

# Un détecteur d'obstacles pour malvoyants

Arthur Jacquin  
Candidat 27397

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Contexte . . . . .	4
1.2	Objectif du TIPE . . . . .	5
1.3	Cahier des charges fonctionnel . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Choix du capteur de distance</b>	<b>6</b>
2.1	Modèles testés . . . . .	6
2.2	Détermination du faisceau de détection . . . . .	7
2.3	Précision des capteurs . . . . .	8
2.4	Réactivité des capteurs . . . . .	9
2.5	Conclusion . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Élaboration de l'interface utilisateur</b>	<b>11</b>
3.1	Modulation de largeur d'amplitude . . . . .	11
3.2	Courbes intensité-ressenti . . . . .	12
3.3	Modélisation de la courbe intensité-ressenti . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Produit fini</b>	<b>14</b>
4.1	Conception générale . . . . .	14
4.2	Composants . . . . .	14
4.3	Conclusion . . . . .	15
<b>A</b>	<b>Liens</b>	<b>16</b>
<b>B</b>	<b>Prototype final sur <i>breadboard</i></b>	<b>16</b>
<b>C</b>	<b>Code du microcontrôleur</b>	<b>16</b>
<b>D</b>	<b>Schéma électrique du VL53L1X</b>	<b>18</b>
<b>E</b>	<b>Liste complète des composants</b>	<b>18</b>

## Table des figures

1	L’UltraCane (CECIAA, 1055 €) . . . . .	4
2	Dispositif de test . . . . .	7
3	Zone détectée par le capteur placé à l’origine . . . . .	8
4	Mesures de distance . . . . .	9
5	Détection d’une feuille A4 lâchée à 30 cm du capteur à $t_0$ . . . . .	10
6	Modélisation du signal créneau (pour un rapport cyclique de 0.4) . . . . .	11
7	Intensité de vibration ressentie en fonction de l’intensité des vibrations (5 utilisateurs en pointillés, moyenne en rouge) . . . . .	12
8	Fonction <code>dist_to_intensity</code> . . . . .	13
9	Schéma de soudure . . . . .	15
10	Produit fini . . . . .	15
11	Prototype final sur <i>breadboard</i> . . . . .	16
12	Schéma électrique du VL53L1X . . . . .	18

## Liste des tableaux

1	Cahier des charges fonctionnel . . . . .	5
2	Modèles de capteurs de distance testés . . . . .	6
3	Récapitulatif des tests . . . . .	10
4	Modèles de vibreurs testés . . . . .	11
5	Composants retenus . . . . .	14
6	Liste complète des composants . . . . .	18

## Références

- [1] David ABREU et al. “Low-Cost Ultrasonic Range Improvements for an Assistive Device”. In : *Sensors* 21.12 (2021). DOI : 10.3390/s21124250.
- [2] Adrian AIORDCHIOAE, Ovidiu-Andrei SCHIPOR et Radu-Daniel VATAVU. “An Inventory of Voice Input Commands for Users with Visual Impairments and Assistive Smartglasses Applications”. In : *Proceedings of the International Conference on Development and Application Systems (DAS)* (2020). DOI : 10.1109/DAS49615.2020.9108915.
- [3] Rupert R.A. BOURNE et al. on behalf of the VISION LOSS EXPERT GROUP. “Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment : a systematic review and meta-analysis”. In : *The Lancet Global Health* 5.9 (2017). DOI : 10.1016/S2214-109X(17)30293-0.
- [4] Aya DERNAYKA et al. “Tom Pouce III, an Electronic White Cane for Blind People : Ability to Detect Obstacles and Mobility Performances”. In : *Sensors* 21.20 (2021). DOI : 10.3390/s21206854.
- [5] René FARCY et al. “Electronic travel aids and electronic orientation aids for blind people : technical, rehabilitation and everyday life points of view”. In : *Proceedings of the Conference and Workshop on Assistive Technology for People with Vision and Hearing Impairment (CVHI)* (2006).
- [6] Julie FOUCAULT et AL. “INSPEX : Optimize Range Sensors for Environment Perception as a Portable System”. In : *Sensors* 19.19 (2019). DOI : 10.3390/s19194350.
- [7] Tero KIURU et AL. “Assistive device for orientation and mobility of the visually impaired based on millimeter wave radar technology - Clinical investigation results”. In : *Cogent Engineering* 5.1 (2018). DOI : 10.1080/23311916.2018.1450322.

- [8] Organisation Mondiale de la SANTÉ (OMS). *Cécité et déficience visuelle*. URL : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>.
- [9] CECIAA SAS. *Canne blanche électronique*. URL : <https://www.ceciasa.com/ultracane.html>.
- [10] Fondation VISIO. *Cannes blanches électroniques pour personnes aveugles ou malvoyantes*. URL : <http://visioptronic.fr/fr>.

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Avec plusieurs dizaines de millions de personnes touchées selon l'Organisation Mondiale de la Santé [8], et potentiellement trois fois plus d'ici 2050 selon le journal médical The Lancet [3], la cécité est une problématique majeure de santé publique. Les conséquences des déficiences visuelles sont lourdes et nombreuses, par exemple dans la mobilité.

Les solutions les plus communes, comme la canne blanche ou les chiens-guides, présentent toutes des problèmes : la canne a une portée limitée, le chien-guide nécessite une logistique plus importante. De plus, ces solutions ne permettent pas de détecter certains obstacles, notamment ceux situés en hauteur (au dessus du bassin).

Pour répondre à ces problématiques, des entreprises commercialisent des cannes électroniques permettant aux déficients visuels de détecter les obstacles les plus proches. On peut citer CECIAA, Visioptronic ou GoSense, avec respectivement l'Ultracane [9], Tom Pouce [10] et Rango. La perception de l'environnement proche est effectuée par des capteurs de distance, dont la portée dépasse dix mètres pour Tom Pouce. Les informations sont ensuite communiquées à l'utilisateur par le biais de vibrations. Cependant, ces solutions sont très peu démocratisées car très onéreuses (environ 1000 euros pour l'Utracane et 5000 euros pour Tom Pouce) et complexes à prendre en main : pour Tom Pouce, une formation de 30 heures semble nécessaire, pour des résultats partiellement convaincants [5]. De plus, les cannes sont visuellement discriminantes.



**FIGURE 1 :** L'UltraCane (CECIAA, 1055 €)

De nombreuses recherches s'intéressent aujourd'hui à l'amélioration des capteurs de distance, en raison de la multiplicité de leurs applications, du domaine médical aux voitures autonomes. Concernant les dispositifs pour déficience visuelle, on trouve dans la littérature l'utilisation de différents types de capteurs : capteurs à ultrasons [1], caméra pour scanner l'environnement [2], capteurs utilisant un radar à ondes millimétriques [7] ou capteurs LIDAR (LIght Detection And Ranging) [4] émettant un faisceau laser. Pour plus de polyvalence, des dispositifs combinant plusieurs technologies de capteurs ont également été étudiés [6].

## 1.2 Objectif du TIPE

L'objectif de ce TIPE est de proposer une alternative à ces dispositifs d'aide à la mobilité. L'accent sera mis sur le caractère *open-source* du projet, ainsi que sur son accessibilité économique et technique.

Voici le dispositif envisagé : un capteur déterminerait la distance de l'obstacle le plus proche, puis l'information serait communiquée à l'utilisateur par un vibreur. Les vibrations seraient d'autant plus fortes que l'obstacle est proche, et s'arrêteraient pour un obstacle situé à plus de 2 mètres de distance.

L'appareil se tiendrait dans une main. Le faisceau de détection serait volontairement très directif : l'idée est de balayer l'environnement avec des petits mouvements de main (mode par balayages). Cela laisse à l'utilisateur le contrôle sur les zones à sonder, et permet de détecter les obstacles en hauteur.

## 1.3 Cahier des charges fonctionnel

L'établissement du cahier des charges fonctionnel reste la première étape de ce projet, puisqu'il permet de guider la conception du dispositif.

Certaines critères identifiés relèvent du bon fonctionnement de l'appareil. Cela comprend la détection de l'obstacle le plus proche et la communication avec l'utilisateur.

Pour le mode envisagé d'utilisation par balayages, la détection des obstacles se doit d'être rapide et directive. Concernant l'interface utilisateur, il semble primordial de mettre en valeur la distance de l'obstacle le plus proche par la variation, c'est-à-dire le caractères *progressif* de l'interface.

Les autres critères identifiés lient le dispositif technique et son environnement d'utilisation. Étant destiné à un usage commun et quotidien, l'appareil créé doit être robuste, et simple d'utilisation, donc compact et maniable. Par ailleurs, pour que chacun puisse reproduire le dispositif, il importe qu'il soit abordable financièrement et que sa fabrication ne demande pas de compétences techniques préalables.

Fonction	Critère	Valeur
Détecter la distance de l'obstacle le plus proche	Portée	>3 m
	Faisceau de détection	
	Réactivité	>5 Hz
Traiter l'information	Cohérence	
Communiquer l'information à l'utilisateur	Clarté	
	Progressivité	
Être reproductible	Accessibilité économique	<50 €
	Accessibilité technique	
Être ergonomique	Compacité	
	Maniabilité	
	Robustesse	

TABLE 1 : Cahier des charges fonctionnel

## 2 Choix du capteur de distance

Le capteur de distance est l'un des éléments centraux du dispositif. Il a une grande importance dans la qualité du produit final. Son choix est donc primordial : nous allons donc en tester plusieurs.

Le fonctionnement des modèles testés est identique, et repose sur le principe d'écholocalisation. Une onde, dont la nature dépend du capteur, est ponctuellement émise par le capteur, se réfléchit sur les obstacles, puis est reçue par le capteur. On remarque que la distance parcourue par l'onde entre son émission et sa réception est égale au double de la distance du capteur à l'obstacle. On peut ainsi déduire la distance  $d$  de l'obstacle, en notant  $v$  la vitesse de l'onde dans le milieu et  $\Delta t$  le temps séparant la réception de l'émission de l'onde :

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

### 2.1 Modèles testés

Comme le montre les recherches bibliographiques préalables, 3 types de capteurs sont régulièrement utilisés dans la détection d'obstacles : capteurs ultrasons, infrarouges, ou laser.

Les capteurs infrarouges ont immédiatement été écartés du projet, jugés trop onéreux. Les modèles suivants ont été choisis pour représenter les différentes natures d'ondes possibles. Pour une nature d'onde donnée, la portée annoncée par les constructeurs des capteurs a permis de faire la présélection suivante :

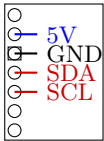
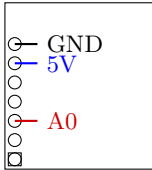
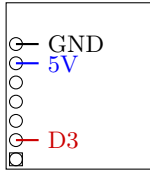
Capteur	VL53L1X	MB1013
Type d'onde	Lumineuse	Sonore
Domaine	Infrarouge (940 nm)	Ultrasonore (42 kHz)
Prix	19,40 €	39,90 €
Interface	I <sup>2</sup> C	Analogique
		
		

TABLE 2 : Modèles de capteurs de distance testés

Le VL53L1X utilise donc un laser (de classe 1, donc inoffensif) de longueur d'onde invisible à l'homme. Il peut communiquer avec le microcontrôleur *via* l'interface I<sup>2</sup>C, utilisant les broches SDA et SCL du microcontrôleur. Développé par ST Microelectronics, on utilise ici une version soudée sur une carte, pour faciliter la connexion à un microcontrôleur.

Le capteur MB1013, de la gamme HRLV-MaxSonar-EZ1 développée par Maxbotic, utilise les ondes ultrasonores. Il est déjà fixé à une plaque. Il peut communiquer de deux façons :

analogique, en le connectant à une broche analogique du microcontrôleur, et en modulation de largeur d'amplitude (MLA), processus détaillé dans la partie correspondante, en le connectant à une broche digitale du microcontrôleur. Ces deux modes de communication seront testés.

## 2.2 Détermination du faisceau de détection

La première étape des tests consiste à déterminer le faisceau de détections des capteurs, c'est-à-dire la zone dans laquelle un obstacle est détecté (quelque soit la précision de la mesure de distance).



FIGURE 2 : Dispositif de test

Les mesures se font dans un environnement dégagé. Pour plusieurs distances  $d_{axiale}$ , on place un obstacle cylindrique, de diamètre 6 cm, dans l'axe de détection du capteur testé, puis on le déplace perpendiculairement à cet axe, et on note la distance  $d_{radiale}$  à l'axe pour laquelle le capteur ne détecte plus l'obstacle. Le choix du diamètre de l'obstacle est censé refléter la taille minimale des obstacles communs dans l'espace public, par exemple des poteaux.

L'émission des ondes étant invariante par rotation autour de l'axe de détection, la zone de détection conserve cette invariance. Pour une distance  $d_{axiale}$  donnée, une seule mesure de  $d_{radiale}$  suffit pour caractériser le faisceau.

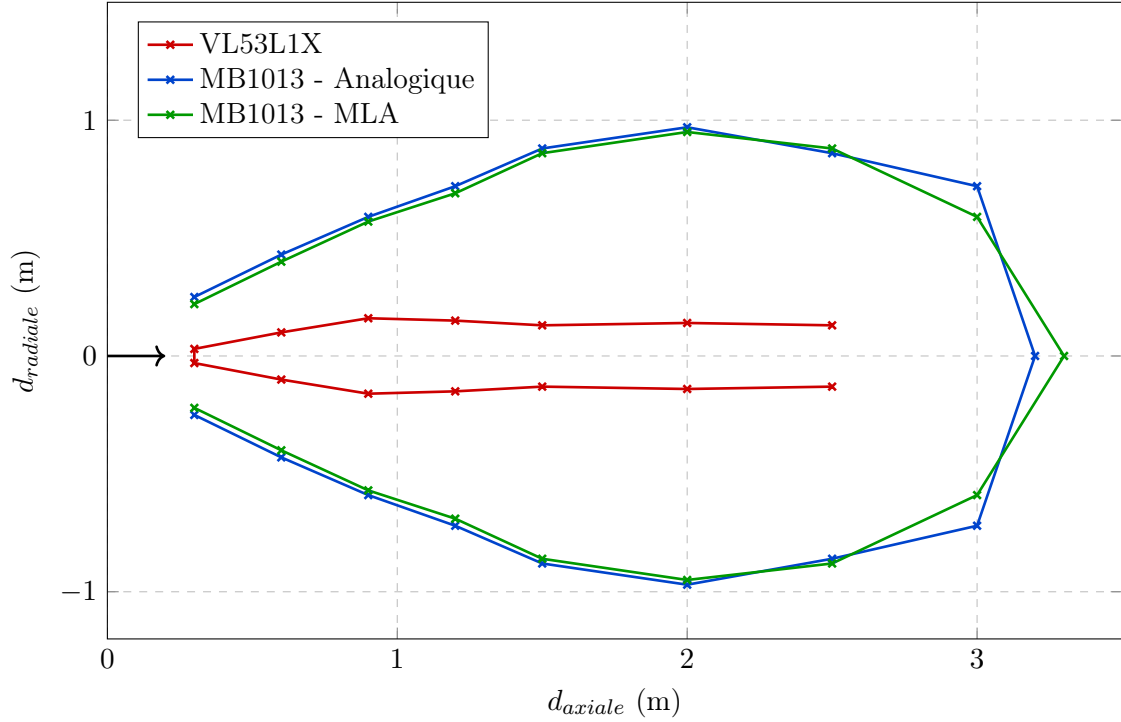


FIGURE 3 : Zone détectée par le capteur placé à l'origine

Les résultats, en figure 3, sont cohérents avec la nature des ondes utilisées : le laser est plus directif que les ondes sonores, bien que le VL53L1X intègre des lentilles (une pour l'émission, une autre pour la réception) permettant d'étendre le champ de vision à  $27^\circ$ .

L'incertitude des mesures est évaluée à 2 cm pour  $d_{axiale}$ , et à 5 cm pour  $d_{radiale}$ . Le mode de communication du MB1013 n'a que peu d'influence. La portée du VL53L1X semble plus limitée que celle du MB1013, sur ce test, mais cela est dû au faible diamètre de l'obstacle. En effet, le VL53L1X reste précis (à 5 cm près) jusqu'à plus de 4 mètres lorsqu'il fait face à un mur.

### 2.3 Précision des capteurs

Le deuxième test mesure la précision des capteurs. On déplace un coussin (mou, analogue au vêtements d'un piéton) carré de 35 cm de coté le long de l'axe de détection, et on relève la distance de détection du capteur pour la comparer à la distance réelle de l'obstacle.



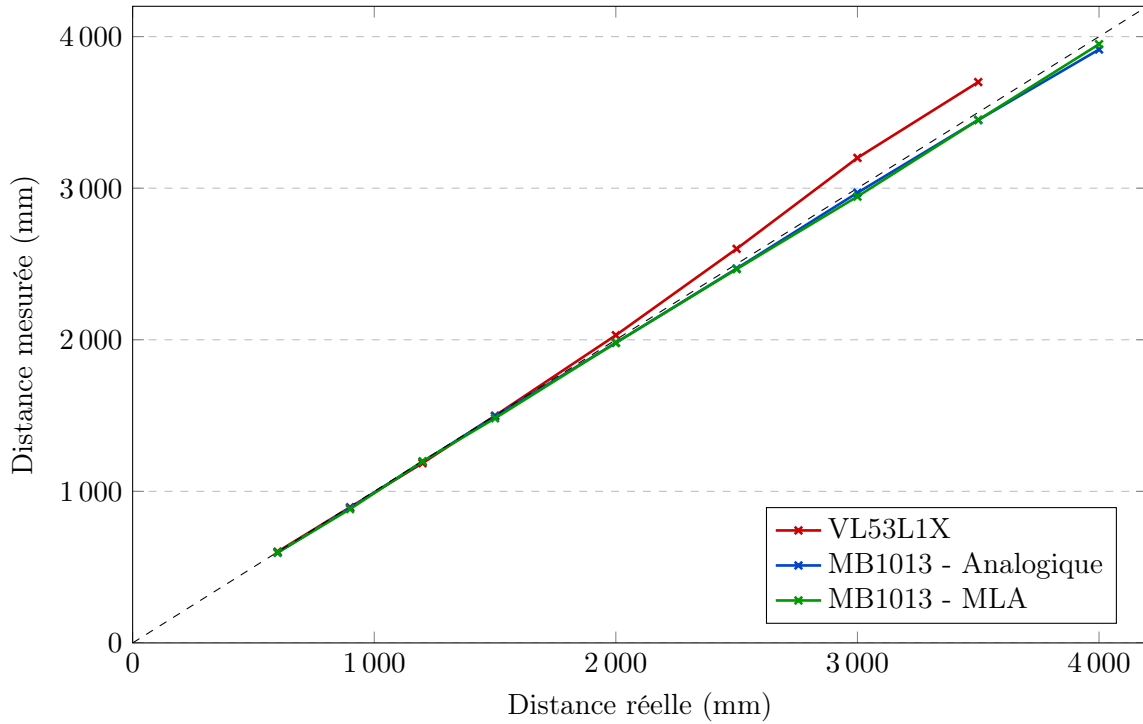


FIGURE 4 : Mesures de distance

Le MB1013 semble plus précis. La précision du capteur n'est cependant pas un facteur de choix déterminant pour ce projet : les écarts peuvent être corrigés algorithmiquement. L'important est que la distance mesurée augmente bien progressivement avec la distance de l'obstacle.

## 2.4 Réactivité des capteurs

La réactivité a été identifiée comme facteur clé. Pour la tester, on place un obstacle à environ 1 mètre du capteur, et on laisse tomber, à  $t_0$ , une feuille A4 30 cm en avant du capteur. On s'attend à ce que la mesure de distance du capteur passe brutalement de 100 cm (obstacle en arrière plan) à 30 cm (feuille en train de tomber), puis de nouveau à 100 cm (chute de la feuille terminée).

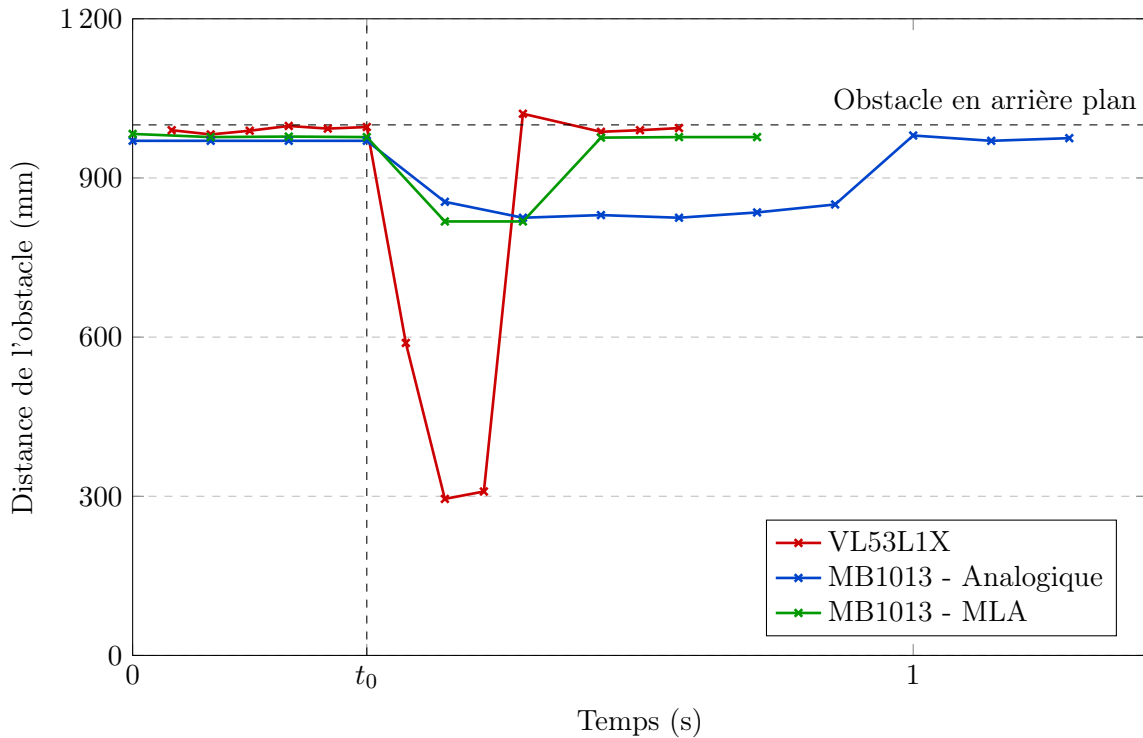


FIGURE 5 : Détection d'une feuille A4 lâchée à 30 cm du capteur à  $t_0$

Les résultats du VL53L1X sont très convaincants. En revanche, les mesures du MB1013 semblent erratiques.

## 2.5 Conclusion

Dans tous les tests réalisés, le mode de communication du MB1013 a semblé peu significatif. On se contente donc de comparer les deux capteurs indépendamment du mode de communication :

Capteur	VL53L1X	MB1013
Portée	++	+++
Faisceau	Directif	Large
Précision	Suffisante	Suffisante
Réactivité	+++	+
Prix	19,40 €	39,90 €

TABLE 3 : Récapitulatif des tests

Malgré un petit manque de précision face au MB1013, on choisi le VL53L1X. Plus réactif, plus directif, et suffisamment précis pour détecter la progressivité dans la distance des obstacles, ce capteur est plus adapté au mode par balayages envisagé pour le dispositif.

L'utilisation du VL53L1X a par la suite mené à l'identification d'un léger bruit dans les mesures. Pour l'éliminer, on effectue (algorithmiquement) une moyenne glissante sur 3 points (ce qui correspond à 0,15 s). Un traitement du signal plus poussé a été envisagé (notamment le filtre de Kalman), mais abandonné à cause des limitations techniques et du besoin de réactivité. Par ailleurs, la moyenne glissante suffit à lisser les mesures.

### 3 Élaboration de l'interface utilisateur

Une fois l'information (distance de l'obstacle le plus proche) acquise, le dispositif doit la transmettre à l'utilisateur. Un signal sonore a été envisagé, mais s'est vite révélé désagréable à l'utilisation, et peut isoler l'utilisateur de son environnement.

Le choix de l'interface s'est naturellement porté sur les vibrations, solution classique parmi les dispositifs personnels de détection d'obstacles. Encore fois, on teste différents vibreurs.





Vibreux Gotronic	VPM2	Gravity	SMD
			
1,30 €	4,20 €	2,60 €	1,30 €

TABLE 4 : Modèles de vibreurs testés

#### 3.1 Modulation de largeur d'amplitude

Les vibreurs sont de simples moteurs, faisant tourner des disques au barycentre désaxé pour générer les vibrations. La première question qui se pose est la façon dont on fait varier l'intensité de la vibration. En effet, on aimerait une amplitude de vibration décroissante avec la distance de l'obstacle, mais le microcontrôleur ne permet que de fixer une tension maximale  $E_0$  ou nulle sur ses broches digitales.

Pour obtenir, à partir d'un ensemble discret de valeurs, un signal pseudo-analogique, c'est-à-dire à valeurs dans une plage continue de valeurs, on utilise le principe de modulation de largeur d'amplitude (MLA en français, *PWM* pour *Pulse Width Modulation* en anglais).

Les vibreurs se comportant comme des filtres passe-bas, on effectue une succession assez rapide de valeurs à ces états discrets, de façon à obtenir une composante continue, c'est à dire la moyenne du signal, à la tension souhaitée. Le microcontrôleur permet de générer de tels signaux à une fréquence de 490 Hz.

En pratique, on génère un signal créneau fixé en position "haute" ( $E = E_0$ ) pendant une durée  $T_{on}$  de la période  $T$ , et en position "basse" ( $E = 0$ ) pendant le reste de la période. On note alors  $D = \frac{T_{on}}{T}$  le rapport cyclique (*duty cycle* en anglais).

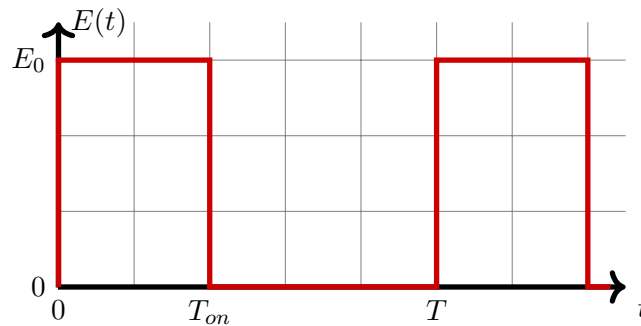


FIGURE 6 : Modélisation du signal créneau (pour un rapport cyclique de 0.4)

Après calcul, la composante continue du signal (correspondant à la moyenne temporelle

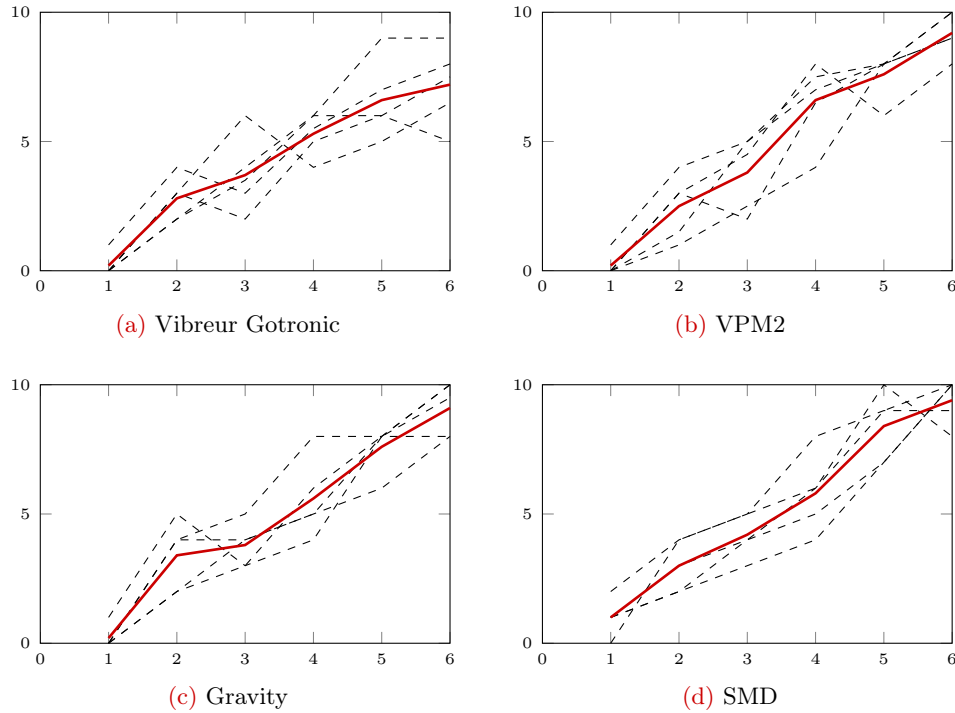
dans la décomposition de Fourier) est proportionnelle au rapport cyclique. La génération du signal décrit est une fonctionnalité intégrée au microcontrôleur : il suffit de préciser le rapport  $D$  pour appliquer la tension choisie au vibreur. C'est aussi avec cette méthode que le capteur MB1013 communique la distance mesurée de l'obstacle le plus proche dans le mode de communication MLA.

$$\langle E(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt = \frac{1}{T} \left( \int_0^{T_{on}} E_0 dt + \int_{T_{on}}^T 0 dt \right) = D \cdot E_0 \quad (2)$$

### 3.2 Courbes intensité-ressenti

Le ressenti de l'intensité de vibration n'est *a priori* pas proportionnel à la tension appliqué aux bornes du vibreur. De plus, les vibreurs n'étant pas idéaux, une certaine tension minimale de mise en route est nécessaire avant l'observation de vibration.

Cela nous pousse à tester la corrélation entre l'intensité des vibrations (celle commandée par le microcontrôleur) et celle ressentie par un utilisateur. Pour cela, on code le microcontrôleur pour appliquer, toutes les 5 secondes, des impulsions de vibrations d'une durée de 1,5 seconde, d'intensité aléatoire parmi 6 niveaux d'intensité. On demande ensuite à 5 individus de noter leur ressenti d'intensité de vibration, sur une échelle de 0 à 10. Voici les résultats :



**FIGURE 7 :** Intensité de vibration ressentie en fonction de l'intensité des vibrations (5 utilisateurs en pointillés, moyenne en rouge)

Le vibreur Gotronic est éliminé : pas assez puissant, il ne permet de communiquer clairement une plage étendue d'intensités de vibrations. Les autres vibreurs semblent tous convenir. On choisit le VPM2, car son disque de rotation est protégé, et il est plus simple à fixer à notre dispositif (scotch intégré).

### 3.3 Modélisation de la courbe intensité-ressenti

Une fois le vibreur choisi, on essaie de l'exploiter au mieux, en calibrant la fonction `dist_to_intensity`. Cette fonction prend la distance de l'obstacle le plus proche (en mm), et renvoie une commande correspondant à l'intensité de vibration (entre 0 et 255). Cette fonction doit utiliser l'étendue de la plage d'intensité de vibrations que le vibreur peut communiquer, tout en restant assez simple pour correspondre à l'objectif de réactivité. Une fonction polynomiale par morceaux de degré 3 se révèle concluante lors des tests.

$$f(x) = \begin{cases} ax^3 + bx^2 + cx + d & x \leq 2000 \\ 0 & x > 2000 \end{cases} \quad (3)$$

$$(a, b, c, d) = (-1.8 \cdot 10^{-8}, 1.08 \cdot 10^{-4}, -0.234, 255)$$

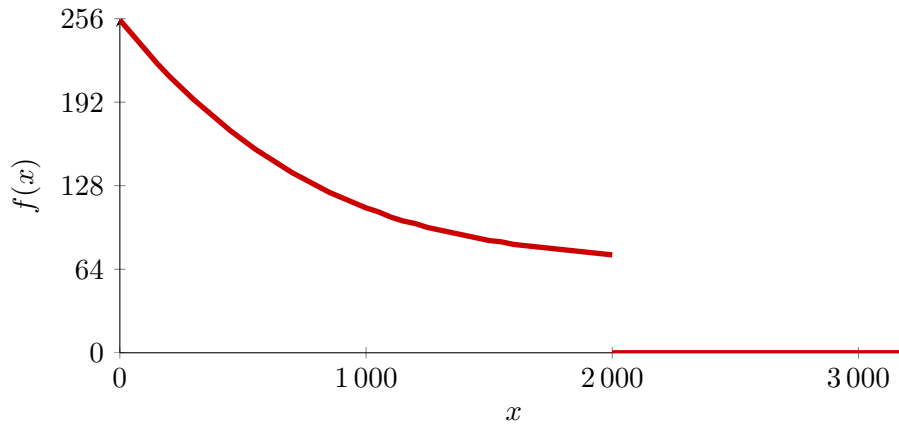


FIGURE 8 : Fonction `dist_to_intensity`

Avec cette fonction, le dispositif vibre uniquement si l'obstacle détecté est à une distance inférieure à 2 mètres. Le choix d'une discontinuité à 2 mètres s'explique par l'existence d'une tension minimale de mise en route.

## 4 Produit fini

### 4.1 Conception générale

Les choix du capteur de distance et du vibreur ont été cruciaux, mais ce ne sont pas les seuls points de discussion lors de la conception de ce produit.

Le microcontrôleur choisi est l'Arduino Nano Every. Peu chère et très populaire, c'est la carte la plus compacte d'Arduino, fabriquant renommé. Elle convient à l'exploitation du capteur de distance, avec une interface I<sup>2</sup>C. D'autres cartes, plus petites, ont été envisagées, mais la tension aux broches de communication s'est révélée insuffisante lors des tests (contre 5 V pour la Nano Every).

Pour conserver un produit maniable et compact, son alimentation est externe. Le dispositif s'allume dès lors qu'il est branché (port micro-USB), par exemple à une batterie externe. Cela supprime également le besoin d'un interrupteur de mise sous tension.

Pour correspondre aux objectifs de reproductibilité, on opte pour une conception simple. On se limite ainsi à un unique couple capteur-vibreur : plus clair, moins cher, plus simple à fabriquer, cela suffit pour le mode de fonctionnement par balayages envisagé. De même, l'appareil n'est pas encapsulé dans un boîtier. L'impression d'un boîtier 3D a été envisagé, mais cela augmente très significativement le coût et la complexité de la fabrication. La conception par l'utilisateur d'un boîtier adapté à son usage est toujours possible *a posteriori*.

### 4.2 Composants

Les composants retenus sont listés dans le tableau 5. Le coût total du produit est inférieur à 40 euros, frais de port exclus.

Composant	Nom	Prix (€)
Microcontrôleur	Arduino Nano Every	8,80
Capteur de distance	VL53L1X	19,40
Vibreur	VPM2	4,20
<b>TOTAL</b>		<b>32,40</b>

TABLE 5 : Composants retenus

La fabrication du produit nécessite un matériel générique, disponible dans des ateliers partagés, ou à l'achat (pour moins de 30 euros) :

- Station de soudure
- Scotch double face
- Fils de prototypage

Les connections à établir sont détaillées sur la figure 9. Il y a une dizaine de points de soudure : des compétences techniques préalables ne sont pas nécessaires.

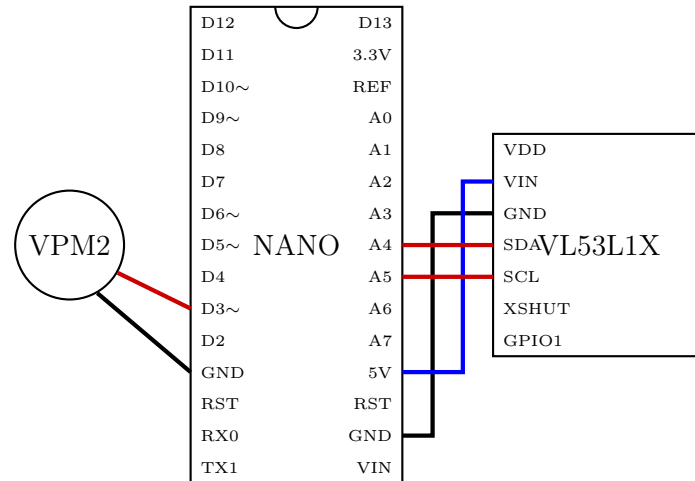
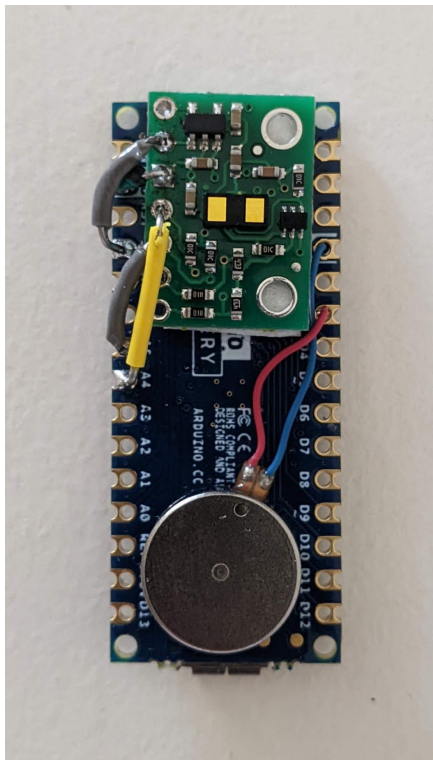


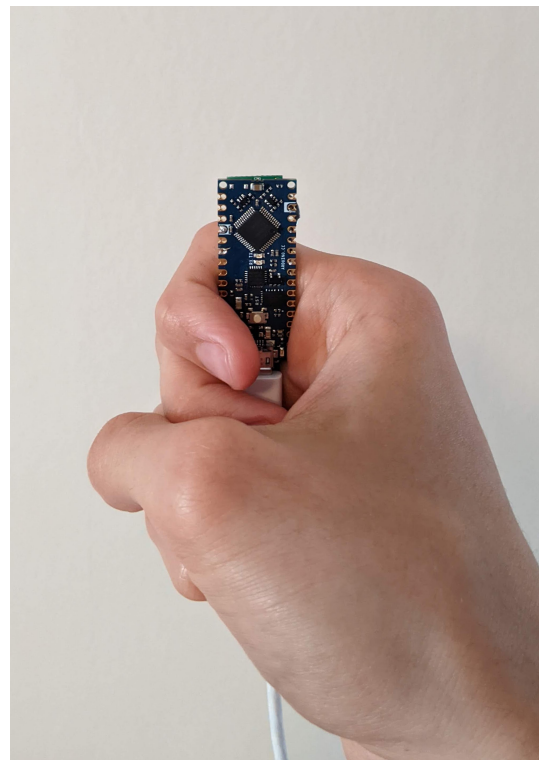
FIGURE 9 : Schéma de soudure

### 4.3 Conclusion

Voici le produit réalisé :



(a) Vue de face



(b) Dans la main

FIGURE 10 : Produit fini

Notons enfin que la rédaction et la publication de la documentation, disponible en ligne, font partie intégrante de ce projet.



## A Liens

- Présentation du projet : <https://jacquin.xyz/tipe>
- Toutes les ressources : <https://github.com/arthur-jacquin/tipe>

## B Prototype final sur *breadboard*

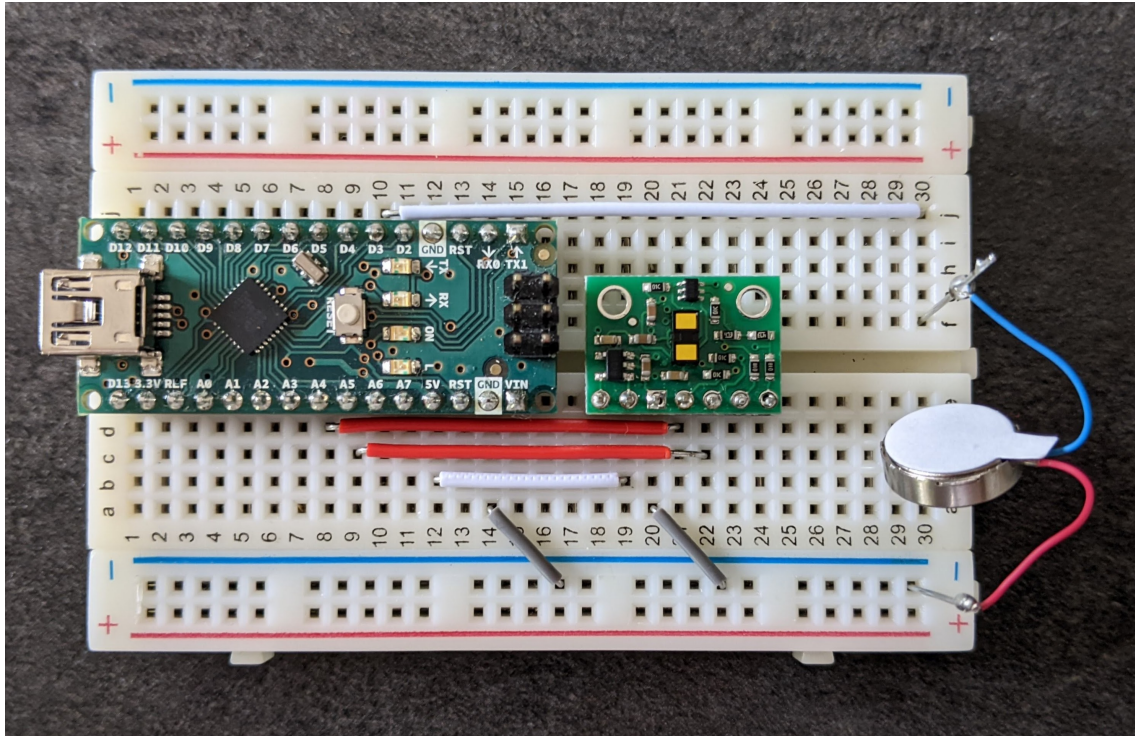


FIGURE 11 : Prototype final sur *breadboard*

## C Code du microcontrôleur

```
1 // Libraries
2 #include <Wire.h>
3 #include <VL53L1X.h>
4
5 // Declare used pins
6 const int pinVibr = 3;
7 VL53L1X sensor; // I2C protocol
8
9 // Declare variables
10 int dist; // Distance measured (in mm)
11 int intensity; // Command for vibration (from 0 to 255)
12 const int n = 3; // Number of points for sliding average
13 int logs[n]; // Array to store last measurements
14 int k = 0; // Sliding index in array
15 int avg = 0; // Average value
16
17 void setup () {
18   pinMode(pinVibr, OUTPUT); // Set vibration motor as output
```



```

19
20  for (int i = 0; i < n; i++) { // Initialize array
21      logs[i] = 0;
22  }
23
24  // Communication through I2C (for VL53L1X), set at 400 kHz
25  Wire.begin();
26  Wire.setClock(400000);
27
28  // Configure VL53L1X in long distance mode
29  // Read rate frequency set as 20Hz (<< 400 kHz)
30  sensor.setTimeout(500);
31  if (!sensor.init()) { while (1); } // No sensor detected
32  sensor.setDistanceMode(VL53L1X::Long);
33  sensor.setMeasurementTimingBudget(50000);
34  sensor.startContinuous(50);
35 }
36
37 void loop () {
38     // Reading the sensor measurement
39     dist = sensor.read();
40
41     // Computing sliding average
42     k = (k + 1)%n;
43     avg = avg + (dist - logs[k])/n;
44     logs[k] = dist;
45
46     // Modifying vibration intensity
47     intensity = dist_to_intensity(avg);
48     analogWrite(pinVibr, intensity);
49 }
50
51 int dist_to_intensity (int x) {
52     // Takes dist in mm, return command between 0 and 255
53     if (x > 2000) {
54         return 0;
55     } else {
56         return -1.8*pow(10, -8)*x*x*x + 0.108*x*x/1000 - 0.234*x +
57             255;
58     };
59 }

```

## D Schéma électrique du VL53L1X

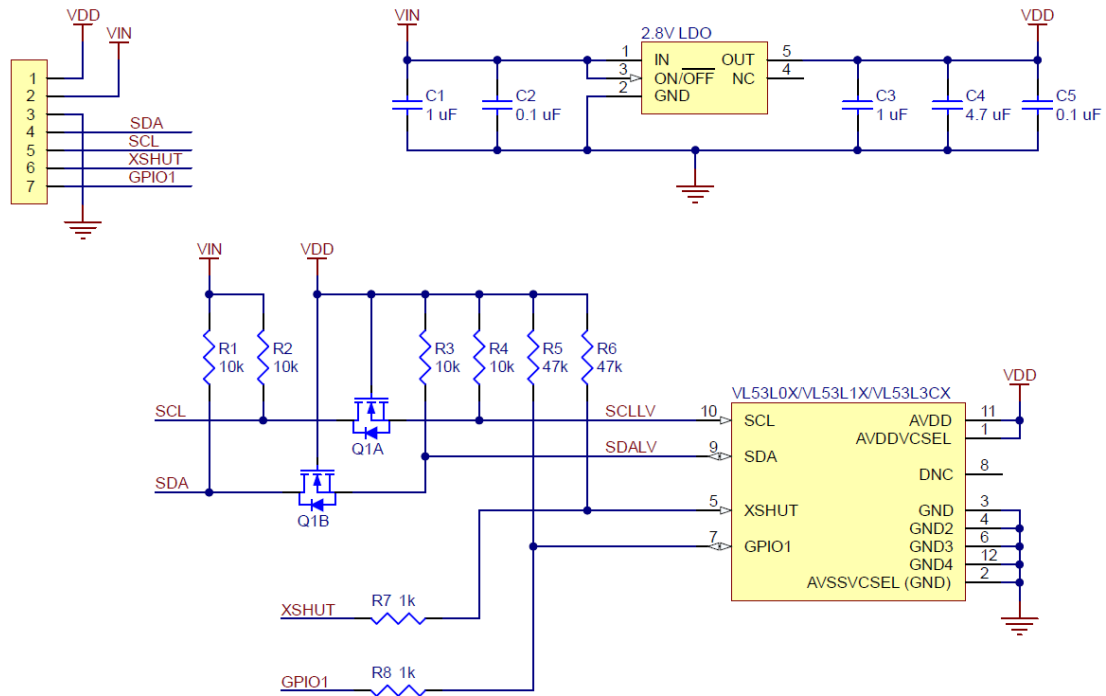


FIGURE 12 : Schéma électrique du VL53L1X

## E Liste complète des composants

Catégorie	Nom/objet	Qté	Fabricant	Réf. fabr.	Fournisseur	Prix (€)
Microcontrôleur	Arduino Nano	1	Arduino	A000005	Gotronic	22,90
Microcontrôleur	Arduino Nano Every	3	Arduino	ABX00028-3P	Arduino	25,10
Microcontrôleur	Seeduino XIAO	1	Seedstudio	102010328	Gotronic	5,90
Microcontrôleur	Beetle	1	DFRobot	DFR0282	Gotronic	9,80
Capteur de dist.	VL53L1X	1	Polulu	3415	Gotronic	19,40
Capteur de dist.	HRLV-MaxSonar-EZ1	1	Maxbotic	MB1013	Gotronic	39,90
Vibreux	Vibreux miniature	2	Gotronic	25355	Gotronic	2,60
Vibreux	VMP2	1	Solarbotics	VPM2	Gotronic	4,20
Vibreux	Gravity	1	DFRobot	DFR0440	Gotronic	2,60
Vibreux	SMD	1	Seedstudio	316040005	Gotronic	1,30
Prototypage	Kit plaque de montage	1	Gotronic	SD80A	Gotronic	9,50
Prototypage	Alimentation	2	Velleman	PS910	Gotronic	15,90
Prototypage	Kit pour prototypage	1	Elegoo	E0	Amazon	20,99
Soudure	Station de soudage	1	Velleman	VTSS4N	Gotronic	17,90
Soudure	Pompe à dessouder	1	Gotronic	13580	Gotronic	3,50
Soudure	Fil de soudure	1	Gotronic	13673	Gotronic	8,30
<b>TOTAL</b>						<b>209,79</b>

TABLE 6 : Liste complète des composants