

UNIVERSITÉ DE RENNES 1

MASTER 2 CALCUL SCIENTIFIQUE ET MODÉLISATION  
RAPPORT DE PROJET DE PRÉSTAGE

---

# Etude et développement d'outils mathématiques pour estimer, en temps réel, le tassage et le volume d'un silo de maïs à partir de capteurs embarqués

---

*Auteur :*  
Sébastien HERVIEU

*Tuteur Universitaire :*  
Fabrice MAHÉ

29 mars 2018



# Table des matières

<b>I</b>	<b>Introduction, Contexte, Objectifs</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
1.1	Présentation de Tellus Environment . . . . .	5
1.1.1	Création et Services . . . . .	5
1.1.2	Expertises . . . . .	5
1.1.3	Activité Recherche et Développement . . . . .	6
1.2	Présentation du Stage . . . . .	7
1.3	Objectifs du projet de pré-stage . . . . .	9
<b>2</b>	<b>L'ensilage de maïs en silo</b>	<b>11</b>
2.1	Les fourrages : importance économique . . . . .	11
2.2	Principes de l'ensilage . . . . .	12
2.2.1	Fermentation Lactique . . . . .	12
2.2.2	Conservation des fourrages annuels . . . . .	13
2.3	Ensilage en silo couloir : mise en oeuvre . . . . .	15
2.3.1	Le chantier d'ensilage . . . . .	15
2.3.2	Méthodologie du remplissage et de tassage du silo . . .	19
2.3.3	Risques d'un tassage mal effectué . . . . .	20
2.4	Préparation et la conduite du chantier . . . . .	21
2.4.1	Les différents types d'intervenant . . . . .	21
2.4.2	Gestion de production . . . . .	21
2.5	Conclusion . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Solution Actuelle à Améliorer</b>	<b>23</b>
3.1	Objectifs initiaux de la version V1 . . . . .	23
3.2	Présentation de solution . . . . .	23
3.2.1	Architecture de la solution . . . . .	23
3.2.2	Les sous-systèmes . . . . .	24
3.3	Points faibles et axes d'amélioration . . . . .	24
3.3.1	Complexité de mise en oeuvre . . . . .	25
3.3.2	Limitation du système . . . . .	26

3.3.3	Axes d'améliorations pour la V2 . . . . .	26
3.4	Conclusions . . . . .	28
<b>II</b>	<b>Outils Importants</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Capteurs et Détecteurs en Robotique</b>	<b>30</b>
4.1	Capteurs et Détecteurs . . . . .	30
4.1.1	Les Capteurs . . . . .	30
4.1.2	Les détecteurs . . . . .	31
4.2	Les détecteurs de présence à distance en robotique . . . . .	32
4.2.1	Détecteurs passifs . . . . .	32
4.2.2	Détecteurs actifs . . . . .	33
4.2.3	Caractéristiques d'un détecteur de présence : . . . . .	33
4.3	Les capteurs de position . . . . .	34
4.3.1	Odométrie . . . . .	34
4.3.2	Centrales inertielles . . . . .	34
4.3.3	GPS . . . . .	35
4.4	Les capteurs de type "Direction" . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Localisation, Cartographie, SLAM</b>	<b>36</b>
5.1	Positionnement du problème . . . . .	36
5.2	Maintenir de le vecteur d'état . . . . .	36
5.3	Bibliographie . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Prototypage</b>	<b>38</b>
6.1	Prototypage Scientifique des Algorithmes . . . . .	38
6.2	Prototype de mise en œuvre . . . . .	38
<b>III</b>	<b>Application Numérique</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Application Numérique</b>	<b>40</b>
7.1	Problème direct . . . . .	41
7.1.1	Modélisation de la scène . . . . .	41
7.1.2	Calcul du nuage de point . . . . .	42
7.1.3	Implémentation du problème direct . . . . .	46
7.2	Problème Inverse . . . . .	46
7.2.1	Ajuster un plan à un nuage de point dans l'espace . . . . .	47
7.2.2	Adaptation à une recherche de plan arbitraire . . . . .	48

<b>IV</b>	<b>Conclusions du Projet Préliminaire au Stage</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Objectifs SMART du Stage</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Sujet de stage</b>	<b>52</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>55</b>

# Première partie

## Introduction, Contexte, Objectifs

# Chapitre 1

## Introduction

Le présent chapitre s'attache à présenter le contexte de ce projet de préstage, à savoir l'entreprise dans laquelle le stage se déroulera et le sujet du stage.

Les objectifs du projet de préstage seront enfin présentés.

### 1.1 Présentation de Tellus Environment

#### 1.1.1 Création et Services

Tellus Environment a été créée en 2012 par Geoffroy ETAIX et Bruno WIRTZ en Juin 2012.

C'est une startup spécialisée dans la cartographie haute définition des sous-sols et des fonds marins, qui propose des services de relevés et mesures nécessaires ainsi que d'analyse de ces données afin d'en permettre l'exploitation par ses clients.

Tellus Environment permet à ses clients de "Cartographier l'invisible pour agir". Elle propose donc des services d'aide à la décision essentiellement à des clients qui interviennent sur le sous-sol et les milieux marins : BTP, aménageurs fonciers, archéologie préventive, agriculture, levée de doute pour la détection précise de réseaux enfouis (eau, gaz, assainissement, télécom) ou de tout autre objet ferreux (épave, vestige de guerre, terre cuite, etc), évaluation avant dépollution de site.

#### 1.1.2 Expertises

La capacité de Tellus Environment à produire des cartographies du sous-sol repose sur une expertise unique pour le traitement des relevés des sites. Elle a breveté et met en oeuvre le procédé MagSalia, procédé initialement

développé par le laboratoire de Mathématiques de L'Université de Bretagne Occidentale.

Ce procédé appliqué à des acquisitions magnétiques produit une tomographie en 3 dimensions de masses magnétiques ponctuelles et étendues, potentiellement jusqu'à 30 mètres de profondeur. Il est de plus possible d'estimer la susceptibilité magnétique de l'objet et donc d'anticiper sa nature (épave ou autre).

Dans sa version sonar multifaisceaux ou lidar, le procédé Magsalia accentue le relief du modèle numérique du terrain mettant en évidence les anomalies du fond marin ou les perturbations de la sous couche terrestre. Ceci est particulièrement adapté aux problématiques agricoles, archéologique, les zones vierges (non exploitées) ou blanches (exploitées mais cartographie imprécise ou absente).

### 1.1.3 Activité Recherche et Développement

En parallèle de sont activité principalement service, Tellus Environnement conduit en parallèle une activité Recherche et Développement.

Cette seconde activité peut intervenir soit pour développer de nouvelles techniques de mesure 3D pour améliorer ou étendre sa gamme de service (lidar embarqué sur drone, ...), soit pour apporter son expertise en matière de mise en oeuvre d'acquisition des données et de leur traitement dans la conception d'un produit.

Parmi les projets en cours de cette activité R&D nous pouvons mentionner les suivants :

**Mesure temps réel de tassage de Silo** Il s'agit d'un équipement mettant en oeuvre un Lidar pour mesurer en temps réel le volume d'un silo de maïs afin d'en faire une évaluation fiable du tassage.

**Détection en milieu marin zone à risque** Mise en oeuvre de différents capteurs (Lidar, Sonar, Video IR) pour l'aide à l'accostage de navire en milieux marins risqués.

**Détection Automatique GeoRadar** Automatiser l'analyse de signaux radars, en vue d'optimiser le processus de cartographie du sous-sol et l'exploitation des résultats par les différents acteurs et parties prenantes. Le but

est de pouvoir, à partir d'une acquisition unique sur le terrain, générer de multiples cartes pour répondre à des besoins différents.

## 1.2 Présentation du Stage

Le sujet du stage, présenté en annexe, interviendra dans le cadre de l'activité R&D de Tellus Environment, pour améliorer le dispositif existant de mesure en temps réel de mesure de tassage de silo de maïs.

**Le tassage de silo de maïs** est une activité agricole qui consiste à tasser de grandes quantités de maïs, généralement dans un silo couloir, en vue d'en permettre la fermentation anaérobie et donc la conservation. Le tassage est une étape primordiale, effectuée à l'aide de tracteurs qui passent de nombreuses fois sur le maïs afin de le compacter. La mesure du tassage est généralement faite au jugé, et est donc relativement imprecise.

**Tellus Environnement apporte** une solution qui permet de mesure avec bonne précision, et en temps réel la surface du tas de maïs tassé et d'en déduire le volume. En combinant cette information avec le tonnage de maïs effectivement ensilée, le tassage - c'est dire la densité du maïs tassé - est donc déterminé avec une bien meilleur précision.

**Le dispositif existant** est basé sur un capteur laser, le Lidar, qui permet la mesure précise de la surface du tas de maïs. Ce capteur est placé à l'un des angles du silo, et communique ses mesures à un terminal monté dans le cockpit du tracteur.

Le terminal peut donc indiquer les parties du tas qui auraient besoin d'être tassées en priorité.



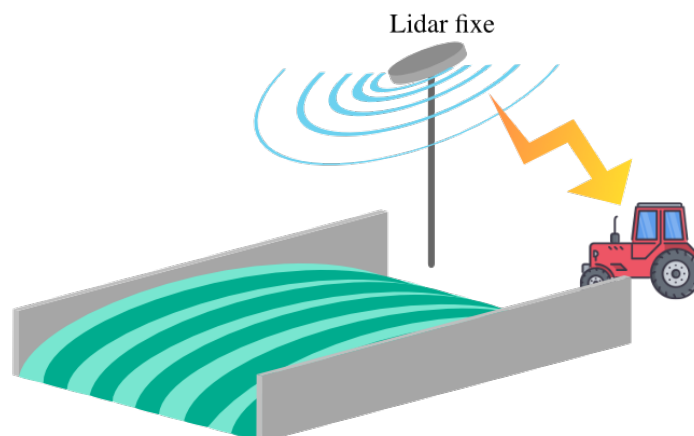


FIGURE 1.1 – Configuration avec Lidar fixe

Ce système est déjà en exploitation par les clients de Tellus Environment et un retour d'expérience a été effectué auprès des opérateurs. Le principal défaut remonté de l'équipement lors son exploitation est le temps d'installation du Lidar dans une des coins du silos qui prend en temps certain. Les contraintes en temps des intervenants autour d'un tassage de silo ne sont pas compatibles avec le déploiement d'un instrument sensible comme un Lidar.

Un besoin supplémentaire a été de plus exprimé : une mesure précise du volume d'ensilage tassé dans le silo doit pouvoir être fournie.

**La solution à ces demandes** envisagée par Tellus Environment est donc de purement et simplement supprimer cette étape d'installation en montant le Lidar directement sur le tracteur de tassage, et de faire évoluer le logiciel de manière à ce qu'il puisse estimer l'état de surface de l'ensilage tassé ainsi que le volume d'ensilage tassé.

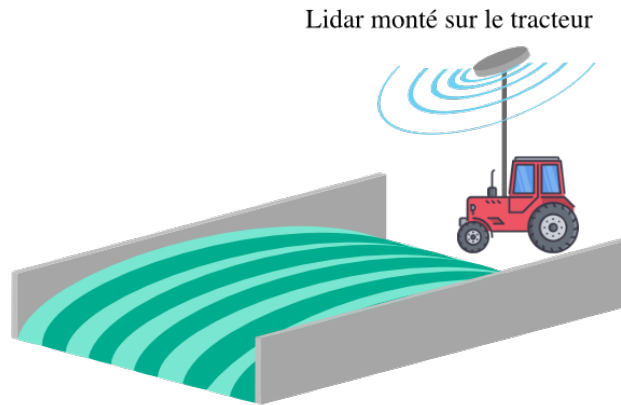


FIGURE 1.2 – Configuration avec Lidar monté sur le tracteur

### 1.3 Objectifs du projet de pré-stage

Le projet de pré-stage a pour objectif principal d'enquêter sur les techniques de mesure précise d'un tas d'ensilage à partir de capteurs montés sur une plateforme mobile, en vue de le les mettre en oeuvre lors du stage.

Les sujets à aborder seront les suivants :

1. **Notions sur les chantiers d'ensilage** : l'objet de cette partie est de déterminer précisément ce qui constituera l'environnement opérationnel du système V2, à savoir les chantier d'ensilage. Nous étudierons pourquoi les silos sont nécessaires à une exploitation, les moyens engagés sur un chantier d'ensilage et les critères de qualité sur la conduite de ces chantiers.
2. **Les Capteurs pour les systèmes mobiles** : généralités sur les différents types de capteurs susceptibles d'être utilisés sur le projet.
3. **Analyse de la solution existante** : cette partie s'attachera à analyser en détail la version 1 de la solution, en vue d'en dégager les points forts et les points faibles.
4. **Les Outils Importants** : détecter les outils qui se révéleront nécessaires à la bonne conduite du stage :
  - Plateforme Robot OS : système d'exploitation sous lequel la solution sera déployée.
  - Localisation, Cartographie, SLAM : les outils pour l'implémentation d'un système "Simultaneous Localization And Mapping"

- Mesurer le tassage : les outils mathématiques pour reconstituer en 3D le tas d'ensilage à partir de relevé issus d'un LIDAR
  - Prototypage et mise en oeuvre : les différents outils qui permettront de modéliser le système, monter et tester des prototype simulés ou en grandeur.
- 5. Application numérique :** mettre en oeuvre un algorithme de détection d'un mur à partir d'un nuage de points.
  - 6. Critères SMART pour le projet de stage :** évaluer les facteurs de succès du stage sur la base des critères SMART.

# Chapitre 2

## L'ensilage de maïs en silo

L'objectif de ce chapitre est d'introduire l'environnement opérationnel dans lequel le produit final sera déployé, à savoir les chantiers d'ensilage de maïs sur les exploitations d'élevage agricole.

Dans une exploitation d'élevage agricole, l'ensilage a pour but de stocker des fourrages de manière à en permettre la conservation de nourriture animal, à longue durée et en grande quantité.

### 2.1 Les fourrages : importance économique

**La nourriture : poste de charges le plus important pour une exploitation agricole** Pour un élevage agricole, la nourriture animale représente la charge financière la plus importante pour tout élevage agricole. Selon [20] : "Les coûts liés à la culture des surfaces fourragères et aux achats de produits d'alimentation représentent plus de 50% du prix de revient des animaux."

**Les fourrages : un moyen bon marché pour nourrir les herbivores.** Toujours selon [20], un moyen efficace de réduire les coûts liés à l'alimentation animale est d'éviter au maximum l'achat de produits extérieurs à la ferme, en pratiquant le paturage dans les prairies naturelles ou semées, ou alors en amenant aux animaux du fourrage récolté sur la ferme, par exemple.

L'abondance de ces produits disponibles en ferme variant selon les saisons et devenant rares en hiver, il est nécessaire pour un éleveur d'avoir à disposition des aliments stockés en quantité suffisante pour cette période. De plus

ces aliments doivent être conservés dans des conditions d'hygiène telles qu'ils soient toujours comestibles pour les animaux, et les garder en bonne santé.

Selon [22] et [5], la manière la plus courante de stocker l'alimentation d'animaux herbivores est la technique de l'ensilage.

## 2.2 Principes de l'ensilage

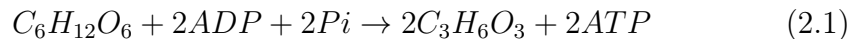
Selon [22] et [5], l'ensilage est un système de conservation des fourrages par fermentation anaérobie dans un silo. Des bactéries transforment les sucres solubles en acides organiques (principalement de l'acide lactique et de l'acide acétique). Ces produits rendent l'ensilage acide, ce qui le stérilise et permet sa conservation à long terme.

### 2.2.1 Fermentation Lactique

Selon [22], la principale fermentation en jeu dans les ensilages de maïs est la fermentation lactique. Comme indiqué dans [23] : "la **fermentation lactique**, ou **lacto-fermentation**, est un mode de fermentation (production d'énergie anaérobie) qui, en présence de glucides et de bactéries spécifiques (les ferments lactiques), induit la formation d'acide lactique.

La production d'acide lactique provoque une acidification du milieu, qui permet l'élimination d'autres bactéries, éventuellement pathogènes."

**Réaction chimique :** La fermentation anaérobie a lieu, comme indiqué dans [23], en absence d'oxygène. La réaction chimique combine le glucose, l'adénosine diphosphate (ADP) et le phosphate inorganique (Pi) pour produire de l'acide lactique ( $C_3H_6O_3$ ) et de l'adénosine triphosphate (ATP), comme indiqué dans l'équation chimique 2.1.



**Stérilisation et conservation :** Selon [23] Les légumes portent en leur surface des micro-organismes qui laissés à l'air libre provoquent leur putréfaction. En l'absence d'air et en présence d'une légère quantité de sel qui inhibe les autres ferments, les ferments lactiques prennent le dessus. Ces bactéries se développent en assimilant les glucides présents dans les légumes et les transforment en acide lactique.

Au fur et à mesure de la progression du processus, la concentration d'acide lactique augmentant, le jus devient de plus en plus acide et neutralise le développement de la putréfaction. Lorsque que le milieu atteint une acidité suffisante (pH autour de 4), les bactéries lactique deviennent elles-mêmes inhibées et la fermentation s'arrête. Le produit devient stable, ce qui permet une longue conseration.

Toujours selon [23], la fermentation lactique est utilisée depuis longtemps pour préparer une grande variété d'aliments, y compris destinés à une consommation humaine. De nombreux fruits et légumes peuvent être consommés fermentés, comme le chou (choucroute, kimchi), les carottes, la betterave, les cornichons, le citron, les olives, etc. Les yaourts, les faisselles et d'autres produits laitiers frais "rustiques" (lait ribot) utilisent le principe de la fermentation lactique.

Selon [12]La fermentation lactique est donc aussi utilisée pour la conservation des fourrages annuels, comme le maïs ensilage, la betterave fourragère et le sorgho fourragé sont conservés selon des procédés basés sur la fermentation lactique.

### 2.2.2 Conservation des fourrages annuels

Il existe plusieurs méthodes d'ensilage, c'est à dire de méthodes de conservation des fourrages annuels basées sur la fermentation lactique. Selon [22] elles sont au nombre de trois :

**Le "Haylage" :** cette technique consiste en l'empilement vertical du fourrage dans des silos-tours limitant le contact avec l'air. L'anaérobiose est assurée par l'épaisseur de l'ensemble. Cette méthode qui requiert des investissements lourds (silo, soufflerie, mécanisme de désilage) est principalement utilisée au Etats-unis où elle a été mise au point. Elle est peu fréquente en Europe.

**L'Enrubannage :** cette méthode consiste au stockage du fourrage dans des balles rondes résultant du déroulage d'un film plastique autour de chaque botte . L'anaérobiose résulte de l'étanchéité à l'air du film plastique.

**Ensilage en silo couloir** Cette technique est la plus utilisée. Le fourrage est d'abord haché en particules d'environ un centimètre de long, puis stocké à plat en couches successives, sur une aire bétonnée entre deux murs. Il est

compacté au fur et à mesure à l'aide de tracteurs afin d'expulser le maximum d'air interstitiel. Il est enfin mis en anaérobiose définitive par recouvrement à l'aide d'une bâche de polyéthylène lestée.



FIGURE 2.1 – Exemple de silo-couloir vide



FIGURE 2.2 – Silos-couloir côte à côte vides

La même technique peut être utilisée lorsqu'on ne dispose pas de murs limitant le silo. On parle alors de **silo taupinière**, fréquemment utilisé pour la pulpe de betterave.



FIGURE 2.3 – Exemple de silo-taupinière

## 2.3 Ensilage en silo couloir : mise en oeuvre

Un chantier d'ensilage consiste à la récolte et la mise en silo immédiate du fourrage en vue de le mettre à fermenter. Il s'agit donc d'un chantier à plusieurs postes qui tournent en parallèle et à flux tendu.

### 2.3.1 Le chantier d'ensilage

**Vue d'ensemble :**

**Les différents postes**

**Fourrageuse :** La fourrageuse récolte le fourrage en champ, le découpe en morceaux d'environ 1 centimètre et le déverse dans la remorque de la navette, tout cela de manière continue ;

**Navette :** La navette suit la fourrageuse dans le champ le temps que celle-ci remplisse sa remorque de fourrage. Une fois la remorque remplie, la navette se rend au silo, dépose le fourrage au pied du silo et retourne auprès de la fourrageuse. Il peut y avoir plusieurs navettes sur un même chantier.





FIGURE 2.4 – Fourrageuse et navette



FIGURE 2.5 – Chantier d'afourragement



FIGURE 2.6 – Dépose du fourrage au pied du silo



FIGURE 2.7 – Dépose et tassage

**Tracteur étaleur :** ce tracteur sert à étaler dans le silo le fourrage déversé par la navette.



FIGURE 2.8 – Tracteur Etaleur

**Tracteur tasseur :** ce tracteur sert à tasser le fourrage ; c'est une tâche précise et non sans danger (risque de chute et de renversement). Son rôle est primordial dans la bonne exécution du tassage et le plus important facteur pour obtenir une fermentation de qualité.



FIGURE 2.9 – Tassage





FIGURE 2.10 – Tassage

### 2.3.2 Méthodologie du remplissage et de tassage du silo

Le remplissage et le tassage du silo est effectué de telle manière à ce que le fourrage soit tassé uniformément sur toute son épaisseur. En vue de réduire la surface de plastique nécessaire pour recouvrir entièrement le fourrage, la forme du silo "couloir" va être plutôt ramassée qu'en longueur. Les murs sont présents pour permettre au fourrage de monter en hauteur et favoriser ainsi l'anaérobie.

Les silos ont généralement une taille de quelques dizaines de mètres sur un peu moins de large. La hauteur des murs est de 1,5m à 2,5m.

**Préparation du silo** Le silo est initialement préparé, les murs et le sol nettoyés. Une bache propre est disposée contre les murs.

**Étalement initial :** La première couche d'ensilage est étalée à une épaisseur de 50 cm. Le tracteur tasseur passe ensuite pour obtenir une épaisseur finale d'environ 30 centimètres pour cette première couche. Une attention particulière est apportée pour tasser les cotés du silo.

**Étalements successifs** Les couches suivantes sont ensuite étalées à 20cm d'épaisseur et aussitôt tassés à 10cm. Encore une fois les côtés du silo sont tassés avec attention car la hauteur augmentant, les tracteurs se trouvent très hauts par rapport au sol et risquent de basculer.

**Isolation hermétique :** Une fois le remplissage et le tassement complétés, le silo est fermé hermétiquement par des baches en polyéthylène lesté. Il est laissé à fermenter à fermenter pendant 6 à 8 semaines.

**Les paramètres cibles :** D'après [19], il faut remplir rapidement et bien compacter. Il faut obtenir plus de 200kg de MS (matière sèche) par  $m^3$ . On peut atteindre 270 kg de MS par  $m^3$  dans un silo-couloir si le fourrage est bien tassé.



FIGURE 2.11 – Le silo après fermentation

### 2.3.3 Risques d'un tassage mal effectué

Toujours d'après [19], dans les silos mal compactés avec moins de 160 kg de MS par  $m^3$  d'ensilage, le silo contient peu de fourrage et l'ensilage est instable. Les mesures montrent que l'oxygène pénètre dans ce cas jusqu'à 2,5m à l'intérieur du tas de fourrage.

**Conséquences** un silo mal compacté a généralement les conséquences suivantes pour un éleveur :

- la fermentation est partielle, ce qui rend l'ensilage instable (la fermentation peut reprendre de manière non contrôlée)
- le niveau d'acidité cible n'est pas atteint, ce qui implique une stérilisation moindre
- le fourrage est beaucoup plus susceptible de pourrir.
- des pertes importante d'ensilage seront à prévoir car le produit sera impropre à la consommation animale.

**Mesurer le tassage :** La mesure du tassage du silo en cours de chantier n'est pas simple. Il faut tout d'abord prendre en compte la teneur en MS du

fourrage, avoir une idée du tonnage récolté, et évaluer le volume effectif de fourrage tassé dans le silo.

De plus, la réaction mécanique du fourrage au tassage va beaucoup varier en fonction du temps d'humidité du fourrage, et aussi de sa nature. Il faudra plus tasser si le fourrage est relativement plus humide, il peut y avoir un comportement légèrement élastique qui fait que le tassage se réduit si le tracteur ne passe pas plusieurs fois en peu de temps.

Tous ces facteurs font que le tassage est difficile à estimer sur le chantier.

## 2.4 Préparation et la conduite du chantier

### 2.4.1 Les différents types d'intervenant

Différents types d'intervenants peuvent monter ou intervenir sur un chantier d'ensilage :

- L'exploitant lui-même
- Les groupements agricoles
- Les prestataires de service agricole

### 2.4.2 Gestion de production

**cible de production** L'exploitant définit à l'avance un objectif de production, basé sur la consommation prévue de son exploitation ( $x$  kg de MS par bête et par jour) pour piloter l'ensilage.

**Eviter la surproduction** l'enjeu est d'éviter la surproduction d'ensilage. Si l'exploitation ne peut consommer sur l'année l'ensilage stocké avant le chantier de l'année suivante, le stock restant est perdu.

Le maïs restant non récolté peut être mis en valeur par d'autres circuits d'exploitation par l'exploitant, par exemple en vendant le maïs sur pied à d'autre exploitation.

Ainsi, permettre la mesure en temps réel de la quantité d'ensilage engrangée lors du chantier permet à un exploitant d'optimiser la mise en valeur de son exploitation.

## 2.5 Conclusion

Nous avons vu que le tassage de silo est une activité stratégique pour une exploitation, qui requiert des moyens lourds, de la planification. C'est de plus une activité très technique, qui est effectuée en parallèle de la récolte, en flux tendu et dont le résultat peut être rendu aléatoire si il n'est pas effectué avec méthode.

La mesure en temps réel du tassement et du volume du silo permet aux opérateurs de travailler mieux et plus vite, et permet à l'exploitation d'optimiser la valorisation de sa production.

# Chapitre 3

## Solution Actuelle à Améliorer

Le présent chapitre s'attache à présenter la première version du système de mesure de tassage de silo mis en place par Tellus Enviroement.

### 3.1 Objectifs initiaux de la version V1

L'objectif initial de ce système est d'apporter une aide à la conduite du tassage sur le chantier d'ensilage en indiquant quelles partie du tassage doit être tassé en priorité.

Il n'y pas de mesure explicite de la taille du tas de fourrage, ni de calcul du volume. Le LIDAR effectue une mesure mesure relative de la hauteur du fourrage et in

### 3.2 Présentation de solution

#### 3.2.1 Architecture de la solution

L'architecture de la première solution peut être représentée par le schéma 3.1 ci-dessous.



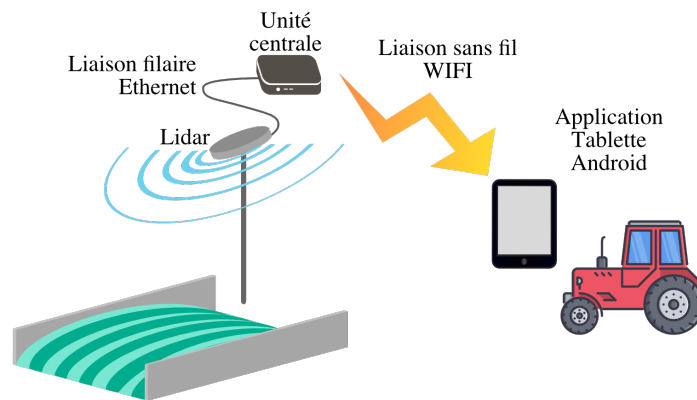


FIGURE 3.1 – Architecture de la solution V1

### 3.2.2 Les sous-systèmes

Le système est composé des éléments suivants :

1. **LIDAR** : Il s'agit d'un équipement à base de laser qui effectue des mesures très rapides et précises du tas de fourrage. Il est situé à 7m de hauteur de manière à bien dominer l'ensemble du silo, et de manière à ce qu'il n'y ait pas d'effet d'horizon qui cache une partie du silo. Pour cela, il est monté sur un mât télescopique, lui-même maintenu par un robuste trépied.
2. **Unité centrale** : Rélée au Lidar au moyen d'une connexion filaire Ethernet, l'unité centrale met en œuvre le système d'exploitation "Robot OS". Elle exécute un programme dédié qui collecte les données générées par le Lidar. Ce programme exploite ces informations pour mesurer avec précision les variations de hauteur du tas de fourrage, et générer une image indiquant les zones à tasser en priorité.
3. **Application tablette Android** : Relié à l'unité centrale par une liaison sans fil WIFI, cette application récupère l'image générée par celle-ci et la présente au conducteur du tracteur.

## 3.3 Points faibles et axes d'amélioration

Selon Tellus Environment, cette première version du système a été utilisée sur environ une dizaine de chantiers dans le courant de l'année 2017, et un retour d'expérience a permis de mettre en évidence plusieurs points faibles et axes d'amélioration.

### 3.3.1 Complexité de mise en oeuvre

Du fait de son architecture, la mise en oeuvre requiert le déploiement de deux équipements distincts pour être opérationnel :

- la **tablette Android** dans le tracteur pour afficher la carte du tas de fourrage
- le bloc **LIDAR + Unité centrale** qui est perché en haut d'un mat de 7m de hauteur.

Cette configuration induit plusieurs difficultés dans la mise en oeuvre du système qui peuvent porter préjudice à son utilisabilité.

**Installation délicate du Lidar :** En début de chantier le block LIDAR + Unité Centrale doit être positionné et orienté de manière à pouvoir couvrir la totalité du silo. Il faut donc une surface relativement stable à proximité directe du silo pour installer le trépied qui maintient le mat télescopique.

Ensuite il faut positionner le Lidar en direction et inclinaison. Le support du Lidar en haut du mat n'étant pas motorisé, il faut donc effectuer ce réglage "à la main", soit en montant sur une échelle pour y accéder et viser à l'oeil nu, soit en vérifiant le cadrage sur la tablette Android et descendre le cas échéant le lidar pour modifier le cadrage, puis le remonter encore, jusqu'à obtenir un réglage satisfaisant.

L'installation du Lidar est donc délicate, et est à l'usage consommatrice de temps. Or le temps est une denrée précieuse sur un chantier d'ensilage, et certains opérateurs ont une exigence forte sur la rapidité de déploiement de leurs équipements. La perception de ces opérateurs est donc que cette exigence n'est pas complètement satisfaite par le système dans sa forme actuelle.

**Connectivité WIFI peu adaptée à l'environnement du chantier :** Tout au long du chantier, la connectivité entre la tablette Android et l'unité centrale est assurée au moyen d'un réseau sans fil WIFI. Or, un réseau WIFI requiert lui aussi une configuration initiale qui peut être problématique et consommatrice de temps.

De plus la portée d'un réseau WIFI, dans les meilleures conditions sera de quelques dizaines de mètres. L'ordre de grandeur de cette portée est donc de l'ordre de la taille des silos. Ceci implique que, si le tracteur équipé de la

tablette est à l'entrée du silo opposé à celle où est installé le LIDAR, les conditions de communication sont loin d'être optimales.

Il en résulte donc des pertes de connexion, qui font que la tablette n'est plus en mesure d'afficher les informations de l'état de tassage du silo. Le conducteur d'intervenir manuellement pour ré-établir la connexion.

### 3.3.2 Limitation du système

**Informations limitées :** Le système dans sa forme actuelle ne fournit en fait qu'une seule information : l'état de tassage du silo, c'est dire une information sur la différence de hauteur sur l'ensemble du silo. Il n'y a pas de mesure numérique précise.

Une demande des opérateurs est donc de faire évoluer le système de manière à ce qu'il permette de mesurer précisément le volume du fourrage ensilé.

**Pas de calibrage :** Le système ne fait aucune calibration de ses mesures en fonction du chantier. Ceci empêche de faire évoluer à bas coût le système pour ajouter des fonctionnalités qui ajouteront de la valeur au système.

**Lidar placé très près du silo :** Pour apporter des informations utiles et exploitables aux les tasseurs, le LIDAR doit être placé le plus près possible du silo. Or cela veut dire que les tracteurs doivent passer dans certains cas très près du mat sur lequel repose le Lidar, au risque de le faire basculer. Les tracteurs doivent donc apporter une attention particulière pour préserver le Lidar, ce qui les gêne dans leur travail.

### 3.3.3 Axes d'améliorations pour la V2

Sur la base des points faibles et limitations listés ci-dessus, Tellus Environment envisage donc de faire évoluer la solution de manière à supprimer ses défauts majeurs et lui permettre d'obtenir des informations précises et chiffrées sur l'état de tassage du silo.

Les facteurs limitants sont les suivants :

- des éléments répartis à différents endroits du chantier requiert un réseau sans fil peu fiable dans l'environnement d'un chantier d'ensilage
- La configuration initiale délicate du Lidar est consommatrice de temps
- Le Lidar à proximité immédiate du silo gêne les tracteurs.

**Supprimer les facteurs limitants de mise en oeuvre :** Monter tous les éléments directement sur la tracteur permet d'éliminer tous les facteurs limitants. En remplaçant le lidar fixe à proximité du silo par un ou plusieurs Lidars montés directement sur le tracteur, et donc en montant l'unité centrale elle aussi sur le tracteur, nous pouvons relier tous les sous-système par un cablage fixe à bord du tracteur tasseur.

Cette configuration élimine le besoin de mettre en oeuvre un réseau sans fil. Elle élimine aussi la nécessité de déployer un appareil dont la mise en place est délicate en début de chantier, puisque le tracteur sera équipé en permanence des capteurs.

**Obtenir des informations supplémentaires sur l'état de tassage :** Il est par contre évident qu'obtenir une vue d'ensemble de l'état de tassage du silo à partir d'une plateforme mobile qui de plus aura une vue parcellaire du silo à chaque instant requièrera un algorithme de calcul bien plus complexe que dans la première version du système.

En effet, le nouveau système devra être en mesure de reconstituer la scène du chantier dans sa globalité à partir de mesures fragmentaires.

Par contre un système qui atteindrait cette performance sera en mesure de fournir des informations à la fois précises et nombreuses aux utilisateurs, et ce à un coût relatif moindre. L'une de ces mesures, le **volume du tas de fourrage**, sera immédiate.

## 3.4 Conclusions

Nous avons vu que le premier système permettait de fournir aux utilisateurs une mesure de l'état de tassage d'un fourrage dans un silo horizontal (couloir ou semi-enterré).

Nous avons vu que ce système, bien qu'opérationnel, était sujet à des défauts qui requièrent des modifications.

Ces modifications impliquent le développement d'un procédé qui permette à partir d'un ensemble de mesure partielles, potentiellement à des instant différents, de reconstituer virtuellement le chantier dans son ensemble. Cette reconstitution devra être faite de manière **autonome**, en **temps-réel** et avec **précision**.

Les outils mathématiques et technologiques seront ceux des systèmes mobiles autonomes, ce seront ceux de la **robotique**.

# Deuxième partie

## Outils Importants

# Chapitre 4

## Capteurs et Détecteurs en Robotique

Notre projet va s'attacher à mesurer un volume d'ensilage à partir d'une plateforme mobile. Cette plateforme doit donc être en mesure de déterminer sa propre position dans le théâtre d'opération, de mesurer le silo et de mesurer la surface d'ensilage qui y est tassée.

Ces informations sont recueillies à l'aide de détecteurs dont la mise en oeuvre sera une partie majeure du projet.

### 4.1 Capteurs et Détecteurs

Cette section a pour objet de rappeler les définitions de bases des capteurs et des détecteurs et à expliciter leurs différences.

#### 4.1.1 Les Capteurs

Le terme de **capteur** recouvre un ensemble de procédés très large qui cherche à convertir une grandeur physique quelconque en une grandeur électrique.

Selon [1], le **mesurande** est la grandeur physique objet de la mesure, (déplacement, température, pression, etc) que l'on représente par  $m$ . L'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son **mesurage**.

Un capteur est un dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désigné par  $s$  et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m) \quad (4.1)$$

$s$  est la **grandeur de sortie** ou **réponse capteur**,  $m$  est la **grandeur d'entrée** ou **excitation**. La mesure de  $s$  doit permettre de connaître la valeur de  $m$ . Pour des raisons de facilité d'exploitation, les capteurs sont utilisés de sorte qu'une relation linéaire entre les variations  $\Delta s$  de la grandeur de sortie et celles  $\Delta m$  de la grandeur d'entrée :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m \quad (4.2)$$

Dans ce cas  $S$  est appelée la **sensibilité du capteur**.

**Types de capteurs :** Il existe une multitude de type de capteurs. Ils sont caractérisés par la grandeur qu'ils mesurent et le phénomène physique exploité pour obtenir cette mesure, ainsi que la nature de l'information de sortie (analogique, numérique, tout ou rien).

Pour une liste exhaustive de nombreux types de capteurs, ainsi que leur principes physiques et leur mise en oeuvre, voir [1] et [6].

#### 4.1.2 Les détecteurs

Selon [21] un détecteur est un dispositif technique (instrument ou substance) qui change d'état en présence de l'élément ou de la situation pour lequel il a été spécifiquement conçu. Un détecteur peut de plus apporter des précisions qualitatives ou quantitatives sur le phénomène observé.

La principale différence de nature entre un capteur et un détecteur est qu'un détecteur est souvent composée en partie de un ou plusieurs capteurs afin de déterminer son état en fonction de l'environnement.

La plupart des détecteurs que nous considérerons seront des détecteurs de présence à distance. Nous nous concentrerons donc sur ceux-ci pour la suite de ce chapitre.



## 4.2 Les détecteurs de présence à distance en robotique

Les détecteurs de présence à distance en robotique sont utilisés pour détecter certaines caractéristique géométriques de l'environnement. Ils peuvent être de 2 grands types :

- les **détecteurs passifs** : microphones, caméras vidéo, etc
- les **détecteurs actifs** : sonars, radars, lidar, etc

### 4.2.1 Détecteurs passifs

Les détecteurs passifs observent l'environnement au moyen de leurs capteurs sans émettre de signaux. Ils sont donc totalement dépendant des rayonnements que leur cible émet pour pouvoir la détecter.

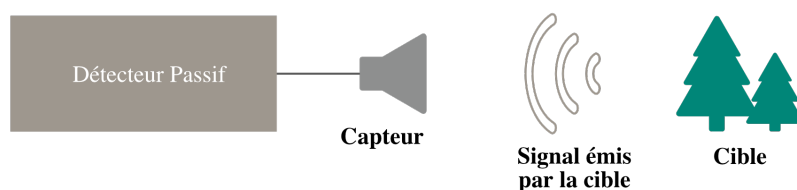


FIGURE 4.1 – Schéma de principe d'un détecteur passif

Les signaux qui peuvent être détectés peuvent être de différents types : ondes sonores, lumière, infra-rouge, ondes radio, etc. Nous pourrions aussi mentionner le contact physique (toucher).

En plus de la présence simple de la cible, la direction et l'intensité du signal peuvent être mesurées pour qualifier la cible. Par contre, la mesure de distance n'est pas immédiate ; requiert l'utilisation de techniques de paralaxe et donc soit d'avoir plusieurs détecteurs pour effectuer une triangulation, soit de déplacer le détecteur au court du temps, en faisant l'hypothèse que la cible n'est pas mobile.

La portée de détection d'un tel dispositif dépend de la sensibilité du capteur ainsi que de l'intensité du signal émis par la cible. Cette dernière n'étant pas forcément connue avec précision, la notion de portée n'est pas forcément bien définie.

Sur le projet, le type de détecteur passif qui sera probablement utilisé sera une ou plusieurs caméra vidéo.

### 4.2.2 Détecteurs actifs

Les détecteur actifs émettent un signal de forte intensité à l'aide d'un transducteur et "écoutent" le signal de retour réfléchi sur une éventuelle cible.

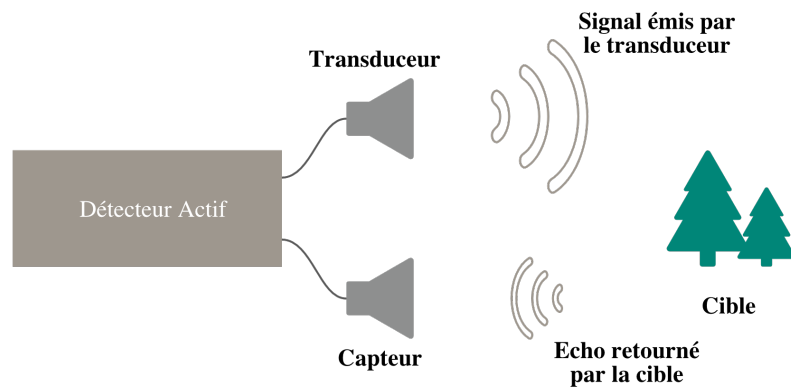


FIGURE 4.2 – Schéma de principe d'un détecteur actif

L'avantage majeur des détecteurs actifs par rapport aux détecteurs passifs est que la mesure de **distance** de la cible détectée est directe : en mesurant le temps  $t$  écoulé entre l'émission du signal et la détection du signal réfléchi et en connaissant la vitesse de propagation du signal  $v$ , la distance  $d$  de la cible sera donnée par :

$$d = \frac{t}{2v} \quad (4.3)$$

La **portée** dépend de la puissance du signal émis, de la capacité de la cible à réfléchir le signal et de la sensibilité du capteur.

### 4.2.3 Caractéristiques d'un détecteur de présence :

Un détecteur de présence peut être caractérisé par les paramètres suivants :

**Directivité et Ouverture :** Un détecteur va souvent avoir une direction privilégiée d'efficacité, associée à une **ouverture** qui décrit la largeur angulaire maximale de part et d'être de la direction principale du détecteur.

Un détecteur avec une très grande ouverture pourra détecter un objet sans être pointé directement vers cet objet, mais ne pourra pas indiquer intrinséquement la direction de cet objet précisément.

Par contre un détecteur avec une petite ouverture pourra indiquer avec une grande précision la direction de la cible, mais devra d'abord être pointé directement vers cette cible pour la détecter d'abord. C'est pour cela que la plupart des détecteurs à petite ouverture sont pilotés de manière à balayer le milieu dans le plus de directions possible.

**Sur le projet,** le type de détecteur actif qui sera utilisé est le LIDAR (LIght Detection And Ranging) qui utilise un faisceau Laser très mobile et très précis pour fournir une mesure de l'environnement en 3D.

## 4.3 Les capteurs de position

Les capteurs de la robotique sont essentiellement les capteurs et détecteurs qui permettent de mesurer le déplacement du véhicule autonomes. Ils sont de plusieurs types.

### 4.3.1 Odométrie

L'objet de l'odométrie pour un système mobile est de détecter ses propres déplacements afin de déterminer sa nouvelle position sur la base de capteurs appropriés.

Par exemple, une système mobile à roue peut compter le nombre de tours de roue effectués pour calculer la distance parcourue. De nombreux capteurs utilisent ce principe. Ils sont cependant peut précis car il est difficile de détecter les dérapements et l'absence de mesure de l'accélération latérale fait que les virages introduisent beaucoup d'incertitude dans l'estimation de la position.

### 4.3.2 Centrales inertielles

Les centrales inertielles sont des équipements mettant en oeuvre des accéléromètres et des gyroscopes qui permettent de suivre les déplacements du véhicule dans toutes les directions. La précision est généralement très bonne à court terme, mais ces centrales doivent régulièrement être recalées dans l'espace par des informations précises issues d'autres équipements.

### **4.3.3 GPS**

Le GPS est de plus en plus utilisé pour fournir une information précise de localisation d'un véhicule sur un théâtre donné, et sera très probablement utilisé par notre projet.

## **4.4 Les capteurs de type "Direction"**

Capteur qui ne sont en mesure de fournir une information que sur la direction de l'objet détecté, sans pouvoir fournir d'information intrinsèque quand à la distance de l'objet détecté.

# Chapitre 5

## Localisation, Cartographie, SLAM

Cette section positionne succinctement le problème du SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) et liste la bibliographie qui a été rassemblée sur le sujet.

### 5.1 Positionnement du problème

**Localisation requiert une carte**

**Cartographe requiert de connaître sa position**

**SLAM permet de résoudre cette problématique "Oeuf et poule"** en mettant à disposition des outils permettant d'exploiter au mieux les informations issues des différents types de capteurs disponibles.

**Localisation, vecteur d'état :** système de coordonnées, vecteur d'état.

### 5.2 Maintenir de le vecteur d'état

**Mise en place de la boucle de rafraichissement, filtres de Kalman**

**Selectionner des points de repère, les maintenir**

## 5.3 Bibliographie

Les sources suivantes seront très utilisées dans le cours du stage, dans les sujets suivants :

**Coordonnées Homogènes :** [8] comporte de très nombreuses références sur la représentation du déplacement des robots exploitant les coordonnées homogènes.

**Exploitation des données LIDAR :** [17] introduit des techniques d'exploitation des données issues d'un LIDAR afin d'en extraire des invariants et construire une carte. [15] apporte une description physique des mécanismes de détection par Laser.

**SLAM :** La bibliographie a pu être rassemblée pour la mise en oeuvre des techniques SLAM : [14], [7], [16], [4].

**Vision par ordinateur :** Les techniques du SLAM dérivent souvent de techniques initialement inventées pour la vision par ordinateur. Les livres suivants seront donc certainement utiles dans le courant du stage : [11], [10], [2]

**Filtres de Kalman :** Le vecteur d'état du véhicule autonome est maintenu en incorporant les mesures des paramètres de l'environnement par l'intermédiaire d'algorithmes basés sur les filtres de Kalman. Les références [9] et [24] traitent de ce sujet en profondeur.

# Chapitre 6

## Prototypage

### 6.1 Prototypage Scientifique des Algorithmes

Le prototypage des algorithmes sera effectué sous Matlab et sous SciPy.

### 6.2 Prototype de mise en œuvre

Le prototypage de mise en oeuvre sera effectué sous l'environnement **Robot OS** (ou **ROS**) qui est un système d'exploitation et de programmation optimisé pour le développement et la mise en oeuvre de système autonomes. [13] offre une bonne référence pour démarrer la programmation, la simulation et le test de ces systèmes.

# Troisième partie

## Application Numérique



# Chapitre 7

## Application Numérique

L'objectif de cette partie est de concevoir et mettre en oeuvre un algorithme de détection de surfaces planes à partir d'un nuage de points, pouvant être issu d'un capteur de type "portée et direction".

Nous établir tout d'abord le problème direct qui nous permettra de générer le nuage de points à partir d'un modèle de scène comprenant une surface horizontale représentant le sol, ainsi qu'un mur.

Nous mettrons en place les outils mathématiques qui seront mis en oeuvre dans la tentative de reconstruction de la scène à partir du nuage de point.

Un programme d'application sera enfin présenté.

1. Produire des données de référence à partir de modèle de structure 3D connus.
2. Introduire bruit gaussien sur les points, de manière à produire un nuage de points bruité
3. Développer un technique d'inversion permettant de détecter la forme et les dimensions des structures à partir des nuages de points bruités
4. Evaluer les marges d'erreur des modèles inversés
5. Dégager les axes de progression en terme de performance de calcul : l'objectif est d'obtenir des outils qui produisent des résultats en quelques secondes.

## 7.1 Problème direct

Le problème direct a pour objectif de générer un ensemble de points qui simule la mesure par un équipement de type LIDAR d'une scène qui comprend un sol et un simple mur très fin.

### 7.1.1 Modélisation de la scène

La modèle de scène qui sert à générer le nuage de points est représenté dans figure ci-dessous.

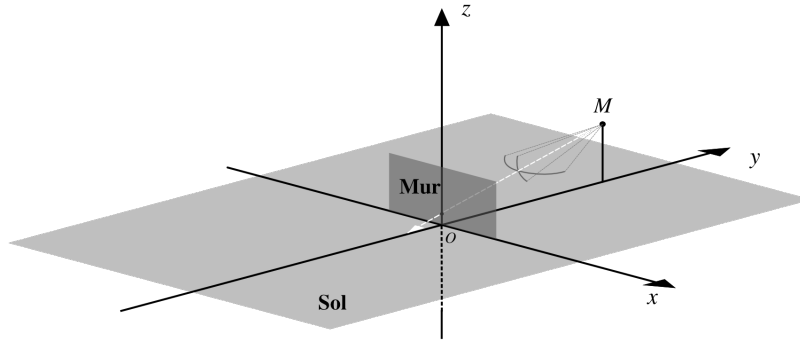


FIGURE 7.1 – Représentation du modèle servant au problème direct.

La scène est constituée d'un plan d'équation  $z = 0$  représentant le sol, et d'une portion de plan d'équation  $y = 0$  représentant le mur, situés dans un repère orthonormé de centre  $O$  et d'axes  $(Ox)$ ,  $(Oy)$  et  $(Oz)$ . Le mur est centré horizontalement de part et d'autre du point  $O$  sur l'axe  $(Ox)$  entre les coordonnées  $x_{min}$  et  $x_{max}$ . La hauteur du mur est délimitée par  $z_{min} = 0$  en bas et par  $z_{max}$  en haut.

Le LIDAR est situé au point  $M$  de coordonnées  $(M_x, M_y, M - z)$  et balaie la scène à l'aide d'un faisceau très fin donc la direction est donnée par 2 angles :

- $\theta$  est l'angle horizontal du faisceau par rapport à l'axe  $(Ox)$
- $\phi$  est l'angle vertical du faisceau par rapport à l'axe  $(Oz)$

Le LIDAR est orienté dans une direction privilégiée. Il est de plus caractérisé par une ouverture horizontale et une ouverture verticale qui font que les angles de balayage permis vont varier respectivement des valeurs  $\theta_{min}$  à  $\theta_{max}$  et des valeurs  $\phi_{min}$  à  $\phi_{max}$ .

Enfin le LIDAR ne prend pas de mesures continues, il prend des échantillons pour des valeurs discrètes de  $\theta$  et  $\phi$ . Les relevés seront faits pour  $N$  valeur de  $\theta$  et pour  $M$  valeurs de  $\phi$ .

**Enoncé du problème direct :** Etant donné la scène décrite ci-dessus, et étant donnés les angles de mesure  $\theta_i$ , pour  $1 \leq i \leq N$  et  $\phi_j$  pour  $1 \leq j \leq M$ ,

Trouver les  $N \times M$  points  $S_{ij}$  telles que les coordonnées  $S_x, S_y$  et  $S_z$  représentent le point d'intersection de la première surface rencontrée par le faisceau provenant de M.

### 7.1.2 Calcul du nuage de point

Pour représenter une poistion de  $M$  réaliste, nous posons  $M_y > 0$ , et  $M_z > 0$ . Par cette disposition, le faisceau sera plongeant du haut vers le bas.

**Vérification d'interception par le mur** Pour un  $\theta_i$  et un  $\phi_j$  donnés nous vérifions cette interception en faisant deux projections l'une après l'autre.

**Projection sur  $(Oyz)$  :** en projetant la scène sur  $(Oyz)$ , nous obtenons le schéma suivant :

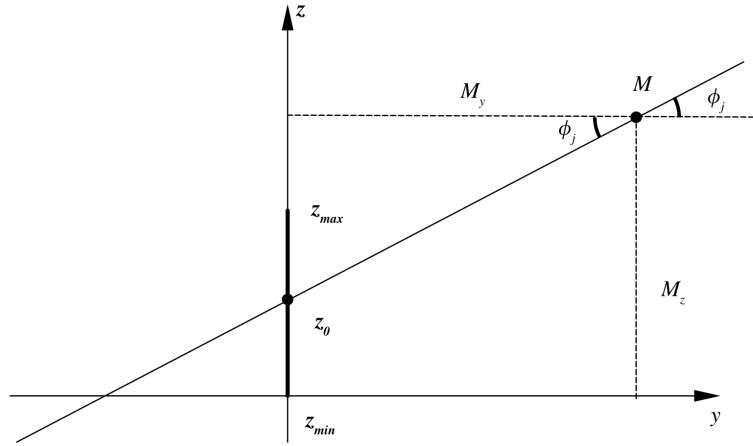


FIGURE 7.2 – Projection sur  $(Oyz)$

A partir de cette figure nous pouvons retrouver l'altitude  $z_0$  de l'intersection de la droite de pente  $\phi_j$  avec le plan  $(Oxz)$  : dans le repère  $(Oyz)$  l'équation de la droite de pente  $\phi_j$  est :

$$z = y \cdot \tan(\phi_j) + z_0 \quad (7.1)$$

En particulier au point M, cette équation devient :

$$M_z = M_y \cdot \tan(\phi_j) + z_0 \quad (7.2)$$

d'où :

$$\boxed{z_0 = M_z - M_y \cdot \tan(\phi_j)} \quad (7.3)$$

**Projection sur  $(Oxy)$  :** A partir de la projection de la scène sur le plan  $(Oxy)$  nous pouvons calculer la coordonnée  $x_0$  de l'intersection du faisceau avec le plan du mur  $(Oxz)$  :

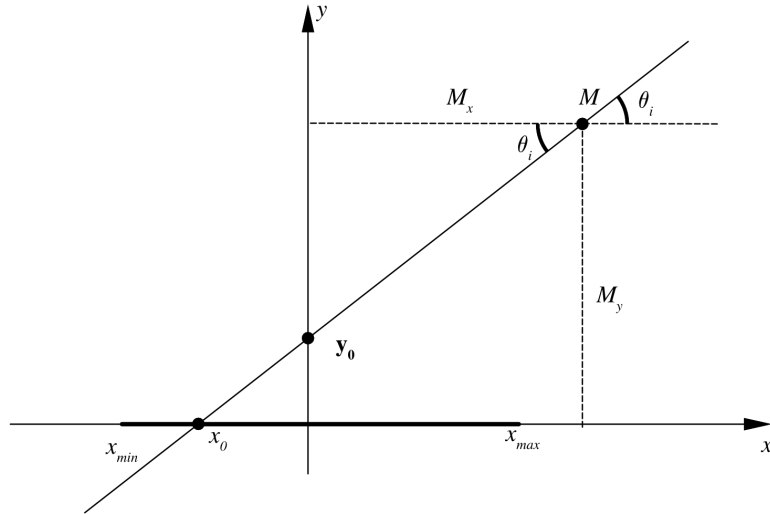


FIGURE 7.3 – Projection sur  $(Oxy)$

L'équation de la droite passant par M et de pente  $\theta_i$  est :

$$y = x \cdot \tan(\theta_i) + y_0 \quad (7.4)$$

En particulier, au point M nous avons :

$$M_y = M_x \cdot \tan(\theta_i) + y_0 \quad (7.5)$$

d'où

$$y_0 = M_y - M_x \cdot \tan(\theta_i) \quad (7.6)$$

De plus, pour  $y = 0$  nous obtenons :

$$x_0 \cdot \tan(\theta_i) + y_0 = 0 \quad (7.7)$$

$$\iff x_0 = \frac{-y_0}{\tan(\theta_i)} \quad (7.8)$$

d'où :

$$\boxed{x_0 = M_x - \frac{M_y}{\tan(\theta_i)}} \quad (7.9)$$

**Vérification que le faisceau touche le mur :** Pour vérifier que le faisceau touche bien le mur, pour chaque couple  $(\theta_i, \phi_j)$  nous calculons  $x_0$  et  $z_0$  à partir de (7.9) et (7.3) et nous vérifions si ces valeurs vérifient :

$$\begin{aligned} x_{min} &\leq x_0 \leq x_{max} \\ z_{min} &\leq z_0 \leq z_{max} \end{aligned}$$

Si nous n'avons pas ces conditions alors le faisceau n'intercepte pas le mur, et nous pouvons calculer à quelles coordonnées le faisceau intercepte le sol.

**Interception avec le sol :**

En reprenant (7.1) et en posant  $z = 0$ , nous obtenons :

$$y_s \cdot \tan(\phi_j) + z_0 = 0 \quad (7.10)$$

donc

$$y_s = -\frac{z_0}{\tan(\phi_j)} \quad (7.11)$$

d'où

$$\boxed{y_s = M_y - \frac{M_z}{\tan(\phi_j)}} \quad (7.12)$$

Pour trouver  $x_s$ , nous utilisons (7.4) en posant  $y = y_s$  :

$$y_s = x_s \cdot \tan(\theta_i) + y_0 \quad (7.13)$$

donc

$$x_s = \frac{y_s - y_0}{\tan(\theta_i)} \quad (7.14)$$

d'où

$$\boxed{x_s = \frac{y_s - My}{\tan(\theta_i)} + M_x} \quad (7.15)$$

### 7.1.3 Implémentation du problème direct

L'algorithme de la résolution du problème direct a été implémenté sous Matlab. En voici une représentation graphique pour une hauteur de mur de 1,5, une largeur de 20 unités.

Le point M (position du LIDAR) est situé aux coordonnées suivantes :

$$M_x = 0 \quad (7.16)$$

$$M_y = 10 \quad (7.17)$$

$$M_z = 1 \quad (7.18)$$

L'ouverture du LIDAR est de  $140^\circ$  horizontalement et de  $30^\circ$  verticalement. L'échantillonnage est de 100 échantillons horizontaux et de 40 échantillons verticalement.

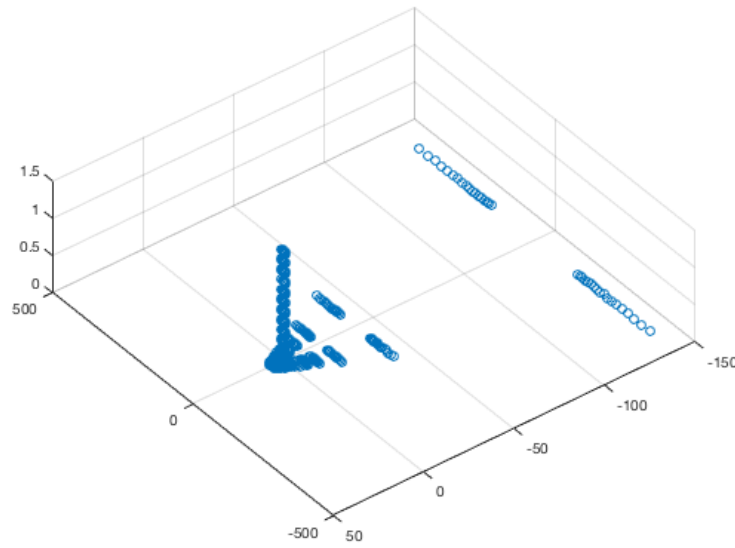


FIGURE 7.4 – Nuage de point généré sous Matlab

## 7.2 Problème Inverse

Cette section présente une méthode qui permet de déterminer si un nuage de point contient des points qui appartiennent à des mêmes portions de plan, et ainsi tenter de délimiter des surfaces planes qui aurait été scannées lors du problème directe.

Cette méthode se base sur une méthode de régression linéaire pour vérifier itérativement si certains sous-ensembles de points appartiennent à un même plan ou non.

### 7.2.1 Ajuster un plan à un nuage de point dans l'espace

Selon [18] et [3], il est possible d'ajuster un plan à partir d'un nuage de points en utilisant un méthode de régression linéaire.

Prenons un ensemble de points  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  avec  $i = 1, \dots, N$ , et tentons d'approcher un modèle  $(a, b, c)$  de manière à ce que nous ayons :

$$z_i = ax_i + by_i + c + \epsilon_i \quad (7.19)$$

où  $\epsilon_i$  est l'erreur d'approximation.

En prenant en compte l'ensemble des points  $P_i$ , nous obtenons le système d'équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ & \vdots & \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

En posant

$$y = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ & \vdots & \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

et



$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

l'équation (7.20) devient :

$$\boxed{y = X\beta + \epsilon} \quad (7.25)$$

Nous cherchons le paramètre  $\hat{\beta}$  qui minimize l'erreur totale :

$$\sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \quad (7.26)$$

$\hat{\beta}$  est donnée par :

$$\boxed{\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y} \quad (7.27)$$

si  $X$  est correctement conditionnée :  $\det(X^T X) \neq 0$ ,

### 7.2.2 Adaptation à une recherche de plan arbitraire

La regression linéaire décrite dans ?? doit être utilisée avec précaution dans notre cas. En effet, si nous devions tenter de détecter une paroi verticale, la matrice  $X^T X$  ne serait pas conditionnée correctement et son déterminant serait très proche de 0.

Il faut donc adapter le système de coordonnées si nécessaire et chercher (chapitre non terminé par manque de temps.)

## Quatrième partie

### Conclusions du Projet Preliminaire au Stage

# Chapitre 8

## Objectifs SMART du Stage

SMART :

- **Spécifique** : Les objectifs du stage sont bien spécifiés
- **Mesurable** : Les objectifs du stage étant bien spécifiés, les résultats mesurables attendus associés sont clairs.
- **Atteignable** : Comme l'état du présent rapport le montre, les sujets à aborder sont nombreux, vastes et complexe. Les objectifs du stage seront atteignables seulement si un chemin réaliste de développement et de mise au point peut être mis en place avec Tellus Environnement.
- **Réaliste** : De nombreux outils Open Source sont disponibles pour mettre en place un système SLAM et le simuler sans forcément avoir la plateforme physique. Cette dernière est développée en parallèle par Tellus Environment.

Le stage sera un succès si un procédé SLAM est d'abord conçu de manière adaptée à la demande, puis mis en oeuvre programmatiquement de manière à être rapidement adaptable et maintenable. Le stagiaire étant un programmeur confirmé, cette mise en oeuvre ne devrait pas être un facteur bloquant majeur. Par ailleurs Tellus Environment dispose d'une vraie expertise dans le traitement des données par filtre de Kalman du fait de son expérience dans le relevé de données géophysiques. Les compétences sont donc là pour que les chances de succès du stage existent. Il faudra cependant être vigilant avec Tellus Environment dans la définition du chemin de développement et être attentif au développement.

- **Temporellement Défini** : L'objectif du stage est d'avoir un système opérationnel pour fin Septembre 2018. Un planning de développement sera mis en place avec Tellus Environment pour atteindre cet objectif.

# Chapitre 9

## Conclusion

La préparation de ce stage nous a permis de découvrir l'ensilage, un aspect du monde de l'élevage actuel à la fois primordial et très technique. Nous avons pu voir son importance économique et les contraintes de mises en oeuvre des chantiers d'ensilage.

Nous avons abordé le monde des véhicules autonomes, dont les techniques seront nécessaires pour la mise en oeuvre du projet de stage, basées sur des techniques mathématiques issues du contrôle optimal et de l'estimation de paramètres, ainsi que la vision par ordinateur.

Ce stage permettra de mélanger le monde rural, issu de la tradition avec celui de la robotique et de l'intelligence artificielle, en vue d'aboutir à une application d'"Agriculture de Précision".

# Annexe A

## Sujet de stage

Le sujet de stage est inclus dans les deux pages suivantes.

## Définition du stage

Titre du stage : Etude et développement d'outils mathématiques pour estimer, en temps réel, le tassage et le volume d'un silo de maïs à partir de capteurs embarqués

<p>Nom de l'entreprise : Tellus Environment          Domaine d'activité : cartographie du sol et du sous-sol          Représentant de l'entreprise : Geoffroy Etaix          Qualité : PDG          N° Siret : 752 182 824 00017          N°NAF : 6201Z          Statut juridique : SAS          Effectif : 5 dont 1 doctorant à l'IRISA</p>	<p>Adresse : Centre des affaires Cicea          2 rue du courtill          35170 Bruz          Tel : 02 99 52 36 93          Web : <a href="http://www.tellus-environment.com">www.tellus-environment.com</a>          Mel : <a href="mailto:contact@tellus-environment.com">contact@tellus-environment.com</a>          Signataire de la convention : Geoffroy Etaix</p>
<p>Nom des encadrants de stage : Geoffroy Etaix &amp; Bruno Wirtz          Sa qualité : CEO et CTO          Service : Tellus Environment          N° téléphone : 02 99 52 36 93          Email : <a href="mailto:geoffroy.etaix@tellus-environment.com">geoffroy.etaix@tellus-environment.com</a></p>	<p>Chargé du suivi administratif : Geoffroy Etaix          Qualité : CEO          N° téléphone : 06 66 61 90 88          Email : <a href="mailto:geoffroy.etaix@tellus-environment.com">geoffroy.etaix@tellus-environment.com</a></p>

Tellus Environment est une startup fondée en juillet 2012 qui valorise une technologie de traitement du signal d'inversion 3D. Tournée vers les défis actuels de l'environnement, la société propose des cartographies du sol et du sous-sol de haute résolution pour les secteurs cibles des sites et sols pollués, de l'agriculture de précision, de l'archéologie préventive et de la détection de réseau. Pour répondre aux besoins exigeant de ces secteurs, notre startup met en œuvre des solutions high tech telles que des logiciels de cartographie 3D, de l'instrumentation embarquée et du traitement du signal.

La thématique et les missions principales :

Calcul du positionnement XYZ du tracteur. Cartographie de l'état de surface d'un silo. Calcul du volume du silo. Les capteurs embarqués sont des télémètres, caméras, GPS ou positionnement local, centrale inertielle.

L'objectif du stage est de développer un module software qui s'intègre à notre plateforme ROS issu du monde de la robotique pour, dans un premier temps, calculer la position d'un tracteur sur un silo de Maïs en temps réel. D'un silo à un autre, nous avons des dimensions et des formes hétérogènes. Il peut par exemple être entouré de mur de parpaing avec des dimensions approximatives de 20m de largeur et 40m de longueur.

On utilisera les caméras positionnées sur le tracteur avec des repères ou des points d'intérêts sur la scène à cartographier. La localisation et cartographie simultanées est classiquement utilisée pour les robots dans un environnement contraint. L'approche par un traitement mathématique video par SLAM (simultaneous localization and mapping) semble pouvoir répondre au besoin.

Dans ce contexte, la mission du stage se décompose de la manière suivante :

- Développement et adaptation d'un module SLAM sur une plateforme ROS qui sera mise à disposition. Chiffrer la précision
- Proposer des améliorations de traitement de données pour améliorer la précision globales en X Y Z
- Prise en compte d'une centrale inertielle avec les angles, le cap. Chiffrer le gain sur la précision
- Produire une cartographie du silo à partir des capteurs embarqués. ( ultra son, leddar)
- Proposer des solutions de traitement temporel pour caractériser au point XYZ, l'état du tassage du silo (gradient temporel ?)
- Développement et intégration sur la plateforme
- Validation en situation réelle.

# Bibliographie

- [1] Georges Asch. *Les Capteurs en Instrumentation Industrielle*. Dunod, 7eme edition edition, 2010.
- [2] Gary R. Bradski and Adrian Kaehler. *Learning OpenCV : computer vision with the OpenCV library*. Software that sees. O'Reilly, Beijing, 1. ed., [nachdr.] edition, 2011. OCLC : 838472784.
- [3] M Bremer. Multiple Linear Regression. page 19, 2012.
- [4] Peter I. Corke. *Robotics, vision and control : fundamental algorithms in MATLAB*. Number v. 73 in Springer tracts in advanced robotics. Springer, Berlin, 2011. OCLC : ocn754988355.
- [5] Christine CUVELIER and Isabelle DUFRASNE. L'ALIMENTATION DE LA VACHE LAITIÈRE Aliments, calculs de ration, indicateurs d'évaluation des déséquilibres de la ration et pathologies d'origine. *Université de Liège, 105p*, 2015.
- [6] Jacob Fraden. *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*. Springer, New York, 3rd ed edition, 2004.
- [7] Peter Giblin, M. de Berg, M. van Kreveld, M. Overmars, and O. Schwarzkopf. Computational Geometry : Algorithms and Applications. *The Mathematical Gazette*, 85(502) :175, March 2001.
- [8] Grigore Gogu, Philippe Coiffet, and André Barraco. *Représentation des déplacements des robots*. HERMES, 1997.
- [9] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews. *Kalman Filtering*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, August 2008.
- [10] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004. OCLC : 804793563.



- [11] Yi Ma, Stefano Soatto, Jana Koseka, and S. Shankar Sastry. *An Invitation to 3-D Vision : From Images to Geometric Models*. Springer, 2004.
- [12] Jean Maciejewski and Brunon Osson. *Productions fourragères*. Editions Lavoisier, September 2015.
- [13] Anil Mahtani, Aaron Martinez Romero, Enrique Fernandez Perdomo, and Luis Sanchez. *Effective Robotics Programming with ROS - Third Edition*. 2016.
- [14] Andréas Nüchter. *3D Robotic Mapping : The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom*. Springer, 2009.
- [15] Gregory R. Osche. *Optical Detection Theory for Laser Application*. Wiley, 2002.
- [16] Søren Riisgaard and Morten Rufus Blas. SLAM for Dummies. *A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping*, 22(1-127) :126, 2003.
- [17] Theodor Sjöstedt. *LIDAR SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES : CLUTTER SUPPRESSION, CLUSTERING AND TRACKING*. 2011.
- [18] Albert Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, January 2005.
- [19] Godi Trachsler. Planifier correctement les silos.
- [20] Wikipédia. Alimentation animale, November 2017. Page Version ID : 142916396.
- [21] Wikipédia. Détection, November 2017. Page Version ID : 142556258.
- [22] Wikipédia. Ensilage, February 2018. Page Version ID : 145640864.
- [23] Wikipédia. Fermentation lactique, February 2018. Page Version ID : 145614846.
- [24] Paul Zarchan and Howard Musoff. *Fundamentals of Kalman filtering : a practical approach*. Number v. 232 in Progress in astronautics and aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Va, 3rd ed edition, 2009. OCLC : ocn457170744.