

HAUTE ÉCOLE D'INGÉNIEUR DU VALAIS

LoRaSnow

PGA

Samy Francelet
21 janvier 2022

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Contexte	5
2	Spécifications	6
2.1	Cahier des charges	6
2.1.1	LoRaWAN	7
2.1.2	Edge Computing	7
2.1.3	Notre interprétation du cahier des charges	8
2.2	Schéma bloc global	9
3	LiDAR	10
3.1	Méthode	10
3.1.1	Fondamentaux	10
3.1.2	Caractéristiques	11
3.1.3	Implémentation	12
3.1.4	Méthode de mesure	13
3.2	Résultats	14
3.2.1	Caractéristique de l'erreur de mesure	15
3.2.2	Mesures de distance dans un environnement perturbé	18
3.2.3	Stabilité en température des mesures	21
3.2.4	Mesure de hauteur en laboratoire	22
3.2.5	Mesure de hauteur en situation réelle	25
4	Computer Vision	27
4.1	Défis liés à la mesure en extérieur	27
4.2	Applications pour la mesure de neige	27
4.2.1	Mesure de niveau sur une règle	28
4.2.2	Mesure de niveau par Stéréovision	29
4.2.3	Mesure du débit de chute de neige	30
4.2.4	Détection de route enneigée	30
4.2.5	Méthodes retenues	30
4.3	Implémentation	31
4.3.1	Récupération des vidéos	31
4.3.2	Mesure du débit de chute de neige	31
4.3.3	Détection de route enneigée	32
4.4	Résultats	33
4.4.1	Mesure de débit de chute de neige	33
4.4.2	Détection de route enneigée	33

Bibliographie

34

Table des figures

2.3	Schéma bloc global du projet	9
3.1	Garmin Lidar Lite v4	10
3.2	LiDAR Lite V4 implémenté sur Arduino Uno	12
3.3	LiDAR Lite V4 sur STM32-NUCLEO	13
3.4	Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow	14
3.5	Mesure de distance comparée à la distance réelle	15
3.6	Distance mesurée en fonction de la distance réelle	16
3.7	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle	16
3.8	Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile	17
3.9	Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile	17
3.10	Mise en place du test de perturbation	18
3.11	Histogramme de la mesure de référence	19
3.12	Comparaison des 5 mesures effectuées	19
3.13	Mise en place du test en température	21
3.14	Graphe de stabilité en température du LiDAR	22
3.15	Mise en place du test de mesure d'épaisseur	23
3.16	Boîte à moustache des mesures d'épaisseur	24
3.17	Résultat des calculs d'offset par méthode	24
3.18	Mise en place du test en condition réelle	25
3.19	Résultat des mesures effectuées	26
4.1	Comparaison image de neige HD et cas concret	27
4.2	Mesure de neige à la règle	28
4.3	Schéma de principe stéréovision	29
4.4	Comparaison image source et bruit sur image	30
4.5	Étapes de la mesure de débit de chute de neige	31
4.6	Référence pour détection de neige sur route	32
4.7	Images testées pour détection de neige sur route	32

Liste des tableaux

3.1	Extrait des spécifications du LiDAR Lite V4	11
3.2	Sélection des registres I2C essentiels	13
3.3	Différentes méthodes de calcul de distance (en cm)	20
3.4	Mesures relevée lors du test	26

1 Introduction

1.1 Contexte

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

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

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

2 Spécifications

2.1 Cahier des charges

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

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



FIGURE 2.1 – Conditions typiques de fonctionnement du 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 des grandes distances tout en permettant une consommation électrique très faible. La longue portée de son signal permet d'installation d'appareils dans des endroits isolés, sans nécessairement avoir accès au réseau électrique ou mobile.

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

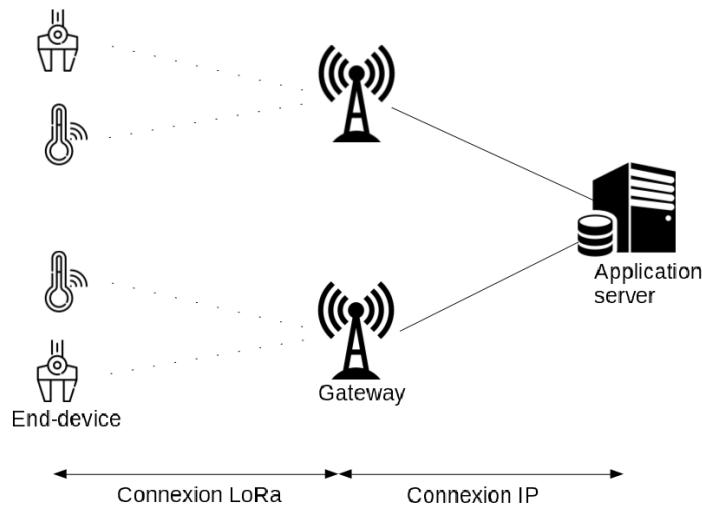


FIGURE 2.2 – Topologie LoRaWAN¹

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 envoyées dans le cloud.

1. Tiré de la page Wikipedia LoRaWAN

2.1.3 Notre interprétation du cahier des charges

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

Mesure de hauteur de neige

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

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

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

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

Fixation et protection du module

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

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

2.2 Schéma bloc global

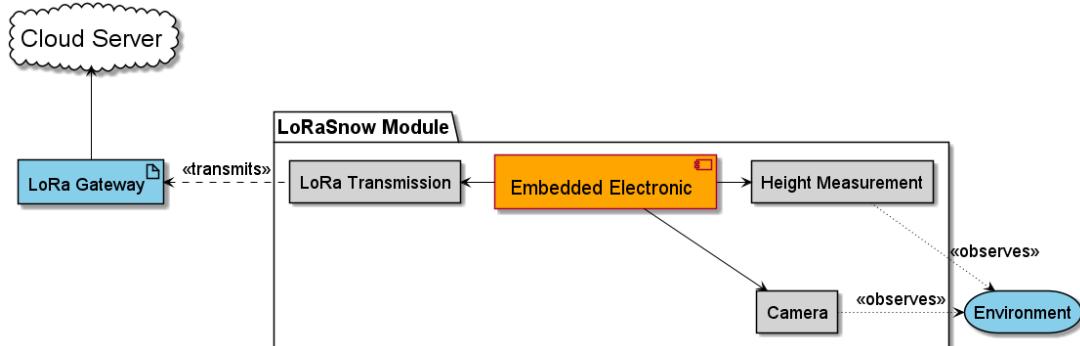


FIGURE 2.3 – Schéma bloc global du projet

Environment

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

Height Measurement

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

Camera

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

Embedded Electronic

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

LoRa Transmission

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

LoRa Gateway

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

Cloud Server

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

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

3 LiDAR

3.1 Méthode



FIGURE 3.1 – Garmin Lidar Lite v4

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

3.1.1 Fondamentaux

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

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

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

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

3.1.2 Caractéristiques

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

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

TABLE 3.1 – Extrait des spécifications du LiDAR Lite V4

La table 3.1 montre une sélection des caractéristiques importantes du capteur, tirées directement de sa fiche technique¹. Ci-dessous sont détaillés les éléments essentiels à la sélection de ce capteur.

Température de fonctionnement

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

Consommation de courant

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

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

Tension des signaux

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

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

1. Fiche technique du LiDAR Lite V4 : https://www.distrelec.ch/Web/Downloads/_m/an/SEN-15776_eng_man.pdf

Longueur d'onde de la LED

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

Répétabilité des mesures

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

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

3.1.3 Implémentation

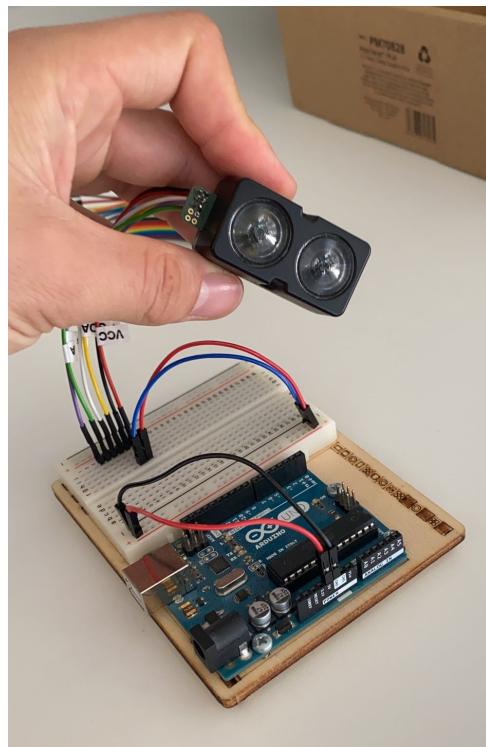


FIGURE 3.2 – LiDAR Lite V4 implanté sur Arduino Uno

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

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

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

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

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

TABLE 3.2 – Sélection des registres I2C essentiels

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



FIGURE 3.3 – LiDAR Lite V4 sur STM32-NUCLEO

3.1.4 Méthode de mesure

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

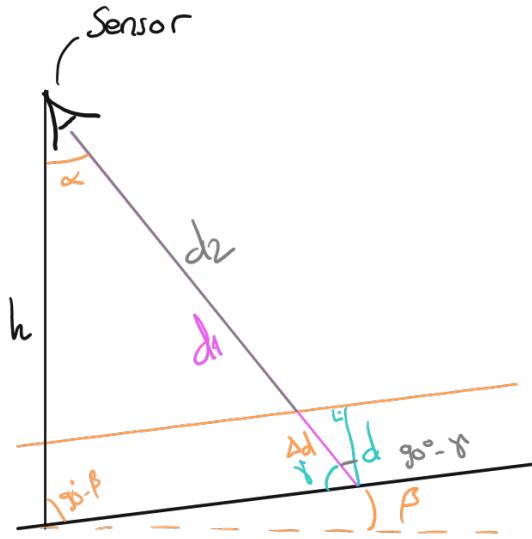


FIGURE 3.4 – Schéma de l'installation d'un module LoRaSnow

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

3.2.1 Caractéristique de l'erreur de mesure

Le premier test consiste à mesurer une distance connue avec le capteur et de noter sa valeur mesurée afin de vérifier si la plage de mesure donnée par la fiche technique (5cm à 10m) est vraie. Ceci nous permet de savoir dans quelle mesure la distance fournie par le capteur représente la réalité. Dans le cas d'une erreur de mesure, il nous est aussi utile de savoir si cette erreur est constante entre plusieurs séries espacées dans le temps.

Méthode

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

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

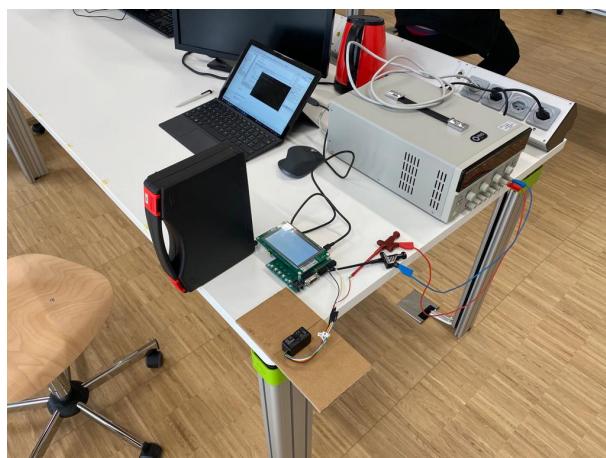


FIGURE 3.5 – Mesure de distance comparée à la distance réelle

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

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

Résultats du test

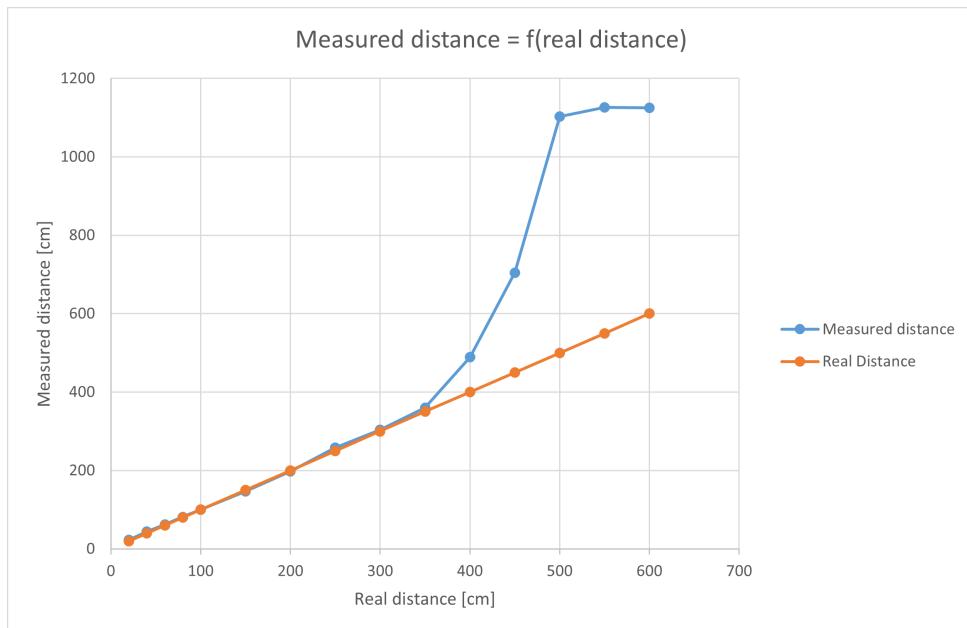


FIGURE 3.6 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle

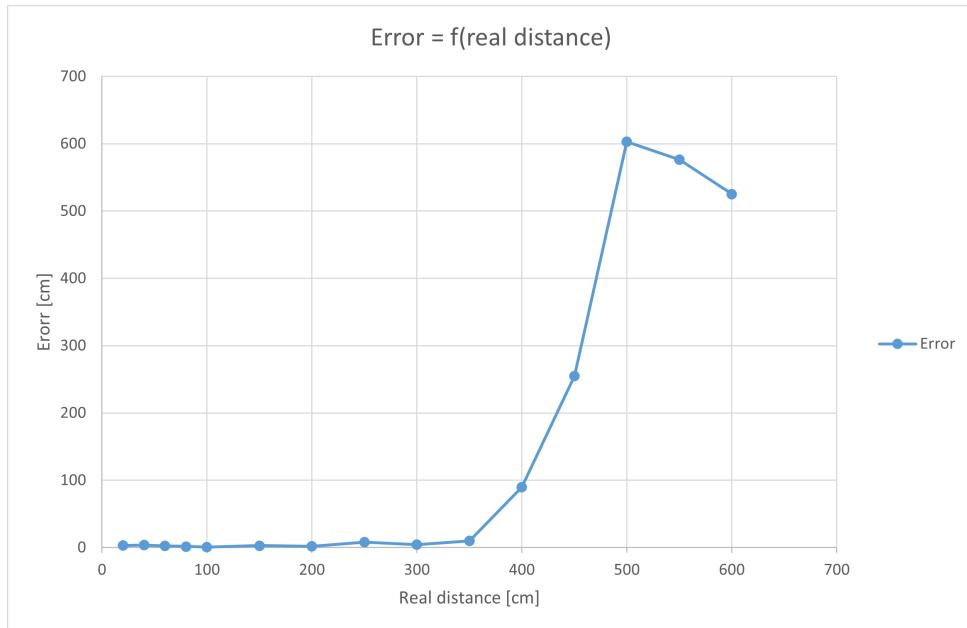


FIGURE 3.7 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle

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

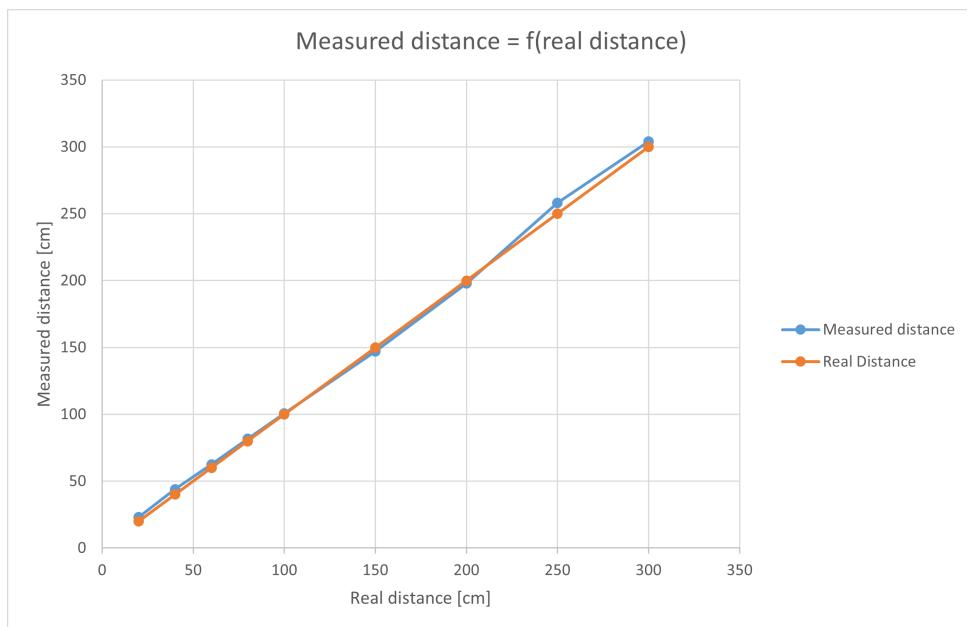


FIGURE 3.8 – Distance mesurée en fonction de la distance réelle dans la plage utile

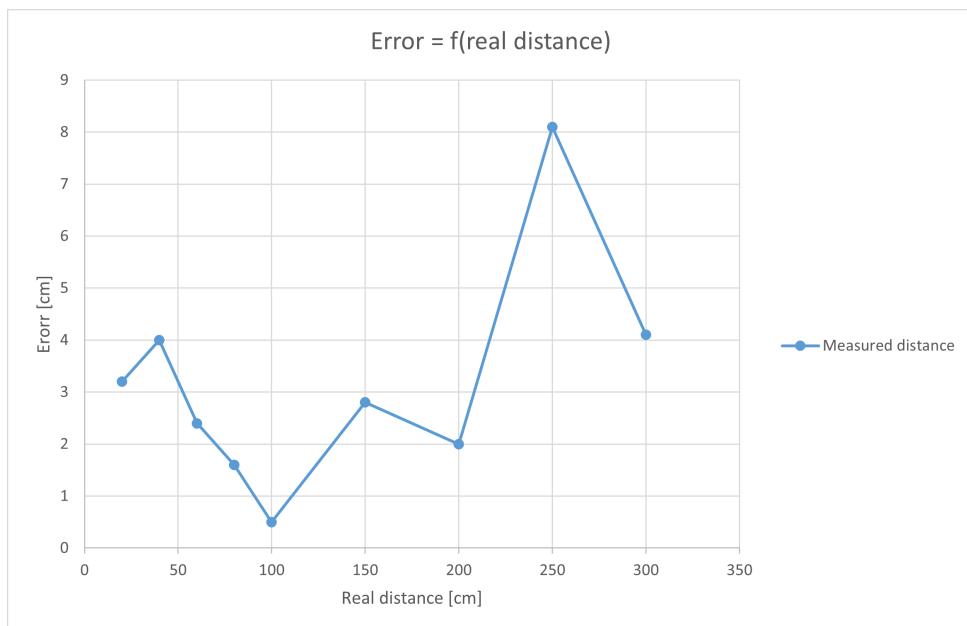


FIGURE 3.9 – Erreur de la distance mesurée par rapport à la distance réelle dans la plage utile

Conclusion préliminaire

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

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

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

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

3.2.2 Mesures de distance dans un environnement perturbé

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

Méthode

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

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

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



FIGURE 3.10 – Mise en place du test de perturbation

Résultats du test

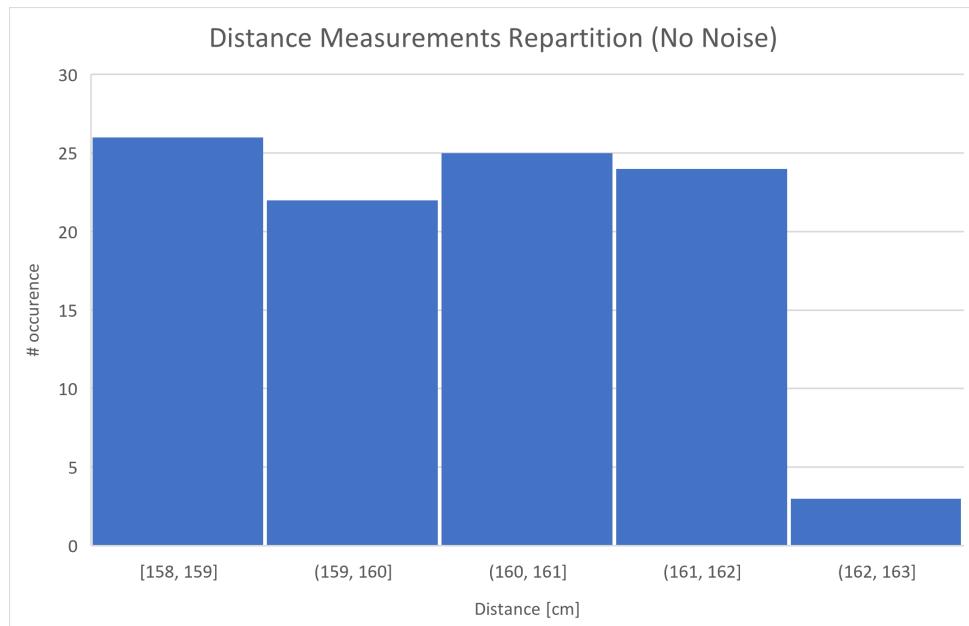


FIGURE 3.11 – Histogramme de la mesure de référence

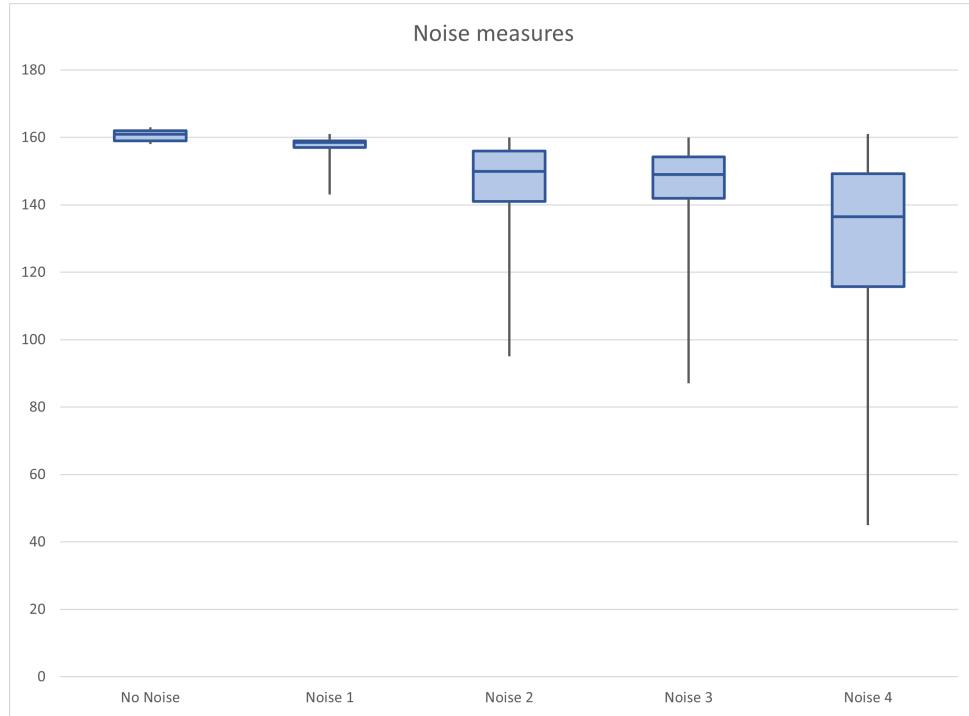


FIGURE 3.12 – Comparaison des 5 mesures effectuées

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

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

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

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

//ANNEXE A : HISTOGRAMME DE CHACUNE DES MESURES

Conclusion préliminaire

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

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

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

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

Moyenne

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

Médiane

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

Maximum

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

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

3.2.3 Stabilité en température des mesures

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

Méthode

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



FIGURE 3.13 – Mise en place du test en température

Résultats du test

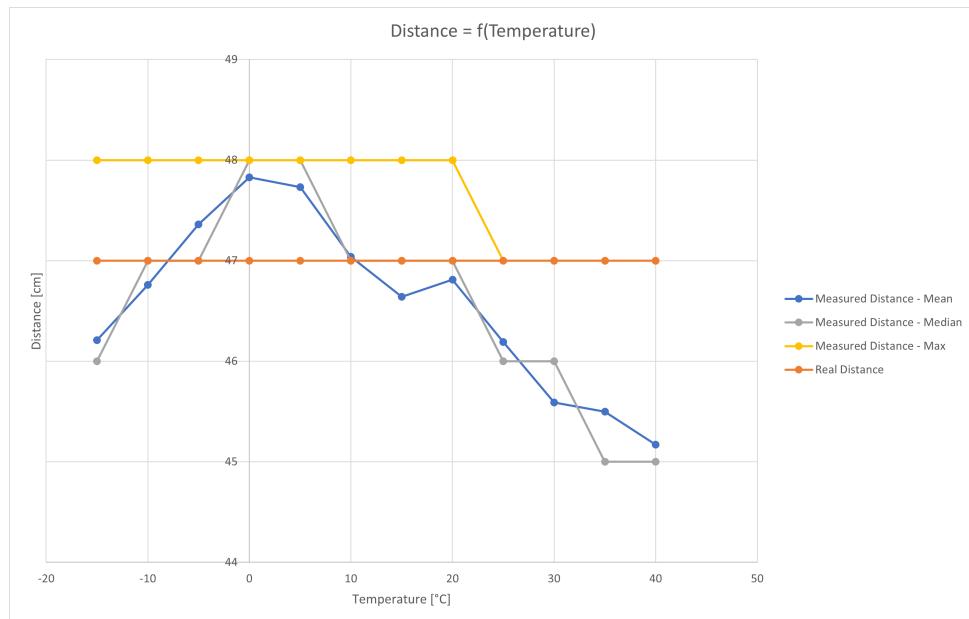


FIGURE 3.14 – Graphe de stabilité en température du LiDAR

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

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

Conclusion préliminaire

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

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

3.2.4 Mesure de hauteur en laboratoire

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

Méthode

Pour effectuer ce test, le capteur est placé dans le banc de test à une hauteur h de 133cm au-dessus du sol. L'angle 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

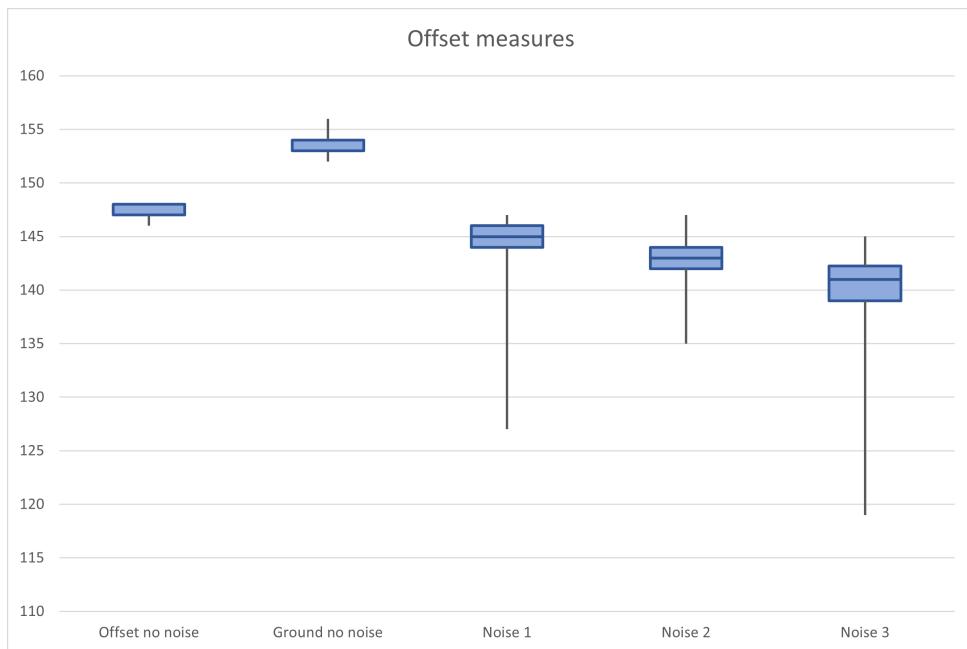


FIGURE 3.16 – Boîte à moustache des mesures d'épaisseur

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.

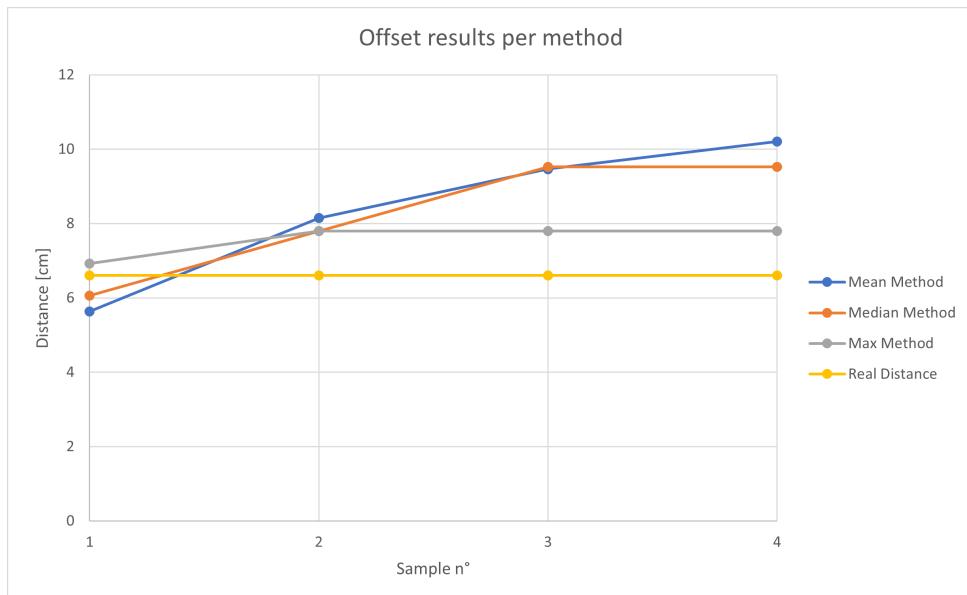


FIGURE 3.17 – Résultat des calculs d'offset par méthode

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.

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 3.18 montre la mise en place du test. Le double-mètre et l'ordinateur ne sont pas visibles ici.

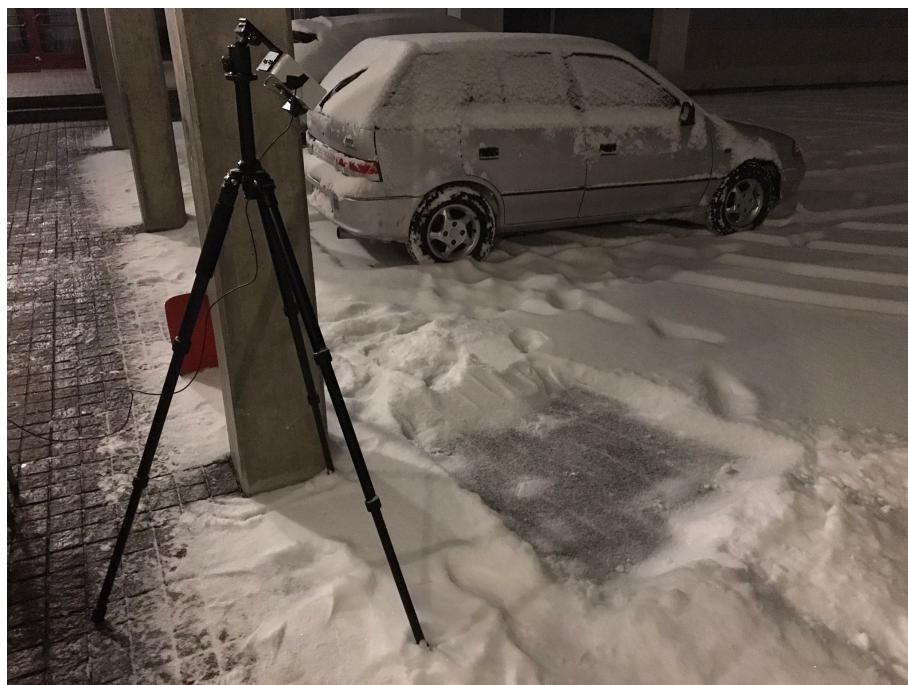


FIGURE 3.18 – Mise en place du test en condition réelle

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

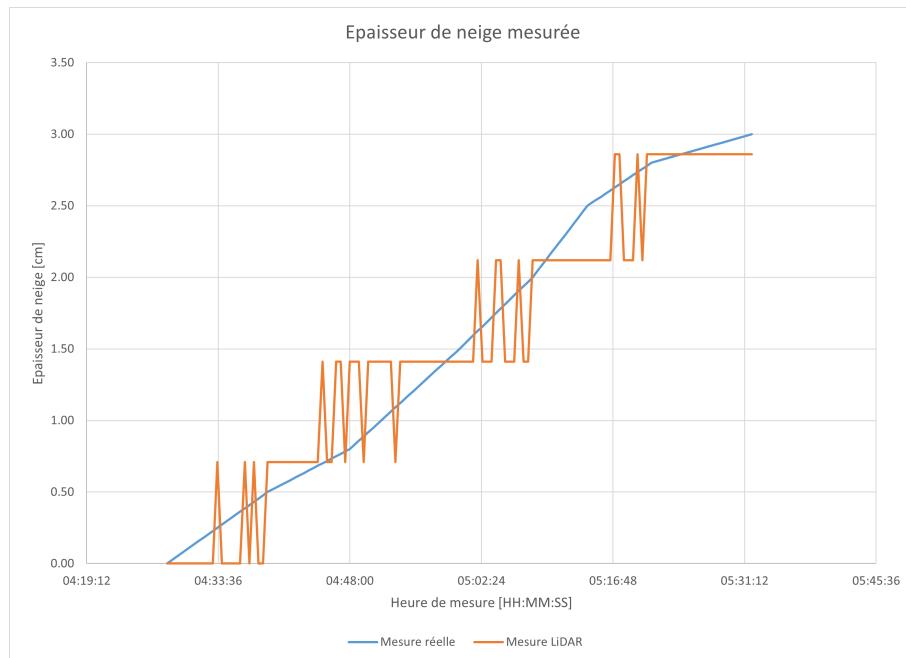


FIGURE 3.19 – Résultat des mesures effectuées

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 3.19, 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 3.19), on peut conclure que le LiDAR arrive bel et bien à mesurer une hauteur de neige, et ce depuis le sol.

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

4 Computer Vision

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

4.1 Défis liés à la mesure en extérieur

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



FIGURE 4.1 – Comparaison entre une image 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.

4.2 Applications pour la mesure de neige

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

1. Wallpaper from WallpaperCave, by caveman, <https://wallpapercave.com/w/scDoVwf> (last accessed : 20 January 2022)
2. VibroSnow camera, implemented at route du Pralan, Ayent, Suisse

4.2.1 Mesure de niveau sur une règlette

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



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

La mesure pourrait être réalisé 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 réfléchis pas trop la lumière du soleil.

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

pour reconnaître le piquet d'autres objets (p. ex. : arbres, lampadaires, ...) (ref²) Cela demanderait trop de puissance de calcul pour un système embarqué basse consommation. Une autre solution serait de calibrer chaque installation pour reconnaître le piquet. Cependant la caméra étant intégrée dans un système embarqué, cette calibration serait certainement fastidieuse et demanderait une interface utilisateur supplémentaire pour la réaliser.

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

2. *Snow Depth Measurement via Time Lapse Photography and Automated Image Recognition*, by Kevin S. J. Brown and Steven R. Fassnacht at Colorado State University, Department of Ecosystem Science and Sustainability, 2019, <http://www.codos.org/#lit>

4.2.2 Mesure de niveau par Stéréovision

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

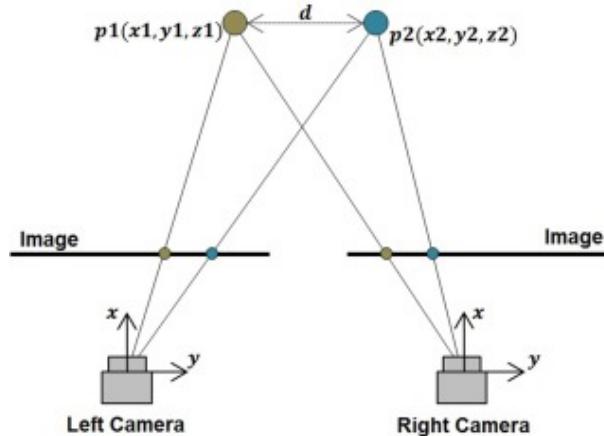


FIGURE 4.3 – Schéma de principe de mesure de distance par stéréovision

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

4.2.3 Mesure du débit de chute de neige

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



FIGURE 4.4 – Image source de la caméra 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 un caillou, mal placé fausse la mesure du capteur, savoir si le segment de route est enneigé ou non permettrait d'éliminer ces erreurs.

4.2.5 Méthodes retenues

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

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

4.3 Implémentation

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

4.3.1 Récupération des vidéos

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

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

4.3.2 Mesure du débit de chute de neige

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

Soustraction de deux images

pour isoler les éléments qui ont bougé entre les deux images

Seuillage des niveaux de blancs sur l'image

pour accentuer les chutes de neige

Calcul du ratio de pixels blancs

pour avoir un nombre correspondant au débit de chute de neige

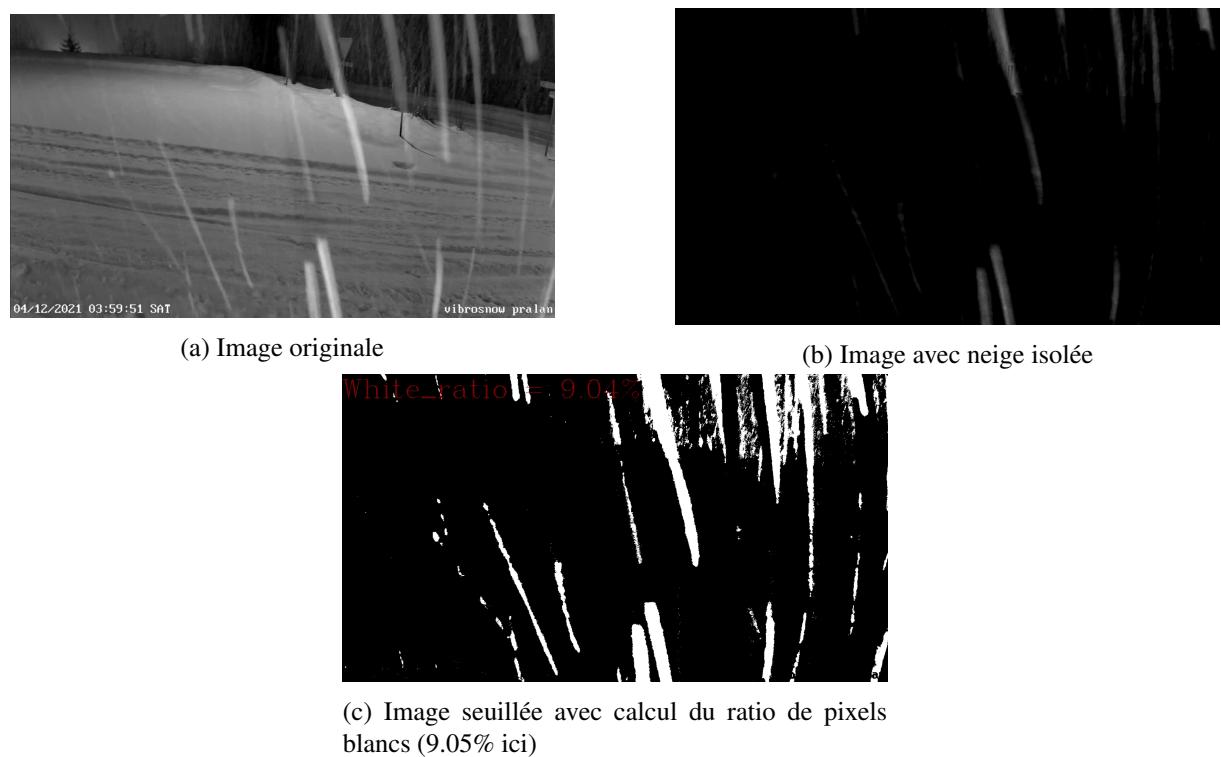


FIGURE 4.5 – Étapes de la mesure de débit de chute de neige

4.3.3 Détection de route enneigée

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

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

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



(a) Image de référence originale

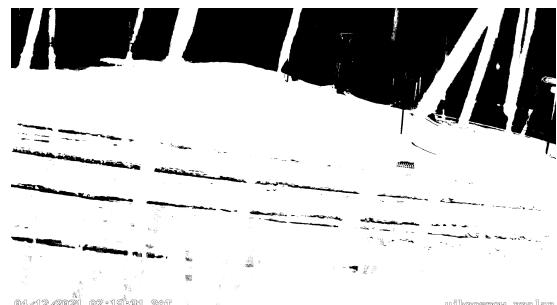


(b) Image de référence seuillée

FIGURE 4.6 – Image de référence



(a) Image de test originale



(b) Image de test seuillée



(c) Image de test avec suppression de bruit



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

FIGURE 4.7 – Image de test

4.4 Résultats

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

4.4.1 Mesure de débit de chute de neige

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

On récupère plusieurs vidéos qu'on trie selon 3 critères :

Le moment de la journée

matin, journée, soir, nuit

La quantité visuelle de neige qui est en train de tomber

rien, petite neige, neige, grosse neige, tempête

L'état de la route

sèche, déneigée, partiellement enneigée, complètement enneigée

Chaque vidéo avec une route sèche ou déneigée, et avec aucune chute de neige peut servir de référence pour faire les mesures suivantes. 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.

4.4.2 Détection de route enneigée

Le but de cette mesure est de fournir, a minima, si oui ou non la route est enneigée. Idéalement elle devrait pouvoir différencier plusieurs degré d'enneigement de la route. Ces degrés sont définis selon les critères cités précédemment 4.4.1

Bibliographie

[AM21] Jérôme AMOS et Fabien MATTER. *Projet parent VibroSnow, détectant la neige par Computer Vision et Ultrason.* 2021.