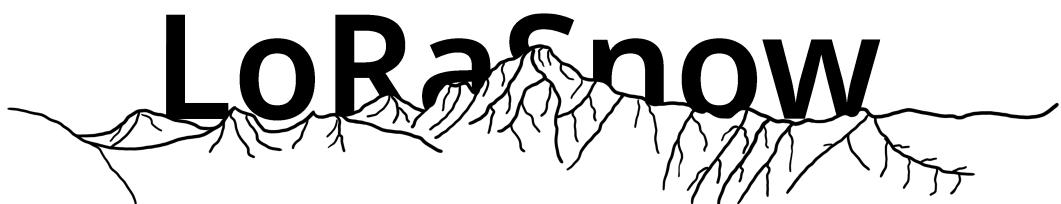




HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIEUR DU VALAIS



MESURE DU NIVEAU DE NEIGE EN CONDITIONS
DIFFICILES

Samy Francelet, Vincent Savioz, Gabriel Deferr
24 janvier 2022

Table des matières

1	Introduction	8
1.1	Contexte	8
I	Technique	9
2	Spécifications	10
2.1	Cahier des charges	10
2.1.1	LoRaWAN	11
2.1.2	Edge Computing	11
2.1.3	Notre interprétation du cahier des charges	12
2.2	Schéma bloc global	13
3	LiDAR	14
3.1	Méthode	14
3.1.1	Fondamentaux	14
3.1.2	Caractéristiques	15
3.1.3	Implémentation	16
3.1.4	Méthode de mesure	18
3.2	Résultats	19
3.2.1	Caractéristique de l'erreur de mesure	19
3.2.2	Mesures de distance dans un environnement perturbé	22
3.2.3	Stabilité en température des mesures	24
3.2.4	Mesure de hauteur en laboratoire	27
3.2.5	Mesure de hauteur en situation réelle	29
4	Computer Vision	32
4.1	Défis liés à la mesure en extérieur	32
4.1.1	Visibilité dans le brouillard et la nuit	32
4.2	Applications pour la mesure de neige	33
4.2.1	Mesure de niveau sur une règlette	33
4.2.2	Mesure de niveau par télevision	35
4.2.3	Mesure du débit de chute de neige	36
4.2.4	Détection de route enneigée	36
4.2.5	Méthodes retenues	36
4.3	Implémentation	37
4.3.1	Récupération des vidéos	37
4.3.2	Mesure du débit de chute de neige	37
4.3.3	Détection de route enneigée	38

4.4	Résultats	39
4.4.1	Mesure de débit de chute de neige	39
4.4.2	Détection de route enneigée	41
5	Mécanique	44
5.1	Banc de test	44
5.1.1	Fausse neige (confettis)	45
5.1.2	Canon à confettis	45
5.2	Boitier	49
5.2.1	Vitre	49
5.2.2	Modification des composants internes	50
5.2.3	Etanchéité	50
5.2.4	Problème de buée	51
5.2.5	Premier concept	51
5.2.6	Version finale du boitier	52
5.2.7	Module électronique	55
5.2.8	Bras de fixation	57
5.2.9	LoRaSnow Testbox	58
6	Synthèse des résultats	59
6.1	LiDAR	59
6.1.1	Problèmes rencontrés	59
6.2	Computer Vision	60
6.2.1	Problèmes rencontrés	60
6.3	Mécanique	60
II	Gestion	61
7	Résumé	62
7.1	Idée commerciale	62
7.2	Domaine d'activité	62
7.3	Marché	62
7.4	Analyse des risques	63
8	Produits et services	64
8.1	Description du produit	64
8.2	Détection de hauteur de neige	64
8.3	Mesure du débit de chute de neige	64
8.4	Détection du givre	64
8.5	Pourquoi nous ?	64
9	Marché et Contexte	65
9.1	Qui bénéficie du déneigement des routes	65
9.2	Analyse de la clientèle	66
9.2.1	Communes	66
9.2.2	Entreprise privée	66
9.3	Analyse du marché	67
9.3.1	Demande	67
9.3.2	Offres présentes sur le marché	67

9.4	Analyse des partenaires	67
9.4.1	Eurocircuit	67
9.4.2	Pfefferlé Sion	67
9.4.3	Protolabs	67
9.4.4	Boschung	67
9.5	Analyse de la concurrence	67
9.5.1	Boschung	67
9.5.2	Population de la région	67
10	Stratégie	68
10.1	Analyse SWOT	68
10.1.1	Forces	68
10.1.2	Avantage pour le client	68
10.1.3	Faiblesses	68
10.1.4	Menaces	69
10.1.5	Opportunités	69
10.1.6	Analyse	69
10.2	Stratégie adoptée	69
11	Mesures	70
11.1	Marketing	70
11.1.1	Tarifs	70
11.1.2	Canaux	70
11.2	Infrastructure	70
11.2.1	Serveurs et LoRaWAN	70
11.2.2	Site web	70
11.2.3	Service client	70
11.3	Ressources humaines	71
11.3.1	R&D	71
11.3.2	Service client	71
12	Finances	72
12.1	Planification des coûts	72
12.2	Bilan prévisionnel	72
12.3	Plan de liquidité	72
13	Conclusion	73
13.1	Bilan	73
13.2	Signatures	73
A	Planning	74
A.1	Planning prévisionnel	75
A.2	Planning réalisé	76
B	Bilan prévisionnel	78
B.1	Prix et coûts	78
B.2	Budgets et bilans	80
B.2.1	Base case	80
B.2.2	Worst case	81
B.2.3	Best case	82

C Schéma électronique	83
D Mises en plan	85
E Protocoles de test du LiDAR	89

Table des figures

2.3	Schéma bloc global du projet	13
3.1	Garmin Lidar Lite v4	14
3.2	LiDAR Lite V4 implémenté sur Arduino Uno	16
3.3	LiDAR Lite V4 sur STM32-NUCLEO	17
3.4	Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow	18
3.5	Mesure de distance comparée à la distance réelle	19
3.6	Distance mesurée en fonction de la distance réelle	20
3.7	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle	20
3.8	Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile	21
3.9	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile	21
3.10	Mise en place du test de perturbation	22
3.11	Histogramme de la mesure de référence	23
3.12	Comparaison des 5 mesures effectuées	23
3.13	Mise en place du test en température	25
3.14	Graphe de stabilité en température du LiDAR	26
3.15	Mise en place du test de mesure d'épaisseur	27
3.16	Boîte à moustache des mesures d'épaisseur	28
3.17	Résultat des calculs d'offset par méthode	28
3.18	Vue du PCB fabriqué	29
3.19	Mise en place du test en condition réelle	30
3.20	Résultat des mesures effectuées	31
4.1	Comparaison image de neige HD et cas concret	32
4.2	Mesure de neige à la règle	33
4.3	Schéma de principe stéréovision	35
4.4	Comparaison image source et bruit sur image	36
4.5	Étapes de la mesure de débit de chute de neige	37
4.6	Référence pour détection de neige sur route	38
4.7	Images testées pour détection de neige sur route	38
4.8	Exemples de degré de chute de neige	39
4.9	Résultats de la mesure de débit de chute de neige (<i>échelle : 0 pas de neige, 1 quelques flocons, 2 neige, 3 grosse chute de neige</i>)	40
4.10	Exemples de degré d'état de la route	41
4.11	Résultats de la mesure d'état de la route, sans suppression de bruit(<i>échelle : 0 déneigée, 1 partiellement enneigée, 2 enneigée</i>)	42
4.12	Résultats de la mesure de débit de chute de neige, avec suppression de bruit(<i>échelle : 0 déneigée, 1 partiellement enneigée, 2 enneigée</i>)	43

5.1	Encombrement de la structure de test	44
5.2	Aspect des confettis fabriqués	45
5.3	Principe du canon à effet Venturi	46
5.4	Exemple d'impression 3D du canon	46
5.5	Turbine DC	47
5.6	Deuxième version du canon	47
5.7	Mise en fonction du canon	48
5.8	Ensemble final du canon à confettis	48
5.9	Vitre et jointure	49
5.10	Transmittance de différents matériaux	50
5.11	Premiers designs du boîtier (à gauche : double vitre, à droite : simple vitre)	50
5.12	Etanchéité du boîtier	51
5.13	Ouverture arrière du boîtier	52
5.14	Encombrement du boîtier, version 1 (en rouge l'encombrement estimé de l'électronique)	52
5.15	Ouverture du boîtier, version 2 (à gauche), grenouillère pour la fermeture (à droite)	53
5.16	Mécanisme du pivot	54
5.17	Fixation de la casquette et inserts filetés	54
5.18	Support du module	55
5.19	Support de fixation du boîtier	55
5.20	Module électronique	55
5.21	Support à batteries	56
5.22	Plaque de fixation pour la partie électronique	56
5.23	Support pour le LiDAR	57
5.24	Système de réglage de l'élévation	57
5.25	Support de fixation tubulaire et mural	58
5.26	LoRaSnow Testbox, intérieur et extérieur	58

Liste des tableaux

3.1	Extrait des spécifications du LiDAR Lite V4	15
3.2	Sélection des registres I2C essentiels	17
3.3	Différentes méthodes de calcul de distance (en cm)	24
3.4	Mesures relevée lors du test	30

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 précipitations. Ce projet amène donc une surveillance constante et automatique d'une région, remplaçant par la même occasion le système coûteux déjà en place.

Première partie

Technique

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 lors de vents forts.

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 projet¹

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 de grandes distances tout en permettant une consommation électrique très faible. La longue portée de son signal permet l'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.

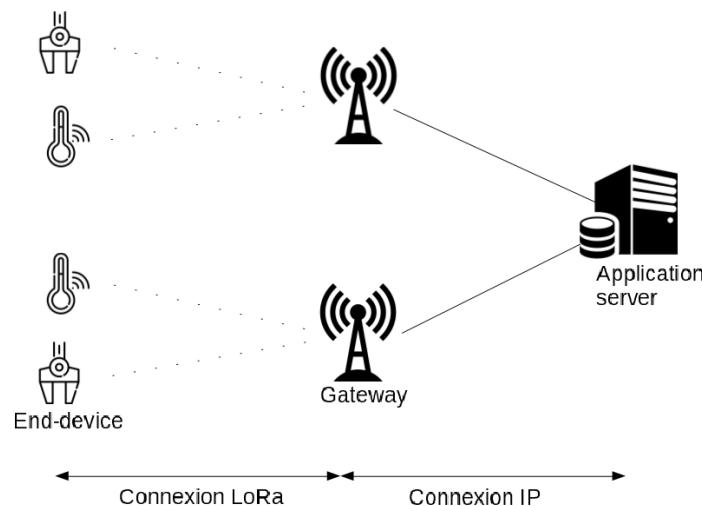


FIGURE 2.2 – Topologie LoRaWAN¹

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 envoyés 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. Cela nous permet d'avoir une vue globale 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 sera sûrement réalisée sur une toute petite zone ou un point. Si cette zone/point est mal déneigé, ou qu'un objet comme une pierre se place à cet endroit, la mesure sera faussée.

Fixation et protection du module

Comme le module LoRaSnow sera exposé aux aléas météorologiques de la montagne, un boîtier étanche et résistant doit être confectionné sur mesure. Il doit permettre de protéger totalement l'électronique de l'humidité et d'autres types de perturbations, et doit offrir 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 aux autres durant le prototypage.

2.2 Schéma bloc global

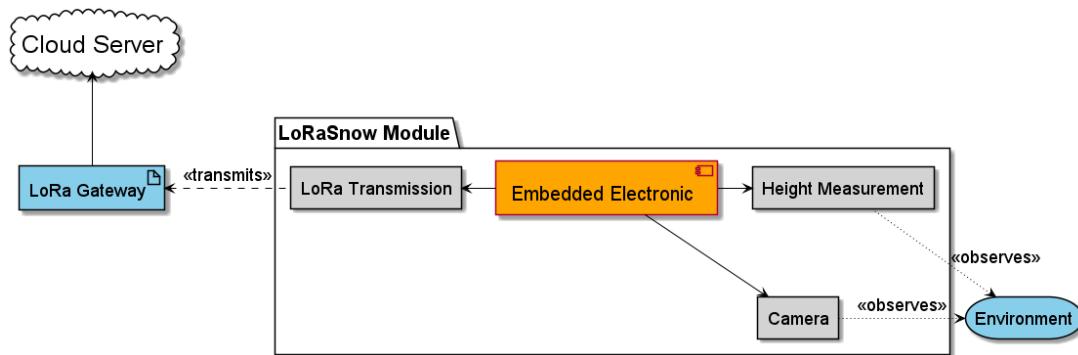


FIGURE 2.3 – Schéma bloc global du projet

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 d'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 capteur 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 du trajet aller-retour vers le 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. Finalement, 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.

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 technique¹. Ci-dessous sont détaillés les éléments essentiels à la sélection de ce capteur.

Température de fonctionnement

Cette information s'avère importante pour ce projet. En effet, on peut s'attendre à ce que ce capteur puisse fonctionner à des températures négatives, allant 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

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

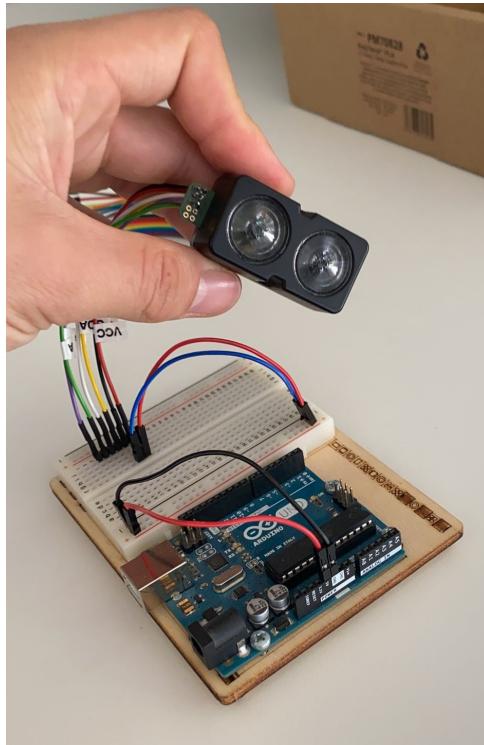


FIGURE 3.2 – LiDAR Lite V4 implanté sur Arduino Uno

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 ensuite été porté 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 language 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, une commande de mesure de distance est envoyée dans le registre 0x00, puis on attend grâce au status (0x01) que l'appareil ne soit plus occupé. Les deux registres 0x10 et 0x11 peuvent ensuite être consulté 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.

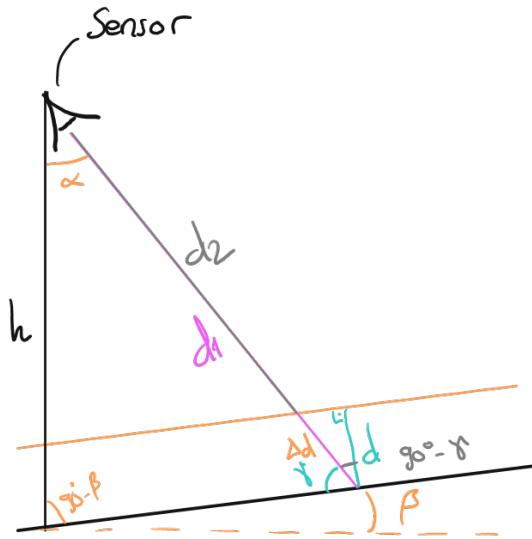


FIGURE 3.4 – Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow

α Angle du capteur par rapport à la verticale (en degré)

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

γ 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)

Δd 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, α , β et h doivent être connus. Avec ces valeurs, on peut désormais calculer facilement l'angle γ :

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

Le Δd 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 annexeE, 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.

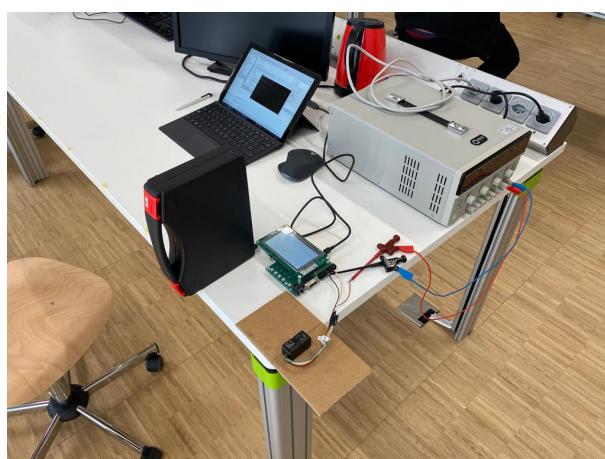


FIGURE 3.5 – Mesure de distance comparée à la distance réelle

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

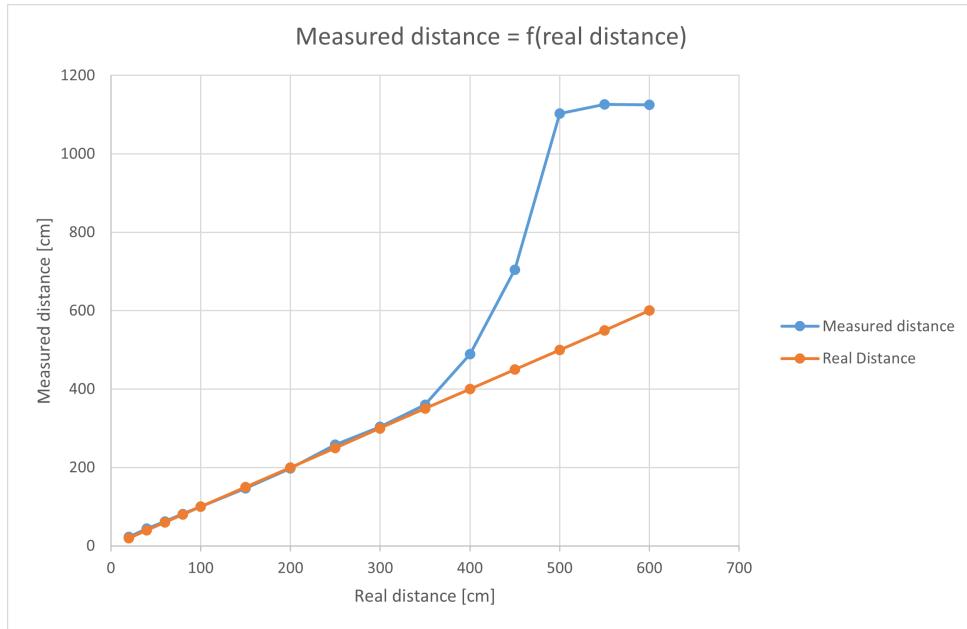


FIGURE 3.6 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle

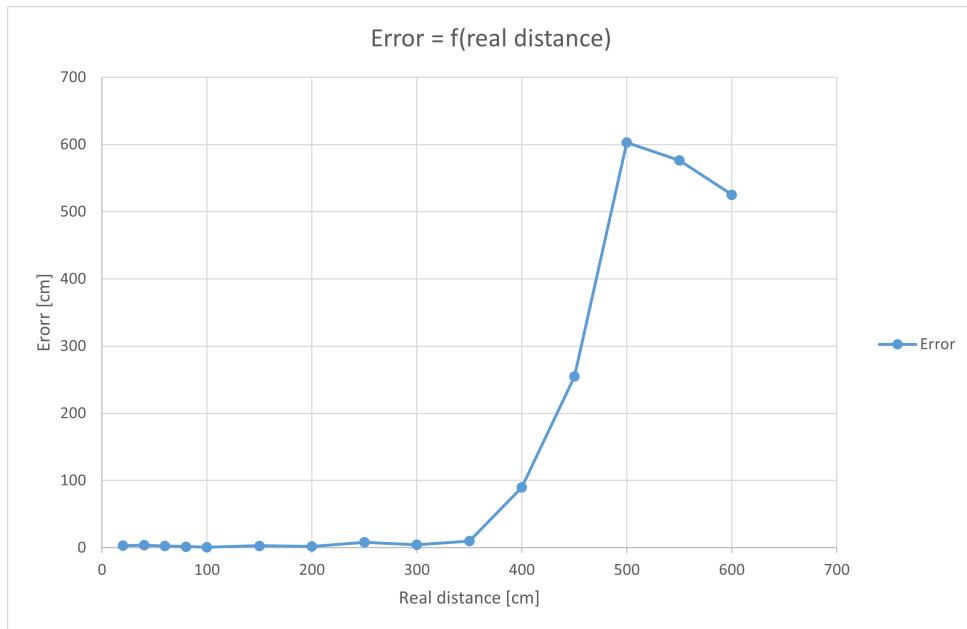


FIGURE 3.7 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle

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

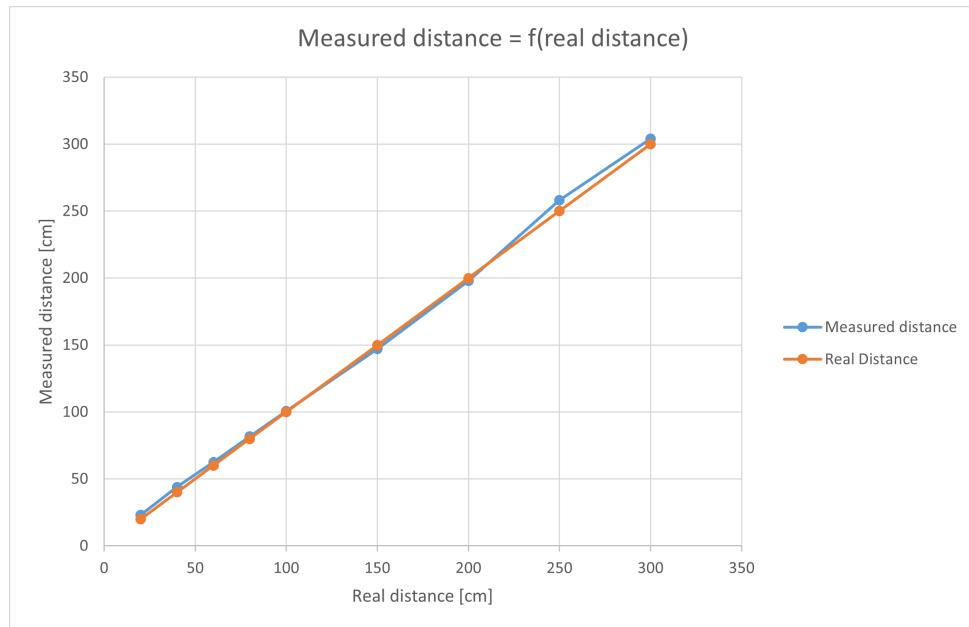


FIGURE 3.8 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile

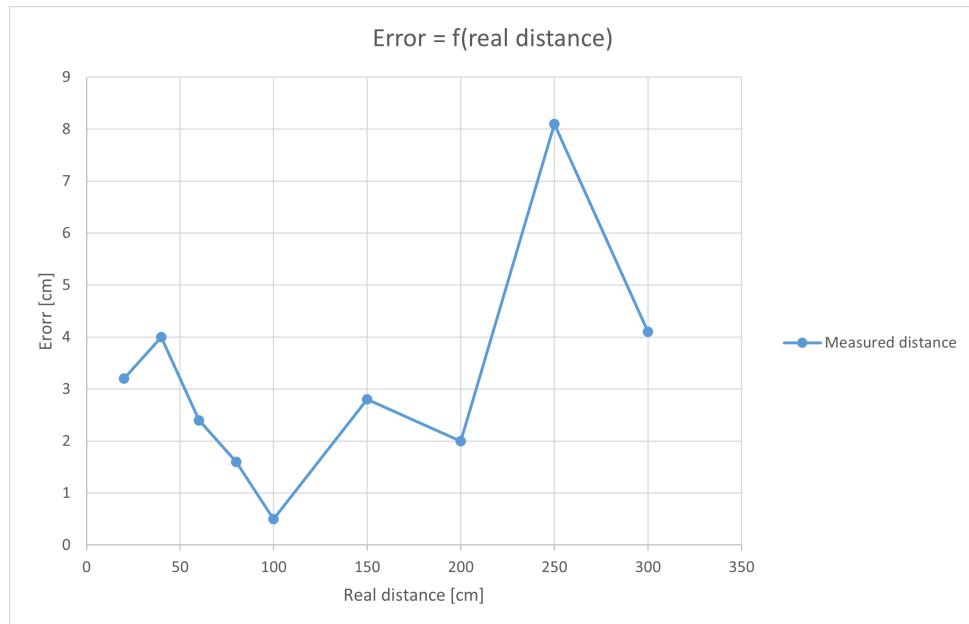


FIGURE 3.9 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile

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 important 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, nous ne travaillons qu'avec des différences entre deux mesures, ce qui limite d'autant plus les effets de cette erreur.

Nous pouvons 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 5.1. 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° 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

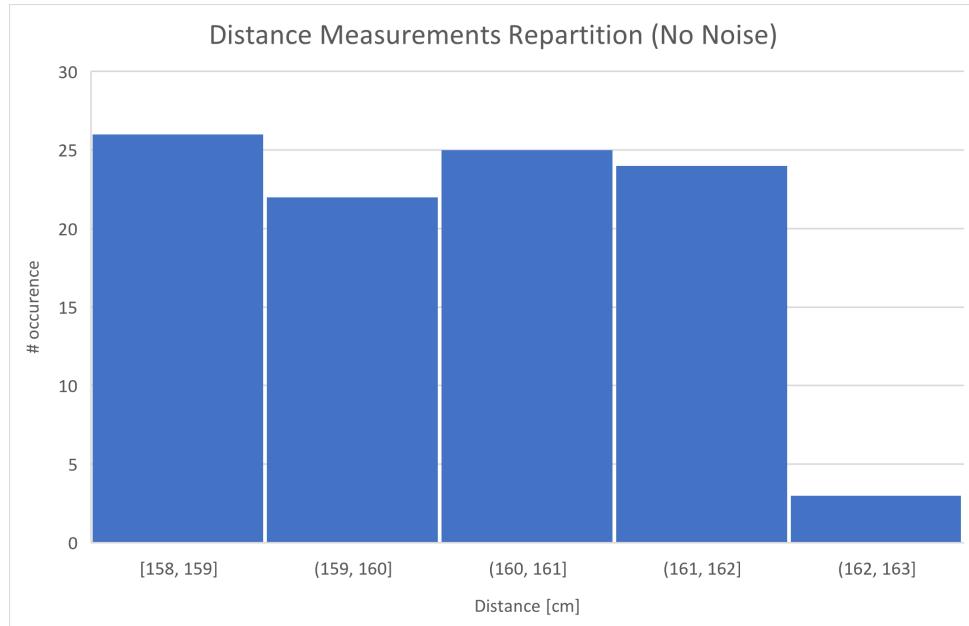


FIGURE 3.11 – Histogramme de la mesure de référence

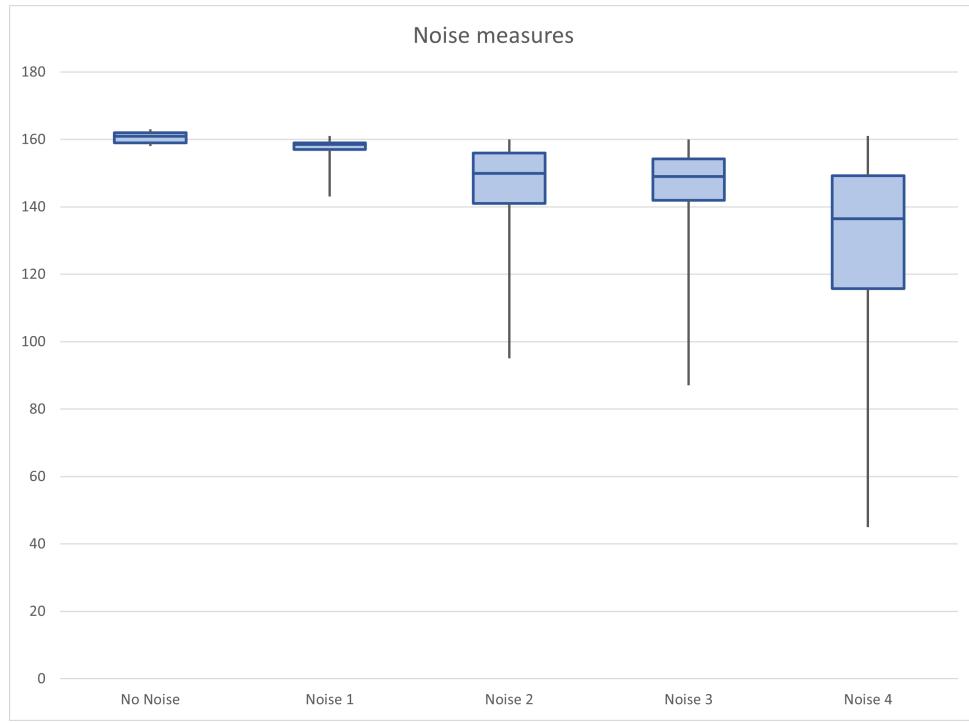


FIGURE 3.12 – Comparaison des 5 mesures effectuées

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.

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'indiquent les boîtes à moustache, les valeurs medianes des séries s'éloignent de plus en plus de la distance à la 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, nous constatons que cette méthode devient très imprécise lorsque du bruit apparaît devant le capteur.

Médiane

Malgré une amélioration par rapport à la moyenne, la médiane 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, le capteur 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°C 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

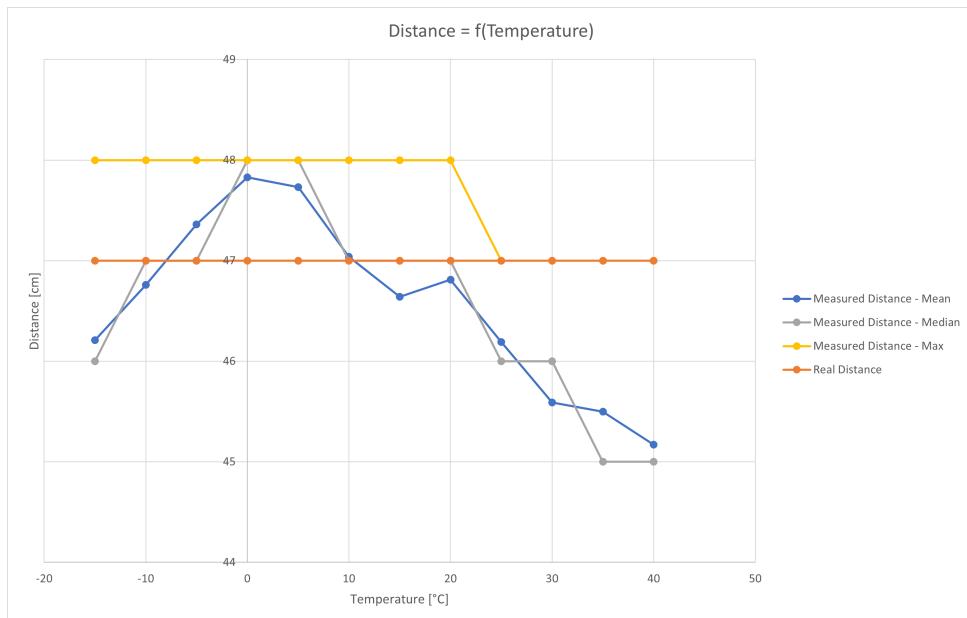


FIGURE 3.14 – Graphe de stabilité en température du LiDAR

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 α du LiDAR a été fixé à 60° , alors que l'angle β 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

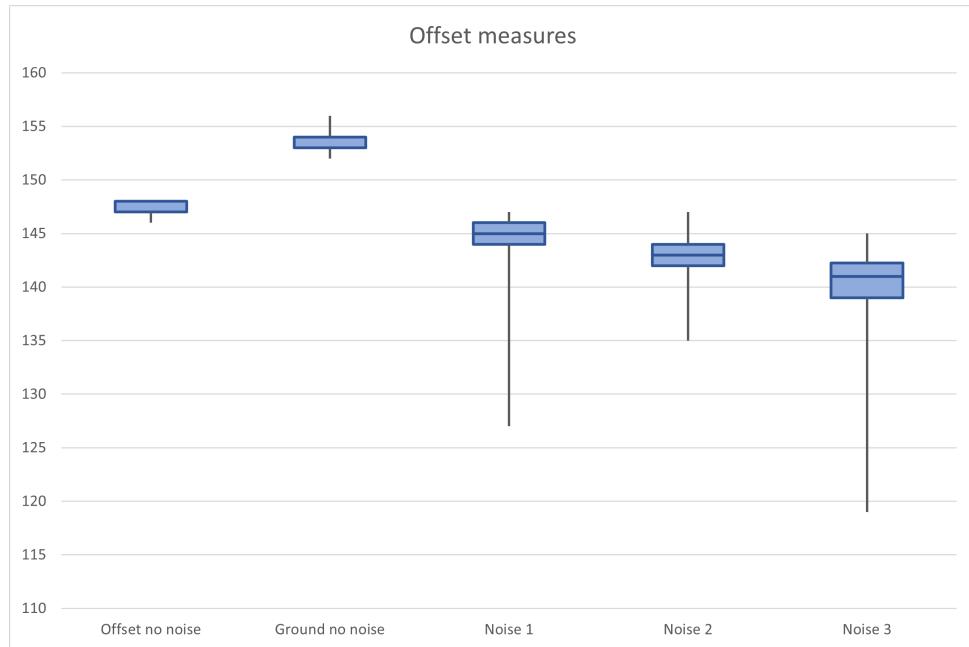


FIGURE 3.16 – Boîte à moustache des mesures d'épaisseur

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.

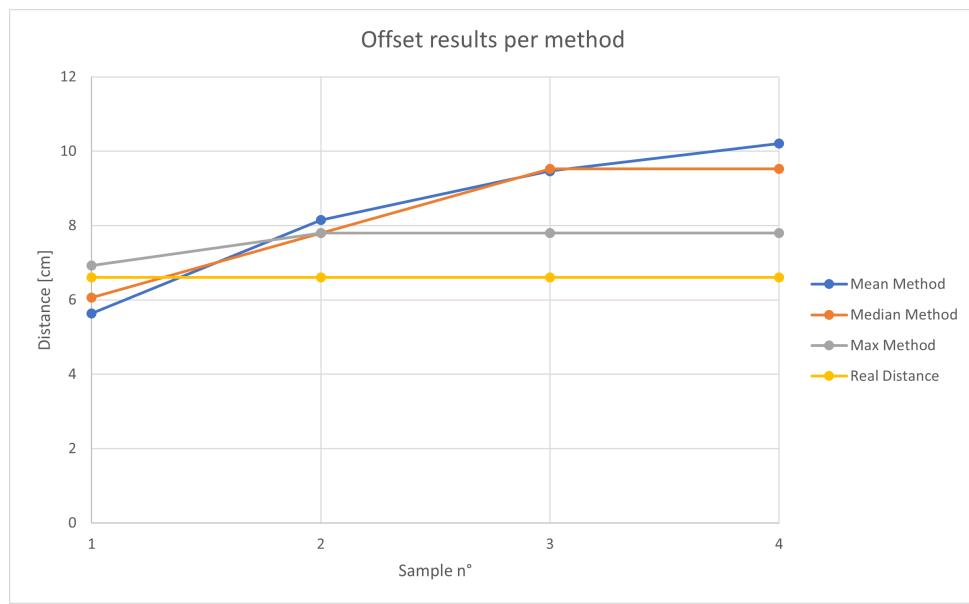


FIGURE 3.17 – Résultat des calculs d'offset par méthode

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.

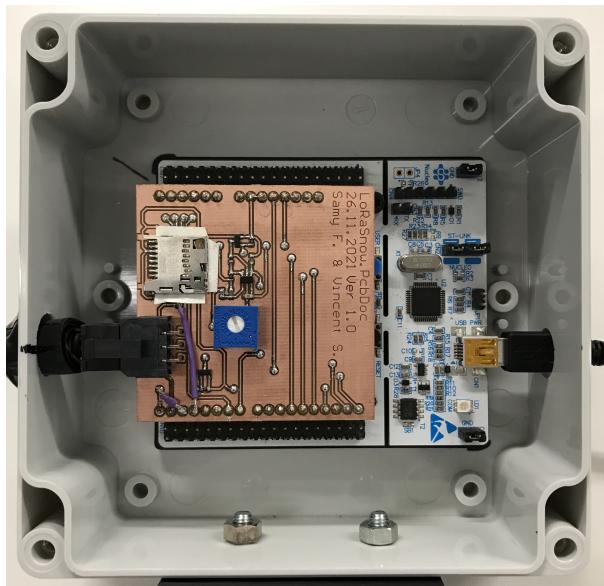


FIGURE 3.18 – Vue du PCB fabriqué

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

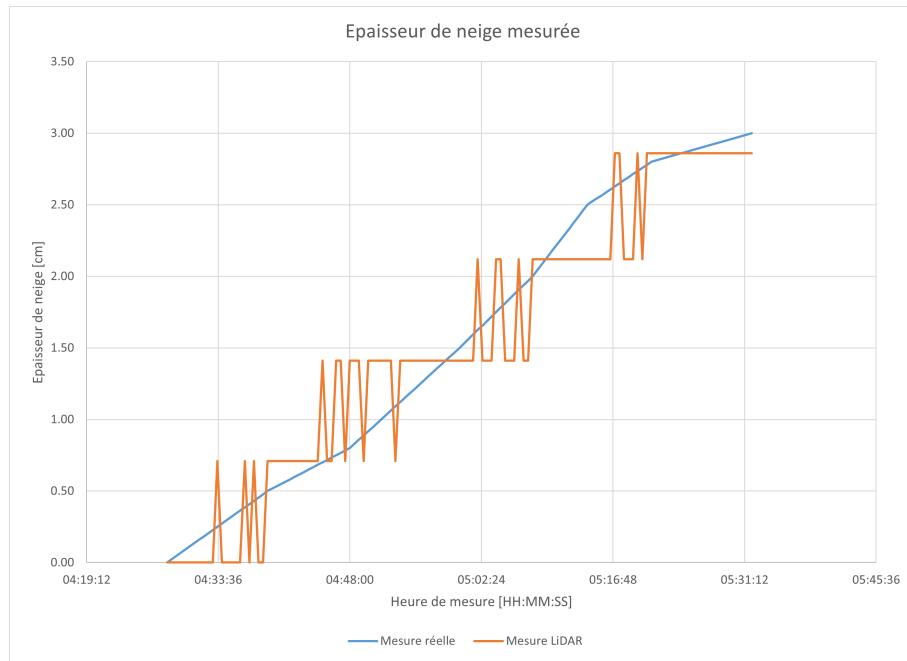


FIGURE 3.20 – Résultat des mesures effectuées

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, infinies.

4.1 Défis liés à la mesure en extérieur

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

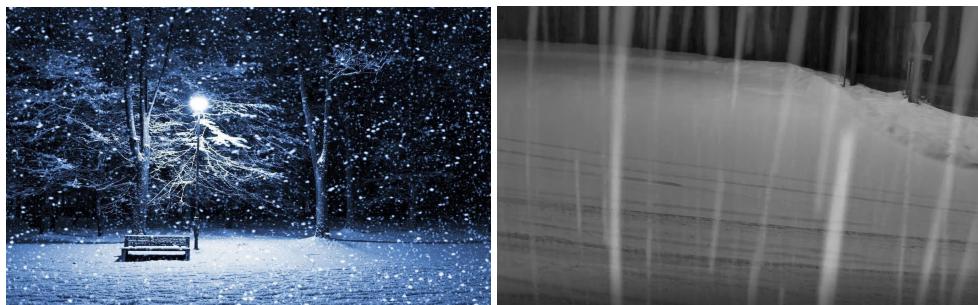


FIGURE 4.1 – Comparaison entre une image idéale¹ et un cas concret²

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.

4.1.1 Visibilité dans le brouillard et la nuit

Bien qu’il est rare d’avoir une forte chute de neige ainsi qu’un brouillard épais, il reste nécessaire de trouver un moyen d’améliorer la visibilité au travers du brouillard. Selon ce rapport[HAL], les infrarouges proches (*NIR*) permettent de voir au travers d’un brouillard fin, et d’augmenter *légèrement* la visibilité au travers d’un brouillard épais. L’ajout d’un éclairage infrarouge sera donc nécessaire, et permettra également de pouvoir augmenter la visibilité durant la nuit.

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

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

4.2 Applications pour la mesure de neige

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

4.2.1 Mesure de niveau sur une règlette

Les mesures de niveau de neige manuelles se font déjà avec une règlette plantée dans la neige.



FIGURE 4.2 – Mesure d'environ 4.5 pouces de neige à Manitoba, Canada¹

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

Avoir une règlette 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 règlette 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 règlette

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 règlette 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 [SnowTimeLapse]

pour reconnaître le piquet d'autres objets (p. ex. : arbres, lampadaires, ...) Cela demanderait trop de puissance de calcul pour un système embarqué basse consommation. Une autre solution

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

serait de calibrer chaque installation pour reconnaître le piquet. Cependant la caméra étant embarquée, cette calibration serait certainement fastidieuse et demanderait une interface utilisateur supplémentaire pour la réaliser.

4.2.2 Mesure de niveau par stéréovision

La stéréovision est une méthode de mesure se servant d'images provenant de plusieurs points de vue. Typiquement, deux caméras côté à côté, peuvent mesurer des profondeurs de la même manière que des yeux.

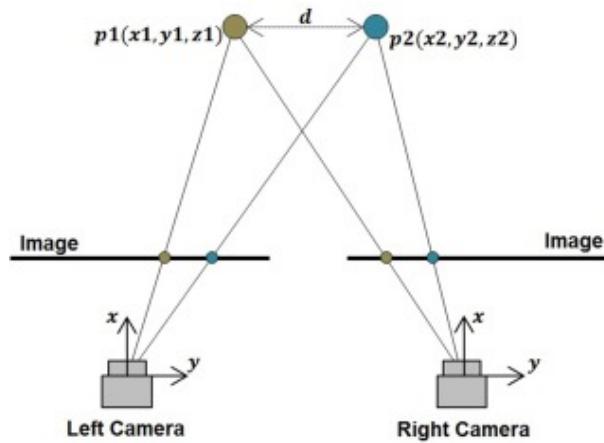


FIGURE 4.3 – Schéma de principe de mesure de distance par stéréovision

Beaucoup de caméras spécialisées dans la reconnaissance d'image par intelligence artificielle utilisent 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 résultats suffisamment précis pour mesurer une couche de neige.

4.2.3 Mesure du débit de chute de neige

Une mesure simple et rapide consiste à estimer le débit de chute de neige en isolant les flocons.



FIGURE 4.4 – Image source de la caméra VibroSnow¹ 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 une pierre, mal placé fausse la mesure du capteur, savoir si le segment de route est enneigé ou non offre l'occasion 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, installed 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 ont aimablement donné l'accès à la caméra de notre projet parent *VibroSnow/VibroSnow* 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 ait été donné, nous ne pouvons pas aller chercher les fichiers 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

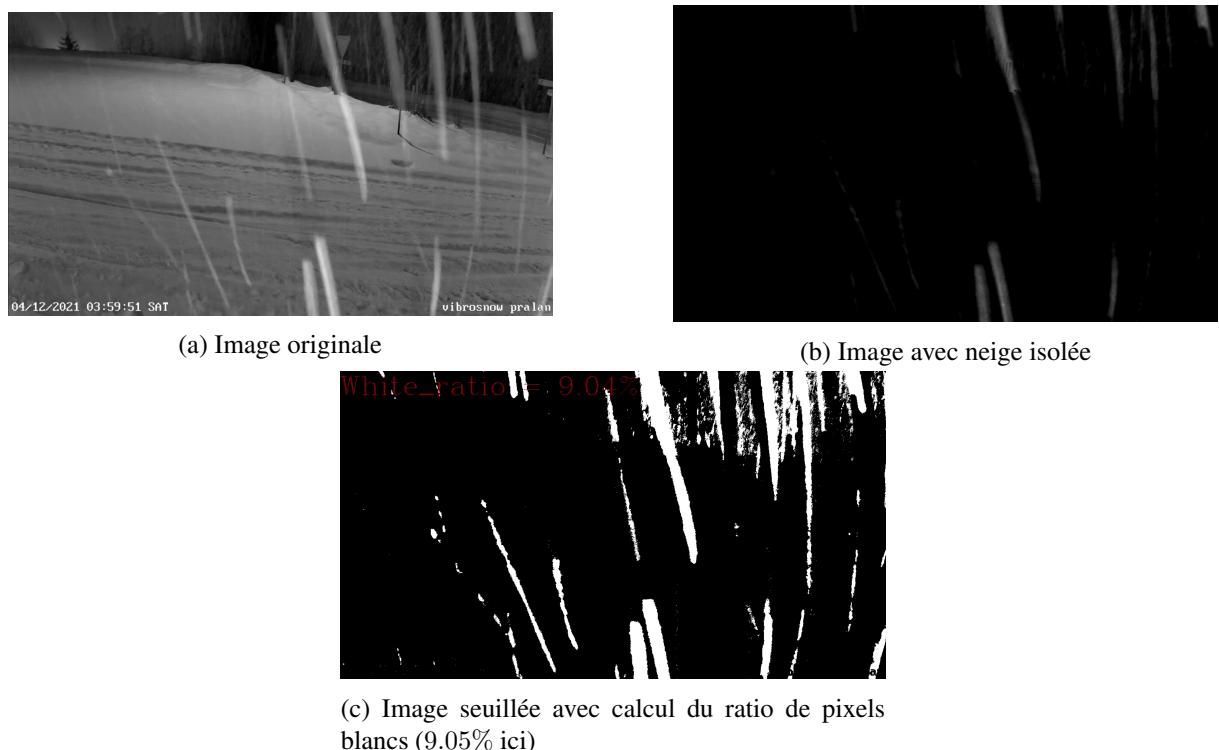


FIGURE 4.5 – Étapes de la mesure de débit de chute de neige

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 tester les différentes méthodes de mesure. Cette section ne détails pas, mais discutre des tests effectués et de 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 chute de neige, neige, grosse chute de neige



(a) Chute de neige (degré 2)

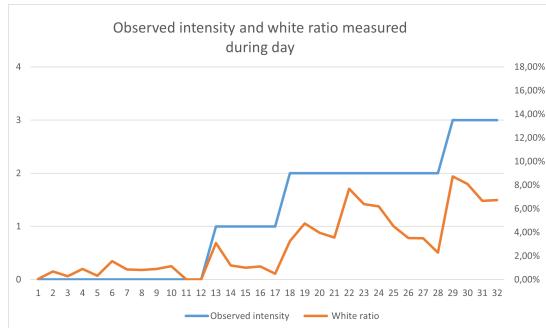


(b) Grosse chute de neige (degré 3)

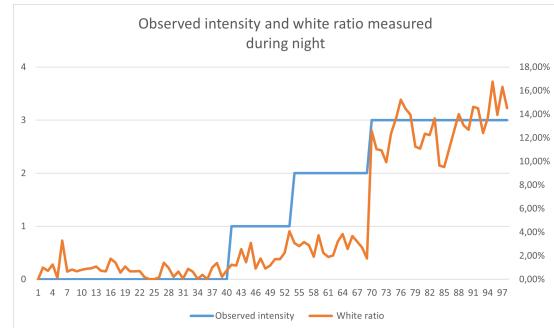
FIGURE 4.8 – Exemples de degré de chute de neige

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.

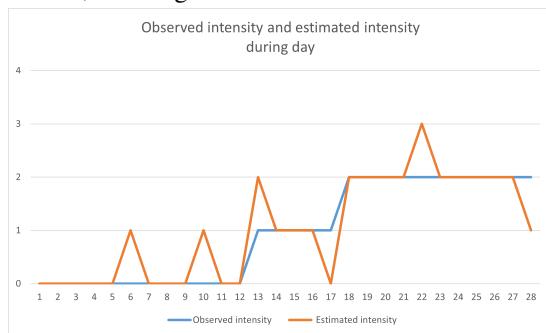
Résultats



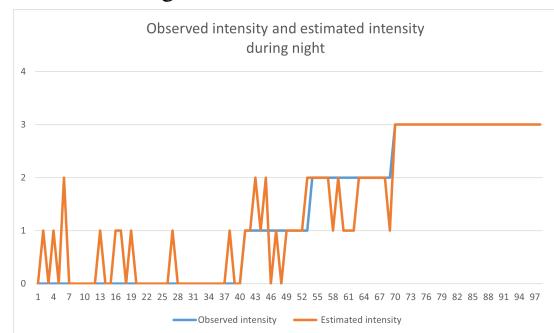
(a) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(b) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(c) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée



(d) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée

FIGURE 4.9 – Résultats de la mesure de débit de chute de neige (*échelle : 0 pas de neige, 1 quelques flocons, 2 neige, 3 grosse chute de neige*)

La précision de cette méthode est de 79.2% sur cet échantillon. Les erreurs au degré 0 sont entièrement dues aux véhicules qui passent. En effet la caméra n'enregistre uniquement lorsqu'elle détecte un mouvement.

Conclusion préliminaire

Cette méthode est suffisamment précise pour détecter le débit de neige. Cependant il faudrait ajouter une méthode évitant de prendre la mesure lorsqu'un véhicule passe. Les degrés mesurés peuvent être *fine tuned* en expérimentant avec plus de vidéos et des données météos fiables.

4.4.2 Détection de route enneigée

Le but de cette mesure est de fournir, à minima, si oui ou non la route est enneigée. Idéalement elle devrait pouvoir différencier plusieurs degrés 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



(a) Route partiellement couverte (degré 1)



(b) Route entièrement couverte (degré 2)

FIGURE 4.10 – Exemples de degré d'état de la route

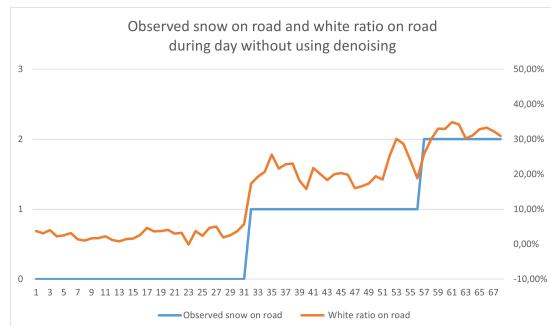
La séparation jour/nuit est importante pour cette mesure. Si la route est encore humide, la lumière du soleil peut si réfléchir et fausser la mesure. C'est pourquoi des valeurs de seuils différentes ont été utilisées ici (80/255 pour la nuit et 120/255 pour le jour).

Chaque vidéo sans chute de neige avec une route déneigée peut servir de référence pour différencier une route déneigée d'une route enneigée.

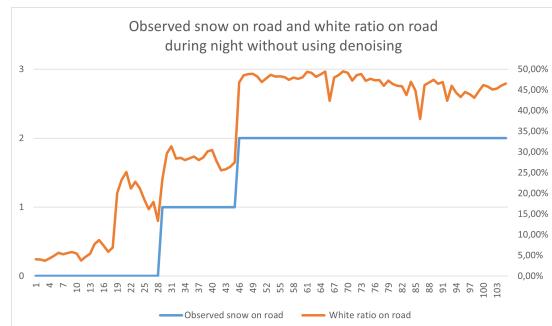
Dans l'idéal, on devrait aussi pouvoir les trier selon la quantité de chute de neige, mais n'ayant pas suffisamment de vidéos pour réaliser ce tri, on devra se contenter de cette méthode.

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.

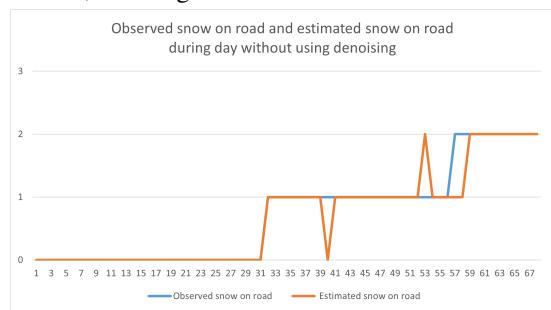
Sans traitement



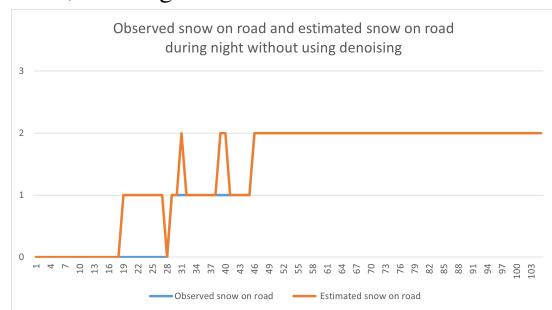
(a) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(b) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(c) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée

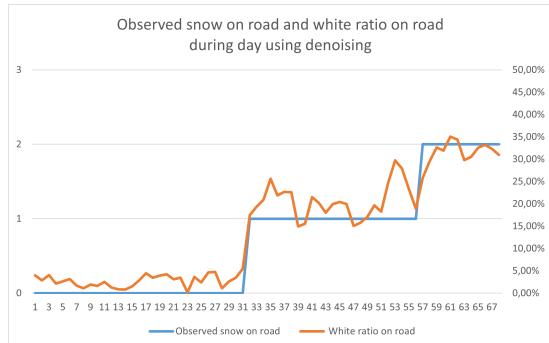


(d) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée

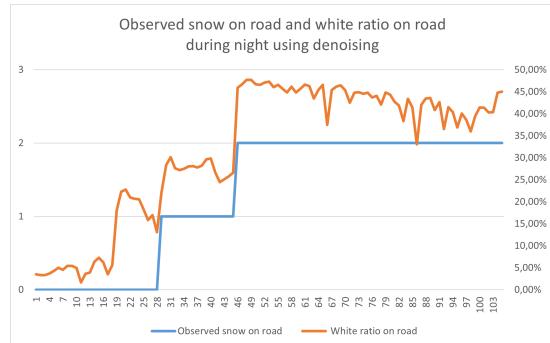
FIGURE 4.11 – Résultats de la mesure d'état de la route, sans suppression de bruit(échelle : 0 déneigée, 1 partiellement enneigée, 2 enneigée)

Cette méthode a une précision de 90.8% sur cet échantillon.

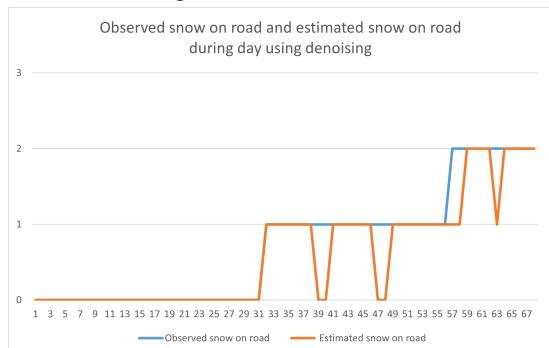
Avec suppression de bruit



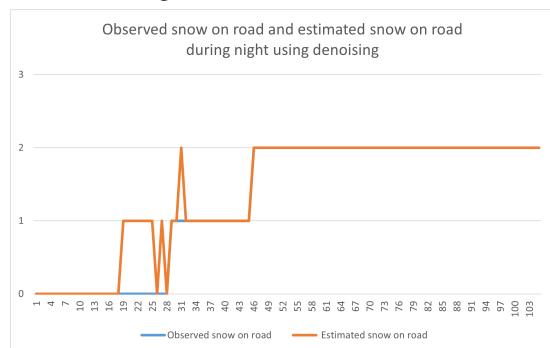
(a) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(b) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur mesurée



(c) Mesure durant la journée, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée



(d) Mesure durant la nuit, en bleu la valeur jugée à l'oeil, en orange la valeur interprétée

FIGURE 4.12 – Résultats de la mesure de débit de chute de neige, avec suppression de bruit(échelle : 0 déneigée, 1 partiellement enneigée, 2 enneigée)

Cette méthode a également une précision de 90.8% sur cet échantillon.

Conclusion préliminaire

Les deux méthodes ont un résultat identique sur cet échantillon. La méthode sans suppression de bruit est donc retenue car elle demande moins de ressources. On peut avoir l'impression que le système fonctionne moins de jour, mais cela est dû au fait que l'échantillon représentant les routes enneigées était en fait des routes qu'on pourrait considérer *entre* le degré 1 et 2. Dans l'échantillon de nuit, les erreurs sont liées à des chasses-neige faussant la mesure avec leurs grands phares. Une méthode évitant de mesurer lorsqu'un véhicule passe, comme cité au point 4.4.1 est nécessaire.

La méthode tel quel, fonctionne parfaitement.

5 Mécanique

Dans le but d'effectuer une série de tests avec les capteurs 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 proprement. Un canon à confetti a permis de simuler la neige qui tombe. 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 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.

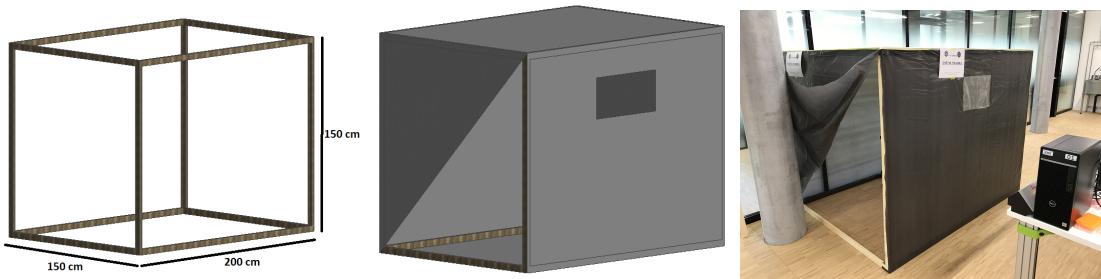


FIGURE 5.1 – Encombrement de la structure de test

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 agrafés 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.

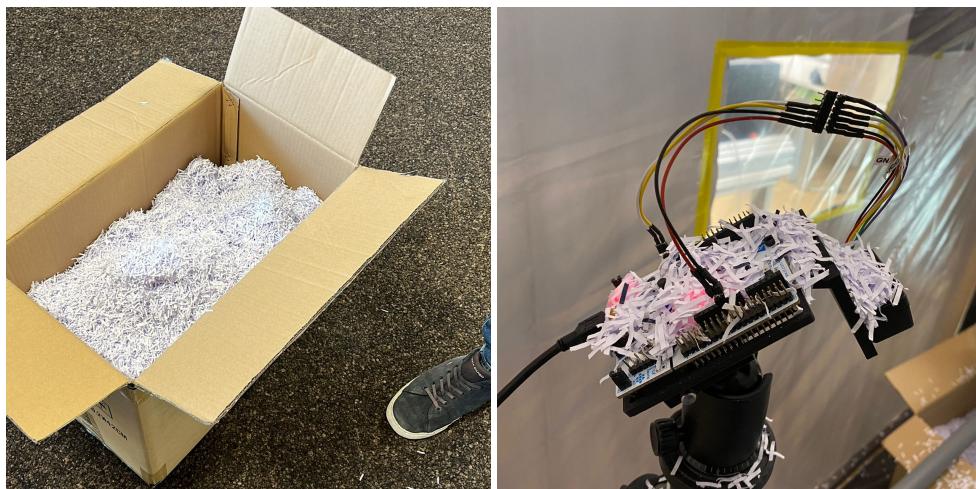


FIGURE 5.2 – Aspect des confettis fabriqués

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 l'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 est représenté. Le débit d'air constant (en rouge) 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.

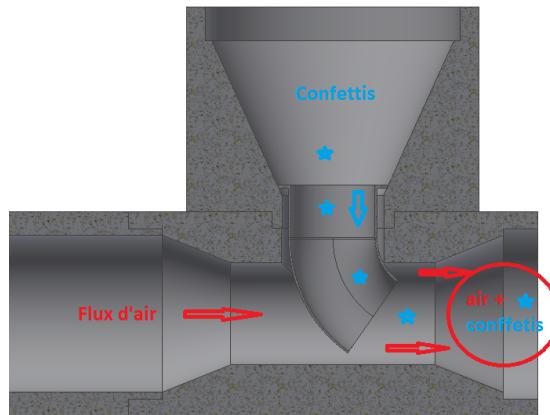


FIGURE 5.3 – Principe du canon à effet Venturi

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 permettrait d'avoir un meilleur écoulement et de limiter la formation d'agglomérats.

Solution apportée

En prenant en compte les problèmes survenus 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.

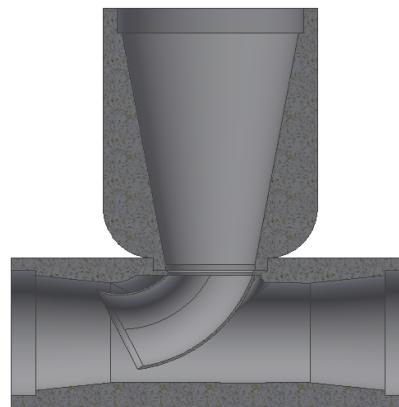


FIGURE 5.6 – Deuxième version du canon

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 fortement réduit 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 d'aspirer des confettis placés sur le sol et de les souffler. On peut voir sur la figure 5.7 le canon en action.

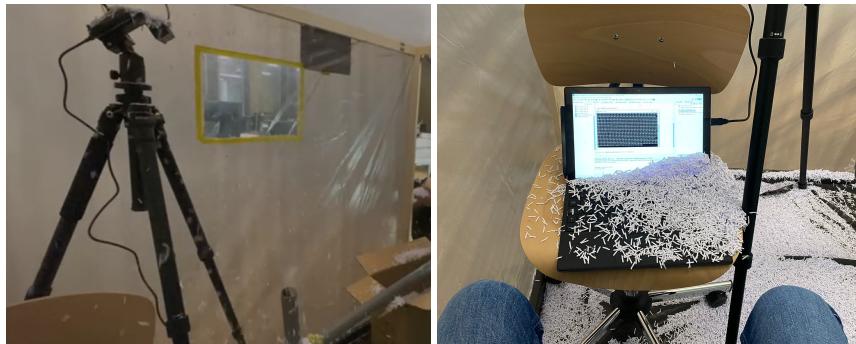


FIGURE 5.7 – Mise en fonction du canon

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, par conséquent 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 boîtier doit assurer une bonne étanchéité. Pour cela il faut un boîtier sur mesure répondant à beaucoup de critères comme un encombrement optimisé, une fixation permettant de mettre le boîtier sur plusieurs types de supports et surtout une simplicité de conception. Garantir une simplicité de conception dans un encombrement limité constitue un défi à relever.

La configuration de base du boîtier 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 boîtier transparente sans pour autant ne plus être étanche. Le but est 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.

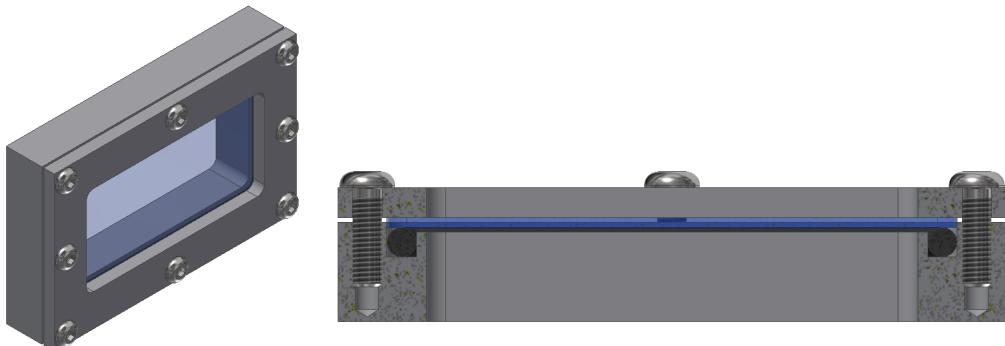


FIGURE 5.9 – Vitre et jointure

Dans le cas où ces pièces seraient faites en plastique, l'utilisation de vis auto-taraudeuses ou d'inserts filetés est nécessaire. Les vis auto taraudeuses sont plus simples à mettre en place et tout aussi efficaces. 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 boîtier transparente. L'utilisation d'un verre est la solution. Cependant, ce n'est pas aussi simple, le capteur fonctionnant dans les infrarouges proches (940nm). Tous les verres ne permettent pas le passage de ces rayons. Sur le graphique 5.10, la capacité à laisser passer les rayons en fonction de la longueur d'onde est exprimée. 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 ([wave]).

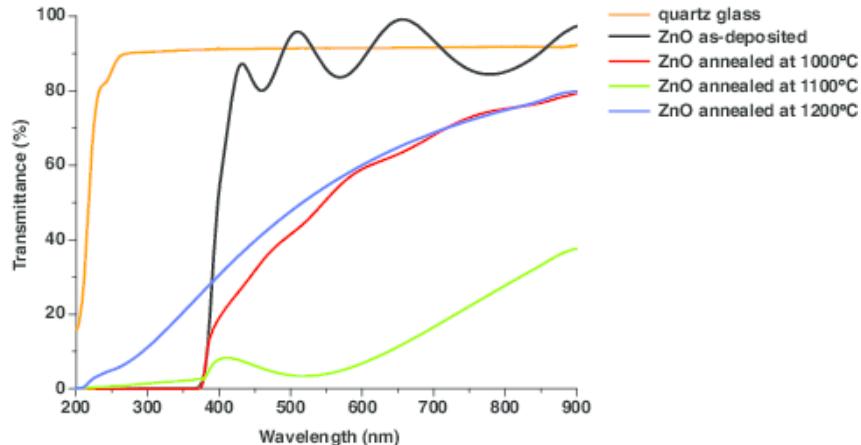


FIGURE 5.10 – Transmittance de différents matériaux

5.2.2 Modification des composants internes

Durant la 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, ce dernier augmente la complexité du montage. Il n'y a aucun réel intérêt à faire ce design plutôt qu'une simple grande vitre (figure 5.11).

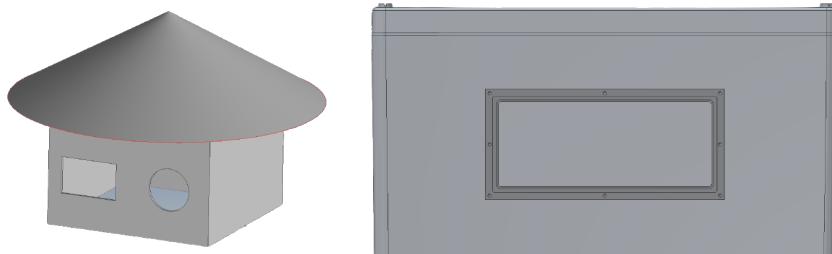


FIGURE 5.11 – Premiers designs du boîtier (à gauche : double vitre, à droite : simple vitre)

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

5.2.3 Etanchéité

Lors de la suite de la conception, l'étanchéité de la boîte a posé 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 bourlet (5.12) 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 une étanchéité garantie.

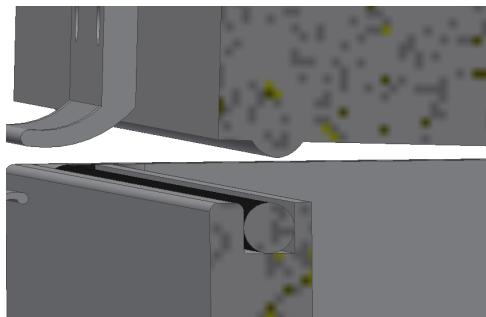


FIGURE 5.12 – Etanchéité du boîtier

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 est 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.

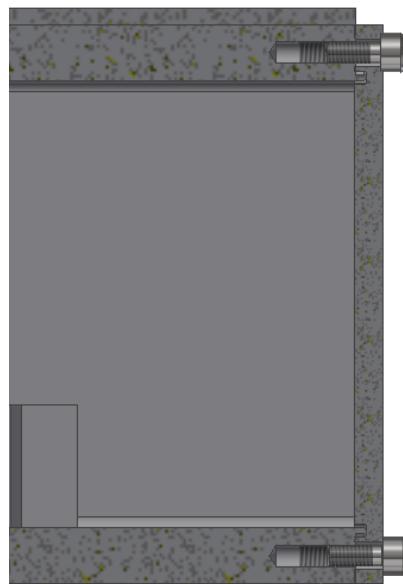


FIGURE 5.13 – Ouverture arrière du boîtier

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.

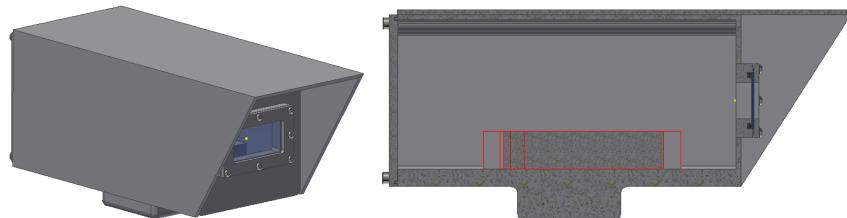


FIGURE 5.14 – Encombrement du boîtier, version 1 (en rouge l'encombrement estimé de l'électronique)

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 récentes. Ce boîtier est conçu à base de polymère, qui permet de limiter les transferts de chaleur 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'est pas adapté aux environnements humides. Cela pourrait provoquer de l'hydrolyse et dégrader le boîtier. L'ABS quant à lui est très

résistant. L'injection de ce polymère est très répendue. Il est notamment utilisé pour fabriquer les briques Lego et des barques de secours. 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 tonne¹. 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 le dessus 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 dite grenouillère, comme le montre la figure 5.15. La grenouillère² 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.

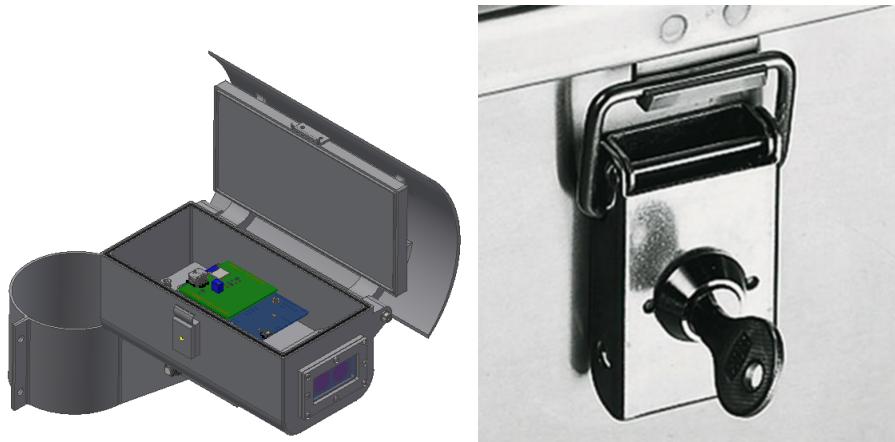


FIGURE 5.15 – Ouverture du boîtier, version 2 (à gauche), grenouillère pour la fermeture (à droite)

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. Elle permet aussi de 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=>

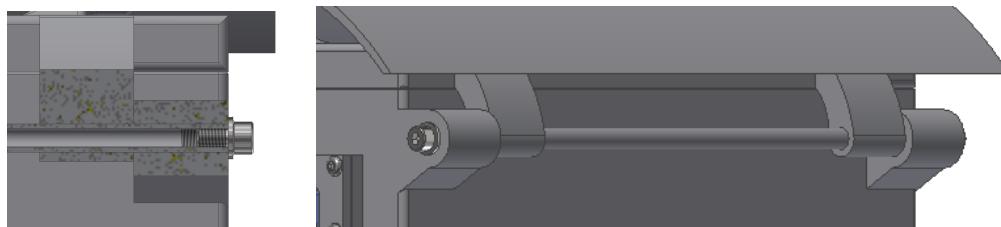


FIGURE 5.16 – Mécanisme du pivot

Fixation de la casquette

La casquette qui se situe sur le couvercle est facilement démontable pour l'échanger avec un autre modèle ou la remplacer 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.

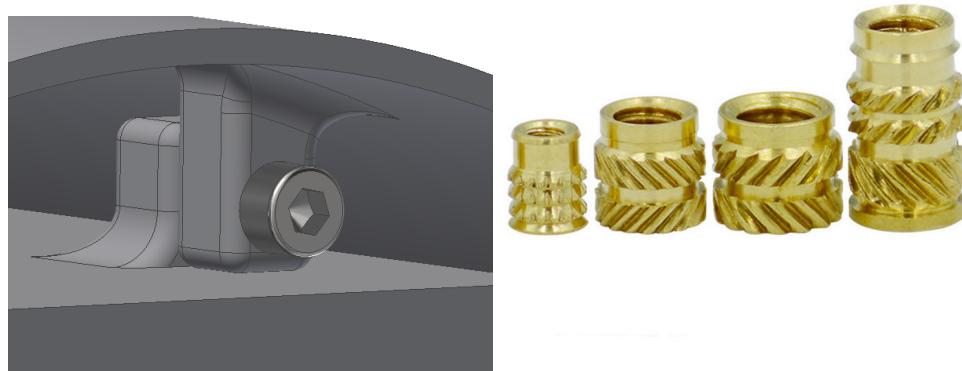


FIGURE 5.17 – Fixation de la casquette et inserts filetés

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.

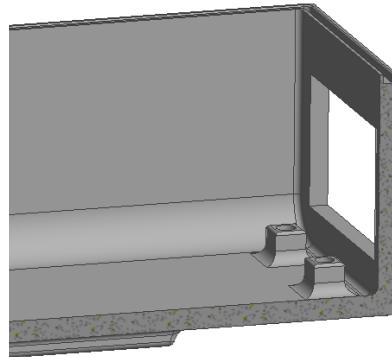


FIGURE 5.18 – Support du module

Fixations des supports

La fixation du bras sera assurée par quatre écrous carrés situé sous le boitier, comme le montre la figure 5.19. Cette solution permet de ne pas à avoir à faire de trous dans le boitier pour maintenir une bonne étanchéité. Les écrous carrés viennent se 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.

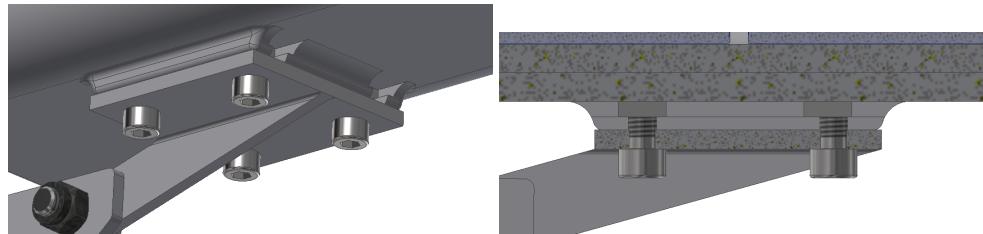


FIGURE 5.19 – Support de fixation du boitier

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 boitier grâce aux quatre plots de fixations situés dans le fond du boitier. 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.

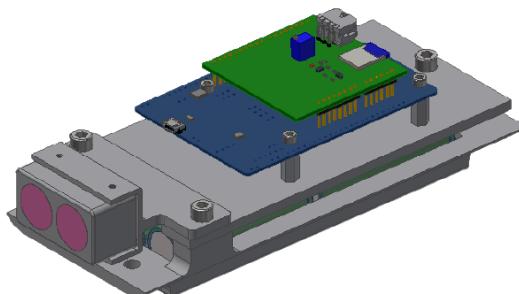


FIGURE 5.20 – Module électronique

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.

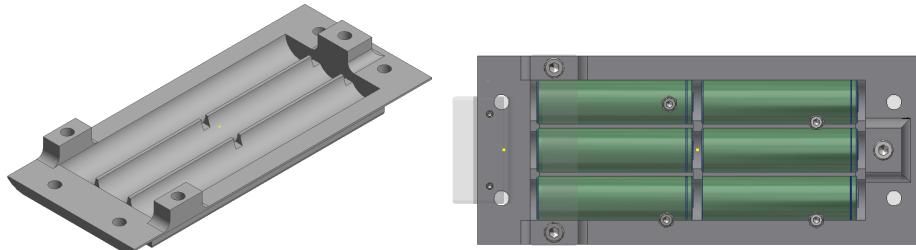


FIGURE 5.21 – Support à batteries

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 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 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.

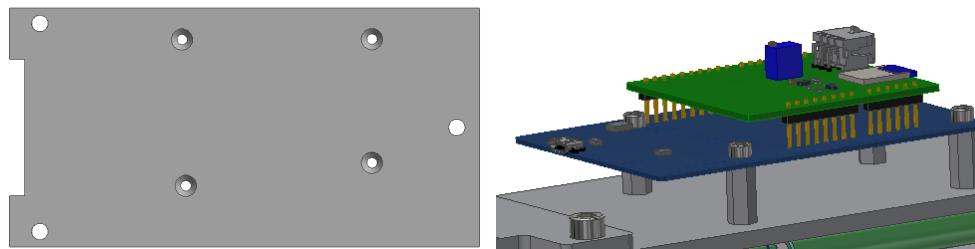


FIGURE 5.22 – Plaque de fixation pour la partie électronique

Support du LiDAR

Le capteur LiDAR ne possède pas de trou de fixation. Seul deux fentes sont disponibles pour venir cliper un support. 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 cela 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.

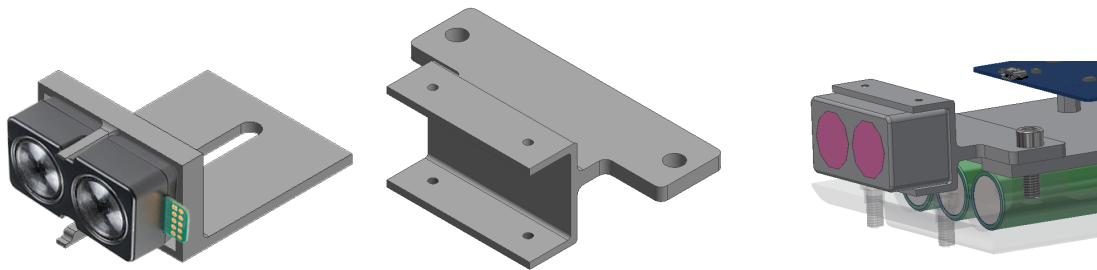


FIGURE 5.23 – Support pour le LiDAR

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 disposition comme les murs ou les lampadaires.

Support du boîtier

Le support du boîtier est une partie rigide en aluminium qui se visse sous le boîtier à l'aide quatre vis. Cette pièce est en deux parties. La première 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. Grâce 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 ajouté 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.

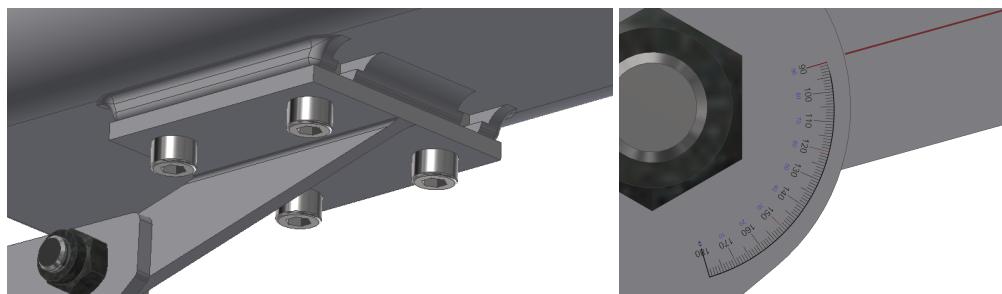


FIGURE 5.24 – Système de réglage de l'élévation

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 collés 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.

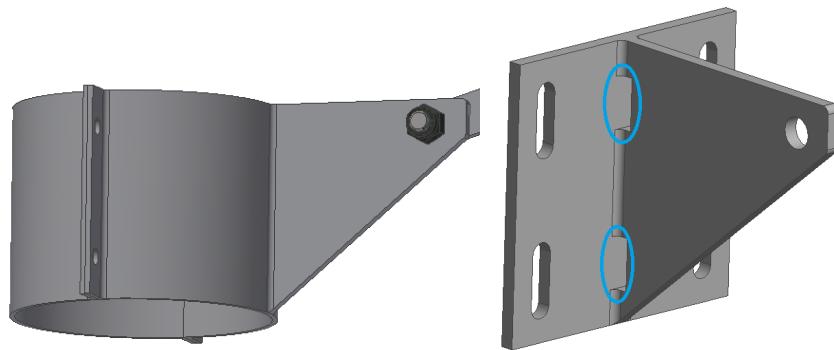


FIGURE 5.25 – Support de fixation tubulaire et mural

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 correspondent à la réalité, il a fallu tester le capteur en condition réelle. Cependant les chutes de neiges sont difficilement prévisibles. Comme 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 convainquant, une attache plastique a été ajouté pour augmenter la force de pincement des clips. Une autre fixation permet de visser le boîtier sur un trépied. La figure 5.26 montre le boîtier temporaire ainsi que sa fixation.

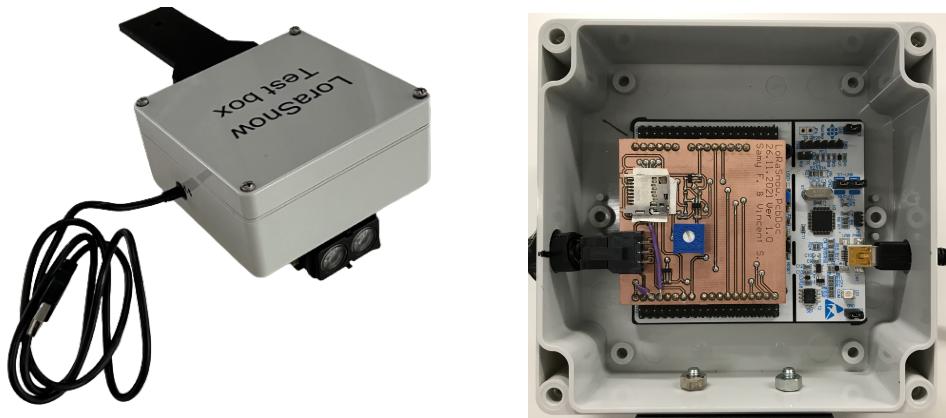


FIGURE 5.26 – LoRaSnow Testbox, intérieur et extérieur

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.

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

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 Computer Vision

La *Computer Vision* qui devait initialement servir plutôt de redondance au *LiDAR* fournit finalement des résultats très suprenants avec des algorithmes très simples.

La mesure du débit de chutes de neige est fonctionnelle, bien que perfectible avec des données météos précises.

La détection de route enneigée est une réussite, l'algorithme est très simple et peut fonctionner sur un processeur rudimentaire. Elle fournit une mesure très importante et le fait à la perfection.

La vision par ordinateur permet donc de palier parfaitement aux problèmes du *LiDAR*, c'est à dire : les mesures durant la journée, et les erreurs liées à la mesure sur un point (p. ex : pierre sur le point de mesure).

Si on imaginait un système encore plus simpliste, la *Computer Vision* pourrait être le seul outil de mesure.

6.2.1 Problèmes rencontrés

Caméra

Au départ, pour tester rapidement l'idée de la mesure de débit, nous avions imaginés filmer notre session de mesure avec un ordinateur, puis comparer les données de bruit du *LiDAR* avec le débit estimé par la caméra. Hors les webcams utilisées n'avaient pas de possibilités de désactivation de l'autofocus, du réglage automatique du diaphragme et rendaient les vidéos capturées inutilisables.

Il a donc été primordial de récupérer des données d'une caméra bien plus fiable, et sur le terrain. Nous remercions encore une fois Dr. Mudry Pierre-André et M. Matter Fabien de nous avoir donné l'accès aux vidéos de la caméra du projet parent *VibroSnow*/**VibroSnow**.

Données météos

Une demande d'accès aux données de *MeteoSwiss* a été visée et signée par M. Cyril Bezençon et transmise par la poste vers *MeteoSwiss*. Cependant l'autorisation a tardé à arriver et les données météos n'ont pas pu être utilisées pour améliorer la reconnaissance du débit de chute de neige.

6.3 Mécanique

Grâce 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 travail des autres usagers de la salle.

Différents designs de boîtier ont été imaginés avant d'arriver à la solution finale. L'étanchéité fut la partie plus problématique lors de la conception. L'utilisation de joints toriques pincés a permis de résoudre ces problèmes. L'ABS étant une matière très simple à injecter, la fabrication des pièces du boîtier serait corolaire. Le support du boîtier offre l'occasion de régler à la fois l'élévation et l'azimut du boîtier. 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 boîtier 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.

Deuxième partie

Gestion

7 Résumé

7.1 Idée commerciale

LoRaSnow est une solution autonome de détection de hauteur de neige. Il arrive parfois que les routes mettent du temps à être déneigées, ou que le salage soit trop faible, conduisant à une chaussée glissante et dangereuse. De plus, une répartition inhomogène du manteau neigeux sur une région peut rendre la tâche compliquée, surtout en montagne. LoRaSnow apporte un monitoring constant des niveaux de neige sur la route et du débit de neige à des points clés ainsi que les possibilités de verglas.

Grâce à un réseau de capteurs sur une région, il devient possible d'optimiser la courses des chasses-neige et de cibler les axes en plus grandes difficultés, de même que d'offrir l'opportunité d'effectuer des salages préventifs, avant que du verglas ne se forme.

Se présentant sous forme d'abonnement annuel, il suffit au client de souscrire et de bénéficier d'un service de surveillance des routes. Le client n'aura pas à se soucier d'éventuelles pannes, installations et infrastructures, tout est compris dans l'abonnement.

7.2 Domaine d'activité

Le domaine d'activité principal est la détection de hauteur de neige sur route de montagne.

7.3 Marché

Des communes, comme Ayent, ont manifesté leur intérêt pour une solution de détection du niveau de neige sur route. Des entreprises privées de déneigement bénéficieraient de LoRaSnow pour optimiser leur service de déneigement et améliorer la qualité du service fourni.

Pour lancer le produit, il faudra d'abord cibler les communes avec stations de ski, qui ont plus de moyens et de raisons de se tourner vers l'innovation.

7.4 Analyse des risques

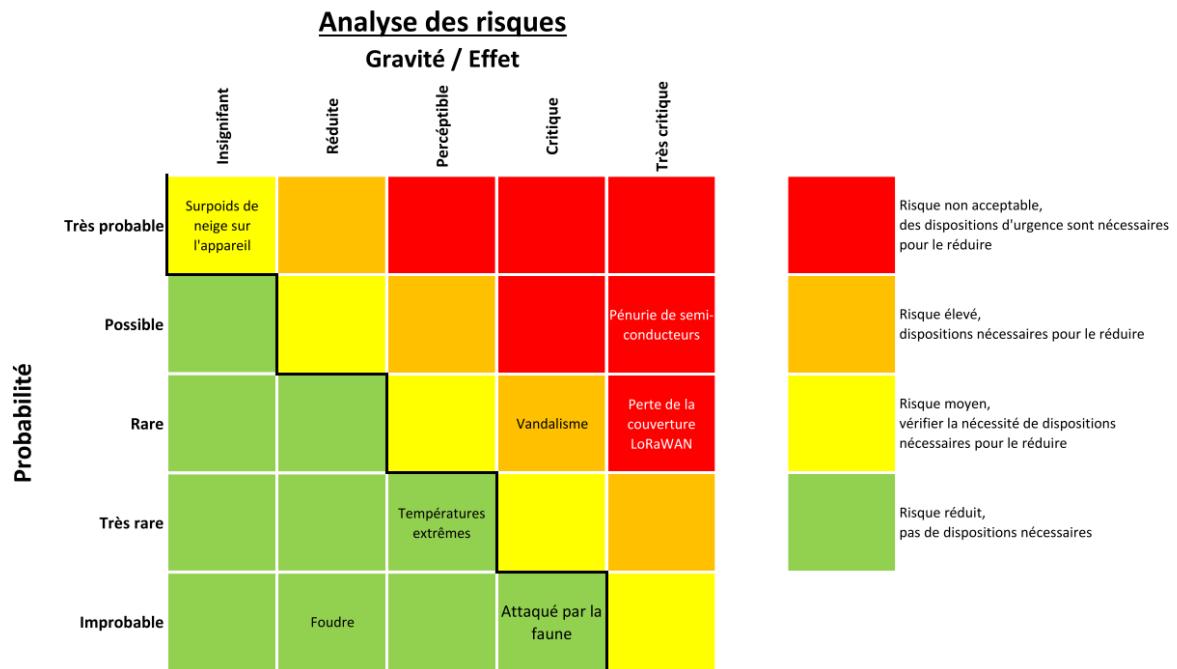


FIGURE 7.1 – Analyse des risques

Il est possible qu'une installation soit endommagée ou détruite par la faune, l'environnement ou par un simple vandale. Les causes naturelles sont trop improbables pour être considérées. Le vandalisme sera paré par des installations très discrètes : afin d'éviter que les automobilistes ne s'arrêtent, pensant qu'il s'agit d'un nouveau radar de la police et le vandalisant en conséquence. Une assurance est également à prévoir si une installation discrète n'est pas possible.

L'appareil étant prévu pour effectuer des mesures exposé aux précipitations, il va inévitablement se trouver couvert d'une grande couche de neige. La casquette du boîtier permet d'éviter l'enneigement de la vitre et le montage du boîtier est suffisamment solide pour supporter de fortes charges, rendant ce risque insignifiant.

Il faut prévoir une redondance pour le réseau LoRaWAN. Une panne des passerelles n'est pas impossible, et si cela arrive, tous les appareils dans la nature ne pourraient plus transmettre leurs données. Il faut donc toujours avoir un minimum de 3 appareils qui couvrent une région afin d'éviter une perte de couverture.

La pénurie de semi-conducteurs persiste et pourrait s'éterniser. Pour éviter de ne pas pouvoir respecter les commandes des clients, il pourrait être préférable d'attendre quelques années avant d'envisager l'industrialisation et commercialisation du projet.

8 Produits et services

8.1 Description du produit

LoRaSnow est un projet pilote de détection de hauteur de neige sur route, de débit de chute de neige ainsi que des risques de verglas. L'objectif est de fournir une solution de monitoring de l'état d'un segment de route. Implémenter un réseau de modules LoRaSnow permettrait donc de surveiller une région entière et d'offrir une meilleure gestion des ressources lors de la période hivernale, tant bien pour une administration publique que pour une entreprise privée.

LoRaSnow utilise le protocole LoRaWAN pour communiquer les données sur le cloud, permettant ainsi d'être installé n'importe où sans nécessiter d'infrastructure (internet ou électricité) au préalable.

Lorsque la neige commence à tomber, ou qu'une couche importante de neige est présente sur une route, une alerte est transmise au client, lui offrant la possibilité d'être informé de la situation sans devoir être actif devant un terminal. Cela permettrait d'éliminer les besoins de personnel de piquet durant la nuit.

8.2 Détection de hauteur de neige

En utilisant un mélange de solutions lasers et de vision par ordinateur, LoRaSnow permet une détection innovante et efficace de la couche de neige présente sur un segment de route.

8.3 Mesure du débit de chute de neige

Toujours en utilisant la vision par ordinateur, une indication correcte et fiable du débit de chute de neige en temps réel donne des informations sur les chutes de neige sur la région, minimisant les risques de surprises.

8.4 Détection du givre

En intégrant une mesure de l'humidité ainsi qu'une mesure de la température du bitume, couplé aux prévisions météos, LoRaSnow offre une prévision de verglas efficace.

8.5 Pourquoi nous ?

Nous apportons une solution simple et autonome à un problème complexe et inexploré, problème sur lequel nos prédécesseurs n'ont pas trouvé de solution fonctionnelle.

9 Marché et Contexte

9.1 Qui bénéficie du déneigement des routes

Pour comprendre qui compose notre clientèle, il est important de comprendre à qui bénéficie le déneigement des routes.

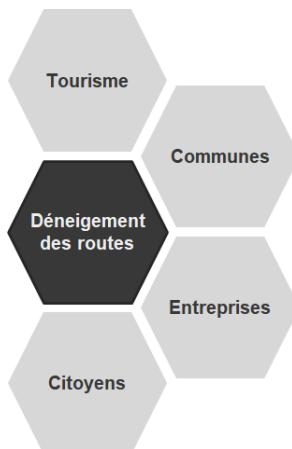


FIGURE 9.1 – Bénéficiaires du déneigement

Tourisme

Si vous êtes en vacances en station, ne pas pouvoir profiter d'une journée à ski car les routes ne sont pas déneigées serait le comble. C'est pourquoi tous les commerces et communes des régions touristiques ont besoin de route impeccables en tout temps.

Communes

Une route déneigée, c'est une route sur laquelle vous évitez des accidents dus à la neige. C'est une route qui ne sera pas bloquée car une voiture est à l'équerre et bloque le car postal. C'est la mission d'une commune d'entretenir ses routes pour assurer la sécurité de ses citoyens.

Entreprises

Un boulanger a besoin de sa livraison tôt le matin. S'il ne l'a pas reçue, il ne pourra pas faire son pain à temps pour ses clients du matin. Il est donc fondamental que la route permette au livreur d'arriver à temps. Un opticien, avec seulement 2 employés, peut se retrouver à ne pas pouvoir ouvrir à l'heure si tout le monde est coincé à cause de la neige.

Citoyens

Personne n'a envie de passer 15 minutes à déneiger sa voiture, pour finalement trouver une route en piteux état.

9.2 Analyse de la clientèle

9.2.1 Communes

Les administrations publiques verront en ce projet la possibilité de superviser un territoire parfois compliqué (par exemple, les fonds de vallée, routes de montagnes, etc...) et d'efficacement déneiger ou saler afin que la chaussée soit prête à accueillir des automobilistes dès que possible. Par exemple, la commune d'Ayent, étant très vaste et possédant des zones où l'accès est compliqué, fait face au problème de la répartition inhomogène des chutes de neige. Durant la nuit, il est donc contraignant d'envoyer quelqu'un contrôler chaque zone. Des allers-retours inutiles peuvent être évités grâce à un réseau de capteurs. De plus, malgré la mise en place de personnel de piquet, il est possible d'être surpris par des chutes de neige non annoncées par la météo.

9.2.2 Entreprise privée

De nombreuses entreprises fournissent des services de déneigement pour particuliers. Installer des capteurs chez les clients (par exemple devant un boulanger), permettrait de mieux planifier le déneigement, et ainsi d'améliorer la qualité du service offert aux particuliers. Notre solution permet également de minimiser les temps de sortie des véhicules, et ainsi réaliser des économies. Intégrer à tous leurs clients, LoRaSnow donnera une vue d'ensemble de l'état des routes de leurs clients, optimisant par la même occasion leur parcours.

9.3 Analyse du marché

9.3.1 Demande

La demande pour une telle solution est déjà présente, notamment en Valais. La commune d'Ayent a déjà fait savoir son intérêt pour ce type de détection.

9.3.2 Offres présentes sur le marché

Actuellement, aucune offre comparable directement avec la nôtre n'est disponible.

9.4 Analyse des partenaires

9.4.1 Eurocircuit

Eurocircuit, leader européen dans la production de circuits imprimés sur mesures, partenaire de choix pour la réalisation de produits électronique. À noter que ce partenaire propose aussi un service de montage électronique, ce qui nous permet de faire sous-traiter cette partie compliquée pour un coût plus faible qu'en Suisse.

9.4.2 Pfefferlé Sion

Pfefferlé serait notre fournisseur de visserie et autre quincaillerie (p. ex : la grenouillère du boîtier). Leur proximité est un avantage pour réduire les coûts et alimenter l'économie locale.

9.4.3 Protolabs

Protolabs est un fabricant de moule à injection plastique. Il offre la possibilité de fabriquer des moules pour des petites productions (env. 1000 unités). C'est un partenaire très important pour assurer une production de boîtier bon marché et fiable.

9.4.4 Boschung

Boschung est une entreprise spécialisée dans les solutions de surveillance des routes et notamment du déneigement. Ils proposent déjà un système de détection de verglas sur les routes, mais sont relativement chers. Nous pourrions collaborer afin de proposer nos solutions pour améliorer leurs gammes de produits.

9.5 Analyse de la concurrence

9.5.1 Boschung

Boschung, bien qu'un potentiel allié stratégique, pourrait devenir notre concurrent principal. La détection de neige sur route est un domaine dans lequel ils cherchent à s'implanter. De plus, ils possèdent un carnet de clients bien fourni et un savoir-faire très développé.

9.5.2 Population de la région

Certaines régions, notamment la région de Vex/Veysonnaz, jouissent d'un excellent réseau d'alerte citoyenne. Plusieurs résidents sont des lève-tôt et alertent donc automatiquement les services communaux ou privés de déneigement. De telles régions n'ont donc aucun intérêt à utiliser notre solution, car une solution est déjà présente et fait ses preuves chaque année.

10 Stratégie

10.1 Analyse SWOT

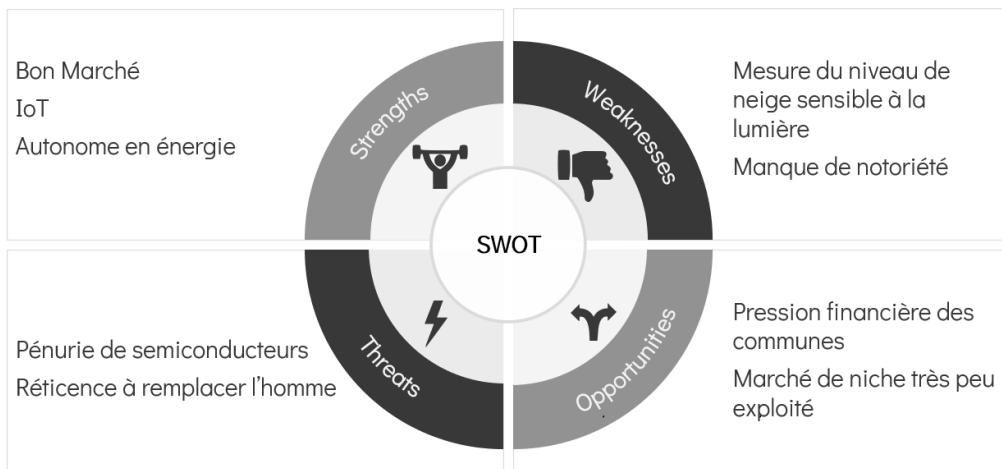


FIGURE 10.1 – Analyse SWOT

10.1.1 Forces

La recherche étant réalisée par des étudiants et les composants du produit étant bon marché, nous sommes capables de maintenir un coût bas pour un éventuel produit.

10.1.2 Avantage pour le client

Notre principal avantage est le prix. Même si un concurrent comme Boschung se présente, intégrer un réseau complet de capteur sera beaucoup moins cher avec notre solution, tout en offrant une qualité excellente.

La système étant IoT et fonctionnant sur batterie, il ne nécessite pas d'infrastructure spécifique pour fonctionner. Il peut donc être installé n'importe où, à condition d'avoir une réception LoRaWAN.

10.1.3 Faiblesses

La principale faiblesse dans notre développement, réside dans le fait que le LiDAR utilisé pour mesurer la hauteur de neige ne fonctionne pas durant la journée. Cependant, la surveillance des routes durant la journée n'est pas un problème et le système remplace principalement les piquets durant la nuit.

Étant donné que nous sommes 3 étudiants, nous n'avons pour le moment aucune notoriété dans le milieu et nous n'avons pas pu faire preuve de nos compétences. Les clients potentiels risquent de se montrer méfiant à l'égard de notre produit au départ.

10.1.4 Menaces

La principale menace actuelle est la pénurie de semi-conducteurs. Si cette pénurie perdure notre projet ne pourra pas se développer convenablement.

Une autre menace est la réticence à remplacer l'homme. Certaines régions comme Vex/Veysonnaz jouissent actuellement d'un réseau de surveillance citoyenne efficace et ces régions ne verrait pas l'intérêt d'utiliser notre produit.

10.1.5 Opportunités

La pression financière exercée sur les communes nous permettrait de s'implémenter rapidement sur le marché. Par exemple, la ville de Sion a décidé de se séparer des services d'une entreprise durant l'hiver 2021/2022 pour économiser. La commune d'Ayent dépense 500'000CHF chaque année pour le déneigement et elle ne compte que 5'000 habitants.

De plus ce marché n'a encore été exploré. C'est donc un marché de niche sans concurrence.

10.1.6 Analyse

Pour obtenir de meilleurs résultats sur le marché, nous décidons de mettre en avant les points suivants :

Bon marché - Pression financière des communes

La pression financière des communes les orientera plus facilement vers des solutions bon marché.

Réticence à remplacer l'homme - Pression financière des communes

Bien que la réticence à remplacer l'homme soit présente, surtout en Valais, la pression financière des communes va doucement amener à supprimer le travail pénible et couteux des personnes de piquet.

Marché de niche - Faible notoriété

Ne pas avoir de notoriété dans un marché bien rempli est problématique. Dans un marché de niche tout est possible. Le fait d'être les pionniers sur ce marché palierait à notre faible notoriété.

10.2 Stratégie adoptée

La stratégie adoptée pour une potentielle commercialisation du produit se ferait ainsi :

- LoRaSnow en format abonnement, tout inclus
- Le client paie une fois par année, tout le reste est pris en charge par nos soins
- Prix de départ de l'abonnement : 3'000CHF par appareil par année
- Réduction sur les abonnements par achat groupé :
 - 10 appareils : 28'000CHF/an
 - 20 appareils : 55'000CHF/an
 - ...

Cette stratégie appuie bien sur le fait de rester bon marché. Le format abonnement diminue le prix direct de l'appareil pour le client.

De plus, ce format permet au client de ne pas avoir à se soucier de quoi que ce soit et d'avoir simplement un produit qui fonctionne.

11 Mesures

11.1 Marketing

11.1.1 Tarifs

Les tarifs pour les abonnements sont les suivants :

- 1 appareil : 3'000CHF/an
- 10 appareils : 28'000CHF/an
- 20 appareils : 55'000CHF/an

11.1.2 Canaux

Publicité du produit

Afin de faire connaître notre produit, nous allons nous baser sur trois méthodes :

- Bouche à oreille -> Proposer la solution à une commune et faire parler de notre réussite.
- Marketing ciblé -> Se présenter à des salons industriels et technologiques, montrer des exemples fonctionnels et parler de clients utilisant notre projet.
- Site web -> Présenter des vidéos de démonstrations, proposer un site en libre accès avec des données de capteurs en direct.

11.2 Infrastructure

11.2.1 Serveurs et LoRaWAN

Des serveurs d'acquisition de données seront mis en place, et des Gateway LoRaWAN seront installées dans les régions où nos clients se situent.

11.2.2 Site web

Un site web devra être maintenu et mis à jour pour toujours fournir des informations actuelles aux potentiels clients.

11.2.3 Service client

Nous aurons notre propre monitoring de tous les appareils, offrant un service client *invisible*, qui verra ses appareils défectueux remplacés sans demande.

11.3 Ressources humaines

11.3.1 R&D

Trois ingénieurs seront présents jusqu'à la fin de la première année d'implémentation du projet pour développer et optimiser LoRaSnow.

11.3.2 Service client

Un technicien est nécessaire pour la fabrication, l'installation et la maintenance des appareils. Un secrétaire est prévu pour gérer les comptes de l'entreprise ainsi que le service client.

12 Finances

12.1 Planification des coûts

Les coûts liés au projet sont les suivants :

- Trois ingénieurs à 110[CHF/heure]
- Un secrétaire à 60[CHF/heure]
- Un technicien à 80[CHF/heure]
- Un coût unitaire de fabrication à 191,44CHF :
 - Le circuit imprimé à 9.80CHF
 - Les composants pour un total de 84,52CHF
 - Un boîtier mécanique en plastique moulé à 97,12[CHF]
- Des coûts de Marketing liés aux déplacements, à la publicité ciblée
- Des coûts liés au site web ainsi qu'aux serveurs d'acquisition

12.2 Bilan prévisionnel

Un bilan prévisionnel sur 3 ans a été réalisé par trimestre. Dans le pire des cas où le projet serait un échec total, une perte de 500'000[CHF] est prévue. Dans un bon cas, en louant 100 unités à la fin de la 3e année, et que le développement est complet, les coûts sont amortis. Une rentabilité sur 5 ans est envisageable. Le bilan prévisionnel détaillé est disponible en annexeB.

12.3 Plan de liquidité

Un somme de base de 675'000[CHF] est nécessaire pour industrialiser entièrement la solution. Cette somme peut provenir d'un partenaire éventuel ou d'un investisseur.

13 Conclusion

13.1 Bilan

Beaucoup d'étapes ont été réalisées afin d'atteindre le but fixé pour ce projet pilote, c'est-à-dire mesurer une hauteur de neige dans des conditions difficiles. Au fur et à mesure de l'avancement de LoRaSnow, nous nous sommes rendu compte de la vraie signification de *conditions difficiles*. En effet, faire fonctionner des systèmes dans un froid glacial, du vent et de la neige est un défi qui demande des ressources et de l'imagination.

Nous sommes finalement arrivés avec deux solutions complémentaires ; l'une mesurant directement une hauteur de neige et l'autre mesurant des débits ainsi que l'état de la route. Cette redondance apporte une fiabilité supplémentaire. De plus, une conception mécanique astucieuse permet une protection efficace des éléments électroniques.

Une bonne gestion du planning a été réalisée. En effet, malgré un léger retard dans la partie recherche, nous avons réussi à gagner une certaine avance dans les autres tâches, ce qui nous a permis de se concentrer sur des détails pour notamment peaufiner les tests en extérieur. On retrouve les plannings prévus et réalisés à l'annexe A.

Il reste cependant encore une longue route avant la commercialisation d'un tel produit. En effet, ce projet pilote doit servir de base pour de futurs améliorations, visant on l'espère, à un projet abouti. Une analyse préalable du marché et des opportunités a d'ailleurs été effectuée. Cela nous a permis de voir au-delà du simple projet technique, en nous projetant dans le monde de la gestion de projet.

Finalement, nous nous sommes beaucoup investis dans ce défi, même hors du cadre du projet pilote. De nombreuses heures ont été consacrées à trouver des solutions innovantes et intelligentes. Nous pouvons sans aucun doute dire que nous sommes ressortis enrichis de cette expérience.

13.2 Signatures

24 janvier 2022

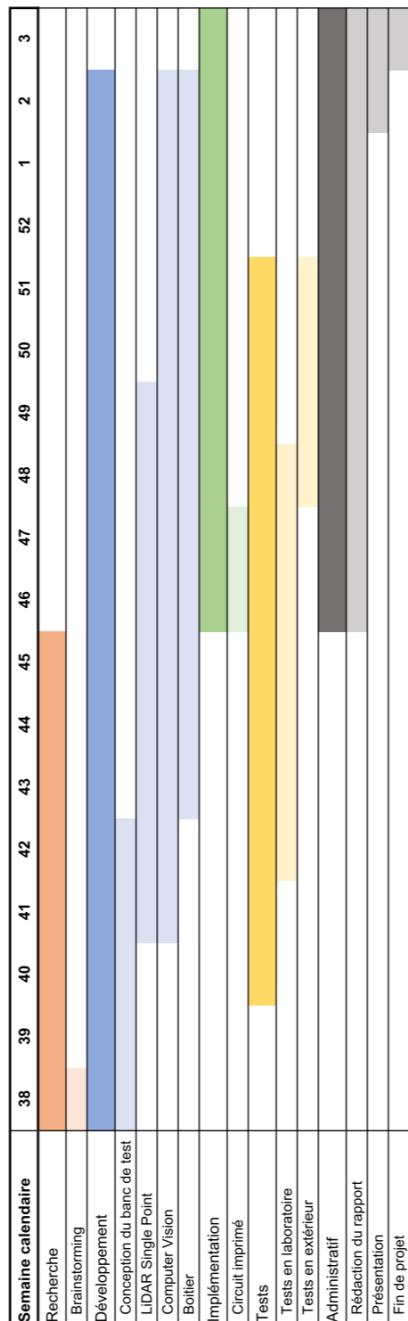
Vincent Savioz

Samy Francelet

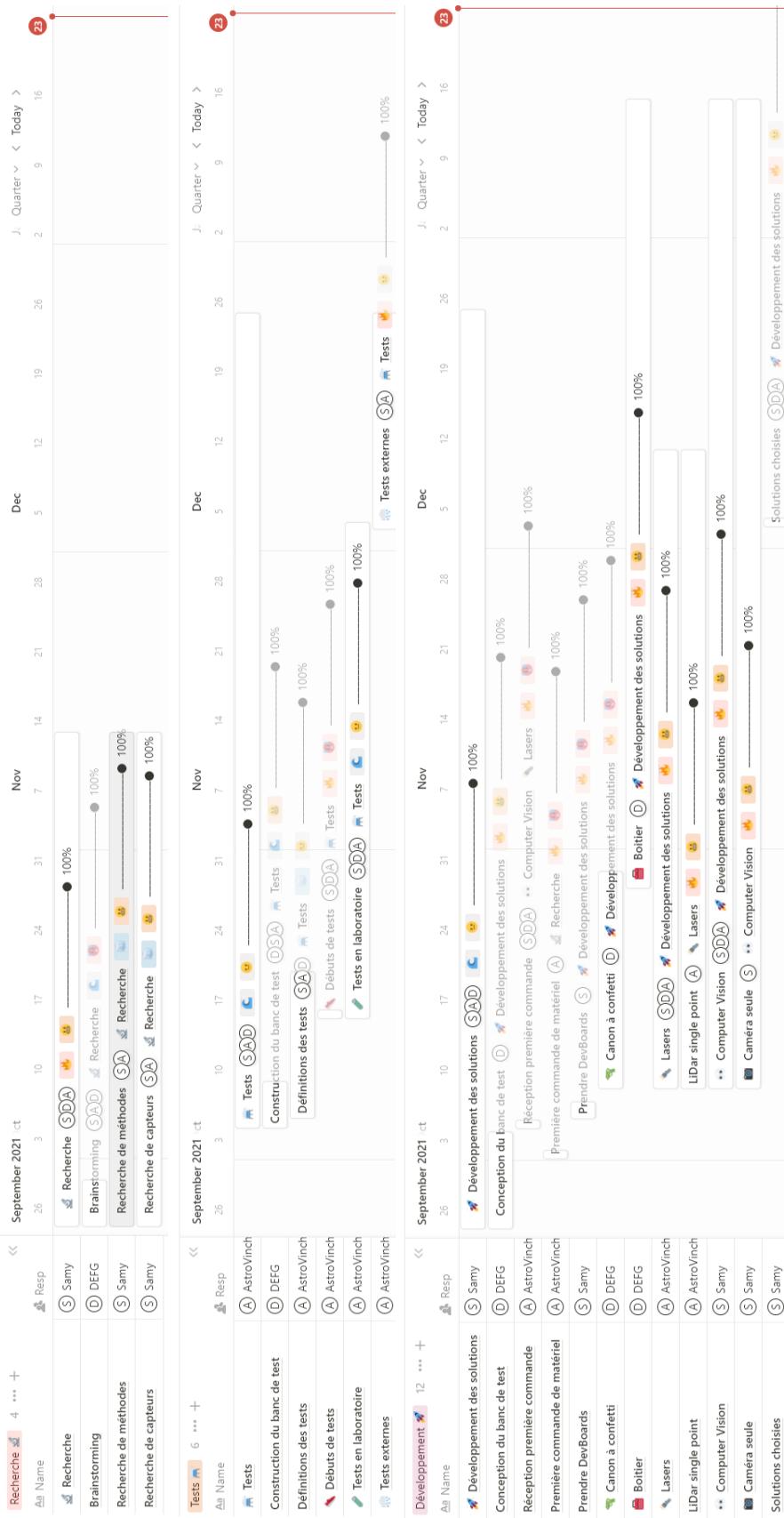
Gabriel Deferr

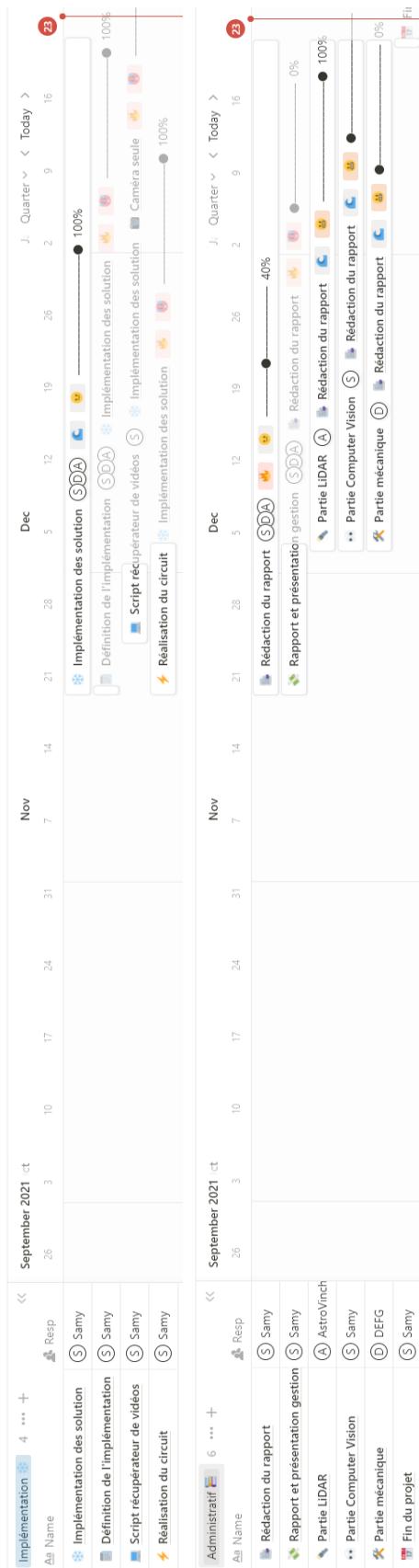
A Planning

A.1 Planning prévisionnel



A.2 Planning réalisé





B Bilan prévisionnel

B.1 Prix et coûts

Engineers	3	Work hours	8
Engineers cost [CHF/hours]	110,00 CHF	PGA work days	1
Secretaries	1	Work days	5
Secretaries cost [CHF/hours]	60,00 CHF	Week/quarter	16
Technicians	1	PGA [Hours/quarter]	128
Technicians cost [CHF/hours]	80,00 CHF	Full time [Hours/quarter]	640
Unit subscription [CHF/year]	3 000,00 CHF	Half time [Hours/quarter]	320
Unit manufacturing costs [CHF/year]	191,44 CHF	30% time [Hours/quarter]	192
Unit installation costs	120,00 CHF		
Unit total costs	311,44 CHF		
Unit maintenance costs	500,00 CHF		
Manufacturing costs detail			
Case	97,12 CHF		
Electronics			
PCB with components	9,80 CHF		
Sensor	70,00 CHF		
Batteries 6x	14,52 CHF		
Total unit price:	191,44 CHF		

Estimation moules	5k et 10k 1000 ex	Fourniture			
Désignation pièce	prix	Désignation	quantité	prix unitaire	prix
Fond boîtier	10 000,00 CHF	ABS (kg)	1600	3,20 CHF	5 120,00 CHF
Couvercle boîtier	10 000,00 CHF	Plaque	1000	2,00 CHF	2 000,00 CHF
Casquette	8 000,00 CHF	Vis	1000	5,00 CHF	5 000,00 CHF
Capot vitre	5 000,00 CHF	Grenouillère	1000	10,00 CHF	10 000,00 CHF
Support batterie	10 000,00 CHF	Tube	1000	2,00 CHF	2 000,00 CHF
Support Lidar	7 000,00 CHF	Collier	1000	15,00 CHF	15 000,00 CHF
		Vitre	1000	8,00 CHF	8 000,00 CHF
Total :	50 000,00 CHF				47 120,00 CHF
Estimated case price	97,12 CHF				

B.2 Budgets et bilans

B.2.1 Base case

Year	2021	2022	2023	2024
Quarter	Q3	Q4	Q1	Q2
Units solds	0	0	30	5
Total solds	0	0	30	35
Subscriptions	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Total revenues	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Units costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Units maintenance	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Engineering costs	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	105 600,00 CHF	105 600,00 CHF
Secretaries costs	- CHF	- CHF	11 520,00 CHF	19 200,00 CHF
Technicians costs	- CHF	- CHF	25 600,00 CHF	25 600,00 CHF
Marketing	- CHF	- CHF	2 000,00 CHF	300,00 CHF
Website	- CHF	- CHF	2 000,00 CHF	200,00 CHF
Total costs	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	105 600,00 CHF	110 217,20 CHF
Balance	- 42 240,00 CHF	- 84 480,00 CHF	- 126 720,00 CHF	- 232 320,00 CHF - 388 383,20 CHF - 393 600,40 CHF - 502 060,40 CHF - 589 400,40 CHF - 686 783,60 CHF - 591 767,20 CHF - 650 947,20 CHF - 710 127,20 CHF - 779 350,40 CHF - 571 917,20 CHF

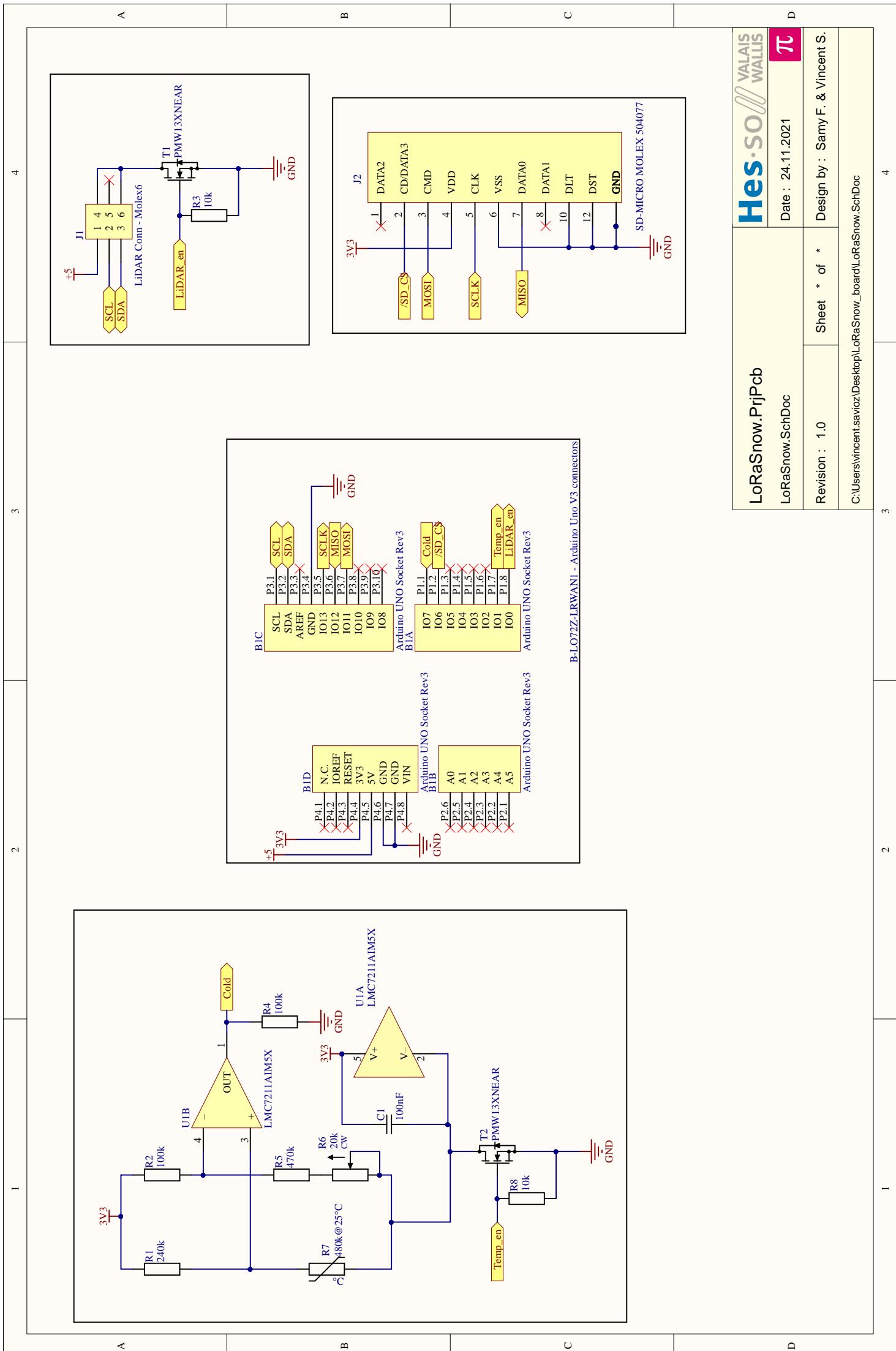
B.2.2 Worst case

Year	2021	2022	2023	2024						
Quarter	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Units solds	0	0	0	30	5	0	0	0	0	0
Total solds	0	0	0	30	35	0	0	0	0	0
Subscriptions	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105 000,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Total revenues	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105 000,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Units costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	9 343,20 CHF	1 557,20 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Units maintenance	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105 600,00 CHF	63 360,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Engineering costs	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	11 520,00 CHF	19 200,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Secretaries costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	25 600,00 CHF	25 600,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Technicians costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	300,00 CHF	2 000,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Marketing	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	2 000,00 CHF	2 000,00 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Website	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	108 460,00 CHF	110 217,20 CHF	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF
Total costs	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	42 240,00 CHF	156 063,20 CHF	502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF
Balance	- 42 240,00 CHF	- 84 480,00 CHF	- 126 720,00 CHF	- 232 320,00 CHF	388 383,20 CHF	393 600,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF	- 502 060,40 CHF
							Fin d'activité			
							Produit ne plait pas			

B.2.3 Best case

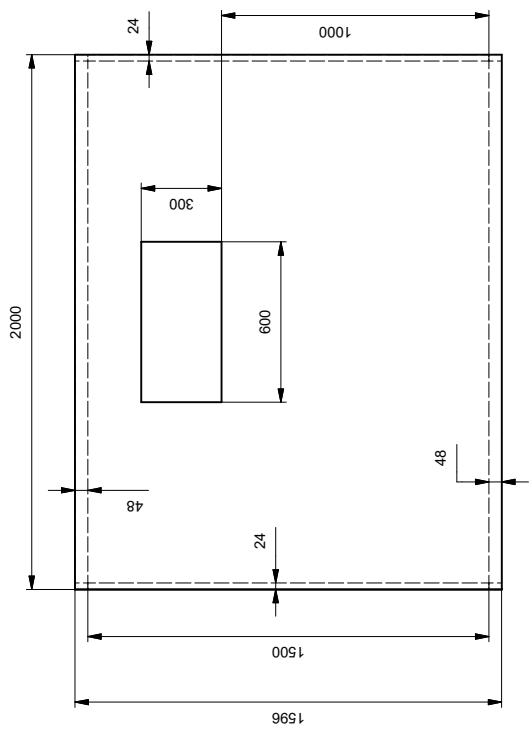
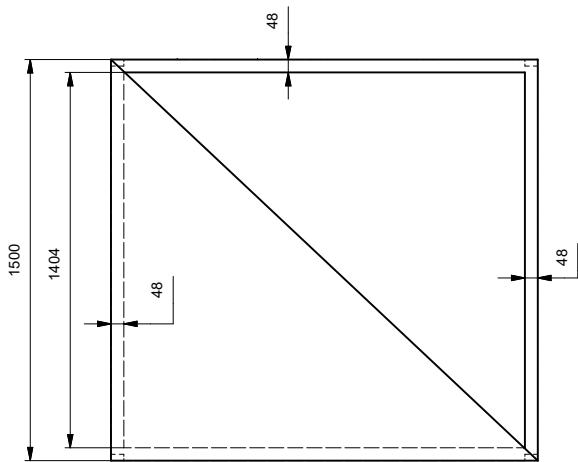
Year	2021	2022	2023	2024						
Quarter	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Units solds	0	0	0	0	30	5	0	0	0	0
Total solds	0	0	0	0	30	35	35	35	35	35
Subscriptions	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105'000,00 CHF	- CHF	- CHF	420'000,00 CHF	- CHF	- CHF
Total revenues	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105'000,00 CHF	- CHF	- CHF	420'000,00 CHF	- CHF	- CHF
Units costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	9'343,30 CHF	1'587,20 CHF	- CHF	28'029,60 CHF	4'671,60 CHF	- CHF
Units maintenance	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	105'600,00 CHF	105'600,00 CHF	- CHF	12'443,60 CHF	- CHF	- CHF
Engineering costs	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	63'360,00 CHF	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	14'080,00 CHF	14'080,00 CHF	18'186,80 CHF
Secretaries costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	11'520,00 CHF	19'200,00 CHF				
Technicians costs	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	25'600,00 CHF	25'600,00 CHF	25'600,00 CHF	25'600,00 CHF	25'600,00 CHF	25'600,00 CHF
Marketing	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	2'000,00 CHF	300,00 CHF	1'000,00 CHF	300,00 CHF	300,00 CHF	1'000,00 CHF
Website	- CHF	- CHF	- CHF	- CHF	2'000,00 CHF	200,00 CHF	- CHF	200,00 CHF	- CHF	- CHF
Total costs	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	42'240,00 CHF	105'600,00 CHF	156'063,20 CHF	110'217,20 CHF	108'460,00 CHF	87'340,00 CHF	116'069,60 CHF
Balance	- 42'240,00 CHF	- 84'480,00 CHF	- 126'720,00 CHF	- 126'720,00 CHF	- 388'383,20 CHF	- 232'320,00 CHF	- 393'600,40 CHF	- 502'060,40 CHF	- 589'400,40 CHF	- 705'470,00 CHF
										- 449'305,20 CHF
										- 508'485,20 CHF
										- 587'051,60 CHF
										- 64'618,40 CHF

C Schéma électronique

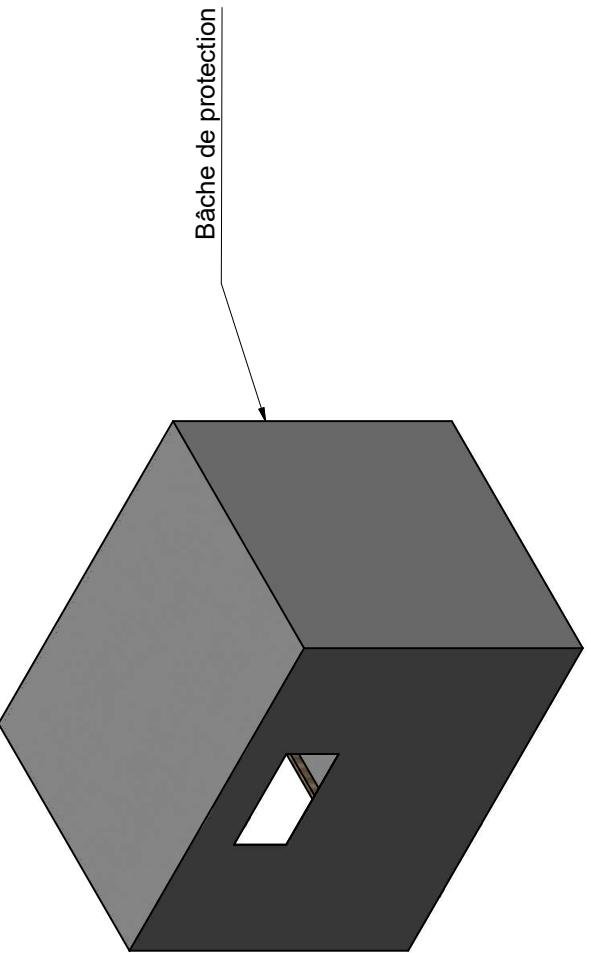


D Mises en plan

Section des planches : 48 mm x 24 mm



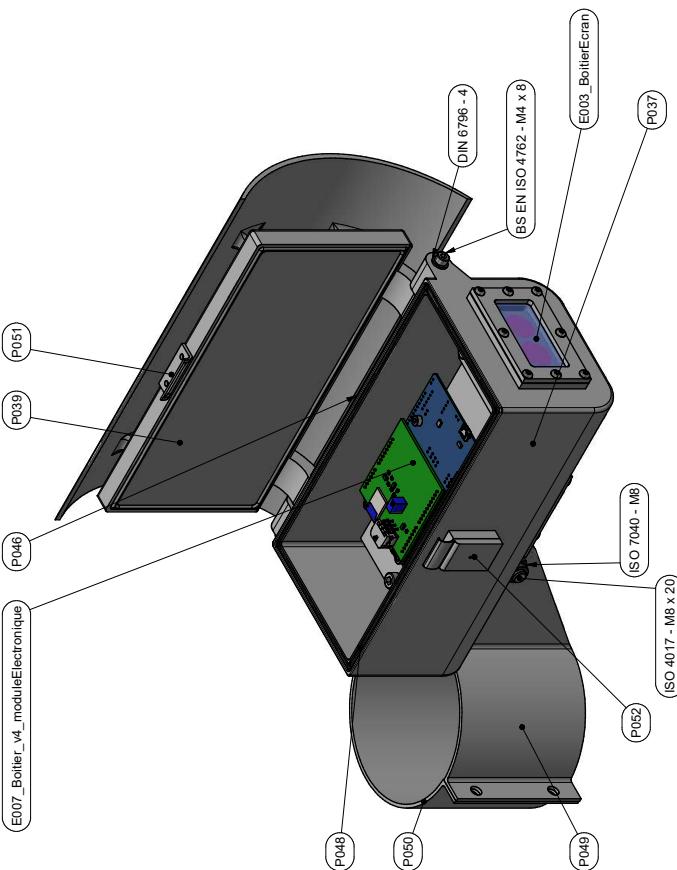
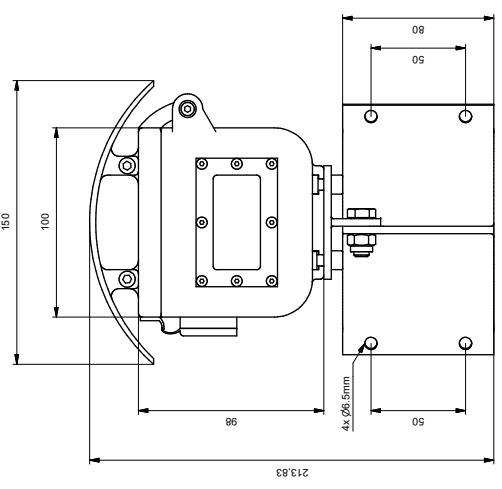
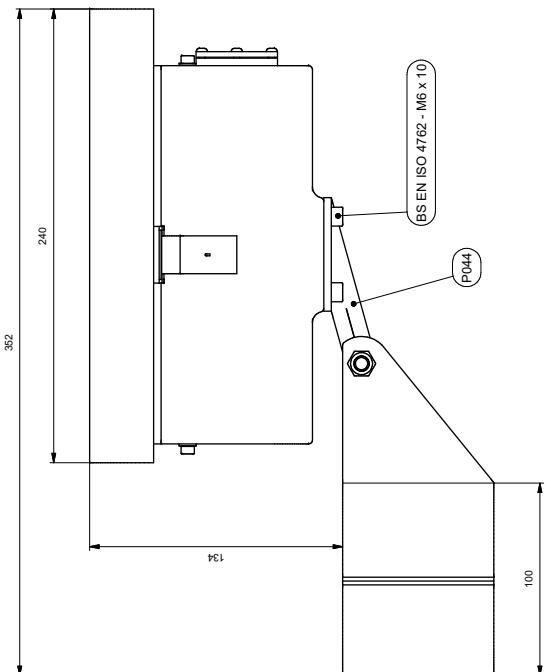
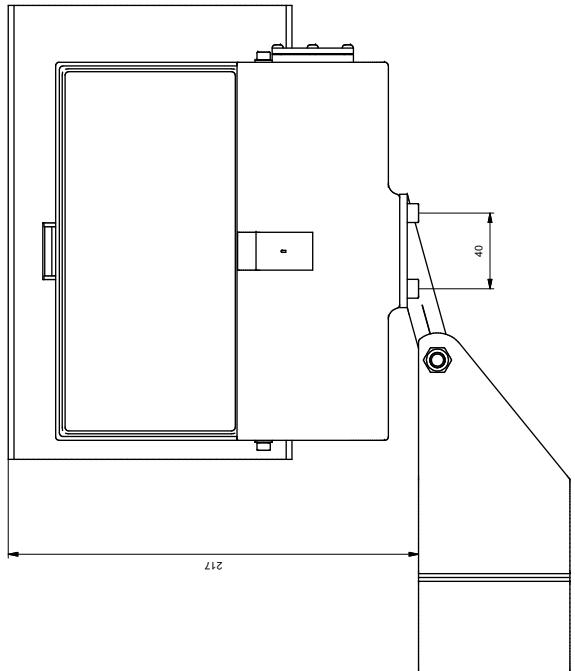
vue ombrée échelle 1:25



Bâche de protection

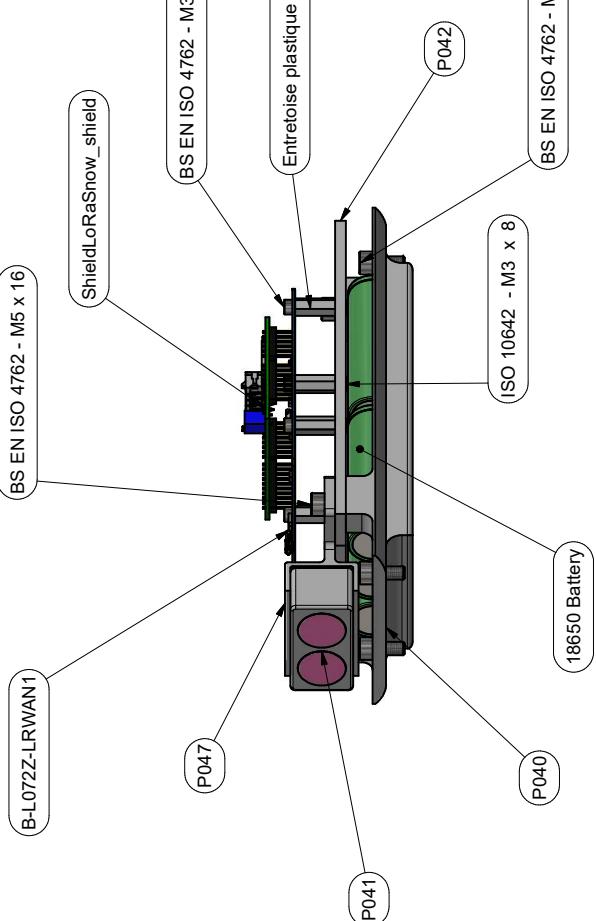
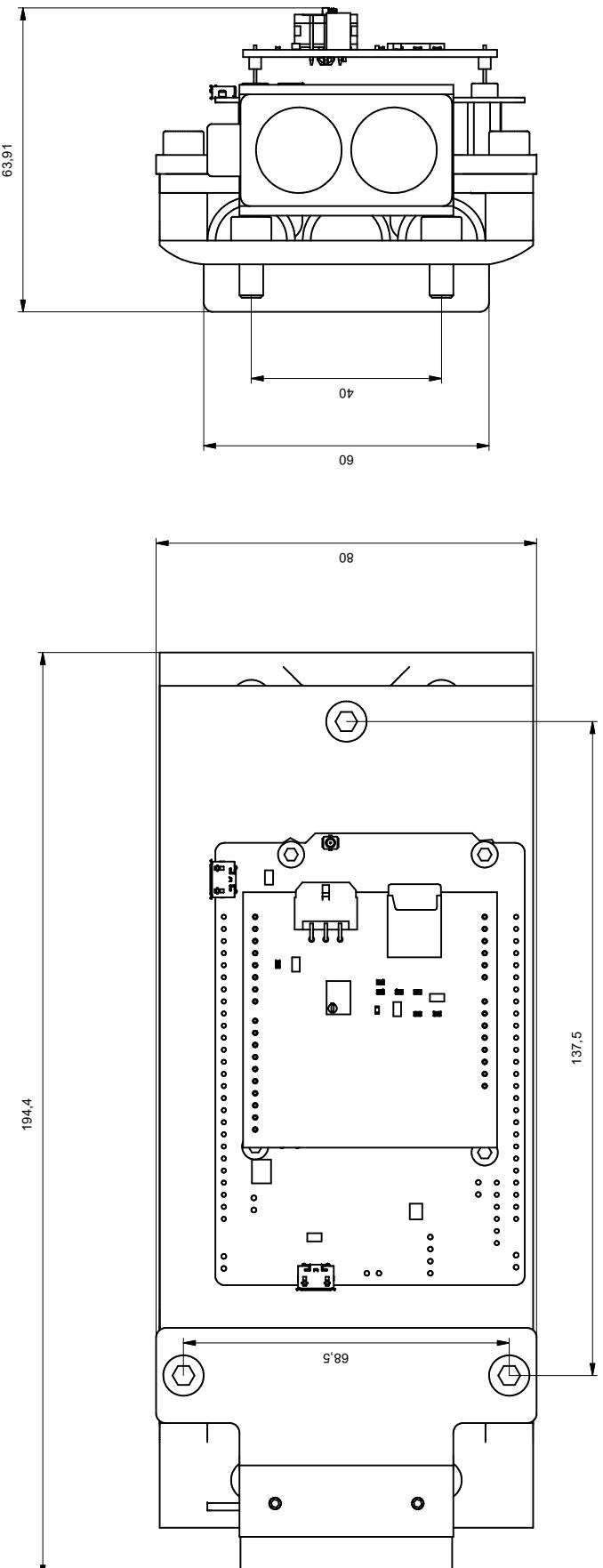
P004

No./Num.	P004		No. de Projet/Projectnummer:
Titre/Titel	Projet LoraSnow	Dessiné/Gezeichnet	22.01.2022
Sous-titre/Untertitel	Cage de test	Contôle/Gekritzt	Echelle/Maßstab
		Revision/Aenderung	1 : 20
Hes-SO // VALAIS WALLIS	Refer to protection notice ISO-16016	Materiel/Rohstoff:	Feuille/Blaatt
		Masse/Gewicht:	1/1
		13.663 kg	A3



P045	1	Aluminium Steel, Mild		Support mural Spare Nut	
AS 147-1 - M6 P050	4	Aluminium Geneic		Pontet de fixation Pontet de fixation	
P049	1	Ceramic/Gummi		Joint d'écoulement Joint d'écoulement	
P048	1	Steel, Mild		Hexagon Socket Head Hexagon Socket Head	
BS EN ISO 4762 - M6 x 8	2				
BS EN ISO 4762 - M6 x 10	4	Steel, Mild			
BS EN ISO 4762 - M5 x 16	4	Steel, Mild		Hexagon Head Screws Hex Head with Torque	
ISO 4017 - M8 x 20	1	Stainless Steel, 440C			
ISO 7040 - M8	1	Steel		Grenouillère de fixe Fond du boîtier	
P0327	1	Acier / Stahl			
P051	1	Acier / Stahl		Fixation Grenouillère Fixation du boîtier	
P044	1	Aluminium			
P039	1	ABS		Couvercle du boîtier Couvercle du boîtier	
DN 6796 - 4	2	Steel, Mild		Conical Spring Wash Conical Spring Wash	
P038	1	ABS		Casquette du boîtier Casquette du boîtier	
P046	1	Acier / Stahl		Axe de pivot du cou Axe de pivot du cou	
EO03-BouléE cran	1				
EO07-Boulé_ vr_modèleE	1				
étronique					

E006_Bottler_v4	Projet LoraShow	Bottler complet LoraShow	Hes·so
Titre/Num	Début Déclinaison	Début Déclinaison	VALAIS WALLIS
Sous-déclinaison	Défaut Gabriel	Contrôle Défaut	1:2
	Contrôle Défaut	Contrôle Défaut	1/1
	Relevé Affectation	Relevé Affectation	
	Motif/Réf/Ref:	Motif/Réf/Ref:	
	Refer à préfecture Valais Wallis	Refer à préfecture Valais Wallis	
	1:566 kg	1:566 kg	
	Montage	Montage	
	Montage	Montage	
			A2



No./Num.	Part Description	Ref.	No. de Projet/Project number:
Time/Titel	Projekt LoraSnow	Deferr Gabrie	22.01.2022
Sous-Attre/Unterteil	Module électronique	Dessiné/Gezeichnet Contôle/Gefertigt Révision/Aenderung	Echelle/Maßstab Feuille/Batt 1/1
Hes-SO / VALAIS WALLIS	Refer to project/Referenz: ISO-46016 Maße/Rohmorf: 0.348 kg	Masse Gewicht	
			A3

E Protocoles de test du LiDAR

Sensor under test	Garmin LiDAR Lite v4		Progression
Operator	Vincent Savioz		
Test ID	S000		
Test Description	Wire the sensor, power it on and take distance measurements in a room without sunlight.		
Test Prescription	Wire the sensor to the controller (uC, PC, Arduino, etc.) and write a small program that can take distance measurements. The sensor needs to be in a room without any trace of infrared light (i.e. sunlight). Output the measures on a prompt if possible. In order to compare sensors, measures need to be logged.		
Expected Result	The sensor take distance measures up to its theoretical limit without any problem and show them on the prompt.		
Results	<i>After a quick test on Arduino, a programm was developped on a STM32F746G-DISCO board in order to use a more powerful processor. The sensor outputs distance measurements without any problem.</i>		
Conclusion	<i>The sensor is working properly according to this test.</i>	Success	
Test ID	S001		
Test Description	Characterize the distance measurement error of the sensor.		
Test Prescription	Fix the sensor on a surface and place an object in front of it at a known distance. Then, note the output distance versus the real distance and characterize its measurement error (proportional, linear, etc.). Create a way of calibrating it if necessary.		
Expected Result	After calibration or compensation, the sensor should measure the right distance according to its accuracy		
Results	<i>The error characteristic was done on a scale from 20cm to 600cm. Turned out the sensor can't properly measure anything after 300cm. Between 0cm and 300cm, we can expect an error between 1cm and 5cm. We now need to know if this error is constant in temperature and between different sets or not.</i>		
Conclusion	<i>Further measurement showed that the sensor has a typical error of +2cm.</i>	Success	

Test ID	S002
Test Description	Optimize measurement results by eliminating value that are too far from the standard deviation.
Test Prescription	Make a program that compute mean and standard deviation from a running or static set of measures. It then deletes extreme values and recompute mean value. It should increase sensor accuracy.
Expected Result	The sensor shouldn't be sensitive to small perturbation in front of it.
Results	<i>The "Maximum" method is used to measure a distance to the ground.</i>
Conclusion	<i>The system is mostly insensible to noise.</i>

Test ID	S003
Test Description	Measure the sensor robustness in the lab sandbox using artificial snow (confetti).
Test Prescription	Fix the sensor on the tripod and make sure it won't move (measure repeatability). Then, note the sensor angle and floor from the plane and give them to the program in order to calibrate measurements.
Expected Result	The sensor should be able to measure an offset at least 10mm high on the ground, even with perturbations.
Results	<i>Tests showed that the sensor has a more or less +/- 2cm error from the real distance. Apart from that, the sensor measures a right offset measurement, as long as the material on which the measure is taken is not too porous.</i>
Conclusion	<i>The sensor measures an offset.</i>

Test ID	S004
Test Description	Measure the sensor capability to output a right offset measurement in various temperatures and environments.
Test Prescription	Take measurements at various temperatures and humidity values, i.e. room temperature, outdoor near-zero temperature, etc. but always without direct sunlight (in a low infrared environment), if possible during the night.
Expected Result	Sensor measurements shouldn't be affected by temperature too much.

Results	<i>The test was done in a temperature-controlled environment with temperature from -15°C to 40°C. Results showed that the sensor is almost not disturbed by the temperature and stay in its +2cm error from the real distance.</i>
Conclusion	<i>The sensor pass the test and can be reliably used at various temperatures.</i>

Test ID	S005
Test Description	Measure the sensor capability to output a right offset measurement in an overcast outdoor situation (medium infrared environment).
Test Prescription	Take measurements during an overcast day without any direct sunlight.
Expected Result	Sensor measurements shouldn't be too much affected by a medium infrared environment.
Results	<i>The sensor can't measure any distance.</i>
Conclusion	Failed

Test ID	S006
Test Description	Measure the sensor capability to output a right offset measurement in an sunny outdoor situation (high to very high infrared environment).
Test Prescription	Take measurements during a sunny day in direct sunlight.
Expected Result	Sensor measurements shouldn't be too much affected by a high to very high infrared environment.
Results	<i>The sensor can't measure any distance.</i>
Conclusion	Failed

Test ID	S007
Test Description	Finally, test the sensor in real snowy condition, at night if necessary.
Test Prescription	Take the sensor outside during a snowy weather, especially in poor visibility conditions in order to take measurements on real snow. Try to measure offsets and log data.
Expected Result	The sensor should be able to measure offset in real conditions.

Results	Tests were conducted at night during a medium snowfall. Measures were taken during more than 1 hour every 30 seconds, with at everytime an offset measurement.
Conclusion	It turned out that the LiDAR measures a right offset even when starting from 0cm

Success