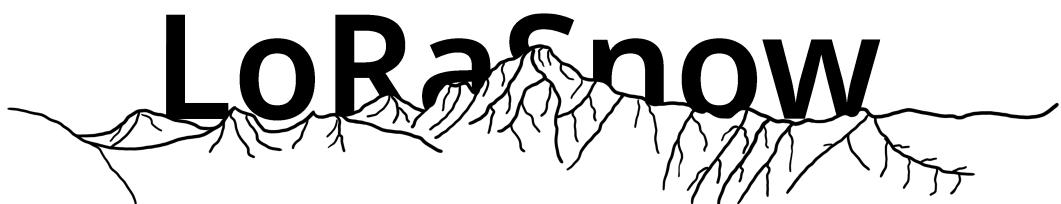


HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIEUR DU VALAIS



MESURE DU NIVEAU DE NEIGE EN CONDITIONS  
DIFFICILES

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
1.1	Contexte . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Spécifications</b>	<b>7</b>
2.1	Cahier des charges . . . . .	7
2.1.1	LoRaWAN . . . . .	8
2.1.2	Edge Computing . . . . .	8
2.1.3	Notre interprétation du cahier des charges . . . . .	9
2.2	Schéma bloc global . . . . .	10
<b>3</b>	<b>LiDAR</b>	<b>11</b>
3.1	Méthode . . . . .	11
3.1.1	Fondamentaux . . . . .	11
3.1.2	Caractéristiques . . . . .	12
3.1.3	Implémentation . . . . .	13
3.1.4	Méthode de mesure . . . . .	14
3.2	Résultats . . . . .	15
3.2.1	Caractéristique de l'erreur de mesure . . . . .	16
3.2.2	Mesures de distance dans un environnement perturbé . . . . .	19
3.2.3	Stabilité en température des mesures . . . . .	22
3.2.4	Mesure de hauteur en laboratoire . . . . .	23
3.2.5	Mesure de hauteur en situation réelle . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Computer Vision</b>	<b>29</b>
4.1	Défis liés à la mesure en extérieur . . . . .	29
4.2	Applications pour la mesure de neige . . . . .	29
4.2.1	Mesure de niveau sur une règle . . . . .	30
4.2.2	Mesure de niveau par Stéréovision . . . . .	31
4.2.3	Mesure du débit de chute de neige . . . . .	32
4.2.4	Détection de route enneigée . . . . .	32
4.2.5	Méthodes retenues . . . . .	32
4.3	Implémentation . . . . .	33
4.3.1	Récupération des vidéos . . . . .	33
4.3.2	Mesure du débit de chute de neige . . . . .	33
4.3.3	Détection de route enneigée . . . . .	34
4.4	Résultats . . . . .	35
4.4.1	Mesure de débit de chute de neige . . . . .	35
4.4.2	Détection de route enneigée . . . . .	35

<b>5 Mécanique</b>	<b>36</b>
5.1 Banc de test . . . . .	36
5.1.1 Fausse neige (confettis) . . . . .	37
5.1.2 Canon à confettis . . . . .	37
5.2 Boîtier . . . . .	41
5.2.1 Vitre . . . . .	41
5.2.2 Modification des composants internes . . . . .	42
5.2.3 Etanchéité . . . . .	42
5.2.4 Problème de buée . . . . .	43
5.2.5 Premier concept . . . . .	43
5.2.6 Version finale du boîtier . . . . .	44
5.2.7 Module électronique . . . . .	47
5.2.8 Bras de fixation . . . . .	49
5.2.9 LoRaSnow Testbox . . . . .	50
<b>6 Synthèse des résultats</b>	<b>51</b>
6.1 LiDAR . . . . .	51
6.1.1 Problèmes rencontrés . . . . .	51
6.2 Mécanique . . . . .	52
<b>7 Conclusion</b>	<b>53</b>
7.1 Bilan . . . . .	53
7.2 Signatures . . . . .	53
<b>Bibliographie</b>	<b>54</b>

# Table des figures

2.3	Schéma bloc global du projet . . . . .	10
3.1	Garmin Lidar Lite v4 . . . . .	11
3.2	LiDAR Lite V4 implémenté sur Arduino Uno . . . . .	13
3.3	LiDAR Lite V4 sur STM32-NUCLEO . . . . .	14
3.4	Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow . . . . .	15
3.5	Mesure de distance comparée à la distance réelle . . . . .	16
3.6	Distance mesurée en fonction de la distance réelle . . . . .	17
3.7	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle . . . . .	17
3.8	Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile . . . . .	18
3.9	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile . . . . .	18
3.10	Mise en place du test de perturbation . . . . .	19
3.11	Histogramme de la mesure de référence . . . . .	20
3.12	Comparaison des 5 mesures effectuées . . . . .	20
3.13	Mise en place du test en température . . . . .	22
3.14	Graphe de stabilité en température du LiDAR . . . . .	23
3.15	Mise en place du test de mesure d'épaisseur . . . . .	24
3.16	Boîte à moustache des mesures d'épaisseur . . . . .	25
3.17	Résultat des calculs d'offset par méthode . . . . .	25
3.18	Vue du PCB fabriqué . . . . .	26
3.19	Mise en place du test en condition réelle . . . . .	27
3.20	Résultat des mesures effectuées . . . . .	28
4.1	Comparaison image de neige HD et cas concret . . . . .	29
4.2	Mesure de neige à la règle . . . . .	30
4.3	Schéma de principe stéréovision . . . . .	31
4.4	Comparaison image source et bruit sur image . . . . .	32
4.5	Étapes de la mesure de débit de chute de neige . . . . .	33
4.6	Référence pour détection de neige sur route . . . . .	34
4.7	Images testées pour détection de neige sur route . . . . .	34
5.1	Encombrement de la structure de test . . . . .	36
5.2	Aspect des confettis fabriqués . . . . .	37
5.3	Principe du canon à effet Venturi . . . . .	38
5.4	Exemple d'impression 3D du canon . . . . .	38
5.5	Turbine DC . . . . .	39
5.6	Deuxième version du canon . . . . .	39
5.7	Mise en fonction du canon . . . . .	40
5.8	Ensemble final du canon à confettis . . . . .	40

5.9	Vitre et jointure . . . . .	41
5.10	Transmittance de différents matériaux . . . . .	42
5.11	Premiers designs du boîtier (à gauche : double vitre, à droite : simple vitre) . . . . .	42
5.12	Etanchéité du boîtier . . . . .	43
5.13	Ouverture arrière du boîtier . . . . .	44
5.14	Encombrement du boîtier, version 1 (en rouge l'encombrement estimé de l'électronique) . . . . .	44
5.15	Ouverture du boîtier, version 2 (à gauche), grenouillère pour la fermeture (à droite) . . . . .	45
5.16	Mécanisme du pivot . . . . .	46
5.17	Fixation de la casquette et inserts filetés . . . . .	46
5.18	Support du module . . . . .	46
5.19	Support de fixation du boîtier . . . . .	47
5.20	Module électronique . . . . .	47
5.21	Support à batteries . . . . .	48
5.22	Plaque de fixation pour la partie électronique . . . . .	48
5.23	Support pour le LiDAR . . . . .	48
5.24	Système de réglage de l'élévation . . . . .	49
5.25	Support de fixation tubulaire et mural . . . . .	49
5.26	LoRaSnow Testbox, intérieur et extérieur . . . . .	50

# Liste des tableaux

3.1	Extrait des spécifications du LiDAR Lite V4 . . . . .	12
3.2	Sélection des registres I2C essentiels . . . . .	14
3.3	Différentes méthodes de calcul de distance (en cm) . . . . .	21
3.4	Mesures relevée lors du test . . . . .	27

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Ne vous est-il jamais arrivé de vous réveiller un matin et, lorsque vous prenez votre véhicule ou un transport en commun, surprise ! Il a neigé durant la nuit, et les services de déneigement n'y étaient visiblement pas préparés.

LoRaSnow est un projet qui vise à palier à ce problème. Intégrant les dernières technologies de l'internet des objets et une utilisation intelligente de capteurs, ces modules alertent les services privés et communaux de chutes de neige dès les premiers flocons, permettant une réaction rapide et efficace.

En effet, le système d'alerte de piquet en place ne permet pas une vue globale de la région, et tarde parfois à réagir. De plus, les prévisions météorologiques sont parfois imprécises quand il s'agit de quantité de précipitation. Ce projet amène donc une surveillance constante et automatique d'une région, remplaçant par la même occasion le système coûteux déjà en place.

## 2 Spécifications

### 2.1 Cahier des charges

LoRaSnow est un projet destiné à détecter de la neige sur une route lorsque les conditions météorologiques sont difficiles. Ainsi le système doit pouvoir fournir des résultats fiables, même sous une neige importante, dans le brouillard ou encore un vent fort.

Le but du projet est donc de créer un module capable de détecter de la neige par une quelconque méthode définie et transmettre des données sur un réseau LoRaWAN tout en implémentant une solution en *Edge Computing*. Notre travail ici est d'étudier les différentes possibilités qui s'offrent à nous pour accomplir cette tâche.



FIGURE 2.1 – Conditions typiques de fonctionnement du projet<sup>1</sup>

---

1. Copyright : MediaPunch/Shutterstock

### 2.1.1 LoRaWAN

LoRaWAN (acronyme de *long-range wide-area network*) est un réseau de communication radio spécifique à l'internet des objets (IoT). Ce protocole est utilisé pour transmettre des données sur des grandes distances tout en permettant une consommation électrique très faible. La longue portée de son signal permet d'installation d'appareils dans des endroits isolés, sans nécessairement avoir accès au réseau électrique ou mobile.

La topologie de LoRaWAN est dite en étoile d'étoiles. En effet, comme le montre la figure 2.2, le serveur d'application se trouve au centre, et les passerelles réparties sur un territoire donné communiquent avec les appareils installés.

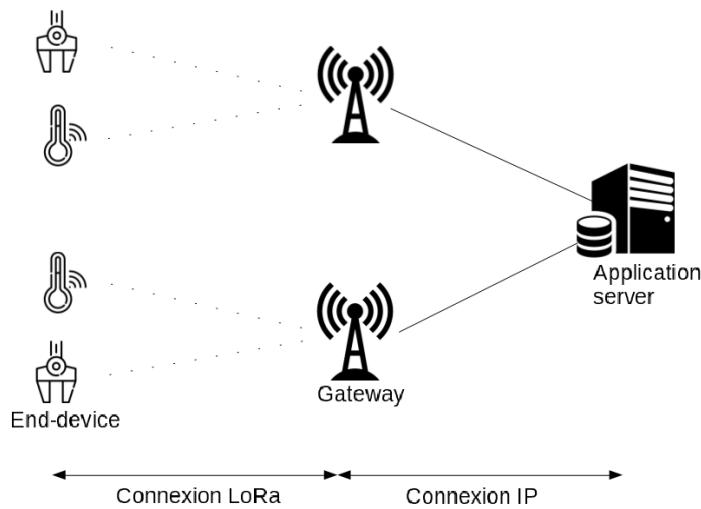


FIGURE 2.2 – Topologie LoRaWAN<sup>1</sup>

### 2.1.2 Edge Computing

Comme le réseau LoRa utilisé permet une transmission de données bas débit, il est important d'économiser le plus possible la bande passante. Pour cela, la méthode d'optimisation d'*Edge Computing* est privilégiée, rapprochant le traitement des données au plus proche des capteurs.

En pratique, dans ce projet, cela signifie que les données récoltées seront traitées directement sur le module LoRaSnow. Ainsi, uniquement les résultats des mesures seront envoyées dans le cloud.

1. Tiré de la page Wikipedia LoRaWAN

### 2.1.3 Notre interprétation du cahier des charges

Comme le cahier des charges donne un objectif à atteindre, nous avons jugé important de préciser les étapes à accomplir pour détecter de la neige sur une route.

#### Mesure de hauteur de neige

Afin d'avoir une indication sur l'enneigement de la route, nous avons trouvé utile d'avoir une information sur la hauteur de neige présente dans le but d'avoir une vue global d'une région grâce à un réseau de capteurs. Sur un vaste territoire comme certaines communes de montagne, l'enneigement peut être irrégulier. De cette manière, nous pouvons connaître facilement l'état des routes dans des endroits isolés.

#### Reconnaissance du débit de neige et de l'état de la route

En plus des informations de hauteur de neige, nous avons couplé une solution de vision par ordinateur qui nous permet de récolter des mesures sur l'enneigement de la route ainsi que le débit actuel de flocons, dans l'objectif de faire des prévisions à court terme.

Nous avons estimé qu'il était important de créer une redondance sur l'indication de l'état de la route. En effet, nous nous attendons à ce que la mesure physique de hauteur de neige ne soit pas capable de donner des résultats pertinents pour les premiers millimètres. De plus la mesure de hauteur de neige par un capteur sera sûrement réalisé sur une toute petite zone ou un point, si cette zone/point est mal déneigé, ou qu'un objet comme un caillou se place à cet endroit, la mesure sera faussée.

#### Fixation et protection du module

Comme le module LoRaSnow sera exposé au aléas météorologiques de la montagne, un boîtier étanche et résistant doit être confectionné sur mesures. Il doit permettre de protéger totalement l'électronique de l'humidité et d'autres types de perturbations. Il doit permettre une fixation simple, fiable et réglable. La fixation de l'électronique devra être organisée pour permettre une installation ou maintenance simple.

L'avantage principal de ce cahier des charges explicite réside dans le fait qu'il est très facile pour nous de séparer les tâches entre les collaborateurs du projet. Ainsi, chaque solution n'est que très peu couplée les unes par rapport aux autres durant le prototypage.

## 2.2 Schéma bloc global

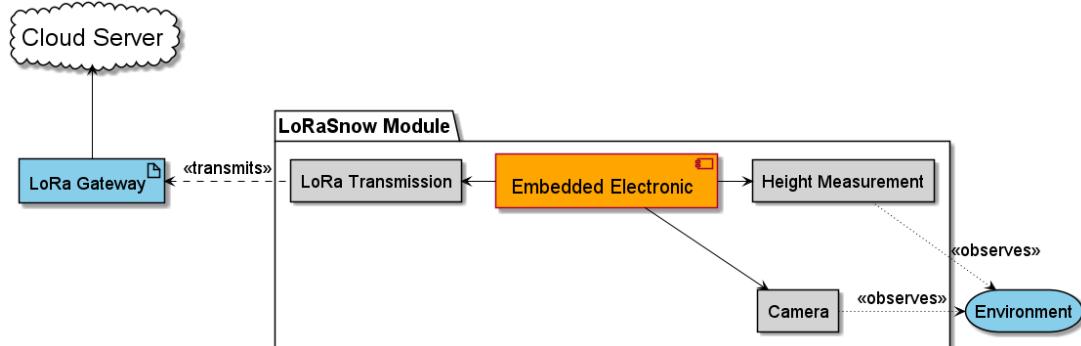


FIGURE 2.3 – Schéma bloc global du projet

### Environment

Ceci représente l'environnement mesuré, c'est-à-dire la route enneigée. Il est important de noter que les deux capteurs qui observent l'environnement le font de manière non-intrusive.

### Height Measurement

Ce capteur se charge de mesurer une hauteur de neige sur la route selon une méthode définie. Il communique ses mesures directement à l'*Embedded Electronic*.

### Camera

Cette partie s'occupe de mesurer le débit de flocons et indiquer si le segment de route est enneigé. Elle permet aussi de certifier que la *Height Measurement* est bien fiable.

### Embedded Electronic

L'électronique embarquée représente la partie central du projet. C'est ici que l'on retrouve le microcontrôleur qui traite les données reçues par les différents capteurs et de transmettre les résultats.

### LoRa Transmission

Le module de transmission LoRa reçoit les données du microcontrôleur et les envoie sur le réseau LoRaWAN à l'aide d'une antenne à l'intérieur du boîtier.

### LoRa Gateway

La passerelle LoRaWAN couvre une surface donnée dans laquelle se trouvent un ou plusieurs modules LoRaSnow. Ainsi, les données transmises sont réceptionnées et retransmises sur un réseau IP.

### Cloud Server

Finalement, on retrouve un serveur dans le cloud se chargeant de la bonne réception des données de tous les modules LoRaSnow d'un même groupe. Les données récoltées peuvent ainsi être mises en forme et utilisées pour indiquer par exemple la couverture neigeuse d'une région.

Les trois derniers points évoqués (*LoRa Transmission*, *LoRa Gateway*, *Cloud Server*) n'ont pas encore été implémentés dans le projet.

# 3 LiDAR

## 3.1 Méthode



FIGURE 3.1 – Garmin Lidar Lite v4

Le LiDAR (ou *laser imaging detection and ranging*) est un système de télédétection par laser utile pour mesurer des distances. Ce dernier envoie des faisceaux laser et mesure le temps que parcourt la lumière jusqu'au sujet. Il est ainsi possible de connaître avec plus ou moins de précision quelle est la distance entre l'objet et le capteur.

### 3.1.1 Fondamentaux

Le LiDAR a l'avantage de mesurer des distances de manière non-intrusive. De cette manière, il n'y a aucun contact avec le milieu mesuré.

Dans le cadre du projet, cette solution est préférée car elle n'interfère pas avec la route et les machines de déneigement. Nous attendons donc que ce LiDAR mesure une hauteur de neige sur un segment de route de manière fiable, et ce à une distance d'environ 2 mètres du sol afin de protéger les instruments.

À partir d'une mesure de référence au sol, le capteur doit être capable de mesurer une hauteur de neige présente dès les premières chutes, même après déneigement de la route. De plus, les conditions météorologiques extrêmes présentes en altitude ne doivent en aucun cas perturber ces mesures, et ce durant tout l'hiver. De plus, il serait important de ne pas avoir à entretenir ou dépanner le système au cours de la saison, sauf en cas de force majeure.

Lors d'une mesure lorsqu'il neige, les flocons peuvent passer devant le capteur et interférer avec la mesure. De ce fait, une solution efficace devra être développée afin de pouvoir mesurer efficacement la hauteur de neige présente sur la route. De plus, le bruit généré par ces flocons pourra éventuellement nous donner des informations sur le débit de neige actuel.

### 3.1.2 Caractéristiques

Après une étude détaillée des solutions disponibles sur le marché, nous avons retenu le LiDAR Lite V4 de la firme Garmin, spécialiste des équipements GPS et de capteurs pour diverses applications. Il a l'avantage principal d'être livré dans un boîtier adapté (comme le montre la figure 3.1), permettant une implémentation mécanique simple et rapide. Il faut cependant se méfier du fait que ce boîtier n'est pas étanche et ne peut par conséquent pas être directement utilisé en extérieur.

Specification	Measure
Operating temperature	-20 to 60°C
Operating voltage	4.75 to 5.25V
Current consumption	2mA idle 85mA during acquisition
Signals voltage	3.3V typical
Range	5cm to 10m
Resolution	1cm
LED wavelength	940nm
Interface	I2C or ANT
Update rate	I2C : Greater than 200Hz typical
Measurement repeatability	±1cm to 2m ±2cm to 4m ±5cm to 10m

TABLE 3.1 – Extrait des spécifications du LiDAR Lite V4

La table 3.1 montre une sélection des caractéristiques importantes du capteur, tirées directement de sa fiche technique<sup>1</sup>. Ci-dessous sont détaillés les éléments essentiels à la sélection de ce capteur.

#### Température de fonctionnement

Cette information s'avère essentielle pour ce projet. En effet, on peut s'attendre à ce que ce capteur puisse fonctionner à des températures négatives, parfois jusqu'à -20°C. La borne supérieure de cette caractéristique nous intéresse moins, car ce sont des températures difficilement atteignables en hiver, même dans un boîtier fermé en plein soleil.

#### Consommation de courant

Cette valeur est cruciale pour un projet qui se veut basse consommation et autonome. En effet, nous ne pouvons pas nous permettre de consommer plus que quelques microampères lorsque le système est en veille.

Ainsi, on remarque que le capteur au repos consomme un courant relativement élevé de 2mA, ce qui n'est malheureusement pas acceptable. Pour cela, un système de déclenchement devra être implanté (grâce à un MOSFET par exemple) afin de faire tomber cette consommation à zéro. Le courant de 85mA lorsque le LiDAR fait des acquisitions ne pose pas problème car la période de mesure représente une partie négligeable du temps de fonctionnement total.

#### Tension des signaux

Il est important de noter que les signaux qui sont transmis au capteur (par le biais du bus I2C ou par les GPIO) doivent absolument avoir une tension de 3.3V.

**Gamme de mesure** Le capteur est théoriquement capable de mesurer avec plus ou moins de précision n'importe quelle distance entre 5cm et 10m, ce qui satisfait entièrement les besoins du projet.

1. Fiche technique du LiDAR Lite V4 : [https://www.distrelec.ch/Web/Downloads/\\_m/an/SEN-15776\\_eng\\_man.pdf](https://www.distrelec.ch/Web/Downloads/_m/an/SEN-15776_eng_man.pdf)

### Longueur d'onde de la LED

Pour effectuer ses mesures, le LiDAR envoie des rayons lumineux infrarouges (940nm) grâce à une LED. Ainsi, compte tenu de la puissance du système et des limitations introduites par ce type de lumière, on peut d'ores et déjà s'attendre à ce que ce capteur ne fonctionne pas durant la journée.

### Répétabilité des mesures

Cette information est nécessaire pour ajuster nos attentes quant à la précision attendue de ce capteur. Sur le terrain, il est estimé qu'il aura des distances maximales de 3 mètres à mesurer, impliquant une précision typique de  $\pm 2\text{cm}$ .

De plus amples tests seront nécessaires pour attester de la véracité de ces informations sur le terrain. Ils seront détaillés dans la section correspondante.

#### 3.1.3 Implémentation



FIGURE 3.2 – LiDAR Lite V4 implanté sur Arduino Uno

Afin d'implémenter le LiDAR avec un microcontrôleur, il a été choisi d'utiliser l'interface I2C mise à disposition. Ce protocole est relativement simple à mettre en place et permet un bon débit de donnée. En plus des pins d'alimentation et de transmission I2C, le capteur met à disposition deux ports GPIO, dénommés *GPIOA* et *GPIOB*. *GPIOA* permet de déclencher une mesure du capteur sans passer par la modification des registres I2C. *GPIOB* informe le microcontrôleur de l'état actuel de l'acquisition de mesures, et peut donc être configurée en interruption si nécessaire (état bas, prêt ; état haut, occupé).

Pour tester simplement et efficacement ce capteur, il a tout d'abord été interfacé sur Arduino Uno à l'aide de la librairie Sparkfun fournie (voir figure 3.2). Les premiers résultats sont détaillés dans la section correspondante.

Le capteur a été porté ensuite sur une carte de développement *STM32F411RE NUCLEO* de la firme STMicroelectronics (figure 3.3) pour plus de flexibilité et une puissance de calcul plus importante. La

librairie mentionnée ci-dessus a été adaptée pour correspondre à l'environnement de développement dans le langage C.

Register Address	Register Name	Value / Description
0x00	Device command	Write 0x04 : Take distance measurement with receiver bias
0x01	System status	Read 0x00 : Busy flag (Low, ready; High, busy) Other values : See datasheet
0x10	Distance measurement Low byte	Measured distance in cm
0x11	Distance measurement High byte	Measured distance in cm

TABLE 3.2 – Sélection des registres I2C essentiels

Dans le but de prendre des mesures de distance, plusieurs registres I2C doivent être consultés. La table 3.2 montre une sélection de 4 registres essentiels au fonctionnement de ce capteur. Premièrement, on va envoyer une commande de mesure de distance dans le registre 0x00, puis on attend grâce au status (0x01) que l'appareil ne soit plus occupé. On peut donc ensuite consulter les deux registres 0x10 et 0x11 afin de recomposer une valeur 16 bits représentant la distance mesurée, en centimètre. Par défaut, le LiDAR possède une adresse I2C fixée à 0x62.



FIGURE 3.3 – LiDAR Lite V4 sur STM32-NUCLEO

### 3.1.4 Méthode de mesure

Une méthode de mesure de hauteur de neige doit être établie avant de poursuivre le développement. Comme le capteur sera placé en bordure de route à un angle connu de la verticale, un peu de trigonométrie est nécessaire afin de retrouver une hauteur de neige avec deux mesures de distances. La situation est schématisée sur la figure 3.4.

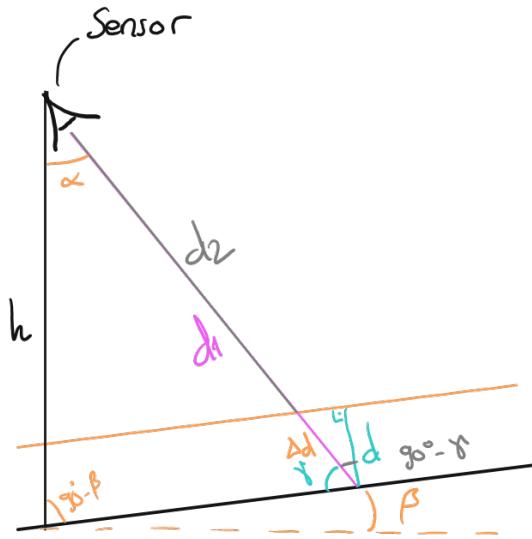


FIGURE 3.4 – Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow

$\alpha$  Angle du capteur par rapport à la verticale (en degré)

$\beta$  Angle du segment de route mesuré par rapport à l'horizontale (en degré)

$\gamma$  Angle entre le faisceau du LiDAR et le segment de route (en degré)

$d_1$  Distance de référence entre le capteur et le segment de route (en centimètre)

$d_2$  Distance mesurée entre le capteur et une hauteur de neige (en centimètre)

$\Delta d$  Différence entre la distance de référence et la distance à la neige (en centimètre)

$d$  Hauteur de neige sur la route (en centimètre)

$h$  Distance entre le capteur et le sol, à la vertical (en centimètre)

Lors de l'installation du module,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $h$  doivent être connus. Avec ces valeurs, on peut désormais calculer facilement l'angle  $\gamma$  :

$$\gamma = 180^\circ - 90^\circ + \beta - \alpha = 90^\circ + \beta - \alpha$$

Le  $\Delta d$  est simplement la différence entre la distance de référence et la distance entre la neige et le capteur :

$$\Delta d = d_1 - d_2$$

Ces deux informations nous permettent maintenant de déterminer la hauteur de neige présente sur le segment de route mesuré :

$$d = \Delta d * \cos(90^\circ - \gamma)$$

Il est important de noter que la résolution du capteur est de 1 centimètre, ce qui implique que la hauteur de neige mesurée va varier par pas de  $\cos(90^\circ - \gamma)$ .

## 3.2 Résultats

Ici seront présentés les résultats des tests qui concernent le LiDAR Lite V4. Au fur et à mesure des résultats, quelques conclusions seront d'ores et déjà tirées.

En annexe, se trouve le protocole de test complet du capteur.

### 3.2.1 Caractéristique de l'erreur de mesure

Le premier test consiste à mesurer une distance connue avec le capteur et de noter sa valeur mesurée afin de vérifier si la plage de mesure donnée par la fiche technique (5cm à 10m) est vraie.

Ceci nous permet de savoir dans quelle mesure la distance fournie par le capteur représente la réalité. Dans le cas d'une erreur de mesure, il nous est aussi utile de savoir si cette erreur est constante entre plusieurs séries espacées dans le temps.

#### Méthode

Pour ce faire, le capteur a été placé le long d'un étalon gradué de 6 mètres. Un objet est ensuite placé à un interval de 20cm pour le premier mètre, puis à un interval de 50cm. À chaque mesure, on note la valeur mesurée par le LiDAR ainsi que la distance réelle.

Cela nous permet donc de comparer la plage de mesure effective du capteur, dans les tolérances annoncées. La figure 3.5 montre la mise en place du test de distance.

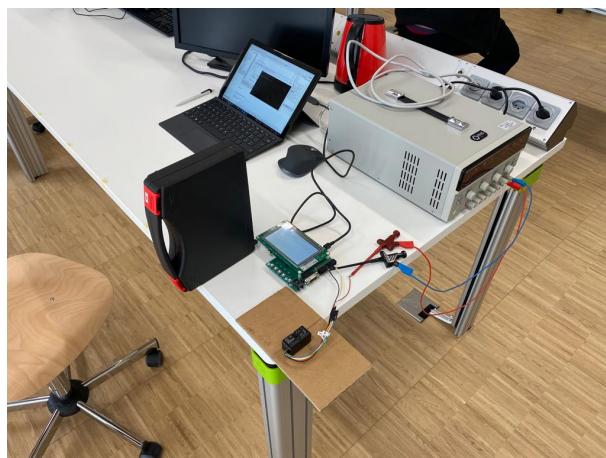


FIGURE 3.5 – Mesure de distance comparée à la distance réelle

La mesure finale de distance est une moyenne de 10 mesures. Cela permet notamment d'éliminer partiellement l'erreur due à la résolution finie du capteur.

Le test a été réalisé en intérieur, en l'absence total d'élément perturbateur, notamment de rayons infrarouges, à température ambiante (25°C).

## Résultats du test

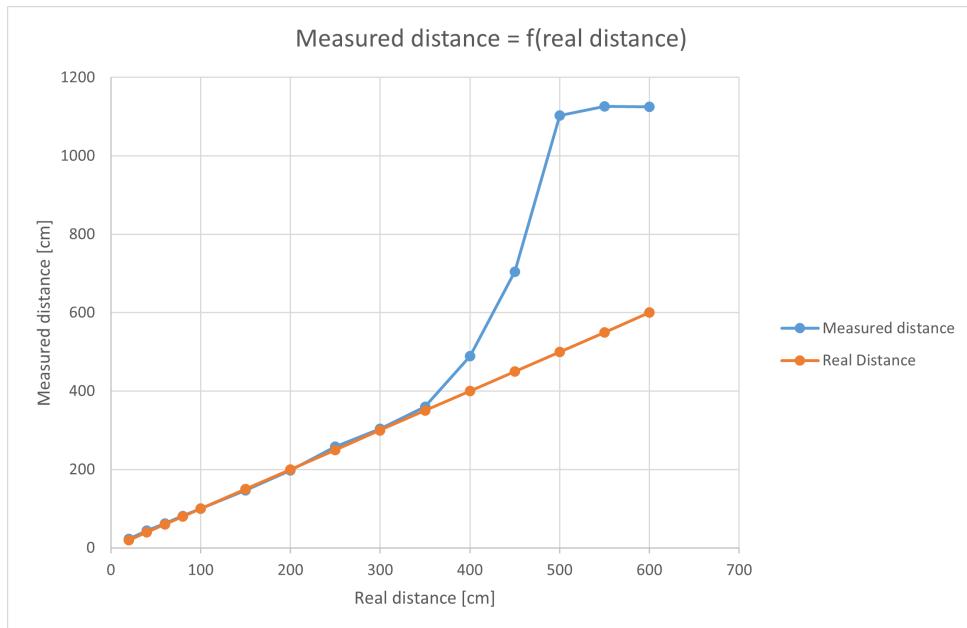


FIGURE 3.6 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle

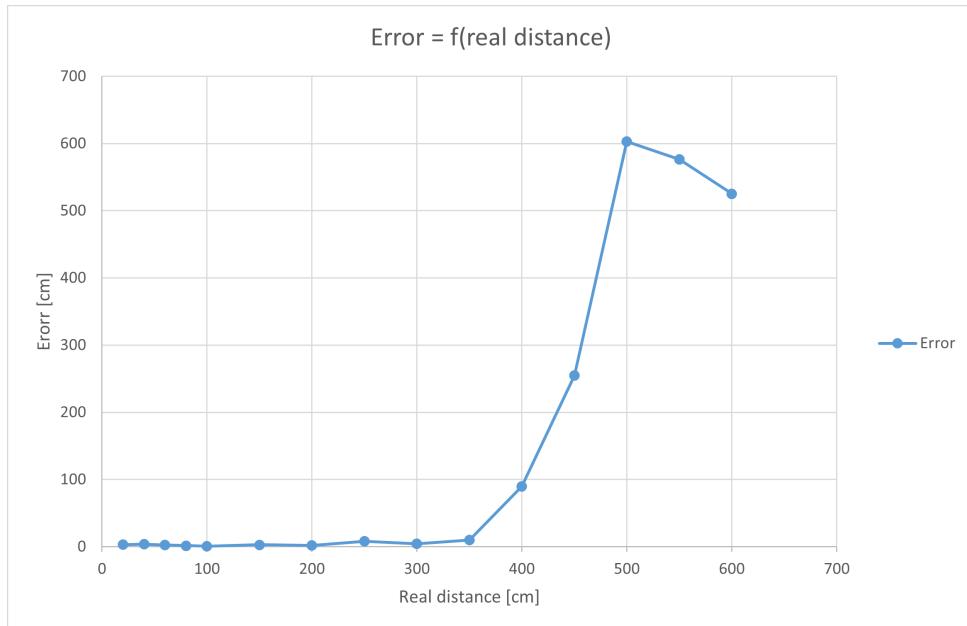


FIGURE 3.7 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle

Nous avons jugé important de zoomer sur la plage utile entre 0 et 3m afin de visualiser les graphes de manière plus claire.

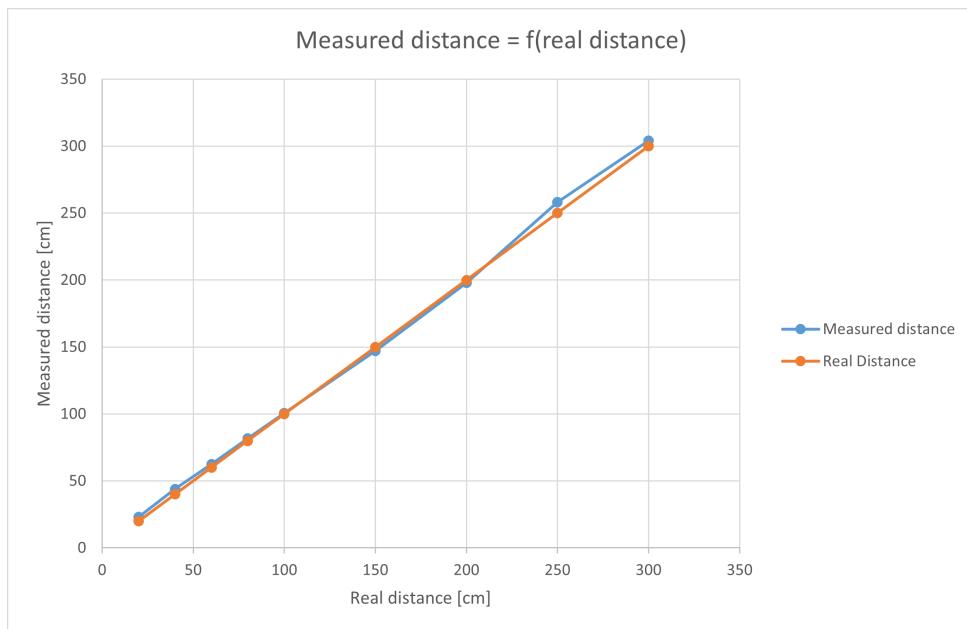


FIGURE 3.8 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile

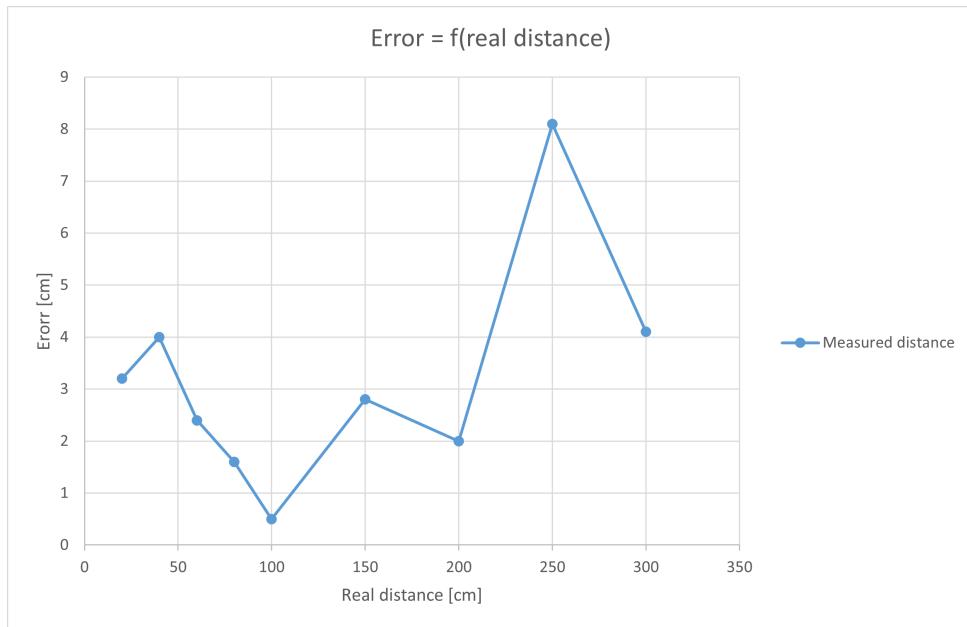


FIGURE 3.9 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile

### Conclusion préliminaire

On constate très facilement sur la figure 3.6 que le capteur est perdu au delà de 3.5m, soit bien moins qu'annoncé par le fabricant. La figure 3.7 nous montre une erreur absurde de plus de 5 mètres. On conclut donc que ce capteur ne pourra pas être utilisé pour des distances de plus de 3.5m.

Comme cette grande erreur aplatis totalement les mesures sous 3.5m, nous avons jugé utile d'effectuer un zoom sur cette plage utile. On constate alors que la distance mesurée par le LiDAR reflète avec plus ou moins de précision la distance réelle, comme le montre la figure 3.8. Lorsqu'on trace l'erreur en fonction de la distance réelle, on remarque une erreur généralement bien plus élevée qu'annoncé (figure 3.9), soit

$\pm 1\text{cm}$  pour des distances de moins de 2m et  $\pm 2\text{cm}$  entre 2 et 4m. Cependant, il faut se rappeler que ce graphe montre uniquement l'erreur à la distance réelle, et non l'erreur de répétabilité. Or, comme ces mesures sont un condensé de plusieurs séquences espacées dans le temps, on remarque que l'erreur est constante, qui donc peut être compensée. De plus, dans le projet, on ne travaille qu'avec des offsets, ce qui limite d'autant plus les effets de cette erreur.

On peut finalement conclure que ce test est réussi. En effet, malgré une erreur non-négligeable de mesure, le capteur a une répétabilité constante. Nous pouvons donc passer au test suivant.

### 3.2.2 Mesures de distance dans un environnement perturbé

Maintenant que nous savons que le capteur a une répétabilité acceptable, nous cherchons à déterminer comment le LiDAR réagit dans un environnement perturbé. Ainsi, un banc de test a été construit afin de projeter des confettis devant le capteur lorsqu'il mesure. Les détails de sa construction sont expliqués dans la section correspondante. Le but final est de générer du bruit de mesure afin de représenter au mieux une situation réelle, par exemple en pleine tempête de neige. Nous pourrons ainsi développer une méthode de mesure qui permet en tout temps de mesurer une hauteur de neige.

#### Méthode

Afin de vérifier ce test, le capteur ainsi que la plaque de développement ont été montés sur un trépied à environ 1.5m au-dessus du sol, avec un angle de  $60^\circ$  par rapport à la verticale. Le LiDAR pointe le sol, nettoyé au préalable et donc sans confetti. 100 mesures de distance sont réalisées à chaque série afin d'avoir assez d'échantillons pour quantifier le bruit généré.

Sur l'appui du bouton utilisateur de la carte, le programme lance une série de 100 mesures en direction du sol. Cela nous permet dans un premier temps d'avoir une distance de référence à comparer, sans aucune perturbation.

Ensuite, quatre autres séries de mesures sont effectuées, avec quatre niveaux arbitraires de perturbation différents, générés manuellement par les opérateurs, comme le montre la figure 3.10.



FIGURE 3.10 – Mise en place du test de perturbation

## Résultats du test

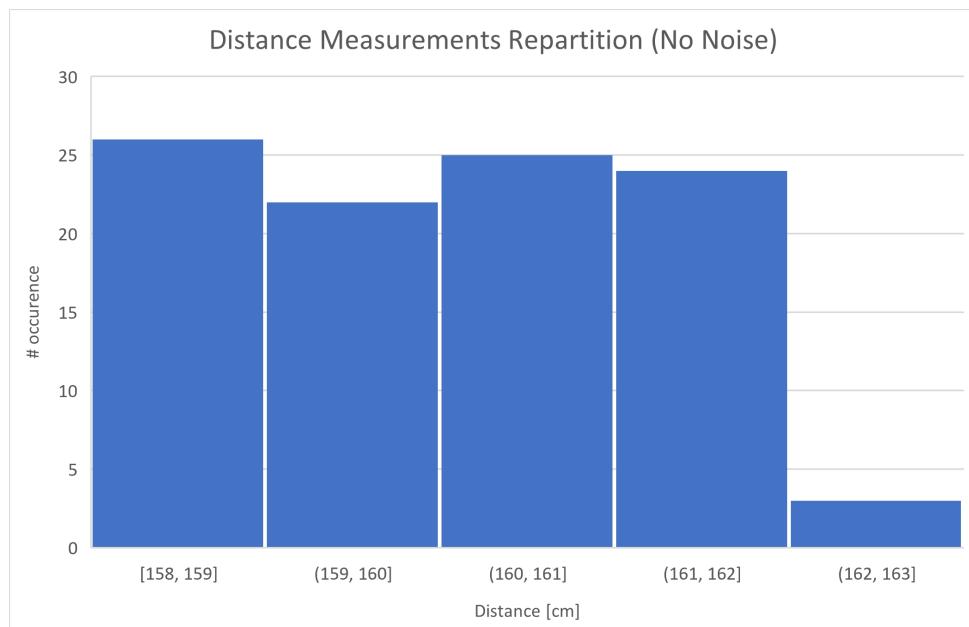


FIGURE 3.11 – Histogramme de la mesure de référence

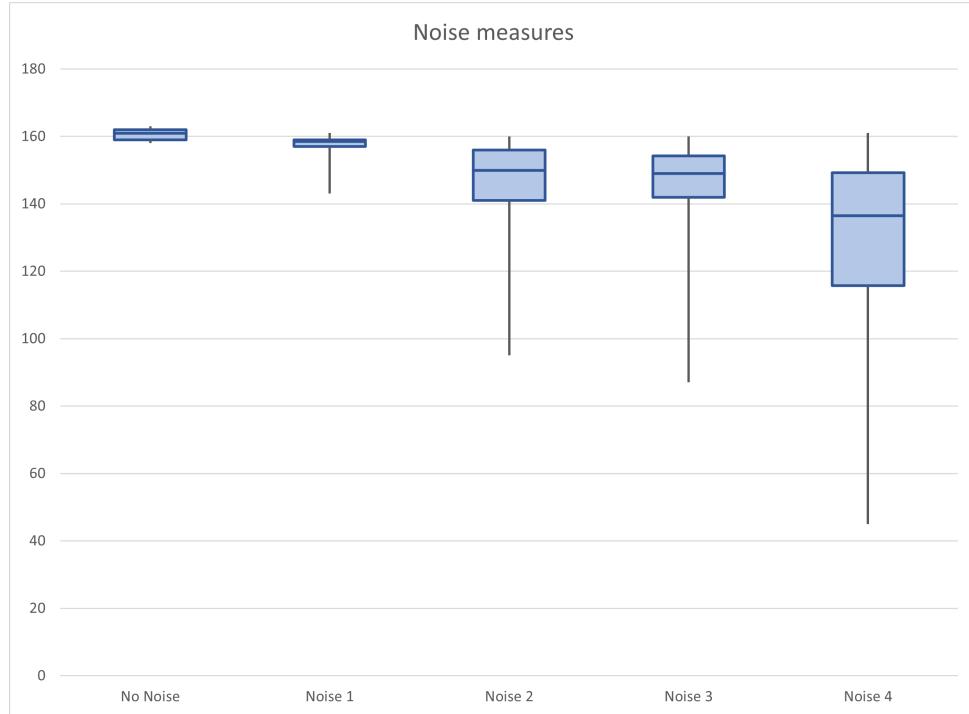


FIGURE 3.12 – Comparaison des 5 mesures effectuées

Les 5 mesures ont été regroupées en un seul graphe de type "Boîte à moustaches" afin de pouvoir comparer avec plus d'aisance les mesures entre-elles. De gauche à droite, on retrouve une augmentation graduelle du bruit généré par les opérateurs.

	No Noise	Noise 1	Noise 2	Noise 3	Noise 4
Mean	160.52	157.77	145.44	145.06	127.78
Median	161	158.8	150	149	136.5
Max	163	161	160	160	161

TABLE 3.3 – Différentes méthodes de calcul de distance (en cm)

Afin d'avoir la méthode la plus représentative possible de la distance au sol, trois solutions ont été envisagées. À partir de la série de mesures, nous avons calculé la moyenne, la médiane ainsi que le maximum afin de déterminer laquelle de ces valeurs représente le plus la réalité.

#### //ANNEXE A : HISTOGRAMME DE CHACUNE DES MESURES

#### Conclusion préliminaire

Premièrement, la figure 3.11 montre l'histogramme des 100 mesures de référence au sol. Elles s'avèrent plutôt rassurantes car on remarque que la répétabilité des mesures est respectée, avec une précision typique de  $\pm 2\text{cm}$ . La plupart des mesures sont réparties uniformément autour de 160cm.

On distingue ensuite sur la figure 3.12 que le bruit de mesure a bel et bien augmenté au fil des séries, représenté par la longueur des barres d'erreur. Comme l'indique le principe des boîtes à moustache, le trait central du rectangle représente la médiane des valeurs, alors que les deux autres sont le premier et troisième quartiles. Ainsi, les valeurs médianes des séries s'éloignent de plus en plus de la distance au sol (de référence).

Le but final de la figure 3.12 est d'aider à déterminer quelle est la méthode de mesure la plus efficace pour calculer des distances dans un environnement perturbé. On remarque ainsi d'ores et déjà que la médiane n'est pas un outil fiable, puisque sa valeur d'éloigne de plus en plus de la référence au fil des séries. Cependant, on voit facilement que les valeurs maximales de chaque boîte s'approche très fortement de la distance de référence.

La table 3.3 nous aide à y voir plus clair en ce qui concerne l'efficacité de ces trois méthodes. Pour rappel, selon la mesure de référence, la distance au sol à mesurer est de 160cm.

#### Moyenne

La moyenne représente la meilleure méthode dans le cas d'une mesure sans aucune perturbation. Cependant, on voit que cette méthode devient très imprécise lorsque du bruit apparaît devant le capteur.

#### Médiane

Malgré le fait que la médiane soit généralement plus proche de la réalité par rapport à la moyenne, elle est encore beaucoup trop éloignée de la vraie distance au sol. L'erreur est à nouveau de plus en plus grande dès que les perturbations augmentent.

#### Maximum

La méthode du maximum semble donner une valeur très proche de la vraie distance, et ce peu importe le niveau de perturbation devant le capteur. Il suffit en effet qu'une valeur de la série soit la mesure du sol pour que cette méthode fonctionne. Nous comptons donc sur le fait que, statistiquement, on finisse toujours par faire au moins une mesure de la distance au sol dans la série.

Il semblerait que pour le moment, la méthode du maximum obtienne les résultats les plus prometteurs. Cependant, nous garderons ces 3 méthodes pour les tests suivants afin de confirmer ou non l'efficacité des techniques de calcul.

### 3.2.3 Stabilité en température des mesures

Le capteur, intégré dans un boîtier étanche, sera soumis à des températures qui varient constamment, de -20°C lors d'une nuit glaciale jusqu'à 30 voire 40°C à l'intérieur du boîtier, en plein soleil. Il est important de savoir comment les mesures prises par le LiDAR vont être influencées par cette variation. À titre d'exemple, imaginons que le système prenne une mesure de distance de référence afin d'être prêt à mesurer des hauteurs de neige. Le soleil vient de se coucher, mais une température de 15°C régne encore dans le boîtier. Plus tard dans la nuit, alors qu'il fait -5°C, il commence à neiger. Le système de détection se met en marche et commence à mesurer des offsets. Ces derniers seront peut-être faussés par une différence de 20°C entre la mesure de référence et la mesure actuelle !

#### Méthode

Le LiDAR et la plaque de développement sont fixés sur un trépied et sont placés dans une chambre climatique (de la marque *Vötsch*, modèle 4010) afin de faire varier la température ambiante. Comme décrit dans le paragraphe ci-dessus, le système sera soumis à des températures entre -20°C et 40°C. C'est pour cela que le capteur sera soumis à cette même plage de températures, par pas de 5°C. La distance entre le capteur et la paroi opposée de la chambre climatique est de 47cm. Les mesures sont récupérées via le port COM qui lie la carte à l'ordinateur. La figure 3.13 montre la mise en place du test, avec le capteur à l'intérieur de la chambre.



FIGURE 3.13 – Mise en place du test en température

## Résultats du test

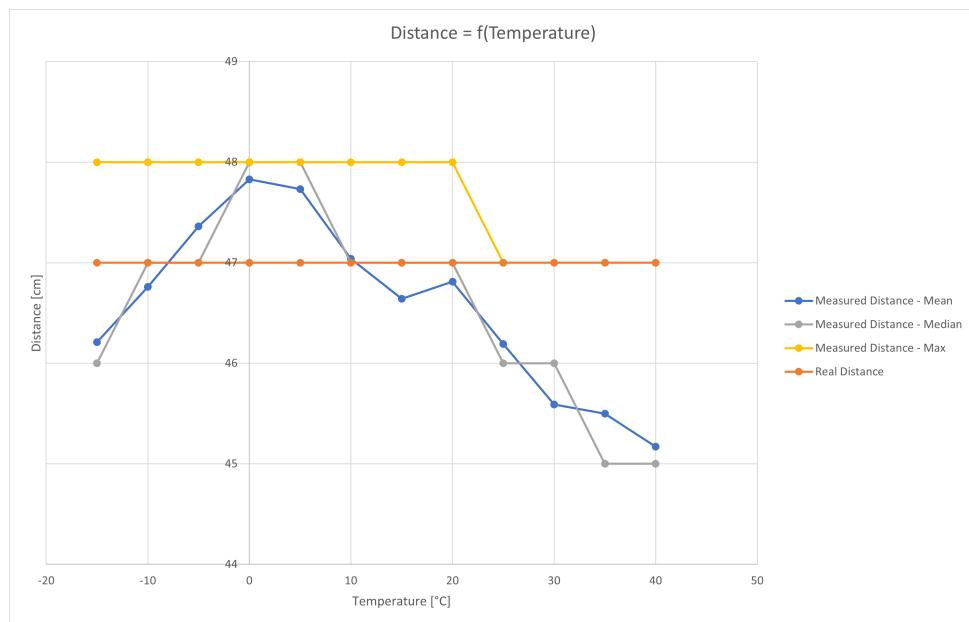


FIGURE 3.14 – Graphe de stabilité en température du LiDAR

Le test a été réalisé à partir d'une température de -15°C et non pas de -20°C. En effet, la chambre climatique utilisée n'était pas en mesure d'atteindre cette consigne dans un temps raisonnable.

Les trois méthodes décrites dans le test précédent ont été reprises afin de mieux comprendre la répartition des valeurs mesurées.

## Conclusion préliminaire

Il semblerait que le capteur soit relativement peu influencé par la variation de température. En effet, en plus de sa résolution fixe de 1cm, nous avons une erreur typique de  $\pm 2\text{cm}$  autour de la valeur réelle. Cependant, on constate tout de même que la moyenne et la médiane sont plus influencées que la méthode du maximum. On peut ainsi conclure que le capteur est plutôt stable en température, surtout si on utilise le maximum comme méthode de mesure.

On peut considérer finalement que le capteur est fiable pour une mesure de référence et de hauteur de neige prises à des températures différentes, comme cette différence est noyée dans sa précision typique.

### 3.2.4 Mesure de hauteur en laboratoire

Maintenant que nous avons caractérisé ce capteur pour plusieurs situations, nous pouvons procéder aux véritables mesures d'épaisseur en laboratoire. En effet, il faut à présent vérifier si la méthode de calcul de la section 3.1.4 est réalisable en condition de laboratoire dans un premier temps.

#### Méthode

Pour effectuer ce test, le capteur est placé dans le banc de test à une hauteur  $h$  de 133cm au-dessus du sol. L'angle  $\alpha$  du LiDAR a été fixé à 60°, alors que l'angle  $\beta$  est de 0°. Ces informations ont été fournies au programme de test afin de calculer des bons offsets. La figure 3.15 montre la préparation au test. Le but est de mesurer tout d'abord une distance de référence au sol, sans aucun obstacle ni bruit de mesure. Ensuite, une fois la plaque placée, on effectue quatre mesures différentes, la première sans bruit

puis avec un bruit graduel généré par les opérateurs.

L'obstacle utilisé est une plaque en mousse blanche de protection, d'une épaisseur de 6.6cm.



FIGURE 3.15 – Mise en place du test de mesure d'épaisseur

## Résultats du test

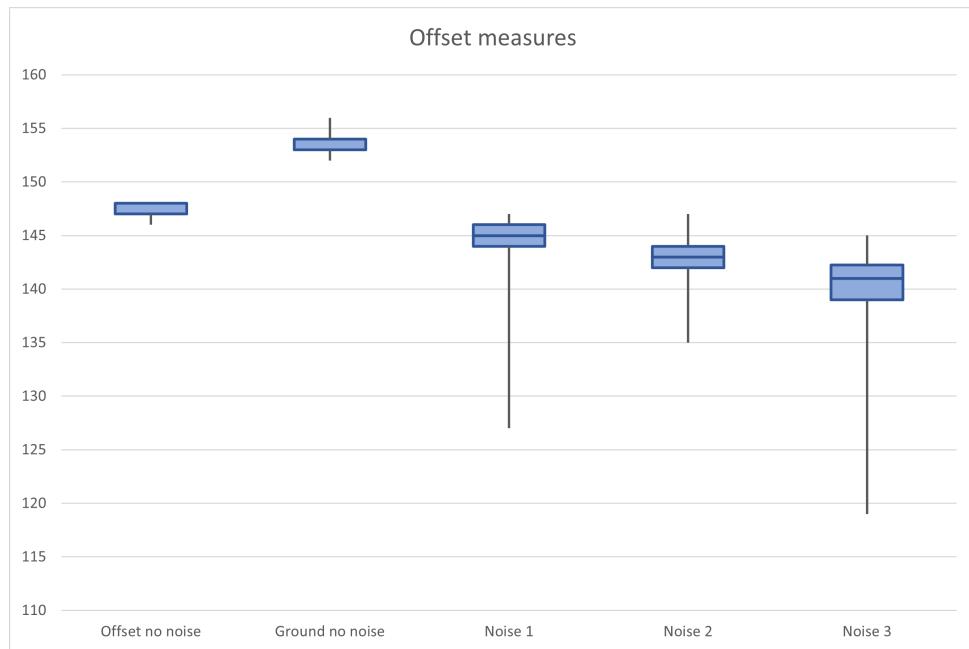


FIGURE 3.16 – Boîte à moustache des mesures d'épaisseur

Il est important de noter que pour la série de mesure *Noise 3*, la valeur maximale n'atteint pas celle des autres séries. Cela est dû majoritairement au fait qu'une couche de 2cm de confettis se sont accumulés sur la plaque au fil des mesures.

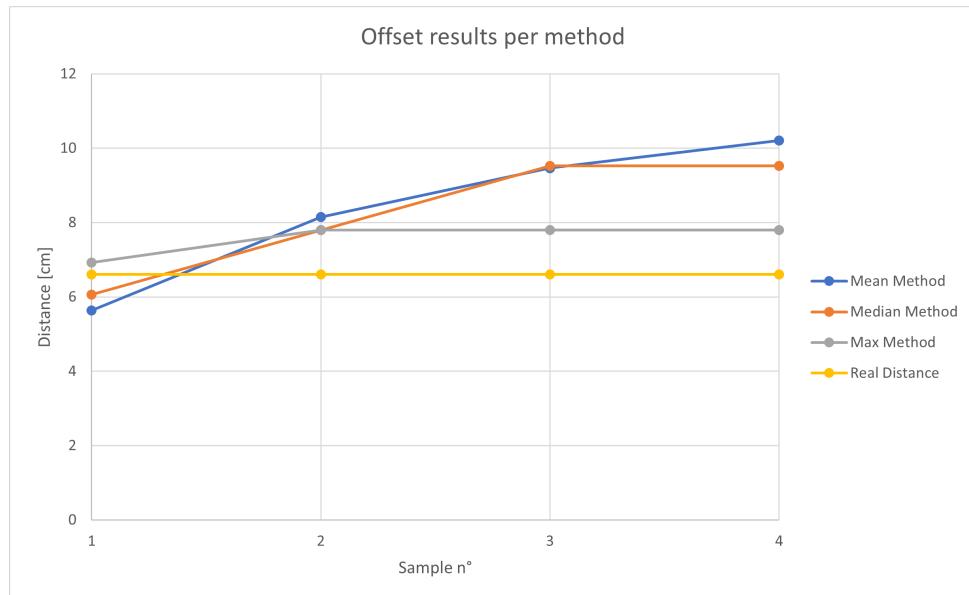


FIGURE 3.17 – Résultat des calculs d'offset par méthode

## Conclusion préliminaire

Le graphe 3.16 montre la répartition des mesures effectuées sous la forme d'une boîte à moustache. Cela permet de représenter facilement la répartition des mesures autour de la médiane.

On remarque sur les séries *Noise 1* à *Noise 3* que du bruit a bien été généré par les opérateurs, ce qui n'est pas le cas pour les deux premières séquences de mesure. Hormis cela, le graphe est très similaire aux tests dans un environnement perturbé, à la section 3.2.2. On retrouve en effet une médiane qui s'éloigne de plus en plus de la vraie distance, alors que le maximum s'approche le plus de la réalité.

On voit sur la figure 3.17 l'épaisseur calculée à l'aide de la méthode de la section 3.1.4 pour les 3 solutions proposées, à savoir la moyenne, la médiane et le maximum. Ce calcul d'offset a été réalisé pour les quatre séries de mesures à disposition, avec un bruit graduel. On peut ici conclure que la méthode du maximum est la plus proche de la réalité. Pour cette raison, elle sera utilisée pour les tests sur le terrain.

### 3.2.5 Mesure de hauteur en situation réelle

Après avoir prouvé le fonctionnement du capteur en laboratoire, il est essentiel de le tester en conditions réelles, sous la neige. Pour ce faire, des tests ont été réalisés la nuit du 3 au 4 décembre 2021 à Ayent. Un boîtier temporaire a été confectionné afin de protéger le LiDAR et la carte de développement des précipitations.

Afin de faciliter l'intégration du module dans un boîtier, un PCB a été confectionné par nos soins. Ainsi, une carte d'extension au format *Arduino Uno* a été imaginée, implémentant une connexion pour le LiDAR, un capteur de température sous la forme d'une NTC ainsi qu'un slot pour carte SD. Le capteur de température permet d'enclencher le système lorsque la température est suffisamment basse. Cette dernière a été fixée à 5°C. La carte SD nous est utile pour enregistrer des données à des fins de debug. La figure 3.18 montre la carte d'extension dans le boîtier de test.

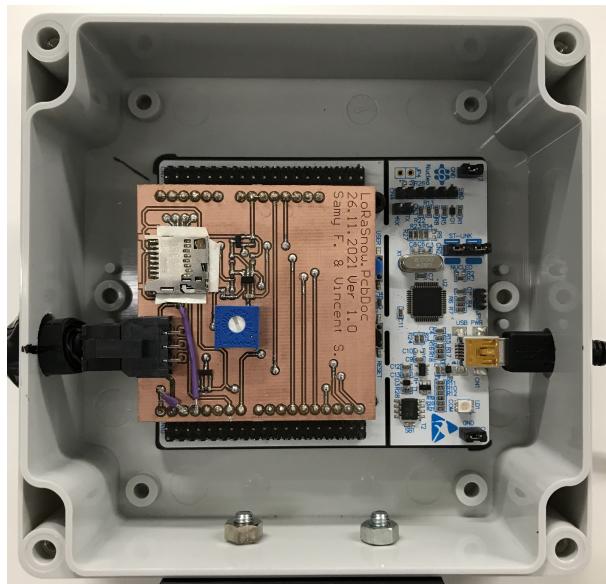


FIGURE 3.18 – Vue du PCB fabriqué

### Méthode

Le boîtier a été installé sur un trépied à 140cm au-dessus du sol, sous un couvert, à l'abri de la majorité des flocons. Le LiDAR pointe vers le sol avec un angle de 45° par rapport à la verticale, donnant une distance de 197cm entre le capteur et la route. Les données récoltées sont enregistrées via un câble USB sur un ordinateur.

Le but est de mesurer des épaisseurs de neige en partant de 0cm (la route a été nettoyée au préalable) afin de mettre à l'épreuve l'efficacité du capteur et de nos méthodes de mesure. Chaque mesure d'épaisseur est réalisée chaque 30 secondes, et ce pendant plus d'une heure. En parallèle, une double-mètre est posé dans

la neige afin de relever périodiquement la hauteur de neige présente sur la route. Une mesure qualitative du débit de neige est aussi effectuée. La figure 3.19 montre la mise en place du test. Le double-mètre et l'ordinateur ne sont pas visibles ici.



FIGURE 3.19 – Mise en place du test en condition réelle

### Résultats du test

Mesure n°	Hauteur réelle [cm]	Hauteur mesurée [cm]	Type de précipitation	Heure
1	0	0	Petits flocons	04h28
2	0.5	0.71	Petits flocons	04h39
3	0.8	1.41	Quelques gros flocons	04h48
4	1.5	1.41	Quelques gros flocons	05h00
5	2	2.12	Quelques gros flocons	05h08
6	2.5	2.12	Quelques gros flocons	05h14
7	2.8	2.86	Quelques gros flocons	05h21
8	3	2.86	Quelques gros flocons	05h32

TABLE 3.4 – Mesures relevées lors du test

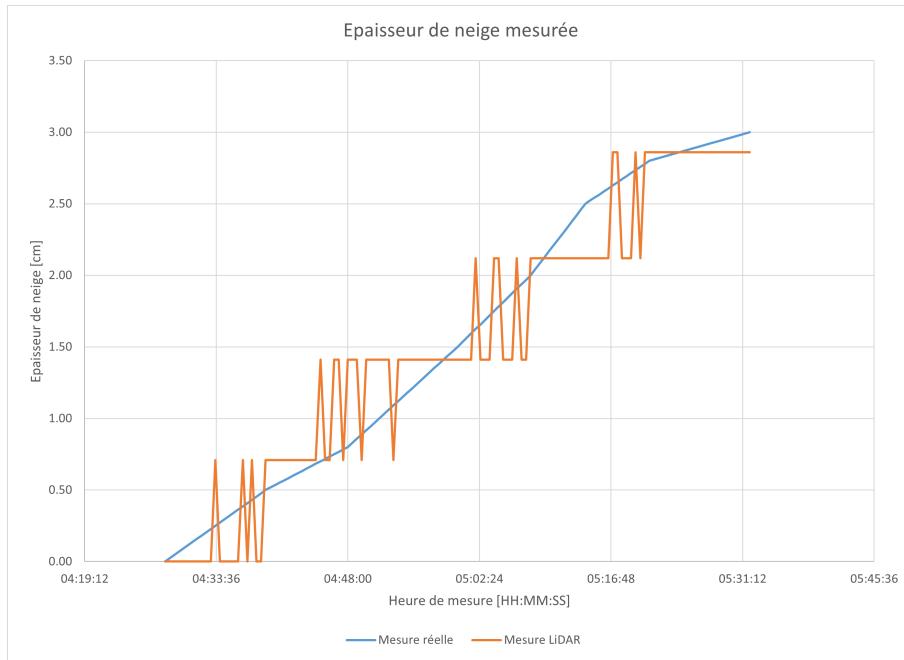


FIGURE 3.20 – Résultat des mesures effectuées

La température lors des mesures oscillait entre -2°C et 0°C, sans aucun vent.

Afin de réaliser la courbe *Mesure réelle* de la figure 3.20, une interpolation linéaire a été utilisée entre les différents points de mesure.

### Conclusion préliminaire

Après avoir passé plusieurs heures dans un froid glacial à mettre à l'épreuve notre projet, nous avons enfin pu obtenir des résultats.

Le tableau 3.4 montre les différentes heures de mesures, mettant notamment en évidence l'erreur entre la valeur réelle et mesurée. Malgré une légère oscillation lors d'un changement proche de valeur (figure 3.20), on peut conclure que le LiDAR arrive bel et bien à mesurer une hauteur de neige, et ce depuis le sol.

On constate par la même occasion que le pas de mesure du capteur dépend effectivement de son angle par rapport à la verticale.

# 4 Computer Vision

La *Computer Vision* (ou vision par ordinateur) comprend l’acquisition, l’analyse et le traitement des images numériques pour comprendre et extraire des données, informations ou décisions. Les applications et possibilités de ce domaine sont pour ainsi dire, infinie.

## 4.1 Défis liés à la mesure en extérieur

La principale difficulté de la mesure de neige par *Computer Vision* est lié au fait qu’il neige. Les caméras embarquées sont souvent de mauvaise qualité, et les débits sont mauvais à cause des processeurs embarqués qui sont limités en puissance de calcul.



FIGURE 4.1 – Comparaison entre une image idéale<sup>1</sup> et un cas concret<sup>2</sup>

Il faut donc trouver une méthode ne demandant pas trop de ressources de calcul, et pouvant fournir des résultats utiles pour informer sur l’état des routes.

## 4.2 Applications pour la mesure de neige

Les possibilités de la *Computer Vision* étant vaste, plusieurs méthodes ont été discutées.

---

1. Wallpaper from WallpaperCave, by caveman, <https://wallpapercave.com/w/scDoVwf> (last accessed : 20 January 2022)

2. VibroSnow camera, implemented at route du Pralan, Ayent, Suisse

#### 4.2.1 Mesure de niveau sur une règlette

Les mesures de niveau de neige manuel se font déjà avec une réglette plantée dans la neige.



FIGURE 4.2 – Mesure d'environ 4.5 pouces de neige à Manitoba, Canada<sup>1</sup>

La mesure pourrait être réalisé en plaçant la caméra en face de la règle. Deux méthodes sont possibles :

##### **Avoir une règle graduée**

et compter le nombre de graduation encore visible pour déterminer la hauteur de neige.

##### **Avoir un piquet d'une taille connue**

comparer la hauteur de ce piquet au nombre de pixel quand il n'y a pas de neige, puis mesurer le nombre de pixels non-ensevelis pour mesurer la hauteur de neige.

Cependant mesurer une règle peut paraître simple d'un point de vue de l'implémentation, mais présente plusieurs désavantages lors du fonctionnement :

##### **Il faut déneiger devant la caméra et la règle**

demandant probablement à un ouvrier de descendre de son chasse-neige pour déneiger l'installation.

##### **L'installation ne doit pas être trop proche d'une route**

de risque d'être ensevelie ou endommagée lors du passage d'un chasse-neige.

##### **Si on utilise une règle graduée**

il faut s'assurer d'avoir un matériau surlequel la neige ne colle pas ou ne réfléchit pas trop la lumière du soleil.

##### **L'utilisation d'un piquet peut demander l'usage d'une intelligence artificielle**

pour reconnaître le piquet d'autres objets (p. ex. : arbres, lampadaires, ...) [BF19] Cela demanderait trop de puissance de calcul pour un système embarqué basse consommation. Une autre solution serait de calibrer chaque installation pour reconnaître le piquet. Cependant la caméra étant intégrée dans un système embarqué, cette calibration serait certainement fastidieuse et demanderait une interface utilisateur supplémentaire pour la réaliser.

---

1. Image by Jerry Zachedniak, <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1338531/hiver-tempete-parc-mont-riding> (last accessed : 20 January 2022)

#### 4.2.2 Mesure de niveau par Stéréovision

La Stéréovision est une méthode de mesure se servant d'images provenant de plusieurs point de vue. Typiquement, deux caméras côte à côté, peuvent mesurer des profondeurs comme des yeux.

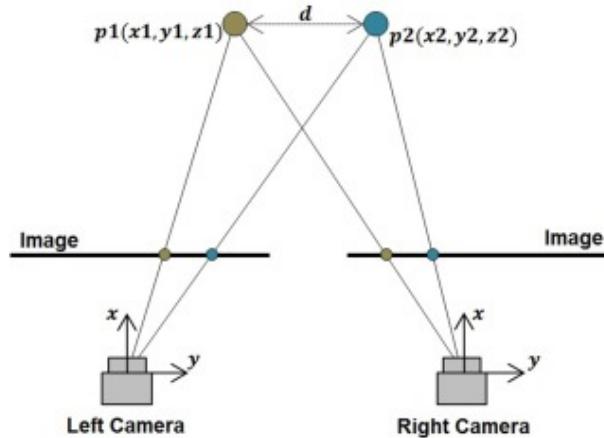


FIGURE 4.3 – Schéma de principe de mesure de distance par stéréovision

Beaucoup de caméra spécialisée dans la reconnaissance d'image par Intelligence artificielle utilise ce principe pour estimer les distances (ex : OpenCV OAK cameras). Cette méthode demande trop de puissance de calcul pour un système embarqué basse consommation et ne fournit pas de résultat suffisamment précis pour mesurer une couche de neige.

#### 4.2.3 Mesure du débit de chute de neige

Une mesure simple et rapide est d'estimer le débit de chute de neige en isolant les flocons.



FIGURE 4.4 – Image source de la caméra VibroSnow<sup>1</sup> et image avec les flocons isolés

Cette mesure, en parallèle à une mesure de hauteur de neige, permettrait d'estimer l'augmentation de cette hauteur au fil du temps. Fournissant ainsi une information supplémentaire aux services de déneigement.

#### 4.2.4 Détection de route enneigée

Étant donné que la mesure de hauteur de neige par *Computer Vision* serait trop complexe pour un système embarqué basse consommation, détecter si la route est enneigée ou non permettrait de fournir une redondance à une mesure de hauteur de neige fournie par un autre capteur. Si la petite zone mesurée par le capteur se retrouve mal déneigée, ou qu'un objet, comme un caillou, mal placé fausse la mesure du capteur, savoir si le segment de route est enneigé ou non permettrait d'éliminer ces erreurs.

#### 4.2.5 Méthodes retenues

Les méthodes retenues pour ce projet de recherche sont **la mesure du débit de chute de neige** et **la détection de route enneigée**. Elles peuvent fournir des informations pertinentes pour le déneigement, tout en demandant relativement peu de puissance de calcul.

---

1. VibroSnow camera, implemented at route du Pralan, Ayent, Suisse

## 4.3 Implémentation

Pour tester les algorithmes de mesure avec des vidéos sur le terrain, Dr. Mudry Pierre-André et M. Matter Fabien nous on aimablement laissé accès à la caméra de notre projet parent *VibroSnow*[AM21] et nous les remercions énormément.

### 4.3.1 Récupération des vidéos

La caméra de *VibroSnow* détecte le passage d'objet (voitures, chute de neige,...) et enregistre une vidéo qui est ensuite transmise à un serveur *Windows*. Bien que l'accès aux vidéos nous a été donné, nous ne pouvons pas aller chercher les vidéos directement sur le serveur *Windows* car il est utilisé pour d'autres projets auxquels nous n'avons pas accès.

Il a donc fallu créer un script *Powershell*, transferant chaque jour les vidéos cumulées sur le serveur *Windows* vers un serveur auquel nous avons accès. Un *Raspberry Pi* a été mis en place comme serveur pour récupérer les vidéos.

### 4.3.2 Mesure du débit de chute de neige

La méthode utilisée pour détecter les chutes de neige se décompose ainsi :

#### Soustraction de deux images

pour isoler les éléments qui ont bougé entre les deux images

#### Seuillage des niveaux de blancs sur l'image

pour accentuer les chutes de neige

#### Calcul du ratio de pixels blancs

pour avoir un nombre correspondant au débit de chute de neige

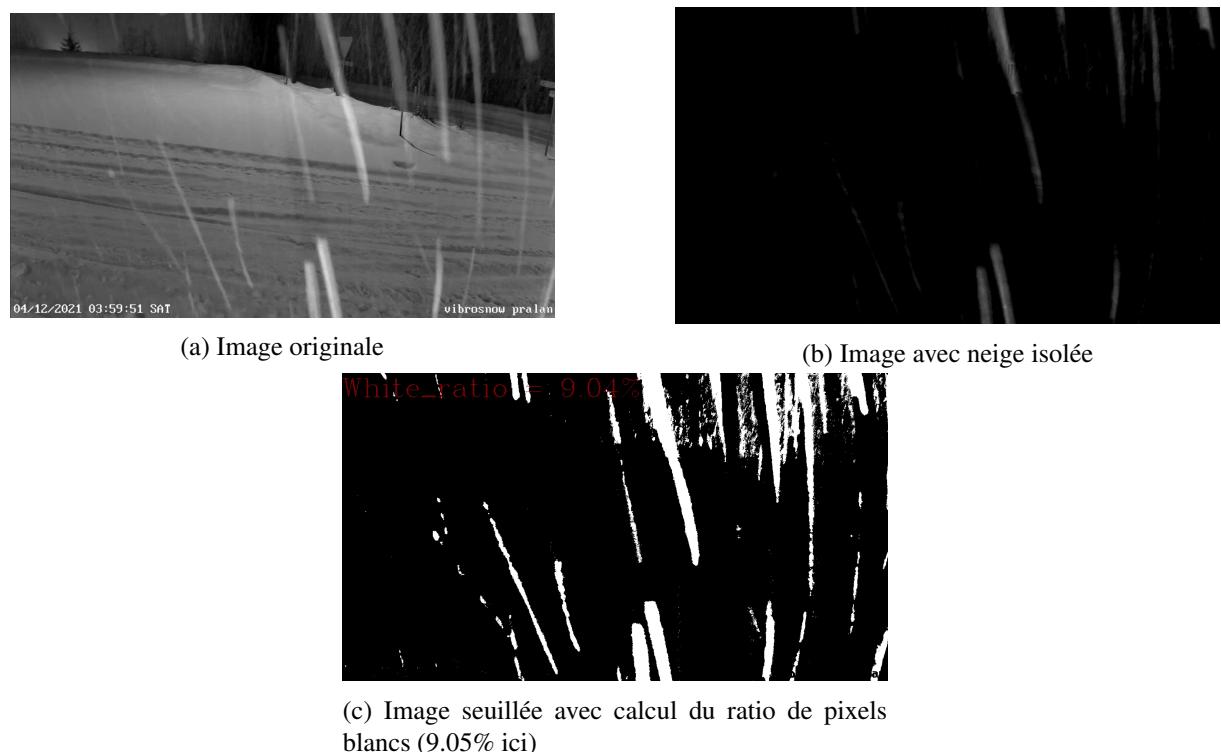


FIGURE 4.5 – Étapes de la mesure de débit de chute de neige

### 4.3.3 Détection de route enneigée

Deux méthodes ont été testées pour détecter si la route est enneigée ou non.

La première réalise un simple seuillage des niveaux de blancs, et un calcul du ratio des pixels blancs sur l'image. On récupère plusieurs images et on calcule la moyenne du ratio de blanc sur toutes les images. Cette moyenne est ensuite comparée à une moyenne similaire réalisée sur une vidéo de la route déneigée, en vérifiant qu'on se trouve au même moment de la journée (jour/nuit, matin/après-midi).

La deuxième est identique, à l'exception d'une suppression du bruit réalisée avant le seuillage. Cette suppression du bruit reprend la méthode d'isolation de neige utilisée pour mesurer le débit de chute de neige et soustrait cette image de bruit à l'image originale. Cette méthode demande un peu plus de calculs mais peut potentiellement générer un résultat plus fiable.



(a) Image de référence originale

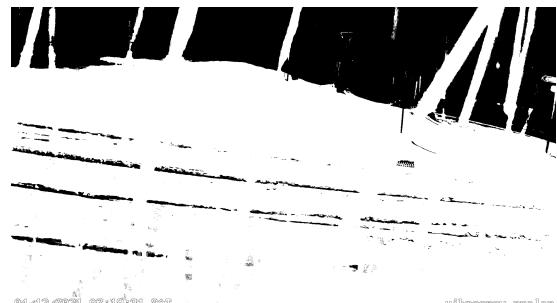


(b) Image de référence seuillée

FIGURE 4.6 – Image de référence



(a) Image de test originale



(b) Image de test seuillée



(c) Image de test avec suppression de bruit



(d) Image de test avec suppression de bruit et seuillée

FIGURE 4.7 – Image de test

## 4.4 Résultats

Plusieurs scripts *Python* ont été réalisés pour testés les différentes méthodes de mesure. Cette section détails ces scripts, les tests effectués et des conclusions préliminaires.

### 4.4.1 Mesure de débit de chute de neige

Cette mesure doit permettre une information estimée de la chute de neige actuelle. Idéalement, on devrait pouvoir estimer les précipitations de neige en mm/h. Mais n'ayant pas encore reçu l'accès aux données de *MeteoSwiss* pour comparer nos mesures à des données fiables, une approche simplifiée a été appliquée.

On récupère plusieurs vidéos qu'on trie selon 2 critères :

**Le moment de la journée**

journée, nuit

**La quantité visuelle de neige qui est en train de tomber**

rien, petite neige, neige, grosse neige

Il est important de comparer des vidéos se passant durant la même période de la journée. La luminosité peut grandement affecter le résultat de la mesure. La localisation de la caméra (Ayent) ne permet pas de différencier significativement la matinée de la journée et la soirée de la nuit. Il a donc été convenu de séparer uniquement par jour/nuit.

### 4.4.2 Détection de route enneigée

Le but de cette mesure est de fournir, a minima, si oui ou non la route est enneigée. Idéalement elle devrait pouvoir différencier plusieurs degré d'enneigement de la route.

Pour réaliser les mesures on récupère plusieurs vidéos qu'on trie ainsi :

**Le moment de la journée**

journée, nuit

**L'état de la route**

déneigée, partiellement enneigée, complètement enneigée

Chaque vidéo sans chute de neige avec une route déneigée peut servir de référence pour différencier une route déneigée d'une route enneigée. Dans l'idéal, on devrait aussi pouvoir les trier selon la quantité de chute de neige, mais n'ayant pas suffisamment de vidéos pour réaliser ce tri, on devra se contenter de cette méthode. Les deux méthodes de mesure citées au point 4.3.3 vont être mises à l'épreuve pour déterminer laquelle est la plus pertinente pour ce projet.

# 5 Mécanique

Dans le but d'effectuer une série de tests avec les capteur choisis, il a fallu simuler un environnement similaire aux conditions réelles. Le premier défi est de simuler de la neige en plein été. Etant donné que des canons à neige ou autres dispositifs équivalents n'étaient pas disponibles, de la fausse neige a dû être fabriquée. Cependant, simuler des chutes de neige implique des importantes salissures. Un banc de test a donc été mis en place pour effectuer ces tests de manière propre. Pour simuler la neige qui tombe, un canon à confettis a permis de le faire. Ces mesures ont grandement aidé à l'avancement du projet.

Le deuxième grand défi est de compacter toute l'électronique dans un boîtier pouvant résister aux intempéries. Une carte de développement, une carte d'extension, des batteries ainsi que d'autres composants doivent être à l'abri dans ce boîtier. Pour assurer des mesures fiables et la survie de l'électronique, l'étanchéité du boîtier est nécessaire. La simplicité du démontage est aussi recherchée, elle permettra aux techniciens de gagner du temps lors du montage ou de la maintenance.

## 5.1 Banc de test

Durant l'étape de recherche, deux méthodes de mesure ont été retenues. Cependant, les possibilités pour attester de leur bon fonctionnement sont restreintes. Afin d'avoir un espace pour effectuer des tests volatiles sans impacter nos collègues, un banc d'essai a été mis en place. Il est nécessaire que ce banc de test soit assez grand pour que trois personnes puissent effectuer des essais avec les capteurs choisis. Les nuages de confettis générés ne doivent en aucun cas gêner les autres personnes présentes dans la salle de classe. Une cage avec une base de 2m par 1.5m et 1.5m de haut a été développée. La figure 5.1 montre les étapes de conception de ce banc de test.

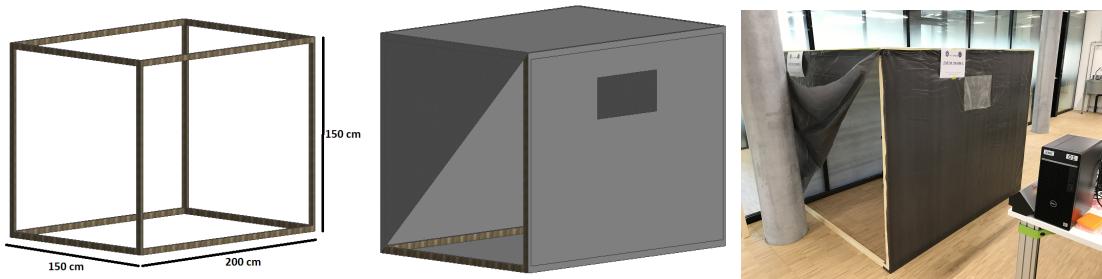


FIGURE 5.1 – Encombrement de la structure de test

Comme des essais doivent être réalisés dès les premières semaines du projet, la structure a dû être rapidement construite. Une structure en bois a donc été retenue pour sa simplicité de montage. Les façades de la cage ont été réalisées avec des bâches de protections épaisse que nous avons agrafé sur la structure. Les planches ont été assemblées à l'aide d'équerres métalliques et de vis à bois.

Afin d'avoir une bonne rigidité, la structure aurait pu être triangulée avec des poutres en bois. Cependant, le banc de test étant exposé à quasiment aucune contrainte mécanique, la rigidité ajoutée par les bâches de protections est largement suffisante. Cette configuration nous a permis d'économiser du temps et de l'argent.

### 5.1.1 Fausse neige (confettis)

#### Problématique

Simuler de la neige en plein été représente un défi supplémentaire. La température ne jouant pas en notre faveur, la solution retenue est d'utiliser des confettis blancs. À la suite d'une commande impossible de confettis (rupture de stock), nous avons rapidement dû trouver une autre solution.

#### Méthode

La première idée envisagée consiste à regarder dans les bacs des perforatrices automatiques situées dans les imprimantes de l'école. Malheureusement ces derniers étaient vidés régulièrement. La quantité trouvée était plus qu'insuffisante.

La deuxième solution, celle qui a été retenue, est d'utiliser la déchiqueteuse du secrétariat. Cette démarche n'était pas des plus écologique, mais elle a permis de pouvoir créer les confettis rapidement. Un paquet de feuille blanche a été détruit pour fabriquer un carton plein de lamelles blanches ressemblant à des confettis ou de la grosse neige.

Le remplissage du carton à la figure 5.2 a pris environ une heure.

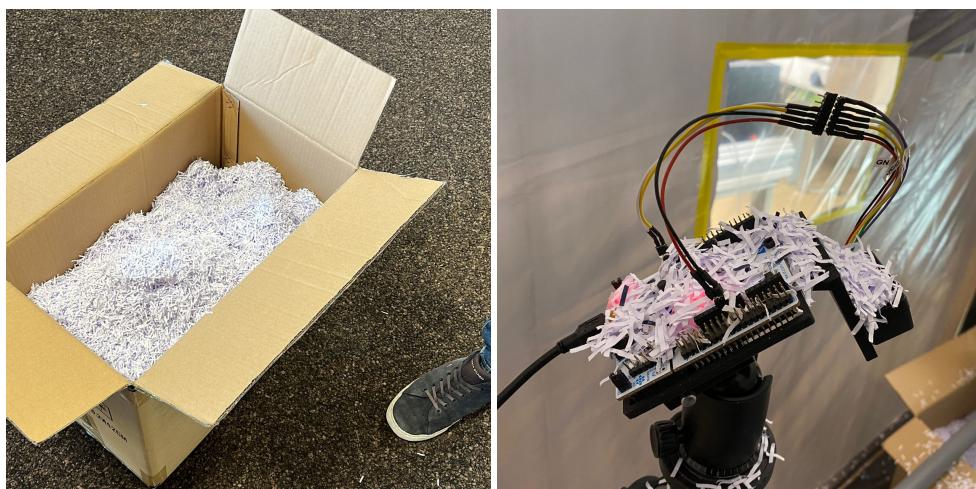


FIGURE 5.2 – Aspect des confettis fabriqués

### 5.1.2 Canon à confettis

La meilleure solution pour simuler la chute des flocons est de projeter des confettis vers le haut de la manière la plus continue possible. Les premiers essais ont été effectués en les jetant manuellement devant les capteurs. Cependant, un débit constant était nécessaire afin de pouvoir effectuer des séries de mesures et déterminer plus précisément les erreurs.

#### Principe de fonctionnement

Des recherches concernant des solutions déjà existantes ont été effectuées. Malheureusement, la plupart utilisent un principe d'à-coup d'air comprimé, un effet non désiré. Finalement, un canon avec un

débit d'air plus faible a été retenu, fonctionnant par effet Venturi. Le principe de base (inspiré des carburateurs) est, grâce à un débit d'air régulier dans notre cas, d'aspirer des confettis introduits dans un réservoir grâce à une baisse de pression à un endroit précis. La première version est constituée d'un tube principal avec une réduction de section, où on retrouve un débit d'air constant. Les confettis sont stockés dans un réservoir au-dessus de la zone de dépression, d'où ils sont aspirés vers un petit coude, leur permettant de mieux couler dans le tube principal.

Sur le schéma de la figure 5.3, le principe du canon y est représenté. Le débit d'air constant (en noir) arrive au niveau du réservoir, la section diminuant, la pression diminue aussi. Ainsi, un phénomène d'aspiration se produit. De cette manière, un mélange d'air et de confettis est projeté à travers le tube principal.

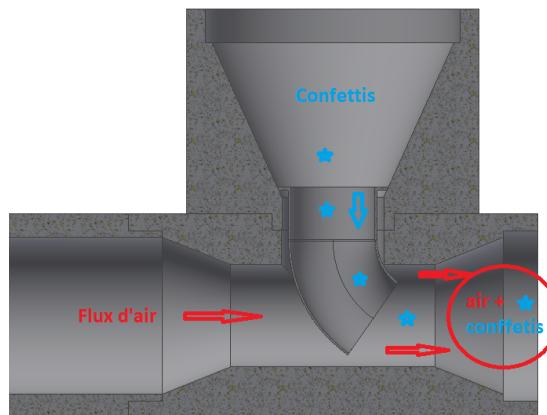


FIGURE 5.3 – Principe du canon à effet Venturi

Cette première version fut rapidement envoyée à l'atelier pour être imprimée afin d'effectuer les premiers tests et les éventuelles corrections du canon. La figure 5.4 montre le tube principal imprimé en PETG grâce à l'imprimante 3D (*Prusa MK3*) de l'école.



FIGURE 5.4 – Exemple d'impression 3D du canon

## Turbine

Un paramètre indispensable est d'avoir une source d'air continue avec un débit satisfaisant. La salle de classe étant équipée d'air comprimé, il suffit de l'utiliser pour avoir un débit d'air constant. Cependant, le bâtiment étant encore en travaux, les raccords d'air n'étaient pas sertis. Une autre solution doit être trouvée. Une turbine alimentée par un moteur à courant continu se trouve être la bonne solution. Premièrement, ce dispositif est relativement simple. En effet, pour régler la vitesse de rotations, il suffit de changer la tension aux bornes du moteur. Deuxièmement, la mécanique est facilement intégrable au

canon. Cette solution permet de ne plus se soucier des problèmes de débit d'air. La figure 5.5 montre la pièce d'adaptation entre la turbine et le tube principal.



FIGURE 5.5 – Turbine DC

### Problèmes rencontrés

A la suite d'une série de tests, plusieurs éléments se sont révélés problématiques. Premièrement, les confettis confectionnés ont une tendance à s'enchevêtrer les uns dans les autres, et cela réduit considérablement leurs capacités à couler dans le réservoir. Ce dernier se retrouvait sans cesse bouché. Grace aux tests, le fait d'agrandir le passage des confettis permettra d'avoir un meilleur écoulement et de limiter la formation d'agglomérats.

### Solution apportée

En prenant en compte les problèmes survenu lors des premiers essais, une deuxième version a été modélisée, cette fois-ci avec un réservoir plus haut et un angle de remplissage plus faible. Le coude passe de 28mm de diamètre à 34 mm. Ce dernier est maintenant directement imprimé dans le tube principal afin d'éviter les angles trop saillants qui pourraient causer un blocage, comme le montre la figure 5.6. Afin d'obtenir un coude plus large il a fallu augmenter le changement de section dans le tube principal. Nous aurions eu la possibilité de totalement refabriquer la pièce pour avoir une plus grande aspiration. Cependant, le fait de garder les dimensions de bases permettait de gagner du temps et d'éviter de relancer des impressions 3D inutilement.

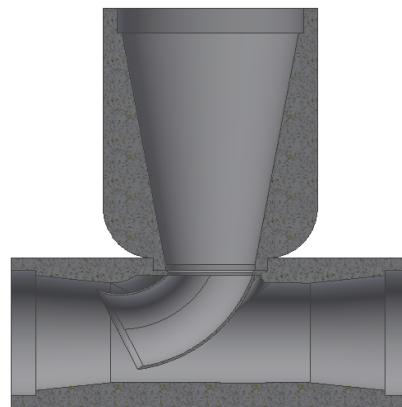


FIGURE 5.6 – Deuxième version du canon

Lors des essais de la nouvelle version, le changement était notable. Le fait d'avoir augmenté le diamètre du coude et de l'avoir imprimé en une fois avec le tube principal a réduit fortement les angles

saillants. Les lamelles de papiers continuaient à se coincer de temps en temps mais l'objectif d'avoir un débit constant pendant plus d'une minute a pu largement être atteint. Le canon était même capable s'il était placé réservoir vers le bas d'aspirer les confettis comme un aspirateur et de les rejeter comme de la neige. On peut voir sur la figure 5.7 le canon en action.

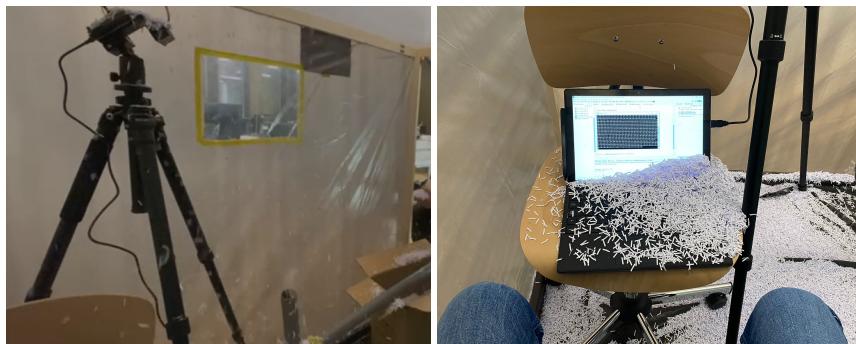


FIGURE 5.7 – Mise en fonction du canon

Pour l'assemblage des différentes pièces du canon, comme ces dernières étaient très bien ajustées et tenaient entre elles, utiliser des colles fortes spécifiques n'a pas été nécessaire. L'utilisation de colle thermofusible pour garantir un non-détachement et un démontage plus simple a été utilisé. Certaines pièces étant interchangeables, elles ne pouvaient pas être collées. Par conséquent, l'utilisation de ruban adhésif pour garantir aucun déboîtement a été privilégié. Cet appareil a surtout été conçu dans un but d'effectuer les mesures rapidement et le temps de conception/réalisation était très court. C'est pourquoi la complexité des fixations n'a pas été une priorité. L'objectif qui était d'avoir un débit de neige constant a donc été atteint. La figure 5.8 montre l'assemblage final du canon à confettis.



FIGURE 5.8 – Ensemble final du canon à confettis

## 5.2 Boitier

Les mesures se passant en milieu non favorable (neige, pluie, vents...), L'électronique ainsi que les capteurs doivent être protégés. La conception du boitier doit assurer une bonne étanchéité. Pour cela il faut un boitier sur mesure répondant à beaucoup de critères comme un encombrement optimisé, une fixation permettant de mettre le boitier sur plusieurs styles de supports et surtout une simplicité de conception. Garantir une simplicité de conception dans un encombrement limité devient vite compliqué.

La configuration de base du boitier est d'avoir un LiDAR et une caméra qui travaillent ensemble. Le LiDAR permet d'avoir une mesure de hauteur de neige et la caméra d'avoir une indication sur le débit de neige. Une carte de développement ainsi qu'un Shield spécifique doivent être intégrés. Une batterie permet au système de fonctionner de manière autonome. Si la solution devait être reliée au secteur, beaucoup d'endroits potentiels de mesure seraient supprimés. C'est pourquoi la solution d'une batterie fut retenue.

### 5.2.1 Vitre

Le premier défi est d'avoir une partie du boitier transparente sans pour autant ne plus être étanche. Le but étant d'incruster une ou plusieurs vitres pour que les capteurs puissent effectuer leurs mesures sans être perturbés par des problèmes d'eau ou de poussière. La vitre doit rester remplaçable facilement en cas de casse ou d'usure. Un appareil qui correspond à ces caractéristiques est la GoPro. Sur les anciens modèles, la vitre est démontable. Le système qui permet à cette dernière d'être étanche est composé d'un joint qui vient se pincer entre deux surfaces en contact. Ci-dessous, la solution est plus amplement détaillée (figure 5.9), la vitre en bleu vient pincée sur le joint par la plaque du haut. La pression est maintenue par les vis ce qui garantit l'étanchéité.

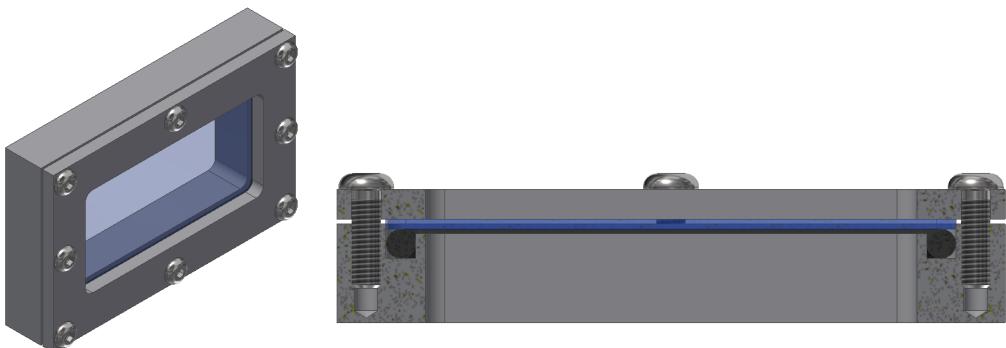


FIGURE 5.9 – Vitre et jointure

Dans le cas où ces pièces seraient faites en plastique, l'utilisation de vis auto taraudeuse ou d'insert filetés sera nécessaire. Les vis auto taraudeuses sont plus simple à mettre en place et tout aussi efficace. Dans le cas de pièces métalliques, un simple taraudage suffit. L'utilisation de frein-filet est envisageable mais étant donné que la pièce serre un joint élastique, il absorbera la plupart des vibrations.

Afin de permettre au capteur de faire des mesures, il faut une zone du boitier transparente. L'utilisation d'un verre est la solution. Cependant ce n'est pas aussi simple, le capteur fonctionne dans les infrarouges proches (940nm). Tous les verres ne permettent pas le passage de ces rayons. Sur le graphique ci-dessous 5.10, la capacité à laisser passer les rayons en fonction de la longueur d'onde est exprimé. Sans étonnement, le verre de quartz est le plus adapté.

De plus, les verres de quartz offrent une grande résistance aux hautes températures et aux chocs thermiques. Ils ont une grande homogénéité et permettent une excellente transmission de la lumière visible, mais aussi des rayonnements ultraviolets et infrarouges proches<sup>1</sup>.

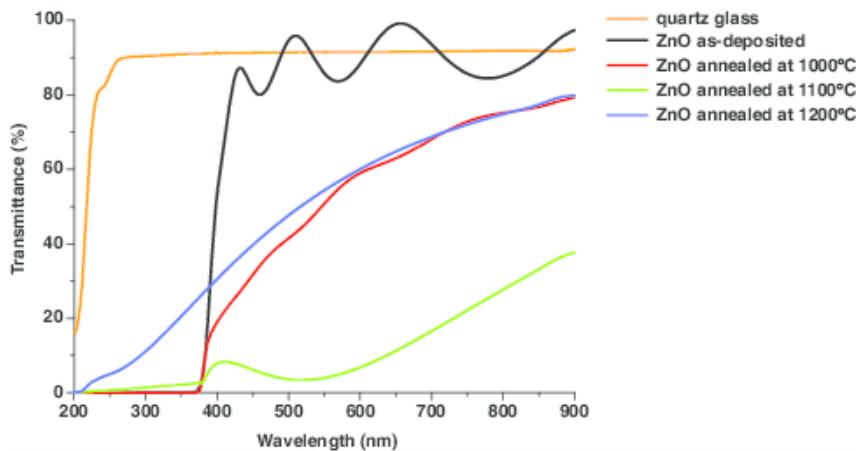


FIGURE 5.10 – Transmittance de différents matériaux

### 5.2.2 Modification des composants internes

Durant une bonne première partie du projet, la caméra et le lidar devaient être inclus ensemble dans le boîtier. Un choix au niveau de la disposition des vitres était nécessaire. Dans la première configuration, chaque capteur possède une vitre adaptée à son boîtier. Le design est très original cependant le fait de faire ça augmente la complexité du montage et des pièces utilisées. Il n'y a aucun réel intérêt à faire ce design plutôt qu'une simple grande vitre (figure 5.11).

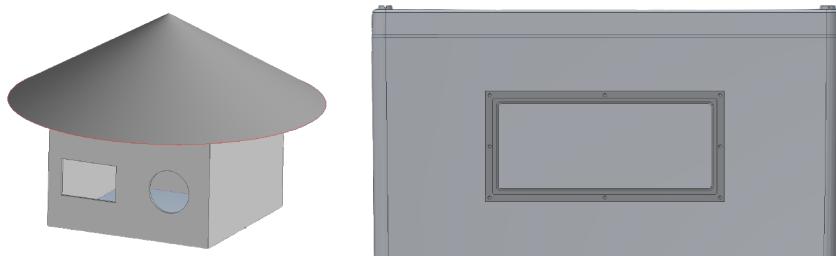


FIGURE 5.11 – Premiers designs du boîtier (à gauche : double vitre, à droite : simple vitre)

Durant une séance, la suppression de la *Computer Vision* dans le boîtier fut décidée. Ce choix remis en cause le design de ce dernier. L'encombrement se retrouvait réduit et l'utilisation de deux verres n'était plus une question à se poser.

### 5.2.3 Etanchéité

Lors de la suite de la conception, l'étanchéité de la boîte posa beaucoup de difficultés. La situation de l'ouverture pour accéder à l'intérieur était aussi une question à bien se poser.

La solution pour l'étanchéité du mécanisme d'ouverture est inspirée des boîtiers étanches fortement utilisés dans l'industrie pour protéger les composants électroniques. Le principe est très simple, il suffit d'une gorge dans la partie non amovible afin de pouvoir loger un joint. La partie amovible, qui dans notre cas est le couvercle, est composée d'un petit bouton qui va venir écraser le joint lors de la fermeture afin d'assurer une très bonne étanchéité. L'élasticité du joint, sous contrainte, permettra d'avoir constamment une étanchéité.

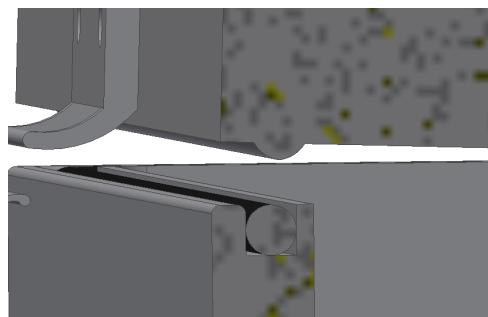


FIGURE 5.12 – Etanchéité du boîtier

#### 5.2.4 Problème de buée

L'humidié dans le boîtier se condense à cause du froid de la vitre et forme une couche de buée. Cette buée pourrait nuire au bon fonctionnement du capteur. Le système ne consommant que très peu courant (moins de 100mA durant fonctionnement, quelques uA sinon), la buée ne posera sûrement pas de problème. La solution pour enlever au maximum l'humidité dans le boîtier est l'utilisation de sachet de gel de silice. Un espace permettra de pouvoir en disposer deux dans le boîtier.

Malheureusement par manque de temps, des essais n'ont pas pu être réalisés pour prouver le bon fonctionnement de cette solution. Cependant cette méthode est déjà très rependue et n'a pas besoin de faire ses preuves.

#### 5.2.5 Premier concept

##### Ouverture

À la suite de ça, un concept de boîtier a été réalisé pour se rendre compte de l'encombrement, de la praticité et du design. Il a été choisi de mettre l'ouverture à l'arrière du boîtier, comprenant un système d'étanchéité démontré sur la figure 5.13. Le maintien de la pression sur le joint était fait grâce à quatre vis qui viennent directement se prendre dans la base du boîtier. Cette manière de fixer permet de ne pas avoir de trou traversant le boîtier. Cette méthode est la même que dans de la plupart des boîtiers étanches.

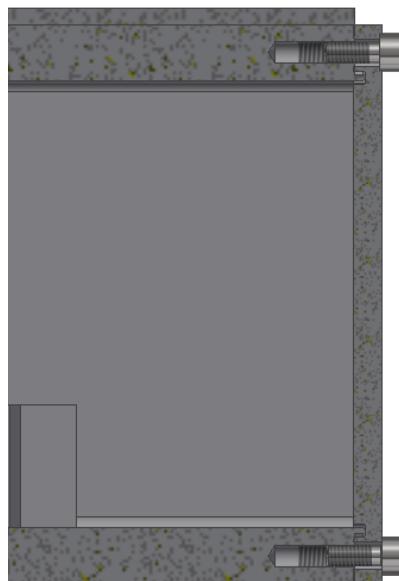


FIGURE 5.13 – Ouverture arrière du boîtier

### Encombrement

Arbitrairement, les dimensions de 200mm x 100mm x 100mm ont été choisies afin de rendre le système compact. La figure 5.14 montre l'espace disponible dans le boîtier, sans les batteries, le capteur et le module d'extension.

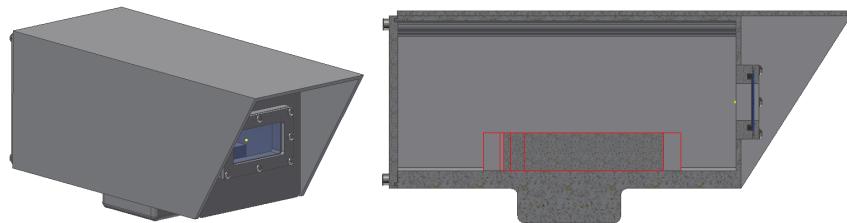


FIGURE 5.14 – Encombrement du boîtier, version 1 (en rouge l'encombrement estimé de l'électronique)

En avançant dans le design du boîtier, des difficultés concernant la fixation de l'électronique dans le boîtier se sont manifestées. L'utilisation d'une casquette devenait aussi compliquée, car il faut éviter à tout prix d'avoir des perçages traversants. La fixation du bras a été pensée pour se situer sous le boîtier. Cependant elle aurait aussi pu être prise sur les côtés en englobant la casquette. À la suite de tous ces problèmes, le design a été complètement revisité.

### 5.2.6 Version finale du boîtier

Le dernier design est inspiré des caméras de surveillance récente. Ce boîtier est conçu à base de polymère, qui permet de limiter les transferts de chaleurs et les coûts.

### Matériaux

Les deux matériaux les plus souvent retrouvés dans l'industrie pour les boîtiers sont l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le polycarbonate (PC). Le polycarbonate n'apprécie pas d'être exposé trop

longtemps à un environnement humide. Cela pourrait provoquer de l'hydrolyse et dégrader le boîtier. L'ABS quant à lui est très résistant. Il est notamment utilisé pour faire des barques de secours. L'injection de ce polymère est très répandue. Il est notamment utilisé pour fabriquer les briques *Lego*. Ce terpolymère montre une bonne résistance aux chocs jusqu'à -40 °C. Sa température de transition vitreuse se situe aux alentours 110 °C, ce qui est largement suffisant dans notre cas. Le problème de l'ABS est qu'il a une mauvaise résistance aux rayons UV. L'utilisation d'un revêtement de protection UV sous forme de vernis est envisageable. Ce processus permettrait d'augmenter la durée de vie du boîtier. Le prix de l'ABS se situe aux alentours de 3200 euros la tonne<sup>1</sup>.

L'aluminium aurait aussi pu être intéressant pour la fabrication de ce boîtier. Cependant la fonderie s'avère plus complexe et plus coûteuse que l'injection plastique. Le prix de la matière aurait quasiment triplé. Les caractéristiques du polymère étant parfaitement suffisantes, l'intérêt d'utiliser de l'aluminium n'était donc pas nécessaires.

## Ouverture

L'ouverture se fait par en haut à l'aide d'un couvercle amovible. Le système d'étanchéité est le même que les précédentes versions. Le maintien de la pression sur le joint est effectué grâce à une fixation dites grenouillère, comme le montre la figure 5.15. La grenouillère<sup>2</sup> dispense l'utilisation d'outils et permet un gain de temps lors de l'ouverture et la fermeture. Cette dernière possède une serrure intégrée pour dissuader de possibles vols.



FIGURE 5.15 – Ouverture du boîtier, version 2 (à gauche), grenouillère pour la fermeture (à droite)

## Pivot du couvercle

L'une des grandes forces de ce système est son ouverture simplifiée. En effet, le couvercle est fixé comme une trappe. Cette spécificité permet d'avoir un bien meilleur accès à l'intérieur du système. Cette particularité permet pouvoir manipuler aisément les éléments qui se situent à l'intérieur. Le pivot est assuré par un axe (tube) fileté à ses deux extrémités. Deux vis viennent maintenir de chaque côté l'axe afin qu'il ne puisse pas sortir de son logement. Le système d'ouverture est représenté à la figure 5.16.

1. <https://www.polyvia.fr/fr/prix-du-plastique-les-previsions-pour-2022>

2. <https://www.pfefferle.ch/?srv=search&pg=det&partnerId=3&rub=100048505&groupId=0&artNr=100148750&markId=>

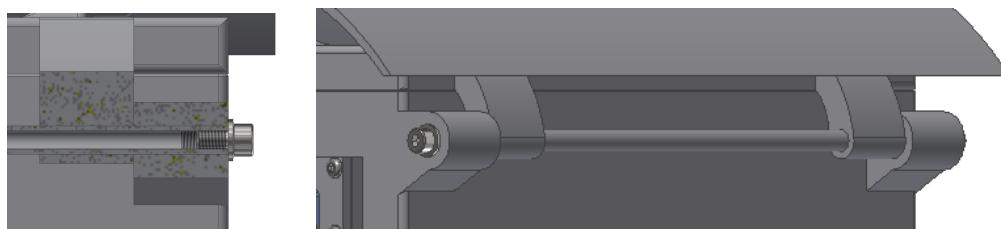


FIGURE 5.16 – Mécanisme du pivot

### Fixation de la casquette

La casquette qui se situe sur le couvercle est facilement démontable pour mettre un autre modèle ou la changer en cas de dégradation. Elle est fixée par quatre vis imbus qui viennent se loger dans des inserts situés sur le dessus du couvercle. Les fixations de la casquette sont posées sur le couvercle, cette configuration permet de soulager les efforts sur les supports, comme le montre la figure 5.17.



FIGURE 5.17 – Fixation de la casquette et inserts filetés

### Fixation du module

En ce qui concerne la partie intérieure, quatre supports sont intégrés dans le fond du boîtier. Ces derniers sont dimensionnés pour accueillir des inserts filetés. Toute la partie électronique pourra par la suite venir se fixer sur les quatre supports. La figure 5.18 montre les supports du module.

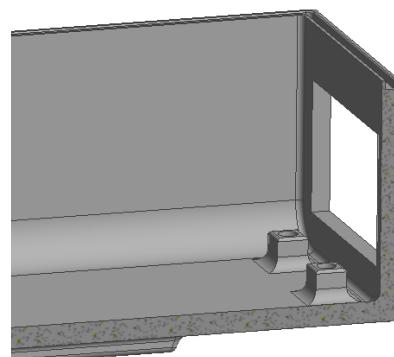


FIGURE 5.18 – Support du module

### Fixations des supports

La fixation du bras sera assurée par quatre écrous carrés situé sous le boîtier, comme le montre la figure 5.19. Cette solution permet de ne pas à avoir à faire de trous dans le boîtier pour maintenir une bonne étanchéité. Les écrous carrés viennent glisser dans des fentes et sont ensuite bloqués par les vis de fixation. Le même principe est utilisé pour fixer des éléments dans les armoires d'automation.

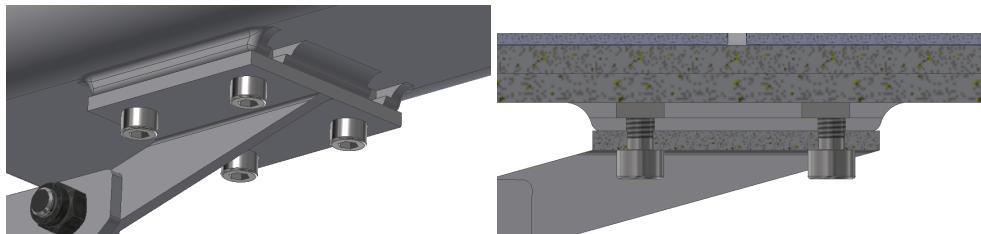


FIGURE 5.19 – Support de fixation du boîtier

### 5.2.7 Module électronique

Cette partie est consacrée au développement d'un module compact et simple composé de toute l'électronique, comme montré sur la figure 5.20. Ce module est fixé dans le boîtier grâce aux quatre plots de fixations situés dans le fond du boîtier. L'intérêt de designer une construction mécanique est de pouvoir soutenir tous les composants pour les empêcher de se déplacer à leur guise. La simplicité recherchée dans sa conception permet aux opérateurs de gagner du temps. L'aspect interne est également beaucoup plus propre et le module est rapidement remplaçable en cas de panne.

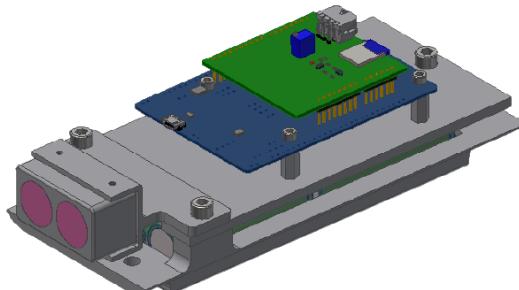


FIGURE 5.20 – Module électronique

### Base du support des batteries

La pièce de base est prévue pour accueillir 6 batteries 18650, que l'on retrouve à la figure 5.21. Un espace légèrement plus grand est prévu. L'appellation 18650 signifie que l'élément rechargeable fait un diamètre de 18mm et une longueur de 65mm. Des petites fentes ont aussi été pensées pour faciliter un câblage série/parallèle entre les éléments. Cette pièce est la fondation du module électronique, elle sera naturellement fixée dans le boîtier grâce à quatre vis imbus.

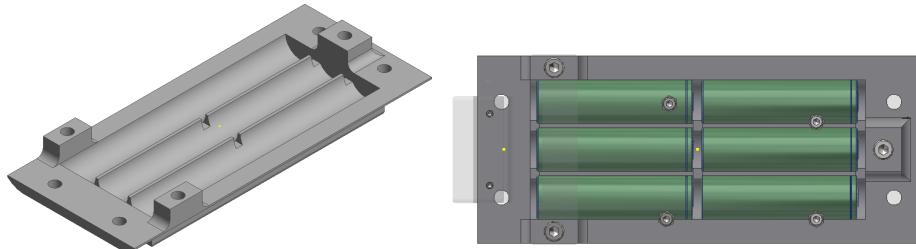


FIGURE 5.21 – Support à batteries

### Plaque de fixation et PCB

Au-dessus de la pièce supportant les batteries, une plaque est fixée. Cette dernière est très importante dans l'ensemble. Elle permet grâce aux trois fixations situées aux extrémités de venir bloquer les batteries pour éviter qu'elles ne bougent. Ces trois trous sont prévus pour venir fixer la plaque sur la pièce du bas. Les quatre autres servent à fixer la partie PCB. Quatre vis à tête fraisée seront insérées dans les trous fraisés afin de venir fixer des entretoises en plastiques. Sur ces dernières, les circuits imprimés pourront être fixé à l'aide de vis en plastiques. Ces composants plastique permettent d'éviter tout risque de court-circuit. La figure 5.22 montre la plaque de fixation et le module électronique monté.

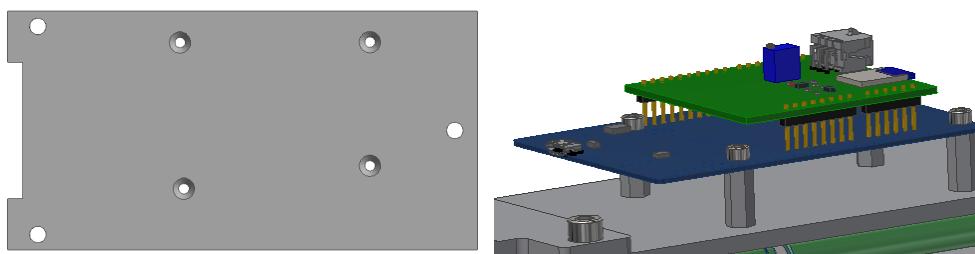


FIGURE 5.22 – Plaque de fixation pour la partie électronique

### Support du LiDAR

Le capteur LiDAR ne possède pas de trou de fixation, seul deux fentes sont disponibles pour venir cliper un support sur ce dernier. Le fabricant (*Garmin*) préconise de le fixer avec des attaches câbles ou du scotch double face. Ces solutions sont plutôt prévues à des fins de bricolage. Des essais de supports à base de clips ont été réalisé mais l'ajustement de ces derniers était problématique. C'est pour ça que la solution de pincer le capteur à l'aide de vis sans tête est parvenue comme la plus sûre et la plus simple. Le support qui permet de fixer le LiDAR dans la bonne position vient directement se fixer dans les trous de fixations du support à batteries. La figure 5.23 montre sous différents angles le support.

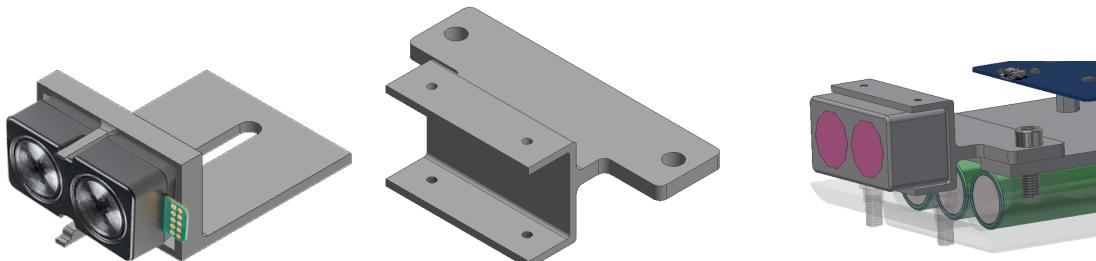


FIGURE 5.23 – Support pour le LiDAR

### 5.2.8 Bras de fixation

La fixation permet d'assurer un positionnement juste et précis de l'ensemble du boîtier. Elle doit pouvoir se faire sur quasiment toutes les surfaces à dispositions comme les murs ou les lampadaires.

#### Support du boîtier

Le support du boîtier est une partie rigide en aluminium qui vient se visser sous le boîtier à l'aide quatre vis. Cette pièce est en deux parties. La première partie est une plaque carrée ayant les trous de perçage correspondant au boîtier. La deuxième est une autre plaque percée soudée perpendiculairement. Ce perçage permettra de jongler entre les systèmes de fixation désiré. Grace à cette liaison par boulon, l'inclinaison du boîtier pourra être réglée.

En ce qui concerne le réglage précis de l'angle, un petit cadran autocollant pourrait être rajouté sur le collier-support et une ligne autocollante sur le support du boîtier. Elle permettra de lire la valeur de l'inclinaison du système. Cette petite subtilité permettra de faciliter le montage du boîtier et de pouvoir contrôler si la position est bonne sur le long terme.

La figure 5.24 montre la fixation au boîtier ainsi que le réglage d'angle.

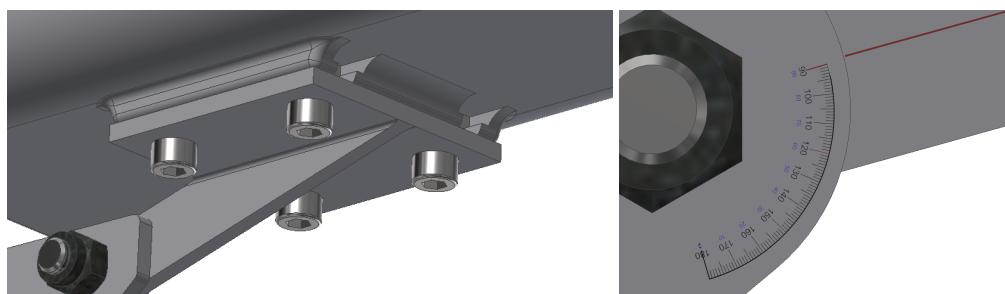


FIGURE 5.24 – Système de réglage de l'élévation

#### Support mural et tubulaire

L'objectif voulu est de pouvoir fixer le boîtier sur des lampadaires ou des poteaux. Un système de collier de serrage a donc été conçu pour répondre à cette problématique. Les deux arcs de cercle collé entre eux forment un ovale avec une aire plus petite que celle du poteau de fixation. En venant serrer les vis, une force de serrage agira naturellement sur le poteau et le boîtier sera bien fixé. Afin de régler la rotation azimutale, c'est-à-dire autours de l'axe du lampadaire, il suffit de placer le boîtier dans la position voulue. Une fois cette position atteinte, il faut bloquer l'ensemble boulonné. Ce dispositif permet deux degrés de liberté, l'azimut et l'élévation. La figure 5.25 montre les deux supports possibles de fixation.

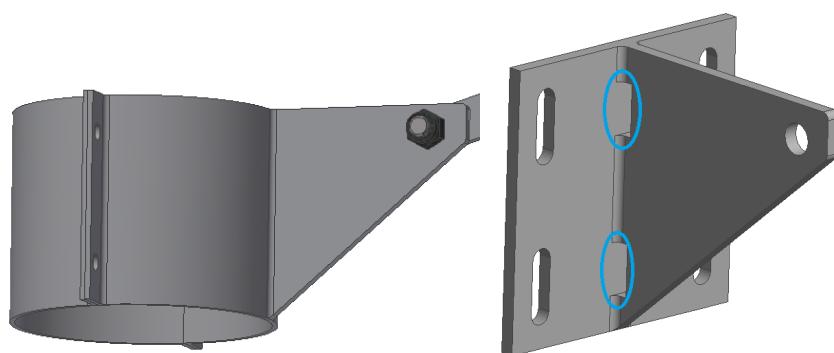


FIGURE 5.25 – Support de fixation tubulaire et mural

Un autre dispositif pour une fixation murale a aussi été pensé. Malheureusement dans cette configuration la rotation azimutale ne peut pas être réglée. Le seul degré de liberté est l'élévation. Les trous en bleus ont été pensés pour passer un éventuel collier de serrage pour un fixation spécial ou un montage provisoire.

### 5.2.9 LoRaSnow Testbox

Pour savoir si les simulations effectuées correspondaient avec la réalité, il a fallu tester le capteur en condition réelle. Cependant les chutes de neiges sont difficilement prévisibles. Le boîtier final était encore au stade de conception, il a fallu confectionner un élément temporaire pour protéger les composants durant les essais. Le LiDAR a été fixé sous le boîtier à l'aide de la fixation avec les clips. Ce type de fixation n'étant pas convaincant, une attache plastique a été rajouté pour augmenter la force de pincement des clips. Une autre fixation permettait de visser le boîtier sur un trépied. La figure 5.26 montre le boîtier temporaire ainsi que sa fixation.

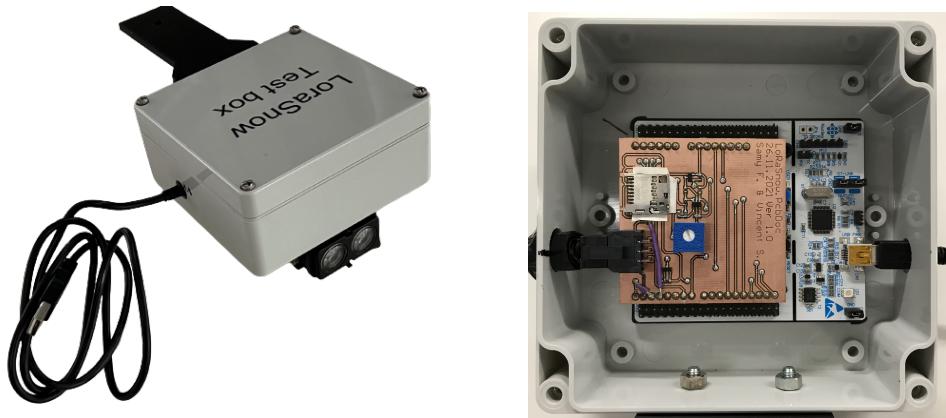


FIGURE 5.26 – LoRaSnow Testbox, intérieur et extérieur

# 6 Synthèse des résultats

## 6.1 LiDAR

Une batterie de tests a été effectuée afin d'attester du bon fonctionnement du LiDAR dans les conditions attendues.

En effet, on remarque que le capteur est capable de fonctionner dans la plage utile de 2 à 4 mètres. Il serait cependant préférable d'éviter d'avoir une distance trop grande entre ce dernier et la route, comme sa mesure diverge très vite de la réalité.

De la même manière, le LiDAR a été mis à l'épreuve dans le banc de test en laboratoire. Sur une série d'une centaine de mesures, il était parfaitement capable de mesurer une distance au sol, et ce peu importe le débit de fausse neige devant le capteur. Cette information est essentielle pour un fonctionnement en condition réelle. De cette manière, nous savons que la neige ou le brouillard ne poseront pas de problèmes pour effectuer les mesures. La méthode de mesure du maximum a par ailleurs été retenue.

Comme ce projet est à même de devoir résister à de grandes variations de température entre le jour et la nuit. Cependant, cette différence ne doit en aucun cas avoir des répercussions sur les mesures effectuées. Heureusement, il semble que le capteur soit stable en température, restant majoritairement dans son erreur typique.

Après que les tests ci-dessus soient validés, nous avons pu nous concentrer sur une méthode de mesure de hauteur en laboratoire. Nous avons ainsi constaté que le capteur arrive à calculer la hauteur d'un élément, même avec du bruit généré devant lui. Il faut cependant faire attention à la porosité du matériau mesuré. En effet, certaines épaisseurs ont été fortement faussées. Cette étape a aussi permis de définitivement valider la méthode du maximum pour le test suivant.

Finalement, le 4 décembre 2021, nous avons pu faire une nuit de mesure sur le terrain. Le LiDAR a été en mesure de calculer la hauteur de neige présente sur la route, et ce avec une précision de 7 milimètres ! Ce test final a permis de valider le *proof of concept* de cette méthode. De plus amples recherches et essais doivent être effectués afin de totalement valider ou abandonner ce capteur, mais les résultats actuels sont prometteurs.

Il est important de noter que, comme prévu, le LiDAR ne fonctionne pas de jour, même lorsque le ciel est complètement couvert. Cela ne pose en aucun cas un problème. En effet, ce projet est fait pour majoritairement fonctionner la nuit.

### 6.1.1 Problèmes rencontrés

#### Porosité du matériau mesuré

Nous savons que le LiDAR a des difficultés à mesurer des distances sur des matériaux poreux. Cependant, les essais sur le terrain avec de la véritable neige n'ont monté aucune erreur. Il serait nécessaire d'approfondir les recherches afin de déterminer si certaines neiges peuvent provoquer ce problème.

## 6.2 Mécanique

Grace à un banc de test comprenant une cage d'essai et un canon à confettis. Plusieurs séries de mesures concluantes ont pu être réalisées. Le débit de neige produit par le canon étant réglable, il augmente les possibilités de mesures. La cage permet de contenir les nuages de confettis sans dégrader les conditions de travaux des autres usagers de la salle.

Différents designs de boitier ont été imaginés avant d'arriver à la solution finale. L'étanchéité fut la partie plus problématique lors de la conception. L'utilisation de joint torique pincé permit de résoudre ces problèmes. L'ABS étant une matière très simple à injecter, la fabrication des pièces du boitier serait corollaire. Le support du boitier permet de régler à la fois l'élévation et l'azimut du boitier. La partie amovible supérieure permet un très bon accès à la partie du module électronique. Elle se verrouille facilement grâce à une fermeture par grenouillère. L'ouverture est verrouillée grâce à la serrure incrustée dans la fixation.

Le module électronique se fixe simplement dans le boitier à l'aide de 4 vis. Une pièce mécanique permet de loger les batteries. Au-dessus des batteries, une plaque permet la fixation du capteur Lidar et des PCB. Suffisamment d'espace est prévu autour du module afin de pouvoir disposer aisément le câblage. La simplicité du module permet une manipulation rapide et simple des différents éléments.

# **7 Conclusion**

## **7.1 Bilan**

## **7.2 Signatures**

# Bibliographie

- [AM21] Jérôme AMOS et Fabien MATTER. *Projet parent VibroSnow, détectant la neige par Computer Vision et Ultrason.* 2021.
- [BF19] Kevin S. J. BROWN et Steven R. FASSNACHT. *Snow Depth Measurement via Time Lapse Photography and Automated Image Recognition.* Rapp. tech. Colorado State University, Département of Ecosystem Science et Sustainability, 2019. URL : <https://static1.squarespace.com/static/52a10a08e4b05a96c777d05a/t/5fa19a903ad19b1b4c1d9331604426392069/CR233.pdf>. (last accessed : 20 January 2022).