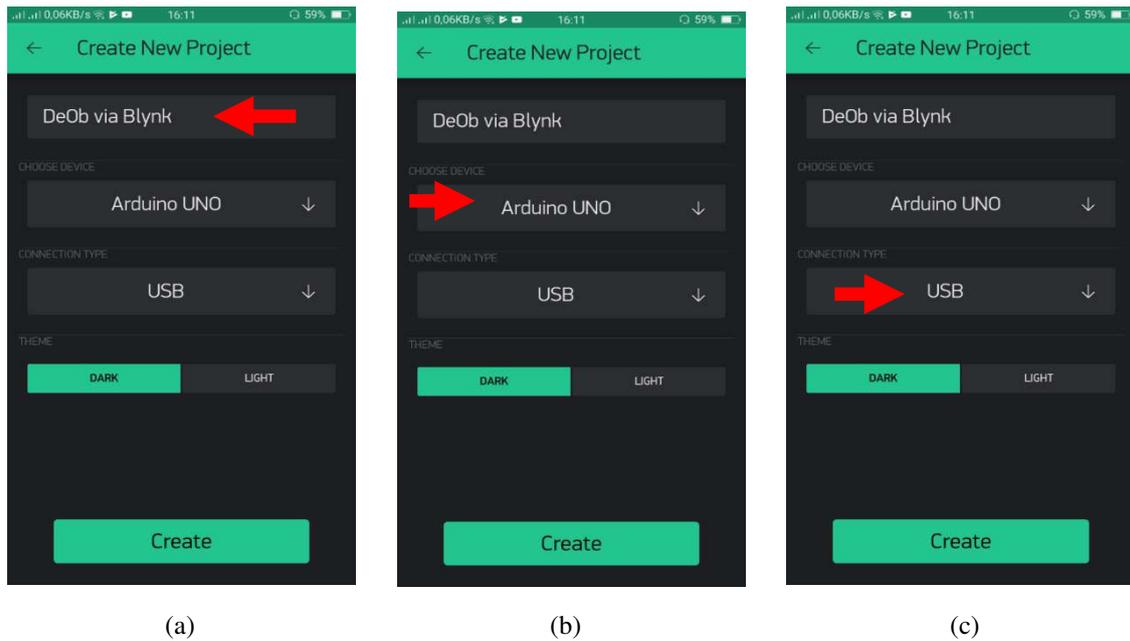


Figure 3.20. Nom, modèle de hardware, et périphérique de connexion du projet.

Jeton d'Authentification :

Le Jeton d'Authentification est un identifiant unique nécessaire pour connecter votre hardware à votre mobile. Chaque nouveau projet que vous créez a son propre Jeton d'Authentification. Vous obtiendrez un Jeton d'Authentification automatiquement sur votre e-mail après la création d'un projet (voir la figure 3.21 (a) et la figure 3.21 (b)).

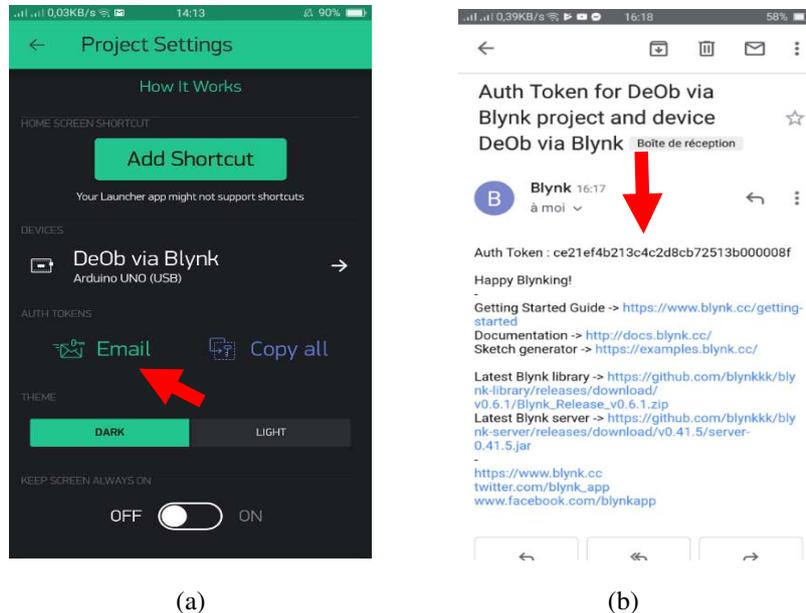


Figure 3.21. Jeton d'Authentification via e-mail.

Il est conseillé de ne pas partager votre Jeton d'Authentification avec quiconque, à moins que vous ne souhaitiez que quelqu'un puisse avoir accès à votre hardware.

C'est vraiment pratique de l'envoyer via l'e-mail. Pressez le bouton e-mail et le jeton vous sera envoyé à l'adresse e-mail utilisée lors de l'inscription. Vous pouvez aussi appuyer sur la ligne du Jeton et il sera copié vers le presse-papier.

Après avoir sélectionné le type de périphérique et de recevoir le Jeton d'Authentification, vous pouvez maintenant cliquer sur le bouton "Create" (voir la figure 3.22 ci-dessous).

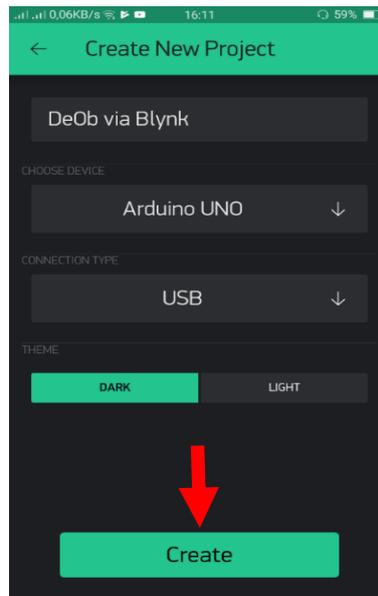
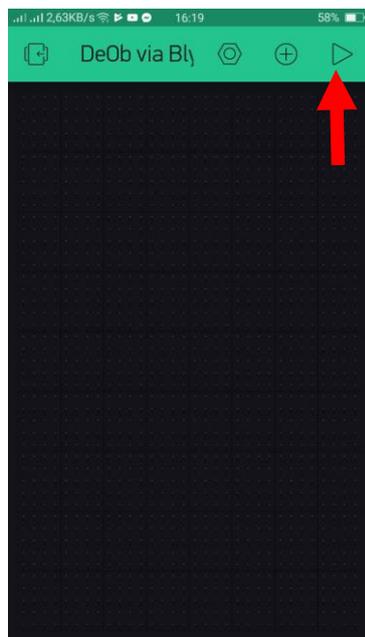


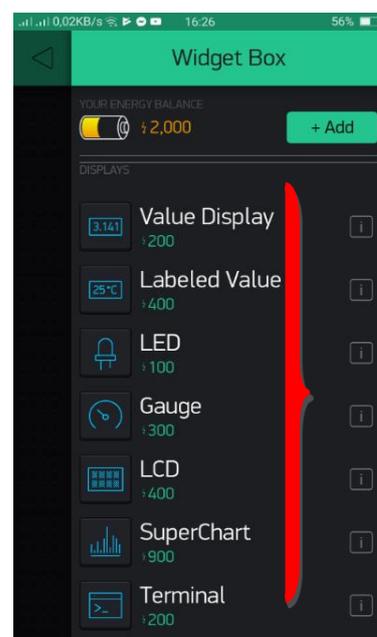
Figure 3.22. Cliquez sur le bouton "Create".

Ajouter un Widget :

Au début, votre grille de projet est vide (voir la figure 3.23 (a)). Pour ajouter les widgets disponibles, vous pouvez ouvrir la liste des Widgets (voir la figure 3.23 (b)). Dans cette étape, nous montrons les Widgets utilisées dans notre projet (voir la figure 3.24). Ici, nous voulons interagir sur des pins de l'Arduino UNO afin de recevoir les données. Pour cela, cliquez sur le petit « + » encadré (figure 3.23 (a)), cela vous donnera accès à une multitude de widgets (figure 3.23 (b)). Nous choisirons dans notre cas, cinq widgets (voir la figure 3.25).



(a)



(b)

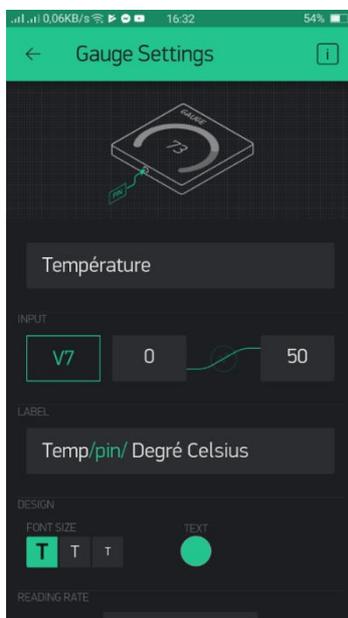
Figure 3.23. Grille du projet et liste des widgets.

Glisser-Déposer : tapotez et gardez chaque Widget pour le déposer vers sa nouvelle position. Nous allons également le configurer : cliquez dessus (voir la figure 3.24).



Figure 3.24. Widgets utilisées.

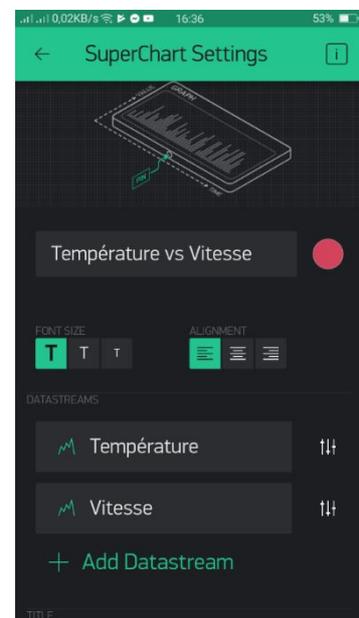
Paramètre du Widget : chaque Widget a ses propres paramètres. Tapez sur le widget pour y accéder. Donnez-lui le nom que vous voulez (ici : cinq noms sont mentionnés) avec une couleur associée. Ensuite, il nous faut choisir le pin sur lequel l'application va interagir (ici : cinq pins sont exploités, à savoir : V5, V6, V7 et V8). (voir les deux figures 3.25).



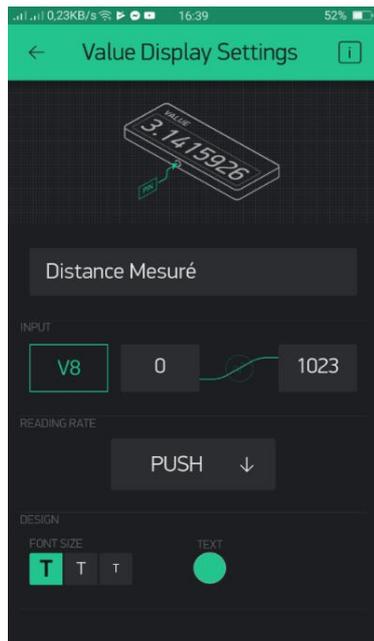
(a)



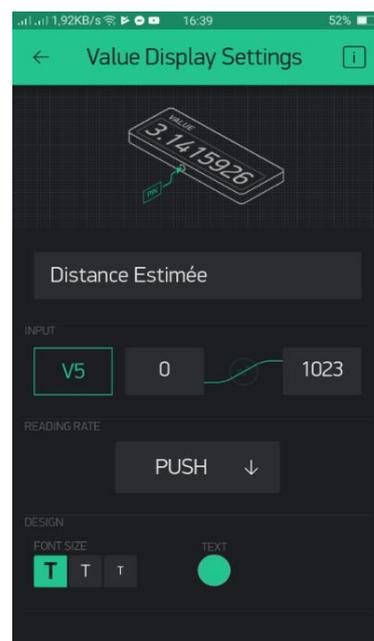
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3.25. Paramètre des Widgets.

Test :

Allez dans votre application Blynk et démarrez votre projet « DeOb via Blynk » en appuyant sur le bouton start (représenté par une flèche, voir la figure 3.26) en haut à droite. Un indice s'affichera en haut, dans le cas où votre Arduino n'est pas connecté à un réseau (voir la figure 3.26).



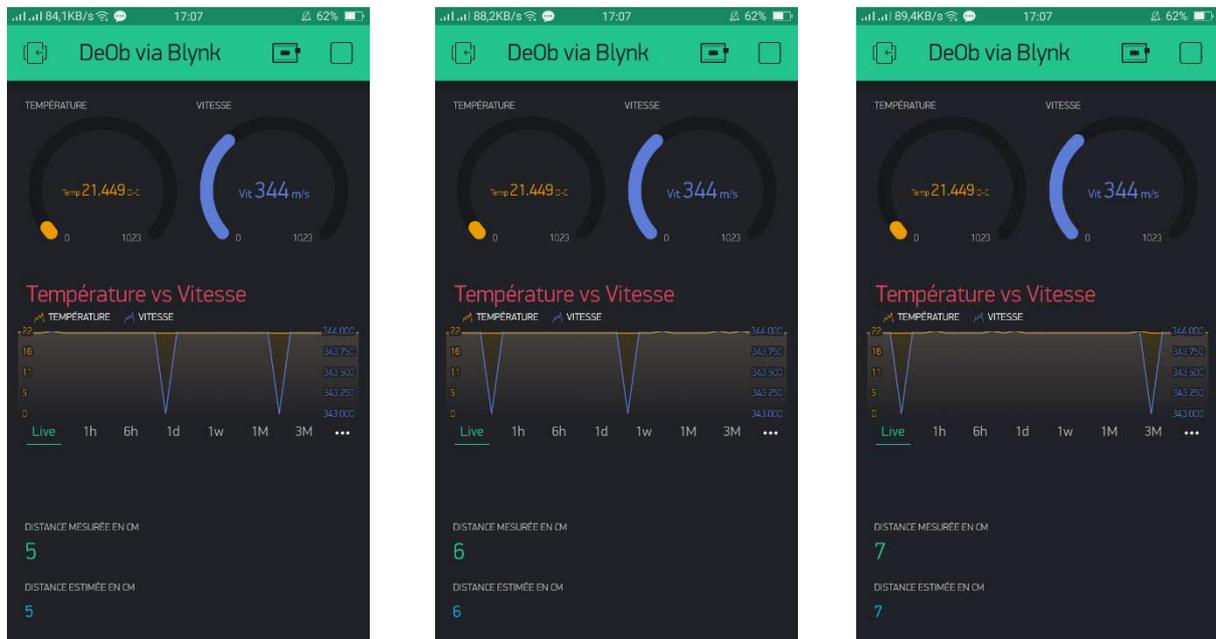
(a)



(b)

Figure 3.26. Application Blynk finale.

Après avoir terminé notre application mobile avec la plate-forme Blynk, nous passons maintenant à l'exécution de l'application afin d'acquérir les données. La figure 3.27 montre les résultats obtenus pour détecter un obstacle à 5 cm, 6 cm et 7 cm respectivement.



(a) à 5 cm

(b) à 6 cm

(c) à 7 cm

Figure 3.27. Résultats finals.

3.4 Conclusion

Ce projet vise à utiliser le capteur à ultrasons HC-SR04 et le capteur de température LM35 en les connectant à la carte Arduino UNO et à transmettre le signal du capteur HC-SR04 à l'ordinateur via un port série pour mesurer la présence d'obstacle devant le capteur et déterminer la distance à laquelle l'obstacle est détecté par le capteur. Nous avons mis en œuvre ce projet avec succès et les résultats sont obtenus comme souhaité.

Conclusion générale

Ce mémoire constitue une contribution concrète aux applications de la détection des obstacles à l'aide des ondes ultrasonores.

Un système hybride intelligent (DéOb) a été mis en place afin de mesurer la distance des obstacles détectés, dans des conditions environnementales défavorables, où l'effet de la température est pris en compte lors de la détection. Nous avons utilisé la méthode d'interpolation linéaire entre la température et la vitesse du son. L'ensemble du système DéOb était composé d'une carte Arduino UNO, d'un capteur à ultrasons HC-SR04 et d'un capteur de température LM35 ; chacun d'entre eux a été discuté dans les chapitres de ce travail. Les capteurs sont également influencés par un bruit de mesure, par conséquent, ce type de bruit peut provoquer des effets indésirables lors de la mesure des données. De ce fait, le système DéOb a été équipé par un filtre de manière à stabiliser les mesures, afin d'améliorer les performances du système DéOb proposé. Dans ce travail, nous avons utilisé le filtre du Kalman.

Les simulations de ce projet nous ont bien amené aux conclusions suivantes :

- la prédiction de la vitesse du son à l'aide du capteur LM35 nous a bien fourni des résultats raisonnables, pour mesurer une distance désirée et cela, après l'utilisation de la méthode d'interpolation linéaire.
- le filtre du Kalman peut stabiliser les distances mesurées, et cela après la réduction du bruit de la mesure.
- après l'utilisation de l'estimateur du filtre du Kalman, la réponse d'estimation de distance est acceptable, à titre d'exemple, avec une covariance du bruit du processus de $1e-1$, le temps de réponse est de 4.56 s.

Pour un travail de futur et comme perspectives, nous viserons à améliorer le temps de réponse en estimant la distance mesurée avec d'autres techniques d'estimation.

Références Bibliographiques

- [1] P. Goy, " Détection D'obstacles Et De Cibles De Collision Par Un Radar FMCW Aéroporté ", Thèse de doctorat à l'université de Toulouse, 2012.
- [2] http://encyclopedie_universelle.fracademic.com/17460/RADAR.
- [3] P. Lacomme, J.-C. Marchais, J.-P. Hardange, and E. Normant, " Air and Spaceborne Radar Systems : An Introduction ", William Andrew Scitech Publishing, Norwich, NY, 2001.
- [4] <http://www.madeinacoustic.com/fr/introduction>.
- [5] <http://www.cochlea.eu/son>.
- [6] T. Dufour, " Les ondes sonores ", Cours d'ondes et milieux biologiques, Sorbonne Université de Paris, France.
- [7] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-onde-sonore-15526/>.
- [8] <http://roger.barbara.free.fr/page032.html>
- [9] Dale Ensminger, Leonard J. Bond, " Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications ", 3ème edition, 2012, CRC Press.
- [10] Jang, Moon G. Joo, Won Chang Lee, Dong Won Jung, Zhong Soo Lim " Identification and distance detection for ultrasonic sensors by a correlation method ", Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [11] " ultrasons et sonochemie ", n°68. SINAPTEC. <http://www.sinaptec.fr> Mai 2002.
- [12] USR, chapitre 3 : " imagerie par les ondes ultrasonores (échographie) ", Madame Ferroui Amel, pp (3-4, 6, 7, 8, 5), 8/11 /2015.
- [13] MOREL Marie-France, " Iconographie des embryons et des fœtus dans les traités d'accouchement et d'anatomie du XVIeme au XVIIIeme siècle ", Histoire des Sciences Médicale, tome XLIII, N°1, 2009, p 15 à 24.
- [14] Brown B et Goodman J.E., " Ultrasons de haute intensité ", Applications Industrielles, Ed Dunod, Paris 1971.
- [15] Ristic V., " Principles of Acoustic Devices ". John Wiley&Sons, New York 1983.
- [16] Syrota A., " Bases physiques de l'imagerie ultrasonore ", N° Paris Onze édition H37, 1994.
- [17] Banks B, Gordon E et Rawding H, " La détection ultrasonique des défauts dans les matériaux ", Paris 1966.
- [18] Aditi Jain, Aishwarya Thakrani, Kushagri Mukhija, Neha Anand, and Deepak Sharma, " Arduino Based Ultrasonic Radar System using Matlab ", India, Volume 5 Issue IV, April 2017.
- [19] <http://tpe-ondesonore.e-monsite.com>.
- [20] Mohammedi Yahya, " étude préliminaire d'implémentation d'un capteur ultrason sur chariot élévateur pour la détection des obstacles ", mémoire, Trois-Rivières, Université du Québec. 2008.
- [21] Frédéric Bouquet et Julien Bobroff, " Microcontrôleur ARDUINO ", 2015.
- [22] John Nussey, "ARDUINO pour les nuls " , 2ème édition-,2017.
- [23] http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php.
- [24] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3//© 2019 arduino>.
- [25] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
- [26] http://www.electronique-3d.fr/Le_capteur_de_temperature_LM35.html.
- [27] Lucien Bachelard, " HC-SR04 - Module de détection aux ultrasons -Utilisation avec Picaxe ", 2015.
- [28] <https://www.gotronic.fr/art-module-de-detection-us-hc-sr04-20912.htm/© 2012-2015>.
- [29] <http://andyautuori.fr/realisations/utilisation-du-capteur-a-ultrason-hc-sr04-avec-larduino/>

- [30] <https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-distance-avec-un-capteur-ultrason-hc-sr04-et-une-carte-arduino-genuino/>© TamiaLab 2016
- [31] https://wiki.mdl29.net/lib/exe/fetch.php?media=elec:arduino_dossier_ressource.pdf
- [32] Nouali Ibrahim Yassine, " Conception et réalisation d'un prototype lot pour la surveillance à distance d'un lieu via une application Web ", Université de Tlemcen, 2017.
- [33] Hamid HAMOUCHE. " Conception et réalisation d'une centrale embarquée de la domotique Smart Home ". mémoire de master en génie électrique, Université Mohammed V École Normale Supérieure d'Enseignement Technique – Rabat.06/07/2015.
- [34] S.Harkat, " Application du Filtre de Kalman sur la variabilité pluviométrique dans le bassin versant de Chellif ", Algerie, Université de Chlef,2016,188.pp.
- [35] Kalman R. E., " A New Approach to linear Filtering and Prediction Problems ", 1960.
- [36] Adnan Rafi Al Tahtawi, « Kalman Filter Algorithm Design for HC-SR04 Ultrasonic Sensor Data Acquisition System », IJITEE, Vol. 2, No. 1, March 2018.
- [37] <https://www.memorandum.ovh>
- [38] <https://booteille.github.io/blynk-docs-fr/>© 2019 Blynk Inc. All rights reserved.
- [39] <https://letmeknow.fr/blog/tag/blynk/>

Résumé

Dans ce projet, une étude empirique sur les mesures de distance pour un obstacle à détecter existe dans une chambre de mesure inter-modale à l'aide d'un système hybride en utilisant deux capteurs à la fois, à savoir : un capteur de température LM35 et un capteur à ultrasons HC-SR04, plus une carte Arduino UNO pour l'acquisition des données. Selon la théorie des ultrasons, nous avons constaté que la vitesse du son pour les ondes sonores varie en fonction de la température. De ce fait, nous avons proposé un système hybride intelligent permettant de mesurer les distances d'un obstacle à détecter sur la base de la température de l'environnement. Lors de la mesure de distance, le bruit de mesure des capteurs se présente et peut avoir un impact sur la dégradation des performances du système proposé. Pour résoudre ce problème, le filtre du Kalman est proposé, et est mis en œuvre pour améliorer la stabilité de la mesure de distance. Les résultats du test obtenus montrent l'efficacité de l'algorithme FK dans la réduction du bruit de mesure des capteurs.

En outre, l'analyse a été exécutée sous l'environnement Arduino IDE et le logiciel Matlab. À la fin de cette étude, nous avons développé une application pour notre projet sur un smartphone via la plate-forme Blynk.

Mots clés : Capteur LM35, Capteur HC-SR04, Arduino UNO, Filtre du Kalman, Blynk.

Abstract

In this project, an empirical study on the distance measurements for an obstacle to be detected exists in an inter-modal measurement chamber using a hybrid system combined two sensors at a time, namely: an LM35 temperature sensor and an HC-SR04 ultrasonic sensor. However, the two sensors are connected with an Arduino UNO board for data acquisition. According to the ultrasound theory, we have found that the speed of sound for the sound waves varies versus the temperature. As a result, we have proposed a smart hybrid system based on the environment temperature, in order to measure the distances of an obstacle to be detected. During the distance measurement, the measurement noise is produced by the sensors and may have an impact on the performance degradation of the proposed system. To overcome this problem, the Kalman filter is proposed and is also implemented to improve the stability of the distance measurement. The test results obtained illustrate the effectiveness of the FK algorithm for reducing the measurement noise of the sensors.

In addition, the analysis of this study was performed under the Arduino IDE environment and the Matlab software. In the end, we developed an application for our project on a smartphone via the Blynk platform.

Key-words : LM35 sensor, HC-SR04 sensor, Arduino UNO, Kalman filter, Blynk.

ملخص

في هذا المشروع، توجد دراسة تجريبية حول قياس مسافات لحاجز يجب اكتشافه في غرفة قياس بين الوسائط باستخدام نظام هجين يجمع بمستشعرين في وقت واحد، وهما: مستشعر درجة حرارة ومستشعر بالموجات فوق الصوت. ومع ذلك، يرتبط المستشعران بلوحة الكترونية نوع الأردوينو للحصول على البيانات. وفقاً لنظرية الموجات فوق الصوتية، وجدنا أن سرعة الصوت لموجات فوق الصوتية تختلف وفقاً لدرجة الحرارة البيئية. نتيجة لذلك، اقترحنا نظاماً هجيناً يعتمد على درجة حرارة البيئة من أجل قياس مسافات حاجز المراد اكتشافه. أثناء قياس المسافة، قد ينتج ضوضاء القياس بواسطة أجهزة الاستشعار وقد يكون لها تأثير على أداء النظام المقترح. للتغلب على هذه المشكلة، لقد تم اقتراح مرشح كالمان، ولقد تم تنفيذه أيضاً لتحسين استقرار قياس المسافة. توضح نتائج الاختبار التي تم الحصول عليها فعالية خوارزمية مرشح كالمان لتقليل ضوضاء القياس في أجهزة الاستشعار. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء تحليل هذه الدراسة تحت بيئة الأردوينو (ادي) وبرنامج الماتلاب. في النهاية، قمنا بتطوير تطبيق لمشروعنا على الهاتف الذكي عبر منصة بليנק.

الكلمات المفتاحية: مستشعر درجة حرارة، مستشعر بالموجات فوق الصوت، لوحة الالكترونية الأردوينو، مرشح كالمان، تطبيق بليנק.