

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Thème :

**Études et réalisations de télémètres laser et à
ultrasons**

Encadré par :

M. MEHENNI

Réalisé par :

DERAREDJ RAMZI

Soutenu le 13 juin 2015 devant le jury

B. BOUSSEKSOU	Maitre Assistant A	ENP	Président
H. BOUSBIA-SALAH	Maitre de Conférences A	ENP	Examineur
M. MEHENNI	Professeur	ENP	Promoteur

Promotion : Juin 2015

ملخص

تتميز قرار مكانية .القياس عن بعد هو علم قياس المسافة، والباحث عن نطاق هو جهاز النشط الذي يسمح للقياس عالية دون اتصال جسدي .

سيتم تنفيذ العمل في إطار مشروع نهاية الدراسة على حد سواء النظرية والتجريبية في مجال القياس عن بعد بالموجات فوق الصوتية والقياس عن بعد ليزر .

تقنيات كثيرة اليوم تسمح هذه بمناشدة مختلف مجالات الالكترونيات .قياس المسافة عدم الاتصال هو نطاق واسع ومثير والإلكترونيات الضوئية لقياس المسافة التي تتطلب الدقة
كلمات مفتاحية: الموجات فوق الصوتي , الضوئية, القياس عن بعد, علم قياس المسافة

RESUME

La télémétrie est la science de mesure de distance et un télémètre est un dispositif actif qui permet d'effectuer ces mesures ; caractérisé par une grande résolution spatiale sans contact physique. Le travail réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études est à la fois théorique et expérimental dans le domaine de la télémétrie ultrasons et la télémétrie laser.

La mesure de distance sans contact est un champ d'application vaste et passionnant. Aujourd'hui un grand nombre de techniques permettent cela en faisant appel aux différents domaines de l'électronique et de l'optoélectronique pour les mesures de distance où la précision est requise.

Mots clés : télémétrie, science de mesure de distance, la télémétrie ultrasons, la télémétrie laser

ABSTRACT

Telemetry is the science of measurement of distances; a telemeter however is an active device that permits this measurement, characterized by a largespecial resolution without a physical contact. The work to be realized in this thesis same theoretical and experimental in the domain of ultrasonic telemetry and laser telemetry.

The measurement of a distance without a physical contact is very vast and passionate. Nowadays a large numberof technics permits this by calling for other disciplines like electronics and optoelectronics for the measurement of distances where precision is required.

Keywords: Telemetry, science of measurement of distances, ultrasonic telemetry, laser telemetry

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Ma mère, qui a fait de moi l'homme que je suis

Mon père, mon modèle dans la vie

Mon grand frère Rafik qui m'a toujours soutenu et protégé

Mon adorable petite sœur Racha

Mon seul amour Meriem Rachi Inès

*A mes meilleurs amis Rym Lahlou et Yacine abada et Sami
ben abdalakhouja*

Tous les membres de ma famille

Tous mes amis sans exception.

.DERAREDJ RAMZI.

REMERCIEMENTS

Je tiens donc en premier lieu à remercier mon encadreur *Mr M. MEHENNI*, *Professeur à l'ENP*, pour le temps et la patience qu'il m'a accordés tout au long de ce semestre. Il est un professeur très dévoué qui a répondu à mes nombreuses questions. Je garderai dans mon cœur sa pédagogie, son efficacité et sa rigueur. Pour tout ce qu'il m'a donné, qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Je remercie *Mr H. BOUSBIA-Salah* et *Mr B. BOUSSEKSOU* qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Je n'oublie pas non plus tous mes camarades de l'ENP en particulièrement mon ami Lenouar Alizinelabidine, un très grand merci à tous.

Enfin, je remercie mes parents, mes grands-parents, ma sœur, mon frère et toute ma famille de m'avoir encouragé et soutenu moralement tout au long de mes études, pour leur amour, leur confiance et leur présence dans les moments difficiles.

TABLE DES MATIERES

RESUME

INTRODUCTION 1

PARTIE A : TELEMETRIE ULTRASONORE

INTRODUCTION GENERALE 3

CHAPITRE 1 LES SIGNAUX ULTRASONORE 4

1-1 INTRODUCTION 5

1-2 HISTORIQUE 5

1-3 PRINCIPE DES ULTRASONS 5

1-3-1 PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES 6

1-3-2 REFLECTION ET REFRACTION DES ONDES ULTRASONORES 7

1-3-3 ATTENUATION DES ONDES DE PRESSION 8

1-4 GENERATION ET DETECTION DES ULTRASONS 9

1-4-1 L'EFFET DIRECT 10

1-4-2 L'EFFET INDIRECT 10

1-4-3 PRINCIPAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUES. 10

1-4-4 LE TRANSDUCTEUR PIEZOELECTRIQUE 11

1-5 APPLICATIONS DES ULTRASONS 12

1-6 CONCLUSION 14

CHAPITRE 2 REALISATION D'UN TELEMETRE ULTRASONS 15

2-1 INTRODUCTION 16

2-2 OBJECTIF 16

2-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 16

2-4 DESCRIPTION DU PRODUIT 17

2-5 DESCRIPTION DU MATERIEL	17
2-5-1 LE CAPTEUR HC-SR04	17
2-5-2 LA CARTE ARDUINO LIONARDO	19
2-5-2-1 Le microcontrôleur ATmega32u4	20
2-5-2-2 La mémoire	20
2-5-2-3 Le processeur	21
2-5-2-4 Autre composant	21
2-5-3 LES ECRANS LCD	21
2-5-4 LE MODULE BLUETOOTH HC-06	24
2-5-4-1 Caractéristiques	24
2-6. MONTAGE ET PROGRAMMATION DU TELEMETRE	25
2-6-1 LE LANGAGE DE PROGRAMMATION	25
2-6-1-1 La structure d'un programme	25
2-6-1-2 Le programme pour la commande du capteur	26
2-6-1-3 Le programme pour la commande de l'afficheur LCD	28
2-6-1-4 La communication arduino android	30
2-7. CONCLUSION	32
PARTIE B :TELEMETRIE LASER	
INTRODUCTION GENERALE	34
CHAPITRE 3 ETAT DE L'ART D'UN TELEMETRE LASER	36
3-1 INTRODUCTION	37
3-2 GÉNÉRALITÉS SUR LES CAPTEURS	38
3-2.1 DEFINITION D'UN CAPTEUR	39
3-2.2 PROPRIETES D'UN CAPTEUR	39
3-2-2-1 Précision d'un capteur	39
3-3 PROPRIÉTÉS DES SIGNAUX TÉLÉMÉTRIQUES	40
3-3-1 Signal émis	40
3-3-2 Signal reçu	41
3-3.3 DETECTION DE SIGNAUX OPTIQUES	41

3-4 PRÉCISION DES MESURES	41
3-4.1 Erreurs systématiques	42
3.4.1.1 Géométrie	42
3-4.1.2 Taille du faisceau sur la cible et inclinaison de la cible	42
3-4.2 Erreurs aléatoires	42
3-4.2.1 Erreur due à la turbulence atmosphérique	42
3-5 MESURES DES TÉLÉMÈTRES	43
3-5-1 Détection de cibles	43
3-5-2. Portée	44
3-6 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE LA TELEMETRIE LASER	45
3-6-1.Télémétrie à impulsion	45
3-6-2. Télémétrie par comparaison de phase	47
3-6-3 Télémétrie FMCW	49
3-6-4 La triangulation	50
3-7 CONCLUSION	52
CHAPITRE4 REALISATION D'UN TELEMETRE LASER	54
4-1 INTRODUCTION	55
4-2 OBJECTIF	56
4-3 SECURITE LASER	56
4-3-1 Les classes de laser	58
4-4 PRINCIPE DE FONCTIONEMENT	59
4-5.DESCRPTION DU PRODUIT	59
4-6. EALISATION DU TELEMETRE LASER	60
4-6-1 Etalonnage	61
4-6-2 Création de l'équation	62
4-7 PARTIE PROGRAMATION	65

4-8 CONCLUSION	68
CHAPITRE 5 : REALISATION D'UN TELEMETRE LASER A TRIANGULATION INFRAROUGE	69
5-1 INTRODUCTION	70
5-2 PRINCIPE DE LA TRIANGULATION	70
5-2-1 Principe de la cellule PSD	72
5.2.2 Comparaison entre PSD et CCD	73
5-3 PRINCIPE DE FONCTIONEMENT DU TELEMETRE	74
5-4 DESCRIPTION TECHNIQUE DU CAPTEUR	74
5-5 PROGRAMMATION DU TELEMETRE	77
5-5-1 Connaitre le capteur	77
5-5-2 Le code pour l'étalonnage	78
5-5-3 Comment utiliser le code d'étalonnage	80
5-5-4 Equation analytique de la courbe d'étalonnage	81
5-5-5 Récupérations des bonnes valeurs de la distance	81
5-6 CONCLUSION	82
CONCLUSION GENERALE	86
Bibliographie	

Liste des figures

Figure 1.1 : Spectre fréquentiel des ultrasons.	6
Figure 1.2: Réflexions d'une onde ultrasonore	7
Figure1.3:Effet de l'atténuation en fonction du milieu	8
Figure 1-4 : Effet de l'atténuation selon la fréquence	9
Figure 1-5 : Production d'ultrasons	9
Figure 1.6 : L'effet direct	10
Figure 1-7 : Influence de l'application d'un champ électrique sur la structure cristallographique du PZT	11
Figure 1-8 : Composition d'un capteur (E_1 , E_2 , etc.: forme quelconque d'énergie)	11
Figure 1-9 : Capteur à ultrasons standard pour une fréquence supérieure à 40 KHz.	12
Figure 1-10 : les différentes applications des ultrasons	13
Figure 1.11 : Méthode « temps de vol » de mesure de distance par ultrasons	14
Figure 2.1 : schéma bloc du fonctionnement du télémètre	17
Figure 2.2 : le HC-RS04	18
Figure 2.3 : chronogramme illustrant le fonctionnement du module.	19
Figure 2.4 : la structure de l'Arduino Leonardo	19
Figure2.5 : représentation d'un microcontrôleur ATmega32u4	20
Figure 2.6 : les broches de l'écran LCD	21
Figure 2.7 : le rôle de chaque broche de l'écran LCD	22
Figure 2.8 : les types d'afficheur LCD	23
Figure 2.9 : Les broches du module Bluetooth HC-06	24
Figure 2.10 : schéma du module Bluetooth HC-06	24
Figure 2.11 : structure d'un programme	26
Figure 2.12 : communication détecteur Arduino	26
Figure 2.13 : branchement de l'Arduino à l'écran LCD	29
Figure 2.14: communication Arduino avec téléphone	31
Figure3-1: Schéma de principe d'un télémètre à détection cohérente	37
Figure3-2: Schéma de principe d'un télémètre à détection directe	38
Figure 3-3: Représentation d'un capteur	39
Figure 3.4: principe Constant False Alarm Rate (CFAR)	44

Figure3.5:Exemple de chronogramme en télémétrie temps de vol	46
Figure3.6: Schéma de principe d'un télémètre à détection synchrone	48
Figure 3.7:Exemple de modulation utilisée en télémétrie FMCW	49
Figure 3.8 : Principe de la mesure de distance par triangulation.	51
Figure3.9 : une PSD de grande dimension	52
Figure 4.1 : le principe du télémètre laser	55
Figure 4.2 : les coefficients de réflexion	56
Figure 4.3 : les types d'exposition de l'œil aux réflexions	57
Figure 4.4 : Influence de la longueur d'onde du laser sur l'œil	57
Figure 4.6 : Schéma de principe d'émission/réception du faisceau laser	59
Figure 4.7 : blocs constituant la chaîne de mesure	60
Figure 4.8 : les courbes distance en fonction de l'amplitude	62
Figure 4.9 : Tensions de sortie en fonction de la distance avec Excel	64
Figure 4.10 : détermination de l'équation d'une droite avec Excel	64
Figure5.1 : Spectre de la lumière	70
Figure 5.2 : une PSD	71
Figure 5.3 : principe de fonctionnement de la PSD	72
Figure 5.4 : principe de la triangulation avec une PSD	73
Figure 5.5 : schéma bloc de fonctionnent	74
Figure 5.6 : Sharp GP2Y0A60SZLF	74
Figure 5.7 : schéma du GP2Y0A60SZLF	75
Figure 5.8 : Principe de la triangulation	75
Figure 5.9 : Faisceaux diffusés par un obstacle	76
Figure 5.10 : Schéma équivalent d'une PSD	76
Figure 5.11 : Schéma équivalent d'une PSD soumise à un SPOT infrarouge	77
Figure 5.12 : courbe d'étalonnage théorique	78
Figure 5.13 : résultat du programme d'étalonnage	80
Figure 5.14 : courbe d'étalonnage	81

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Vitesse de propagation du son dans différents milieux	7
Tableau 3.1 : comparaison des différentes techniques de télémétrie laser	52
Tableau 4.1 : les distances en fonction des tensions pour différents matériaux	61
Tableau 4.2 : explication des abréviations	62
Tableau 4.3 : les résultats de l'introduction du logarithme sur le tableau	63
Tableau 5.1 : comparaison entre PSD et CCD	73
Tableau comparatif entre: le capteur ultrasons, triangulation IR et laser	84

NOMENCLATURE

f	La fréquence	[Hz]
a	La vitesse de propagation	[m/s]
V	Vitesse de l'onde à l'intérieur du piézoélectrique	[m/s]
d	La distance entre l'émetteur, récepteur	[m]
v	La vitesse du son	[m/s]
τ	Le retard	[s]
δ_{sys}	Incertitude systématique	[sans unité]
$\delta_{aléa}$	Incertitude aléatoire	[sans unité]
δ_i	Incertitude instantanée	[sans unité]
δ_z	Erreur systématique	[sans unité]
b	La distance entre les axes des deux modules	[sans unité]
Z	La distance entre le télémètre et la cible	[m]
\bar{n}	L'indice moyen le long du trajet optique	[1.0003]
RSB_0	Le seuil du rapport signal sur bruit	[sans unité]
$RSB(z)$	Rapport signal sur bruit	[sans unité]
Δx	La résolution	[cm]
f_p	Fréquence de modulation	[Hz]
T_p	La durée entre deux impulsions consécutives	[s]
x	La portée maximale du système	[m]

f	La fréquence de notre horloge.	[Hz]
i_2	Courant	[A]
i_1	Courant	[A]
x	Position du spot	[cm]
L	Taille de la PSD	[cm]

INTRODUCTION GENERALE

La télémétrie est la science pour les mesures de distances et un télémètre est un système de détection actif qui consiste à émettre un signal et à détecter son écho.

L'objectif de ce projet de fin d'études consiste en l'étude des systèmes de télémétrie et des différentes techniques utilisées à l'heure actuelle pour la réalisation d'un télémètre aussi bien à l'aide des ultrasons que des rayonnements infrarouges.

Dans notre travail, nous présenterons les trois méthodes de télémétrie utilisées avec leur prototype. Ces techniques prennent une place de plus en plus importante dans notre vie quotidienne ; par exemple, dans les voitures avec le radar de recul et le système d'anticollision, dans le bâtiment pour la mesure de longueur ou de superficie à distance et beaucoup d'autres applications qui seront détaillées par la suite.

Dans la première partie de ce document nous commencerons par les principales caractéristiques des ultrasons en introduisant le principe de la génération, de la propagation et de la détection des ultrasons ainsi que leurs applications qui sont très nombreuses et variées, en accordant notamment une plus grande importance à la méthode de mesure des distances. Nous présenterons dans cette partie une méthode de réalisation d'un télémètre à ultrasons.

Dans la deuxième partie de ce document nous décrirons différents systèmes et techniques de télémétrie laser. Cet état de l'art nous permettra de sélectionner la technique qui peut répondre à notre cahier de charges en fonction du matériel disponible au département et chez les revendeurs de composants électroniques sur la place d'Alger, ensuite on traitera la partie pratique qui consiste à réaliser un télémètre laser.

PARTIE A :TELEMETRIE
ULTRASONORE

INTRODUCTION

Les signaux ultrasonores sont des ondes de pression mécaniques de fréquences supérieures à celles qui sont audibles par l'oreille humaine. D'une manière générale, cette bande de fréquences se situe entre 20 kHz et 15 Mhz et couvre une grande variété d'applications. En effet, la plage de fréquences située entre 20 kHz et 300 kHz est principalement utilisée par les sonars et par les animaux pour l'écholocation ;Finalement, la plage entre 800 kHz et 15 MHz, par les applications d'imagerie médicale et industrielle non destructive. [1].

Les signaux ultrasonores sont habituellement générés par un transducteur composé d'un élément piézoélectrique qui permet de transformer les ondes mécaniques en signaux électriques et vice-versa. Lorsqu'une variation de tension est appliquée aux bornes d'un cristal piézoélectrique, ce dernier se met à vibrer et produit une onde de pression. Inversement, lorsqu'un cristal piézoélectrique est exposé à une onde de pression, il se déforme et produit un signal électrique

CHAPITRE 1 :

LES SIGNAUX ULTRASONORES

1.1 INTRODUCTION

La détection à ultrasons a connu une évolution considérable et elle est largement utilisée dans divers domaines. En fait, de nombreux types d'instruments à ultrasons conventionnels, des appareils accompagnés de logiciels sophistiqués sont utilisés pour des applications de recherche académiques, industrielles et médicales. Il y a d'innombrables avantages à la détection par ultrasons, tels que la capacité exceptionnelle de sonder à l'intérieur des objets de façon non destructive, car ces ondes peuvent se propager à travers toutes sortes de milieux, y compris les solides, les liquides et les gaz, sauf le vide.

1-2 HISTORIQUE

Les ultrasons originellement appelés supersoniques sont restés pendant longtemps seulement un sujet de recherche. En 1883, Galton produisit à l'aide d'un sifflet des vibrations justes au-dessus des fréquences audibles perçues par l'oreille humaine afin de connaître la limite du spectre audible [2]. Pendant trente ans les ultrasons resteront une curiosité assez mal connue dont on n'imaginait pas d'autres applications que le sifflet à chien. L'intérêt pour ces vibrations a été éveillé par la catastrophe du Titanic en avril 1912. A cette occasion, L. F. Richardson entrevoit la possibilité d'utiliser une méthode d'écho ultrasonore pour la détection d'obstacles immergés comme les icebergs, les épaves, récifs et autres écueils océaniques. Cette idée prend corps durant la Première Guerre mondiale pour le repérage des sous-marins ennemis et un système de détection rudimentaire, mais opérationnel, est mis au point par Langevin en 1918 [3], utilisant le phénomène de la piézoélectricité ; c'est l'ancêtre du sonar. Puis en 1932, les équipes de Debye et Sears, d'une part, de Lucas et Biquard, d'autre part, travaillant indépendamment l'une de l'autre, réalisent les premières expériences de diffraction de la lumière par les ultrasons et vérifient les prévisions théoriques de L. Brillouin faites en 1922 [4]. Les expériences de propagation des ultrasons, d'abord limitées aux fluides, s'étendent ensuite aux solides. L'utilisation des ultrasons pour la détection des défauts dans les matériaux denses remonte aux travaux de Sokolov en 1934 qui peuvent être considérés comme les premiers pas en contrôle non destructif.

1-3 PRINCIPE DES ULTRASONS

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques. Ces ondes se propagent dans un milieu fluide ou solide mais ne peuvent être transmises dans le vide. On peut observer plusieurs modes de propagation suivant la nature du milieu. L'amplitude de ces ondes

décroit au cours de la propagation car les liaisons entre atomes ou entre molécules ne sont pas purement élastiques. Plusieurs phénomènes concourent à leur atténuation

- 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.

Le spectre des ultrasons a été élargi suivant le progrès technologique, aujourd'hui on utilise désormais le terme hypéron par un transducteur composé d'un élément piézoélectrique qui permet de transformer les ondes mécaniques en signaux électriques et vice-versa. Lorsqu'une variation de tension est appliquée aux bornes d'un cristal piézoélectrique, ce dernier se met à vibrer et produit une onde de pression. Inversement, lorsqu'un cristal piézoélectrique est exposé à une onde de pression, il se déforme et produit un signal électrique [4].

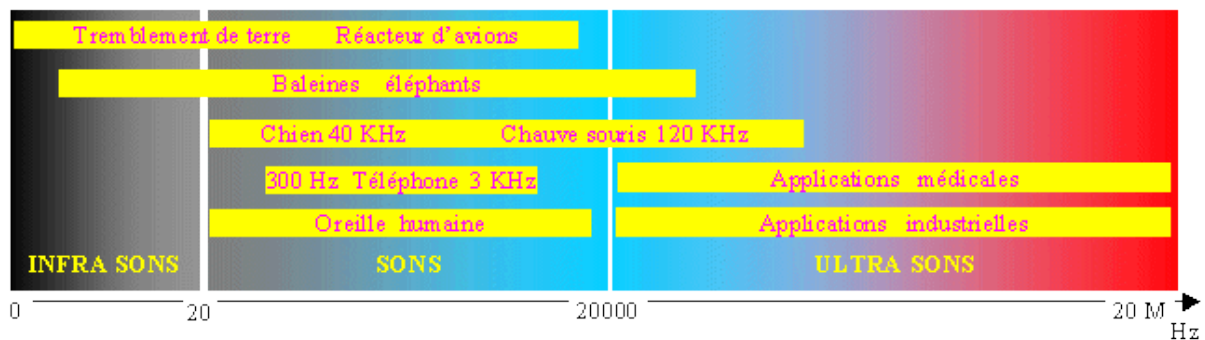


Figure 1.1 : Spectre fréquentiel des ultrasons [1].

1-3-1 PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES

Les ultrasons se propagent à une vitesse qui sera fonction de la nature du milieu (élasticité, densité), indépendamment de la fréquence de l'onde. La relation pour la vitesse d'une onde sonore dans un milieu donné est définie par :

$$v = \lambda f \quad (1.1)$$

Où f et λ représentent respectivement la fréquence et la longueur d'onde.

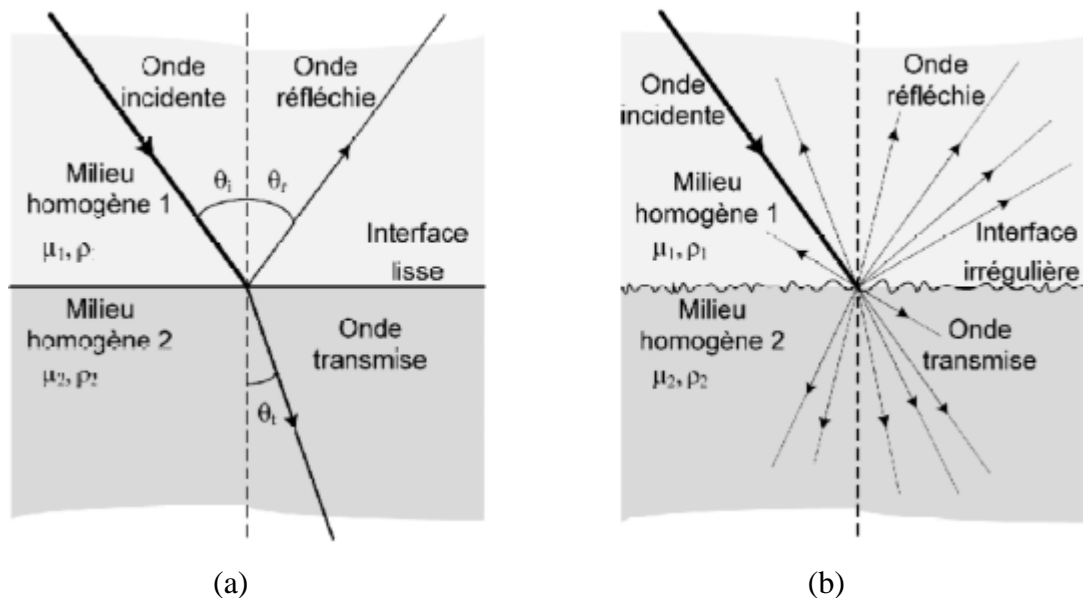
A titre d'exemple, quelques vitesses de propagation du son dans différents milieux sont répertoriées par le tableau ci-dessous:

Milieu	Vitesse de propagation (m/s)
Air	334
Eau	1480
plomb	4080
cuivre	4600
acier	6000

Tableau 1-1 : Vitesse de propagation du son dans différents milieux

1-3-2 REFLECTION ET REFRACTION DES ONDES ULTRASONORES

Lorsqu'une onde ultrasonore atteint une interface plane séparant deux milieux supposés différents, une partie de l'énergie sonore est réfléchiée c'est-à-dire renvoyée vers la source (formation d'un écho ultrasonore), l'autre partie est transmise (voir Figure 1.2). L'importance relative de l'intensité de cet écho par rapport à l'onde incidente dépend de l'interface. L'interface acoustique est définie par son coefficient de réflexion.



a) Réflexion spéculaire; b) Réflexion diffuse

Figure 1.2: Réflexions d'une onde ultrasonore

1-3-3 ATTENUATION DES ONDES DE PRESSION

Les ondes ultrasonores vont interagir avec la matière qu'elles traversent au cours de leur propagation. Plusieurs phénomènes se produisent qui aboutissent à leur atténuation: absorption de l'énergie de l'onde par le milieu, diffusion, réflexions et réfractions. Il est à noter que l'absorption se manifeste par la conversion de l'énergie de l'onde en chaleur et elle est donc responsable de l'augmentation de température du milieu. D'un autre côté, les réflexions et réfractions dispersent l'énergie du faisceau sur une plus grande surface. Pour les milieux homogènes, seule l'absorption occasionne l'atténuation. D'autre part, pour les milieux hétérogènes, les réflexions et réfractions contribuent également à l'atténuation de l'onde lors de sa propagation [7].

Chaque milieu a un coefficient d'atténuation propre qui est généralement exprimé en décibel (dB) par unité de distance, la Figure 1.3 illustre un exemple de l'effet de l'atténuation sur le signal ultrasonique pour différents milieux.

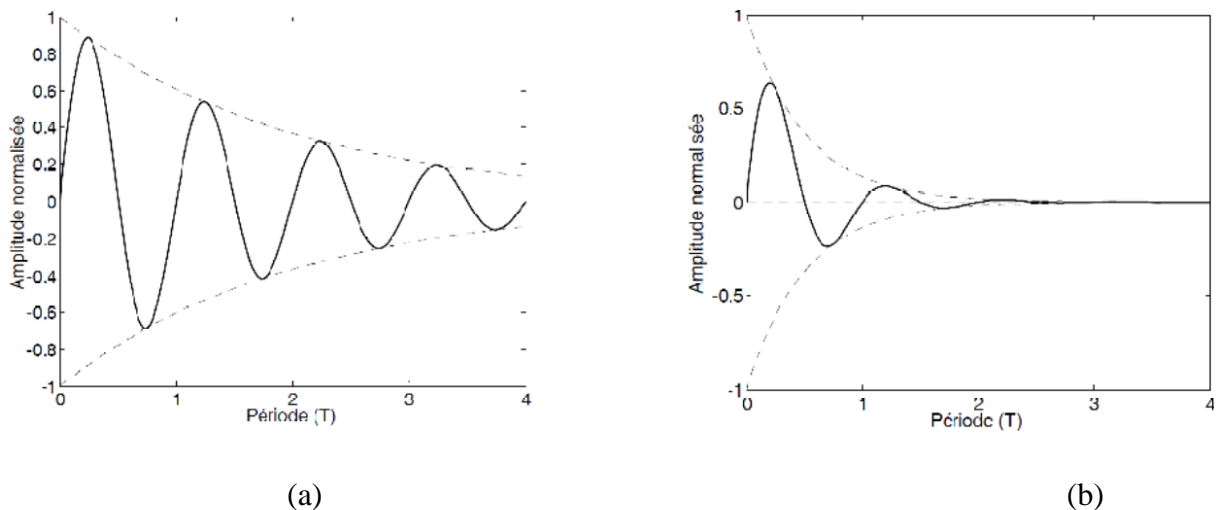


Figure 1.3: Effet de l'atténuation en fonction du milieu

a) Milieu peu absorbant, b) Milieu absorbant [5].

Pour notre application qui sera traitée dans le prochain chapitre, on utilisera la plage de fréquences située entre 20 kHz et 300 kHz à cause de l'atténuation du signal en fonction de la fréquence. La figure 1.4 illustre un exemple de l'effet de l'atténuation pour différentes fréquences.

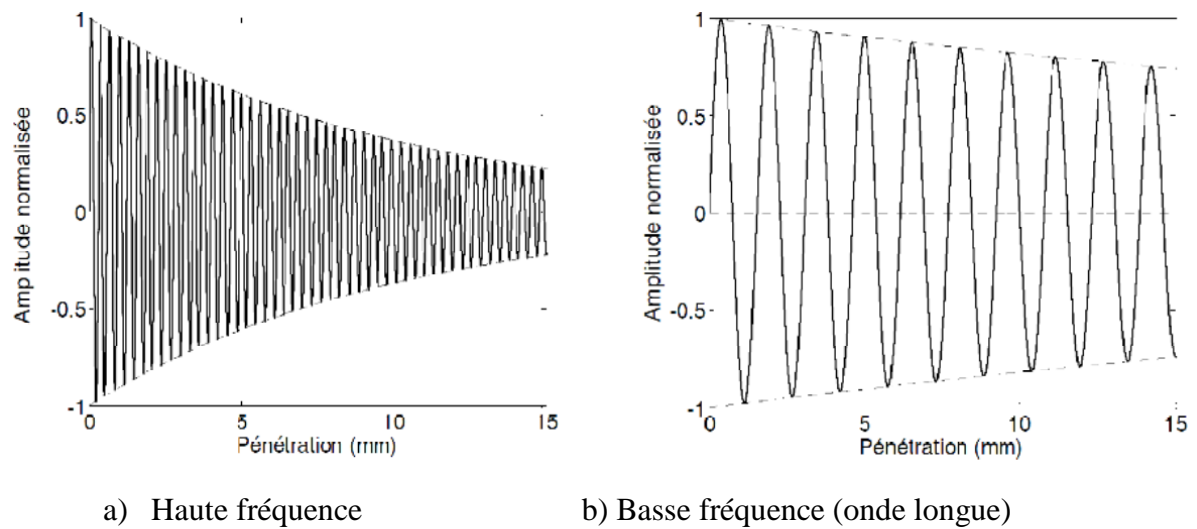


Figure 1-4 : Effet de l'atténuation selon la fréquence [5]

1-4 GENERATION ET DETECTION DES ULTRASONS

Pour créer une onde acoustique il faut une excitation mécanique : L'onde peut être générée par un impact ou une force vibratoire externe. L'onde se propage ensuite de proche en proche grâce à l'oscillation des particules autour de leur position de repos.

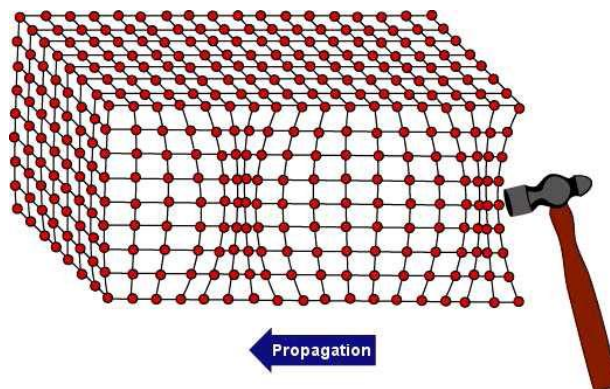


Figure 1-5 : Production d'ultrasons

Plusieurs phénomènes permettent de produire des ondes ultrasons. Le procédé le plus utilisé est la piézo-électricité. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et, réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse). C'est l'effet piézoélectrique qui a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

1-4-1 L'EFFET DIRECT.

Quand on exerce une pression sur une des faces de la lame du cristal (figure 1-5a) les ions positifs se rapprochent globalement de la face B qui se charge donc positivement. Un phénomène similaire est observé pour la face A qui se charge négativement. On montre que la différence de potentiel U qui est générée ainsi est proportionnelle à la pression appliquée. Remarque La taille du cristal par rapport à sa structure cristalline est essentiel (figure 1-5 c).

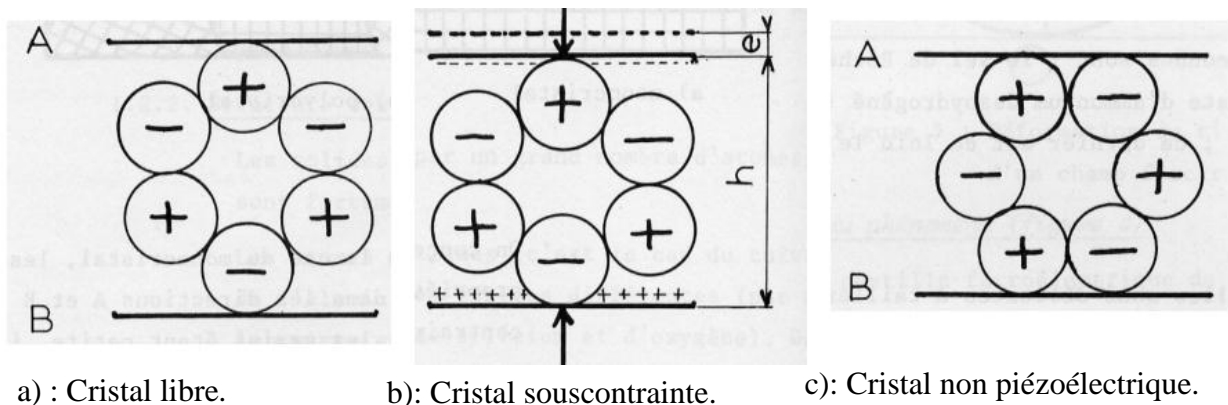


Figure 1.6 : l'effet direct

Si un cristal piézoélectrique reçoit une pression acoustique alternative, il se met à vibrer de manière alternative et génère alors entre les 2 faces une tension alternative. Ce phénomène est utilisé lors de la réception d'une onde ultrasonore par un palpeur.

1-4-2 L'EFFET INDIRECT.

Si on applique une tension électrique entre les faces A et B d'un cristal du type de celui de la figure 1.5, les ions attirés ou repoussés vont contribuer à déformer le cristal. Cette déformation est proportionnelle à la tension appliquée.

Si on applique une tension alternative à un cristal piézoélectrique, celui-ci se met à vibrer au même rythme que celui de la variation de la tension alternative. Ce phénomène est utilisé pour la génération des US par un palpeur.

1-4-3. PRINCIPAUX MATERIAUX PIEZOELECTRIQUE.

De nombreuses substances présentent l'effet piézoélectrique mais rares sont celles où le phénomène est important. A titre indicatif, nous donnons quelques valeurs

- Quartz 2,3 pm/V
- Titanate de baryum 190 pm/V
- Titanate zirconate de plomb (PZT) 270 pm/V

Avec, pm les micro battement « microringresonator en anglais ».

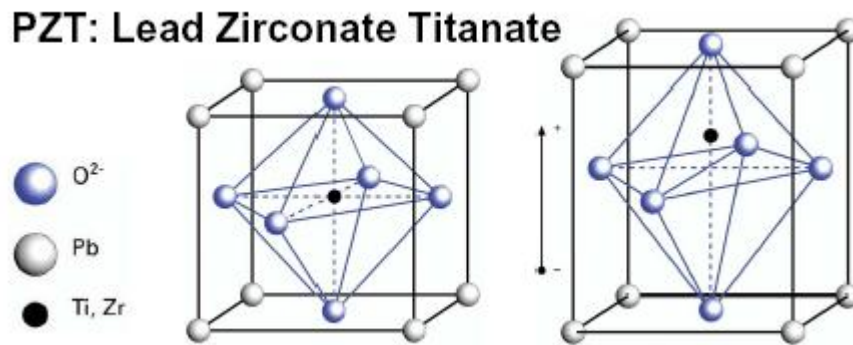


Figure 1-7 : Influence de l'application d'un champ électrique sur la structure cristallographique du PZT

1-4-4 LE TRANSDUCTEUR PIEZOELECTRIQUE.

D'un point de vue terminologique, le terme transducteur devrait être distingué du terme capteur (sensor en anglais) ; par définition le premier est un convertisseur d'énergie d'une forme à une autre, par contre, le second convertit un stimulus vers un signal électrique.

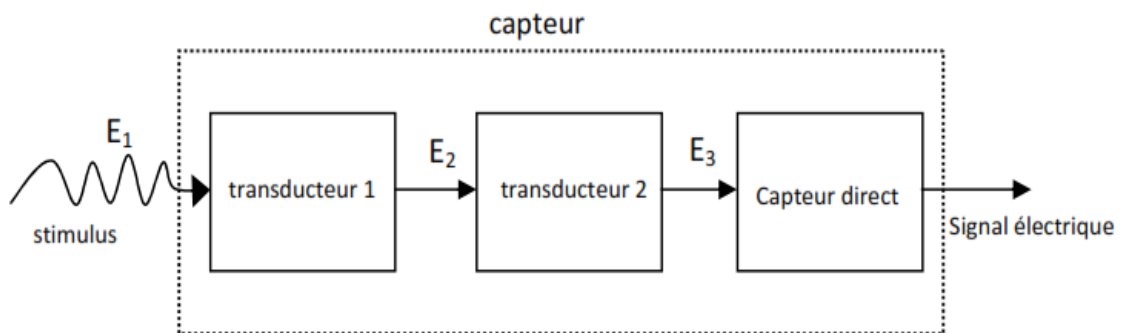


Figure 1-8 : Composition d'un capteur (E_1 , E_2 , etc.: forme quelconque d'énergie)

Le transducteur de ce type est constitué principalement d'un cristal piézoélectrique qui se met à vibrer lorsqu'une variation de tension est appliquée à ces bornes, une onde de pression est alors produite. Inversement, lorsqu'un cristal piézoélectrique est exposé à une onde de pression, il se déforme et produit un signal électrique. La composition standard d'une capsule à ultrasons est détaillée par la figure (1.8).

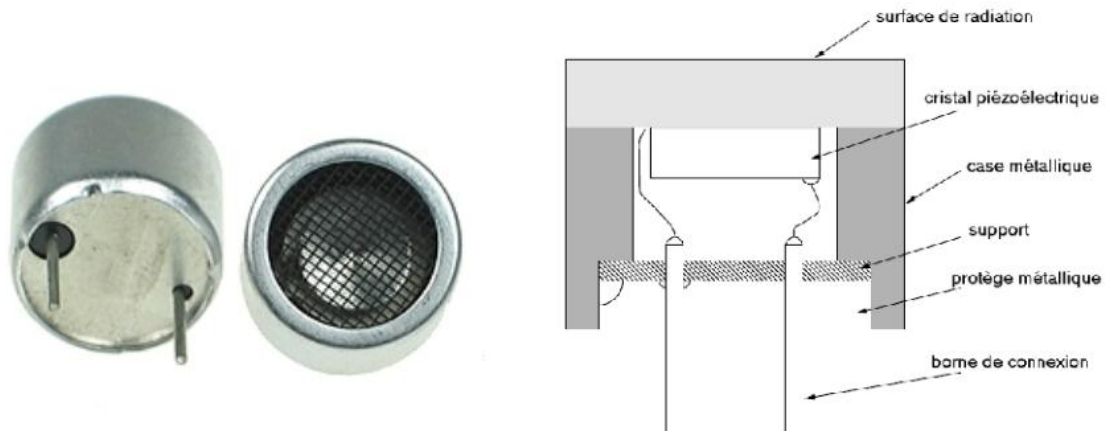


Figure 1-9 : Capteur à ultrasons standard pour une fréquence supérieure à 40 KHz.

Aujourd'hui on fait appel de plus en plus aux céramiques synthétiques en raison de leurs propriétés largement supérieures aux cristaux naturels. Dans l'industrie, les Titano-Zirconate de Plomb ($Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$ (PZT)) sont devenus les matériaux piézoélectriques les plus utilisés. Les caractéristiques physiques du matériel, l'alignement du cristal ainsi que la géométrie de l'élément ont un impact important [6]. Par exemple, ce sont ces paramètres qui déterminent la fréquence de résonance, la largeur de bande, la sensibilité, l'impédance acoustique du piézoélectrique ainsi que l'intensité et la température maximale permise. Les matériaux piézoélectriques possèdent une fréquence naturelle de résonance et la méthode la plus efficace pour produire des ultrasons est d'appliquer aux électrodes un signal électrique de même fréquence. Pour toutes les autres fréquences, la production d'ultrasons sera très faible. Autrement dit, chaque piézoélectrique est conçu pour une fréquence spécifique. Tels que présenté par l'équation (1.2), les paramètres qui déterminent cette fréquence naturelle sont l'épaisseur du piézoélectrique 'a' et la vitesse de propagation 'V' à l'intérieur du piézoélectrique [7].

$$f = \frac{V}{2a} \text{ (kHz)} \quad (1.2)$$

Avec V (m/s) et a(m)

1-5 APPLICATIONS DES ULTRASONS

Les applications des ultrasons sont généralement classées en deux grandes catégories qui se distinguent par l'utilisation des vibrations ultrasonores de faible ou de forte puissance. Dans le second cas, les ultrasons sont dits de puissance et sont considérés comme tels car ils modifient le milieu dans lequel ils se propagent. La majorité des applications des ultrasons

sont celles des ultrasons de puissance dans le domaine de fréquence entre 20 et 100 KHz et avec des intensités acoustiques qui varient approximativement de 0.1 W/cm² jusqu'à plusieurs KW/cm².

La figure 1.9 donne un aperçu de l'implication pluridisciplinaire des ultrasons et résume ces applications : la télémétrie, que présente la figure (1.10) est un exemple d'application qui est largement utilisé à la fois dans la recherche et dans la pratique [8, 9], parfois cette appellation est confondue avec le SONAR (Sound Navigation And Ranging) qui a emprunté sa théorie du radar à base d'onde électromagnétique. Le principe de la télémétrie ou la mesure de distance consiste à mesurer le temps entre l'émission d'un signal ultrasonique et l'écho reçu par la réverbération de l'onde sur un objet. Dans l'air, la vitesse du son étant connu ; il est simple de déterminer la distance entre l'émetteur, récepteur et l'objet selon la formule suivante [10] :

$$d = \frac{v \cdot \tau}{2} \tag{1.3}$$

Où « v » est la vitesse du son, et τ est le retard

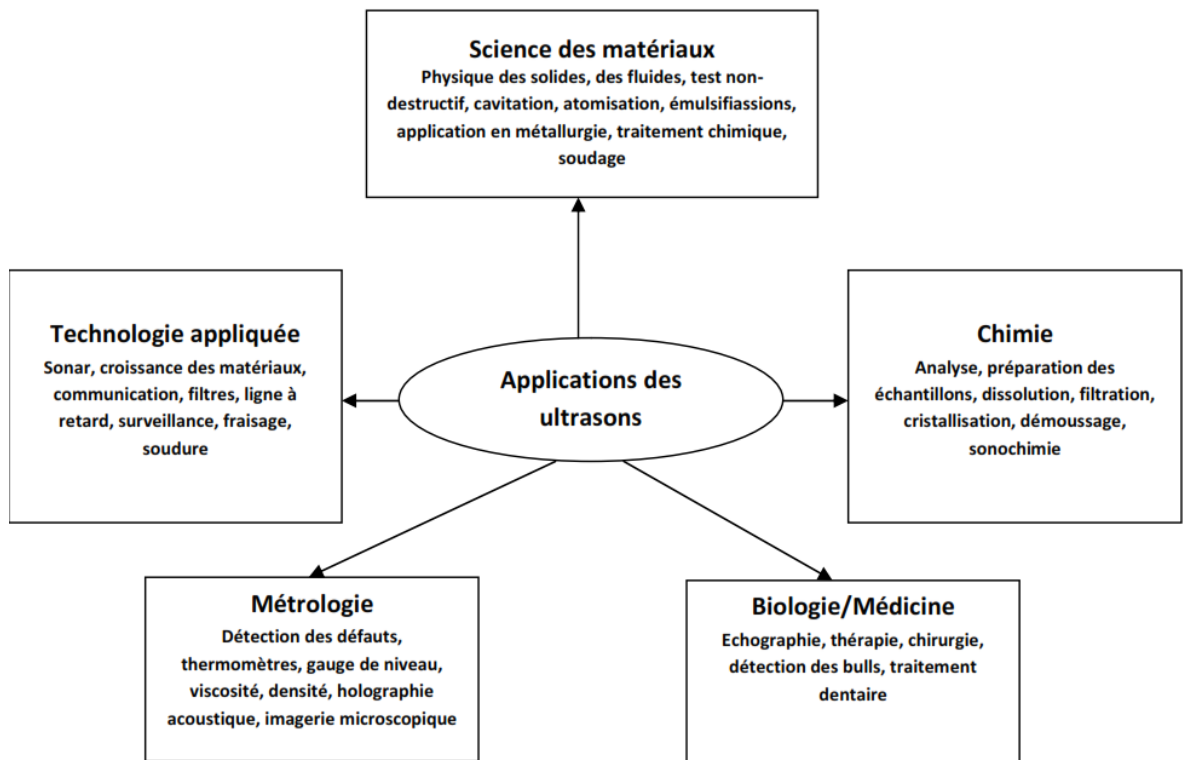


Figure 1-10 : les différentes applications des ultrasons [10]

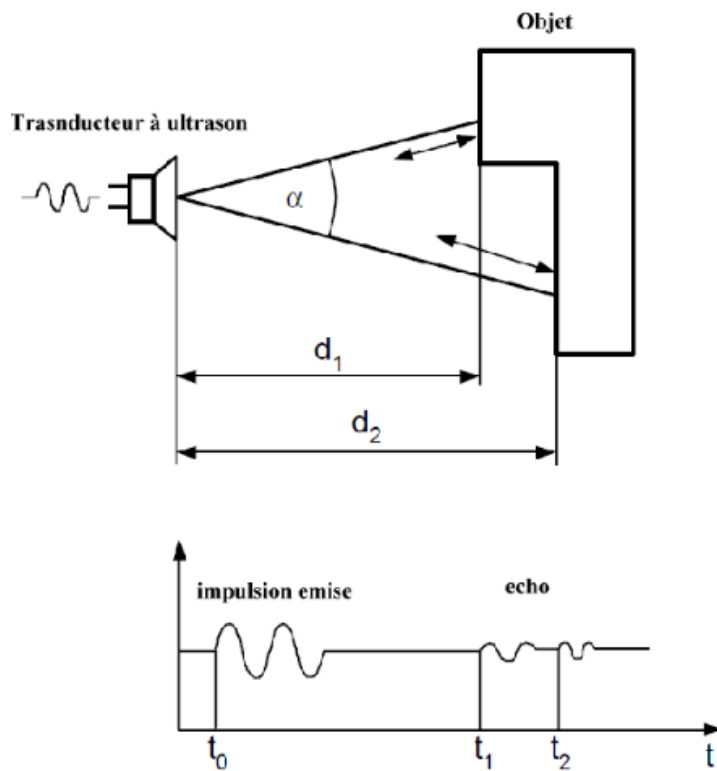


Figure 1.11 : Méthode « temps de vol » de mesure de distance par ultrasons

On remarque dans la figure 1.11 que le temps entre l'émission de l'impulsion et le retour de l'écho augmente quand l'obstacle est plus loin.

1-6. CONCLUSION

Pour conclure, les ultrasons se propagent à une vitesse qui sera fonction de la nature du milieu (élasticité, densité), indépendamment de la fréquence de l'onde et que l'atténuation de l'onde est inversement proportionnelle à sa fréquence, donc on déduit que les ondes ultrasonores à basse fréquence (onde longue) sont les mieux adaptées à la télémétrie.

Pour le prochain chapitre nous allons nous fixer une fréquence de 40KHz pour éviter l'atténuation du signal.

CHAPITRE2.

REALISATION D'UN

TELEMETRE A ULTRASON

2-1.INTRODUCTION

La mesure de distance sans contact est un champ d'application vaste et passionnant. Aujourd'hui un nombre considérable de techniques permettent cela en faisant appel aux différents domaines de l'électronique. L'optoélectronique est ainsi utilisée pour les mesures où la précision est requise, on utilise alors le principe de l'interféromètre de Michelson, associé au laser.

Ici il n'est pas question de techniques onéreuses et complexes, mais d'une application simple tirant partie du temps de propagation d'une onde ultrasonore pour la réalisation d'un télémètre à ultrasons pour mesurer des distances allant de quelques centimètres à quelques mètres.

Les capteurs à ultrasons fonctionnent en mesurant le temps de retour d'une onde sonore inaudible par l'homme émise par le capteur. La vitesse du son étant à peu près stable, on en déduit la distance de l'obstacle.

2-2.OBJECTIF

L'objectif de ce projet consiste à réaliser un télémètre à ultrasons qui fonctionne dans la plage de mesure de 2cm à 400cm et qui affiche les résultats sur un afficheur LCD ou sur un téléphone portable via une connexion Bluetooth.

Comme pour tout projet nous disposons d'un cahier de charges que nous devons suivre. Le cahier de charges nous impose différentes conditions que doit respecter le prototype. Nous devons observer les directives suivantes :

- un temps limité pour le calcul de la distance,
- un rapport qualité prix raisonnable,
- une capacité de détection allant de deux centimètres à quatre mètres,
- un dispositif pouvant être utilisé dans des conditions difficiles,
- l'utilisation du microcontrôleur Atmega.
- la programmation en langage C.

2-3.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Comme mentionné précédemment, on exploite le fait que l'onde sonore rebondit sur les obstacles et revient souvent vers l'expéditeur, connaissant la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré. En effet, la vitesse de déplacement d'une onde sonore dans l'air est connue depuis longtemps. Elle est d'environ 340 mètres par seconde à 25 degrés Celsius, une

distance d'un 1cm est parcourue en $2,94\mu\text{S}$, donc on a besoin d'une horloge avec une fréquence de 340khz et par conséquent notre microcontrôleur qui fonctionnant à 16Mhz est capable de nous donner cette précision.

À partir de là, si on connaît l'instant de l'émission de l'onde « t_i » et que l'instant du retour de l'écho est connu « t_r » (après le rebond), on peut alors déterminer le *temps de vol* de l'onde. On a alors une durée ($t_r - t_i$), une vitesse, et on peut en déduire la distance.

Comme l'onde fait un aller-retour (le voyage depuis l'émission de l'onde, le rebond, puis le retour sur le récepteur), il faudra diviser le temps de vol par deux pour ne considérer qu'un trajet (l'aller ou le retour). Le calcul est alors simple.

$$D = \frac{v \times (t_r - t_i)}{2} \quad (2.1)$$

2-4.DESCRPTION DU PRODUIT

Le prototype de télémètre à ultrasons que l'on souhaite réaliser doit avoir une plage de mesure qui va de 2cm à 400cm avec une précision de 1cm. Pour cela, nous allons utiliser comme module d'émission et de réception le HC-SR04 qui utilise le principe de la propagation d'ondes ultrasonores à 40 kHz, un microcontrôleur pour la commande des modules et le traitement des données reçues. La présentation des résultats se fera sur un afficheur LCD 16x2 ou sur un téléphone portable sous android via un module de communication Bluetooth le hc-06.

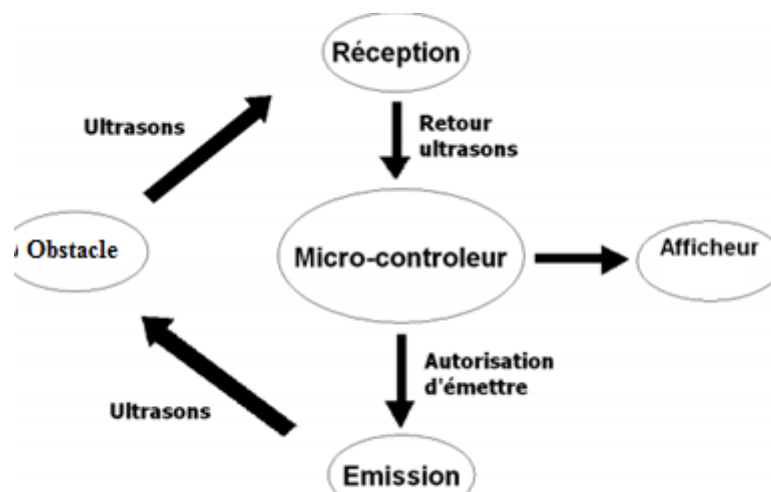


Figure 2.1 : schéma bloc du fonctionnement du télémètre

2-5. DESCRIPTION DU MATERIEL

2-5-1.LE CAPTEUR HC-SR04

Tout d'abord, sur la face avant on peut voir l'émetteur US et son récepteur. Ce sont des petites cellules piézo-électriques qui vont soit vibrer lorsqu'une tension est appliquée

(émetteur), soit au contraire produire une tension lorsque une vibration est reçue (récepteur).

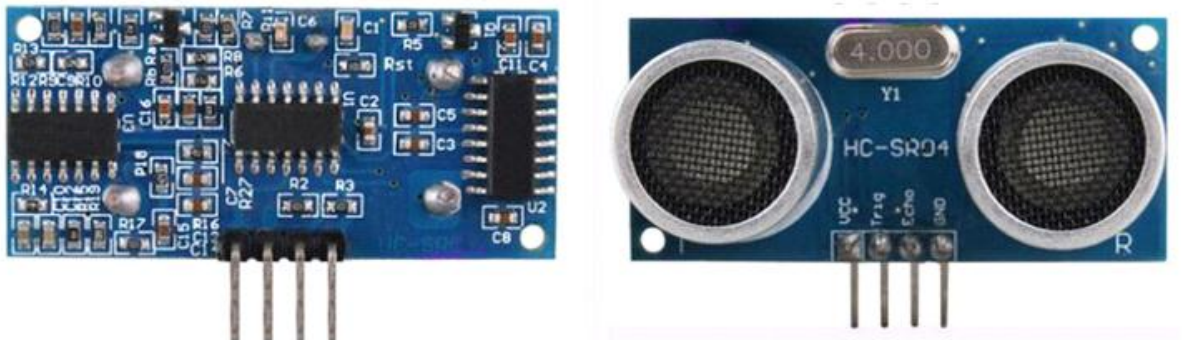


Figure 2.2 : le HC-RS04

Sur la face arrière on trouve plusieurs petits circuits permettant la génération du signal et le traitement de ce dernier. Ainsi, un composant va générer une onde de 40 kHz lors d'un "top départ" et la partie restante s'occupera de la mise en forme de la réception (amplification et filtrage) et de mettre en forme cela proprement sur une broche de sortie. On trouve quatre broches.

Les premières sont comme toujours VCC et GND qui vont accueillir l'alimentation (respectivement 5V et masse). On trouve ensuite la broche "echo" sur laquelle sera présent le signal de sortie. Enfin, une broche nommée "Trig". Cela signifie "Trigger" soit "déclencheur" ou "gâchette". En mettant cette broche à l'état haut pendant 10µs on va déclencher le *ping* pour la mesure. Un "ping" représente le lancement d'une onde ultrasons. Pour reprendre l'exemple de l'écho dans la pièce vide, le ping correspondrait au moment où vous émettez un son en parlant.

Le signal de sortie est assez simple à exploiter. Il est initialement à 0, puis passe à 1 lorsque le *ping* est envoyé. Il repasse ensuite à 0 quand l'écho est parvenu au récepteur OU s'il n'y a pas de retour durant les 30ms après l'envoi (l'onde est alors considérée comme perdue).

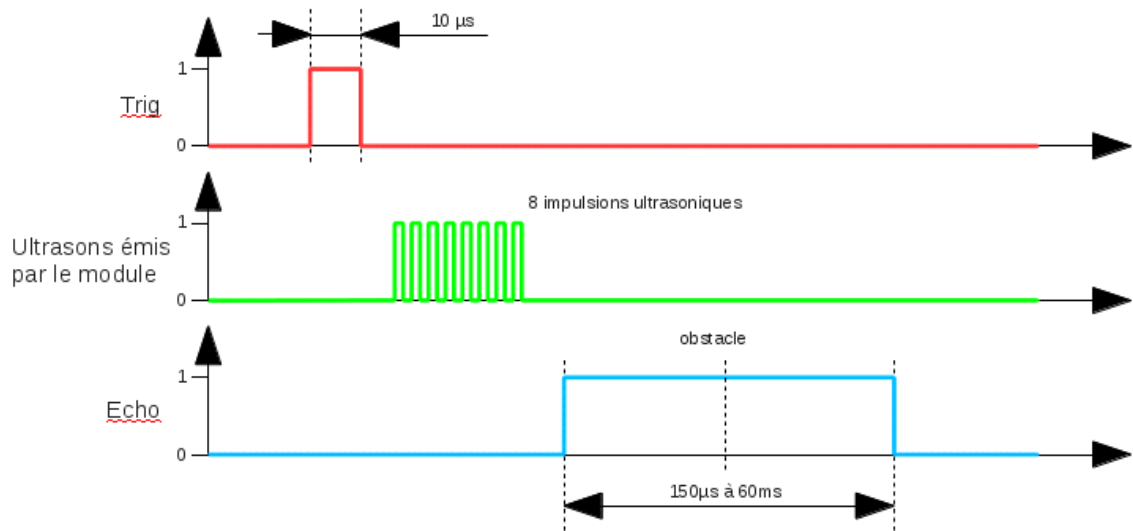


Figure 2.3 : chronogrammes illustrant le fonctionnement du module. [19]

Ces données techniques ont une plage de mesure de 2 cm à 400 cm, une consommation maximum de 15mA, un angle d'émission <math><15^\circ</math> et une précision théorique de 3mm.

2-5-2 LA CARTE ARDUINO LIONARDO :

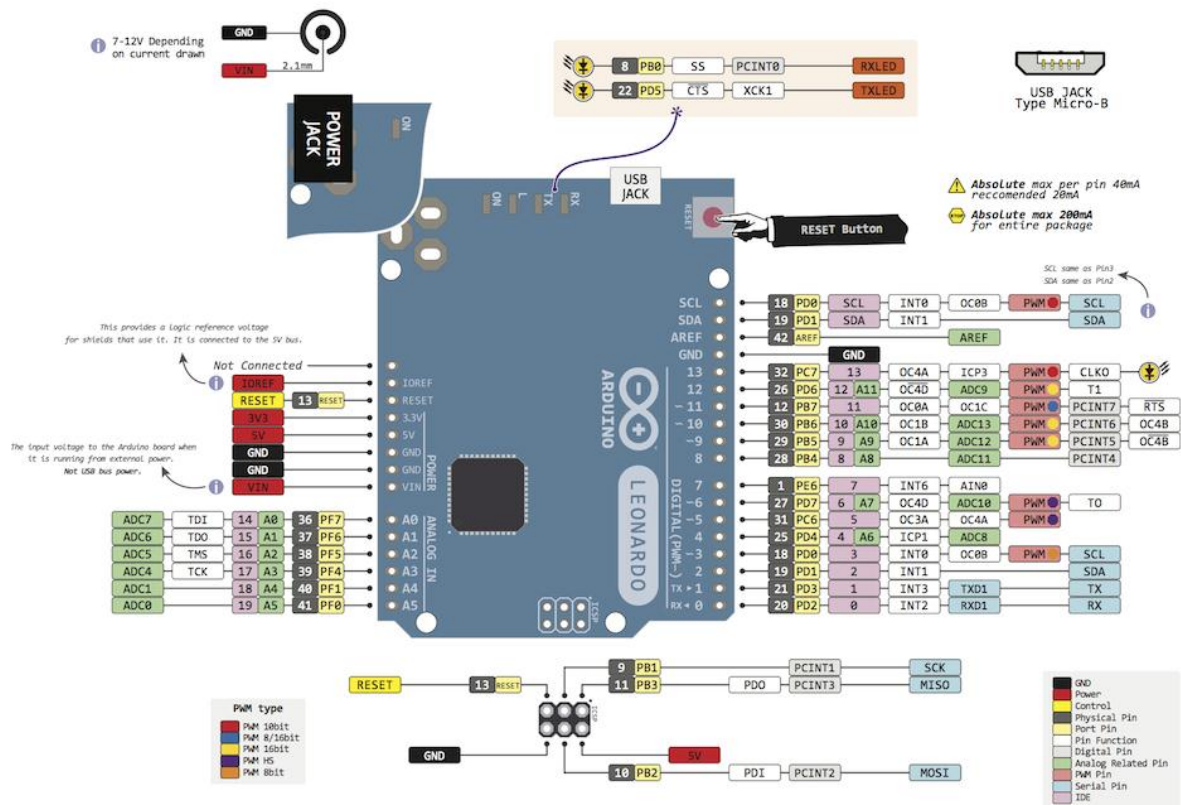


Figure 2.4 : la structure de l'Arduino Leonardo

doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme.

- *LES REGISTRES*: c'est un type de mémoire utilisé par le processeur.

La mémoire cache : c'est une mémoire qui fait la liaison entre les registres et la RAM.

2-5-2-3. Le processeur

C'est le composant principal du microcontrôleur. C'est lui qui va exécuter le programme que nous lui donnerons à traiter. On le nomme souvent le CPU.

2-5-2-4 Autres composants

Un microcontrôleur, ce n'est pas un ordinateur 2GHz multi-cœur, 4Go de RAM! Ici on parle d'un système qui fonctionne avec un CPU à 16MHz et 2Ko de SRAM pour la mémoire vive. Donc deux raisons font qu'il faut choisir ses variables de manière judicieuse.

- La RAM n'est pas extensible.
- Le processeur est de type 8bits (sur ArduinoLéonardo), donc il est optimisé pour faire des traitements sur des variables de taille 8bits, un traitement sur une variable 32bits prendra donc beaucoup plus de temps.

2-5-3. L'ECRAN LCD

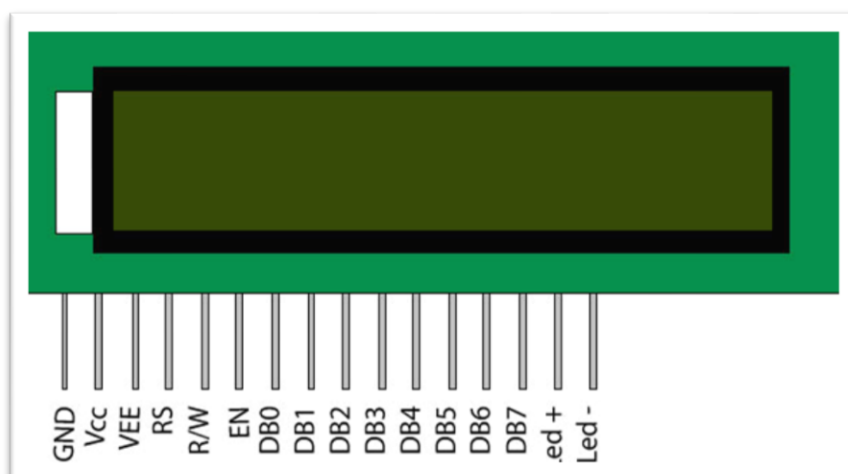


Figure 2.6 : les broche le l'écran LCD

Un écran LCD " Liquid Crystal Display" se traduit, en français, par " Écran à Cristaux Liquides ". Ces écrans sont très utilisés. On en trouve dans des appareils électroniques disposant d'afficheur : les montres, le tableau de bord de voiture, les calculatrices, etc. Cette utilisation intensive est due à leur faible consommation d'énergie et de coût. En effet, les écrans LCD sont aussi fabriquées sous des formes plus complexes telles que la plupart des écrans d'ordinateur ainsi que les téléviseurs à écran plat. Cette technologie est bien maîtrisée et donc le coût de production est assez bas. Dans un futur proche, ils vont être remplacés par les écrans à affichage LED lesquels sont pour le moment trop chers.

N°	Nom	Rôle
1	VSS	Masse
2	Vdd	+5V
3	V0	Réglage du contraste
4	RS	Sélection du registre (commande ou donnée)
5	R/W	Lecture ou écriture
6	E	Entrée de validation
7 à 14	D0 à D7	Bits de données
15	A	Anode du rétroéclairage (+5V)
16	K	Cathode du rétroéclairage (masse)

Figure 2.7 : le rôle de chaque broche de l'écran LCD

Dans la grande famille d'afficheurs LCD, on distingue plusieurs catégories:

- Les afficheurs alphanumériques,
- Les afficheurs graphiques monochromes,
- Les afficheurs graphiques couleurs.

Les premiers sont les plus courants. Ils permettent d'afficher des lettres, des chiffres et quelques caractères spéciaux. Les caractères sont prédéfinis (voir table ci-dessus) et on n'a donc aucunement besoin de gérer chaque pixel de l'écran.

Les seconds sont déjà plus avancés. On a accès à chacun des pixels et on peut donc représenter des dessins beaucoup plus évolués. Ils sont cependant légèrement plus onéreux que les premiers.

Les derniers sont l'évolution des précédents, la couleur en plus soit 3 fois plus de pixels à gérer : un sous-pixel pour le rouge, un autre pour le bleu et un dernier pour le vert, le tout forme la couleur d'un seul pixel.




Afficheur alphanumérique	Afficheur graphique (monochrome)	Afficheur graphique (couleur)
		

Figure 2.8 : les types d'afficheur LCD

Pour notre projet nous utiliserons l'afficheur de la première catégorie.

De manière classique, la communication avec l'écran se fait d'une façon parallèle. Cela signifie que l'on envoie des bits par blocs, en utilisant plusieurs broches en même temps, c'est le contraire d'une transmission série où les bits sont envoyés un par un sur une seule broche.

On utilise dix broches différentes, huit pour les données, en parallèle donc et deux pour la commande (E : Enable et RS : Register Selector). La ligne R/W peut être connectée à la masse si l'on souhaite utiliser en écriture seulement.

Pour envoyer des données sur l'écran, il suffit de suivre un ordre logique et un certain timing pour que tout se passe bien. Tout d'abord, il nous faut placer la broche RS à 1 ou 0 selon que l'on veut envoyer une commande, comme par exemple "déplacer le curseur à la position (1;1)" ou que l'on veut envoyer une donnée : « écrire le caractère 'a' ». Ensuite, on place sur les 8 broches de données (D0 à D7) la valeur de la donnée à afficher. Enfin, il suffit d'envoyer une impulsion d'au moins 450 ns pour indiquer à l'écran que les données sont prêtes.

2-5-4 LE MODULE BLUETOOTH HC-06

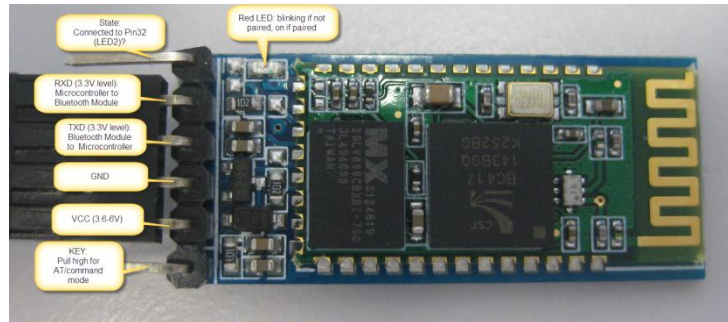


Figure 2.9 : Les broches du module Bluetooth HC-06

Le module Bluetooth HC-06 ajoute une fonction de communication par Bluetooth à la carte Arduino. Il peut ainsi communiquer sans fil à moyenne distance avec n'importe quel autre dispositif Bluetooth, tels que ordinateur, téléphone mobile, second module Bluetooth sur une autre carte Arduino.

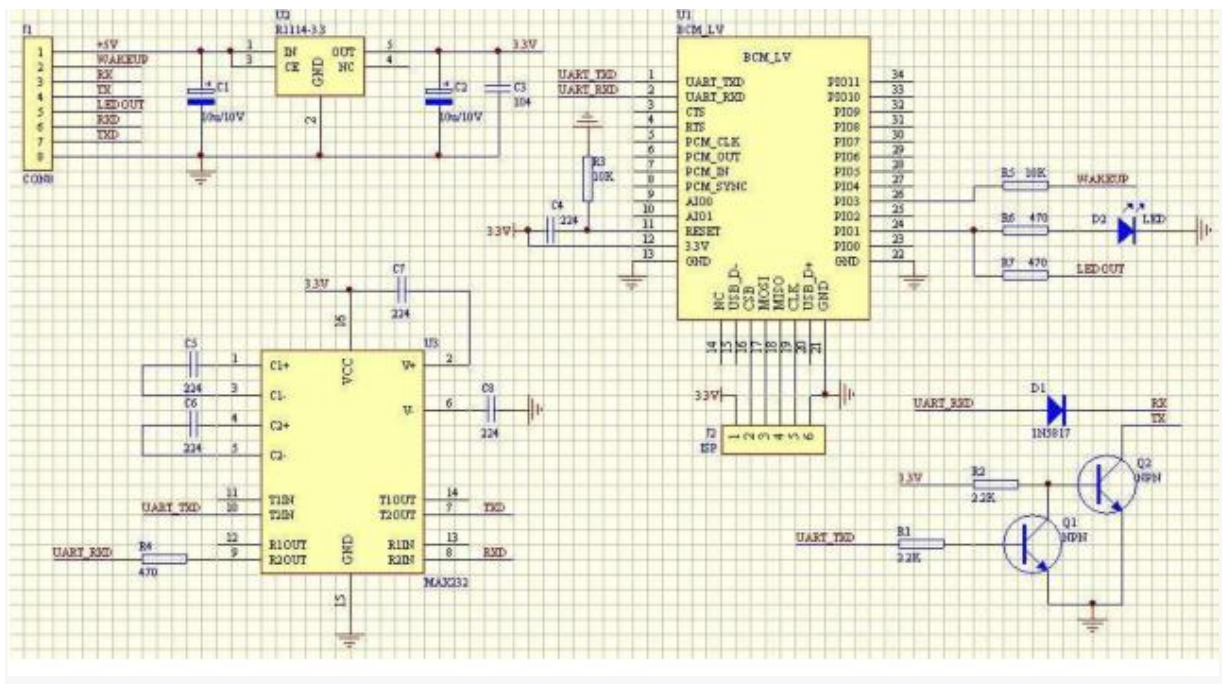


Figure 2.10 : schéma du module Bluetooth HC-06 [19]

2-5-4-1. Caractéristiques :

- Module de type JY-MCU / HC-06 Master.
- Paramétrage par défaut du port série: 9600, N, 8, 1.

- Le baud rate est paramétrable de 4800 à 1382400 bits/s par commande AT, uniquement si le module n'est pas associé, et au maximum à 115200bits/s pour son utilisation avec une carte Arduino.
- Alimentation de 3.3 à 5V DC.
- LED indicatrice : statut de connexion.
- Fonctionnement Bluetooth sur la bande 2.4 GHz, modulation GFSK.
- Le module est fourni avec un mot de passe (1234) modifiable.

2-6. MONTAGE ET PROGRAMMATION DU TELEMETRE

Aujourd'hui, l'électronique est de plus en plus remplacée par l'électronique programmée. On parle d'électronique embarquée ou d'informatique embarquée. Son but est de simplifier les schémas électroniques et par conséquent réduire l'utilisation de composants électroniques, réduisant ainsi le coût de fabrication d'un produit. Il en résulte ainsi des systèmes plus complexes et performants pour un espace réduit.

L'électronique programmée nécessite un ordinateur et un composant programmable. Il existe une variété de composants programmables tels que les microcontrôleurs, les circuits logiques programmables. Nous allons utiliser un Arduino Leonardo qui possède un microcontrôleur ATmega 32u4.

2-6-1. LE LANGAGE DE PROGRAMMATION

Un langage de programmation est un langage permettant d'écrire un ensemble d'instructions, code source, qui seront directement converties en langage machine grâce à un compilateur : c'est la compilation. L'exécution d'un programme Arduino s'effectue de manière séquentielle, c'est-à-dire que les instructions sont exécutées les unes à la suite des autres. Voyons plus en détail la structure d'un programme écrit en Arduino.

2-6-1-1. La structure d'un programme

Un programme Arduino comporte trois parties :

1^{ère} partie : la déclaration des variables (optionnelle).

2^{ème} partie : l'initialisation et la configuration des entrées/sorties : la fonction setup ().

3^{ème} partie : la partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction loop ()

```

programmerArduinoExemple | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
programmerArduinoExemple

1 int brocheCapteur = A0; // selection de la broche sur laquelle est connectée le capteur
  int brocheLED = 13; // selection de la broche sur laquelle est connectée la LED
  int valeurCapteur = 0; // variable stockant la valeur du signal reçu du capteur

2 void setup() {
  // broche de la LED configurée en sortie
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

3 void loop() {
  // lecture du signal du capteur
  valeurCapteur = analogRead(brocheCapteur);
  // allume la LED
  digitalWrite(brocheLED, HIGH);
  // delai de "valeurCapteur" millisecondes
  delay(valeurCapteur);
  // éteint la LED
  digitalWrite(brocheLED, LOW);
  // delai de "valeurCapteur" millisecondes
  delay(valeurCapteur);
}

```

Figure 2.11 : structure d'un programme

Dans chaque partie d'un programme sont utilisées différentes instructions issues de la syntaxe du langage Arduino.

2-6-1-2. Le programme pour la commande du capteur

Comme il est décrit précédemment le module à ultrasons a quatre broches, deux pour l'alimentation et deux pour la commande qui sont le TRIG et l'ECHO. Pour cela, on va programmer la carte Arduino qui joue le rôle d'un microcontrôleur. On branche la broche ECHO à la pin numérique 7 et TRIG à la pin numérique 6.

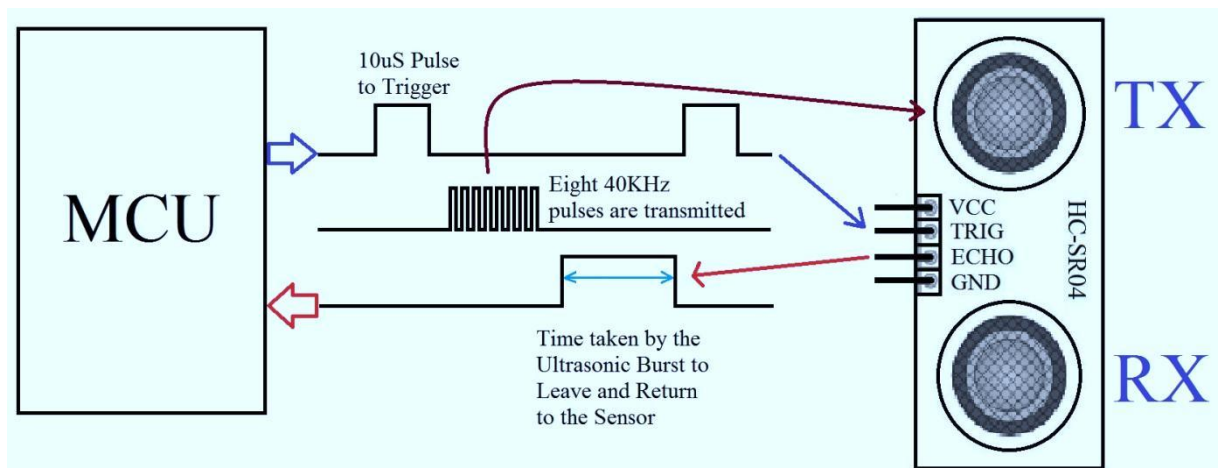


Figure 2.12 : communication détecteur-Arduino

En premier lieu on va déclarer les variables.

```
int trig = 6; // déclare une variable de type 'int' appelée trig et valant 6
int echo = 7; // déclare une variable de type 'int' appelée echo et valant 7
long lecture_echo; // Les variables de type long sont des variables de taille élargie pour le
stockage de nombre entiers, sur 4 octets
long cm; // Les variables de type long sont des variables de taille élargie pour le stockage de
nombre entiers, sur 4 octets
```

Pour la suite, il faut définir la fréquence d'échange qui est en général (9600) bits par seconde et le mode de porte numérique sortie ou entrée dans la fonction `setup()` qui est appelée une seule fois lorsque le programme commence son exécution . C'est dans cette fonction que l'on va écrire le code qui n'a besoin d'être exécuté qu'une seule fois. On appelle cette fonction : " fonction d'initialisation". On y retrouvera la mise en place des différentes sorties et quelques autres réglages.

```
Void setup() //fonction d'initialisation de la carte
{
  pinMode(trig,OUTPUT); /* Configure la broche Trig pour qu'elle se comporte en
  sortie. broche: le numéro de la broche de la carte Arduinodontle mode de
  fonctionnement (entrée ou sortie) doit être défini. mode: soit INPUT(entrée) ou
  OUTPUT(sortie).*/
  digitalWrite(trig,LOW); //Met un niveau logique, LOW(BAS)
  //sur la broche où est connecter Trig.
  pinMode(echo,INPUT); //Configure la broche Echo //pour qu'elle se comporte en entrée.
  Serial.begin(9600); // ouvre le port série et fixe le débit de communication à 9600 bauds.
}
```

Une fois que l'on a initialisé le programme, il faut ensuite créer le " cœur" , autrement dit le programme lui-même. C'est donc dans cette fonction `loop()` où l'on va écrire le contenu du programme. Il faut savoir que cette fonction est appelée en permanence, c'est-à-dire qu'elle

est exécutée une fois, puis lorsque son exécution est terminée, on la ré-exécute et ainsi de suite. On parle de boucle infinie.

Le son se propage à environ 340 mètres par seconde. Cela correspond à environ 29.412µs pour 1 centimètre. Pour mesurer la distance parcourue par le son, nous utilisons la formule: Distance = (Temps x vitesses) / 2. Le "2" est dans la formule parce que le son doit parcourir un aller et retour. D'abord, le son se déplace loin du capteur, puis il rebondit sur une surface et retourne. La méthode retenue pour lire la distance en centimètres est d'utiliser la formule: centimètres = ((microsecondes) / 2/29).

Par exemple, si l'onde ultrasons a pris 100 us (microsecondes) pour un aller-retour, alors la distance est ((100/2) / 29)=100/58 centimètres ou environ 1,7 centimètres.

```
voidloop()
{
    digitalWrite(trig,HIGH);/*Met un niveau logique, HIGH(HAUT)sur la broche où est
    connectéTrig.*/
    delayMicrosecond(10);/*Stoppe le programme pendant 10 microsecondes.*/
    digitalWrite(trig,LOW);/*Met un niveau logique, LOW(BAS) sur la broche où est
    connectéTrig.*/
    lecture_echo=pulseIn(echo,HIGH);/* Lit la durée de l'impulsion niveau HAUT appliquée sur
    la broche Echo qui est configurée en ENTREE. L'instruction pulseIn() attend que la broche
    passe à l'état HAUT, commence alors le chronométrage, attend que la broche repasse au
    niveau BAS et stoppe alors le chronométrage. L'instruction renvoie la durée de l'impulsion en
    microsecondes (1 millions de microsecondes par secondes). L'instruction s'arrête et renvoie 0
    si aucune impulsion n'est survenue dans un temps spécifié. */
    cm = lecture_echo / 58+3; // Calcule la distance en cm
```

2-6-1-3.Le programme pour la commande de l'afficheur LCD

L'afficheur LCD utilise 6 à 10 broches de données ((D0 à D7) ou (D4 à D7) + RS + E) et deux d'alimentations (+5V et masse). La plupart des écrans possède aussi une entrée analogique pour régler le contraste des caractères. Nous brancherons dessus un potentiomètre de 10 kOhms.

Les 10 broches de données peuvent être placées sur n'importe quelles entrées /sorties numériques de l'Arduino, nous indiquerons ensuite dans la librairie "[LiquidCrystal.h](#)" qu'il est branché en un montage à 4 broches de données pour économiser les pins de l'Arduino comme sur la figure ci-dessous.

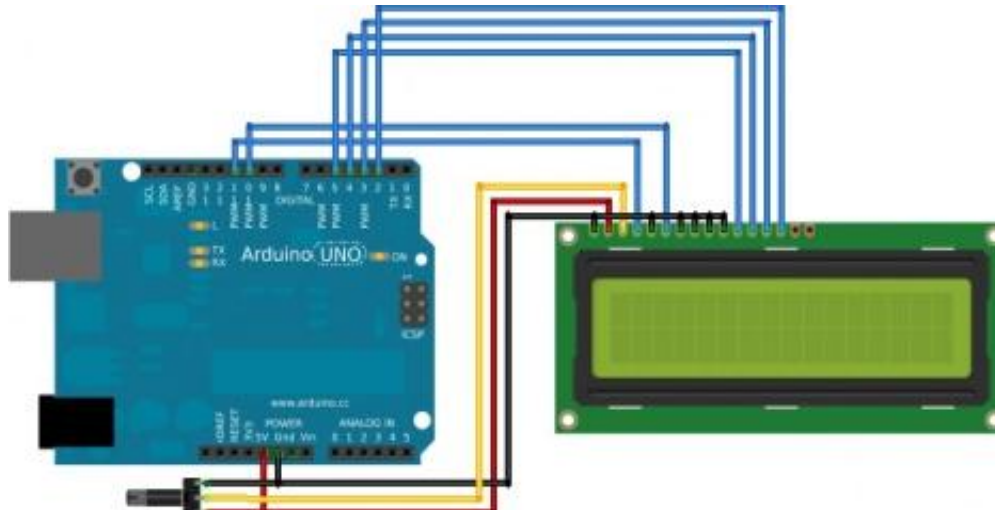


Figure 2.13 : branchement de l'Arduino à l'écran LCD

Nous allons donc commencer par déclarer un objet lcd, de type LiquidCrystal et qui sera global à notre projet. LiquidCrystallcd(rs, enable, d4, d5, d6, d7) où rs est le numéro de la broche où est branché "RS", "enable" est la broche "E" et ainsi de suite pour les données.

```
#include<LiquidCrystal.h>//on inclut la librairie
// initialise l'écran avec les bonnes broches
//LiquidCrystal(rs, enable, d4, d5, d6, d7)
LiquidCrystallcd(4,5,0,1,2,3);
char message [16]=" ";
intrig=6;// déclare une variable de type 'int' appelée echo et valant 6
intecho=7;// déclare une variable de type 'int' appelée echo et valant 7
longlecture_echo;/* Les variables de type long sont des variables de
taille élargie pour le stockage de nombre entiers, sur 4 octets*/
long cm;//variable pour stoquer la disrance
```

Ensuite, dans le setup () il nous faut démarrer l'écran en spécifiant son nombre de colonnes puis de lignes. Cela se fait grâce à la fonction lcd.begin (colonnes, lignes).

```
voidsetup()
{
lcd.begin(16,2);// règle la taille du LCD : 16 colonnes et 2lignes
}
```

Pour afficher du texte comme « la distance est : » et une variable qui est la distance en centimètre on va utiliser la fonction sprintf(). L'instruction sprintf () n'a pas un nombre d'arguments fini. Cependant, elle en aura au minimum deux qui sont le tableau de la chaîne de caractère et une chaîne à écrire.

```
voidloop()
{
if(cm >400)
{sprintf(message,"max = 4 metres");
}else
sprintf(message,"distance %d cm",cm);
lcd.home();//met le curseur en position (0;0) sur le lcd
lcd.clear();//supprimer le message
lcd.write(message);//envoi le message sur l'écran
delay(1000);//attend une seconde }
```

2-6-1-4.La communication Arduino-android

Dans le cas où on n'a pas d'afficheur LCD ou si on veut séparer le module de commande du module d'affichage, on peut utiliser une communication Bluetooth entre notre télémètre et n'importe quel appareil Bluetooth (portable, ordinateur...)

Comme la plupart des gens possède un téléphone portable sous android on va créer une communication pour donner à notre téléphone la possibilité de commander et d'afficher les résultats. Pour cette application on va utiliser le module Bluetooth HC-06 décrit précédemment est cela avec l'utilisation d'une communication série.



Figure 2.14: communication Arduino avec téléphone

Pour se connecter en Bluetooth au Smartphone, l'utilisation d'une librairie a été nécessaire.

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerialmySerial(10,9);// RX, TX
```

En effet, ce module est vendu avec une librairie qui est nécessaire à son bon fonctionnement, elle contient notamment une fonction qui permet de s'authentifier et de se connecter à un autre périphérique Bluetooth. Cette fonction appelée au tout début du programme se divise en trois phases :

- le paramétrage du module, dans fonction setup ()

```
MySerial.begin(9600);// ouvre le port série et fixe le débit de
//communication à 9600 bauds.
```

- la mise en attente de connexion,
- le déversement du buffer.

Quand la fonction est terminée, même si le module n'est toujours pas connecté, il va se mettre en attente jusqu'à ce qu'un Smartphone se connecte.

2-7. CONCLUSION

Le principe de fonctionnement du module à ultrasons est assez simple, il fonctionne dans la plage de mesure allons de 2cm à 400cm avec un affichage qui se fait sur un écran LCD.

Ce télémètre répond à notre cahier de charges, on lui a ajouté un module Bluetooth pour la communication à distance et un buzzer pour exprimer l'information de distance sous forme de son avec une amplitude et une fréquence proportionnelle à la distance.

Enfin, ce projet a été très instructif, il nous a permis de mettre en pratique nos connaissances sur la programmation en Arduino et d'en acquérir de nouvelles, particulièrement sur la partie électronique embarquée comme la communication Bluetooth avec un Smartphone.

PARTIEB :

TELEMETRIE LASER

INTRODUCTION

Un télémètre laser est un dispositif qui permet d'effectuer des mesures de distance ou de vitesse sans contact, avec une grande résolution spatiale.

Un télémètre laser est un système de télédétection actif, au même titre que le radar, avec la particularité de permettre la mesure d'une distance avec une forte résolution spatiale. Le radar utilise un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde λ de l'ordre du cm. La divergence minimale pouvant être obtenue à la sortie d'un émetteur est limitée par la diffraction à λ/D où D est le diamètre de l'antenne. L'utilisation des ondes optiques, la longueur d'onde λ est de l'ordre du μm , permet de réduire la divergence du faisceau pour une surface d'émission donnée d'un rapport allant de 10^4 à 10^5 . Cela permet ainsi de localiser précisément la mesure.

Les premiers domaines d'application des télémètres étaient à l'origine militaires et scientifique, une des premières applications consistait à mesurer la distance séparant notre planète de la lune. Le développement des sources laser à semi-conducteurs, plus communément connues sous le nom de diodes laser, a largement contribué, grâce à leur faible coût, leur large diffusion, leurs faibles dimensions, leur facilité d'emploi, au développement des dispositifs de télémétrie pour les domaines d'applications industriels et civils. Par exemple, l'utilisation d'un télémètre disposé à l'avant d'une automobile a été envisagé comme système d'anticollision : le télémètre détecte tout objet se trouvant sur la trajectoire du véhicule et évalue sa distance, cette information peut alors être transmise au conducteur. Un télémètre, installé sur le pont d'un bateau, peut être utilisé pour l'aide à la navigation côtière ou fluviale. De nombreuses applications, dans le domaine des transports, où l'évaluation des distances est importante, peuvent encore être imaginées. Dans le domaine de la géologie et de la topographie, un outil comme le télémètre laser facilite les relevés de terrain. Les activités de loisirs sont également concernées. En effet, certaines enseignes de sports proposent à leurs clients chasseurs ou golfeurs des télémètres laser portables pour les aider dans la pratique de leur activité.

Chaque application possède des contraintes liées à la nature de la mesure. Pour un système d'anticollision automobile, par exemple, il n'est pas forcément nécessaire d'obtenir une mesure de distance avec une précision de l'ordre du centimètre, par contre des cibles éloignées de quelques centaines de mètres doivent être détectées, de plus la fréquence ou la cadence des mesures doit être importante en particulier lorsque la vitesse relative des objets

sur la trajectoire du véhicule est élevée.

Dans le cas d'un relevé topographique, la précision désirée est quelquefois importante, de l'ordre du millimètre un délai de quelques secondes, avant la fourniture d'une mesure est acceptable. Dans le cas d'une application d'imagerie en trois dimensions, les objets peuvent être éloignés de plusieurs centaines de mètres, la restitution des détails de l'objet nécessite une bonne précision, de l'ordre du centimètre, et la cadence des mesures doit être la plus rapide possible : le temps mis pour la capture d'une image doit être raisonnable sachant que le nombre de mesures donne la résolution de celle-ci. Mis à part le coût du dispositif, nous pouvons donc différencier trois spécifications techniques pour la conception d'un système de télémétrie laser : la portée, la précision et la cadence des mesures.

CHAPITRE 3 :
ETAT DE L'ART D'UN
TELEMETRE LASER

3-1) INTRODUCTION

L'ensemble des systèmes de télédétection utilisant un laser sont généralement regroupés sous les acronymes anglophones « LIDAR », qui signifie « Light Detection And Ranging », ou « LADAR », qui signifie « Laser Detection And Ranging ». Sous ces désignations se cachent en réalité une multitude de techniques et de systèmes. Il est par exemple possible d'analyser la structure spatiale fine de l'atmosphère, de mesurer des champs de concentration d'espèces chimiques dans des domaines comme la mesure de la pollution ou l'étude d'accidents graves dans le domaine nucléaire. Nous nous limiterons dans cette partie aux systèmes de télédétection dont l'objectif est de réaliser une mesure de distance : les télémètres. L'ensemble de ces systèmes peut être scindé en deux familles utilisant chacune un principe de détection différent : la détection cohérente (figure 3-1) et la détection directe (figure 3-2).

Il existe, en général, dans tous les systèmes de télémétrie, un bloc d'émission comportant une source laser modulée et une optique de mise en forme du faisceau, un bloc de réception constitué d'un photodétecteur et d'une optique de réception, et enfin, un bloc dédié au traitement adapté des signaux qui délivrent l'information de distance. Dans le cas de la détection cohérente la puissance et la phase de l'onde lumineuse interviennent dans le mécanisme de la détection, une partie du signal émis est prélevée et directement envoyée sur le photodétecteur et vient se mélanger avec le signal en provenance de l'objet.

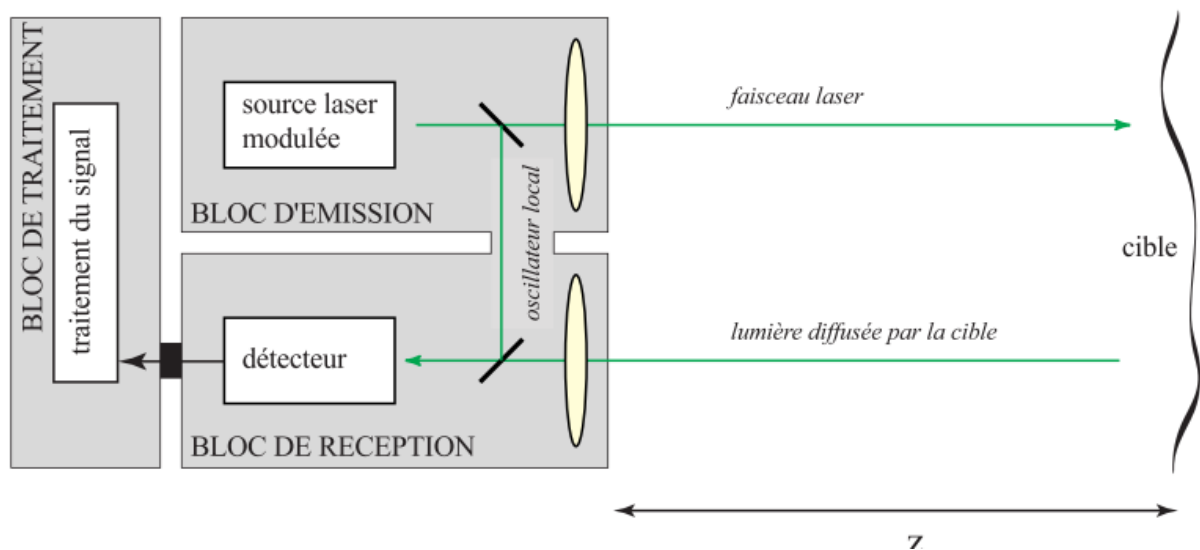


Figure 3-1: Schéma de principe d'un télémètre à détection cohérente

Dans le cas de la détection directe, le photo-détecteur fournit un signal électrique proportionnel à la puissance de l'onde lumineuse en provenance de l'objet.

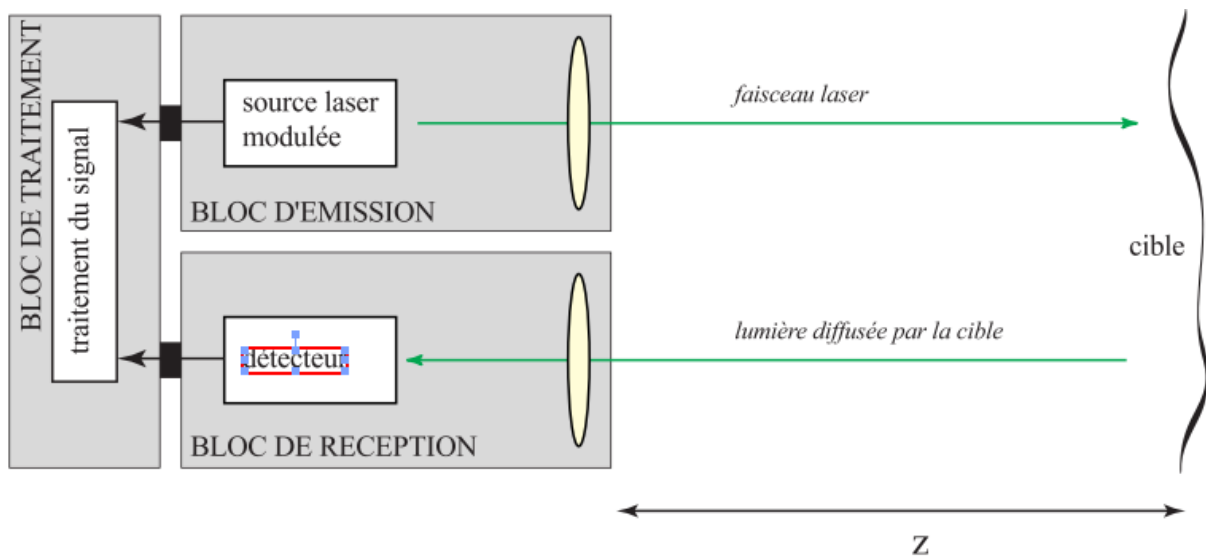


Figure3-2: Schéma de principe d'un télémètre à détection directe

Dans les deux architectures, le signal de modulation du laser permet de coder l'intensité, la fréquence ou encore la phase de l'onde lumineuse. Ce codage et le traitement du signal déterminent les performances du système en termes de précision et de cadence. La portée est limitée par le rapport signal sur bruit du bloc de réception. Le calcul du rapport signal sur bruit pour des systèmes utilisant une détection directe et une détection cohérente a été réalisé par divers auteurs.

Dans cette partie, après avoir donné les définitions relatives aux performances des capteurs en général, nous définirons les signaux et détaillerons les performances attendues dans le cas particulier des télémètres. Nous décrirons ensuite plus en détail, les différents types de télémètre laser avec leur avantage et leur inconvénient.

3-2 GÉNÉRALITÉS SUR LES CAPTEURS

Un télémètre laser est donc constitué de différentes parties qui peuvent être considérées indépendamment les unes des autres ou au contraire de façon globale. L'approche sous la forme d'un système complet revient à représenter un télémètre comme un capteur de distance intelligent qui fournit une information de distance suite à une excitation électro-optique. Par conséquent, en considérant tout d'abord le télémètre en tant que système, nous commençons notre présentation par quelques définitions relatives aux capteurs dont nous aurons besoin par la suite.

3-2.1 DEFINITION D'UN CAPTEUR

Un capteur est un système qui transforme un stimulus, à priori de nature physique quelconque, en un signal électrique, image de la réponse au stimulus. Nous limitons notre définition aux capteurs délivrant une grandeur de sortie électrique. Le signal électrique peut être par la suite caractérisé par son amplitude, sa fréquence, sa densité spectrale, sa phase, son énergie ou sa puissance.

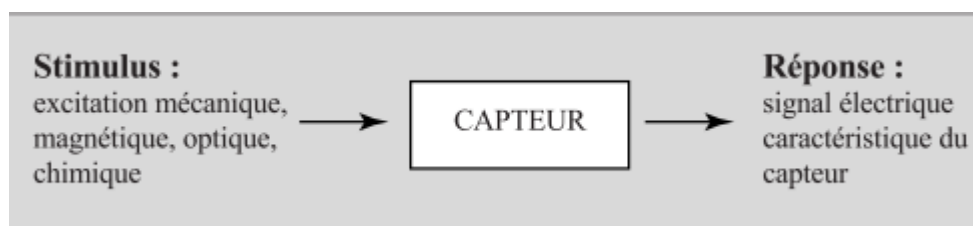


Figure 3-3: Représentation d'un capteur

Un capteur appartient généralement à un système complet, comportant d'autres capteurs, des conditionneurs ou transducteurs, des filtres, des codeurs, des actionneurs et un système d'acquisition des données mesurées. De plus, la tendance actuelle s'oriente vers une intégration de plus en plus poussée des éléments de traitement numérique des données dans le capteur proprement dit. Les capteurs deviennent progressivement intelligents : la réponse n'est plus un simple signal électrique mais une information issue de ce signal en vue de son utilisation.

3-2-2 PROPRIETES D'UN CAPTEUR

Des grandeurs caractéristiques communes à tous les types de capteurs ont été définies afin de pouvoir comparer leurs performances plus aisément.

3-2-2-1. précision d'un capteur

La précision est représentée par l'écart entre la sortie réelle du capteur et la valeur idéale de cette sortie. Elle est d'autant meilleure que cet écart est faible. Le terme d'erreur est également employé pour quantifier la précision à travers l'évaluation numérique de l'écart.

Les erreurs peuvent avoir des origines diverses, soit elles sont liées au capteur, soit elles dépendent de l'environnement. Elles peuvent être séparées de la façon suivante :

-*Erreur systématique*: l'erreur prend une valeur identique pour une cause donnée, c'est à priori l'erreur due à un défaut reproductible du système ou capteur, et par conséquent,

elle peut être corrigée lors d'un étalonnage.

-*Erreur aléatoire (au sens mathématique)* : son influence peut être réduite en augmentant le nombre de mesures. En effet, l'incertitude sur la mesure se traduit par la probabilité que la grandeur de sortie, par exemple la distance z , soit comprise entre $z-\epsilon$ et $z+\epsilon$ à 95% près. Si la distribution de probabilité est normale d'écart-type alors $\epsilon = 2 \delta$

-*Erreur liée à l'environnement* : elle traduit l'influence de paramètres extérieurs tels que la température, le degré d'hygrométrie, la présence de champ électromagnétique. Il est parfois nécessaire de protéger le capteur contre ces grandeurs d'influence.

Dans tous les cas, il est nécessaire de tenir compte de toutes les sources d'erreurs afin de connaître la précision du système.

- **Résolution:** La résolution est déterminée par le plus petit incrément du stimulus qui peut être détecté en sortie. Il s'agit en fait de la capacité de distinguer deux valeurs de stimulus très proches l'une de l'autre.
- **Sensibilité:** La sensibilité caractérise la capacité à fournir une forte variation de la grandeur de sortie S pour une faible variation de la grandeur d'entrée E . Elle est représentée par un coefficient de sensibilité s donné par la pente dS/dE .
- **Etendue de mesure:** L'étendue de mesure est l'écart entre les valeurs extrêmes que peut fournir le capteur.
- **Linéarité:** La linéarité caractérise la qualité de la mesure pour un capteur donnant comme grandeur de sortie une fonction linéaire de l'entrée.
- **Reproductibilité:** La reproductibilité traduit la capacité à reproduire une sortie donnée pour une entrée donnée, dans les mêmes conditions de mesure. Dans le cas où les résultats issus des mesures sont dispersés, il est possible de définir une erreur de fidélité du capteur.

•

3-3.PROPRIÉTÉS DES SIGNAUX TÉLÉMÉTRIQUES

Nous présentons ici les signaux télémétriques à partir desquels la mesure de distance est possible.

3-3-1. SIGNAL EMIS

Comme nous l'avons vu précédemment, en télémétrie, le signal de modulation appliqué au laser permet de coder l'intensité, la fréquence ou la phase de l'onde électromagnétique émise. Dans le cas des radars, la fréquence de cette onde électromagnétique appelée porteuse, est de l'ordre de quelques kHz à plusieurs GHz.

La fréquence de la porteuse dans le visible et le proche infrarouge est de quelques centaines de THz.

$$E_t(t) = s(t) \times \exp[2j \pi f t] \quad (3.1)$$

3-3-2.SIGNAL REÇU

Supposons une cible ponctuelle, située à la distance z_0 à l'origine des temps et animée d'une vitesse radiale v constante, positive en rapprochement. La cible rétrodiffuse une partie de l'énergie émise par le signal $E_t(t)$. Le signal reçu à un instant t est égal au signal émis, affecté d'un coefficient d'atténuation et retardé d'un temps τ .

3-3.3 DETECTION DE SIGNAUX OPTIQUES

L'effet photoélectrique est le mécanisme le plus utilisé pour détecter les signaux optiques. Cet effet n'est pas instantané mais possède un temps caractéristique t_c de l'ordre de 1ns dans les semi- conducteurs.

Lorsque la détection est directe, l'information de phase est perdue car la réponse du récepteur est quadratique et lente par rapport à la fréquence optique. Nous allons maintenant nous intéresser aux limites fondamentales d'un système de télémétrie laser en termes de précision et de portée.

3-4.PRÉCISION DES MESURES

En télémétrie la précision d'une mesure est principalement liée à deux incertitudes. La première notée δ_{sys} est systématique et liée aux instruments et méthodes de mesure et donc dépendante du système. Par exemple, si la grandeur mesurée est une distance z avec une erreur systématique δ_z , alors la valeur réelle de la distance est donnée par $z + \delta_z$. De plus, si plusieurs erreurs systématiques viennent se superposer il suffit d'en ajouter leur valeur en tenant compte de leur signe.

La seconde notée $\delta_{aléa}$ est aléatoire, si l'on considère n effets indépendants générant $\delta_{aléa}$, il vient :

$$\delta_{aléa} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \sigma_i^2} \quad (3.2)$$

Dans les deux prochains paragraphes, nous allons mentionner les principales sources d'erreurs systématiques et aléatoires intervenant dans les systèmes télémétriques.

3-4.1 ERREURS SYSTEMATIQUES

3.4.1.1 Géométrie

Nous avons vu dans l'introduction de cette partie que les systèmes télémétriques étaient composés de module d'émission et de réception. La distance entre les axes des deux modules est notée « b » et la distance entre le télémètre et la cible est notée « z » dans la *figure 3.8*, alors la distance mesurée s'écrit :

$$\frac{1}{2}(z + \sqrt{z^2 + b^2}) \quad (3.3)$$

En général, cette erreur systématique est négligée pour des distances importantes. Par exemple, pour une cible à 50m et un entre-axe de 10 cm la distance mesurée est surestimée de 100 μ m.

3-4.1.2 Taille du faisceau sur la cible et inclinaison de la cible

Jusqu'à présent, nous avons supposé que le faisceau était ponctuel. En pratique, dans le cas d'une cible quelconque, cette hypothèse est rarement vérifiée. La surface de la cible peut être inclinée par rapport au faisceau ou encore irrégulière avec des discontinuités. Cette réalité induit des distorsions plus ou moins importantes sur les signaux. Plus la tâche sur la cible sera importante plus les signaux seront sujets à ces distorsions. Ces effets peuvent introduire, selon la méthode de traitement utilisée, une erreur supplémentaire.

Par exemple dans le cas d'un télémètre temps de vol, l'incidence du faisceau sur un plan incliné aura pour effet d'élargir les impulsions. L'utilisation d'une détection à seuil sur le front de montée de l'impulsion aura donc pour effet de sous-estimer la distance mesurée.

Les dimensions de la tâche laser sur la cible limitent donc le sens du mot « précision ». De plus, contrairement à l'erreur géométrique qui est parfaitement connue, cette erreur est dépendante des caractéristiques de la cible à priori inconnues et n'est donc pas compensable. Il faut ajouter que cette erreur est beaucoup moins importante que pour les radars, le faisceau laser ayant un pouvoir de localisation de la mesure bien supérieur. Par exemple, pour un faisceau avec une divergence de 0,1mrad, la tâche laser sur une cible à 50m a un diamètre de 5mm : la précision est limitée à cette valeur.

3-4.2 ERREURS ALEATOIRES

3-4.2.1 Erreur due à la turbulence atmosphérique

La formule 3.1 est utilisée pour déterminer la distance du télémètre à la cible en fonction du temps de vol et de la vitesse de la lumière. Cette formule a été écrite dans l'hypothèse où le milieu traversé par le faisceau laser est le vide. Or l'indice de l'air n'est pas parfaitement égal à 1 et peut également varier le long du chemin optique : la valeur de l'indice de réfraction n est dépendante des conditions de température et de pression variant localement dans l'atmosphère. La formule (5.1) s'écrit alors :

$$\tau = \frac{2\bar{n}Z}{c} \quad (3.4)$$

Où $\bar{n}=1,003$ représente l'indice moyen le long du trajet optique.

3-5. MESURES DES TÉLÉMÈTRES

Le but principal des radars est de déterminer en premier lieu l'absence ou la présence d'une cible, puis dans un deuxième temps d'estimer sa position et éventuellement sa vitesse : c'est également le cas des télémètres lasers. Dans ce paragraphe nous nous intéresserons tout d'abord au premier de ces objectifs : la détection d'une cible. En effet, comme nous le verrons plus loin, le signal reçu est perturbé par un bruit dont l'origine provient du capteur lui-même et de son environnement. Cette perturbation additionnée au signal peut induire une mesure erronée ou encore une non-mesure. Il convient de choisir un seuil de détection tel que les probabilités de mesure erronée ou de non-mesure soit minimisées.

Nous verrons que la valeur de ce seuil participe à la détermination d'une caractéristique importante des télémètres : la portée.

3-5-1. DETECTION DE CIBLES

Le problème de détection est un problème de décision statistique

: à partir d'une expérience (la

réception), le télémètre doit prendre une décision concernant la présence ou l'absence de

cible. Pour résoudre ce problème nous élaborons un critère de décision

qui détermine l'appartenance à l'une ou l'autre des hypothèses. L'observation considérée s'écrit

$$y = s + b \quad (3.5)$$

Où « s » et « b » représentent respectivement le signal utile et le bruit.

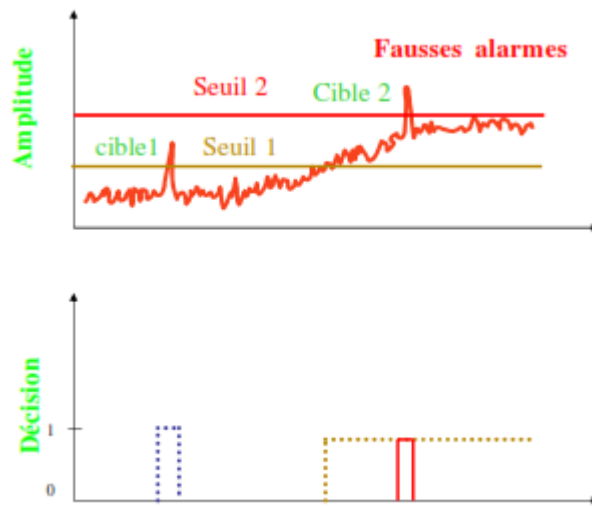


Figure 3.4: principe Constant False Alarm Rate (CFAR)

Deux hypothèses doivent être alors envisagées :

$$H_{yp1}: y = b \quad \text{lacible n'est pas présente} \quad (3.6)$$

$$H_{yp2}: y = s + b \quad \text{lacible est présente} \quad (3.7)$$

3-5-2. PORTEE

Nous avons vu précédemment que le rapport signal sur bruit joue un rôle déterminant dans les performances en termes de précision et en termes de détection des télémètres. La portée théorique d'un système de télémétrie se calcule à partir du rapport signal sur bruit noté $RSB(z)$, en général, l'amplitude du signal de retour dépend de la distance z de la cible. Si RSB_0 est le seuil que l'on s'est fixé au préalable, la portée maximale z_{MAX} est déterminée en résolvant une équation du type :

$$RSB(z_{max}) = RSB_0 \quad (3.8)$$

Jusqu'à présent, notre démarche était assez générale et ne dépendait pas en particulier des paramètres de l'élément et de l'environnement du télémètre. Or une connaissance préalable de tous les paramètres du système est nécessaire pour réaliser le calcul du rapport signal sur bruit. En effet, la plupart des bruits dépendent de l'élément et de l'environnement du télémètre. C'est le cas

par exemple du bruit ambiant causé par le rayonnement solaire, des fluctuations de signaux dues à la turbulence atmosphérique et à la granularité laser, ou bien encore le bruit généré par le photodétecteur

et l'amplificateur électronique.

3-6. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE LA TELEMETRIE LASER

Il existe différents types de télémétrie laser. Chaque système utilise une optique d'émission où la lumière est créée et également modulée. On observe ensuite une étape de traitement de la lumière du laser où le faisceau est colimaté. En dernier lieu, ces systèmes utilisent une optique de réception où une photodiode permet de transformer le signal optique en signal électrique qui va nous permettre d'effectuer le traitement du signal afin de déterminer la mesure de la distance. Pour chaque type de système, on utilise le rapport signal sur bruit qui provoque une difficulté lors de l'analyse du signal détecté. Pour la détection de ce signal, une photodiode PIN sera utilisée.

On va maintenant présenter les types de télémètres et choisir celui qui va nous permettre de répondre au cahier de charges.

3-6-1. TELEMETRIE IMPULSIONNELLE

La télémétrie impulsionnelle à détection directe ou télémétrie temps de vol à un fonctionnement identique à celui d'un radar à impulsions. Dans ce type de télémètre, on s'intéresse seulement au domaine temporel. En effet, on émet une impulsion sur la cible qui est alors réfléchi et lorsque cette dernière est détectée par l'optique de réception (photodiode), on en déduit la distance entre la source et la cible notée d_{cible} à l'aide de la relation suivante :

$$d_{cible} = \frac{c}{2} t_{A-B} \quad (3.10)$$

Où le terme t_{A-B} est le temps aller-retour mis par l'impulsion, le terme 'c' représente la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹) et enfin la division par 2 est due au trajet aller-retour et elle permet donc de revenir directement à la distance source-cible.

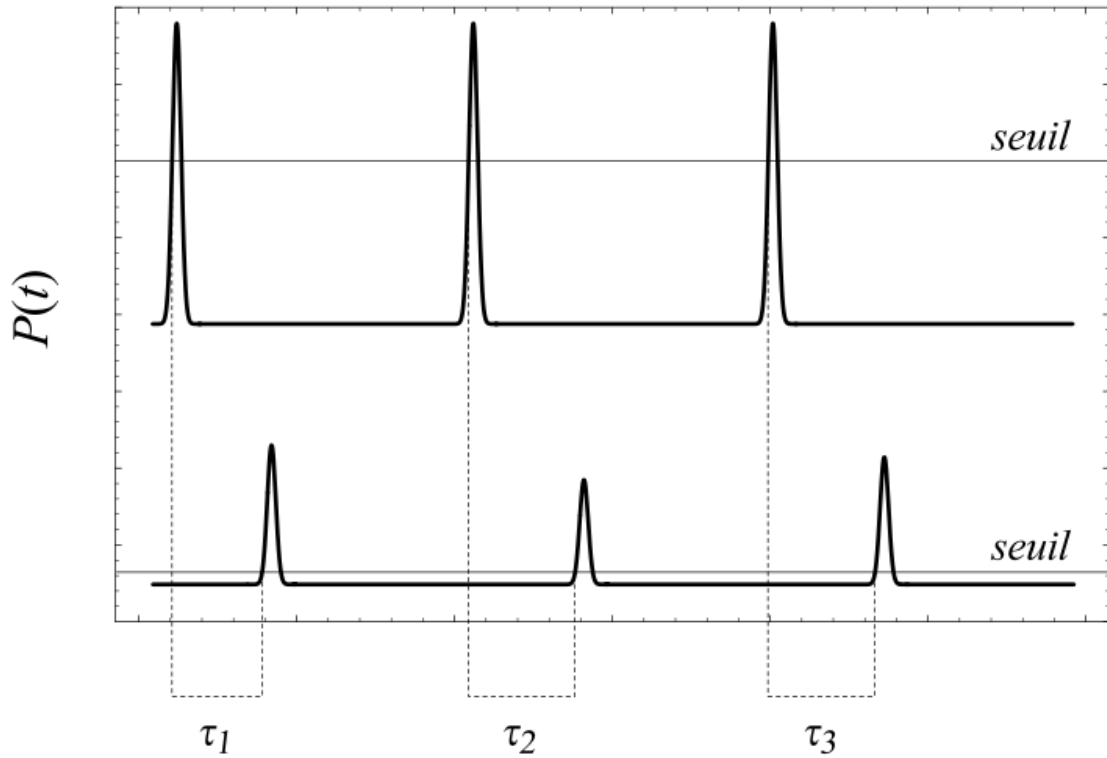


Figure 3.5: Exemple de chronogramme en télémétrie temps de vol [12]

La figure 3.5 permet d'observer le signal dans le domaine temporel. En se basant sur le cahier de charges, nous pouvons définir la valeur de chaque terme à mettre en place et donc décider si ce système est réalisable ou non. On rappelle que la résolution notée Δx doit être de : 1 cm et que le télémètre doit être capable de mesurer une distance de quelques mètres.



Figure 3.5: Signal émis du laser dans le domaine temporel

Le pouvoir discriminatoire d'un tel système est sa capacité à distinguer 2 cibles à 1 cm de distances. Autrement dit, la résolution, il est donnée par la relation suivante où le terme est la durée d'une seule impulsion :

$$\Delta x = \frac{c\tau}{2} \Rightarrow \tau = 66.6 \text{ ps} \Rightarrow f = 15 \text{ GHz} \quad (3.11)$$

Où f est la fréquence de notre horloge.

La portée maximale du système noté x est donnée par la relation suivante où le terme T_p est la durée entre deux impulsions consécutives. Si on fixe une portée maximale de 10 m alors on devra émettre à une fréquence de :

$$x = \frac{c}{2} T_p \Rightarrow T_p = 66.6 \text{ ns} \Rightarrow f_p = 15 \text{ MHz} \quad (3.12)$$

Il faut donc moduler au maximum la puissance du laser à 15 MHz seulement il est possible de diminuer la fréquence de modulation. En effet si la fréquence de modulation diminue la portée maximale va augmenter ce qui ne pose pas de problème au niveau du cahier de charges. On module alors le faisceau du laser on parle alors de modulation externe.

En conclusion ce système est limité en résolution, le temps de réponse de la photodiode peut également être un frein à sa réalisation dû à la très courte durée des impulsions. Pour répondre au cahier de charges il faudrait mettre en place une durée d'impulsion de 66,6 ps, donc une horloge qui travaille à 15 GHz ce qui est irréaliste avec le matériel disponible en plus son coût excessif.

3-6-2. TELEMETRIE A DEPHASAGE DE MODULATION

Le télémètre à détection synchrone utilise une émission optique et une réception distinctes. Le laser émet une lumière qui subit une modulation externe sinusoïdale. Une modulation externe de la puissance du laser permet de s'affranchir de certains phénomènes optiques. Pour réaliser cette modulation on peut utiliser un modulateur électro-acoustique ou électro-optique. La puissance du laser modulée en amplitude à basses fréquences subit un déphasage proportionnel à la distance aller-retour entre la source et la cible. On observe sur la figure 3.6 le schéma optique d'un télémètre à déphasage de modulation d'amplitude.

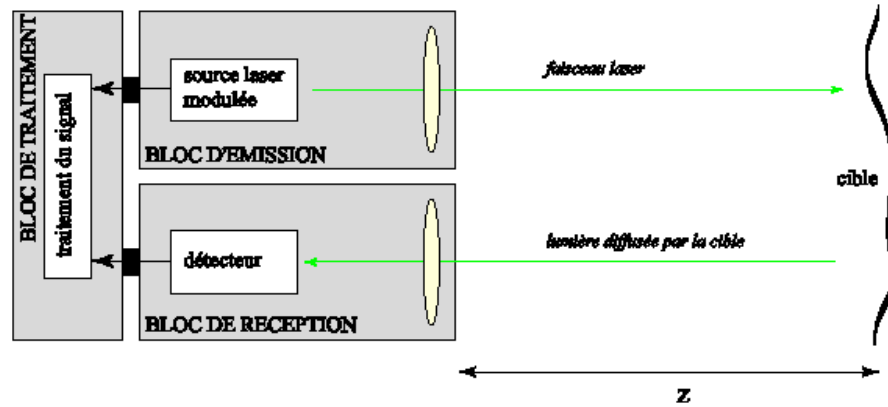


Figure 3.6: Schéma de principe d'un télémètre à détection synchrone [13]

Le signal de puissance P_0 émis par le laser est modulé sinusoïdalement avec la fréquence f_m où :

$$P(t) = P_0 \sin(2\pi f_m t) \quad (3.13)$$

Soit le signal reçu par la photodiode où d est la distance entre la source et la cible et le facteur 2 représente le trajet aller-retour :

$$P_s(t) = P_0 \sin\left(2\pi f_m \left(t - 2\frac{d}{c}\right)\right) \quad (3.14)$$

On compare ensuite le signal détecté sur la photodiode avec le signal de référence de l'émission, pour cela on multiplie les deux signaux dans le domaine temporel et on utilise les relations trigonométriques et on obtient la relation suivante :

$$P_s(t) P(t) = \frac{P_0}{2} [\cos(\Delta\Phi) - \cos(2\pi f_m t - \Delta\Phi)] \quad (3.15)$$

La dernière étape consiste à filtrer de façon à ce qu'il ne reste seulement que la composante continue du signal qui contient l'information sur le déphasage. Il est donc possible de déterminer la valeur de la distance entre la source et la cible. La relation du déphasage fournie par la détection synchrone est donc :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi d f_m}{c} \quad (3.16)$$

$$P_{\text{sortie}} = \frac{P_0}{2} \cos(\Delta\phi) \quad (3.17)$$

On détermine alors la fréquence de modulation idéale permettant de répondre au cahier de charges. Considérons une distance maximale de 10 m et la résolution égale à 1 cm. La distance maximale sera détectée lorsque le déphasage sera égal à 2π .

$$\Delta\phi = 2\pi \text{ et } d = 10 \Rightarrow f_m = 15 \text{ MHz} \quad (3.18)$$

$$\Delta R = 1 \text{ cm et } f_m = 15 \text{ MHz} \Rightarrow \Delta\phi = 6.28 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 0.35^\circ \quad (3.19)$$

Ce type de télémétrie est tout à fait réalisable, une modulation de 15 MHz est réalisable sans un coût excessif ; de plus le système permet de détecter deux cibles distinctes de 1 cm sans trop de difficulté. Sa limitation vient du rapport signal sur bruit. De plus lorsque $\Delta\Phi$ est supérieur à 2π il y a ambiguïté, il faut donc bien définir le cahier de charges du système.

3-6-3. TELEMETRIE A MODULATION LINEAIRE DE LA FREQUENCE OPTIQUE

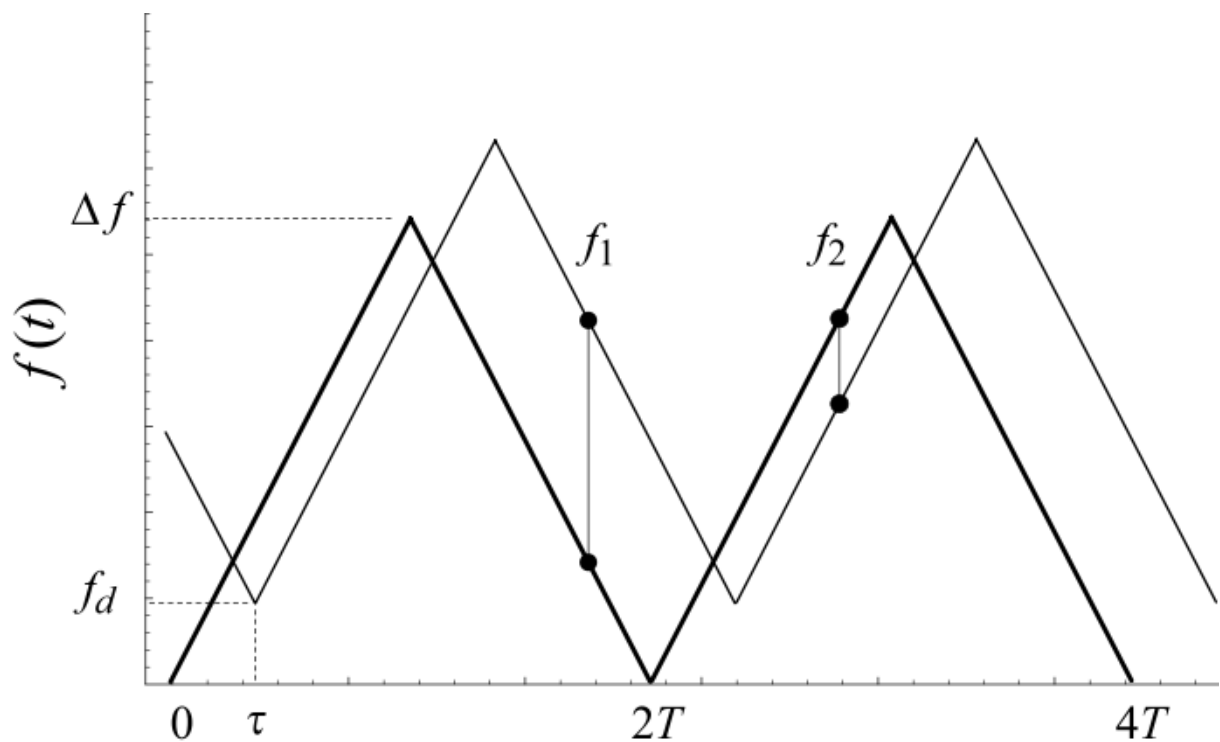


Figure 3.7: Exemple de modulation utilisée en télémétrie FMCW [14]

La modulation de la fréquence optique utilisée en télémétrie FMCW est décrite schématiquement sur la figure 5.7. Un balayage de fréquence en forme de double rampe est mis en œuvre pour réaliser une mesure de l'effet Doppler. La différence fondamentale avec la télémétrie impulsionnelle à

détection cohérente provient du fait que l'information de distance est obtenue dans le domaine fréquentiel. Le principe de la télémétrie FMCW consiste à faire interférer le signal de réception avec une partie du signal émis à mesure des battements résultants. Si l'objet est en mouvement, les fréquences de battement obtenues par interférence de l'onde de référence et de l'onde du signal s'écrivent :

$$\begin{cases} f_1 = \Delta f \cdot \frac{2z}{cT} - \frac{2v}{\lambda} \\ f_2 = \Delta f \cdot \frac{2z}{cT} + \frac{2v}{\lambda} \end{cases} \quad (3.20)$$

La mesure des fréquences f_1 et f_2 permet de déterminer la distance z et la vitesse v de l'objet pour autant que ces deux quantités ne varient pas de manière significative pendant le temps de la mesure. L'obtention de z est immédiate à partir des relations (3.20) qui forment un système de deux équations à deux inconnues. L'avantage de cette technique est l'obtention d'une résolution en distance inférieure à $\lambda/4$.

Les premiers lidars utilisant un balayage de la longueur d'onde ont été réalisés avec des lasers CO₂ émettant à 10,6 μm . À cette longueur d'onde, les problèmes d'alignement et les fluctuations sont moins critiques qu'au proche infrarouge. On va maintenant présenter le dernier type de télémétrie laser, c'est ce dernier système que nous allons utiliser.

3-6-4. LA TRIANGULATION

La télémétrie laser à triangulation n'est pas, à priori, une méthode de mesure telle que nous l'avons définie précédemment dans ce chapitre. En effet, elle n'utilise pas un paramètre de modulation de la source laser mais des informations géométriques. Cependant, de nombreux capteurs utilisant cette méthode sont commercialisés.

Le principe consiste à transformer l'information de distance longitudinale en un décalage transversal du faisceau rétrodiffusé. La mesure s'effectue alors en repérant cette position à l'aide d'un détecteur multipoints de type barrette CCD, barrette de photodiodes, ou une photodiode sensible à la position PSD.

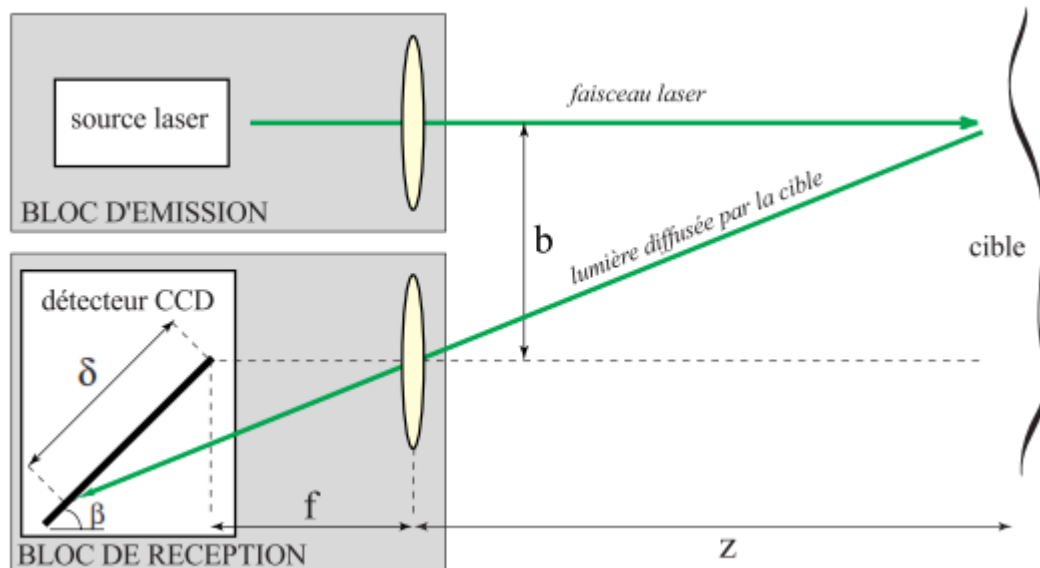


Figure 3.8 : Principe de la mesure de distance par triangulation. [13]

Une source laser émet un faisceau traversant une lentille de collimation à une distance intermédiaire dans la gamme de mesure du télémètre. Un système optique de réception focalise le spot laser rétrodiffusé par la cible sur une barrette CCD ou une PSD. L'axe optique de l'ensemble de réception est parallèle à l'axe d'émission de la diode laser par souci de simplicité, mais peut éventuellement être incliné pour optimiser la formation de l'image sur la CCD. De même, la barrette CCD peut être inclinée d'un angle β sur la figure 3.8 par rapport à l'axe optique pour optimiser la profondeur de champ du système optique de réception.

Dans ce cas, on montre facilement que :

$$\beta = \text{Arctg} \left(\frac{b}{f} \right) \quad (3.21)$$

Avec f distance focale de la lentille convergente.

Le point laser rétrodiffusé par la cible et imagé sur la CCD sera repéré à une position dépendant de la distance z de la cible à la lentille. On trouve rapidement z :

$$z = f \left(1 + \frac{b}{\delta \sin \beta} \right) \quad (3.22)$$

La relation n'est pas linéaire et la précision n'est donc pas constante avec la distance. En première approximation, c'est à dire sans tenir compte de la défocalisation ni des aberrations (coma et distorsion) il vient :

$$\Delta_z = \frac{f \cdot b}{\sin \beta} \frac{\Delta_\delta}{\delta^2} \quad (3.23)$$

Ce type de capteur est donc plus précis pour les distances les plus courtes. On trouve à l'heure actuelle des barrettes CCD à 4096 pixels, voire 8192 pixels, ce qui permet d'obtenir une bonne résolution. Il est de plus possible d'améliorer la résolution en utilisant un traitement du signal approprié. Par ailleurs, ces détecteurs peuvent accumuler le signal sur des durées variables, ce qui permet d'augmenter le rapport signal sur bruit et détecter de très faibles flux, donc d'obtenir des portées intéressantes avec des sources lumineuses peu puissantes. La difficulté principale réside dans l'optique de réception qui doit généralement être assez ouverte pour récupérer suffisamment de flux lumineux tout en ayant corrigé les aberrations sur l'axe et hors de l'axe sur une large gamme de fonctionnement.



Figure3.9 : une PSD de grande dimension

Ceci limite généralement la gamme de mesure. Par ailleurs, ces capteurs sont encombrants, la distance entre l'émetteur et le récepteur devant être suffisante pour obtenir un décalage transversal exploitable. Le principe de détection est simple et surtout adaptable à la gamme de distances à mesurer. On trouve dans la littérature et dans le commerce des télémètres à triangulation travaillant sur quelques centimètres avec des précisions pouvant aller jusqu'à $10\mu\text{m}$, mais aussi des systèmes permettant de mesurer des distances jusqu'à plusieurs dizaines de mètres avec une précision inférieure au centimètre.

En conclusion, la triangulation est souvent appliquée au contrôle industriel de dimensions ou plus généralement à la mesure précise d'une distance autour d'une valeur donnée, là où la profondeur de champ n'est pas un paramètre critique.

On présente certaines techniques pour la télémétrie laser. On peut les résumer dans le tableau ci-dessous.

Techniques	Avantages	Inconvénients
Mesure de temps de vols d'impulsions	Fourniture de mesure absolue sans ambiguïté; aucune exigence sur la cohérence du faisceau utilisé	Sensibilité limitée par le temps de montée des photodétecteurs Le coût sera excessif
Mesure de différence de phase d'ondes modulées en amplitude	Système simple, aucune exigence sur la cohérence de la porteuse optique	ily a ambiguïté si $\Delta\Phi$ est supérieur à 2π
Télémétrie à modulation linéaire de la fréquence optique (FMCW)	une excellente sensibilité	conception beaucoup trop complexe Coût excessif
principe de fonctionnement de la triangulation	Faible coût Bonne résolution pour les faibles distances	La précision n'est pas linéaire avec la distance Ces capteurs sont encombrants, la distance entre l'émetteur et le récepteur devant être grande

Tableau 3.1 : comparaison des différentes techniques de télémétrie laser

3-7. CONCLUSION

Cette première partie nous a permis de mieux cerner les techniques de télémétrie laser et montrer la complexité du sujet. D'une manière générale, nous avons constaté que la télémétrie à détection cohérente, c'est à dire la télémétrie qui utilise les principes tirés de l'interférométrie comme FMCW, bien qu'ayant une sensibilité supérieure, est de conception beaucoup plus complexe que la télémétrie à détection directe. C'est la simplicité de mise en œuvre et la fiabilité des systèmes à détection directe qui a permis leur commercialisation.

CHAPITRE 4 :

REALISATION D'UN

TELEMETRE LASER

4-1.INTRODUCTION

Avec le manque de matériel, une CCD linéaire ou une PSD de grande dimension à qui on a dû faire face pour la réalisation d'un télémètre laser à triangulation, on a opté pour une solution qui consiste à utiliser une optique d'émission et de réception qui fonctionne à la même longueur d'onde et un microcontrôleur pour le traitement des données.

Pour cette méthode, on utilise un laser modulé par une fréquence de 10KHz et une photodiode de réception qui fonctionne au proche infrarouge avec une longueur d'onde de 850 nm.

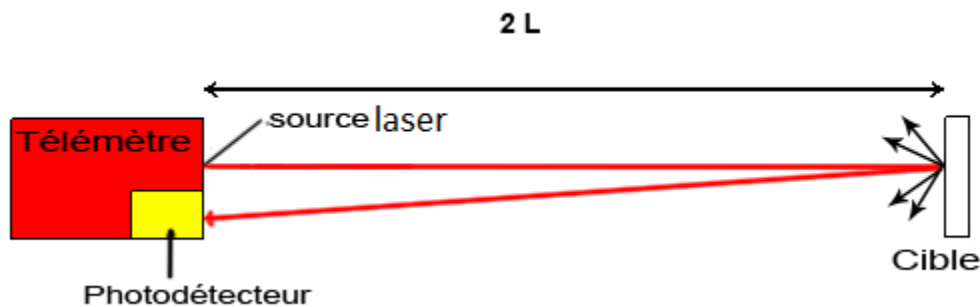


Figure 4.1 : le principe du télémètre laser

Quand l'onde parcourt une distance dans l'air, elle est atténuée car l'indice de l'air n'est pas parfaitement égal à 1 mais à 1,0003 et peut également varier le long du chemin optique, la valeur de l'indice de réfraction est dépendante des conditions de température et de pression variant localement dans l'atmosphère qui sont difficiles à estimer à chaque mesure. Il y a aussi le facteur d'absorption des matériaux constituant la cible qui change d'un matériau à un autre. La figure ci-dessous représente quelques valeurs des coefficients de réflexion pour des parois courantes.

Pour remédier à ce problème, on va proposer une méthode qui se base sur la détermination du coefficient d'absorption du matériau et des perturbations atmosphériques combinées à l'information sur la puissance du signal reçu pour avoir l'information sur la distance.

Facteurs de réflexion de quelques surfaces intérieures			
Peintures :		Autres matériaux de construction :	
blanc	0,70 à 0,80	plâtre blanc	0,7 à 0,80
jaune	0,50 à 0,70	marbre blanc propre	0,80 à 0,85
vert	0,30 à 0,60	brique blanche propre	0,62
gris	0,35 à 0,60	brique rouge	0,10 à 0,20
brun	0,25 à 0,50	brique rouge usagée	0,05 à 0,15
bleu	0,20 à 0,50	aluminium poli	0,6 à 0,75
rouge	0,20 à 0,35	aluminium mat	0,55 à 0,60
noir	0,04	émail blanc	0,65 à 0,75
Bois :		vitrages	0,08 à 0,40

Figure 4.2 : Coefficients de réflexion

4-2. OBJECTIF

La réalisation d'un télémètre laser qui respecte le cahier de charges qui consiste à travailler avec un laser de classe 1 que nous avons dans notre laboratoire pour des raisons de sécurité oculaire et qui doit atteindre la distance de 50cm.

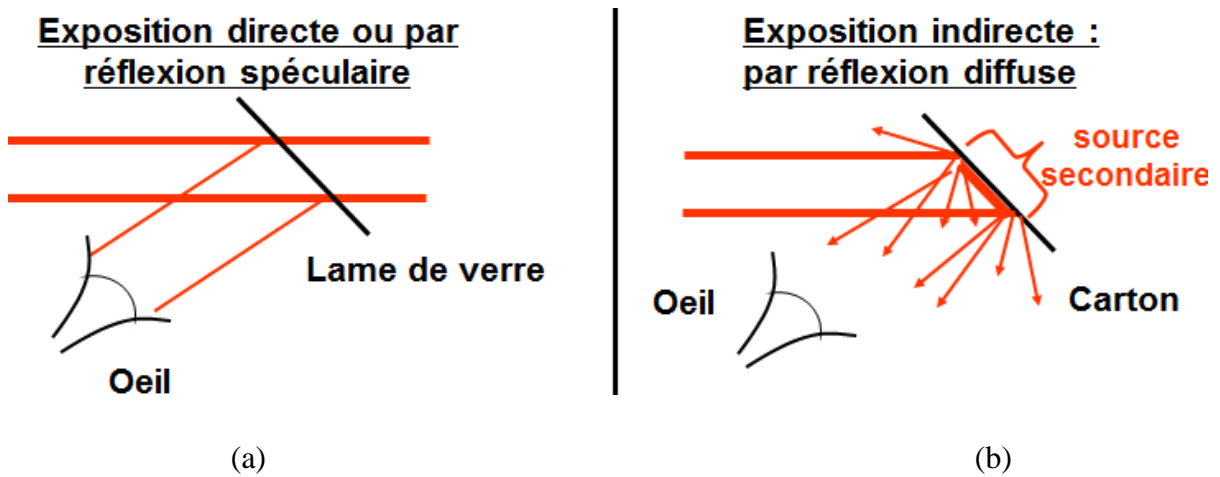
4-3.SECURITE LASER

Les normes (NF EN 60825) établissent les seuils de dommage pour l'utilisateur et classe les lasers en fonction des risques.

Les expositions maximales permises (EMP) correspondent au seuil de dommage de la rétine de l'œil et ils s'expriment, en général en W/m^2 ou en J/m^2 , c'est une densité moyennée sur une surface de référence. Les expositions maximales permises varient en fonction des tissus irradiés : $EMP(\text{peau}) > EMP(\text{œil})$.

EMP peau : Surface de référence de diamètre 1 mm (Énergie ou puissance mesurée au travers d'un diaphragme $\Phi=1\text{mm}$).

EMPœil : Au niveau de la cornée diamètre 7 mm entre les longueurs d'onde de 400 à 1400 nm(*pupille ouverte au maximum*), diamètre 1 mm ailleurs.



Taille de l'image sur la rétine très petite

Taille de l'image sur la rétine plus grande

L'EMP est une densité de puissance.

L'EMP est une luminance

Figure 4.3 : les types d'exposition de l'œil aux réflexions

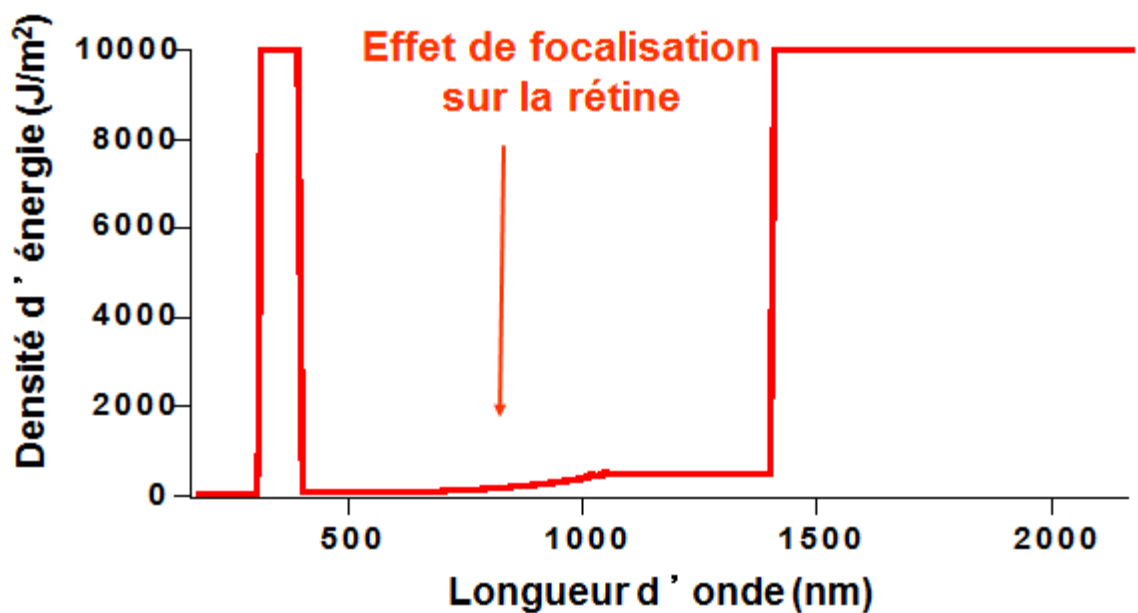


Figure 4.4 : Influence de la longueur d'onde du laser sur l'œil

Cette courbe est donnée pour une exposition de 10 s.

On remarque que la densité d'énergie absorbée par l'œil dépend de la longueur d'onde à laquelle elle est exposée. L'œil ne subira pas dommage pour la gamme de longueurs d'onde se trouvant entre 400nm à 1400 nm.

4-3-1 Les classes de laser

Selon la puissance et la longueur d'onde d'émission du laser, celui-ci peut représenter un réel danger pour la vue et provoquer des brûlures irréparables de la rétine. Pour des questions de sécurité, la nouvelle norme interdit l'utilisation des lasers de classe supérieure à 2 en dehors d'une liste d'usages spécifiques autorisés :

- Classe 1 : lasers sans danger, à condition de les utiliser dans leurs conditions raisonnables prévisibles (exemples : imprimantes, lecteurs de CD-ROM et lecteurs de DVD).
- Classe 1M : lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instrument optiques, peut être dangereuse.
- Classe 2 : lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur de 400 à 700 nm. La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral, clignement de la paupière (par exemple, des lecteurs de code-barres).
- Classe 2M : lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur de 400 à 700 nm. Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instrument optiques, peut être dangereuse (exemples : loupes et télescopes).
- Classe 3R : lasers dont l'exposition directe dépasse l'EMP (Exposition Maximale Permise) pour l'œil, mais dont le niveau d'émission est limité à cinq fois la LEA (Limite d'Émission Accessible) des classes 1 et 2.
- Classe 3B : laser dont la vision directe du faisceau est toujours dangereuse. La vision de réflexions diffuses est normalement sans danger.
- Classe 4 : lasers qui sont aussi capables de produire des réflexions diffuses dangereuses. Ils peuvent causer des dommages sur la peau et peuvent également constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requiert des précautions extrêmes.

Les classes ont été déterminées en fonction des lésions que peut provoquer un laser, elles varient en fonction de la fréquence du laser, les lasers infrarouge (IR) et ultraviolet (UV) étant bien plus dangereux que le laser visible.

Dans le domaine visible, pour un laser continu, les classes sont :

- Classe 1 : jusqu'à 0,39 μ W.
- Classe 2 : de 0,39 μ W à 1 mW.
- Classe 3R : de 1 à 5 mW.
- Classe 3B : de 5 à 500 mW.
- Classe 4 : au-delà de 500 mW.

4-4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Comme mentionné précédemment, on va exploiter les propriétés d'absorption des matériaux. Cela consiste en premier lieu à calculer le coefficient de réflexion du matériau représentant l'obstacle et les variations locales des facteurs atmosphériques du milieu d'expérimentation. Pour cela, on place le télémètre à une distance de 10cm de l'obstacle (mur, bois, ...) et d'appuyer sur le bouton poussoir du télémètre et ainsi déterminer le coefficient de réflexion.

En deuxième lieu, on va déterminer la distance en utilisant l'intensité du signal reçu sur la photodiode, le coefficient de réflexion calculé précédemment et la courbe d'étalonnage relevée expérimentalement.

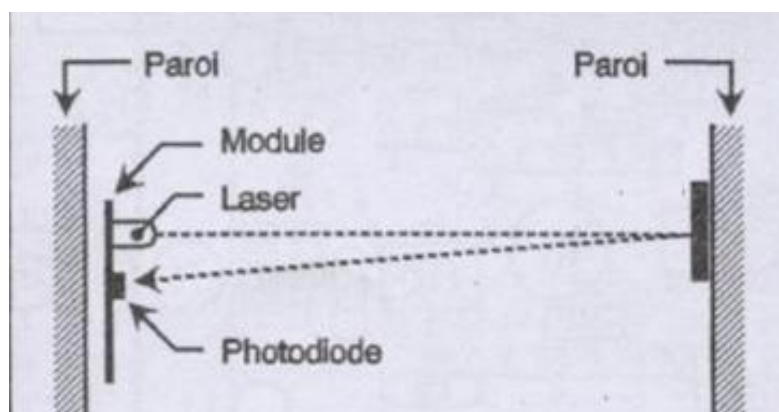


Figure 4.6 : Schéma de principe d'une émission-réception du faisceau laser

4-5 DESCRIPTION DU PRODUIT

Le prototype de télémètre laser monté au laboratoire travaille avec des cibles coopératives; il possède une plage de mesure qui dépend de la puissance d'émission du laser, celui-ci peut aller jusqu'à 50cm pour le laser basse puissance « classe 1 » disponible au laboratoire. Le contrôle des données se fait grâce à un microcontrôleur qui travaille à une fréquence respectant la condition de Shannon. L'écho obtenu permet de déterminer l'amplitude du signal et le coefficient de réflexion.

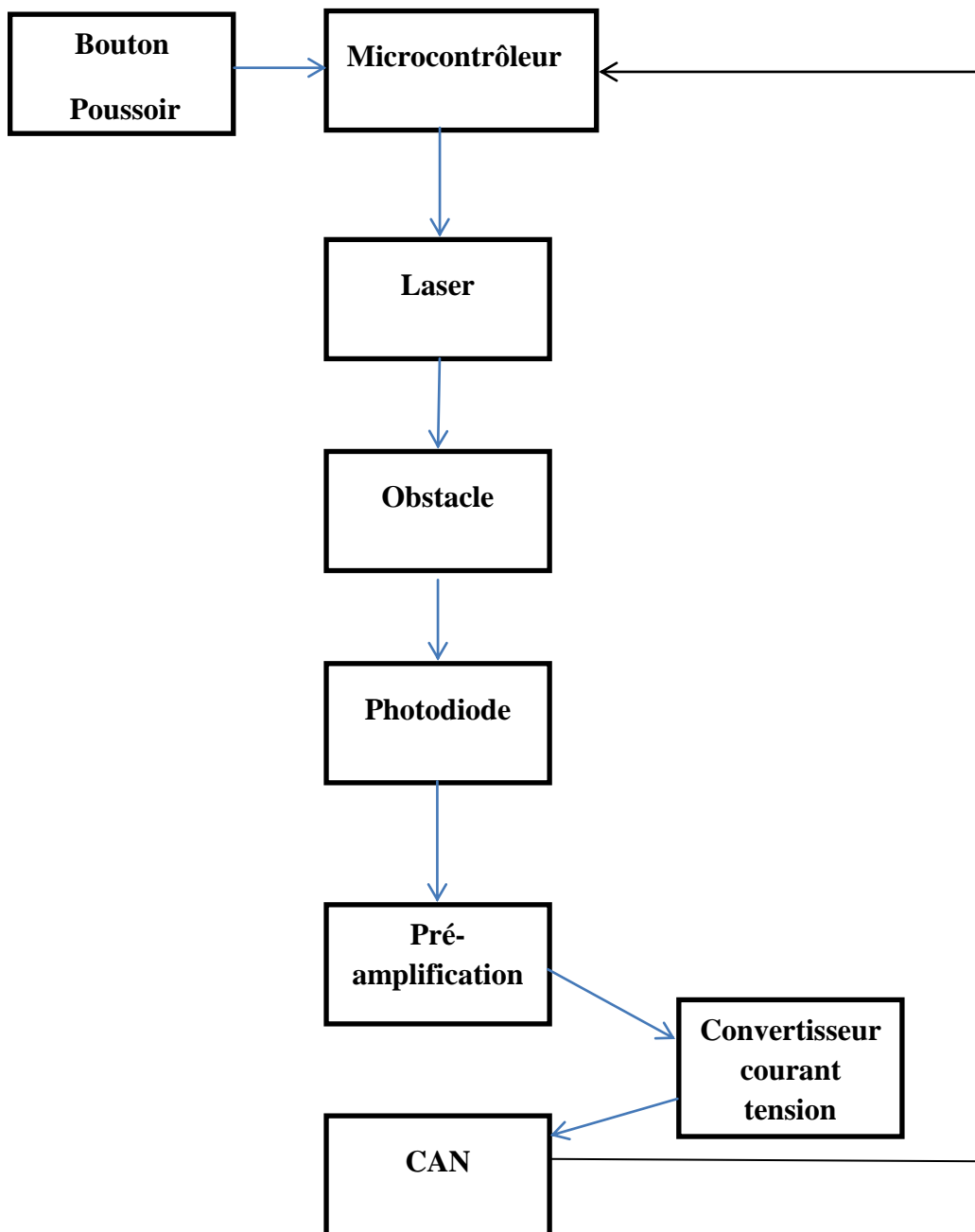


Figure 4.7 : blocs constituant la chaîne de mesure

4-6.REALISATION DU TELEMETRE LASER

Pour la réalisation de notre télémètre on va se baser sur la chaîne de mesure représentée par la figure 4.7 et pour cela, on va avoir besoin d'une optique d'émission « laser » et de réception « photodiode » qui vont travailler à la longueur d'onde $\lambda=850\text{nm}$, on a besoin d'un montage convertisseur de courant à faible bruit et d'un microcontrôleur pour la conversion analogique -numérique, traiter ces données, calculer le coefficient de réflexion pour finalement déterminer la grandeur qui nous intéresse à savoir la distance.

4-6-1 ETALONNAGE

Pour la partie étalonnage on a fait des mesures sur une distance de 6cm à 26 cm avec un pas de 1cm en fonction de l'intensité du signal reçu pour plusieurs matériaux qui sont illustrées dans les tableaux ci-dessous :

cm	Aluminium faible réflexion	Aluminium forte réflexion 1	Aluminium forte réflexion 3	Aluminium forte réflexion 2	Aluminium forte réflexion 2	Boite grise forte réflexion	Moyenne des coeff.
6	200	400	340	400	125	318	297,166
7	170	350	330	360	115	305	271,666
8	150	310	280	300	100	280	236,6667
9	130	265	260	275	90	241	210,1667
10	110	225	240	253	80	215	187,1667
11	100	200	210	230	70	180	165
12	85	170	164	200	65	160	140,6667
13	75	150	150	180	60	143	126,3333
14	65	130	140	160	52	127	112,3333
15	57	110	120	140	48	112	97,83333
16	50	100	110	125	44	103	88,66667
17	45	86	100	115	40	95	80,16667
18	40	80	89	103	36	88	72,66667
19	36	70	79	90	32	78	64,16667
20	32	64	70	79	31	69	57,5
21	30	55	64	75	29	63	52,66667
22	26	50	60	69	27	60	48,66667
23	24	45	56	64	26	54	44,83333
24	22	40	52	58	22	50	40,66667
25	18	36	48	52	20	48	37
26	16	33	44	48	19	44	34

Tableau 4.1 : Mesures de distances pour différents matériaux

On remarque que l'intensité du signal reçu sur la photodiode est décroissante chaque fois que l'on s'éloigne de l'émetteur et les courbes ci-dessous illustrent cette évolution.

AlumM	AlumF	alumF3	alumF2	Boitf	Boit F2	Somtout
Aluminium faible réflexion	Aluminium forte réflexion 1	Aluminium forte réflexion 3	Aluminium forte réflexion 2	Aluminium forte réflexion 2	Boit gri forte réflexion	Moyenne des toutes les matières

Tableau 4.2 : explication des légendes des figures suivantes

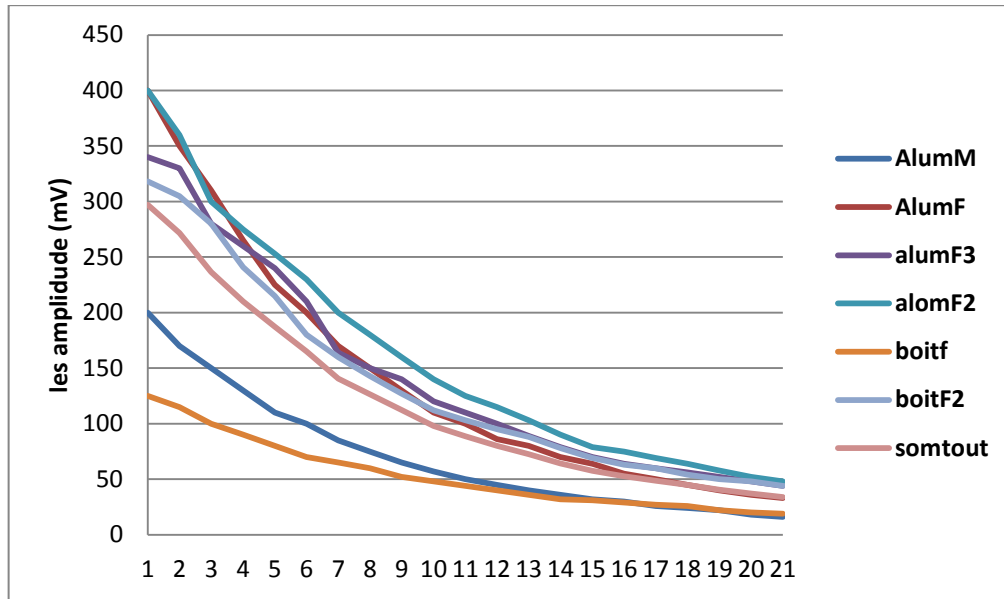


Figure 4.8 : amplitude du signal en fonction de la distance

On remarque que les courbes ont la même allure d'une forme exponentielle décroissante.

4-6-2 CREATION DE L'EQUATION

Pour la suite de ce travail, on va chercher à déterminer les coefficients de réflexion et pour cela on fixe la valeur moyenne comme seuil de détection, mais avant cela on cherche l'équation qui décrit ce fonctionnement.

Comme les courbes ont une allure exponentielle, la première idée qui vient à l'esprit est de prendre le logarithme des différentes valeurs du tableau de mesures et ainsi approcher au mieux une courbe linéaire. Les résultats ont été concluants et ainsi on a pu rendre ces courbes plus ou moins linéaires.

log(AlumM)	log(alumF)	LOG(som)	log(alumF2)	log(alumF3)	log(boitf)	log(boutF)	MOY
2,301029996	2,6020599	2,473000	2,602059991	2,53147891	2,0969100	2,5024271	2,43671
2,230448921	2,5440680	2,434036	2,556302501	2,5185139	2,060697	2,4842998	2,39181
2,176091259	2,4913616	2,374137	2,477121255	2,44715803	2	2,4471580	2,33045
2,113943352	2,4232458	2,322563	2,439332694	2,41497334	1,9542425	2,3820170	2,28137
2,041392685	2,3521825	2,272228	2,403120521	2,38021124	1,9030899	2,3324384	2,23902
2	2,3010299	2,217483	2,361727836	2,32221929	1,845098	2,2552725	2,18279
1,929418926	2,2304489	2,14819	2,301029996	2,21484384	1,8129133	2,20411998	2,11505
1,875061263	2,1760912	2,101517	2,255272505	2,17609125	1,7781512	2,1553360	2,06929
1,812913357	2,1139433	2,05050	2,204119983	2,14612803	1,7160033	2,1038037	2,01965
1,755874856	2,0413926	1,990486	2,146128036	2,07918124	1,6812412	2,0492180	1,95347
1,698970004	2	1,947760	2,096910013	2,04139268	1,6434526	2,0128372	1,91767
1,653212514	1,9344984	1,903993	2,06069784	2	1,6020599	1,977723	1,87654
1,602059991	1,9030899	1,861335	2,012837225	1,94939000	1,5563025	1,9444826	1,82064
1,556302501	1,845098	1,807309	1,954242509	1,89762709	1,5051499	1,892094	1,77787
1,505149978	1,8061799	1,759667	1,897627091	1,8450980	1,4913616	1,8388490	1,73978
1,477121255	1,7403626	1,721535	1,875061263	1,80617997	1,4623979	1,7993405	1,69621
1,414973348	1,6989700	1,687231	1,838849091	1,7781512	1,4313637	1,7781512	1,65118
1,380211242	1,6532125	1,651601	1,806179974	1,74818802	1,4149733	1,7323937	1,62477
1,342422681	1,6020599	1,609238	1,763427994	1,71600334	1,3424226	1,69897	1,57116
1,255272505	1,5563025	1,568201	1,716003344	1,68124123	1,3010299	1,6812412	1,53847
1,204119983	1,518513	1,531478	1,681241237	1,64345267	1,2787536	1,6434526	1,49352

Tableau 4.3 : les résultats de l'introduction du logarithme sur le tableau (4.1)

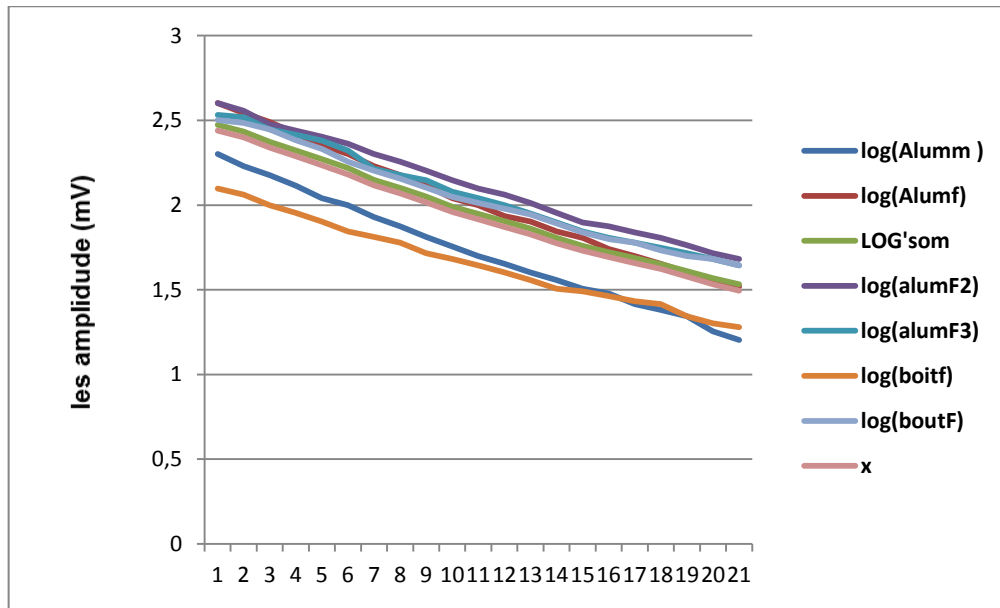


Figure 4.9 : Tension de sortie en fonction de la distance

On remarque qu'après l'introduction de la fonction logarithme les courbes ont pris l'allure de droites décroissantes avec un des angles d'inclinaison différents.

On utilise le logiciel Excel pour déterminer l'équation de la droite que l'on a nommée y est qui représente la moyenne entre toutes les courbes sur la figure 4.11 Pour $x \in \mathbb{R}^+$, l'équation de la droite est :

$$y = -0.0478x + 0.4 \quad (4.1)$$

avec un taux de corrélation de 0.995.

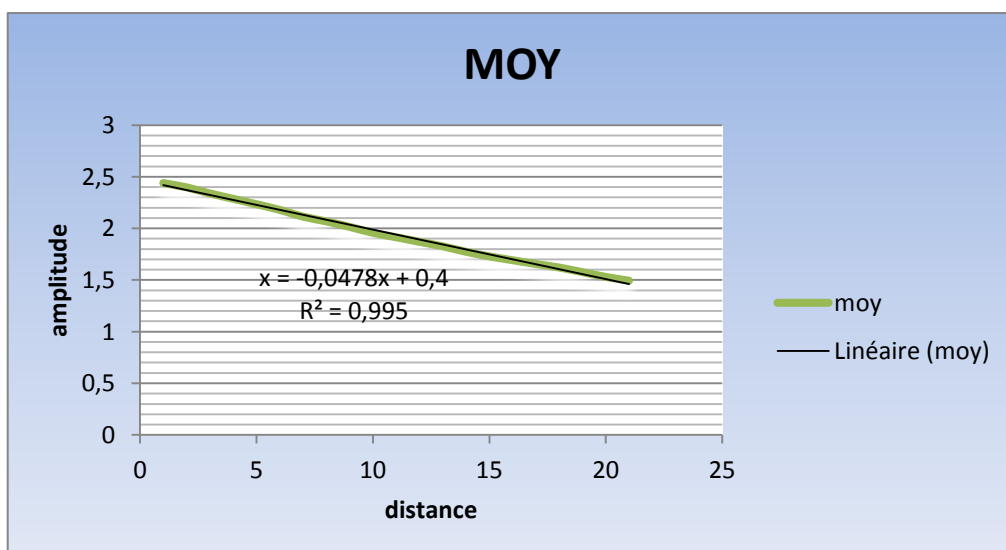


Figure 4.10 : détermination de l'équation d'une droite avec Excel

Si on divise les valeurs de cette fonction 'x' qu'on a trouvées sur les valeurs de n'importe quelle courbe on trouve une valeur constante qu'on va nommer coefficient de réflexion.

Ce coefficient va nous permettre d'avoir l'information sur la distance en le multipliant avec les amplitudes mesurées par notre montage.

4-7.PARTIE PROGRAMATION

Après avoir reçu le signal réfléchi par la cible on va présenter et expliquer la méthode de programmation qui permet de passer de l'intensité du signal reçu à la distance, la grandeur qui nous intéresse.

Ce qu'il faut savoir c'est que le signal reçu a une composante continue et une composante alternative, mais notre information se trouve dans la partie alternative du signal. Afin d'éviter la réalisation d'un filtre passe haut pour éliminer la composante continue, on a développé un programme qui élimine la composante continue.

Comme on a détaillé la méthode d'utilisation de l'arduino et le langage arduino dans le chapitre 2, on va expliquer le programme d'une manière très succincte.

Dans cette première partie du programme, on déclare nos variables et on initialise la fonction setup(). On déclare la pin 7 en entrée, c'est cette porte qui va être activée par le bouton poussoir qui va commander le calcul du coefficient de réflexion.

```
floatcoef=0.815; //DECLARATION DES VARIABLES
floatlectur=0;
constint pin=7;
void setup ()
{
  pinMode (pin , INPUT);
}
```

On passe à la fonction loop() et on commence par déclarer les variables qui doivent être réinitialisées pour chaque exécution de la fonction loop().

```
void loop ()
{intresulta=0;
  int i;
  int top=0;
  int bas=500; //500 pour 5volte
  intdif=0;
  int fin =0;
```

Pour la suite on crée trois boucles, la première va calculer l'amplitude du signal reçu, cette opération consiste à échantillonner le signal et prendre les valeurs maximum et minimum pour éliminer la composante continue, on va boucler quarante fois pour avoir quarante échantillons.

La deuxième boucle contient la première et s'exécute 10 fois pour éliminer toute valeur erronée; elle calcule la moyenne des différences entre les valeurs maximum et minimum.

```
while(fin==0)
{
  for(int j=0; j<10;j++)
  {
    for( i =0; i<40;i++)
    {
      intvar=analogRead(1);
      int per =map (var,0,1023,0,500);
      if (per < bas) bas=per;
      if (per > top) top=per;
    }
    dif =dif+ top-bas;
  }
  dif=dif/20;
  Serial.print("l amplitude est: ");
  Serial.println(dif);
  fin=1;
```

Pour l'acquisition du coefficient de réflexion, on met une condition sur la pin 7, si elle passe à l'état bas on exécute l'équation suivante :

$$coef = 2.2354/\log(lecture) \quad (4.2)$$

Avec 2.2354 est la valeur de la courbe de référence à la distance 10cm.

```
if(digitalRead(pin)==LOW)
{float temp = log (dif)/log(10);
temp=2.2354/temp;
coef=temp;
Serial.println("000000000000000000000000000000");
}
}
lectur = log (dif)/log(10)*coef;
Serial.println(lectur);
intdist=0;
for(int i=0;i<24;i++)
{
Serial.println(i);
if(lectur> tab[i])
{
dist = i+6;
i=24;
}
}
Serial.print("la distance=");
Serial.println(dist);
delay(1000);
}
```

4-8.CONCLUSION

Le travail accompli dans cette partie a été très bénéfique ; il m'a permis de mettre en pratique mes connaissances en optoélectronique et en programmation et d'acquérir de nouvelles connaissances.

Les résultats obtenus ont été concluants avec un taux de corrélation de 0.955; on peut dire que notre télémètre répond au cahier de charges. La méthode de calcul utilisée fait que l'information de la distance dépend juste de la puissance d'émission du laser de notre télémètre et du type de matériau représentant la cible.

Chapitre 5 :

REALISATION D'UN

TELEMETRE LASER A

TRIANGULATION INFRAROUGE

5-1.INTRODUCTION

Les ondes infrarouges font partie de notre quotidien. Au tout début de leurs existences, les lasers émettaient de la lumière dont les longueurs d'ondes concernées étaient les micro-ondes. Puis, elles se sont élargies aux domaines de l'infrarouge, du visible, de l'ultra-violet et même depuis peu les rayons X (voir spectre de la lumière).

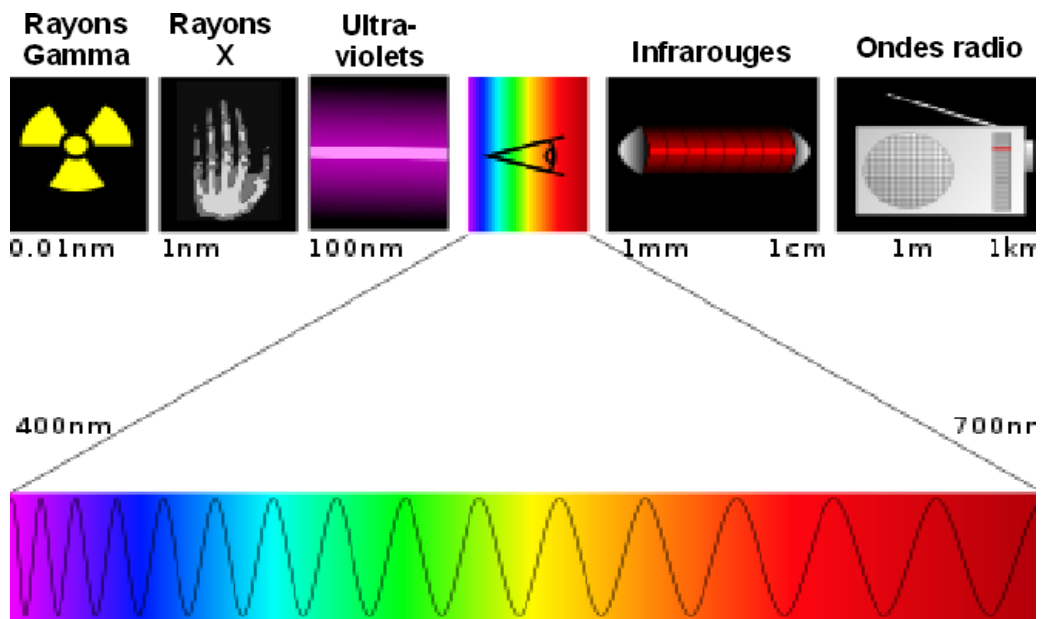


Figure5.1 : Spectre de la lumière

Notre objectif est la réalisation d'un télémètre laser qui fonctionne dans le proche infrarouge avec une longueur d'onde $\lambda=950\text{nm}$, en utilisant la méthode la plus utilisée dans l'industrie qu'est la triangulation.

On commence tout d'abord par expliquer la méthode de triangulation en donnant ses avantages et ses inconvénients, puis on passera au fonctionnement du télémètre en détaillant chaque bloc. La dernière partie sera consacrée à l'étude et à la commande par programmation du module à infrarouge.

5-2 PRINCIPE DE LA TRIANGULATION

La détection sans contact est très souhaitable dans de nombreuses situations de mesure. Elle permet de recueillir des données avec une précision et une rapidité beaucoup plus élevées que les dispositifs de contact et ceci sans influencer l'objet sur lequel on effectue la mesure. Par rapport aux dispositifs capacitifs et inductifs, les capteurs de triangulation IR

ont un plus grand écartement (distance entre le capteur et l'objet) et par rapport aux capteurs à ultrasons ils sont disponibles avec une résolution beaucoup plus élevée et une meilleure précision.

Ces capteurs sont idéaux pour la surveillance des pièces ou des caractéristiques qui sont trop petites pour la mesure, et pour les contrôles en cours de fabrication sur des surfaces qui sont humides ou molles. Les capteurs de triangulation sont largement utilisés pour l'inspection des matériaux dynamiques, tels que la surveillance des épaisseurs de bandes en mouvement, le suivi des dimensions des pneumatiques tournant à grande vitesse.

Aujourd'hui les capteurs de triangulation sont disponibles avec une grande variété de spécifications, de tailles et de configurations qui remplacent et surpassent les anciens types de capteurs.

Lors de la sélection d'un capteur de triangulation pour une application spécifique, il est important de comprendre les bases de la triangulation et l'importance des paramètres nécessaires à la mise en œuvre. Le but de cette partie est d'expliquer le principe de la triangulation, et de fournir un aperçu des paramètres impliqués.

Le principe de la triangulation optique a été compris et utilisé depuis des siècles, par exemple dans la navigation avec un sextant, en utilisant des angles pour déterminer la position. Cependant, l'utilisation de la triangulation pour la mesure automatisée, est une technologie relativement nouvelle, non pas parce que la connaissance de la façon de réaliser un capteur manque, mais plutôt à cause de la non disponibilité des composants appropriés. Les capteurs de triangulation pratiques pour les applications industrielles ont commencé à devenir disponibles vers le début de 1971, et cela par la commercialisation des (PSD) et des micro-ordinateurs.



Figure 5.2 : Photo d'une PSD

5-2-1. PRINCIPE DE LA CELLULE PSD

Une cellule PSD (Position Sensitive Detector) est un capteur permettant de délivrer sous forme de deux courants fournissant les informations sur:

- La position du spot lumineux qui l'éclaire,
- L'intensité de ce spot; c'est en fait une photodiode de grande surface réalisée avec une structure PIN (temps de réponse très court et meilleure linéarité qu'une structure PN). On la polarise en inverse avec une tension de polarisation (montage photo-détecteur).

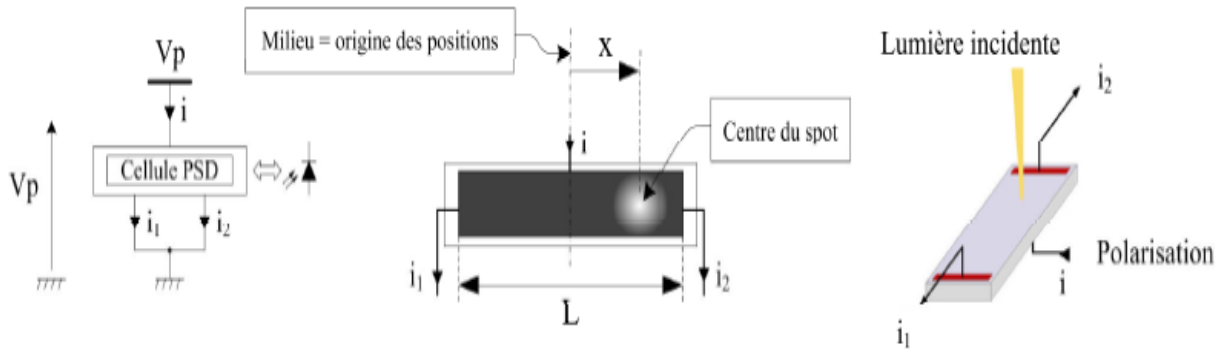


Figure 5.3 : principe de fonctionnement de la PSD

Lors de l'éclairement de la cellule, les photons incidents donnent naissance à un photo-courant. Une couche résistive transparente recouvre la partie anodique (ou cathodique) présentant une résistivité homogène, les intensités des courants i_1 et i_2 vont dépendre de la position du spot (principe du pont diviseur de courant), mais aussi de son intensité lumineuse. Ainsi sur la figure ci-dessus, le courant i_2 sera plus intense que le courant i_1 car la distance entre le spot et l'électrode 2 étant plus courte donc moins résistive que la distance entre le spot et l'électrode 1.

La position du spot est liée aux courants par la relation

$$x = \frac{L}{2} \times \frac{i_2 - i_1}{i_2 + i_1} \quad (5.1)$$

Le principe de base de la triangulation est représenté sur la figure 5.4. A la surface, une diode laser à infrarouge projette un spot de lumière à la position 1. Avec un certain angle par rapport au faisceau laser, une lentille est utilisée pour former une image de ce lieu sur la PSD, la position P1. Si la surface est plus loin du capteur, la tâche sur la surface est formée à la position 2, et l'emplacement de la tâche se déplace à la position P2. En déterminant la position du spot imagé et le calcul des angles concernés, la distance entre le capteur et la surface peut être déterminée.

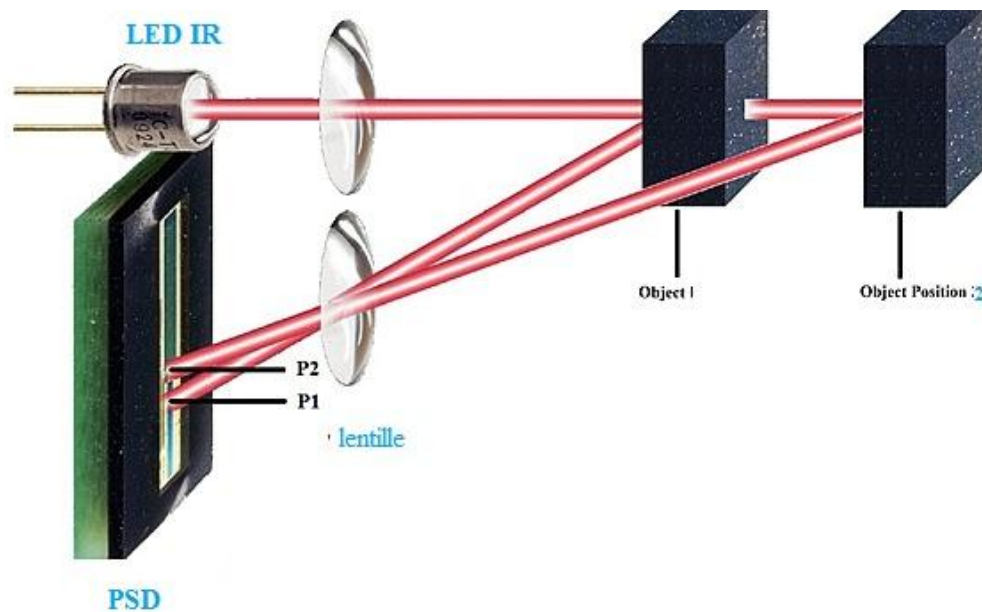


Figure 5.4 : principe de la triangulation avec une PSD

La PSD est concurrencée par le capteur CCD linéaire qui peut remplir le même rôle. Le tableau 5.1 donne un aperçu sur les deux éléments.

5.2.2 COMPARAISON ENTRE PSD ET CCD

Propriété	PSD	CCD
Ordre de Prix	50€	8€
Rapidité	Rapide: $\approx 10\mu s$	Plus lent du fait du traitement logiciel nécessaire pour obtenir l'information $\approx 1ms$
Résolution	La sortie étant analogique, la résolution ne dépend que de l'électronique de traitement qui la dégrade. Ordre après traitement	Généralement 11 bits pour toute la longueur soit 2048 valeurs possibles sur quelques mm. Mais le traitement numérique permet d'améliorer la résolution en interpolant la position réelle à partir des mesures de chaque pixel. Ordre après traitement: μm
Type de Sortie	Analogique (nécessité CAN)	numérique
Mesure	Barycentre de l'éclairement	Max de l'éclairement

Tableau 5.1 : comparaison entre PSD et CCD

5-3 .PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU TELEMETRE

Le fonctionnement de notre télémètre est très simple, comme il est représenté sur la figure 5.5, la diode laser IR émet une onde qui est réfléchié au contact de l'obstacle et vient percuter sur la photodiode qui transforme la puissance lumineuse en signal électrique. Le microcontrôleur est le cœur du montage, il commande l'émission du signal et gère la réception on convertissant la grandeur analogique en une information numérique sur huit bits puis il réalise le traitement de l'information puis affiche le tout sur un écran LCD ou un téléphone portable.

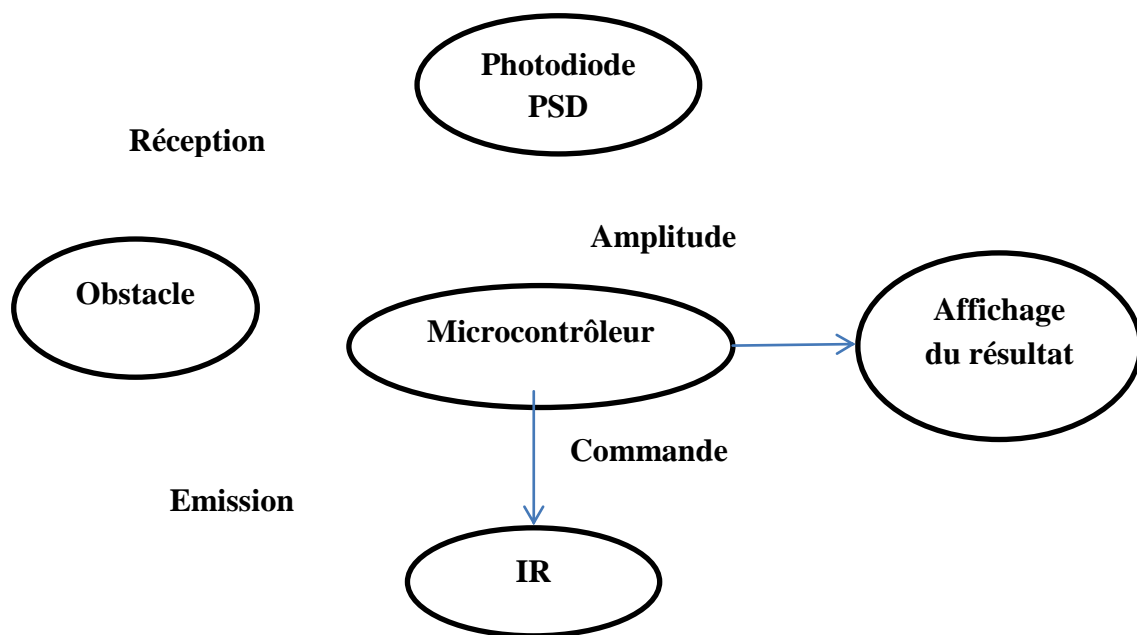


Figure 5.5 : schéma bloc de fonctionnent

5-4.DESCRPTION TECHNIQUE DU CAPTEUR

Le GP2Y0A60SZLF est un capteur analogique de distance 10-150cm, avec une tension de fonctionnement recommandée qui doit être entre 2,7 V et 5,5 V. L'écart de la tension de sortie pour toute la plage de distance est d'environ 3 V; allant de 3,6 V pour la plus petite des distances 10 cm à 0,6 V pour la borne supérieure de distance qui est 150 cm.

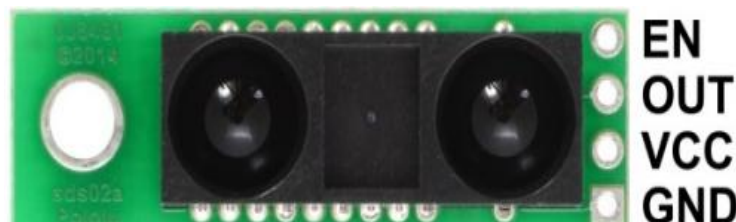


Figure 5.6 : Sharp GP2Y0A60SZLF

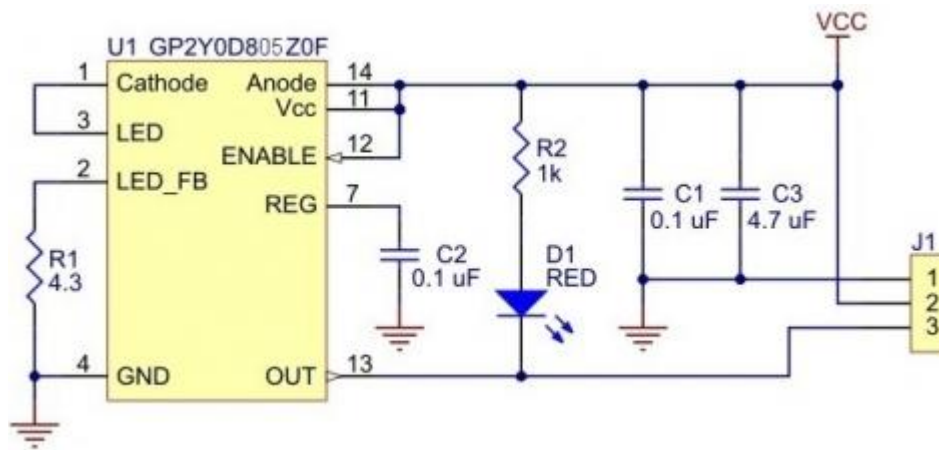


Figure 5.7 : schéma du GP2Y0A60SZLF

Lorsqu'un obstacle se trouve dans la zone de détection, la distance mesurée par le capteur est inférieure à la distance de référence c'est-à-dire celle qui est comprise entre 10cm et 150cm. La borne inférieure est imposée par la disposition du système entier (source, lentilles, détecteur, etc.). Tandis que la borne supérieure est liée à la faible puissance de notre laser.

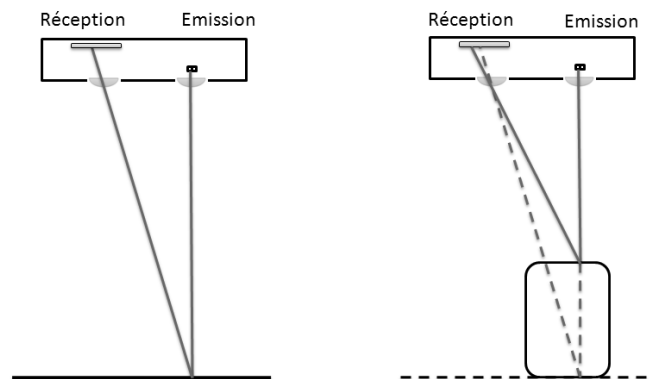


Figure 5.8 Principe de la triangulation

Une diode laser émet un faisceau infrarouge afin d'assurer un champ de détection suffisant. Ce dernier traverse une lentille collimation placée devant la cellule émettrice pour avoir des rayons quasiment parallèles. En effet, la LED est placée à environ un millimètre en retrait par rapport au foyer de la lentille.

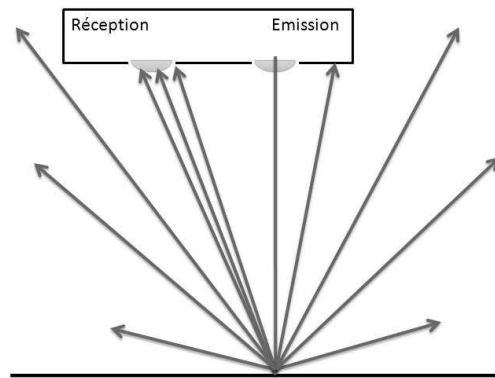


Figure 5.9 : Faisceaux diffusés par un obstacle

Lorsque le faisceau rencontre un obstacle, ce dernier réfléchit la lumière infrarouge dans toutes les directions. Une partie de cette lumière est captée par une autre lentille convergente dont le rôle est de focaliser les rayons infrarouges sur le récepteur représenté par une cellule photosensible de type PSD qui nous fournit l'information. La PSD est une photodiode à grande surface photosensible qui peut être vue comme un ensemble de photodiodes mises en parallèle.

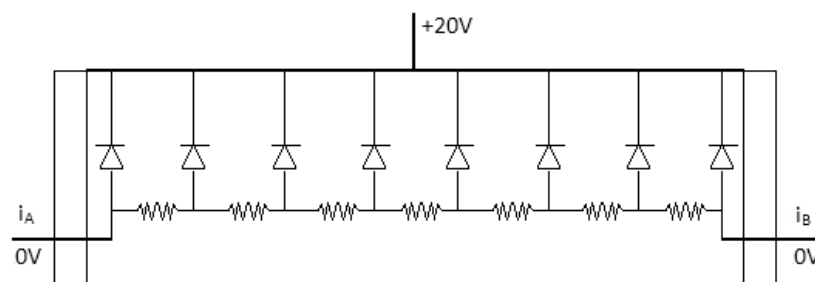


Figure 5.10 : Schéma équivalent d'une PSD

Lorsqu'une zone de la cellule PSD est soumise à un rayon infrarouge, elle se comporte comme un générateur de courant. Ce courant va être réparti en deux courants i_A et i_B . La valeur de ces courants dépendra de la résistance électrique du chemin parcouru qui est proportionnelle à la distance qui sépare la zone exposée des bords de la cellule. Ces deux courants dont les intensités sont liées à la position de la zone exposée peuvent être mesurés en sortie de cette cellule. Les intensités sont l'image de la position du faisceau réfléchi sur la PSD.

A l'instant où un obstacle entre dans la zone de détection, la hauteur de réflexion diffère de celle de référence.

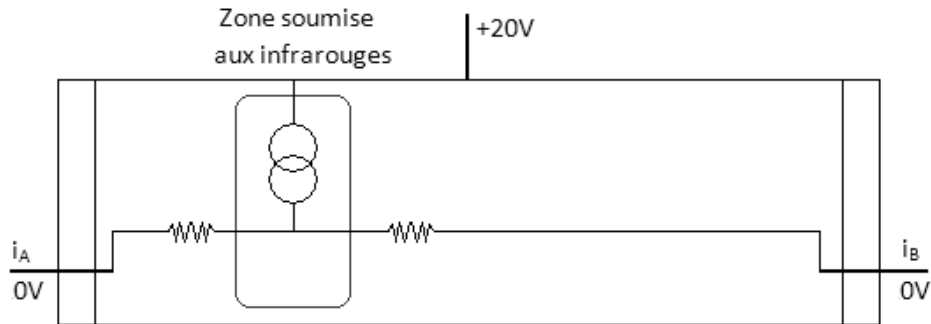


Figure 5.11 : Schéma équivalent d'une PSD soumise à un SPOT infrarouge

D'autres faisceaux avec un angle de réflexion différent, sont captés. Ceci a pour effet de translater la zone exposée de la PSD et donc de modifier les valeurs des intensités des courants, donc il y a détection.

Les valeurs de référence des courants sont déterminées par un microcontrôleur lors de la mise en service du détecteur, il s'agit de l'opération d'étalonnage. De plus, étant donné la sensibilité à la variation de la distance de réflexion de ces faisceaux, l'appareil doit s'adapter à sa zone de travail de référence afin d'assurer un bon fonctionnement. Cet ajustement est réalisé par la translation des lentilles situées devant les modules de réception. Le déplacement des lentilles permet de maîtriser l'angle de réflexion des faisceaux captés et donc d'ajuster la position de référence des faisceaux réfléchis sur la PSD.

5-5 PROGRAMMATION DU TELEMETRE

Quand on a réalisé les premiers essais avec ce capteur, on a eu quelques difficultés pendant sa mise en place. Cette difficulté se manifeste lorsqu'on veut convertir la tension analogique en distance. Le capteur fournit une tension de sortie analogique, qui est ensuite, lue par l'Arduino et convertie en un nombre entier se trouvant entre 0 et 1024 et ceci à l'aide du programme réalisé nous permet de déterminer la distance.

5-5-1. CONNAITRE LE CAPTEUR

Le *datasheet* du capteur nous donne le graphique représenté par la courbe d'étalonnage théorique (figure 5.12) c'est-à-dire une courbe donnant la tension analogique en fonction de la distance. Ceci nous a amenés à établir la courbe d'étalonnage réelle de notre capteur, qui est la première opération que l'on doit mener sur un capteur.

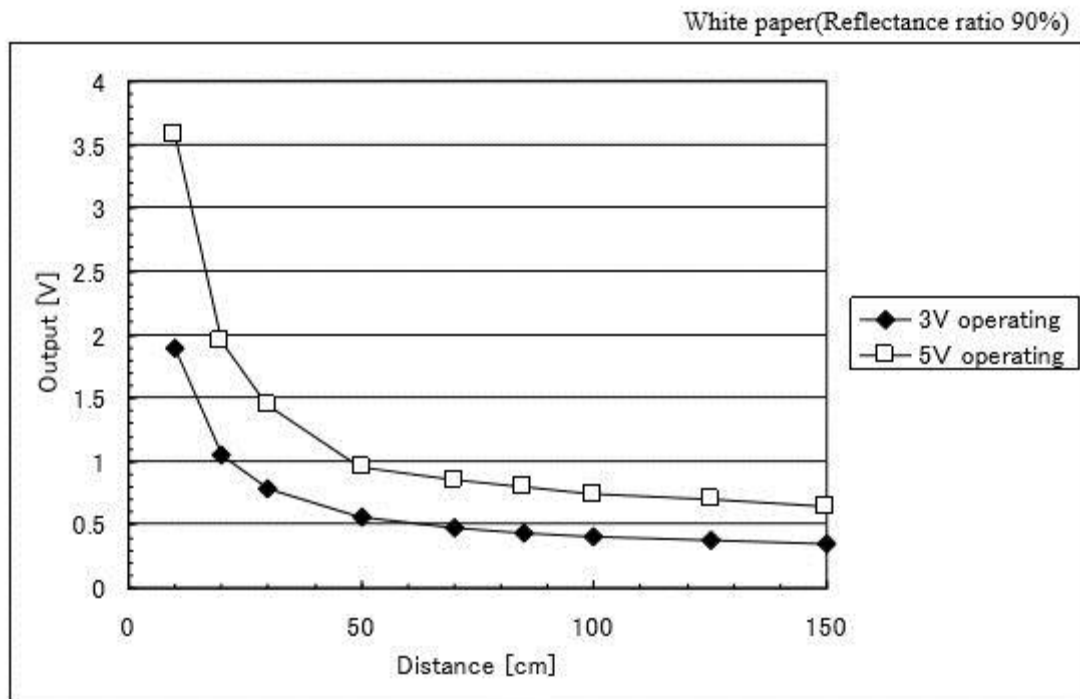


Figure 5.12 : courbe d'étalonnage théorique

Pour calibrer l'Arduino, on a dû mesurer la sortie du capteur pour chaque distance. On a mesuré les valeurs de sortie de 10cm à 150cm avec un incrément de 1 cm. Cela nous a permis d'obtenir beaucoup plus de valeurs donc une meilleure régression.

Comme les valeurs sont difficiles à lire et parce qu'on voulait plus de précision dans les lectures, on a fait un programme Arduino simple qui permet d'étalonner correctement le capteur.

5-5-2. LE CODE ARDUINO POUR L'ETALONAGE

On a utilisé le code suivant pour récupérer les valeurs de l'Arduino.

Dans le code, une moyenne de 500 lectures est réalisée afin d'éliminer les valeurs aberrantes.

Comment connecter le capteur à l'Arduino:

- Capteur - Arduino
- VCC \longleftrightarrow - 5V
- GND \longleftrightarrow -GND
- Out \longleftrightarrow - A0
- EN \longleftrightarrow - Ne pas brancher

Ce programme a pour seul but d'étalonner le capteur infrarouge, il calcule la moyenne des 500 valeurs afin de les faire converger en une seule valeur correcte ; on se sert de cette technique pour supprimer les valeurs aberrantes.

```
/* =====  
étalonnage Infra-Rouge: Envoyer valeur entière moyenne de série  
écrit par DERAREDJ RAMZI  
===== */  
  
long sensorSum=0;  
int n =1;  
int mean =0;  
int lastMean=0;  
void setup()  
{  
  pinMode(13, OUTPUT);  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop(){  
  // Lire l'entrée sur la broche analogique 0:  
  int sensorValue=analogRead(A0);  
  // Calculer des mesures pour une distance spécifique afin de lisser les résultats et après créer  
  la ligne de régression pour la distance  
  sensorSum=(sensorSum+sensorValue);  
  mean =(sensorSum/ n);  
  n = n +1;  
  if(n >500)  
  {  
    digitalWrite(13, HIGH);  
    delay(250);  
    digitalWrite(13, LOW);  
    Serial.println("----RESET-----");  
    n =1;  
    sensorSum=0;  
  }  
}
```

```

lastmean= mean;
}
Serial.print(" Mean = ");
Serial.println(mean);
Serial.print(" Last Mean = ");
Serial.println(lastmean);
delay(25);
}

```

5-5-3. COMMENT UTILISER LE CODE D'ETALONAGE

Après avoir téléchargé ce programme, l'Arduino va commencer à envoyer la valeur moyenne de la distance via le port série. Après avoir effectué 500 lectures, ceci pour augmenter la précision, une chaîne "RESET" sera imprimée ainsi qu'un voyant clignote nous signifiant que nous pouvons prendre une autre mesure de distance.

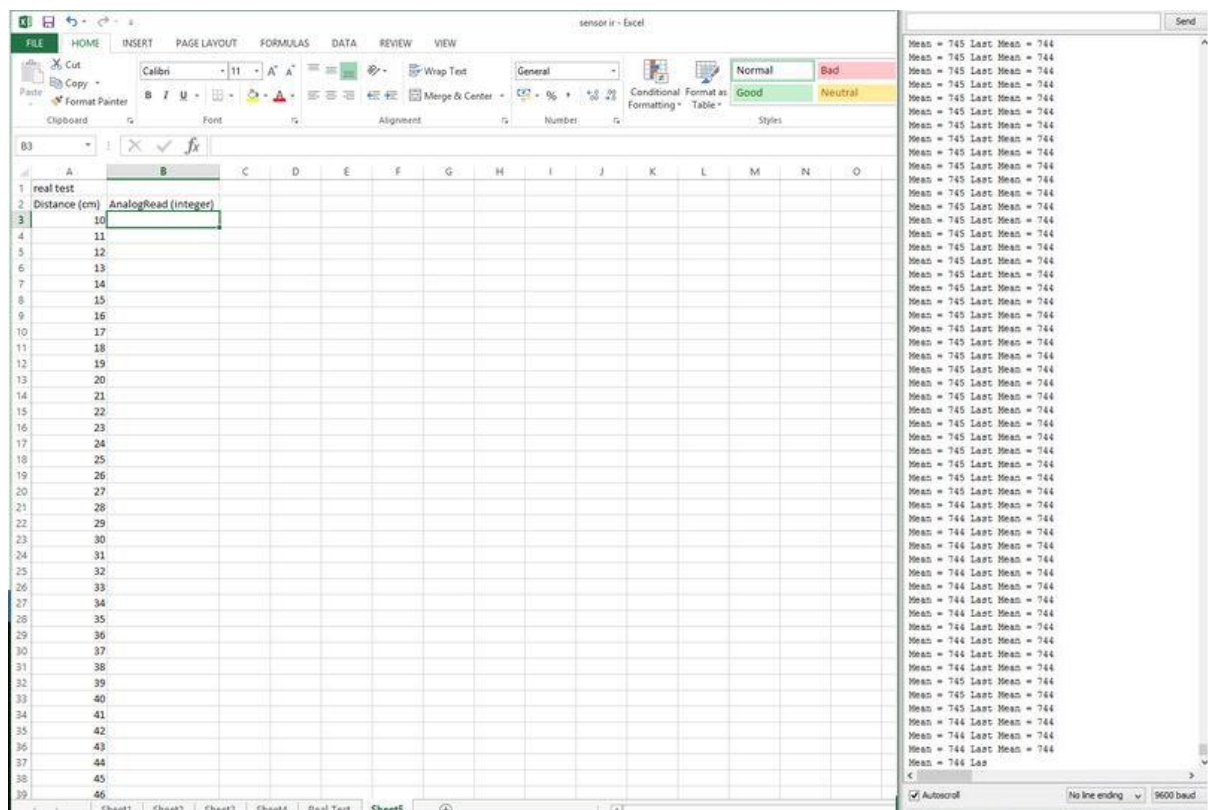


Figure 5.13 : résultats du programme d'étalonnage

5-5-4. EQUATION ANALYTIQUE DE LA COURBE D'ETALONNAGE

Après avoir réalisé toutes les mesures, on utilise les options dans Excel pour lisser la courbe pratique et d'en fournir une expression analytique qui répond au mieux à nos valeurs. L'expression obtenue est donnée par l'équation 5.2 où 'x' est la valeur de la distance prélevée sur la PSD et -1.51 [en cm^{-1}]; et y représentera la distance réelle lue.

$$y = 1877 \times e^{-1,51x} \quad (5.2)$$

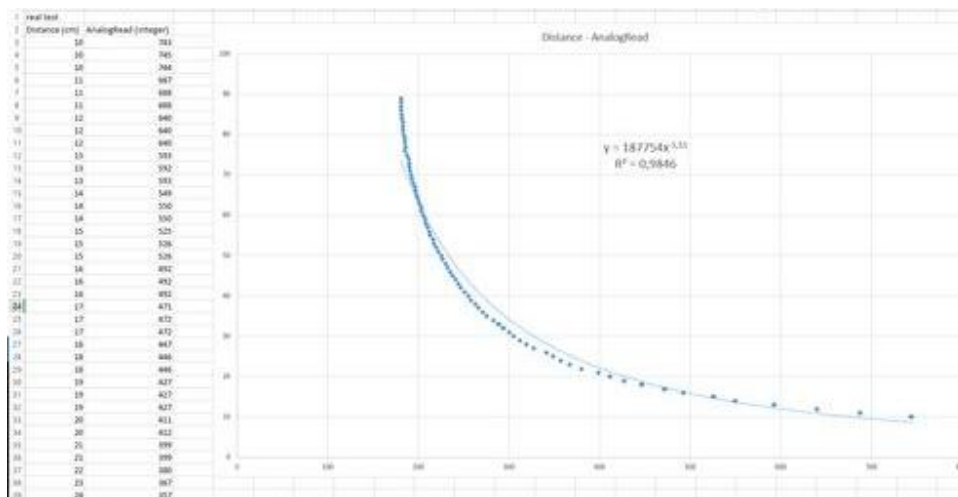


Figure 5.14 : courbe d'étalonnage pratique du capteur

5-5-5. RECUPERATION DES BONNES VALEURS DE LA DISTANCE

A la fin de ce processus, nous devons être en mesure d'obtenir des mesures correctes de distance avec ce capteur.

Un programme Arduino traite les valeurs de distances obtenues lors de la régression sur Excel. La ligne IRdistance fournit l'endroit où se trouve le résultat attendu.

A ce stade, nous sommes en mesure de récupérer les valeurs correctes de distance avec la précision voulue.

```
const int irsensorpin = A0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(irsensorpin);
```

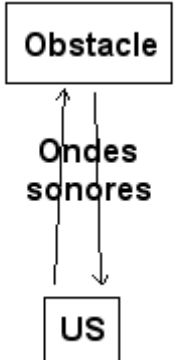
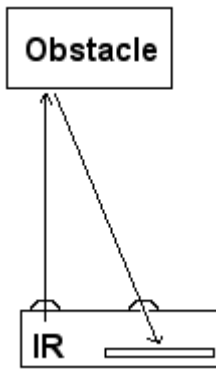
```
double IRdistance=187754*pow(sensorValue,-1.51);  
Serial.println(IRdistance);  
delay(100);}
```

5-5.CONCLUSION

On peut dire que le télémètre réalisé répond au cahier de charges. La distance calculée dépend juste de la puissance du télémètre et du type de matériaux représentant la cible.

Enfin, ce projet a été très bénéfique, il m'a permis de mettre en pratique mes connaissances en programmation, en optoélectronique et d'en acquérir de nouvelles compétences.

Nous présentons un tableau récapitulatif des différents télémètres étudiés et réalisés en vue d'une comparaison objective.

	ultrasons	triangulation à infrarouge	laser
le principe	<p>Les télémètres à ultrasons fonctionnent en mesurant le temps de retour d'une onde sonore inaudible émise par le capteur. La vitesse du son dans l'air étant à peu près stable, on en déduit la distance de l'obstacle.</p> 	<p>Le capteur SHARP fonctionne en mesurant l'angle de réflexion d'une émission d'IR modulée, grâce à une rangée de récepteur</p> 	<p>les différentes méthodes et principes de la télémétrie laser sont bien détaillés dans le chapitre 3</p>
portée	<p>Quelques mètres en général pour les systèmes ultrasons, même si en théorie il n'y a pas de limite. Il y a aussi en général une distance minimale.</p>	<p>La portée est de 5 à 80 cm.</p>	<p>plusieurs mètres à plusieurs centaines de mètres selon les modèles</p>
	<p>Les ultrasons sont très évasifs. Ce qui peut être un gros</p>	<p>La directivité est bien meilleure (cône de 5°). Pour faire mieux, il faut des</p>	<p>les plus directs de l'ordre du degré, voire de demi-degré</p>

Ladirectivité	avantage(détectiond'obstacle rapprochéesurunelargecouronne)ouun gros inconvénient(détectiondes murs d'un couloiretrondufondducouloir).	uitepasseràdes télémètreslaserbeaucoup plus chers !	
La précision	La précision des ultrasons dépend de la mesure précise du temps de parcours del'onde sonore. Ce dernier peut aussi varier suivant les conditions de température, de pression ...	La précision du capteur dépend de ladistance. Excellente à 10 cm, elle régresse de plus en plus jusqu'au 80cm.	ont précis avec un bruit de quelques centimètres sur des mesures de plusieurs mètres.
La taille	les transducteurs ultrasons peuvent être assez petits. Mais les cartes réalisant latélém mesure comme prennent de la place.	La taille est très petite. Rien d'autre n'est nécessaire.	assez grand, selon du modèle et de l'application
Coût	Peu chers	Peu chers	Relativement chers
sensibilité aux interférences et aux autres capteurs	, les capteurs ultrasons sont sensibles à la température et à la pression. Mais il y a plus grave : Ils sont aussi sensibles aux autres appareils utilisant les mêmes fréquences, comme les téléobjectifs à ultrasons, ou tout simplement les autres robots !	Sont sensibles aux fortes sources de lumière qui contiennent un fort rayonnement infrarouge. Sont également sensibles à la couleur et à la nature des obstacles.	Ne peut pas détecter les objets réfléchissant la lumière laser (vitres, objets chromés,...)
domaine d'utilisation	Les robots "professionnels utilisent beaucoup les capteurs à ultrasons.	Fabricants de jouets Pobot Technology	dépendes du modèle.

Tableau 5.2 : comparatif capteur ultrasons, triangulation IR et laser .

Évidemment, les systèmes qu'on a utilisés ont leurs avantages et leurs inconvénients, et comme la distance avec un faible cout est l'information qui nous intéresse il va falloir choisir entre les deux. Ceci dit, je distinguerais 5 cas :

- Les capteurs IR seront ce qu'il y a de plus simple !
- Vous avez besoin de mesurer une distance éloignée, et seuls les ultrasons le permettront. Mais Attention au large cône d'émission !
- Vous voulez vraiment être sûrs que rien n'approche près de votre robot, et dans ce cas une couronne de capteurs ultrasons couvrira mieux que les IR.
- Vous avez un petit robot, avec peu de place, pas beaucoup d'autonomie. Ici évidemment, les IR conviendront mieux.

CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études est à la fois théorique et expérimental pour la télémétrie ultrasons et laser.

D'une part, l'étude des ultrasons nous a permis de cerner leurs propriétés et de trouver la fréquence adéquate à notre projet pour passer ensuite à l'étude et à la réalisation d'un télémètre à ultrasons qui fonctionne dans la plage de mesure de 2cm jusqu'à 400cm avec une précision d'un centimètre, l'affichage des résultats sera fourni sur un écran LCD et sur un téléphone via une connexion Bluetooth. Un buzzer a été inséré en vue de convertir l'information de distance en son.

D'autre part, l'étude des différents types de télémètre laser nous a permis d'affirmer que la méthode de la triangulation est la plus appropriée pour répondre à notre cahier de charges, mais avec l'absence d'une CCD ou d'une PSD on est reparti sur une solution alternative qui consiste à placer un capteur utilisant le principe de la triangulation pour mener l'expérimentation sur la méthode de la triangulation laser et passer au dernier télémètre développé qui utilise l'intensité de l'onde réfléchie avec le coefficient de réflexion calculé des matériaux avec lesquels il interagit. Sa plage de mesure dépend de la puissance du laser utilisé.

En dernier lieu, les réalisations du télémètre à ultrasons et à triangulation ont été montées ensemble afin d'établir une comparaison entre les deux méthodes. Les extensions futures de tous ces projets consistent à réaliser notre propre capteur à triangulation avec une PSD ou une CCD et à travailler avec un laser d'une puissance plus élevée pour atteindre des mesures de distance plus grandes.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] Dale Ensminger, Leonard J. Bond, "Ultrasonics fundamentals, technologies, and applications", 3ème edition, 2012, CRC Press.
- [2] Gilles MAURIS, "Capteurs ultrasonores intelligents", thèse de Doctorat, Université de Savoie, 1992.
- [3] Michel BRUNEAU, "Fundamentals of Acoustics", ISTE Ltd, 2006.
- [4] Jin S. Jang, Moon G. Joo, Won Chang Lee, Dong Won Jung, ZhongSoo 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.
- [5] Leopoldo Angrisani, Aldo Baccigalupi and Rosario Schiano Lo Moriello, "Ultrasonic-Based Distance Measurement Through Discrete Extended Kalman Filter", Kalman Filter: Recent Advances and Applications, April 2009, p. 584.
- [6] LEVESQUE Philippe, "Architecture d'un processeur dédié aux traitements de signaux ultrasoniques en temps réel en vue d'une intégration sur puce", thèse de doctorat 2011, École Polytechnique de Montréal.
- [7] Pavel RIPKA, Alois TIPEK, "Modern Sensors Handbook", ISTE Ltd, 2007.
- [8] V. Matz and J. Kerka, "Digital Signal Processing System Of Ultrasonic Signals", Department of Measurement, FEE, CVUT, Prague, Czech Republic.
- [9] L. Svilainis, S. Kitov, "Analysis of the digital signal processing influence on time-of-flight estimation", ISSN 1392-2114 Ultragasas
- [10] Ramon Pallaá S-Areny, John G. Webster, "Sensors and Signal Conditioning", Second Edition, JOHN WILEY & SONS INC., 2001.
- [11] Eric Jacobsen, "Creating a PWM Output Sensor Using a Field-Programmable Analog Array", Sensors Magazine, May 1998.

[12] KANOUNI Lahcène “ Conditionnement d’un capteur à ultrasons à l’aide d’un FPGA ”
thèse décembre 2013.

[13] « Etude et réalisation d’un télémètre laser par temps de vol » ; Thèse par Vincent Delaye

[14] « Conception et mise en oeuvre d’un télémètre à très haute exactitude pour application
aux missions spatiales de vol en formation et à la caractérisation des grandes installations » ;
Thèse dirigée par Michel LINTZ.

[15] Alexandre MARTORELL « Réalisation d’un télémètre Laser » Thèse avril 2010.

[16] Dr. Walt Pastorius « Triangulation sensors an Overview» mars 2014.

[17] Eskimon et Olyte “ Arduino pour bien commencer en électronique et en
programmation” mars 2013.

[18] Jean-Noël Montagné “Initiation à la mise en oeuvre matérielle et logicielle de
l’Arduino” novembre 2006.

[19] Rian Wirsing ”Sending and Receiving Data via Bluetooth with an Android Device”
March 26, 2014.

[20] K. D. Schultz ”The trials and tribulations of building a phase-sensitive detector with an
Arduino microcontroller” Department of Physics Hartwick College MAS-APS, 2014.

[21] Datasheet MODULE ULTRASON HC-RS04.

[22] Datasheet SERVOMOTEUR SR-03.

[23] Datasheet MODULE BLUETOOTH HC-06.