

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

*ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE
L'INGÉNIEUR*

ICUBE

THÈSE présentée par :

Mélinda BOUKHANA

soutenue le : **15 DECEMBRE 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Informatique

Acquisition et reconstruction 3D de cultures pour l'estimation de surface de feuilles individuelles

THÈSE dirigée par :

M. HÉTROY-WHEELER Franck

Professeur, université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

Mme. DIGNE Julie

Chargée de recherche CNRS, LIRIS

Mme. MORIN Géraldine

Professeure INP Toulouse, IRIT

AUTRES MEMBRES DU JURY :

EXAMINATEURS :

M. BARET Frédéric

Directeur de recherches INRAE, EMMAH

M. GODIN Christophe

Directeur de recherches INRIA, RDP

CO-ENCADRANT :

M. DE SOLAN Benoît

Ingénieur de recherche Arvalis

Acquisition et reconstruction 3D de cultures pour l'estimation de surface de feuilles individuelles

Mélinda BOUKHANA

15 décembre 2021

Version: Version 1

Université de Strasbourg



Icube
Arvalis

Informatique

Acquisition et reconstruction 3D de cultures pour l'estimation de surface de feuilles individuelles

Mélinda BOUKHANA

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. <i>Rapporteur</i> | Julie DIGNE, chargée de recherche CNRS, LIRIS |
| 2. <i>Rapporteur</i> | Géraldine MORIN, professeure INP Toulouse, IRIT |
| 3. <i>Examineur</i> | Frédéric BARET, directeur de recherche INRAE, EMMAH |
| 4. <i>Examineur</i> | Christophe GODIN, directeur de recherches Inria, RDP |
| 5. <i>Directeur de thèse</i> | Franck HÉTROUY-WHEELER, professeur Université de Strasbourg, Icube |
| 6. <i>Co-encadrant de thèse</i> | Benoît DE SOLAN, ingénieur de recherche Arvalis |
| 7. <i>Invité</i> | Sylvain JAY, ingénieur de recherche INRAE, EMMAH |

15 décembre 2021

Mélinda BOUKHANA

Acquisition et reconstruction 3D de cultures pour l'estimation de surface de feuilles individuelles

Informatique

15 décembre 2021

Rapporteurs: Julie DIGNE et Géraldine MORIN

Examineurs: Frédéric BARET et Christophe GODIN

Encadrant: Benoît DE SOLAN

Directeur de thèse : Franck HÉTROUY-WHEELER

Invité : Sylvain JAY

Université de Strasbourg

Sommaire

Introduction	3
1 Acquisition de nuages de points 3D dans un champ de maïs	5
1.1 Acquisition d'images	13
1.1.1 Présentation du matériel et des conditions expérimentales . .	17
1.1.2 Présentation du mode opératoire	28
1.1.3 Quelques résultats (illustrations)	29
1.1.4 Gestion des données obtenues	31
1.1.5 limites des données obtenues à cause de l'expérimentation . .	33
1.2 Reconstruction de nuage de points 3D par photogrammétrie	39
1.2.1 État de l'art des méthodes de reconstruction	39
1.2.2 Présentation des logiciels	45
1.2.3 Étude comparative des méthodes et logiciels	47
1.2.4 Description de notre base de données	61
1.2.5 Conclusion sur la reconstruction de nuages de points	64
1.3 Conclusion sur le processus expérimental et la reconstruction de données	69
2 Modèle synthétique de nuage de points 3D de feuille	71
2.1 Modèles synthétiques de feuille dans la littérature	72
2.2 Modèle synthétique de nuages de points 3D de feuille	76
2.2.1 Description des critères	78
2.3 Validation du modèle	88
2.3.1 Étude de M. Li et al. (2018) et intérêt pour notre validation .	88
2.3.2 Traduction de notre modèle avec les descripteurs de forme traditionnels	91
2.3.3 Visualisation du modèle dans l'espace des descripteurs "tradi- tionnel"	98
2.3.4 Conclusion de la validation	99
2.4 Données synthétiques générées pour les futurs tests	99
2.4.1 Données tests pour l'analyse de sensibilité	101
2.4.2 Cas particuliers	103
2.4.3 Données tests pour l'analyse du comportement des méthodes. Tous les autres critères ont leurs valeurs par défaut.	104
2.5 Conclusion	105

3	Estimation de la surface foliaire par la reconstruction de surface à partir d'un nuage de points : méthodes et processus de l'étude	107
3.1	Contexte	107
3.2	Mesure architecturale sur nuage de points: état de l'art	111
3.2.1	Étude comparative des méthodes de reconstruction de surface pour les feuilles: état de l'art	112
3.2.2	Algorithmes de reconstruction 3D : une sélection	113
3.2.3	Choix des méthodes de reconstruction de surface pour l'étude	115
3.3	Méthodes de reconstruction de surface	117
3.3.1	Reconstruction de maillage	117
3.3.2	Modèles paramétriques	125
3.3.3	Modélisation implicite	132
3.4	Analyse de sensibilité	133
3.4.1	Paramètres testés	133
3.4.2	Méthode de choix des paramètres optimaux	134
3.4.3	Résultats généraux sur les méthodes	138
3.4.4	Détail méthode par méthode	138
3.4.5	Limites de l'analyse de sensibilité pour les paramètres des méthodes	161
3.5	Méthodologie d'obtention des résultats comparatifs	162
3.5.1	Données réelles	162
3.5.2	Prétraitement des nuages de points de données réelles	163
3.5.3	Méthodologie	167
3.6	Conclusion	169
4	Analyse des résultats de l'approche comparative	171
4.1	Résultats sur les données synthétiques	171
4.1.1	Ratio longueur/largeur	174
4.1.2	Courbure	174
4.1.3	Concavité	174
4.1.4	Motif d'échantillonnage	177
4.1.5	Densité d'échantillonnage	177
4.1.6	Échantillonnage non uniforme	180
4.1.7	Bruit d'acquisition	180
4.1.8	Recalage/alignement	188
4.1.9	Trou	190
4.2	Résultat du prétraitement des données	190
4.2.1	Influence d'un filtre manuel	199
4.2.2	Jeu de données issu de la foresterie (châtaignier, bouleau et chêne)	200
4.2.3	Jeux de données du maïs	204

4.2.4	Conclusion générale sur l'utilisation des méthodes de pré-traitement	207
4.3	Résultats sur données réelles	207
4.3.1	Châtaignier, Chêne et Bouleau	207
4.3.2	Maïs	210
4.3.3	Conclusion sur la performance sur les données réelles	213
4.4	Conclusion et discussion des résultats de mesure de surface foliaire .	215
	Conclusion	220
	Bibliographie	229
	Glossaire	263
	Acronymes	271
	Annexes	273
A	Annexes	273
A.1	Analyse de Sensibilité résultat de l'ERAM	273
A.2	Résultats sur les données synthétique	273
A.2.1	Visualisation pour le critère de la courbure	273
A.2.2	Résultats ERAM sur les jeux de données synthétiques	273
A.2.3	Étude de compensation des erreurs sur les jeux de données synthétiques	278
A.3	Résultat jeux de données réelles	284
A.3.1	Résultat ERAM sur les données réelles	287
A.3.2	Résultats statistiques sur le jeu de données forestier	287
A.3.3	Résultats statistiques sur le jeu de données maïs	287
A.3.4	Statistiques ERAM pour chaque méthode et chaque filtre sur les données réelles	287
A.3.5	Résultats du filtrage en prétraitement	293

Introduction

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une bourse CIFRE, avec Arvalis - Institut du Végétal en partenariat avec le laboratoire ICUBE de l'Université de Strasbourg. Arvalis est un institut technique agricole français dont les principaux objectifs sont la recherche appliquée agricole et la diffusion des connaissances et avancées techniques et technologiques. L'institut a aussi un rôle de soutien technique pour les producteurs et d'expert pour le grand public. Plusieurs produits agricoles sont au centre de ses recherches comme, entre autres, la pomme de terre, le maïs, les céréales à paille ou le lin. L'objectif principal de l'ensemble de la filière agricole nationale est de garantir la sécurité alimentaire du pays tout en adoptant des pratiques respectueuses de l'environnement. Ceci se traduit dans les faits par le développement de techniques de culture améliorant le rendement et augmentant la qualité des produits récoltés. Cependant, le milieu agronomique est confronté à de multiples bouleversements : les changements législatifs qui entraînent l'abandon progressif des techniques (notamment chimiques) de culture, le dérèglement climatique sur un territoire au sol et climat déjà hétérogènes combiné à ces nouvelles considérations sanitaires posent un énorme défi aux agronomes et producteurs. Pour relever ce défi, il faut cultiver les espèces les mieux adaptées à l'environnement et qui ont les meilleurs rendements. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir accès au maximum de connaissances possible sur les plantes, et de pouvoir prédire leur développement dans un environnement donné. Pour la prédiction des caractéristiques d'une variété de plantes, les données génomiques sont utilisées. En effet, la présence d'un ou plusieurs gènes conditionne la capacité d'une plante à se développer dans son environnement (par exemple : un gène pour la résistance à une maladie, ou un gène pour la résistance à des vagues de sécheresse). Les techniques permettant de décrire le génome du monde vivant sont largement développées et accessibles. Cependant, pour pouvoir déduire la fonction d'un gène, encore faut-il pouvoir observer son expression : c'est la caractérisation de l'état et du fonctionnement des cultures et elle est appelée le phénotypage. Le phénotypage est par définition l'expression dans un environnement donné du génotype. L'ensemble des données du génotype et du phénotype sont essentielles pour la sélection variétale, la connaissance des plantes et leur fonctionnement, mais aussi pour le pilotage des cultures. Pourtant les données de phénotypage restent très

limitées, car elles sont effectuées avec des méthodes destructrices, qui ont un coût élevé et sont non répétables. Aujourd'hui, le développement de capteurs permet d'envisager des mesures non destructrices et répétables. Il existe de nombreux projets de niveau international (IPPN), européen (EPPN, Emphasis) ou national (PHENOME) qui s'intéressent à cette problématique.

L'entreprise Arvalis développe avec l'INRAE un outil appelé Phénomobile qui permet de mesurer les caractéristiques des cultures en extérieur avec de multiples capteurs (caméras, LiDAR, ...). La Phénomobile se déplace de manière autonome dans un champ et les capteurs sont entièrement automatisés. Le volume de données obtenu permet de classer la Phénomobile dans les systèmes de phénotypage haut débit. Elle est aussi particulière, car elle opère en milieu extérieur et non pas en milieu contrôlé. En effet, la plupart des systèmes actuels de phénotypage haut débit opèrent dans des milieux contrôlés où les plantes sont plantées dans des pots individuels et la chaîne d'acquisition est équivalente à une chaîne de production industrielle. Ce mode de fonctionnement permet d'acquérir de nombreuses données de qualité très élevée et de façon entièrement automatisée. Cependant, les expériences sont fortement limitées par l'impossibilité d'obtenir des données sur les interactions entre voisins et des conditions environnementales simulables deux aspects qui sont essentiels pour la culture agricole.

Actuellement, la Phénomobile est active dans un champ expérimental et réalise des acquisitions de données grâce au LiDAR. La première problématique de la thèse est de montrer que l'acquisition par un système de caméras est réalisable pour l'obtention de nouvelles données architecturales en plus des modalités déjà existantes. Pour ce faire, un protocole d'acquisition et la création d'une base d'images pour la photogrammétrie et d'une base de nuages de points 3D sont présentés associés à des mesures architecturales de référence des plantes numérisées dans le chapitre 1.

Une fois que les modèles 3D numériques sont disponibles, des mesures sur l'architecture des plantes peuvent être entreprises. Suivant les espèces et l'objectif de l'étude, plusieurs mesures sont possibles : par exemple compter le nombre de feuilles, déterminer le volume d'un épi de maïs, obtenir la hauteur de la tige. L'une des mesures les plus importantes est la surface foliaire. En effet, la quantité de lumière reçue par la plante - indispensable pour le processus de photosynthèse - en dépend directement.

Comme l'obtention de cette information est capitale dans l'étude de toutes les plantes, on cherche à automatiser l'obtention de la mesure de la surface foliaire sur des bases de données larges et diversifiées, car acquises avec du phénotypage haut débit. Cependant, la base de données dont on dispose grâce à l'acquisition présentée dans le chapitre 1 ne contient pas des feuilles de géométries variées. Je cherche donc à augmenter mes données d'entrée. Il n'existe pas au moment de l'étude de base de données en libre accès possédant les informations requises, à savoir des nuages de points de feuilles et la mesure de la surface foliaire obtenue avec une méthode de référence. J'ai donc choisi de créer un modèle synthétique de nuages de points de feuille. Le modèle est décrit et validé pour notre application dans le chapitre 2.

Avec l'ensemble des données, à la fois acquises et générées numériquement, il est maintenant possible de réaliser une étude comparative en profondeur sur les méthodes de traitements de nuages de points 3D de feuilles. Dans le chapitre 3, je présenterai les méthodes de reconstructions de surfaces à partir de nuages de points pour la mesure de la surface foliaire. J'expliquerai les raisons justifiant la sélection de chaque méthode de reconstruction de surface et celles justifiant la mise à l'écart des autres. Parmi ces méthodes, deux sont implémentées dont une nouvelle méthode proposée basée sur les surfaces et courbes de Bézier. De plus, je développerai dans ce chapitre la méthodologie de l'étude comparative, à la fois pour choisir les paramètres optimaux d'exécution de chaque méthode de reconstruction sélectionnée dans l'étude et la méthodologie de comparaison des méthodes entre elles. Une base de données de nuages de points de feuille réelle issue du domaine de la foresterie possédant les mesures de référence de la surface foliaire est ajoutée à l'ensemble de la base de données de l'étude. Après la présentation du travail préparatif et la méthodologie de l'étude des méthodes de reconstruction, je détaillerai l'ensemble des résultats obtenus dans le chapitre 4. Ces résultats permettront de conclure sur les limites et avantages de chaque méthode de reconstructions de surface. Je pourrai aussi montrer une chaîne de traitement optimale générale pour l'obtention de l'estimation de la surface foliaire à partir de n'importe quel nuage de points 3D de feuille incluant une méthode de filtrage suivi d'une méthode de reconstruction de surface. L'ensemble de ce travail présente une première approche d'un processus complet de mesures de caractéristiques architecturales de plantes automatiques et fiables.

Acquisition de nuages de points 3D dans un champ de maïs

Dans ce chapitre, l'objectif est d'obtenir des nuages de points 3D représentant un couvert de maïs dans des conditions proches de celles du champ. Les données architecturales en 3D des plantes ont une utilité différente des données obtenues par imagerie 2D comme présenté dans l'article de Chéné et al. (2012). Les auteurs démontrent dans leur article l'intérêt et la faisabilité d'obtenir des nouvelles mesures de phénotypage sur des plantes comme le rosier, le pommier et le yucca, en utilisant une caméra de profondeur. Par exemple, les auteurs peuvent calculer la courbure de chaque feuille, ou l'orientation de la feuille, à partir des données de profondeur. Je présente ensuite, dans l'ordre, différents types de plateforme d'acquisition haut débit spécialisée dans les données phénotypiques architecturales. En premier lieu, je présente un système d'acquisition de données en 2D, mais automatisé. Puis je parle brièvement des systèmes utilisant d'autres capteurs que les caméras numériques, qui permettent d'accéder aux informations 3D. Ensuite, je présente des plateformes d'acquisition de données 3D basées sur des techniques de photogrammétrie. Enfin, je présente deux systèmes automatiques multicapteurs.

Des systèmes d'obtention de données de phénotypage haut débit existent et ne sont pas toujours centrés sur la 3D. Par exemple le système Phenotiki de Minervini et al. (2017) est une station de phénotypage à très faible coût. Elle est composée d'une caméra et d'un Raspberry Pi. Elle permet de faire des acquisitions d'images à n'importe quel intervalle de temps voulu (dans les limites du temps d'écriture en mémoire et du temps de latence de la caméra). Les paramètres d'acquisition sont fixes et avec une connexion internet, le dispositif permet de transmettre les données à la suite du pipeline automatiquement. Le dispositif est montré sur la figure 1.1. Elle n'est cependant pas conçue pour obtenir de l'information 3D, mais plutôt pour automatiser l'ensemble du processus d'acquisition d'image.

D'autres types de plateformes utilisent un capteur permettant d'obtenir directement l'information en 3D. Je présente maintenant quelques systèmes utilisant d'autres capteurs que les caméras numériques. Par exemple Sun et al. (2018) proposent une plateforme de phénotypage composée d'un Lidar monté sur un tracteur (figure 1.2). Elle permet de se déplacer dans un champ avec un véhicule adapté au terrain. Et ses dimensions (hauteur et largeur) sont adaptées à des cultures comme le coton,

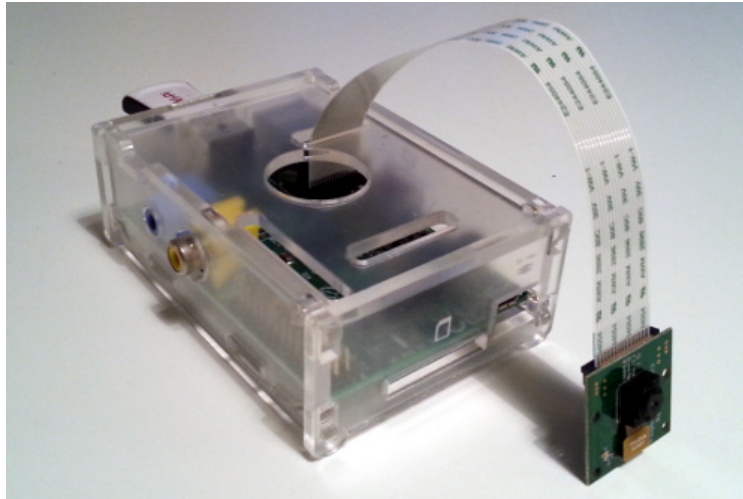


Fig. 1.1.: Dispositif Phenotiki de Minervini et al. (2017) composé d'une caméra et d'un Raspberry Pi.

soja et les blés. L'acquisition se fait rang par rang qui sont écartés d'une distance de 1,5 mètres. La position du capteur est limitée par les panneaux de protection latéraux. De plus, l'acquisition n'est pas automatisée et nécessite au moins un conducteur. Un autre appareil d'acquisition est proposé par Coliaux et al. (2017) qui développe un bras robotique monté par une caméra SoftKinetic (caméra temps de vol*, image de l'appareil dans la figure 1.3). Le montage est modulable et peut être utilisé dans différentes configurations (intérieur/extérieur, mobile/statique). Cependant, le bras ne permet que l'utilisation d'une caméra TOF qui a une résolution très faible. Toutefois, l'obtention d'information 3D avec une caméra numérique ne se limite pas à l'utilisation des méthodes de reconstruction par multivue. Il existe des systèmes n'utilisant qu'une seule caméra numérique. En utilisant par exemple un système d'acquisition composé d'appareil photographique plénoptique* (Bernotas et al. (2019)) les informations de profondeur sont accessibles grâce aux 4 à 8 LED qui l'entourent. Ce système d'acquisition est appelé le Photometric Stereo plant ou PS-Plant. Il permet de suivre la croissance d'*Arabidopsis* en 3D et il est entièrement autonome pour son processus d'acquisition. Le système est schématisé et photographié sur la figure 1.4 issue de l'article (Bernotas et al., 2019). Il est cependant impossible d'utiliser ce système dans un environnement extérieur. En effet il est impossible de complètement contrôler l'éclairage dans ces conditions. La qualité de l'acquisition, et donc du nuage de points reconstruit, en serait alors fortement diminuée.

Cependant, ce qui nous intéresse le plus dans le contexte de cette thèse, c'est d'utiliser un système d'acquisition basé sur la photogrammétrie. Il existe dans l'état de l'art de tels systèmes qui ont tous leurs particularités. Afin d'obtenir des bases de données d'images de taille suffisante pour pouvoir appliquer des méthodes d'apprentissage profond pour la détection d'épi de blé dans un champ, Hasan et al. (2018) utilisent



Fig. 1.2.: Illustration du système d'acquisition de Sun et al. (2018). (A) vue avant de la plateforme d'acquisition; (B) vue arrière la plateforme d'acquisition; (C) modèle 3D de la plateforme d'acquisition; (D) Visualisation centrée sur les capteurs.

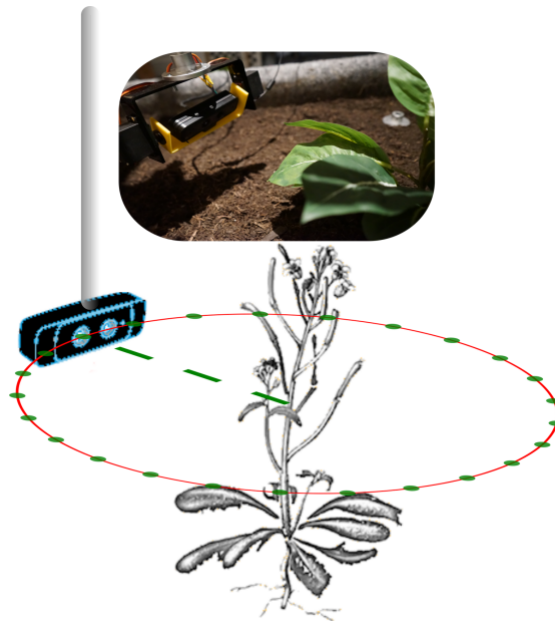


Fig. 1.3.: Dispositif d'acquisition de Coliaux et al. (2017) sur un chemin circulaire autour d'une plante.

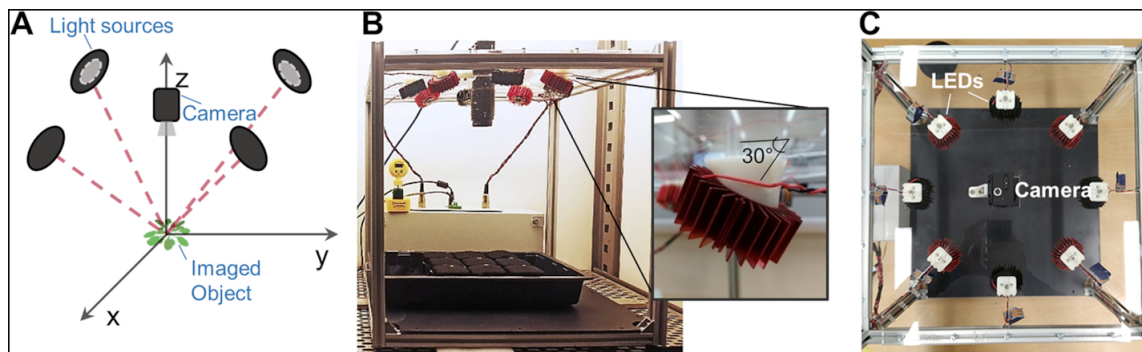


Fig. 1.4.: Dispositif PS-Plant d'acquisition issue de l'article de Bernotas et al. (2019). (A) Le dispositif PS-Plant est constitué de NIR LED disposées de façon circulaire autour d'une caméra centrale positionnée à la verticale des plantes. Les lignes rouges décrivent les directions des rayons lumineux. (B) et (C) montrent le système complet respectivement la vue latérale et du dessus. Chaque LED est positionnée à un angle de 30 °de façon à minimiser la distribution de rayon lumineux dans le champ de vue. Les LED et la caméra sont statiques.

un véhicule terrestre monté d'une caméra RVB haute définition. L'angle de la caméra par rapport au champ est oblique à la verticale du champ. Une image et un schéma du montage du véhicule par rapport au champ provenant de l'article sont présentés sur la figure 1.5. Le véhicule peut porter une paire de caméras pour de la stéréovision, mais ce montage n'est pas utilisé dans cet article. Il n'a donc pas été testé sur l'obtention de données 3D. De plus, le véhicule n'est pas motorisé mais déplacé manuellement. Il y a donc besoin d'au moins un opérateur et aucun contrôle de la vitesse n'est envisageable pendant l'acquisition, ce qui peut aboutir à des résultats de qualité inégale selon la zone du champ. Quant au système Becam (Benet (2009) image sur la figure 1.6) monté d'une seule caméra numérique, il se base sur le principe de la Structure From Motion (SFM) et Jay et al. (2015) développent un pipeline d'acquisition d'un rang de betterave pour retrouver des caractéristiques architecturales de la plante. Elle est cependant limitée par le fait que les plantes sont dans un milieu non contrôlé et non rigide. Les mouvements des plantes par des causes extérieures (comme le vent par exemple) provoquent des erreurs de reconstructions avec la méthode SFM.

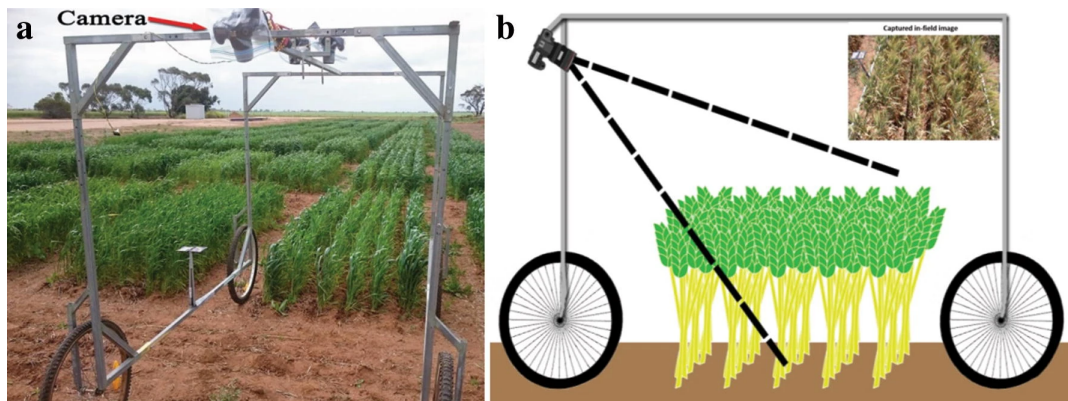


Fig. 1.5.: Véhicule d'acquisition de Hasan et al. (2018) pour l'acquisition en champ. (A) Position de la caméra avec une vue oblique sur le cadre de montage de capteurs monté sur le wagon à quatre roues. (B) Schéma de montage du dispositif d'acquisition vue de profil. Une image échantillon prise avec le dispositif est insérée en haut à droite.

Enfin, des appareils sont équipés de multiples capteurs et permettent donc de combiner les avantages de plusieurs modalités d'acquisition. Virlet et al. (2016) proposent eux de monter une plateforme sur des rails: *Rothamsted's Field Scanner*. La plateforme est entièrement automatisée et équipée de plusieurs types de capteurs, dont plusieurs types de caméras. La plateforme pose à la fois un défi de robotique et de gestion des conditions extérieures. Plus de détails sont disponibles dans l'article et ici l'image de la plateforme est affichée sur la figure 1.7. Beauchêne et al. (2019) présentent leur propre version de *Rothamsted's Field Scanner* nommée **Phénofield®** (voir figure 1.8). Elle permet de moduler la barre de capteurs, dans l'article la barre comporte 2 LiDAR, 4 caméras et 4 spectromètres. L'ensemble du



Fig. 1.6.: Plateforme de phénotypage Becam (Jay et al., 2015)).

processus d'acquisition est automatisé et 8 plateformes Phénofield[®] sont utilisées pour les expériences décrites dans Beauchêne et al. (2019). L'intérêt de ces plateformes est clair, elles permettent d'obtenir de très nombreuses données en extérieur de manière entièrement automatique et de très haute qualité. De plus, contrairement à d'autres systèmes plus mobiles, il est possible d'étudier l'effet de champ de façon automatique car les champs sont suffisamment larges et longs (respectivement, $115,8m \times 11,3m$ et $25m \times 25m$). Il n'est cependant pas envisageable de construire ces rails sur l'ensemble des champs, même si l'on se restreint uniquement aux champs expérimentaux, pour des raisons de coût et de place principalement.

Comme on vient de le voir, il existe maintenant de nombreuses techniques et de systèmes d'acquisition de données pour la 3D. Paulus (2019) se propose de comparer les performances de différents capteurs dans le cadre du phénotypage de plantes. Selon les différents traits qui sont mesurés, l'espèce de plante et les conditions d'acquisition, différentes modalités d'acquisition peuvent être adaptées ou non. Les mesures par LiDAR sont adaptées pour les applications centrées sur l'extraction de paramètres architecturaux à l'échelle d'organes de plante. Mais les résultats sont très dépendant des caractéristiques physiques optiques des plantes numérisées. En plus des effets de bord qui peuvent être source d'erreurs très larges, il faut donc limiter les configurations où les zones limites entre l'arrière-plan et la plante sont très fréquentes lors de l'acquisition. Dans le cas de l'acquisition par des méthodes de reconstruction par photogrammétrie, les limites sont différentes suivant l'utilisation de la SFM ou la multivue. Dans tous les cas, les différences d'illuminations dans la

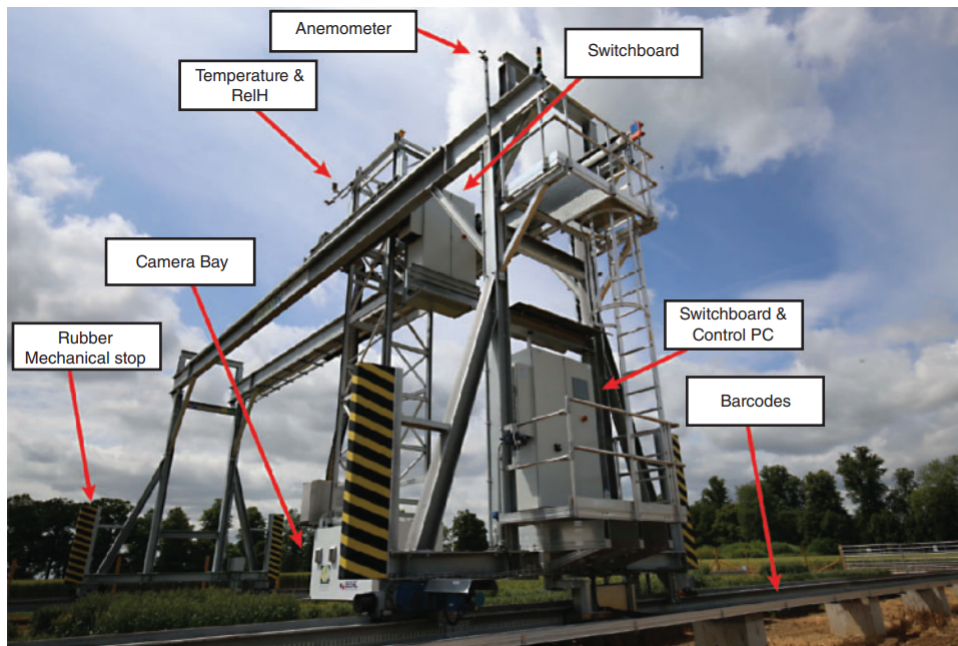


Fig. 1.7.: Composants de *Rothamsted's Field Scanalyzer* (Virlet et al., 2016).

scène peuvent créer des artefacts lors de la reconstruction. Une des solutions est d'augmenter le nombre de points de vue d'acquisition, ce qui augmente le temps de reconstruction et, dans le cas de la multivue, le coût du système. Cependant, la multivue n'est pas affectée par les problèmes de mouvements et déformations de la plante causés par le vent qui créent eux aussi des problèmes pour la SFM. Ces problèmes peuvent être mitigés en augmentant la fréquence d'acquisition du système SFM. Mais cela provoque aussi une augmentation significative du temps de reconstruction du nuage de points. Les techniques de photogrammétrie ont l'avantage d'être rapides, moins coûteuses et légères. Aucun système, LiDAR ou photogrammétrie, ne permet d'éliminer les zones d'occultation, d'autant plus lorsque les plantes sont développées et ont une géométrie complexe.

Il existe donc de nombreuses plateformes d'acquisition répondant aux différents besoins des utilisateurs, que ce soit en termes de plantes à étudier (arbres de grande taille ou plants de betterave), de coût global du système (grande installation et capteurs onéreux ou réutilisation d'anciennes structures et caméra(s)), d'environnement de l'acquisition (milieu contrôlé ou plein champ), de niveau d'automatisation souhaité (protocole d'acquisition entièrement autonome ou déplacement manuel) ainsi que d'objectifs de mesure (différentes échelles de la plante et différentes échelles temporelles).

Dans cette thèse, malgré l'objectif final d'utiliser le système Phénomobile, un protocole intermédiaire de validation de la faisabilité du processus complet a été développé avec un autre système. Les dispositifs de l'état de l'art pour acquérir des données pour le phénotypage haut débit ont été passés en revue. L'appareil qui est utilisé pour l'acquisition est présenté avec le protocole expérimental dans la première section

© ARVALIS-Institut du végétal



(a)



(b)

Fig. 1.8.: (a) Huit Phénofield® d'Arvalis. (b) Une Phénofield® dans un champ expérimental (Beauchêne et al., 2019).

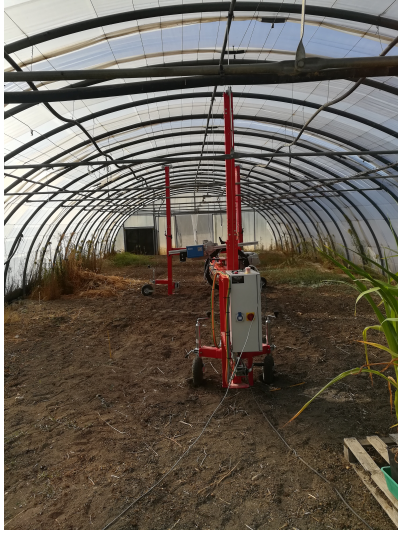
(1.1). Puis les méthodes de reconstruction pour obtenir des nuages de points 3D à partir des images sont présentées et comparées dans la section suivante (1.2) ainsi que les nuages de points obtenus pour la suite du travail de mesure. La qualité des résultats et du protocole expérimental est discutée dans leurs sections respectives.

1.1 Acquisition d'images

Il est nécessaire de développer un processus d'acquisition adapté. Je détaille dans cette section une première approche du protocole expérimental. L'environnement d'acquisition de la Phénomobile est à terme à l'échelle du champ en phénotypage haut débit. Voilà pourquoi pour cette première approche, j'ai privilégié l'aspect champ et extérieur comme principales composantes de l'environnement. Cependant, ce sont des conditions très complexes. Afin de pouvoir garantir l'obtention de nuages de points, et aussi à cause de considérations matérielles, j'ai décidé de réaliser l'expérience sous une serre. Dans ces conditions, une partie des difficultés de l'acquisition, notamment dues au changement de luminosité et au vent, ont une influence moindre sur la qualité de l'acquisition. Mais d'un autre côté, il est toujours possible de disposer d'un champ sous une serre, donc de modéliser des occultations intraplantes et interindividus. D'autant plus que la serre n'est pas un environnement clos : lors de l'acquisition, le vent et le changement de luminosité sont seulement amoindris et ne disparaissent pas complètement (voir figure 1.9). Un des autres avantages de la serre est de permettre une croissance rapide du maïs. Cette première approche est une approximation, mais néanmoins suffisante pour nous permettre d'obtenir des nuages de points similaires à ce qui peut être obtenu dans de bonnes conditions en plein champ et aussi de valider l'ensemble du processus.

Je n'ai pas à disposition la Phénomobile, cependant j'ai accès à une machine appelée Phénofixe (voir figure 1.10). Comme son nom l'indique, elle a été conçue pour être utilisée dans des tâches de phénotypage et a une fonction de banc de test. Il permet de simuler le déplacement de Phénomobile et tester l'intégration de nouveaux systèmes de mesure. Elle est posée et fixée en parallèle de la zone d'intérêt (voir figure 1.11). Une barre sur laquelle peuvent être montés différents capteurs peut alors se déplacer parallèlement à sa position. Pour plus de détails sur son fonctionnement, voir la figure 1.11. Les capteurs que nous avons utilisés sont détaillés dans la section 1.1.1.

Le protocole expérimental a de multiples objectifs initiaux :



(a)



(b)

Fig. 1.9.: Environnement d'acquisition pour l'expérience. (a) Phénofixe positionnée dans la serre. (b) Phénofixe et le dispositif expérimental complet (station d'étalonnage, capteur et champ de maïs) mis en place.

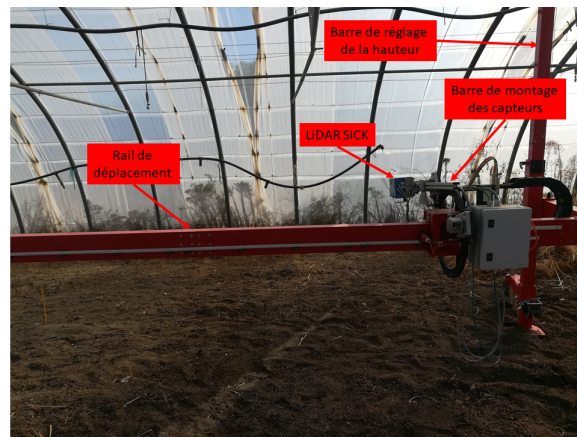


Fig. 1.10.: Phénofixe en position basse.

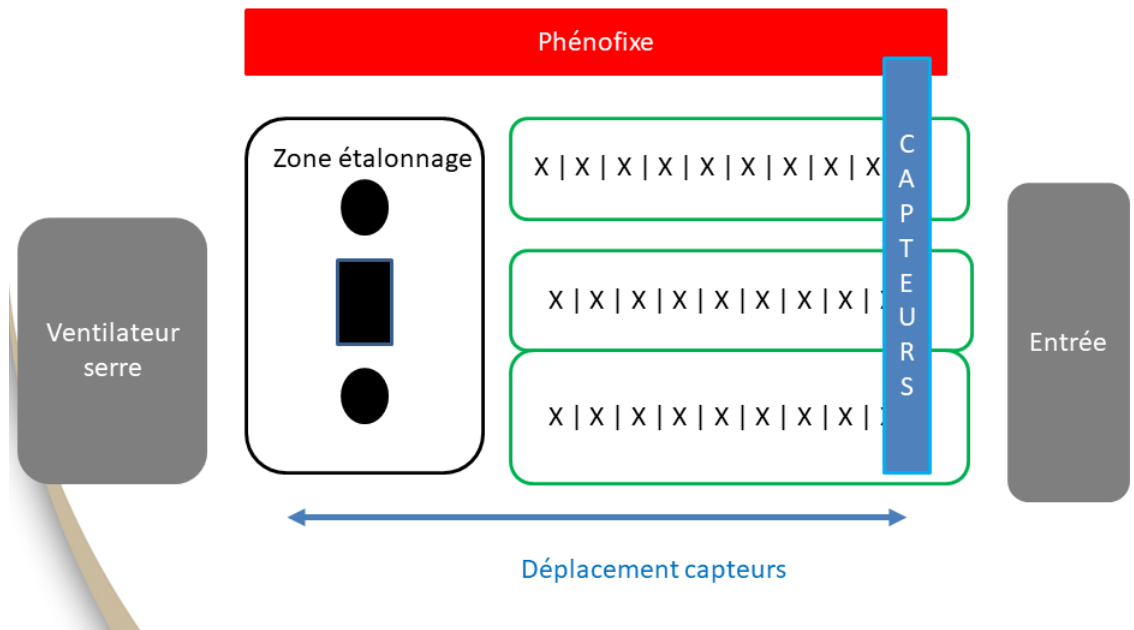


Fig. 1.11.: Schéma de la configuration expérimentale globale. X correspond à un plant de maïs.

- Objectif 1 : Obtenir les paramètres intrinsèques de chaque caméra.
Ces données sont essentielles pour pouvoir utiliser les techniques de reconstruction multivues exposées dans la section 1.2.
- Objectif 2 : Obtenir les données pour une variété d'écartements entre deux caméras pour les systèmes de stéréovision.
Ces données permettront de comparer les qualités des nuages de points obtenus suivant les positions relatives des capteurs entre eux. Cela servira de validation par l'expérience des principes de positionnement optimaux de caméras dans nos conditions expérimentales.
- Objectif 3 : Obtenir des données pour l'étalonnage des systèmes de stéréovision.
Ces données sont essentielles pour pouvoir utiliser les techniques de reconstruction multivues exposées dans la section 1.2.
- Objectif 4 : Obtenir des images du champ d'une variété de points de vue.
Ces données permettront de comparer les qualités des nuages de points obtenus suivant les différents points de vues. Cela servira de validation par l'expérience des principes de positionnement optimaux de caméras dans nos conditions expérimentales. De plus, un recalage puis une fusion potentielle de nuages de points issus de points de vue différents peut augmenter la qualité finale du nuage de points (par exemple en remplissant des zones occultées).

Objectif 5 : Obtenir des données LiDAR et multivue simultanée.

L'utilité de la prise de vue simultanée par de multiples modalités d'acquisition différentes est d'étudier l'apport de la fusion de données hétérogènes pour la suite du processus de traitement de ces données.

Objectif 6 : Construire une base de données de nuages de points 3D (LiDAR ou multivues) de maïs variée en champ.

Le but est d'obtenir une large base de données de nuages de points se rapportant toujours au même champ et de permettre des comparaisons de différentes méthodes de traitement à réalité terrain identique.

Objectif 7 : Comparer les résultats 3D obtenus par les différentes modalités d'acquisition. Chacune des modalités d'acquisition a ses avantages et ses inconvénients. Cependant, aucune étude n'a mesuré la différence de précision des nuages de points acquis dans des conditions d'acquisition en plein champ.

Objectif 8 : Base de données pour tester les algorithmes de reconstruction multivues.

Afin d'obtenir un nuage de points 3D à partir d'images RVB 2D, il faut utiliser un algorithme de reconstruction. Il en existe plusieurs et il y a aussi plusieurs implémentations à disposition. Pour plus de détails, se référer à la section 1.2.

Objectif 9 : Caractériser le rang central du champ.

C'est celui qui a le plus d'occultation interindividus et qui se rapproche le plus des conditions réelles en milieu de champs. Il évite les effets de bord du champ.

Objectif 10 : Caractériser l'influence de l'occultation pour les mesures sur les feuilles occultées suivant la modalité d'acquisition.

Sur l'ensemble de ces objectifs, certains sont prioritaires pour la suite de la thèse. L'**objectif 9** est, par essence, l'objectif absolu de toute chaîne de traitement pour le phénotypage, mais je le restreins ici au rang central du champ. Il guide la conception du protocole d'acquisition et la mesure de la qualité du résultat final, qui ne concerne donc que le rang central. Pour pouvoir ensuite réaliser l'étude des méthodes de reconstruction de surface pour l'estimation de surface foliaire à partir de nuage de points, il est nécessaire de réaliser, au moins en partie, les **objectifs 6 et 8** pour obtenir suffisamment de données de tests. L'achèvement des **objectifs 1 et 3** permet d'obtenir une base de données de nuage de points de qualité optimale dans nos conditions d'acquisition. Mais il est possible de ne pas remplir cet objectif pour continuer la suite du travail. La même chose peut être dite pour les **objectifs 2,4 et 10** qui permettent de valider les meilleures configurations des caméras pour la reconstruction et donc d'optimiser l'acquisition de l'information. L'avantage sup-

plémentaire pour les **objectifs 2,4** est que la base de données de nuages de points reconstruits est plus large et variée. De même, en remplissant l'**objectif 5**, il est possible d'augmenter d'une nouvelle modalité la base de données de nuages de points. Un travail de comparaison des performances quantitative et qualitative de différentes modalités devient alors possible. À terme, la fusion des données issues de modalités différentes (**objectifs 5 et 7**) peut être envisagée.

Dans la suite de cette section, je détaille le protocole expérimental. Tout d'abord je décris le matériel, puis le mode opératoire. Ensuite, je présenterai quelques illustrations des résultats obtenus et la gestion des données. Enfin, je discuterai des limites de cette expérimentation.

1.1.1 Présentation du matériel et des conditions expérimentales

Étalonnage et recalage

Afin de réaliser l'étalonnage des caméras et obtenir les configurations du système d'acquisition multivue, trois mires sont utilisées. Les mires ne présentent pas toutes les mêmes caractéristiques géométriques. Deux mires dites "sol" et "brune" ont 7 x 9 cases de 3,5 cm x 3,5 cm. Et une mire dite "noire" est une mire telle qu'elle a 7 x 9 cases de 2,4 cm x 2,4 cm (voir figure 1.12). Plus d'informations concernant l'étalonnage du système de caméras sont disponibles dans la section 1.1.5 .



Fig. 1.12.: Image des mires et informations de reconnaissance. De gauche à droite, mire "brune", mire "sol", mire "noire".

Pour le LiDAR, deux sphères très réfléchissantes et de caractéristiques parfaitement connues sont utilisées (voir figure 1.13).



Fig. 1.13.: Une sphère réfléchissante.

Nous avons associé deux sphères à une mire. L'ensemble est toujours isolé au sol et ne bouge pas pendant toute la durée de l'expérience. Cet ensemble permettra de recalculer entre eux tous les nuages de points obtenus lors de l'expérimentation (voir figure 1.14).

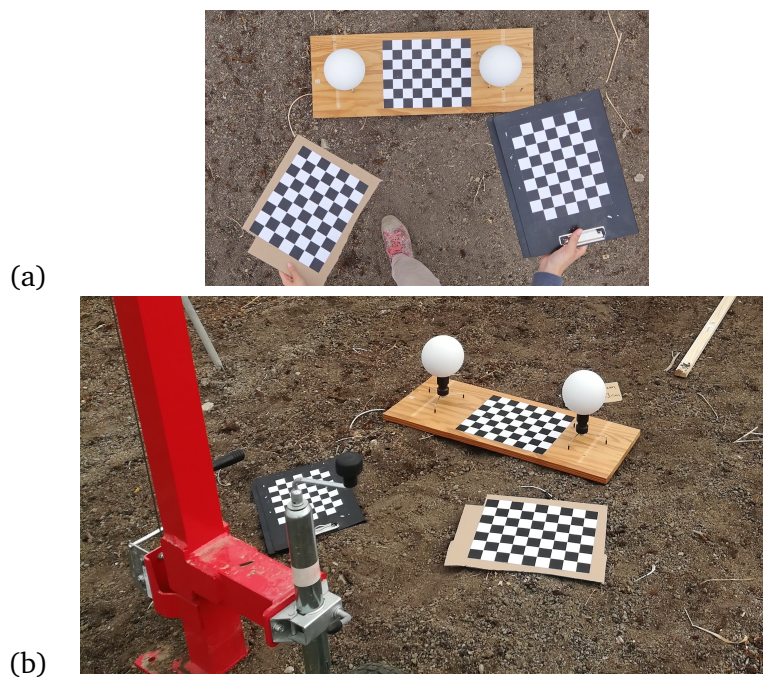


Fig. 1.14.: Ensemble de la station d'étalonnage en bout de champ composé des tris mires et des deux sphères réfléchissantes.

Le champ

Nous avons à disposition 48 plants de maïs qui ont grandi dans de bonnes conditions générales sous serre. Certains ont souffert d'un manque d'eau et tous ont manqué

d'engrais. Ce manque d'engrais n'impacte pas la structure de la plante, mais le manque d'eau a pour conséquence que les bouts des feuilles s'enroulent sur eux-mêmes et sont jaunis (voir figure 1.15). On a évité de mettre ces spécimens dans le rang central. Chaque plant de maïs porte un numéro unique qui l'identifie (voir



Fig. 1.15.: Quelques plants de maïs utilisés lors de l'expérience.

figure 1.16)

Les capteurs

Nous avons utilisé 3 types de capteurs différents. Le premier est des caméras SONY-RX0 (voir figure 1.17). Nous avons à disposition 10 caméras dont 9 ont été utilisées simultanément (nous en avons gardé une en réserve en cas de problème technique,



Fig. 1.16.: Le numéro du plant de maïs se trouve sur l'étiquette orange. Les numéros vont de 1 à 48.

qui a eu lieu, voir dans la section limitation 1.1.5). Pour toutes les caméras, les



Fig. 1.17.: Caméra SONY-RXO.

mêmes réglages ont été utilisés. La distance focale est fixe et la taille de l'image est fixé à 1600x1600 pixels. Aucun flash n'a été utilisé lors de l'acquisition et l'ensemble des caméras est passé en mode rafale (c'est-à-dire une vitesse d'acquisition de 4 images par seconde). Chaque caméra est identifiée par un numéro unique (voir figure 1.21).

Le deuxième type de capteur est le LiDAR SICK-LMS400 (voir figure 1.18). Les caractéristiques principales de ce capteur sont son ouverture à 70 °et une résolution à 0.1°. Sa portée est comprise entre 0,7 et 3 mètres. Lors de l'acquisition avec Phénofixe, la vitesse peut être réglée et lors des premières acquisitions elle est fixée à 0,3 m/s. Pour la suite des acquisitions, elle est réglée à 1 m/s.

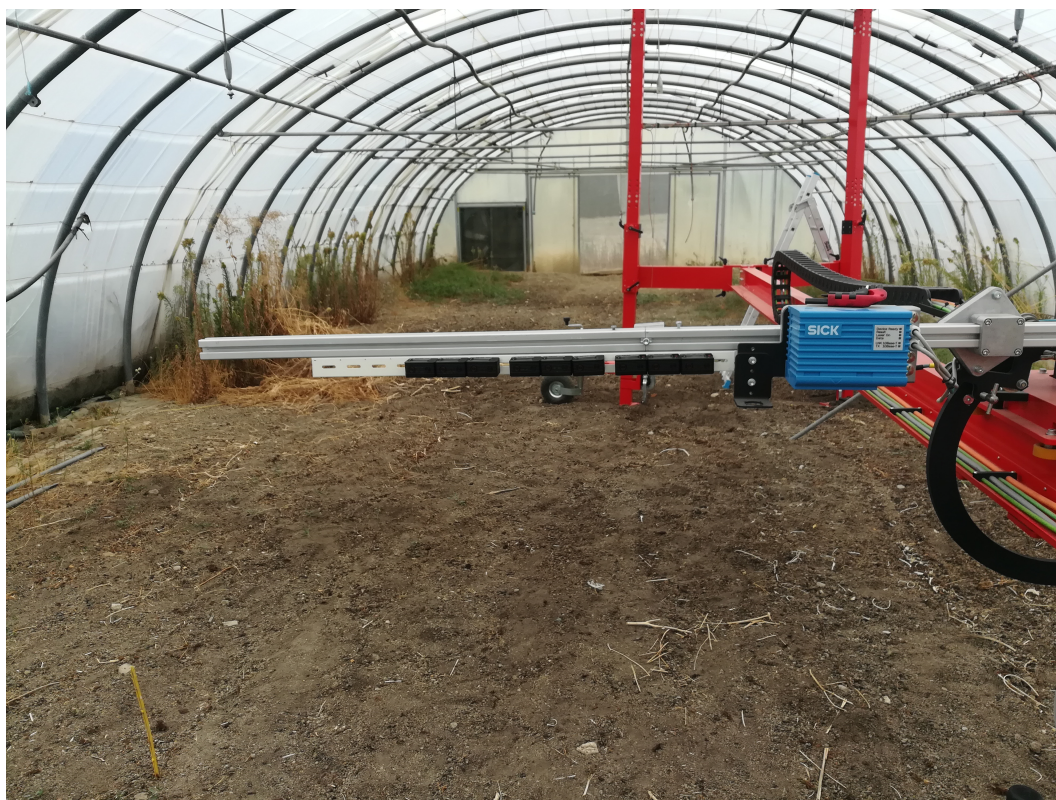


Fig. 1.18.: Illustration Lidar SICK et Lidar sur Phénofixe.

Le troisième capteur est le LiDAR FARO 3D X130 (voir figure 1.19 dont les caractéristiques techniques principales sont très différentes du précédent LiDAR SICK. La résolution du LiDAR FARO est à $0,001^\circ$ et sa portée va jusqu'à 130 mètres avec une erreur de 2 mm à 15 mètres. La fréquence utilisée est de 900 nm.

Les LiDAR font automatiquement des acquisitions une fois leurs processus enclenchés, mais pour contrôler la prise de vue des images, nous utilisons l'application Imaging Edge Mobile (Corporation, 2020) fournie par le constructeur. Cette application permet de contrôler jusqu'à 5 appareils. On synchronise ensemble les caméras 1 à 4 et les caméras 5 à 9 sur deux appareils mobiles différents.

À cause de la connexion à distance, les batteries sont encore plus rapidement déchargées, d'où l'ajout de batteries externes aux caméras. L'écriture des images se fait sur la carte SD et nous n'avons aucune transmission sur les mobiles.

Le montage général des capteurs et de Phénofixe se présente comme illustré dans la figure 1.20.

Les conditions expérimentales - simulation de champs

Dans la serre on dispose les plants de maïs selon la géométrie classique d'un champ. Notre champ de maïs a donc une densité de 8 plantes par mètre carré sur une



Fig. 1.19.: Positionnement du LiDAR FARO pour l'acquisition.

longueur de 1 mètre et sur 3 rangs. Chaque rang est espacé de 80 cm et il y a 10 plantes par rang. Chaque pied de plante est espacé d'environ 15 cm. Nous les avons donc placés pots à pots. La hauteur des plants de maïs est d'environ 1,60 mètre en moyenne (voir figure 1.20).

On référence par le mot CP X (Configuration Plante numéro X) la configuration de champ qui a été acquise. Il y a eu 5 champs acquis composés de différents spécimens. Les schémas globaux de la composition de chaque champ sont dans la figure 1.21.

Les conditions expérimentales - configuration des capteurs

En prenant en considération la hauteur des plantes et la distance minimale d'acquisition pour le LiDAR, nous plaçons les capteurs à une hauteur d'environ 2,5 mètres.

Les noms de référence pour les configurations des capteurs sont CCYX (Configuration Capteurs Y = numéro position Lidar , X = Numéro position caméras). Je note ici que les distances sont mesurées à la règle au centimètre près par rapport à un repère qui n'est pas ponctuel (environ un demi-centimètre de diamètre). La mesure reste la plus systématique possible par rapport à la référence, mais il est plus raisonnable de considérer les longueurs indiquées comme des ordres de grandeur. De plus, ces positions seront recalculées et vérifiées avec les techniques d'étalonnage de caméras et le recalage par rapport aux sphères pour le LiDAR (pour plus de renseignements voir les figures 1.22 et 1.1). L'origine de la distance est posée arbitrairement au niveau du boîtier du LiDAR ou au niveau de la barre principale Phénofixe suivant la position relative du capteur que l'on cherche à positionner (voir figure 1.1).



(a)



(b)

Fig. 1.20.: Montage global des capteurs, du champ de maïs et de Phénofixe pour l'acquisition.

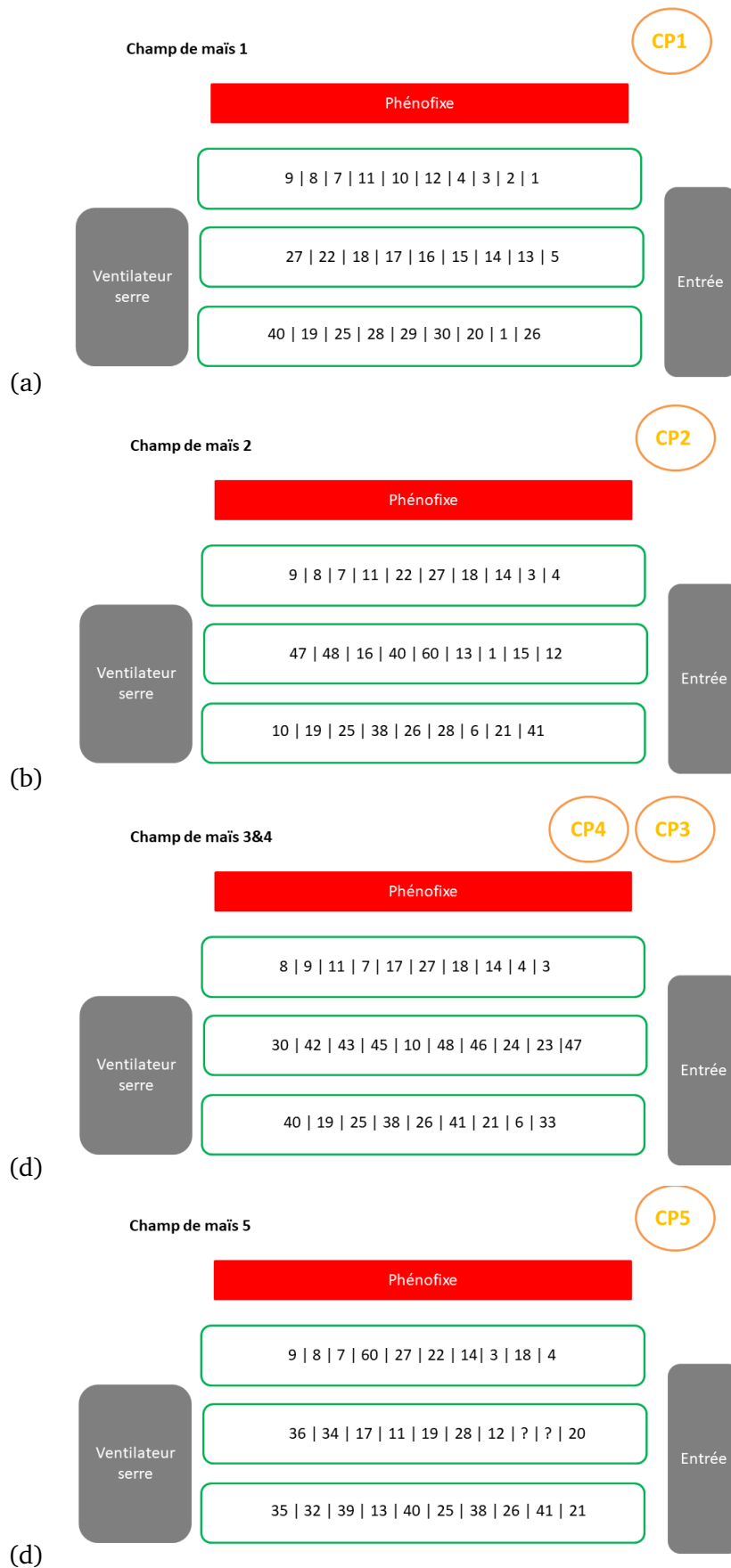


Fig. 1.21.: Disposition de chaque plant dans chaque champ (numéros).

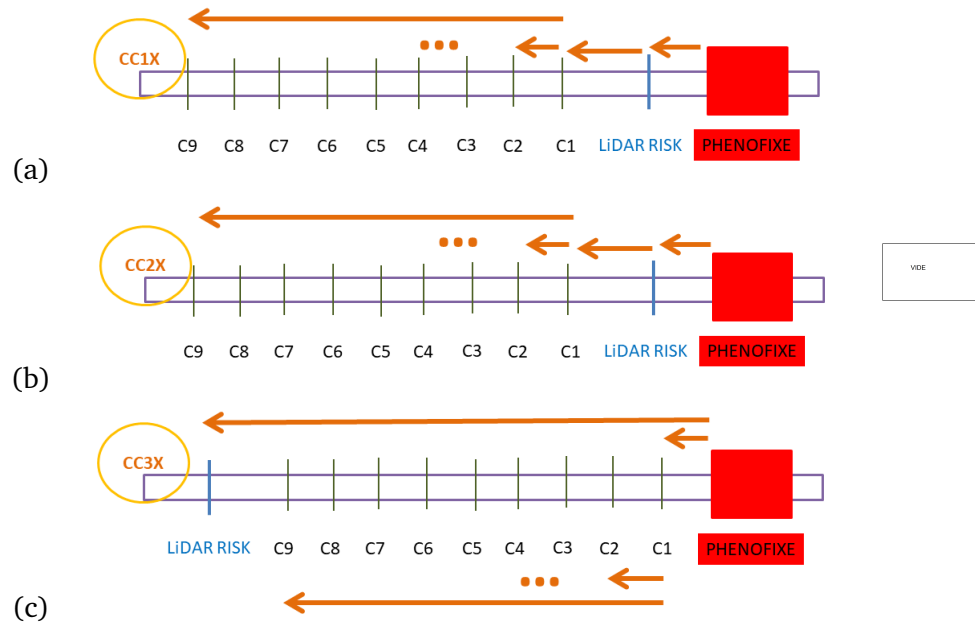


Fig. 1.22.: Mesure de disposition de chaque capteur sur Phénofixe.

CCYX	CPZ	distance (cm)
CC1X	CP1-5	Non mesuré
CC2X	CP1	63
CC2X	CP2-5	54
CC3X	CP1-5	94

Tab. 1.1.: Distance en cm entre le Lidar SICK et Phénofixe pour chaque configuration de LiDAR (CCYZ) pour toutes les configurations de champ (CPZ).

Ces distances correspondent au LiDAR respectivement au-dessus du rang central, à l'interrang proche de Phénofixe et à l'interrang éloigné de Phénofixe (voir figures 1.2 et 1.3).

CCYX	origine	distance (cm)
CC1X	C1	15
CC2X	C1	16
CC3X	C9	5

Tab. 1.2.: Distance entre les caméras et le LiDAR SICK sur Phénofixe pour chaque configuration de LiDAR. La position d'origine de la mesure de distance entre les caméras pour le tableau 1.3 est précisée dans la colonne origine.

CCYX	distance C2	distance C3	distance C4	distance C5	distance C6	distance C7	distance C8	distance C9
CC11	6	12	19	25	31	39	45	51
CC12	6	12	20	27	35	45	55	62
CC13	6 A	12 A	20	27 A	35 A	45 A	55 A	62 A
CC14	7	15	22	32	47	55	65	72
CC15	7 A	15 A	22 A	32	47 A	55 A	65 A	72 A
CC21	7A	15A	22A	32A	47A	55A	65A	72
CC22	7	15	22	32	47 55	65	72	
CC31	6	16	24	39	49	56	64	71
CC32	6A	16A	24A	39A	49A	56A	64A	71A

Tab. 1.3.: Distance entre la position d'origine (voir tableau 1.2) et chaque caméra pour toutes les configurations de capteurs (en cm). La notation A = Angle. On ajoute un angle à la caméra. Cet angle n'est pas mesuré et on met autant que possible le centre de la caméra vers le rang central.

1.1.2 Présentation du mode opératoire

Il y a deux processus distincts qui impliquent des capteurs et des étapes particulières.

Processus d'acquisition général

Le processus d'acquisition général se déroule de la façon suivante :

1. Positionnement des maïs dans le champ
2. Positionnement des capteurs LiDAR SICK et caméras sur Phénofixe
3. Déplacement de la Phénofixe au début du champ et activation de l'acquisition de caméra
4. Arrêt de Phénofixe et acquisition des données d'étalonnage
5. Fin de l'acquisition de caméras :
 - si on veut faire une nouvelle configuration de caméra : reprendre à l'étape 2
 - si on veut changer la configuration du champ après avoir testé toutes les configurations de capteurs : reprendre à l'étape 1
 - s'il n'y a plus de configuration de champ ou de capteur : fin de l'expérience

Processus d'acquisition complet

Pour les configurations de champs CP3 et CP4, nous avons utilisé le LiDAR FARO en parallèle du processus d'acquisition décrit plus haut dans la sous-section 1.1.2. Les deux processus d'acquisition (LiDAR FARO et Phénofixe) sont indépendants, mais ne doivent pas être simultanés.

On fait attention à ce que les plants du rang central aient les feuilles les plus épanouies et grandes possibles. Pour pouvoir prendre les mesures architecturales de référence, dont la LAI, les feuilles sont découpées et la plante est donc détruite après le processus d'acquisition.

Tout d'abord, le champ est mis en place et les trois feuilles supérieures de chaque plan du rang central sont numérotées (1 la plus haute et 3 la plus basse). Ensuite, l'ensemble des acquisitions Phénofixe détaillées précédemment sont effectuées. Puis

l'acquisition avec le LiDAR FARO est faite en utilisant 8 positions (4 positions à chaque coin du champ et 4 positions au niveau du milieu de chaque côté du champ). Les trois feuilles sont ensuite découpées à leurs bases et elles sont identifiées avec le code "NumPlante.NumFeuille". Les trois feuilles suivantes, qui sont aussi les dernières au stade de développement du maïs lors de l'acquisition, sont numérotées. À nouveau le même processus est effectué avec en premier les acquisitions Phénofixe, puis LiDAR FARO et enfin le découpage à la base des feuilles et l'attribution du code d'identification "NumPlante.NumFeuille". Les mesures suivantes sont réalisées sur l'ensemble des feuilles (voir figure 1.23) :

- l : la plus petite largeur en bas de la feuille
- L : plus grande largeur de la feuille
- d_1 : distance de la base de la feuille à l'axe de la plus grande largeur
- d_2 : distance de l'axe de la plus grande largeur à la pointe de la feuille
- S : surface de la feuille

1.1.3 Quelques résultats (illustrations)

J'illustre ici avec quelques échantillons les données obtenues pour chaque modalité d'acquisition.

Les images

Les images sont acquises en rafale est parallèle. Je présente un échantillonnage d'images acquises qui composent la base de données dans la figure 1.24.

Pour pouvoir juger de la qualité d'acquisition pour les caméras, il faut reconstruire les nuages de points. La reconstruction de nuage de points est présentée dans la section 1.2).

LiDAR SICK

Le LiDAR SICK acquiert donc le champ en se déplaçant dans sa longueur. Quelques vues de l'acquisition de CP3 \CC11 sont montrées dans les figures 1.25 à 1.26.

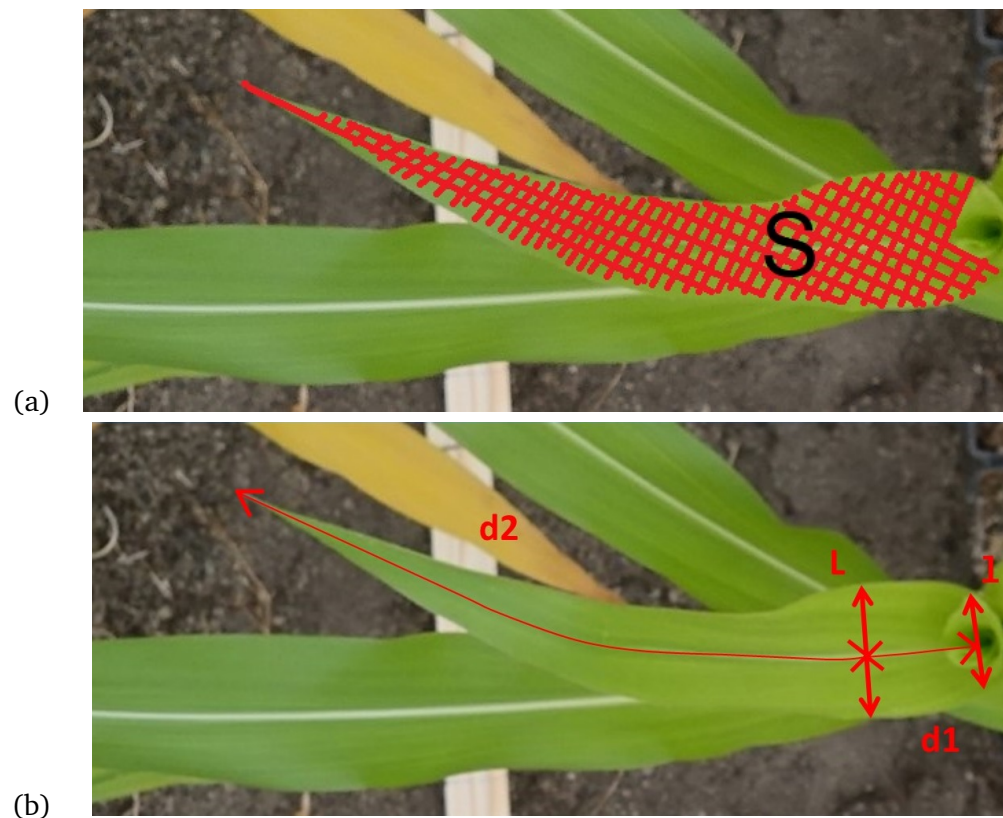


Fig. 1.23.: Schéma des mesures réalisées sur les feuilles de maïs. (a) Détails des différentes distances mesurées: la largeur la plus grande (L) et la plus petite (l) de la feuille. La distance (d1) de la base au point central à la hauteur de la zone la plus large de la feuille et la distance (d2) entre le point central au niveau le plus large de la feuille à l'apex. (b) Surface foliaire.

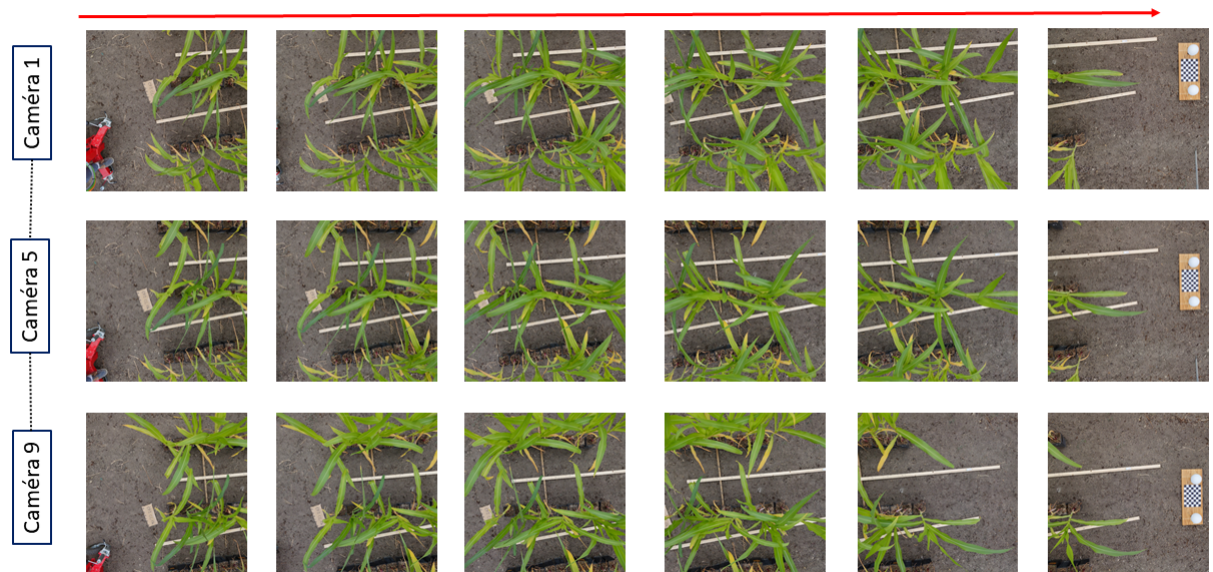


Fig. 1.24.: Exemples d'images acquises par le système de caméra présenté sous la forme de la séquence d'acquisition. La configuration de caméra correspond à CC12 dans le champ CP2.

Les nuages de points sont très bruités avec des bruits de points mixtes. L'utilisation des données issues de ce LiDAR nécessite un filtrage en prétraitement. Le nuage de points montre un champ très complet avec quelques occultations dans la couche inférieure du couvert du maïs.

LiDAR FARO

Je présente dans les figures 1.27 et 1.28 des images de l'acquisition par le LiDAR FARO sur le champ CP3.

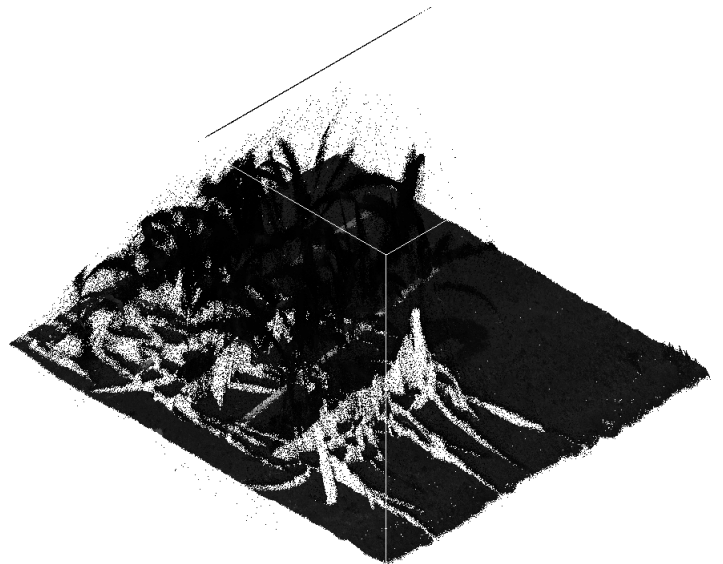
Le LiDAR FARO donne un nuage de points coloré pratiquement complet. Cependant, elle présente des problèmes de recalage de feuille à cause du mouvement des feuilles qui a eu lieu lors de la procédure d'acquisition à cause du vent. Il y a aussi du bruit, mais de nature différente par rapport au LiDAR SICK et en quantité moindre.

1.1.4 Gestion des données obtenues

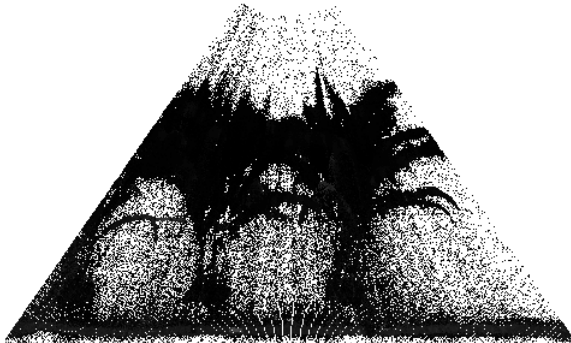
Les images sont de taille 1600x1600 (maximum possible 4800x360). L'ensemble des images acquises reviennent à 220 Go de données qui sont rangés suivant une arborescence et nommés selon une nomenclature précise.



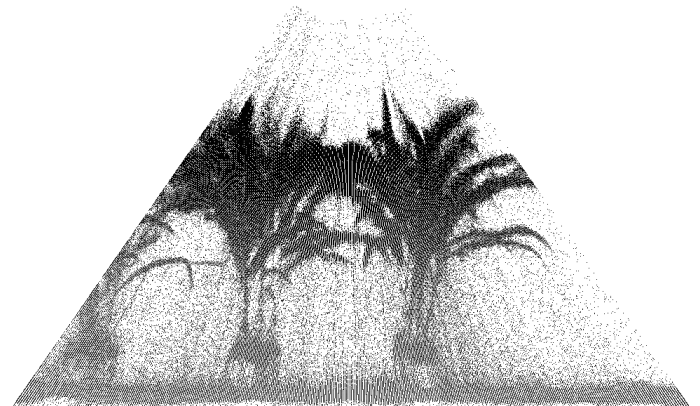
(a)



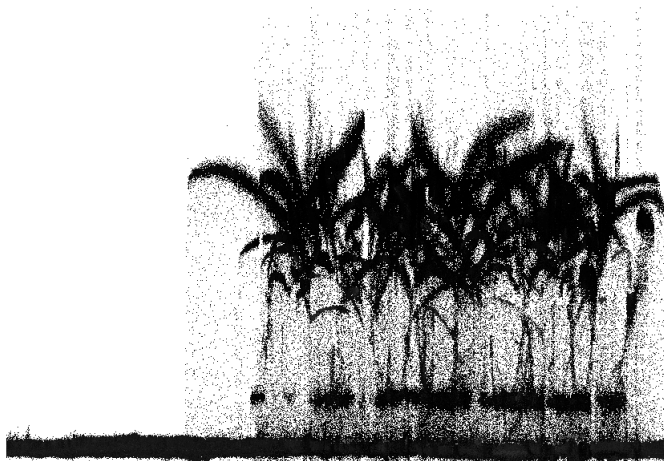
(b)



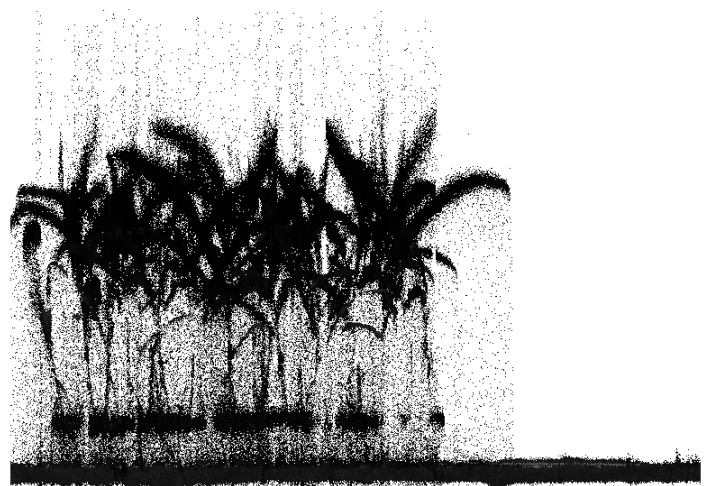
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 1.25.: Acquisition par LiDAR SICK en position 1 dans le champ 3. (a) Vue du dessus, (b) vue oblique, (c) vue arrière, (d) vue avant, (e) et (f) vues latérales.

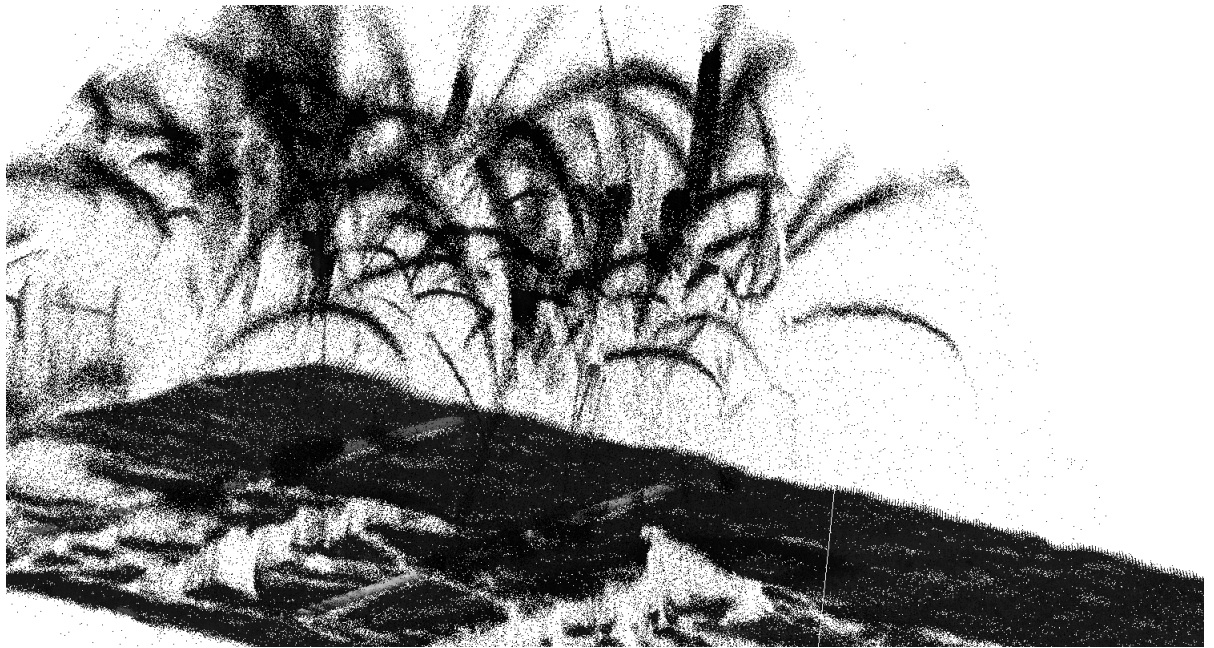


Fig. 1.26.: Acquisition par LiDAR SICK en position 1 dans le champ 3 en vue oblique approchée.

Architecture de fichier et nomenclature des noms

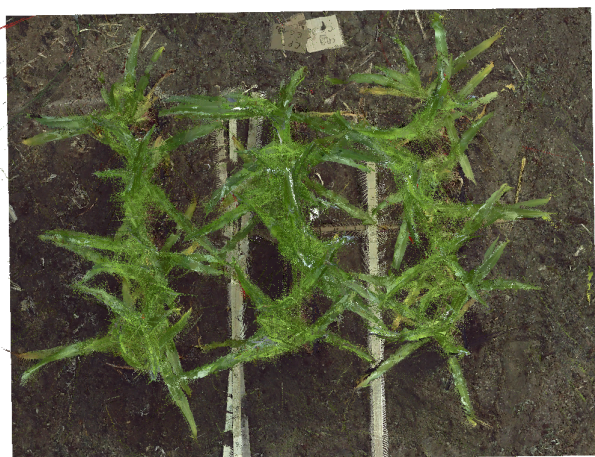
L'arborescence de dossier pour les données de photogrammétrie est CameraZ/CPY/CCXW/champ et CameraZ/EtalonnageIntrinseque. Tel que Z représente le numéro de la caméra, Y le numéro de la configuration du champ, X le numéro de la configuration du LiDAR et W la configuration des caméras associée. Dans le dossier champ, l'ensemble des images d'acquisition correspondant aux plantes sont rangés. Les images correspondant à l'étalonnage de du système de caméra pour cette acquisition particulière sont rangées dans le dossier CameraZ/EtalonnageIntrinseque.

Pour le LiDAR chaque fichier est associé à sa configuration.

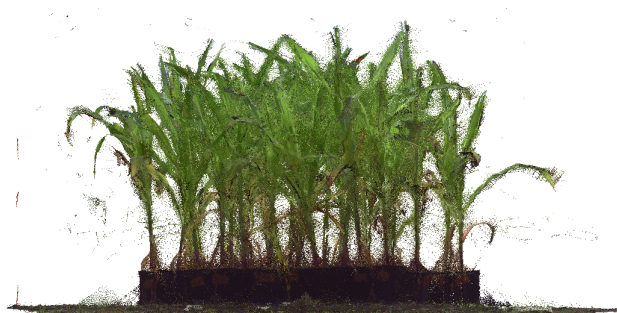
1.1.5 limites des données obtenues à cause de l'expérimentation

L'acquisition des données n'a pas été sans erreurs. En effet, certains fichiers sont vides, certainement à cause d'un problème de la caméra comme une commande d'enclenchement non reçue ou une batterie vide. Un autre problème du montage de l'acquisition est l'occultation par un ou plusieurs fils de batterie des images acquises (voir figure 1.29).

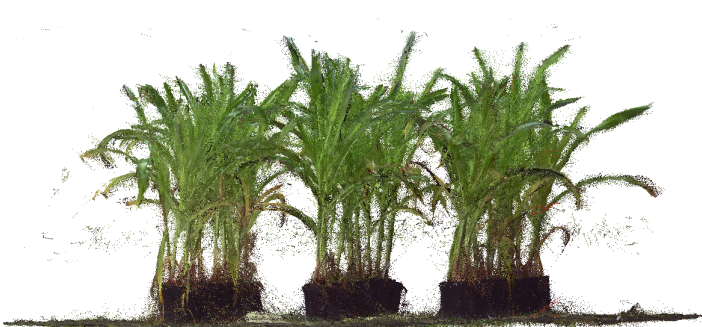
Les sphères spécialement placées pour permettre le recalage des différentes modalités d'acquisition n'ont pas été correctement acquises par le LiDAR SICK. Il est nécessaire



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 1.27.: Acquisition du champ CP3 par le LiDAR FARO. (a) Vue du dessus, (b) et (d) vues latérales, (c) vue arrière, (e) vue oblique du dessus.

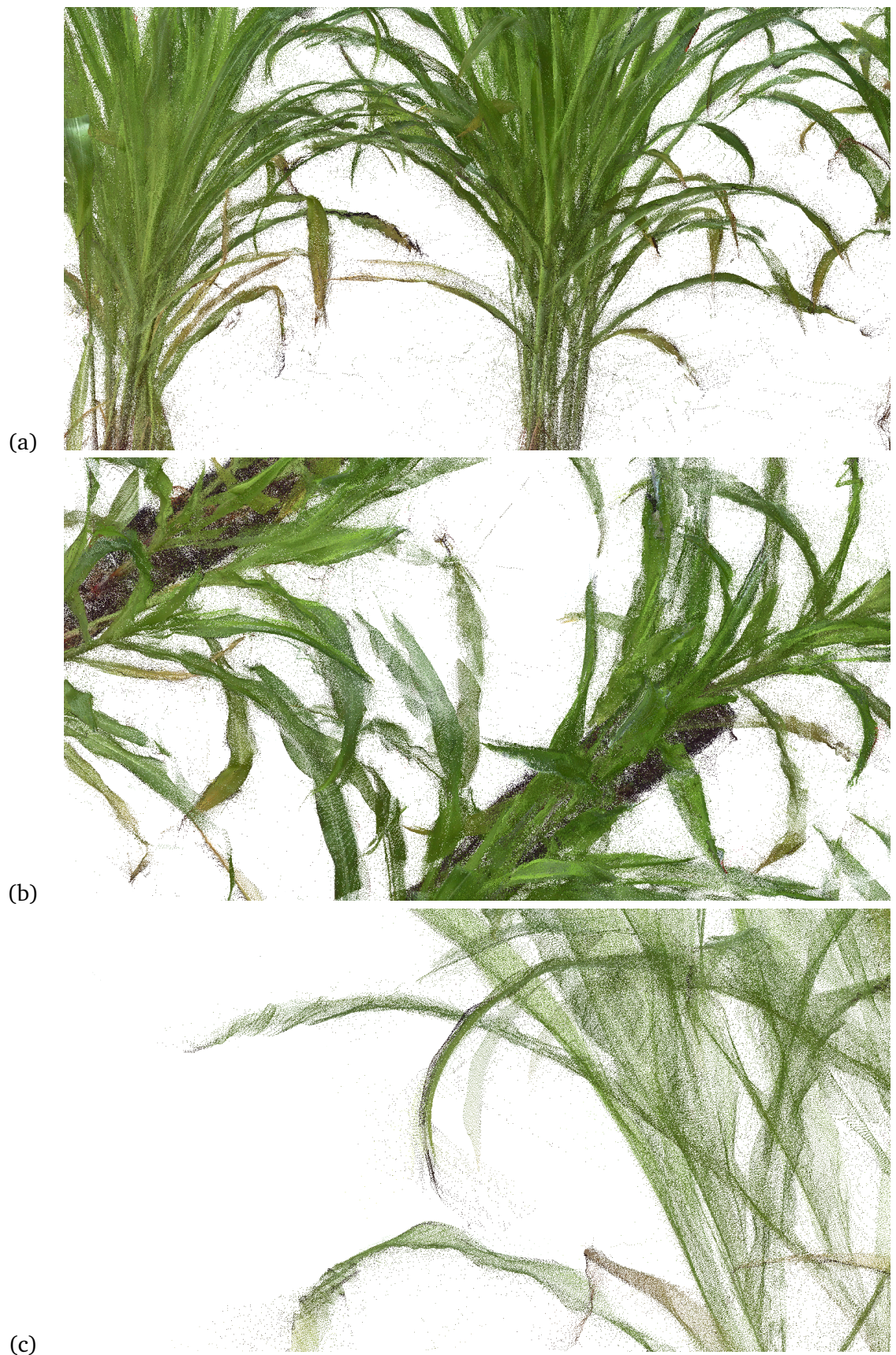


Fig. 1.28.: Acquisition du champ CP3 par le LiDAR FARO avec des vues rapprochées. (a) Vue rapprochée sur un problème de recalage au niveau de la feuille. (b) Vue rapprochée du dessus sur le rang central. (c) Vue rapprochée de problème de bruit autour des feuilles.



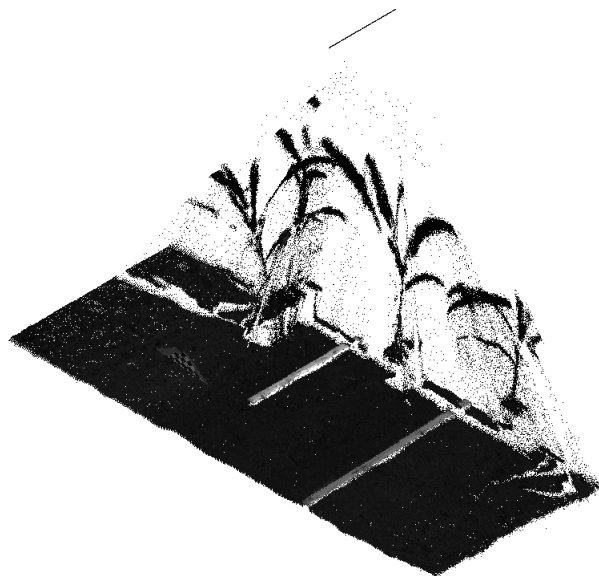
Fig. 1.29.: Séquence d'images d'une caméra occultée par un fil de batterie du montage d'acquisition.

de vérifier la zone d'acquisition réelle du LiDAR (voir figure 1.30). Comme les caméras sont contrôlées via deux mobiles différents et que le mode rafale n'est que théorique, on rencontre des difficultés quant à l'étalonnage des caméras et leurs positionnements, car les mires sont en mouvement.

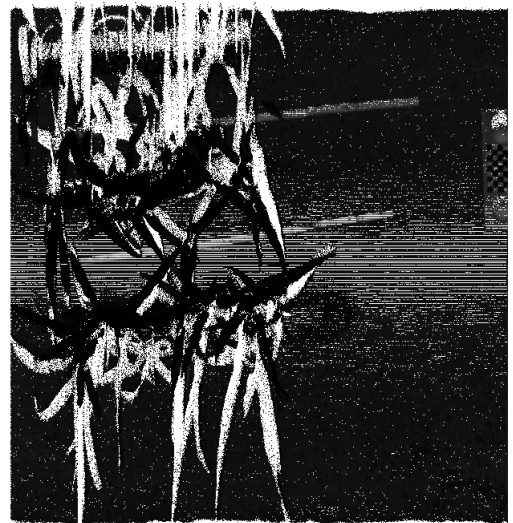
Quelques améliorations directes possibles peuvent être tirées de l'expérience :

- Vérifier la synchronicité des prises de vue pour faire de la multivue plus proche de ce que la Phénomobile fait déjà.
- Vérifier les paramètres de prise de vue notamment le format de l'image.
- Vérifier la zone d'acquisition du LiDAR et bien placer les objets dans cette zone.
- Vérifier que la vitesse de déplacement est suffisamment basse pour obtenir la précision de reconstruction souhaitée.

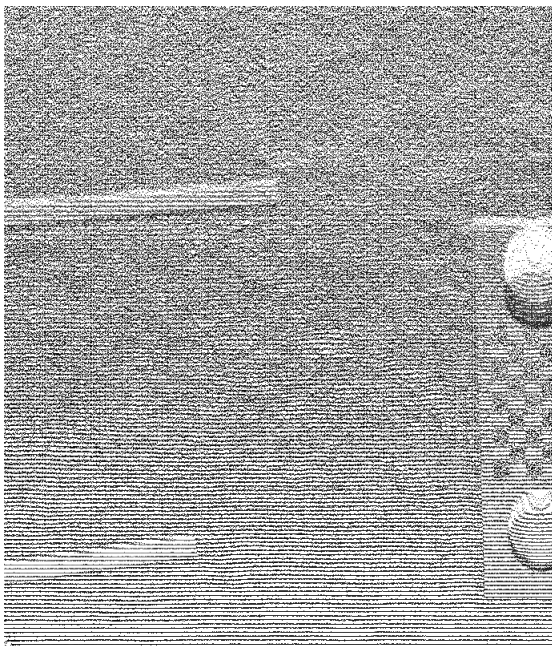
Des améliorations pour mener à bien le processus d'étalonnage doivent aussi être apportées. Par exemple, il est tout d'abord apparu comme une bonne idée d'utiliser le maximum de mires afin de multiplier les points d'intérêts dans l'image qui ne peuvent pas porter à confusion. En effet, les algorithmes de détection de points d'intérêt en déterminent de nombreux au niveau du sol, mais la mise en correspondance ne peut pas être vérifiée. Cependant, il n'est dans ce cas pas possible d'exploiter les logiciels et fonctions mises à disposition dans des bibliothèques comme, par exemple, Matlab (*MATLAB version 9.3.0.713579 (R2017b)* 2017) ou OpenCV (Bradski, 2000) car elles ne sont pas conçues pour gérer plus d'une seule mire dans une image. De plus, de nouveaux cas doivent être pris en compte, comme l'occultation d'une partie d'une mire par une autre. C'est pourquoi, avec nos images, l'implémentation d'une



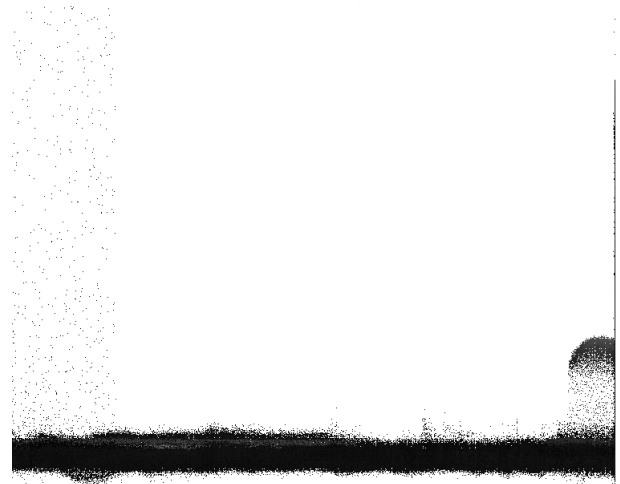
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.30.: Illustration de l'échec d'acquisition par le LiDAR SICK. (a) interruption de l'acquisition. Échec de l'acquisition par le LiDAR SICK des deux sphères réfléchissantes pour le recalage. (b) Vue du dessus globale. (c) Vue du dessus rapproché sur les sphères. (d) Vue latérale rapprochée sur les sphères.

version robuste de l'algorithme d'étalonnage pour les multimires est nécessaire (voir la figure 1.31).



Fig. 1.31.: Exemple de détection de points caractéristiques sur une image issue de l'acquisition avec Phénofixe. Les points caractéristiques sont obtenus avec le logiciel VisualSFM et ils sont marqués par des points rouges.

Lors de l'acquisition, il a été noté que la température des caméras devenait très élevée (suffisamment pour qu'elles deviennent intouchables). Ceci paraît normal en considérant que les appareils en fonctionnement se réchauffent de base, et encore plus dans une serre en canicule. Or Adamczyk et al. (2018) expliquent que la température de la caméra a un effet sur les paramètres d'étalonnage, et donc dans notre cas, sur la reconstruction du nuage de points. La mesure de l'influence de ce phénomène sur la qualité de la reconstruction est pour l'instant inconnue.

1.2 Reconstruction de nuage de points 3D par photogrammétrie

De nombreux algorithmes 3D et logiciels sont disponibles pour cette étape de reconstruction de nuage de points à partir d'images 2D. En effet, la photogrammétrie est un domaine largement développé et employé à de nombreux effets dans des domaines. Tels que la vision industrielle (Mohammadikaji et al., 2017), la robotique (Krainin et al., 2011), les modélisations 3D d'objets culturels ou de monuments (Alsadik et al., 2014) et bien d'autres. C'est un domaine d'étude à part entière qui s'est démocratisé à la suite du développement de capteurs (caméras) peu coûteux. Comme décrit dans l'article de (Remondino, 2011) posant un état de l'art sur les méthodes de modélisation 3D dans le domaine culturel.

Dans le cadre de ce projet, il n'est pas utile de développer une solution particulière à notre pipeline. D'abord, je présenterai l'ensemble des méthodes et logiciels accessibles. Puis je présenterai l'étude comparative qui m'a permis de choisir un logiciel pour le pipeline.

1.2.1 État de l'art des méthodes de reconstruction

Il existe deux grandes méthodes de reconstruction classique à partir d'images RVB pour la photogrammétrie : soit les méthodes basées Structure From Motion, soit les méthodes basées multivue. L'essentiel de leurs différences se trouve dans les connaissances du système d'acquisition. Pour les méthodes multivue, il est nécessaire de connaître les paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras, c'est-à-dire d'avoir accès à l'étalonnage complet du système d'acquisition. Pour la SFM, le placement du système d'acquisition n'est pas nécessaire, et parfois ni même les paramètres intrinsèques des caméras.

Ces problématiques d'étalonnage ne sont pas à négliger dans le cadre d'un projet industriel où chaque étape expérimentale a un coût. Un protocole expérimental trop contraignant limite l'utilisation des systèmes d'acquisition, même si des erreurs d'étalonnage ont des conséquences sur la précision et les caractéristiques des nuages de points (Poulin-Girard et al., 2016).

Algorithme: Structure From Motion (SFM)

La SFM est utilisée pour estimer le modèle 3D à partir de séquences d'images 2D qui se superposent. Elle prend en considération les déformations des caractéristiques 3D lors du mouvement, soit de la cible, soit du capteur. Les positions relatives entre images n'ont pas besoin d'être connues. Cette technique est très efficace pour gérer des images dont les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques sont

inconnues et pour les bases de données d'images hétérogènes d'objets. La rigueur de l'acquisition est donc bien moindre dans le cas d'utilisation de cette méthode de reconstruction. L'article de (Özyeşil et al., 2017), comprend une étude des différents développements et méthodes utilisés pour la SFM, on peut s'y rapporter pour plus de détails techniques. Cependant, d'un point de vue rigoureux, le terme SFM ne désigne que les étapes de calcul des paramètres de la caméra pour les images et l'obtention des nuages de points parcimonieux. On l'utilise généralement pour l'ensemble du processus en photogrammétrie par métonymie. La reconstruction dense utilise donc les mêmes méthodes que celles de la multivue décrite plus loin pour obtenir le nuage de points (Schonberger and Frahm, 2016). L'ensemble du processus de reconstruction de SFM jusqu'au nuage de points dense est illustré sur la figure 1.32. Les points importants du processus de SFM dans le cadre de l'imagerie

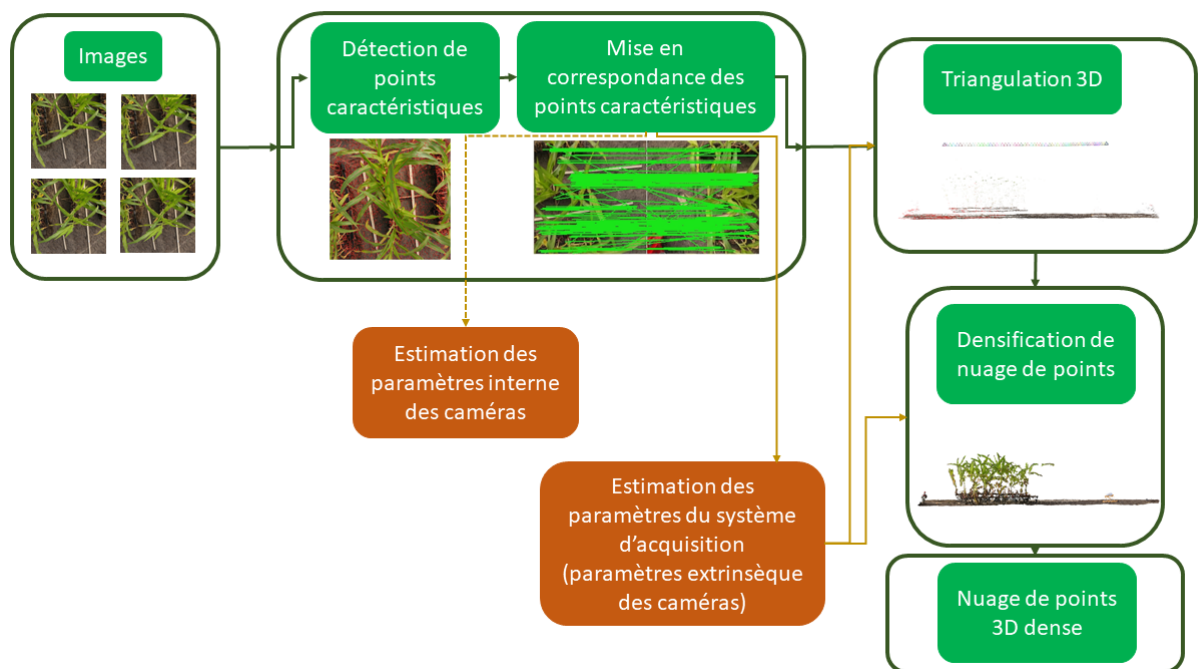


Fig. 1.32.: Description des principales étapes du processus de SFM illustrées avec nos données de l'acquisition de la section 1.1.

rapprochée sont :

1. l'identification des points caractéristiques (SIFT*) dans toutes les images. La qualité du résultat final dépend de la méthode choisie et des propriétés des images.
2. la mise en correspondance des points caractéristiques des différentes images. Il existe plusieurs stratégies possibles (Bianco et al., 2018). À la suite de cette étape, une série d'association d'images au moins en paire est faite et la liste des correspondances entre points caractéristiques est donnée.

3. la vérification de la géométrie pour obtenir le graphe de la scène. C'est la vérification finale de la liste des paires précédentes afin d'éliminer les paires erronées.
4. le recalage des images : les positions relatives des images entre elles sont recherchées à partir des points caractéristiques mis en correspondance.
5. la triangulation : ajout des points dans le nuage de points 3D après le calcul par triangulation de leurs positions à partir de chaque paire.
6. l'ajustement de faisceau (ou Bundle adjustment) pour obtenir les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra et le nuage de points parcimonieux (c'est-à-dire le nuage de points des points caractéristiques des images). En simplifiant, cette étape est composée de deux processus successifs principaux :
 - a) Initialisation des paramètres à partir d'un ensemble d'images sélectionnées aléatoirement (il est optionnel de connaître les paramètres de chaque image).
 - b) Raffinement non linéaire.
7. (optionnel) la classification des images en fonction de leurs positions. Cette étape permet de simplifier le processus de densification de nuage de points.
8. Algorithme de multivue pour la génération du nuage de points dense.

Les résultats obtenus par SFM sont fortement influencés par la base de données d'images d'entrée, à la fois par leurs qualités respectives et par le recouvrement qu'elles proposent. D'après Iglhaut et al. (2019), la qualité de la reconstruction est donc dépendante de cinq catégories différentes qui sont la scène (texture, occultations, etc...), les conditions lumineuses, les paramètres de la caméra, les paramètres de l'acquisition et les paramètres de la reconstruction de nuage de points (nombre de points caractéristiques...).

Les hypothèses d'application de la méthode sont les suivantes :

1. Les objets cibles sont recouverts depuis une grande diversité de points de vue et de positions afin de prévenir les problèmes d'occultations et les erreurs systématiques.
2. Il faut au moins 3 images de points de vue différents pour reconstruire un trait d'intérêt ; 5 à 6 dans les zones de végétation dense (c'est-à-dire d'occultation

dense). Mais on modère ce propos dans le cadre d'un champ qui est moins dense qu'une forêt, sur une moins grande échelle. La différence d'angle entre les prises de vue ne doit pas dépasser les 10 à 20°.

3. La luminosité doit être suffisante et de préférence homogène. En extérieur, ce sont donc généralement des conditions sans nuages ou au contraire au ciel totalement couvert.
4. L'objet d'intérêt doit être fixe et rigide.

C'est le dernier point qu'il est impossible de garantir dans nos conditions expérimentales. La SFM est donc une méthode qu'il faut éviter à terme. Cependant, à cause des limites de notre expérimentation, il n'y a pas eu d'autre choix que d'utiliser aussi ces techniques pour obtenir des nuages de points de nos données. À terme, on cherche donc une méthode ne nécessitant pas de SFM.

Algorithmes: multivue

La multivue est très proche de l'approche SFM qui n'est rigoureusement qu'une étape additionnelle dans le processus de reconstruction par multivue. Pour pouvoir effectuer des reconstructions par multivue, il faut remplir plusieurs conditions. Tout d'abord, les images d'entrée doivent présenter des recouvrements entre-elles. Les paramètres d'étalonnage des caméras doivent être connus. Enfin, l'objet doit être fixe et rigide entre les différentes prises de vue si elles ne sont pas simultanées. L'ensemble de ces contraintes permet de garantir un niveau élevé de précision à condition que la qualité des images d'entrée soit suffisante. Le processus de reconstruction est donc simplifié par rapport à celui présenté dans le paragraphe précédent. Il est illustré sur la figure 1.33.

Les prérequis pour utiliser les pipelines pour la multivue stricte ne sont pas remplis avec la base de données issue de notre expérimentation. Cependant si elles étaient toutes remplies, alors la qualité de la reconstruction 3D du nuage de points serait garantie (Poulin-Girard et al., 2016).

Autres méthodes de reconstruction

Je présente d'autres méthodes de reconstructions 3D qui n'ont pas été sélectionnées. Puis je présente brièvement les avancées récentes dans ce domaine avec l'apprentissage profond. Enfin, je décris les études de la reconstruction qui sont centrées au domaine d'application de l'agronomie.

Les besoins de précision du pipeline et la complexité de l'objet d'étude m'ont poussée à écarter les méthodes de reconstruction à partir d'un seul point de vue (Van den Heuvel, 1998 ou Gonzalez-Aguilera and Gomez-Lahoz, 2008). Schönberger et al.

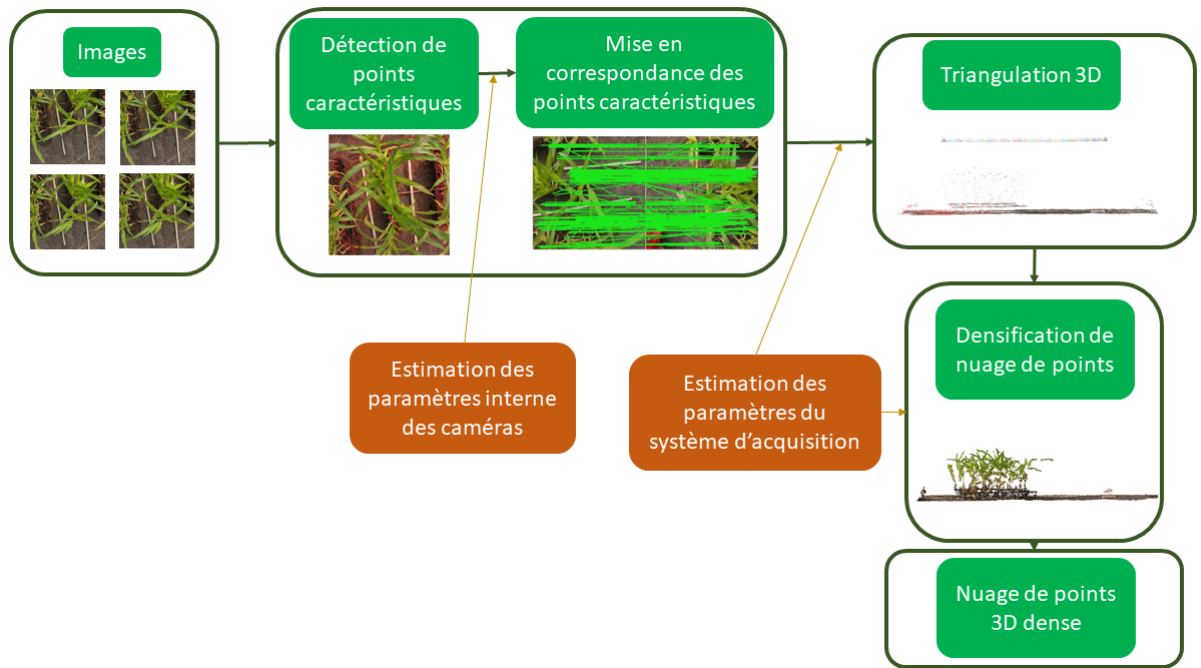


Fig. 1.33.: Description des principales étapes du processus de reconstruction multivue illustrées avec nos données de l'acquisition de la section 1.1.

(2016) présentent une méthode permettant d'obtenir des reconstructions 3D à partir de bases de données d'images non structurées. Cette méthode de reconstruction aurait pu permettre de simplifier le processus d'acquisition et de bénéficier des larges bases de données d'images en champ. Cependant, les hypothèses de fonctionnement de la méthode sont hors du cadre permis par l'application : l'objet d'intérêt doit être rigide, ce qui n'est pas le cas des plantes qui peuvent se déformer.

Il existe bien entendu des méthodes hybrides de reconstruction (entre la SFM et la multivue). Ces méthodes permettent de répondre à différentes contraintes d'acquisition. Par exemple des méthodes de reconstruction de fusion de cartes de profondeurs issues de la multivue (Shen, 2013) qui permettent la reconstruction de nuages de points représentant des objets ou scènes de grande taille. Le principe de fonctionnement de cette méthode repose sur quatre étapes. La première est de sélectionner des paires de stéréovisions d'images dans une base de données qui peut être non ordonnée, puis pour chaque paire la carte de profondeur est calculée. Ensuite pour corriger des erreurs et le bruit, les cartes de profondeurs sont raffinées par rapport aux cartes de profondeurs de leurs voisins. Enfin l'ensemble des cartes de profondeur sont fusionnées et les points projetés dans l'espace 3D. Les limites de cette méthode hybride sont les mêmes que la multivue. En effet, toutes les étapes nécessitent l'hypothèse forte selon laquelle l'objet d'intérêt est identique entre toutes les prises de vues. Or cela n'est pas garanti dans notre application. Il n'est donc pas possible pour nous d'utiliser cette méthode hybride.

Récemment, des méthodes issues de l'apprentissage profond* sont apparues. Elles

permettent d'obtenir des reconstructions 3D qui prennent en compte par exemple l'aspect non rigide des objets. Dans (Y. Jin et al., 2020) et (Han et al., 2019) présentent tous les deux une étude des méthodes de l'apprentissage profond dans les problématiques de reconstruction 3D. Elles sont classifiées en trois familles : les méthodes volumétriques, basées surfaces et basées sur les points et peuvent gérer de nouvelles situations par rapport aux méthodes purement géométriques. Par exemple, il est possible avec certaines méthodes de reconstruire des zones occultées ou des objets déformables. (Laga et al., 2020) présente des méthodes d'apprentissage profond pour estimer la profondeur à partir d'une seule image. L'article (Huang et al., 2018) propose un exemple de réseau de neurones pour la reconstruction multivue. Quant aux auteurs (Tang and Tan, 2018), ils utilisent des réseaux pour améliorer l'étape de bundle ajustement. (Le bundle ajustement est l'étape de raffinement de l'estimation des paramètres d'acquisition des caméras et de la position dans l'espace des points du nuage). Les auteurs Yao et al., 2019 proposent une méthode de reconstruction par récurrence de réseaux de neurones. Celle-ci permet une diminution de l'utilisation de la mémoire et d'obtenir des reconstructions 3D d'objets jusque-là trop volumineux pour les méthodes précédentes d'apprentissage. Le principal problème de l'ensemble de ces méthodes d'apprentissage profond est l'obtention d'une base d'apprentissage adaptée, c'est-à-dire annotée et suffisamment grande. Et ces bases de données n'existent pas dans notre domaine d'application pour l'instant.

Il est cependant important de se poser la question de la performance des méthodes par apprentissage profond par rapport aux méthodes géométriques classiques. Une étude qui a été faite dans le cadre de la reconstruction pour de la réalité augmentée en chirurgie commence à répondre à cette question dans l'article de Prokopcic and Dupont (2019). Notamment elle examine d'un côté les ressources nécessaires pour le fonctionnement de chacune des méthodes, par exemple en mémoire, en base de données d'apprentissage. Et d'un autre côté la qualité de la reconstruction en termes de précision et de complétion. Les résultats de l'analyse comparative montrent que les méthodes d'apprentissage profond ne permettent pas d'obtenir une reconstruction aussi précise qu'avec les méthodes géométriques. Cependant, la reconstruction est plus complète dans le sens où la méthode maximise la complétion de l'objet. Cette conclusion met en avant les points forts de chaque stratégie et les auteurs ouvrent la voie aux méthodes hybrides d'apprentissage profond et géométrique dans leurs perspectives.

Pour autant, dans le domaine plus particulier de l'agronomie et la foresterie, les bases de données ne permettent pas encore d'envisager des applications d'apprentissage profond. Les études sont donc limitées aux méthodes basées sur la géométrie qui restent donc les plus performantes aujourd'hui. Un inventaire est proposé par Iglhaut et al. (2019) des méthodes de SFM à la fois pour les acquisitions par télédétection aérienne et de proximité. Les auteurs présentent l'intérêt croissant que ces méthodes reçoivent pour des applications comme l'inventaire forestier ou la surveillance de l'état sanitaire des forêts. En effet, les capteurs et logiciels sont très accessibles et les

résultats prometteurs malgré les difficultés inhérentes au milieu forestier (c'est-à-dire la texture fine uniforme et les mouvements des plantes dues au vent).

Les méthodes géométriques restent aujourd'hui les méthodes les plus performantes pour la reconstruction de nuage de points 3D dans le cadre d'applications météorologiques. En effet, la précision des résultats obtenus par les méthodes d'apprentissage est encore inférieure. Et dans le domaine de l'agronomie et la foresterie, l'apprentissage profond souffre du manque de données annotées pour la création de base de données d'apprentissage. Elle offre pourtant des propriétés intéressantes en termes de complétion de l'objet et de gestion de déformations. Parmi les méthodes de reconstruction basées sur la géométrie, les méthodes de reconstruction basées sur la SFM, ou à partir d'une seule vue supposent la rigidité et l'immobilité de la plante. Cette hypothèse n'est pas vérifiée dans notre cas. C'est pourquoi les méthodes de reconstruction multivue sont les plus adaptées.

Après avoir choisi la méthode de reconstruction, une autre des problématiques du projet était de savoir si l'étalonnage des caméras et du système de caméras est ou non essentiel. Comme vu dans (Poulin-Girard et al., 2016) l'étalonnage et sa qualité a un impact sur la qualité de reconstruction. Il est clair que la connaissance des paramètres d'étalonnage complets simplifie la reconstruction et augmente la confiance, la fiabilité dans la suite du traitement de données. Cependant, le processus d'étalonnage est coûteux à l'échelle d'une entreprise et des erreurs ont eu lieu lors du processus d'acquisition (pour plus de détails, se référer à la section 1.1.5). Il est impossible d'avoir accès aux paramètres d'étalonnage comme prévu pour les images acquises lors de l'expérience. C'est pourquoi à la fois les méthodes de multivue et de SFM sont étudiées. La première pour décider du pipeline final de l'application et la deuxième pour pouvoir tout de même utiliser les données acquises et obtenir des nuages de points malgré des erreurs.

1.2.2 Présentation des logiciels

Les logiciels payants sont ignorés, à part Agisoft Metashape (LLC, 2020) pour lequel nous disposons d'une licence. Les pipelines passant par le réseau internet et tournant sur des serveurs cloud sont eux aussi ignorés. Les raisons sont tout d'abord des considérations de contrôle et de disponibilité du pipeline, mais également de temps d'accès et d'exécution qui ne sont pas garantis ensuite.

Je liste et présente brièvement les logiciels qui peuvent convenir à notre application d'après les contraintes expliquées précédemment. La liste n'a pas vocation à être exhaustive et lister tous les logiciels disponibles. Elle représente les logiciels les plus connus et les plus utilisés.

Bundle (SRL, 2020)

Logiciel de la suite OPK de Menci digital, il permet la reconstruction de nuages de

points 3D par photogrammétrie à partir d'images aériennes. C'est donc un logiciel plus adapté aux acquisitions par drone par exemple qu'à l'imagerie rapprochée.

VisualSFM (C. Wu et al., 2011)

C'est un logiciel académique spécialisé dans la SFM. Il est basé sur différents algorithmes de l'état de l'art et permet une reconstruction dense. Il est moins flexible, mais bénéficie d'une interface graphique intuitive.

Agisoft Metashape (LLC, 2020)

C'est un logiciel payant développé par la société Agisoft et anciennement connu sous le nom de Photoscan. Il permet la reconstruction par SFM et par multivues. C'est un logiciel dont on ne connaît ni toutes les caractéristiques ni tous les algorithmes internes. Il se base sur quelques méthodes publiques qui sont citées. Les deux références concernant la reconstruction 3D à partir d'images sont Hirschmuller (2007) et Pock et al. (2011). Cependant, l'ensemble du processus de traitement est largement inconnu. Son fonctionnement est donc sur le modèle de la boîte noire.

MicMac (Rupnik et al., 2017)

C'est un logiciel libre développé par l'Institut National de l'information géographique et forestière (IGN) et l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) basée sur la photogrammétrie. Il est extrêmement flexible et permet d'adapter de nombreux modèles et paramètres des caméras et liés au processus d'acquisition. Il permet donc de gérer aussi bien de la photogrammétrie rapprochée que la photogrammétrie aérienne. C'est aussi l'un des logiciels les plus difficiles à utiliser à cause de sa flexibilité.

Meshroom (ou AliceVision) (Griwodz et al., 2021)

Ce logiciel libre de photogrammétrie a pour particularité d'être interactif et d'avoir une interface totalement visuelle. Cependant, au moment de l'étude, le logiciel ne permet pas de faire une reconstruction du nuage de points mais construit directement une représentation maillée de l'objet cible. C'est pourquoi la méthode n'a pas été plus étudiée.

COLMAP (Schonberger and Frahm, 2016)

Le logiciel COLMAP permet d'utiliser un pipeline de multivues ou de SFM. Il propose à la fois une interface graphique ou par ligne de commande. Il suggère aussi des paramètres par défaut qui peuvent suffire à une majorité d'applications qui ne sont pas menées par des experts. Il est donc très accessible et l'interface est intuitive.

Theia (Snavely et al., 2008)

C'est une bibliothèque open source qui implémente la SFM incrémentale et globale. Des algorithmes classiques de détection de points caractéristiques, de mise en correspondance de points, d'estimation de pose et de reconstruction 3D sont inclus. Elle est implémentée en C++ et est compatible avec différents pipelines pour la multivue.

OpenMVG (Moulon, Monasse, et al., 2016)

C'est une bibliothèque open source pour la résolution des problèmes de géométrie multivues. Une implémentation globale et incrémentale de la SFM est fournie. Des algorithmes classiques de détection de points caractéristiques, de mise en correspondance de points, d'estimation de pose et de reconstruction 3D sont aussi fournis. Et il est compatible avec les données GPS. Elle est implémentée en C++ et est compatible avec différents pipelines pour la multivue.

Regard3D (Regard3D 2020)

C'est un logiciel libre et open source pour la SFM. Il permet de reconstruire des surfaces et d'ajouter de la texture. Il est dépendant de nombreuses bibliothèques extérieures dont OpenMVG.

Python Photogrammetry Toolbox (Moulon and Bezzi, 2011)

C'est un logiciel libre et open source basé sur des scripts Python pour automatiser la reconstruction 3D à partir d'une base de données d'images. Les deux processus principaux sont l'étalonnage complet des caméras et la reconstruction dense des nuages de points. Ces tâches reposent sur d'autres logiciels open source : Bundler et CMVS/PMVS.

1.2.3 Étude comparative des méthodes et logiciels

Il faut choisir parmi tous les logiciels présentés précédemment le meilleur pour notre chaîne de traitement. Pour cela, il est important de comparer leurs performances respectives. Dans l'état de l'art, plusieurs études ont comparé les performances des logiciels de reconstruction de nuages de points 3D par photogrammétrie. Je détaille d'abord l'étude de Bianco et al. (2018) qui présente l'ensemble des étapes nécessaires pour obtenir une comparaison quantitative robuste et complète. La comparaison dans (Bianco et al., 2018) a été faite avec des objets de la vie courante, dont les maillages représentant la vérité terrain, sont connus. Les résultats obtenus sont alors fiables. Mais il m'est impossible de réaliser la même étude avec la même méthodologie par absence de modèle représentant la vérité terrain. Je présente ensuite brièvement d'autres études comparatives de l'état de l'art afin de montrer

différents protocoles de comparaison de résultats de reconstruction, notamment pour les études qualitatives. Elles me permettent aussi de guider le choix des logiciels à tester. Enfin, je conclus avec ma propre étude comparative effectuée sur mes propres données (données issues de l'acquisition décrite dans la section 1.1).

Article Bianco et al. (2018)

Dans l'article Bianco et al. (2018), une étude des performances de reconstruction de différents logiciels de SFM sont évalués. Les objets de tests sont simulés sous forme de maillages et permettent une mesure précise des erreurs et des performances de chaque logiciel. Cette étude permet d'avoir un deuxième avis par rapport à nos propres tests et une base plus variée d'objets de test. De plus, nos mesures sont entièrement empiriques, contrairement aux leurs. Je présente ici la méthode d'étude de l'article et les résultats obtenus.

Bianco et al. (2018) évaluent les logiciels de reconstruction suivant les quatre catégories suivantes :

1. Alignement et recalage
2. Évaluation du nuage de points parcimonieux
3. Évaluation de la pose des caméras
4. Évaluation du nuage de points dense

La suite de la présentation de l'article suit cette architecture.

Alignement et recalage

Il est impératif de traduire les positions de la reconstruction dans le système de coordonnées de la vérité terrain afin d'obtenir un alignement correct et d'évaluer les résultats. Comme les méthodes d'alignement de nuages de points ne fonctionnent qu'entre nuages de points, les maillages de la vérité terrain sont échantillonnés pour ramener le problème à la comparaison de deux nuages de points. La méthode de Horn* est utilisée pour obtenir l'alignement des nuages de points (via l'implémentation de CloudCompare). Puis l'Interactive Closest Point (ICP)* implémenté dans Cloudcompare est utilisé pour obtenir le recalage fin des nuages de points.

Évaluation des nuages de points parcimonieux et denses

Maintenant que le nuage de points reconstruit et la vérité terrain sont alignés et

recalés finement, la distance de l'un à l'autre peut être calculée. Si la vérité terrain est disponible en nuage de points, la distance euclidienne entre le point de la reconstruction et le point le plus proche de la vérité terrain est calculée. Cette opération est répétée pour tous les points du nuage reconstruit. Les statistiques (écart-type et moyenne) de cette mesure peuvent ensuite être calculées. Si la vérité terrain est disponible en tant que maillage, l'algorithme de David Eberly (Eberly, 1999) est utilisé pour calculer la distance entre le point du nuage reconstruit et le point le plus proche sur un triangle du maillage. Après avoir obtenu cette distance pour tous les nuages de points reconstruits, les statistiques (écart-type et moyenne) de cette mesure peuvent être calculées.

La méthode est évaluée uniquement sur l'objet cible appartenant à la vérité terrain. Si la reconstruction prend en compte d'autres zones de la scène, les points de ces zones doivent être ignorés (élimination manuelle ou définition d'une distance maximale) (voir figure 1.34).

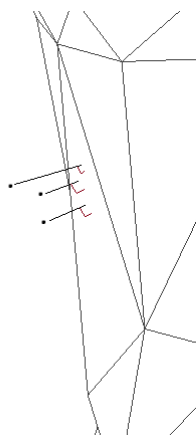


Fig. 1.34.: Schéma du calcul de la distance entre la vérité terrain (maillage) et le nuage de points avec la distance d'Eberly pour la mesure de performance de la reconstruction de nuage de points.

Évaluation de la pose des caméras

La pose des caméras est calculée par SFM, et est composée de deux informations distinctes : les positions des caméras et leurs orientations dans l'espace.

Les positions des caméras sont évaluées par la distance euclidienne entre la position calculée et la position vérité terrain. Il est aussi possible de calculer la distance moyenne et l'écart-type de cette mesure.

Les orientations des caméras sont évaluées suivant l'angle de rotation nécessaire pour aligner les axes de vues des orientations estimées des caméras à celles de la vérité terrain correspondante. Les quaternions* sont utilisés et les statistiques de moyenne et l'écart-type sont calculés pour ces différences d'angles.

Données synthétiques pour l'évaluation des performances

Il existe des ensembles de données contenant les vérités terrains acquises par des méthodes laser de haute précision, comme des objets de taille très large : les temples et tanks de Knapitsch et al. (2017) ou une sculpture de dinosaure dans Seitz et al. (2006). Dans d'autres cas, la vérité terrain est disponible sous forme de maillages issus de ces mêmes nuages de points de haute précision. L'hypothèse sous-jacente est que la reconstruction ne peut pas être de meilleure qualité que l'acquisition de haute précision par scanner et que celle-ci est de qualité très élevée. L'évaluation dépend donc toujours de la qualité de l'instrument et de la méthodologie utilisée. Ces ensembles de données ne fournissent généralement pas les données sur des positions des caméras lors de l'acquisition. Si les bases de données fournissent les informations sur les positions des caméras alors elles ne fournissent généralement pas de modèle de la vérité terrain, aussi partiel soit-il à cause de l'occultation. C'est pourquoi les auteurs ont préféré générer des données synthétiques virtuelles 3D. Puis de ce modèle 3D, des images de bonne qualité ont été produites. De cette façon, la vérité terrain est connue de façon optimale. Les images sont obtenues par des logiciels de rendu, ici Blender (Foundation, 2020) qui est un logiciel libre d'infographie 3D. Les techniques de rendu choisies sont importantes, car certaines (placage de relief (ou bump-mapping en anglais)* ou placage de normales (normal mapping)*) ajoutent des détails complexes aux images qui n'existent pas sur le modèle. Une scène avec lumière et caméra est créée. Les mouvements et caractéristiques de la caméra sont définis (voir figure 1.35).

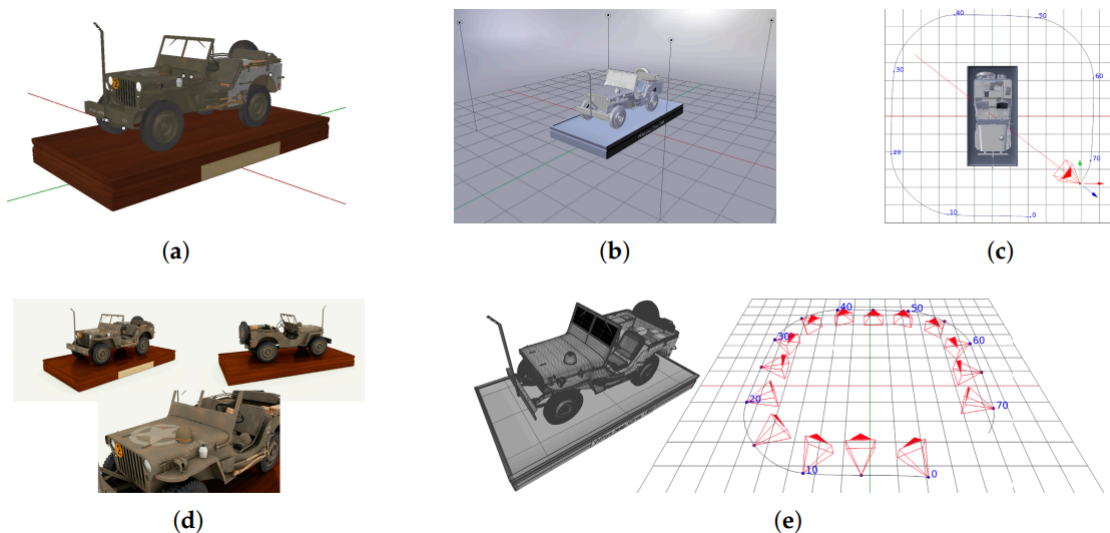


Fig. 1.35.: Schéma de la génération de la base de données synthétique d'images pour la reconstruction. (a) Modèle 3D. (b) Mise en place de la scène dans le logiciel Blender. (c) Déplacement de la caméra autour de l'objet. (d) Rendu d'images. (e) Vérité terrain des poses de la caméra et du modèle géométrique 3D.

Cinq ensembles de données synthétiques de modèles 3D ont été créés :

- Statue (Dgemmell1960, 2017), hauteur 10.01m, 121 images
- Vase d'Empire (Geoffreymarchal, 2017) , hauteur 0.92m,86 images
- Vélo (Milkyduhan, 2013), hauteur 2.66m, 86 images
- Bouche d'incendie (b82160, 2017), hauteur 1m,66 images
- 4x4 Jeep (BMF, 2016), hauteur 2.48m,141 images

Toutes les images ont été acquises à une résolution de 1920 x 1080 pixels à l'aide d'une caméra de distance focale 35mm et un capteur de 32 x 18 mm. Chaque objet est disponible en version numérique de la vérité terrain et les positions des caméras et orientations sont connues.

Pipelines évalués

Dans cette étude, les pipelines évalués sont : COLMAP, Theia, OpenMVG et VisualSFM, qui sont toutes les 4 des références. Pour la reconstruction dense, le pipeline est enrichi avec l'algorithme CMVS/ pmvs (respectivement Furukawa and Ponce (2009) et Furukawa, Curless, et al. (2010)).

Résultats

Ici sont repris les tableaux de résultats (1.36) et quelques illustrations (1.37) obtenues de l'article Bianco et al. (2018).

Model	COLMAP			OpenMVG			Theia			VisualSFM		
	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p
Statue	0.009	0.023	75k	0.008	0.027	86k	0.010	0.011	84k	0.065	0.049	76k
Empire Vase	0.001	0.001	390k	0.001	0.004	246k	0.002	0.002	356k	0.005	0.007	240k
Bicycle	0.013	0.012	74k	0.062	0.146	69k	0.018	0.020	46k	0.021	0.025	44k
Hydrant	0.008	0.017	42k	—	—	—	0.080	0.147	11k	0.008	0.014	40k
Jeep	0.010	0.016	236k	0.008	0.016	471k	0.014	0.019	448k	0.048	0.056	281k
Ignatius	0.004	0.004	155k	0.003	0.004	161k	0.018	0.019	109k	0.017	0.031	76k

(a)

Model	COLMAP			OpenMVG			Theia			VisualSFM		
	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p	\bar{x} [m]	s [m]	N_p
Statue	0.034	0.223	9k	0.057	0.267	4k	0.020	0.039	8k	0.185	0.236	6k
Empire Vase	0.005	0.152	8k	0.013	0.191	2k	0.002	0.005	8k	0.007	0.013	5k
Bicycle	0.042	0.365	5k	0.156	1.705	7k	0.027	0.086	2k	0.056	0.796	4k
Hydrant	0.206	0.300	2k	—	—	28	0.045	0.123	89	0.029	0.032	1k
Jeep	0.053	1.058	6k	0.057	0.686	4k	0.012	0.016	8k	0.055	0.124	5k
Ignatius	0.009	0.021	23k	0.013	0.032	12k	0.023	0.022	10k	0.054	0.124	14k

(b)

Fig. 1.36.: Tableaux d'évaluation quantitative des différentes reconstructions sur les modèles étudiés. \bar{x} est la moyenne de la distance du nuage de points à la vérité terrain. N_p est le nombre de points reconstruit. (a) Pour la multivue. (b) Pour la SFM. (Bianco et al., 2018).

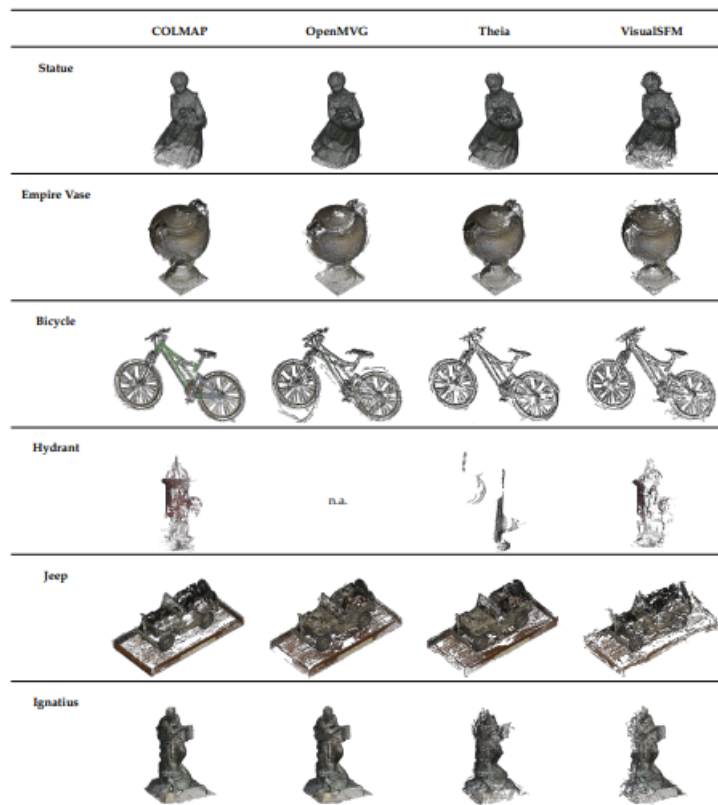


Fig. 1.37.: Exemple de reconstruction dense sur les différents modèles avec les différents logiciels d'intérêt (Bianco et al., 2018).

L'ensemble des pipelines a pu être étendu vers la reconstruction dense sauf pour la bouche à incendie qui n'a pas suffisamment de données pour permettre une reconstruction dense. Les pires résultats dans ce cas sont obtenus par OpenMVG qui ne permet même pas d'exécuter le pipeline. COLMAP donne les meilleurs résultats en moyenne.

Une étude des performances montre que COLMAP est très efficace et a besoin de moins de temps que les autres méthodes pour obtenir la reconstruction.

Le logiciel Theia a une erreur systématique de positionnement de caméra dans le jeu de données de la statue, mais obtient tout de même une bonne reconstruction car l'orientation estimée est précise.

Conclusion de l'article

En termes de pipeline, COLMAP est celui qui donne les meilleurs résultats en moyenne et est aussi le plus rapide d'après cette étude.

Autres travaux sur la comparaison des méthodes de reconstruction

Plusieurs autres auteurs de différents domaines d'application se sont intéressées à la question de la performance des logiciels de reconstruction par photogrammétrie (multivue ou SFM). Ci-dessous je présente brièvement quelques études intéressantes qui ont été effectuées ainsi que leurs conclusions.

La première étude comparative (Bartoš et al., 2014) s'intéresse uniquement à des logiciels ou services Web libres. Les logiciels choisis sont VisualSFM, OSM Bundler. Les trois autres pipelines étudiés sont des services Web : Microsoft Photosynth, Photosynth Toolkit, Autodesk 123D Catch. La mesure de performance se fait sur trois plans différents. Tout d'abord, la densité de la reconstruction est calculée. À partir des mêmes images, plus la densité de points de la reconstruction est élevée, meilleur est considéré le résultat. Le deuxième aspect de la comparaison s'intéresse à la cohérence du nuage de points reconstruit par rapport à l'objet reconstruit. Enfin, la qualité de la texture/photo est examinée. Les deux dernières des mesures de performance sont qualitatives. La conclusion de l'étude est que VisualSFM obtient les meilleurs résultats.

Les logiciels examinés et la méthodologie sont bien différents dans l'étude comparative de Probst et al. (2018). Le domaine d'étude est restreint à la végétation dans le contexte particulier de la foresterie. Les deux logiciels qui sont comparés sont VisualSFM et Photoscan (ancien nom d'Agisoft Metashape), et plus précisément les différents pipelines implémentés dans chacun des logiciels. Les données de l'étude sont doubles : un jeu de données réel et un autre synthétique simulé dans des conditions approchantes en suivant la méthode de Liénard et al. (2016). Les données aériennes réelles sont issues d'un drone qui a tourné autour d'un arbre de 16m à feuilles caduques. La construction des jeux de données synthétiques permet d'utiliser la méthode de comparaison basée sur la distance entre les nuages de points alignés et recalés. Cependant, cette mesure ne permet pas de prendre en compte les occultations, c'est-à-dire les zones qui n'ont pas pu être reconstruites. Une autre mesure de performance complémentaire est alors utilisée. La courbe ROC* décrit pour une distance seuil donnée l'absence ou la présence de points correspondant entre les deux nuages de points (respectivement négatif ou positif). Ce test est fait pour des valeurs continues du seuil. La mesure de l'erreur est calculée en utilisant l'aire sous la courbe (Bradley, 1997). Les auteurs remarquent que chaque pipeline de reconstruction génère des nuages de points avec des caractéristiques géométriques différentes. Le logiciel Photoscan peut être considéré comme légèrement plus performant que l'autre logiciel libre.

Une particularité de la dernière étude comparative présentée est qu'une reconstruction est considérée comme la vérité terrain. En effet, comme vu précédemment, le logiciel Metashape est considéré comme très performant. Rahaman and Champion

(2019) considèrent donc en l'absence de vérité terrain acquise avec la méthode de référence, à savoir un scan de haute précision, que la reconstruction avec Metashape a valeur de référence. L'objectif de l'article est de comparer le logiciel libre permettant d'obtenir le meilleur nuage de points au sens de la reconstruction Metashape qui peut elle-même présenter des erreurs et des déformations. Un autre point intéressant de cette étude comparative est que le calcul de l'erreur de reconstruction quantitative est donc possible. La distance entre le point le plus proche de la reconstruction de référence et celle obtenue par le logiciel étudié est calculée. Puis elles sont transformées en carte de fréquentation* avec une distribution χ^2 . Les logiciels libres étudiés sont VisualSFM, Python Photogrammetry Toolbox, COLMAP et Regard3D. Les bases de données utilisées sont issues du domaine du patrimoine culturel. La conclusion de cette étude est que le logiciel Regard3D est le plus performant au sens de Metashape suivi de COLMAP.

Ces études comparatives montrent plusieurs façons de définir le meilleur logiciel de reconstruction de nuages de points 3D avec les techniques de photogrammétrie. De plus, la présélection des logiciels de reconstruction à comparer ne permet pas d'avoir une vue d'ensemble des performances de chaque pipeline, d'autant plus que les données de tests sont très variées. Les résultats sont d'autant moins transposables à l'ensemble des méthodes et conditions d'acquisition. Il se pose aussi la question de la vérité terrain quand elle est inaccessible. D'un côté, une étude sur des données synthétiques peut être effectuée (Probst et al., 2018) ou des mesures qualitatives indirectes peuvent être proposées (Bartoš et al., 2014). D'un autre côté, des évaluations qualitatives sont aussi possibles (Bartoš et al., 2014) avec tous les biais et erreurs que cela peut apporter. L'ensemble de ces variations de contextes, méthodes et données justifient la variété des conclusions et le fait qu'aucun pipeline n'est systématiquement considéré comme le meilleur. Cependant certains logiciels sont très utilisés et reviennent systématiquement dans le classement des meilleurs dans ces études : COLMAP, Metashape et VisualSFM.

Dans la suite, je présente l'étude comparative qui a été réalisée avec les données acquises présentées dans la section précédente 1.1.

Étude sur nos données

La vérité terrain pour la base de données acquise lors de l'expérimentation décrite dans la section 1.1 n'est pas disponible. Les seules mesures de références sont des mesures indirectes sur l'aire de la surface et de longueurs particulières de la feuille. L'évaluation de la reconstruction se fait de façon empirique, à la fois sur la qualité du résultat et sur la facilité d'utilisation du logiciel.

Les cinq logiciels comparés dans un premier temps sont VisualSFM, MicMac, Meshroom AliceVision, COLMAP et Agisoft Metashape. Dans le tableau 1.4 une description

des 5 logiciels que l'on compare est faite. Ce tableau permet de résumer la facilité d'utilisation d'un logiciel.

	VisualSFM	MicMac	AliceVision	COLMAP	Agisoft Metashape
Libre/Payant	Libre	Libre	Libre	Libre	Payant
SFM	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Multivue	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Sortie Nuage de points	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Simplicité d'utilisation	Oui	Non	Oui	Oui	Oui

Tab. 1.4.: Tableau des caractéristiques principales des logiciels de reconstruction étudiée.

L'utilisation de MicMac n'est pas accessible pour des non experts, même s'il est très performant lorsqu'il est maîtrisé. C'est pourquoi il n'est pas sélectionné pour la suite du pipeline. AliceVision ne permet pas de créer des reconstructions de nuage de points denses (au moment de cette analyse) et se concentre sur les maillages, le logiciel est aussi écarté de l'étude. Le logiciel VisualSFM est spécialisé pour la SFM. Ce n'est pas la méthode visée dans le pipeline final mais pour cette base de données il est retenu. Agisoft Metashape n'est pas libre mais Arvalis en a la licence.

Maintenant je compare de façon empirique la qualité des résultats obtenus par les trois logiciels suivant : VisualSFM , COLMAP et Agisoft Metashape. Les jeux d'images utilisés pour la reconstruction sont l'ensemble des images CP3\CC11\champ1 pour les 9 caméras (respectivement : 79, 80, 74, 75, 75, 70, 71, 74 et 75 images).

Résultats avec VisualSFM

Les résultats obtenus avec VisualSFM sont donnés sur les figures 1.38 et 1.39.

La reconstruction dense a été effectuée sans message d'erreur, mais il y a très peu de points (289276 points). De plus il y a énormément de bruit avec un ensemble significatif de points reconstruits sous le niveau du sol. L'utilisation de VisualSFM n'est donc pas conseillée.

Résultats avec Metashape

Il y a plusieurs qualités possibles pour les de nuages de points 3D reconstruits. La qualité moyenne et la plus haute qualité HQ (high quality) sont choisies. Les illustrations des résultats par Metashape se trouvent sur la figure 1.40.

Il est évident que la reconstruction haute qualité est largement supérieure à la reconstruction de qualité moyenne. Je ne m'intéresse donc dans la suite qu'à la

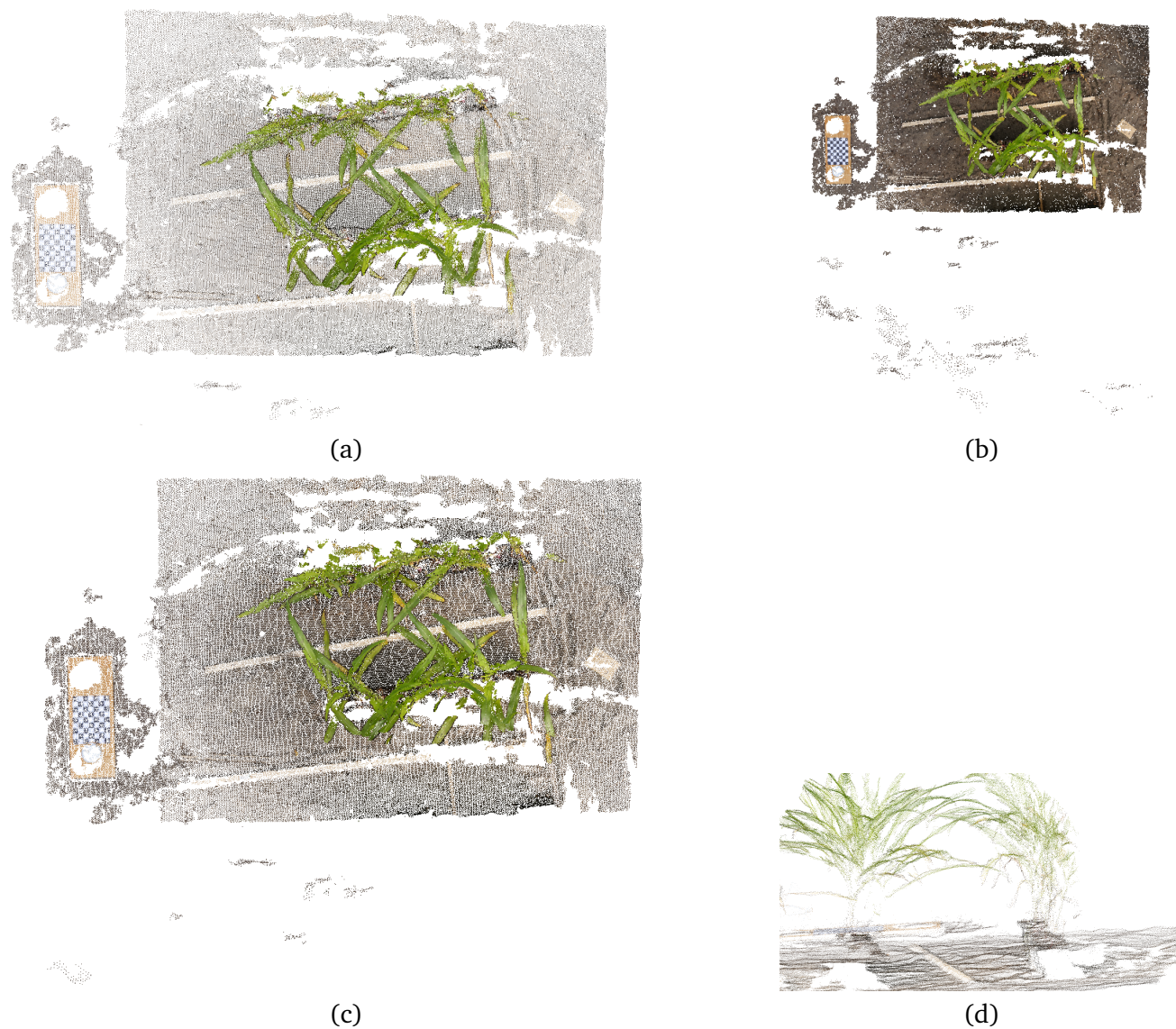


Fig. 1.38.: Reconstruction du nuage de points avec VisualSFM (partie1). (a) (b) (c) Vues du dessus, (d) vue oblique rapprochée.

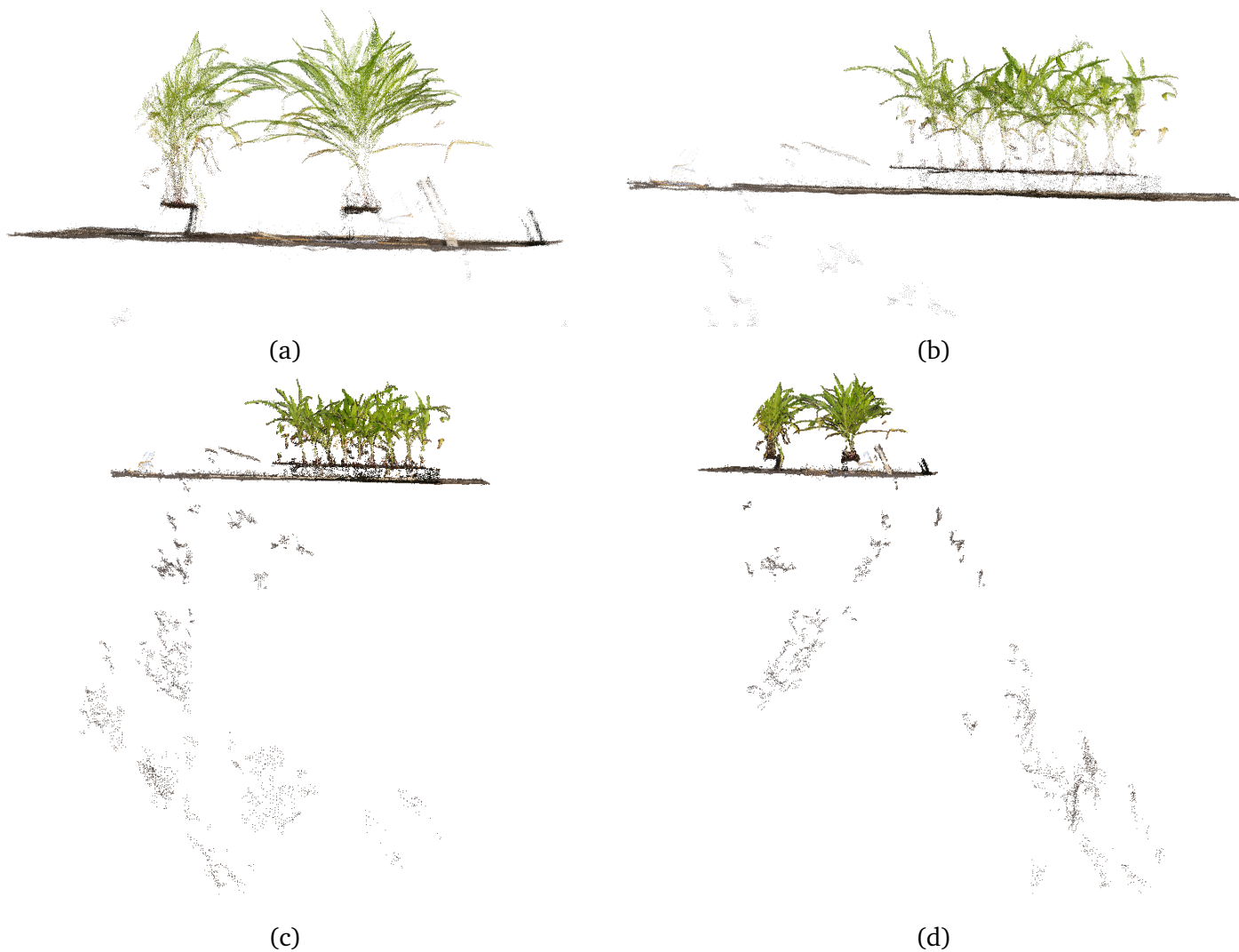


Fig. 1.39.: Reconstruction du nuage de points avec VisualSFM (partie2). (a) (b) vues latérales, (c) (d) vues latérales approchées.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.40.: Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité moyenne. (a) Vue du dessus. (b) Vue latérale. (c) Vue arrière.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.41.: Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. (a) (b) Vue du dessus. (c) Vue arrière. (d) Vue latérale.

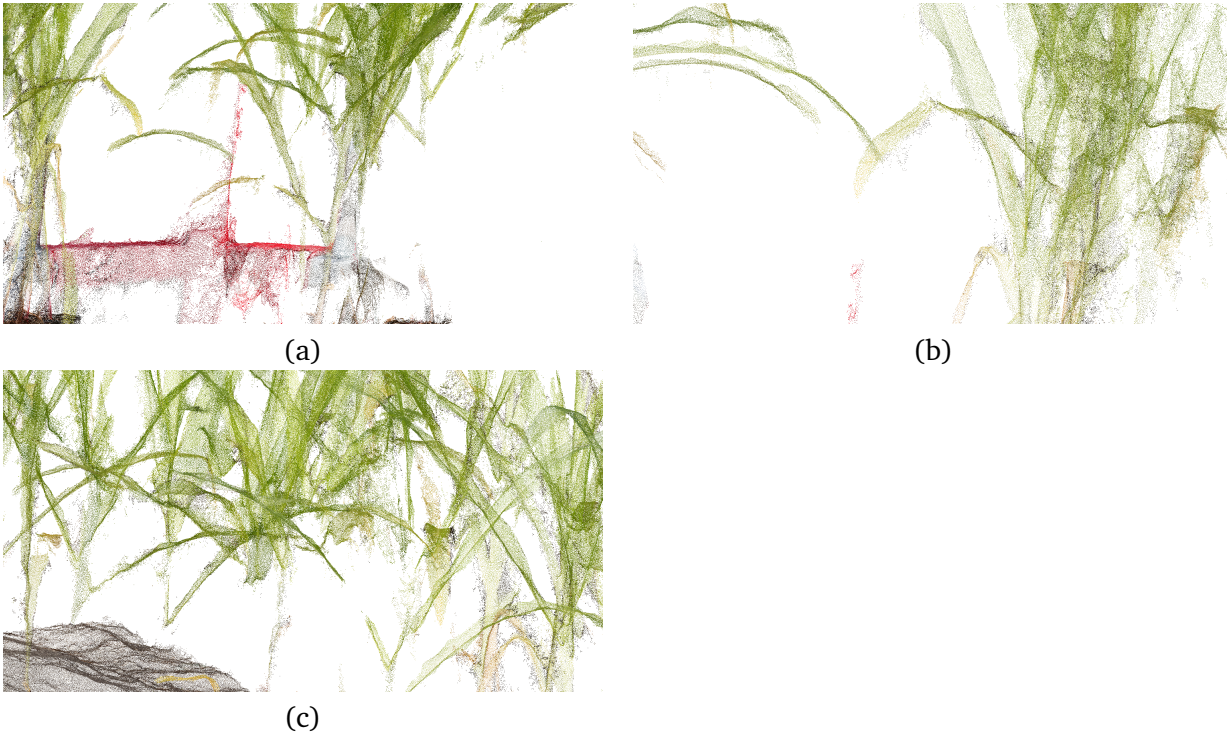


Fig. 1.42.: Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. Vues rapprochées des nuages de points des feuilles. (a) Occultation. (b) Bruit. (c) Détail du champ.

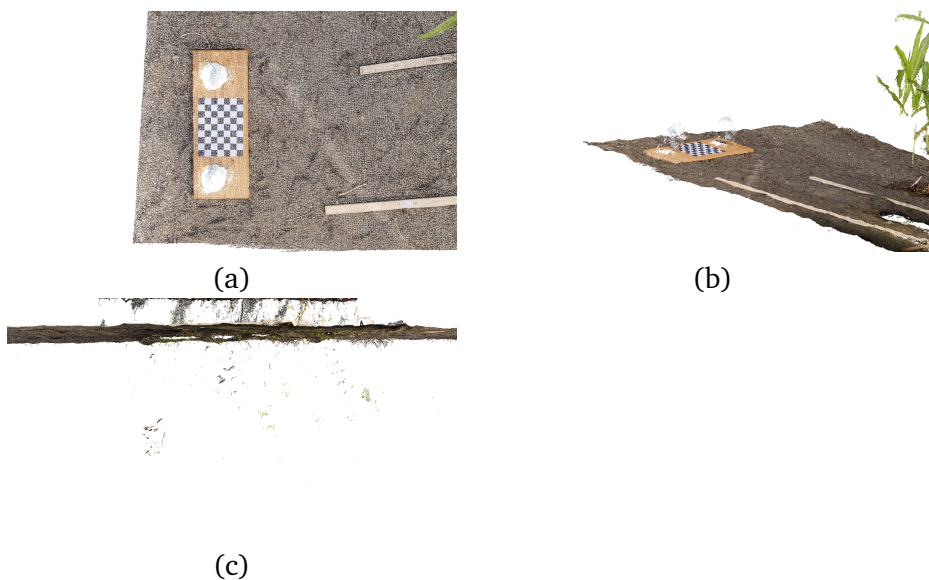


Fig. 1.43.: Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. (a) Détails des déformations de la zone d'étalonnage. (b) Détail de la reconstruction des sphères réfléchissantes. (c) Points du nuage sous le niveau de la terre.

reconstruction de haute qualité. Le nuage de points est très dense (5 216 813 points). On remarque des déformations au niveau de la grille d'étalonnage qui n'est plus droite, de même que le sol qui est légèrement courbé. De la même façon, des points sont reconstruits sous le sol. Le bruit n'est pas absent de la reconstruction et quelques problèmes d'alignement inévitables à cause de la méthode d'acquisition sont aussi visibles.

Résultats avec COLMAP

Les résultats de reconstruction obtenus avec COLMAP sont illustrés dans les figures 1.44 et 1.45.

La reconstruction est aussi dense qu'avec Metashape (5723570 points reconstruits). Cependant il a moins de déformations géométriques si l'on se fie à la géométrie de la plaque d'étalonnage qui reste très bonne. De plus il y a bien moins de bruit de reconstruction et aucun point ne se trouve sous le niveau du sol. Il n'y a aussi pratiquement pas de problème d'alignement. L'angle de vue du système d'acquisition est très bien illustré. Il y a cependant un peu plus de données manquantes que pour la reconstruction avec Metashape.

Conclusion

Le logiciel choisi pour construire la base de données est COLMAP, car il est le plus fiable géométriquement et le plus simple du point de vue d'un utilisateur.

1.2.4 Description de notre base de données

Maintenant que l'algorithme de reconstruction de nuages de points est choisi, la base de données peut être créée. Finalement, 32 nuages de points ont été reconstruits. En l'absence des données d'étalonnage, les mises à l'échelle des nuages de points ont été faites grâce aux objets de la scène dont on connaît les mesures (pots standards, distances entre les rangs, mires d'étalonnage). Ils sont issus de différents jeux de données d'images et de différentes configurations d'acquisition. Ces nuages de points ne sont issus que d'une exploitation minimale de l'ensemble de la base de données d'images disponible. Je précise dans les paragraphes suivants les configurations choisies de caméra pour la reconstruction et illustre le résultat obtenu. L'ensemble des nuages de points ont été reconstruits à partir du champ en configuration 3 et différentes configurations de capteurs listées ci-dessous (se référer à la section 1.1.4 pour plus d'informations) :

- CC11, champ1 (caméras 4,5 et 6)



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.44.: Nuage de points reconstruit avec le logiciel COLMAP. (a) Vue du dessus. (b) Vue latérale. (c) Vue arrière.

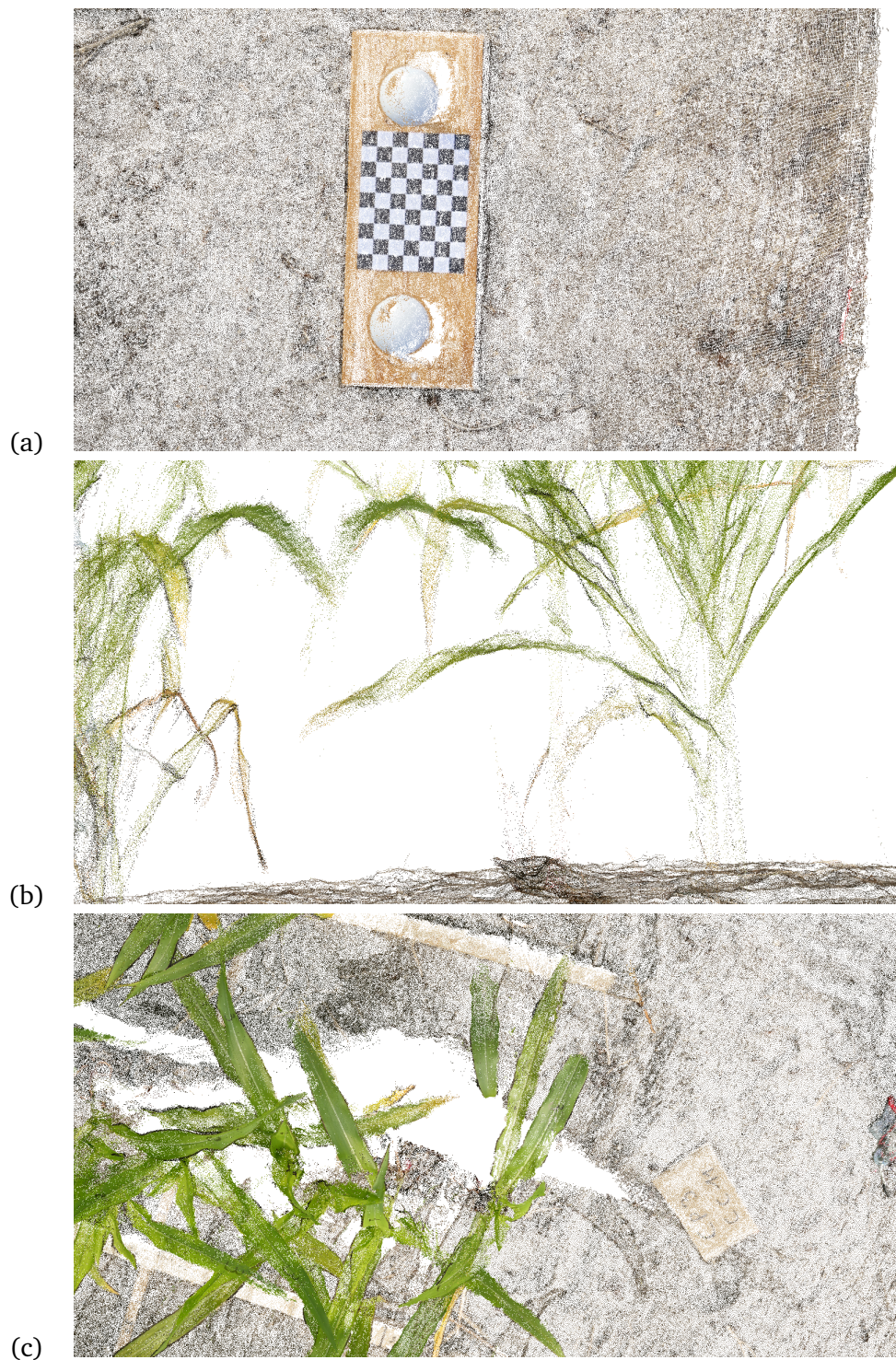


Fig. 1.45.: Nuage de points reconstruit avec le logiciel COLMAP. (a) Détails de la station d'étalonnage. (b) Détails du champ avec différente densité de nuage de points. (c) Détails du champ vu du dessus pour les occultations.

- CC11, champ1 (toutes les caméras)
- CC12 (toutes les caméras)
- CC13 (toutes les caméras)
- CC21 (toutes les caméras)

Pour chaque jeu de données d'image, la position et l'orientation des caméras lors de l'acquisition sont calculées et positionnées au-dessus d'une reconstruction faiblement dense du champ (illustrations sur la figure 1.49). À partir de ce schéma de position, je sélectionne des images pour chaque caméra selon trois schémas différents de positions relatives :

- La ligne L : ce sont les images qui sont a priori acquises le plus proche dans le temps les unes des autres d'après le fonctionnement de Phénofixe.
- Le carré C : c'est en fait la combinaison de 3 caméras en ligne décrivant les 4 coins d'un carré proche et le centre du carré (il y a donc 15 images).
- La vague V : représentant une vague, c'est une déformation de la ligne pour apporter de l'écartement selon la direction de déplacement.

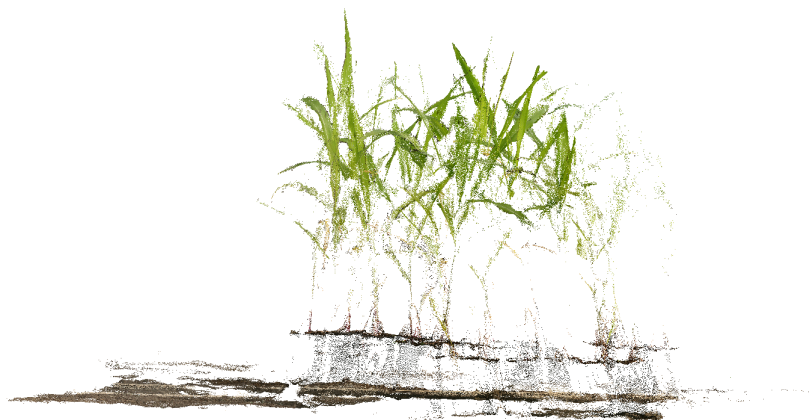
Quelques illustrations des nuages de points issus de la reconstruction avec COLMAP sont données sur les figures 1.46, 1.47 et 1.48.

1.2.5 Conclusion sur la reconstruction de nuages de points

La reconstruction de nuage de points 3D à partir d'images est devenue accessible pour de nombreuses applications. Après avoir étudié les solutions accessibles dans l'état de l'art et décrit leurs caractéristiques, il faut choisir la solution de reconstruction pour notre pipeline. La méthode COLMAP s'est révélée, suite aux études comparatives de l'état de l'art et à mes propres tests, comme le meilleur compromis entre la qualité du résultat et la facilité d'utilisation. Une base de données de nuages de points issus de la photogrammétrie a pu être générée à partir d'une petite partie de la base de données d'images. Elle permet d'illustrer le potentiel du pipeline en termes de quantité et de qualité de données.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.46.: Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de L4 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC13.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.47.: Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de V3 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC12.

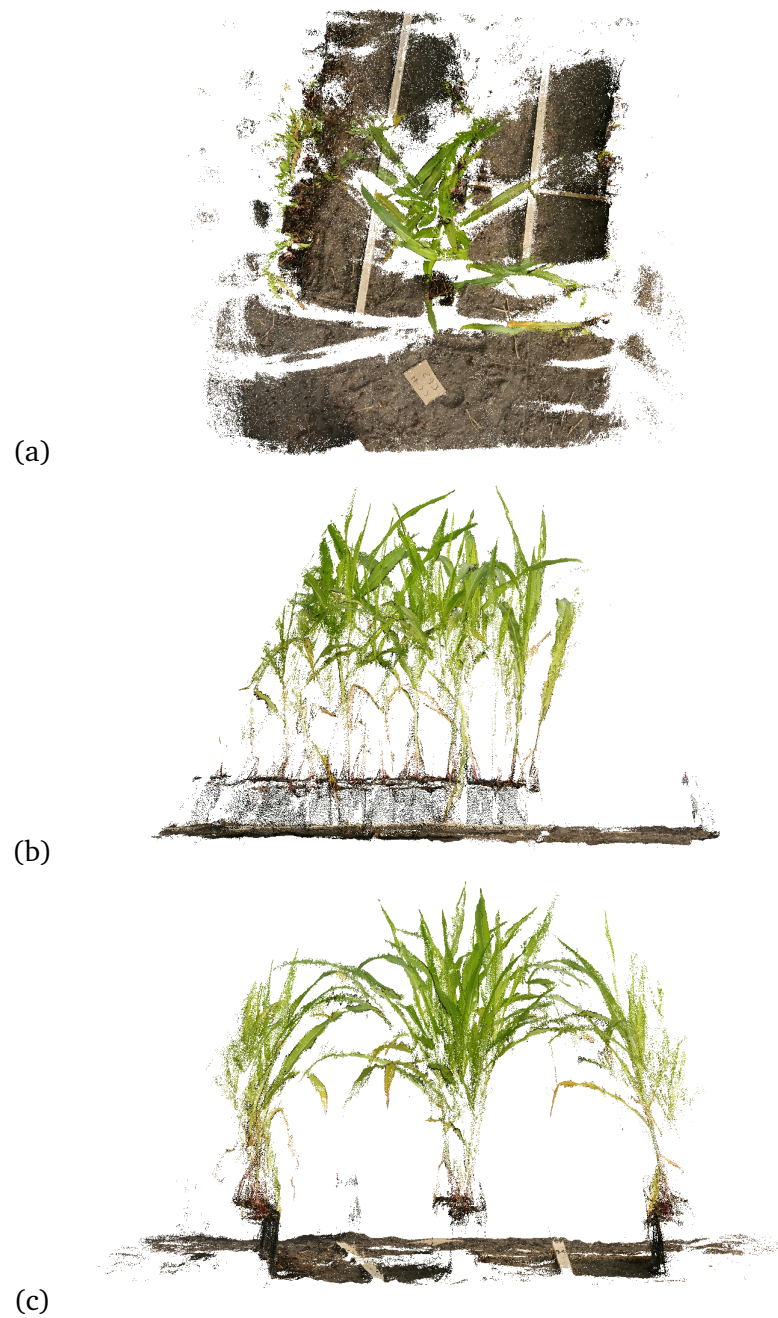


Fig. 1.48.: Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de C2 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC11.

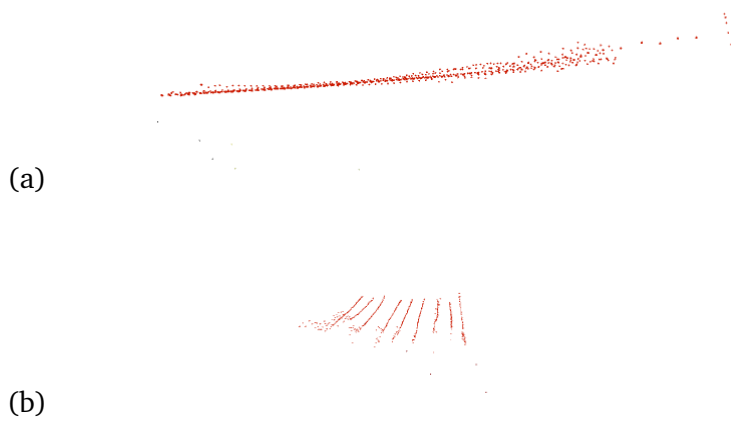


Fig. 1.49.: Positions dans l'espace des caméras pour chaque image au-dessus du champ lors de l'acquisition de CP3 pour la configuration des capteurs CC11 calculée avec COLMAP. (a) Vue latérale. (b) Vue oblique.

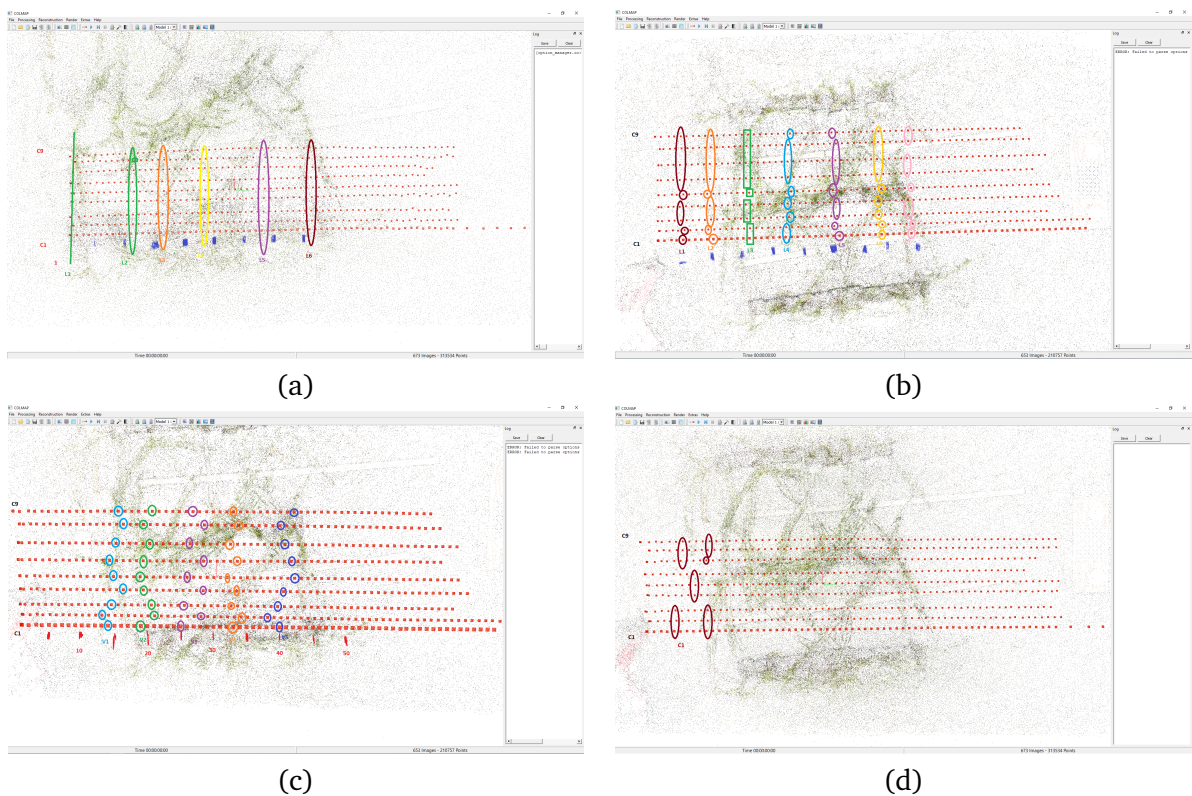


Fig. 1.50.: Dans le logiciel COLMAP, visualisation des différentes configurations des caméras sélectionnées pour chaque jeu de données de reconstruction multivue pour créer la base de données de nuage de points. Chaque couleur représente un jeu de données différent. (a) (b) Configurations en ligne respectivement CP3 \ CC11 et CP3 \ CC12. (c) Configuration en carré pour CP3 \ CC11. (d) Configuration en carré pour CP3 \ CC12.

1.3 Conclusion sur le processus expérimental et la reconstruction de données

Dans les sections précédentes de ce chapitre, le protocole expérimental a été mis au point et testé, puis les méthodes de photogrammétrie ont été présentées et la plus adaptée à notre application a été sélectionnée. Une base de données de nuages de points acquis dans des conditions proches du champ a été créée. Elle est accompagnée de mesures de référence de caractéristiques architecturales de la plante de maïs et sa feuille. Avec cette première expérience, des nuages de points présentant des caractéristiques géométriques qui sont dues aux conditions d'acquisition (champ extérieur, milieu non contrôlé) sont obtenus, ce qui permet de prévoir les qualités de robustesse des méthodes et algorithmes utilisés dans la suite du pipeline de mesures sur le nuage de points 3D. Par exemple, il faut gérer les zones qui ont été occultées lors de l'acquisition et qui ne sont donc pas reconstruites.

Cependant, les caractéristiques géométriques de ces nuages de points ne sont a priori pas optimales. En effet, les paramètres de l'étalonnage n'ont pas été utilisés. Ainsi ces nuages présentent des erreurs et déformations qui seront soit absentes, soit en quantité moindre dans les nuages de points reconstruits à partir d'un pipeline multivue, ce qui a été montré dans les articles Belhaoua et al. (2009) et Dai et al. (2014). Les sources d'erreurs pour les reconstructions sont en effet multiples, car l'ensemble du processus de triangulation est très sensible. Les sources sont principalement ces trois points : erreurs due à la caméra lors du processus de formation des images, erreur dues au processus d'étalonnage des caméras et du système et enfin erreurs dues au traitement des images (segmentation). Dans ce pipeline, nous avons limité au maximum l'ajout de source d'erreur en n'effectuant pas de traitement sur les images. Il reste deux types d'erreurs à minimiser. La première, la formation des images, peut se faire en étudiant les meilleures positions de caméra. La question de l'étalonnage des caméras qui sont présentes dans l'expérimentation actuelle est amenée à disparaître une fois les erreurs de manipulation corrigées et une étude de l'influence de la température du capteur effectuée. De plus que s'il est possible de recalibrer avec le minimum d'erreur les nuages de points issus de la photogrammétrie et de l'acquisition par LiDAR, il sera possible de comparer les deux modalités d'acquisition et, peut-être, à terme, de fusionner les informations dans un nuage de points multimodalités.

Pour ce qui est du processus de reconstruction de nuages de points 3D, il a été impossible de comparer les pipelines de reconstruction par multivue. Cependant, le logiciel COLMAP est considéré comme le meilleur pour notre application en utilisant le pipeline SFM. Cela dit, pour le pipeline multivue, il n'y a pas d'autre logiciel libre

et ouvert qui peut le concurrencer pour l'instant. Pourtant, en l'absence de vérité terrain sous forme d'un modèle 3D, il est difficile de quantifier la précision de la reconstruction. Il serait important de pouvoir réaliser une étude de performance de reconstruction en utilisant les processus de multivue plutôt que de SFM.

Je récapitule dans ce paragraphe l'état d'avancement des différents objectifs de l'expérimentation qui ont été listés dans la section 1.1. Tout d'abord les **objectifs 1 et 3** n'ont pas pu être complètement réalisés. En effet à cause des problèmes de synchronisation des caméras, les paramètres d'étalonnage du système d'acquisition n'ont pas pu être mesurés avec les mires mais ont dû être estimés avec la SFM. Une correction du protocole expérimental permettra de corriger les erreurs et de réaliser ces objectifs. Les objectifs **2,4,5 et 8** ont pu être réalisés en partie, en effet toutes les données ont toute pu être acquises et des nuages de points issus d'une variété de configurations de caméras reconstruites. Ce qui fait que l'**objectif 6** est validé, nous avons bien une base de données multimodale à disposition. Cependant, il n'a pas été possible de comparer les nuages de points entre eux. En effet, les sphères de recalages n'ont pas été acquises correctement pour les deux modalités de la Phénofixe, cette opération essentielle pour la comparaison des modalités n'est donc pas faisable aisément. Et il y a très peu de points de repère disponible dans la scène acquise. C'est pourquoi il n'y a pas eu de comparaison quantitative des modalités effectuée et que ni l'**objectif 7** ni l'**objectif 10** (qui découle de la complétion de l'objectif 7) n'ont pu être entrepris. Cependant, l'**objectif principal 9** est déjà partiellement réalisable, grâce à la base de données créée.

Au final, une base de données de nuages de points 3D de plantes, issues de multiples modalités, avec les mesures de surface foliaire de référence est à disposition. Elle peut être utilisée pour de multiples applications comme l'identification d'organes par segmentation par exemple. Il est maintenant possible de mettre en place l'étude comparative de méthodes de reconstruction de surface à partir de nuages de points 3D pour mesurer l'aire d'une feuille. Notre base de données est utilisée dans la suite de l'étude. Dans le chapitre 3, la méthodologie de l'étude comparative est expliquée et les méthodes de reconstruction de surface à partir d'un nuage de points 3D sont décrites.

Modèle synthétique de nuage de points 3D de feuille

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'étape de l'acquisition est une étape clef pour la numérisation des couverts de plante en plein champ. J'ai monté une expérimentation me permettant de récolter les meilleurs nuages de points possibles d'un champ de maïs sous serre. Cependant, l'expérimentation que j'ai mise en place est intrinsèquement limitée. Les données acquises ne représentent qu'une seule variété de plantes, dans un seul environnement et une seule réalisation de conditions expérimentales. Or, nous voulons l'étude de la chaîne de traitement la plus large possible afin d'en optimiser la fiabilité et la robustesse. En effet, les conditions d'acquisition ainsi que l'objet cible sont tous les deux très variés, ce qui se répercute sur certaines propriétés des nuages de points. Les nuages de points sont par conséquent tout aussi variés. Dans les chapitres 3 et 4, nous verrons plus précisément l'influence de ces propriétés sur des approches globales de reconstruction de surface pour les nuages de points des feuilles. Il est donc essentiel de tester et valider les comportements des différents algorithmes vis-à-vis d'une variété la plus large possible de données.

Malgré la nécessité d'avoir à disposition le maximum de données possible et le grand intérêt que ces données représentent pour l'ensemble de la communauté scientifique, il est pratiquement impossible d'avoir accès à des bases de données de nuages de points de plantes, encore moins acquises dans des conditions similaires à notre étude (c'est-à-dire en milieu non contrôlé). Des ontologies et des initiatives ont pourtant essayé d'encourager le partage de tout type de données phénotypiques et de métadonnées d'expérimentation, par exemple la MIAPPE (Papoutsoglou et al., 2020). De plus, de nombreux auteurs ont souligné l'importance du partage de données en concordance avec le besoin croissant que représentent les algorithmes d'apprentissage par ordinateur (Danilevicz et al., 2021). Force est de constater que ces appels n'ont reçu que peu d'écho pour l'instant. Dans le cadre des bases de données de nuage de points pour le phénotypage, on peut noter la publication d'un ensemble de données centrée sur l'étude du stress (eau, fertilisant, concurrence entre plantes) sur les plants de betterave (Khanna et al., 2019). Une autre base de données publiée en 2020, ROSE-X (Dutagaci et al., 2020) se focalise sur l'étude de la segmentation des organes des rosiers. Enfin, la base de données Pheno4D

(Schunck et al., 2021), publiée en août 2021, met à disposition des nuages de points de haute résolution de plusieurs plants de tomates et de maïs. Certains sont labélisés et associés à des mesures architecturales comme l'aire de la surface et la longueur des feuilles et la longueur de la tige. Ces données, très récentes, forment à ma connaissance le seul exemple de base de données de nuages de points de plante accessible fournissant les informations nécessaires au phénotypage. De ce fait, les études sur des données issues de plantes réelles sont limitées.

Par conséquent, la méthode la plus efficace dans ce chapitre pour obtenir le maximum de données est de créer des feuilles synthétiques pour lesquelles la surface foliaire est connue et les propriétés du nuage de points sont contrôlées. Ces propriétés sont inhérentes soit à la méthode d'acquisition, soit à la géométrie de la feuille. On les appelle ici des **critères**. Avec ces données je peux construire une base de données de nuages de points de feuilles aux propriétés particulières, variées et maîtrisées.

Dans un premier temps, je vais présenter les modèles de feuilles synthétiques de l'état de l'art. Puis je présenterai mon propre modèle basé sur neuf critères. Ensuite, je validerai ce modèle comme représentation valable par rapport à la diversité des architectures de feuilles. Enfin, je détaillerai les ensembles de nuages de points 3D créés avec ce modèle pour la suite de l'étude.

2.1 Modèles synthétiques de feuille dans la littérature

La génération de feuilles synthétiques, et plus globalement de plantes synthétiques, permet de réaliser des études complexes. Elle permet de contrôler les propriétés géométriques des plantes synthétiques, ainsi que les autres paramètres modélisés de l'étude. Sans compter, que l'obtention du nombre de données suffisant pour l'étude est la validation est certain. La génération de données est déjà étudiée et utilisée pour le développement d'algorithmes de reconnaissance d'espèces ou de maladies. On peut aussi considérer que l'obtention d'un modèle précis de plante est une étape déterminante dans la connaissance de sa physiologie et l'interaction avec son environnement.

Il est intéressant de décrire le domaine d'application de chaque modèle proposé dans la littérature par rapport aux considérations suivantes :

- Objectifs du modèle :

- Modèles analytiques : ces modèles permettent d’obtenir des informations sur les plantes à partir de données acquises et de les décrire a posteriori.
 - Modèles génératifs : ces modèles permettent de générer des nouvelles données de plantes synthétiques.
 - Modèles analytico-génératifs.
- Dimensions du modèle :
 - Modèles en 2D.
 - Modèles en 3D.
 - Modèles à composante temporelle : ce sont généralement les modèles de croissance de plantes.
 - Modèle sans composante temporelle : ils permettent de décrire une étape statique du développement des plantes.
 - Modèles paramétriques : les données du modèle ne permettent pas de générer une visualisation de la plante.
 - Niveau d’abstraction du modèle :
 - Complètement abstrait : les modèles ne sont générés à partir d’aucune donnée extérieure mise à part le réglage des paramètres. Ces paramètres peuvent ou non avoir une signification biologique.
 - Basé sur des données réelles : ce sont des modèles de réutilisation de données réelles acquises pour créer de nouvelles plantes. Généralement, il y a des règles de reconstruction et réutilisation strictes en fonction de la plante et des organes considérés.
 - Modèle mixte : ces modèles permettent par exemple la déformation d’organes de plantes issus de la numérisation de plantes réelles.
 - Niveau de description du modèle :
 - Avec forme : ces modèles permettent une description architecturale presque exhaustive.

- Sans forme : ces modèles ne permettent pas de reconstruire l'architecture (presque) complète de la plante.
- Spectre de validité du modèle :
 - Cellulaire : modélisation à l'échelle de la cellule.
 - Mono-espèce : ces modèles sont extrêmement spécialisés et permettent de ne reconstruire qu'une seule espèce de plante.
 - Multi-espèces : ces modèles peuvent fonctionner sur plusieurs espèces partageant généralement des caractéristiques architecturales communes.
 - Ecosystème.
 - Globaux : ces modèles peuvent fonctionner avec tout type de plantes, sans contraintes d'espèces ou de la présence de caractéristiques d'intérêts.
- Échelle de description du modèle :
 - Organes (feuilles, tiges, pétioles, épines ...).
 - Plantes (organisation architecturale globale de la plante).
 - Multi-individus (champ, forêt, couvert , etc.).
- Interprétabilité du modèle : c'est un spectre continu entre les modèles totalement non interprétables (issus de l'apprentissage automatique par exemple) aux modèles complètement biologiquement définis.

Je laisse ici de côté l'ensemble conséquent de modélisations centrées sur la physiologie et l'interaction avec l'environnement des plantes dans le domaine du Functional-Structural Plant Modelling ou FSPM*. Ces modèles proposent souvent une composante géométrique en plus d'une composante physiologique, mais elle reste trop simpliste ou peu flexible. Je ne m'intéresse ici qu'aux modèles architecturaux ou à composante architecturale pour notre objectif.

Je présente ici quelques modèles qui exemplifient les catégories proposées précédemment. Les modèles synthétiques de plantes présentent de nombreuses limites pour leur utilisation optimale. Par exemple, il est souvent difficile de décider de la valeur

de chaque paramètre. De plus, la différence de réglage des paramètres entre utilisateurs change les conclusions obtenues. On peut alors dire que les modèles donnent des conclusions différentes suivant les utilisateurs et les connaissances de l'utilisateur (Confalonieri et al., 2016), ou bien la surparamétrisation des modèles FSPM (Stella et al., 2014) en rend la configuration difficile.

Parmi les modèles permettant de modéliser la plante entière, on peut citer le modèle ADEL-wheat défini par Fournier, Andrieu, et al. (2003) qui est un modèle consacré à la modélisation de la croissance du blé d'hiver dont l'unité est la phytomer* en fonction de la température. Elle repose sur les L-systèmes* et les organes sont modélisés indépendamment et de façon empirique pour leurs modèles de croissance. L'équivalent pour le blé de printemps est proposé par Evers, Vos, Fournier, Andrieu, Michael Chelle, et al. (2005), dans le cas de l'orge par Buck-Sorlin (2002), du riz par Watanabe et al. (2005), le sorghum par Kaitaniemi et al. (1999). Dans le cas du maïs, les modélisations sont nombreuses voir Fournier and Andrieu (1998), Fournier and Andrieu (1999), Guo et al. (2006). Evers, Vos, Fournier, Andrieu, Michaël Chelle, et al. (2007) utilisent des modèles de plantes comme ADEL-Wheat (Fournier, Andrieu, et al., 2003) pour modéliser la croissance et le développement architectural des plantes dans un champ en fonction de la température et la géométrie globale du champ. Pour la plante de coton, Dauzat et al. (2008) étudient la compétition entre plants de coton en utilisant des modèles simulés architecturaux et des modèles de développement interpolés dans le cadre d'un champ. Le modèle architectural du coton est alors paramétré à partir d'observations du champ. Cependant la forme de la feuille en elle-même est modélisée comme une forme idéalisée de la feuille de coton. Le modèle de la plante se concentre sur des aspects comme l'inclinaison de la feuille, le nombre d'internoeuds, la croissance de la tige, etc. Strauss et al. (2020) quant à eux, ne cherche pas à utiliser un modèle simulé précis de l'architecture de la plante. Ils se contentent d'un modèle dit idéalisé pour faire des études sur les captures de lumière par le couvert végétal.

Les modèles utiles dans notre étude sont les modèles de génération de données, plus particulièrement ceux permettant de synthétiser des feuilles de plantes, sur lesquels nous allons maintenant nous focaliser.

Modèles de génération de données synthétiques de feuilles de plantes

Plusieurs exemples de modèles approchent la forme d'une feuille à partir d'une fonction de distance. Les différentes familles de fonctions utilisées sont les fonctions polynomiales dans Fournier, Andrieu, et al. (2003), les splines dans Mundermann et al. (2005) et plus particulièrement les courbes d'Hermite* dans Henke et al. (2014). Ces méthodes peuvent être précises, mais les paramètres des fonctions ne sont pas interprétables d'un point de vue agronomique. De même, il est possible d'avoir des paramètres très différents pour des formes très proches (Dornbusch et al., 2007), ce

qui limite leur utilisation pour des modèles de croissance des plantes (Evers, Vos, Fournier, Andrieu, Michaël Chelle, et al., 2007).

Une autre famille de méthodes est basée sur la technique d'ajustement de contour. Parmi les plus courantes, on retrouve l'analyse de Fourier Elliptique* qui décrit la forme de façon de plus en plus précise en augmentant le nombre d'harmoniques utilisées (Iwata et al., 2002) (Neto et al., 2006). Il faut cependant entre 77 et 117 paramètres non fonctionnels pour avoir un très bon modèle qui représente entre les 20 et 30 premières harmoniques. Ce qui est beaucoup, d'autant plus que la méthode est difficilement applicable pour créer des modèles de plantes. Pour illustrer cette affirmation, on peut citer l'article de Chitwood and Otoni (2017) qui utilise cette description comme outil de prédiction de variétés du genre de *Passiflora*. Ils obtiennent néanmoins de moins bons résultats pour la prédiction qu'en utilisant des points d'intérêt. Les méthodes basées sur les points d'intérêt ne permettent pas une reconstruction a posteriori de la feuille à partir d'un nuage de points. Elles sont surtout utilisées dans le cadre d'applications de détection ou prédiction sur des images 2D, par exemple l'étude des formes de feuilles atypiques (Bensmihen et al., 2008), ou comme dans l'article de Chitwood and Otoni (2017) ci-dessus. Une autre technique est d'utiliser des courbes de Bézier comme dans Chi et al. (2003) ce qui nécessite beaucoup moins de paramètres, mais n'est pas interprétable.

D'autres types d'approches sont moins basées sur des descriptions et modèles mathématiques, mais plutôt sur des connaissances de la géométrie de la plante. La méthode de Young (Young, 2010) repose sur la description en premier lieu de la nervure centrale de la feuille par des points. Puis un modèle de croissance (en direction et en taux) est appliqué pour obtenir l'ensemble de la forme de la feuille. Ce modèle n'est pas directement lié à une réalité biologique de développement de la feuille et reste limité en termes de flexibilité et d'interprétabilité. Coussement et al. (2018) présentent une variation de cette approche : en lieu et place du paramètre de croissance, les auteurs proposent l'introduction des notions de longueur et de direction modélisées par des fonctions plus flexibles. Ce modèle est proposé pour la numérisation de plante, pour la mesure. On ne peut pas créer de nouvelles instances avec le modèle.

2.2 Modèle synthétique de nuages de points 3D de feuille

Comme vu précédemment, de nombreux types de modèles de feuilles synthétiques ont été proposés. Cependant, ces modèles sont limités par rapport aux besoins de notre étude qui sont les suivants :

- Les données générées par notre modèle de feuille doivent exister dans l'espace 3D sous forme de nuage de points 3D.
- Le modèle doit permettre la maîtrise totale et indépendante de chacune de ses caractéristiques.
- Le modèle doit être représentatif d'une large variété d'espèces.
- L'aire de chaque donnée générée par le modèle doit être connue.

Certaines de ces contraintes peuvent être résolues pour certains modèles de l'état de l'art; par exemple en ajoutant une courbure 3D au modèle de surface ou en échantillonnant la surface du modèle pour obtenir un nuage de points 3D. Cependant, aucun de ces modèles ne permet de contrôler entièrement le résultat de sortie et encore moins la mesure de l'aire de celui-ci. Cela nous a poussés à créer un nouveau modèle qui respecte l'ensemble de nos contraintes.

D'un point de vue géométrique, une feuille est une surface à bord, car elle est généralement 2-dimensionnelle. Nous allons en première approche représenter les feuilles synthétiques par un hexagone plat. Deux de ses sommets opposés sont considérés comme la base et l'apex de la feuille (voir figure 2.1). La distance entre la base et l'apex est égale à celle entre les côtés gauche et droit de l'hexagone. L'aire de la surface de la forme est fixée à $2/3$ pour tous.

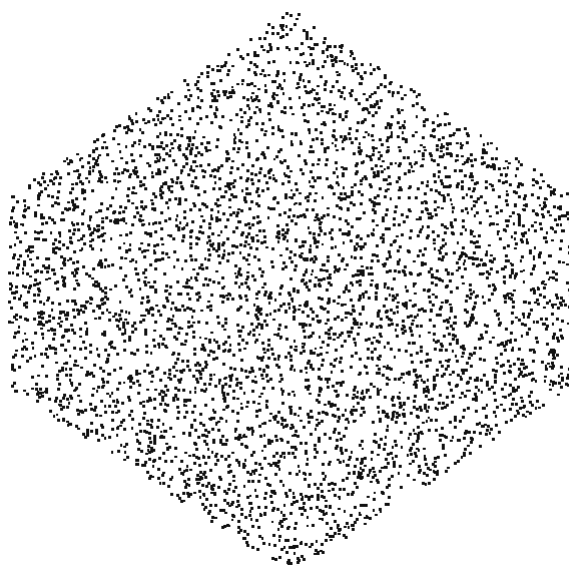


Fig. 2.1.: Nuage de point généré avec les valeurs par défaut de chaque critère détaillé dans le tableau 2.1.

Densité	Bruit	Concavité	Ratio	Courbure
5000 pts/ua	0%	0	1	0°
Non uniforme	Motif	Recalage (d)	Recalage (l)	Trou
1	aléatoire	0	0	0

Tab. 2.1.: Valeurs par défaut pour chaque critère du modèle de nuage de points de feuille synthétique.

2.2.1 Description des critères

Neuf critères utilisés pour générer les données synthétiques sont décrits ici. Trois critères sont relatifs à la forme de la feuille. Les six autres sont liés aux techniques et conditions d'acquisition du nuage de points. Les critères de forme de la feuille sont présentés dans un premier temps puis dans un second temps les critères relatifs à l'acquisition.

Critères de forme de feuille

Les critères de forme de feuille, comme leur nom l'indique, permettent de modéliser des feuilles de caractéristiques géométriques différentes et variées. Ce sont des critères qui sont fixés en fonction des caractéristiques de l'espèce que l'on cherche à modéliser. Dans la suite de la chaîne de traitement, ces critères permettront de décider si un algorithme est capable de traiter les espèces qui nous intéressent. Dans le cas contraire, l'algorithme devra être soit totalement exclu, soit son usage limité aux feuilles dont la géométrie n'est pas source d'erreurs. Je décris maintenant l'ensemble des critères de notre modèle synthétique de feuilles liés à leurs géométries.

Tout d'abord, la plupart des feuilles ne sont pas isotropes et possèdent une direction principale qui correspond à l'axe base-apex autrement appelé nervure centrale. Nous définissons ainsi le ratio **longueur/largeur (R)** de la feuille comme le premier de nos neuf critères (voir figure 2.2).

De même, les feuilles peuvent être courbées et non planaires. Nous identifions donc **la courbure (Cu)** comme deuxième critère. La courbure est définie comme l'angle entre les plans tangents à la base et à l'apex de la feuille. La feuille synthétique courbée est créée en incurvant par incrément le nuage de points avec des angles uniformément distribués le long de la nervure centrale de la feuille. La courbure n'est pas limitée à 360°. Au-delà de cette valeur, la feuille synthétique s'enroule sur elle-même comme un gâteau roulé (voir figure 2.3).

Concernant le critère final correspondant à la forme de la feuille, il s'agit de modéliser les frontières des feuilles qui peuvent être dentées et non lisses. **La concavité (Co)** est définie de façon récursive. La valeur 0 correspond à la forme convexe et lisse. À

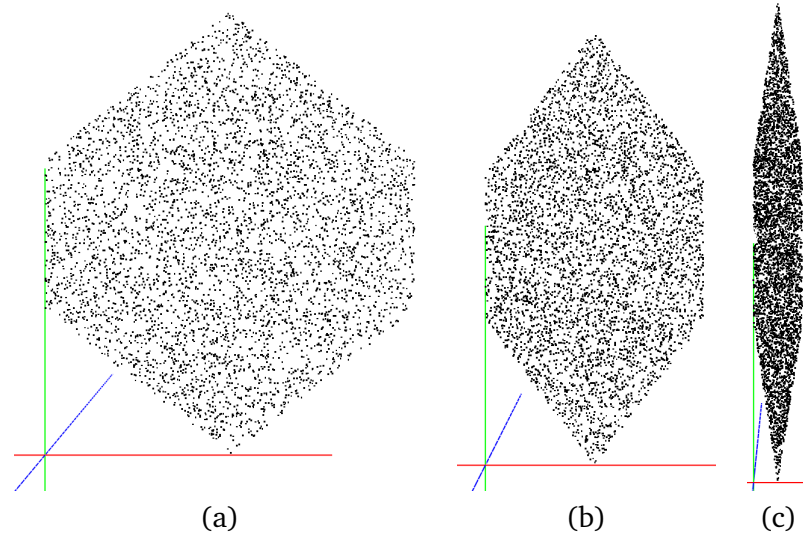


Fig. 2.2.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le ratio Longueur/largeur. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $R = 1,2$, (b) $R = 2$, (c) $R = 10$.

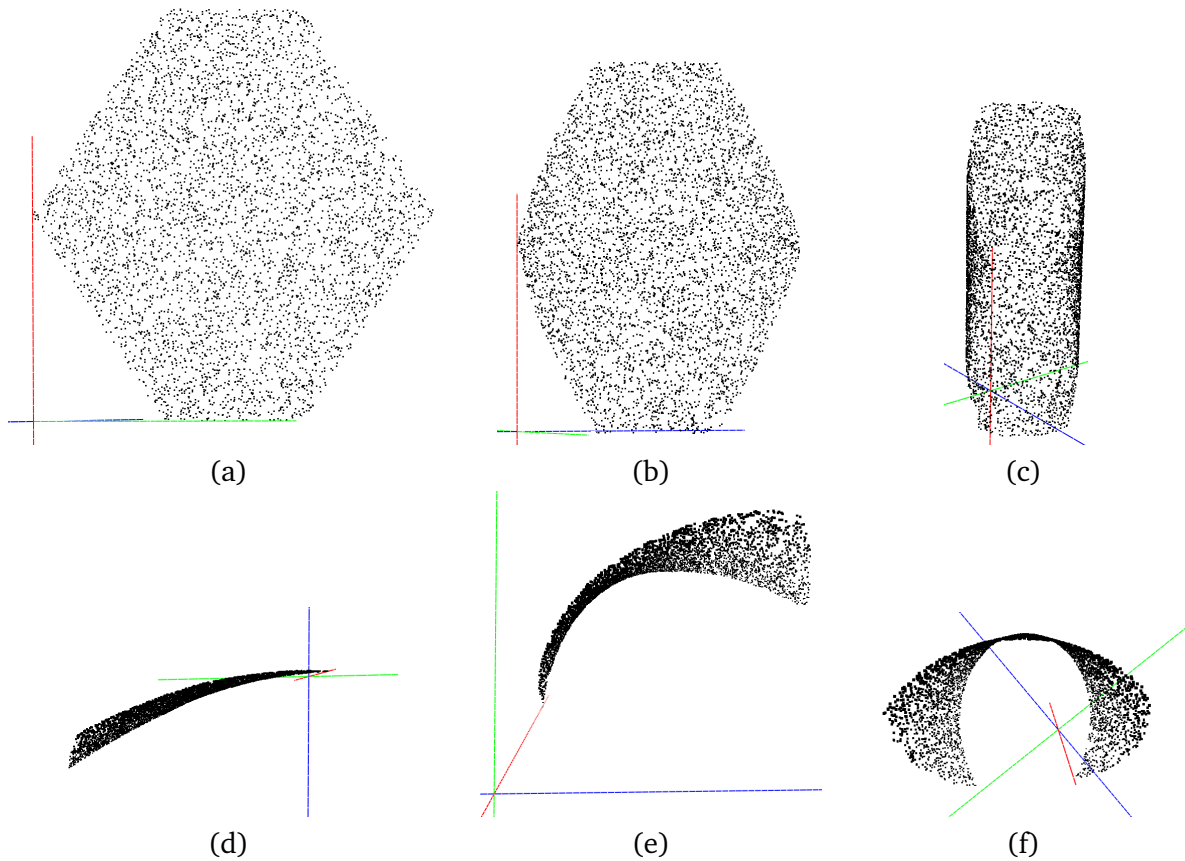


Fig. 2.3.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la courbure. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $Cu = 40^\circ$, (b) $Cu = 140^\circ$, (c) $Cu = 300^\circ$ vue d'en haut et (c) $Cu = 40^\circ$, (d) $Cu = 140^\circ$, (f) $Cu = 300^\circ$ vue latérale.)

1, un zigzag est créé en cassant un côté frontière de la forme générale en trois côtés plus petits et décalés vers l'intérieur pour l'un et l'extérieur pour l'autre. La suite est ensuite l'incrément de cette procédure sur le résultat $n - 1$. $Co(n) = sub(Co(n - 1))$ tel que $sub()$ est cette procédure :

1. Prendre un segment frontière S_F de l'objet
2. Casser le segment S_F en 2 points P_1 et P_2 à respectivement $1/3$ et $2/3$ de la longueur de S_F
3. Calculer la normale N_s à S_F
4. Décaler P_1 vers l'extérieur de l'objet en suivant N_s
5. Décaler P_2 vers l'intérieur de l'objet en suivant N_s
6.
 - Si tous les segments de frontières considérés : fin de l'opération.
 - Sinon reprendre à l'étape 1 avec le segment frontière suivant

$n \in \mathbb{N}^*$ et $C(0)$ est la forme convexe et lisse.

On conserve dans tous les cas l'aire de la feuille synthétique à $2/3$. On retrouve des illustrations dans la figure 2.4.

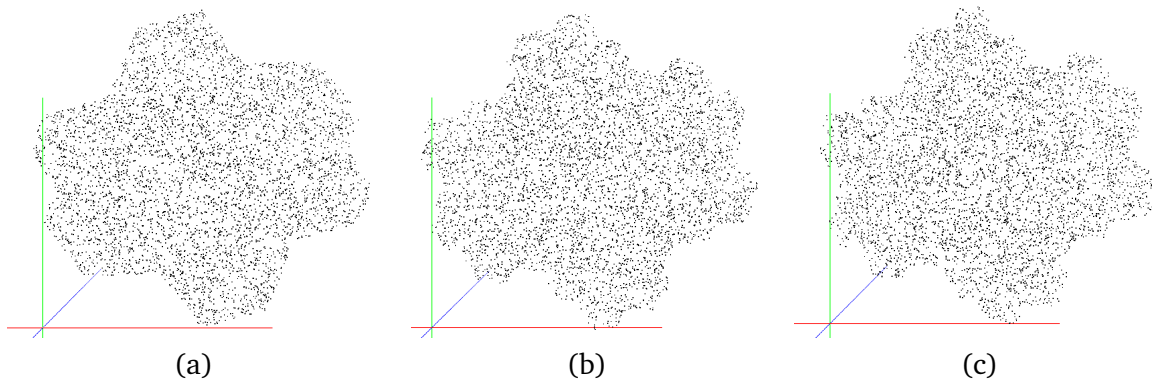


Fig. 2.4.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la concavité. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $Co = 1$, (b) $Co = 3$, (c) $Co = 5$ vues du dessus.

Critères dépendant de l'acquisition

Le processus d'acquisition des données a une grande influence sur les caractéristiques des nuages de points, à commencer par le choix de capteur. En effet, les

deux principales techniques de numérisation, LiDAR et photogrammétrie, ont des caractéristiques différentes que l'on peut retrouver dans les nuages de points acquis. Les scanners laser suivent un schéma régulier. Quant à la photogrammétrie, elle est basée sur la détection dans des images de points caractéristiques, ce qui entraîne un échantillonnage de la forme de densité irrégulière (voir pour plus de précision sur le processus dans la section 1.2). Pour prendre en compte ces différences, nous avons inclus un critère de **motif d'échantillonnage (S.p)** dans notre modèle. C'est un booléen qui peut valoir **Régulier** (correspondant au LiDAR) et **Aléatoire** (correspondant à la photogrammétrie) comme illustré dans les figures 2.5 et 2.6. Cependant, l'échantillonnage de la forme est aussi affecté par l'orientation de la feuille par rapport aux capteurs. Nous ajoutons donc un bruit de position du point dans le plan de la feuille. Nous le nommons **Bruit horizontal (S.n)** et il correspond en pratique à la distance maximale entre la position régulière théorique du point et sa position effective dans le plan du nuage de points (voir figure 2.7).

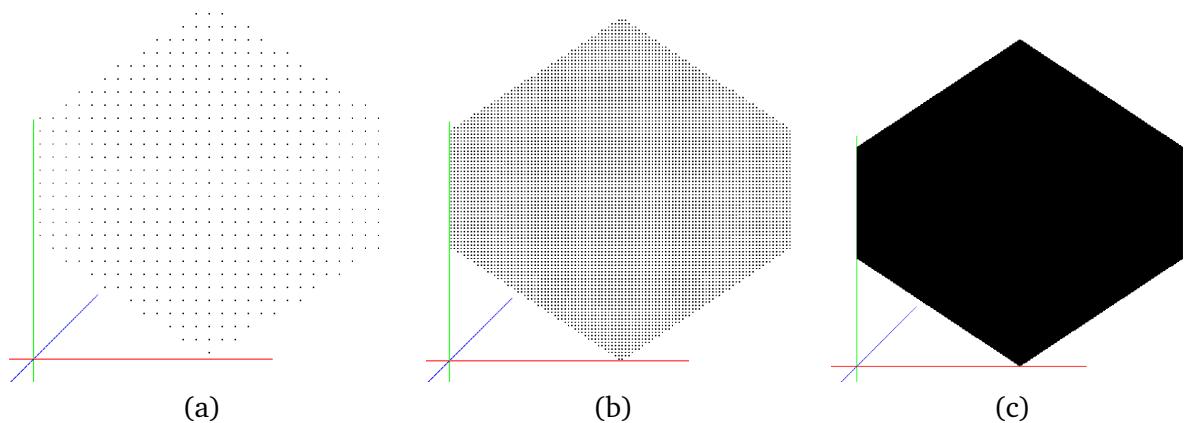


Fig. 2.5.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le motif régulier. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) 509 points/ m^2 , (b) 7019 points/ m^2 , (c) 75331 points/ m^2 vus du dessus.

La précision du nuage de points est affectée par la distance au système d'acquisition de l'objet et par la résolution et la qualité du LiDAR ou des images utilisées, ainsi que leur nombre dans le cas de la photogrammétrie. Nous définissons un critère de **densité (D)** du nuage de points qui est le nombre de points par unité de surface (voir figure 2.8).

Berger et al. (2017) ont listé cinq artefacts potentiels dans les nuages de points qui sont les suivants : échantillonnage non uniforme, bruit, aberrations, scans non alignés et données manquantes. Dans notre contexte, nous ne considérons pas le cas des points aberrants, car la plupart des auteurs de l'état de l'art suggèrent de filtrer les nuages de points en étape de prétraitement. De plus, le travail présenté dans les chapitres suivant 3 et 4 me permet de conclure sur ces points aberrants grâce

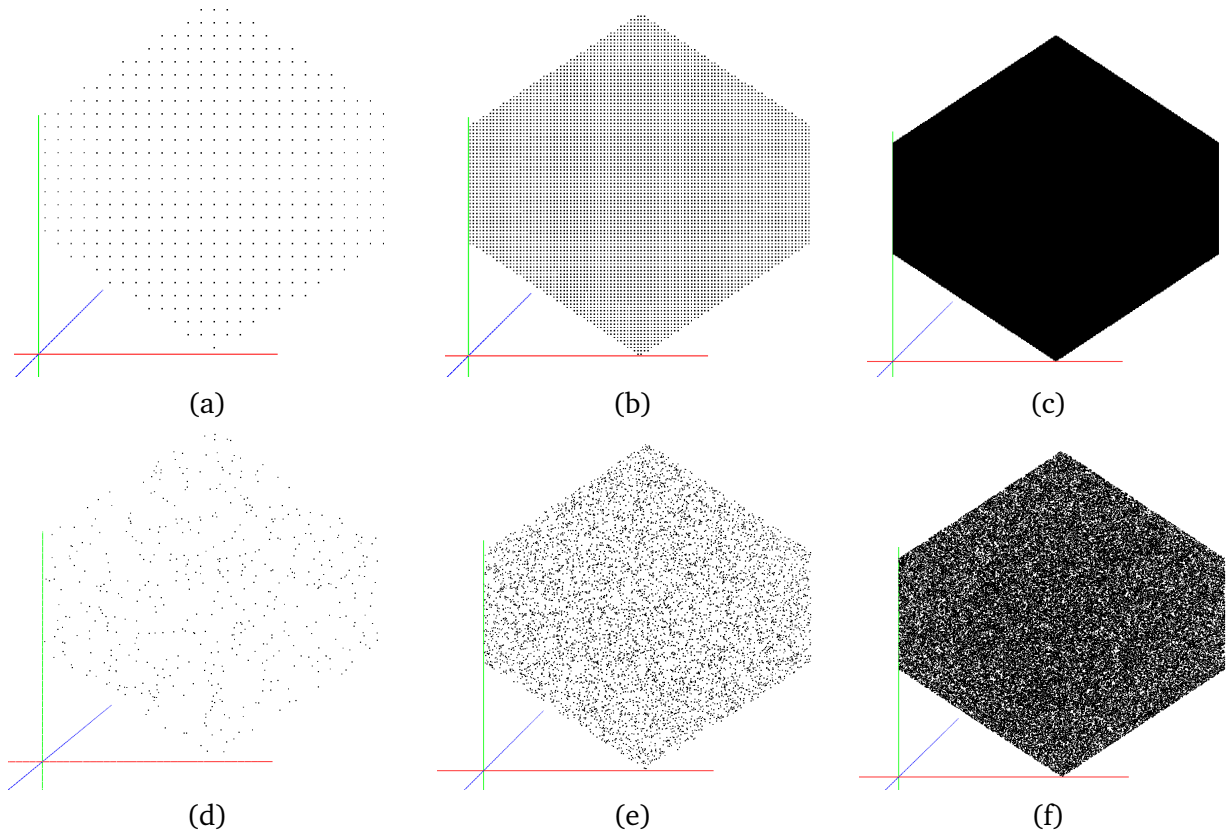


Fig. 2.6.: Comparaison pour les mêmes densités de points entre le motif régulier et le motif aléatoire du modèle de feuille synthétique. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) 509 points/ m^2 , (b) 7019 points/ m^2 , (c) 75331 points/ m^2 avec le motif régulier. (d) 500/ m^2 points, (e) 7000/ m^2 points, (f) 75000/ m^2 points avec le motif aléatoire.

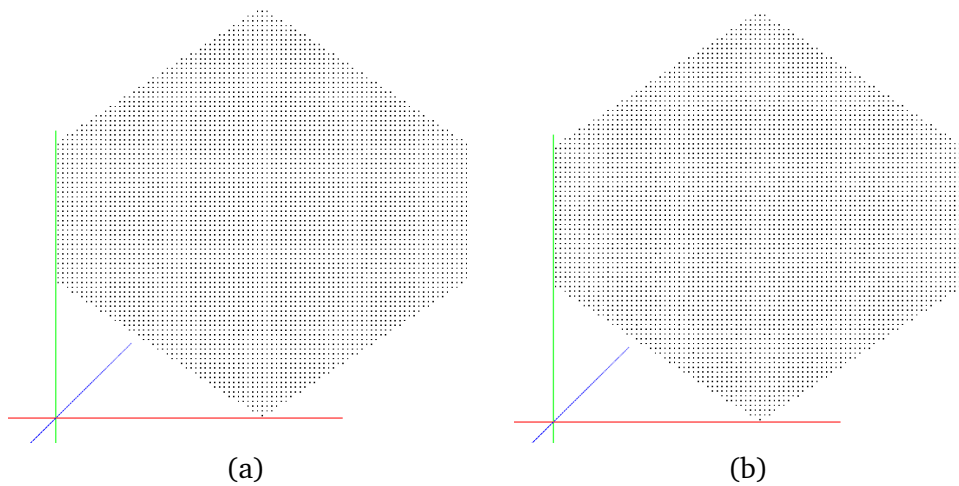


Fig. 2.7.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le bruit horizontal (et un motif d'échantillonnage régulier). L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $S.n = 0.0000004$ m, (b) $S.n = 00008$ m.

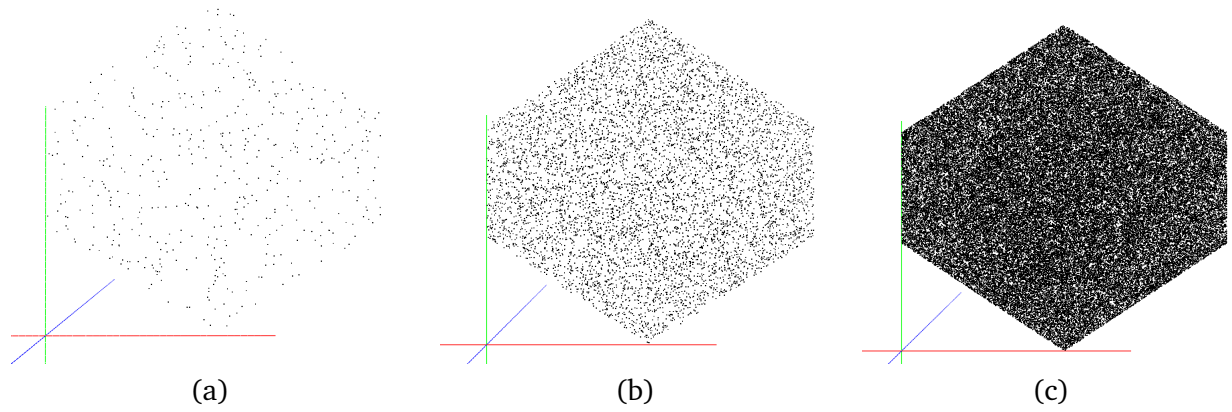


Fig. 2.8.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la densité de points. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) 500 points, (b) 7000 points, (c) 75000 points.

aux tests de deux méthodes de prétraitement. Je présente maintenant les critères de notre modèle liés au processus d'acquisition des nuages de points.

Un échantillonnage non uniforme peut être le résultat d'alignement de plusieurs scans de points de vue différents dans le cas du LiDAR ou de surreprésentation d'une zone dans les images dans le cas de la photogrammétrie. Pour modéliser ce phénomène, nous décidons de séparer en deux zones de densités distinctes la feuille dans notre modèle. En l'occurrence, le bas de la feuille (c'est-à-dire zone près de la base) est échantillonné en utilisant une densité D . Le haut de la feuille, zone contenant l'apex, est échantillonné en utilisant une densité multipliée par un ratio défini par l'utilisateur que nous appelons le **ratio d'échantillonnage non uniforme (NU)** (voir figure 2.9).

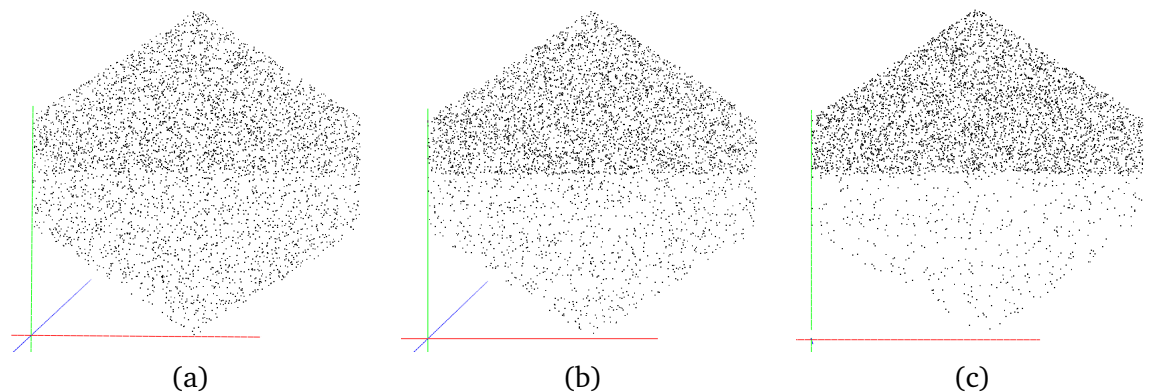


Fig. 2.9.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour un ratio d'échantillonnage non uniforme. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $NU = 2$, (b) $NU = 4$, (c) $NU = 10$.

De plus, l'acquisition n'est pas parfaite au regard de la précision et les coordonnées des points des nuages peuvent être erronées. Cela peut être dû à de multiples facteurs comme des imperfections du capteur (mécaniques ou optiques), ou aux conditions d'acquisition comme les conditions de luminosités ou la texture des feuilles. Nous appelons ces erreurs le **bruit d'acquisition (N)** et nous le modélisons par un bruit gaussien sur le plan orthogonal à la feuille. Il est exprimé en termes de pourcentage de la taille de la feuille. C'est pourquoi il est indépendant de tout autre critère (voir figure 2.10). L'alignement de plusieurs scans peut aussi être erroné, ce

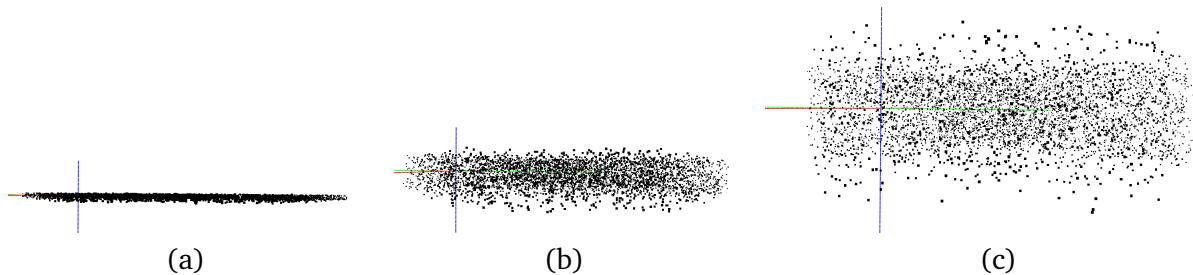


Fig. 2.10.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le niveau de bruit d'acquisition. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $N = 0,007$, (b) $N = 0,05$, (c) $N = 0,1$ m.

sont des erreurs de **recalage (M)**. Elles sont modélisées en séparant la feuille en deux moitiés (une à la base et l'autre avec l'apex). Puis une des parties est translatée dans la direction de sa normale. La distance selon la normale entre les deux parties de la feuille est nommée **distance d'erreur de recalage (M.d)** et la longueur de superposition est appelée la **longueur d'erreur de recalage (M.l)**. C'est le seul critère à deux paramètres (voir figure 2.11).

Enfin, notre dernier critère est la présence d'un trou au centre de l'hexagone de la feuille qui modélise les données manquantes. Cet artefact est dû à la présence d'occultations ou à des dégâts d'insectes par exemple. Les trous dans notre modèle sont de forme carrée et définie par la **longueur du trou (H)** (voir figure 2.12).

Cette modélisation implique des limites quant à l'étude des données manquantes. En effet, lors de l'acquisition, les données manquantes peuvent aussi être situées à la frontière des feuilles ou même séparer en plusieurs clusters une même feuille. Cependant, avec nos méthodes généralistes, il est impossible d'attendre une reconstruction correcte avec ce genre de données manquantes sans l'apport de connaissances a priori. C'est pourquoi ces configurations ne sont pas étudiées.

Les différents critères peuvent être configurés de façons totalement indépendantes. Le modèle permet donc d'avoir un contrôle total sur l'ensemble des critères du modèle de nuage de points de la feuille (voir des exemples de plusieurs critères différents simultanés figure 2.13).

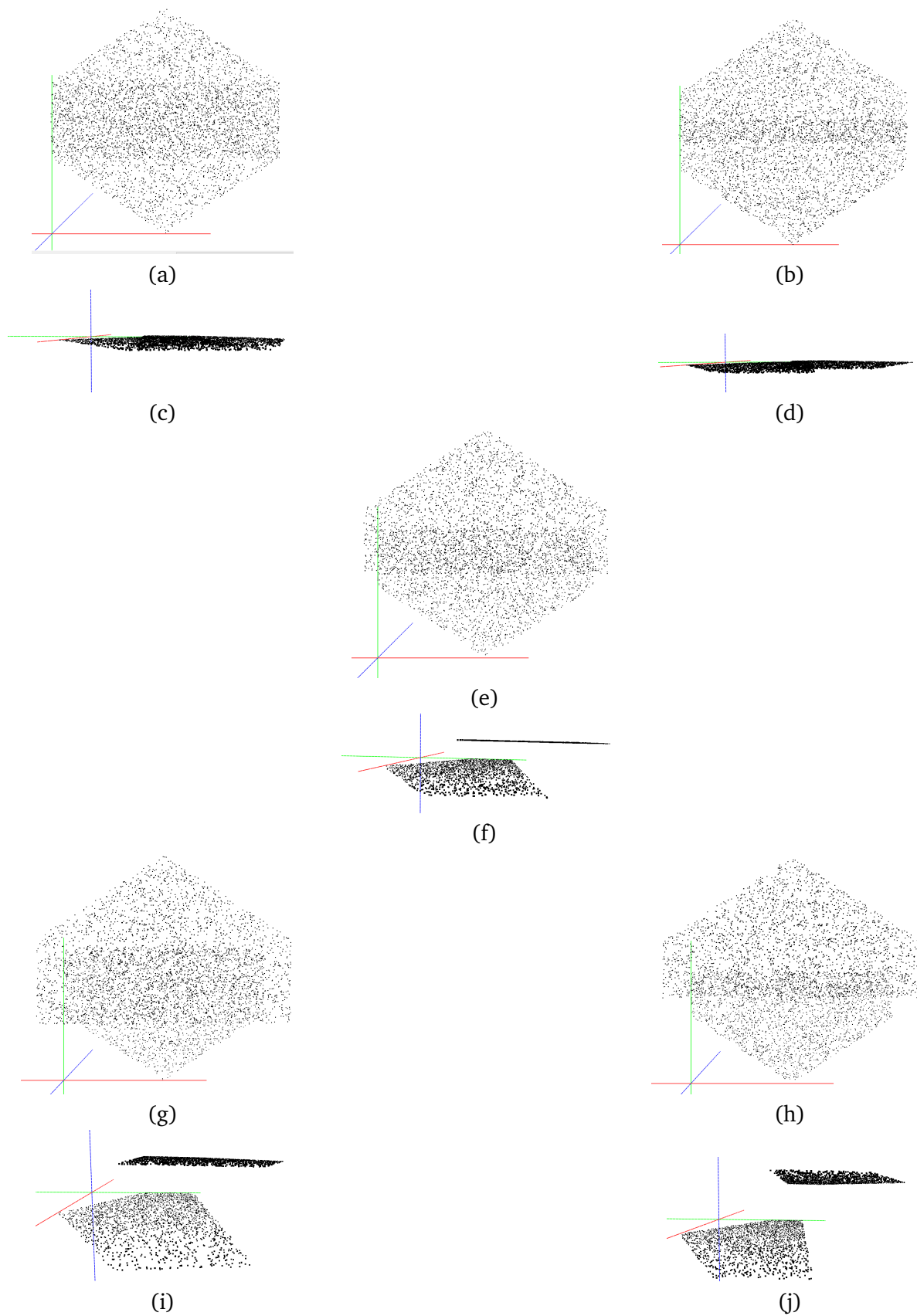


Fig. 2.11.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le recalage. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a)(c) $M.d = 0.008m$ et $M.l = 0.1m$, (b)(d) $M.d = 0.008m$ et $M.l = 0.33m$, (e)(f) $M.d = 0.12m$ et $M.l = 0.2m$, (g)(i) $M.d = 0.24m$ et $M.l = 0.1m$, (h)(j) $M.d = 0.24m$ et $M.l = 0.33m$. Vues respectivement du dessus et latéralement.

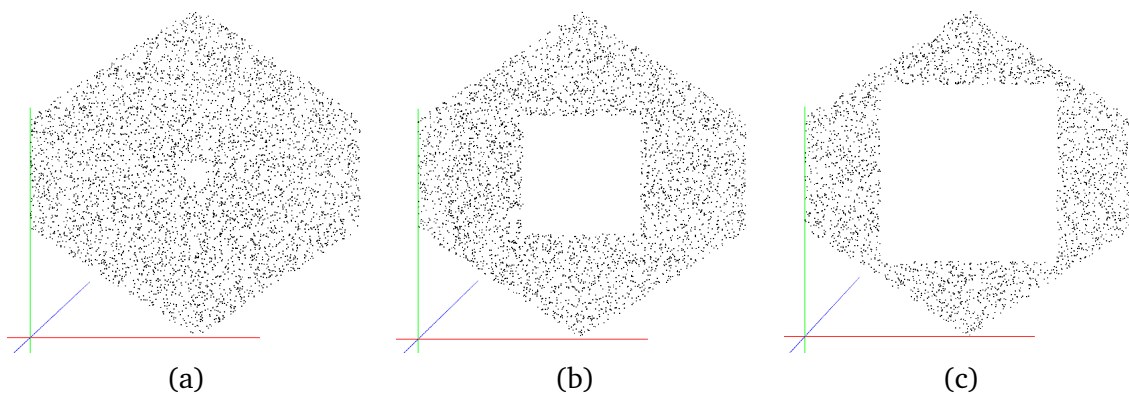


Fig. 2.12.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la taille de trou. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $H = 0.06$, (b) $H = 0.36$, (c) $H = 0.54$ m.

CritèreNom Fichier	Nuage 1	Nuage 2	Nuage 3	Nuage 4
Ratio Longueur/largeur	1	1	2	1.4
Courbure (°)	0	0	40	10
Concavité	0	0	3	1
Motif d'échantillonnage	Aléatoire	Aléatoire	Régulier	Aléatoire
Bruit horizontal	0	0	0,3	0
Densité (points/ m^2)	8000	10000	10000	6000
Ratio d'échantillonnage non uniforme	1,8	1	3	1
Bruit d'acquisition	0,01	0	0	0,001
Recalage - distance (m)	0	0,5	0	0
Recalage - longueur (m)	0	0	0	0
Longueur du trou (m)	0,05	0,1	0	0,25

Tab. 2.2.: Tableau des valeurs des critères utilisés pour générer les nuages de points présentés dans la figure 2.13 avec mon modèle de nuage de points de feuille.

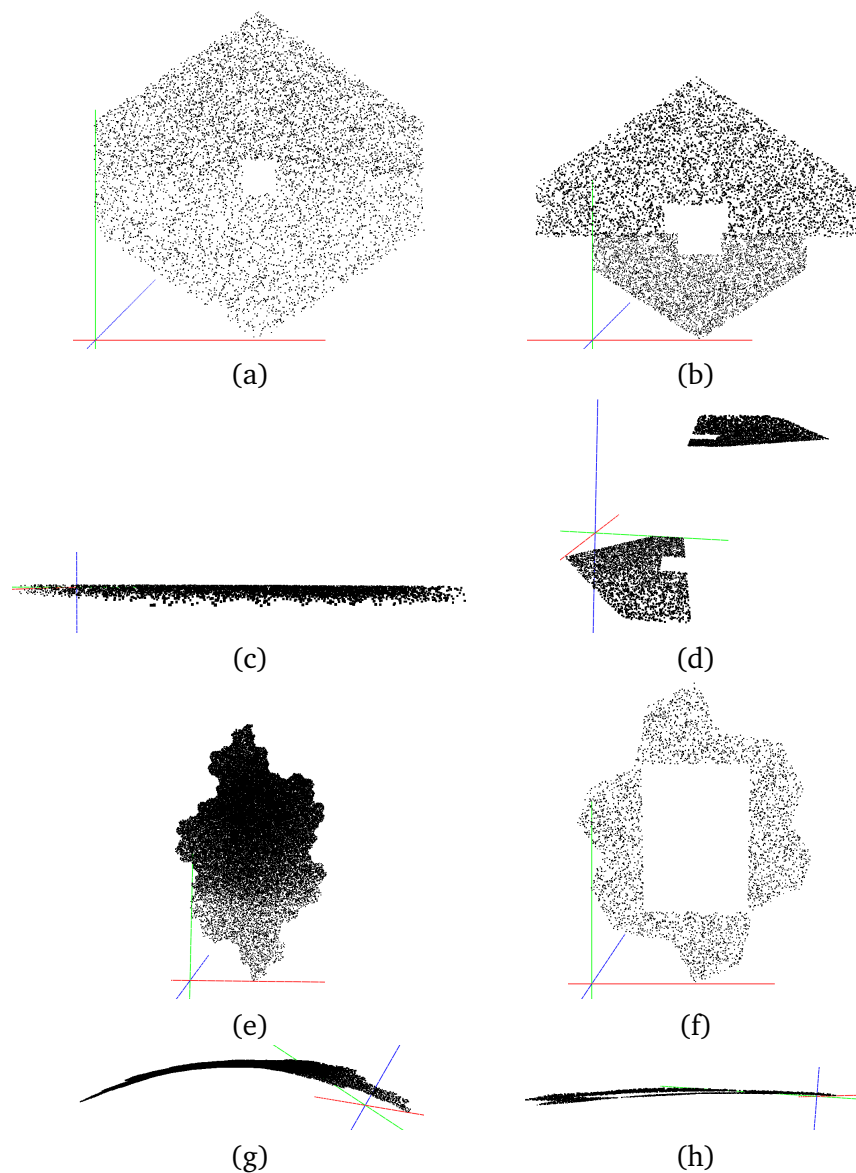


Fig. 2.13.: Exemples de nuages de points générés en changeant simultanément plusieurs critères pour visualiser la variété géométrique des nuages de points générés. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (e) représentent le Nuage 1 , (b) et (f) représentent le Nuage 2 , (c) et (g) représentent le Nuage 3 , (d) et (h) représentent le Nuage 4 vu respectivement du dessus et latéralement. Voir le tableau 2.2 pour connaître les valeurs exactes utilisées pour chaque nuage.

2.3 Validation du modèle

Pour la validation de notre modèle de feuille synthétique, nous utilisons le travail de M. Li et al. (2018). Dans un premier temps, je présenterai ce travail en détail et expliciterai l'intérêt de celui-ci pour valider notre modèle. Ensuite, je présenterai le développement de notre modèle synthétique dans le cadre compatible avec les paramètres d'étude de M. Li et al. (2018). Enfin, je démontrerai la validité de notre modèle synthétique grâce aux connaissances exposées précédemment.

2.3.1 Étude de M. Li et al. (2018) et intérêt pour notre validation

L'objectif général de M. Li et al. est de créer par une approche morphométrique* un classificateur d'espèces d'arbres à partir de leurs feuilles. Il existe de nombreuses façons de décrire la forme des feuilles et d'en étudier les différences et déformations. Les grandes familles présentées dans l'état de l'art sont les Elliptical Fourier Descriptors (ou EFD) en français Descripteurs Elliptique de Fourier*, les Point d'intérêt (ou landmark)*, et les pseudo points d'intérêt (ou pseudo-landmarks)* associés aux méthodes d'analyse procustéenne*. Chacune de ces familles présentes des intérêts et désavantages distincts.

Dans ce cadre, les auteurs s'intéressent tout particulièrement à développer une méthode basée sur l'homologie persistantes*. Cette méthode a l'avantage de permettre de décrire les feuilles, à la fois localement et globalement, de façon exhaustive. Elle est aussi robuste aux bruits communément présents dans les données (défaut d'acquisition, trous dans la feuille, etc...). Elle permet aussi de comparer des feuilles de formes disparates et d'être extrapolée si besoin à d'autres mesures phénotypiques. Dans le cadre de cette thèse, il n'est pas possible d'utiliser directement les espaces morphométriques utilisés par M. Li et al. (2018) pour décrire les feuilles, car la technique d'homologie persistante développée par l'article se base sur des données d'entrée sous forme d'images 2D.

Cependant pour moi, le point le plus intéressant de cet article est la base de données sur laquelle l'étude est réalisée : elle est composée de 182707 feuilles. Ces données sont issues de plusieurs bases de données publiées et non publiées. Elle représente globalement 141 familles de plantes et 75 sites dans le monde (voir le récapitulatif dans le tableau de la figure 2.14).

Bien qu'il ne m'est pas possible d'utiliser les nouveaux descripteurs de l'article comme expliqué plus haut, les auteurs ont travaillé avec d'autres descripteurs. Ces descripteurs de forme sont dits "traditionnels" et sont : **le ratio longueur/largeur, la solidité, la circularité**. Ils peuvent être calculés sur tous les types de feuilles et

Leaf type	Count	References and authors
<i>Alstroemeria</i>	2392	Chitwood et al., 2012c
Apple	9619	Migicovsky et al., 2018
<i>Arabidopsis</i>	5101	AB, RA, CB, ER, BZ
<i>Brassica</i>	1832	HA, SG, JP
<i>Capsicum</i>	3277	TH, AVD
Climate	5812	Huff et al., 2003; Royer et al., 2005; Peppe et al., 2011
<i>Coleus</i>	34607	VC, MF, ML
Cotton	2885	Andres et al., 2017
Grapevine	20121	Chitwood et al., 2014, 2016a,b; VC, MF, LK, JL, AM
<i>Hedera</i>	865	Martinez et al., 2016
LeafSnap	5733	Kumar et al., 2012
<i>Passiflora</i>	3301	Chitwood and Otoni, 2017a,b
Poaceae	866	LC, TG, PK
Potato	1840	DF, SJ
Tomato	82034	Chitwood et al., 2012a,b, 2013
<i>Viburnum</i>	2422	Schmerler et al., 2012; MD, EE, SS, ES
Total	182707	NA

Fig. 2.14.: Tableau décrivant les espèces et les références assemblées pour créer la base de données issue de l'article de Li (M. Li et al., 2018).

notamment sur notre propre modèle de feuilles synthétique. Ils mesurent chacun un aspect spécifique de la forme de la feuille et peuvent être interprétés directement en terme géométrique.

Ratio longueur/largeur : À partir de l'ellipse ajustée à la feuille, on calcule le ratio $\frac{grandaxe}{petitaxe}$. Autrement dit, c'est le ratio de la longueur de la feuille sur la largeur de la feuille.

Circularité : En prenant le périmètre externe de la feuille (c'est-à-dire excluant les trous internes à la feuille) on le calcule comme : $4\pi \frac{aire}{périmètre^2}$. Ce descripteur est sensible à la présence de dentelure, lobe ou foliole et l'élongation de la feuille. Par exemple, la présence de dentelure accroîtra le périmètre de la feuille pour une aire quasi constante, et donc la circularité sera plus faible que pour une feuille de même forme sans dentelure.

Solidité : elle est calculée comme la fraction de l'aire de la feuille sur l'aire de l'enveloppe convexe description* de la feuille : $\frac{aire}{aire\text{enveloppeconvexe}}$. Ce descripteur est sensible à la composition de la feuille par des pétioles ou des lobes.

Les auteurs ont fourni dans leur article les valeurs pour chaque feuille de ces trois descripteurs ainsi qu'une visualisation de la distribution des feuilles par famille dans l'espace de ces descripteurs (voir figure 2.15).

En résumé, j'ai donc à disposition une base de données présentant une grande quantité de feuilles, représentant une large variété d'espèces. L'idée de la validation est donc de vérifier où le modèle de feuille synthétique se place dans l'espace des

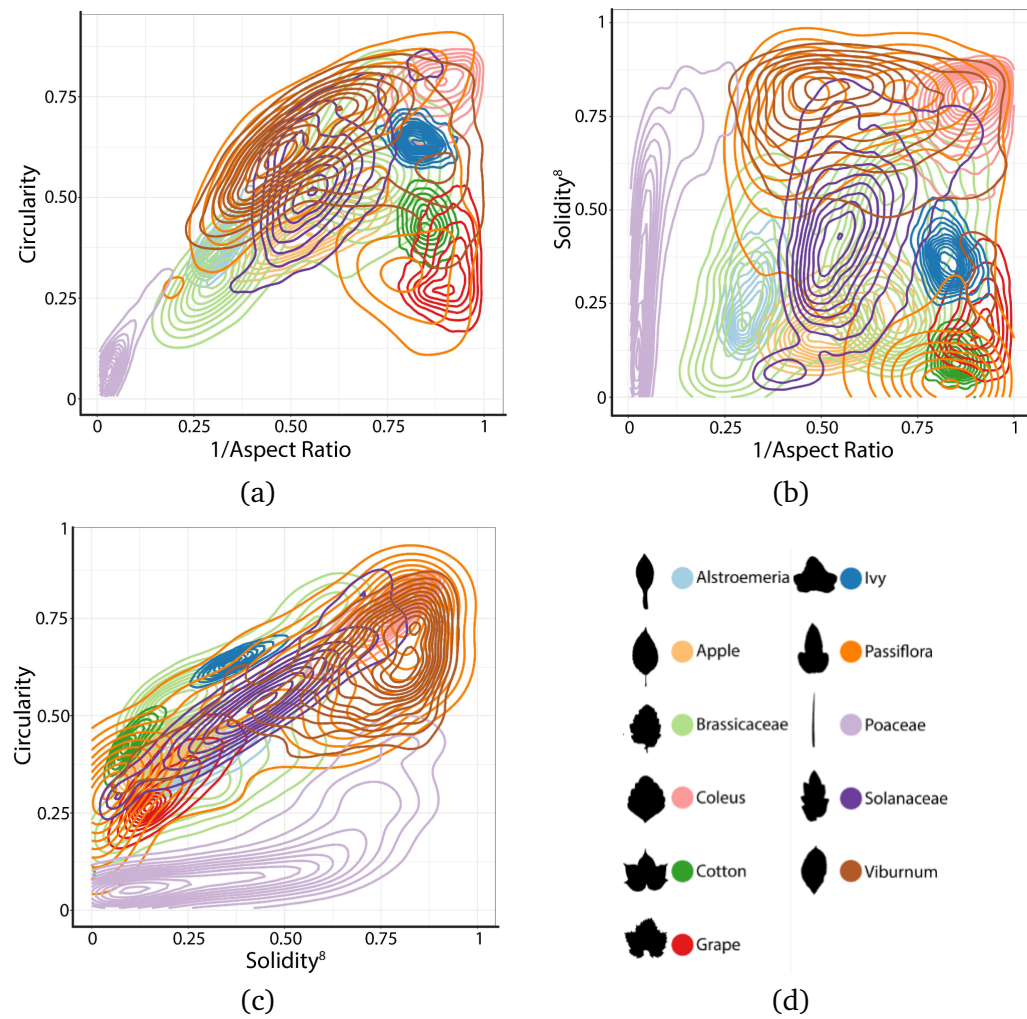


Fig. 2.15.: Visualisation du morphospace de la base de données issue de l'article de Li, (a) inverse ratio en fonction de la circularité, (b) inverse du ratio en fonction de la solidité^s, (c) solidité^s en fonction de la circularité et (d) la légende des couleurs utilisées pour chaque espèce (M. Li et al., 2018).

descripteurs traditionnels. Cela permettra dans un premier temps de dire s'il permet de modéliser une feuille, puis de voir si cette modélisation présente une variété de formes géométriques de feuille ou si l'espace de modélisation est restreint. Ensuite, en considérant les différentes familles de la base de données issue de l'article, je pourrai conclure sur les familles représentées par le modèle de feuille synthétique.

2.3.2 Traduction de notre modèle avec les descripteurs de forme traditionnels

Les trois paramètres desquels dépendent les indicateurs de M. Li et al. (2018) sont le périmètre de la feuille \mathcal{P} , l'aire de la feuille \mathcal{A} et l'aire de l'enveloppe convexe de la feuille \mathcal{CH} . Ces paramètres peuvent être exprimés dans notre modèle en fonction du ratio longueur/largeur \mathbf{R} et du critère de concavité \mathbf{Co} . Dans cette étude, et afin de me ramener dans le cadre de celle de M. Li et al. (2018), je me restreins aux feuilles planes qui ont donc leurs courbures à $\mathbf{Cu} = 0$. Je commence d'abord par détailler les cas les plus simples pour ensuite étendre progressivement l'approche jusqu'au cas général.

Le cas le plus simple: $\mathbf{R} = 1$ et $\mathbf{Co} = 0$

Par définition, notre modèle a une aire tel que $\mathcal{A} = 1$. La forme hexagonale sous-jacente est définie par la longueur d (voir figure 2.16). Sa valeur peut être facilement calculée, comme l'aire \mathcal{A} est la somme de l'aire rectangulaire \mathcal{A}_1 et les deux aires triangulaires \mathcal{A}_2 (voir figure 2.17).

$$\mathcal{A} = \frac{d^2}{3} + 2\frac{d}{2} \frac{d}{3} \Leftrightarrow \frac{2d^2}{3} = 1 \Leftrightarrow d = \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (2.1)$$

Le périmètre \mathcal{P} de l'hexagone est égal à :

$$\mathcal{P} = 2\left(\frac{d}{3} + 2\sqrt{\frac{d^2}{3^2} + \frac{d^2}{2^2}}\right) = \frac{2d}{3} + \frac{4}{6}\sqrt{13}d = (1 + \sqrt{13})\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.2)$$

Enfin, comme l'hexagone est convexe, l'aire de l'enveloppe convexe vaut $\mathcal{CH} = \mathcal{A} = 1$.

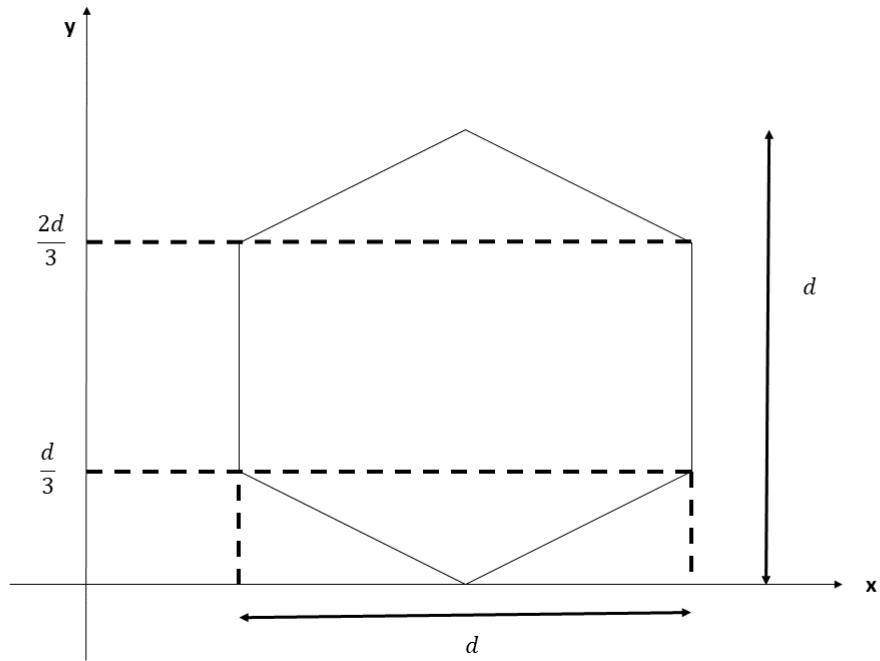


Fig. 2.16.: Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $R = 1$ et $Co = 0$.

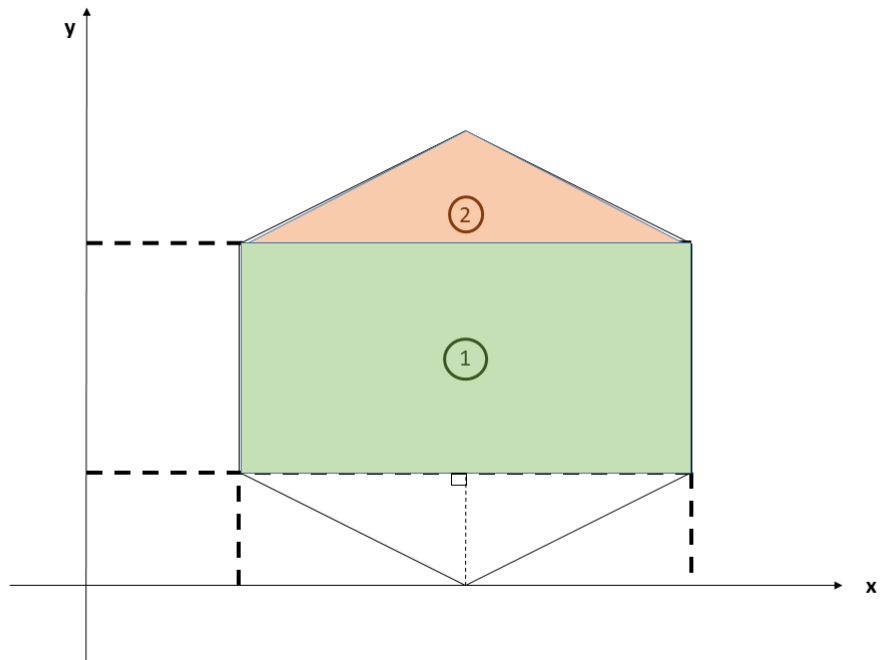


Fig. 2.17.: Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $R = 1$ et $Co = 0$, où l'aire A_1 est colorée en vert et A_2 est colorée en orange.

Le cas convexe : R variable et $C_0 = 0$

Ce cas est illustré en figure 2.18. L'aire de l'hexagone, qui est par définition égale à 1, peut être exprimée comme :

$$\mathcal{A} = 2\left(\frac{d\sqrt{R}}{3}\right)\frac{d}{\sqrt{R}} = 2\frac{d^2}{3} = 1 \quad (2.3)$$

Ce qui donne la même valeur que d que dans le cas précédent. Et de même $\mathcal{CH} = \mathcal{A} = 1$ car la forme est convexe.

Le périmètre \mathcal{P} peut être exprimé comme :

$$\mathcal{P} = 2\frac{d}{3}\sqrt{R} + 4l \quad (2.4)$$

avec $l^2 = \left(\frac{d}{3}\sqrt{R}\right)^2 + \left(\frac{d}{2\sqrt{R}}\right)^2 = \frac{R}{6} + \frac{3}{8R}$, ce qui nous amène à :

$$\mathcal{P} = \sqrt{\frac{2R}{3}} + \sqrt{\frac{8R}{3} + \frac{6}{R}} \quad (2.5)$$

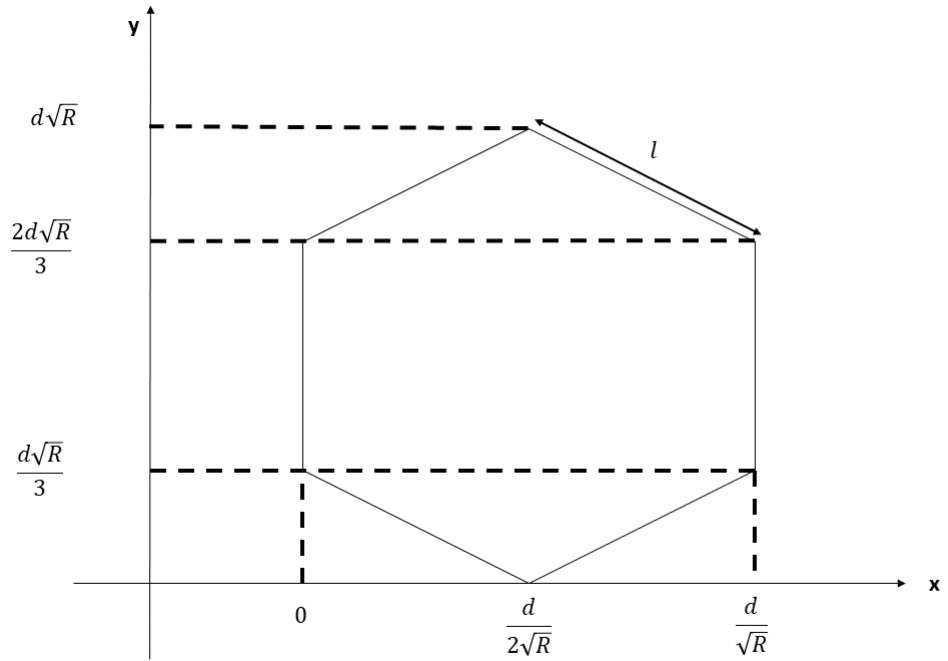


Fig. 2.18.: Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $C_0 = 0$.

Le cas concave le plus simple : R variable et $C_0 = 1$

Quand $C_0 = 1$, la forme de base n'est plus un hexagone, mais un polygone non convexe à 18 côtés (octodécagone) 2.19. Cela est dû au fait que chaque côté de

l'hexagone initial est sectionné en trois côtés comme illustré dans la figure 2.20. Notons $P_1P_2^\perp$ le vecteur orthogonal à P_1P_2 et $n = \frac{1}{9}P_1P_2^\perp$. Ainsi, P_3 et P_4 sont définis de telle façon que $P_1P_3 = \frac{1}{3}P_1P_2 + n$ et $P_1P_4 = \frac{2}{3}P_1P_2 - n$. Notons que le coefficient $\frac{1}{9}$ est arbitraire et peut être changé.

Quand le côté P_1P_2 est divisé, sa longueur L change en :

$$L' = \|P_1P_3\| + \|P_3P_4\| + \|P_4P_2\| \quad (2.6)$$

Nous avons donc :

$$\|P_1P_3\|^2 = \|P_4P_2\|^2 = \left(\frac{L}{3}\right)^2 + \left(\frac{L}{9}\right)^2 \quad (2.7)$$

et

$$\left(\frac{\|P_3P_4\|}{2}\right)^2 = \left(\frac{L}{9}\right)^2 + \left(\frac{L}{6}\right)^2 \quad (2.8)$$

Ce qui nous amène à :

$$L' = 2\sqrt{\left(\frac{L}{3}\right)^2 + \left(\frac{L}{9}\right)^2} + 2\sqrt{\left(\frac{L}{9}\right)^2 + \left(\frac{L}{6}\right)^2} \quad (2.9)$$

$$= \frac{L}{9}(2\sqrt{10} + \sqrt{13}) \quad (2.10)$$

Posons $\alpha = \frac{1}{9}(2\sqrt{10} + \sqrt{13})$. Nous avons montré que lorsque le côté P_1P_2 est divisé en trois plus petits côtés, sa longueur totale est multipliée par le facteur constant α . Par conséquent, le périmètre de l'octodécagone est $\alpha\mathcal{P}$ avec \mathcal{P} le périmètre de l'hexagone calculé dans le cas précédent.

Par construction, l'aire de l'octodécagone est la même que l'aire unité \mathcal{A} de l'hexagone alors que l'aire de l'enveloppe convexe augmente de l'aire de chaque triangle $P_1P_3P_2$, voir figure 2.21.

Pour chaque côté P_1P_2 , définissons \mathcal{T} tel que $P_1T = \frac{1}{3}P_1P_2$ (voir figure 2.21). Ainsi, l'aire ajoutée $P_1P_3P_2$ est la somme des aires des deux triangles P_1TP_3 et TP_3P_2 , qui peuvent être facilement exprimés comme :

$$P_1TP_3 = \frac{1}{2}\|P_1T\|\|TP_3\| \quad (2.11)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{L}{3} \frac{L}{9} \quad (2.12)$$

$$= \frac{L^2}{54} \quad (2.13)$$

et

$$TP_3P_2 = \frac{1}{2} \|TP_2\| \|TP_3\| \quad (2.14)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{2L}{3} \frac{L}{9} \quad (2.15)$$

$$= \frac{L^2}{27} \quad (2.16)$$

Le long de chaque côté P_1P_2 de longueur L , l'aire de l'enveloppe convexe augmente par le facteur $\frac{L^2}{18}$.

Nous remarquons que dans le cas convexe, la longueur d'un côté de l'hexagone est soit $\frac{d\sqrt{R}}{3} = \sqrt{\frac{R}{6}}$ (les deux côtés verticaux sur la figure 2.21) soit $l = \sqrt{\frac{R}{6} + \frac{3}{8R}}$ (les quatre côtés en diagonales sur la figure 2.22). En sachant que par construction, l'aire de notre hexagone est unitaire, on peut dériver l'aire de l'enveloppe convexe de l'octadécagone \mathcal{CH} qui s'exprime alors de cette façon:

$$\mathcal{CH} = 1 + \frac{2}{18} \frac{R}{6} + \frac{4}{18} \left(\frac{R}{6} + \frac{3}{8R} \right) \quad (2.17)$$

$$= 1 + \frac{R}{18} + \frac{1}{12R} \quad (2.18)$$

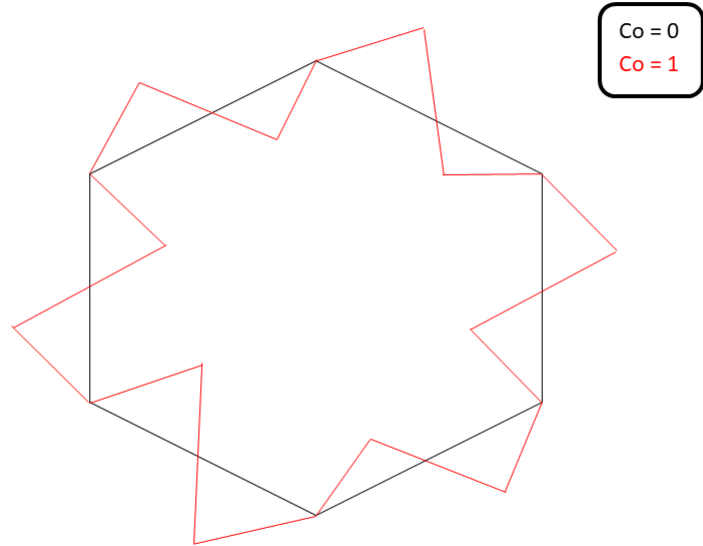


Fig. 2.19.: Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $\mathbf{Co} = 1$.

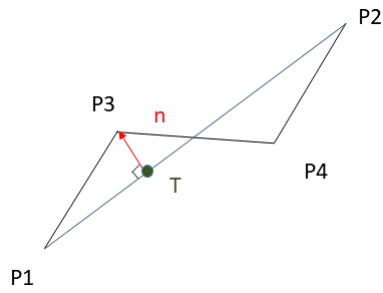


Fig. 2.20.: Chaque arête P_1P_2 est divisée en trois nouvelles arêtes P_1P_3 , P_3P_4 et P_4P_2 quand \mathbf{Co} augmente.

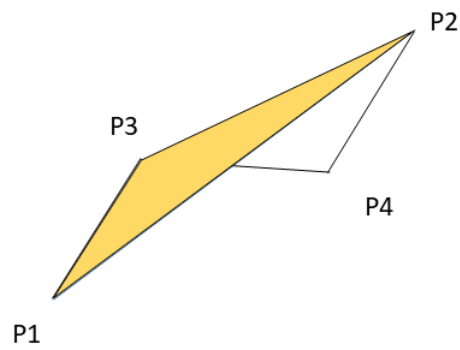


Fig. 2.21.: En jaune, aire ajoutée à l'enveloppe convexe dans le cas où $\mathbf{Co} = 1$ dans notre modèle de feuille synthétique.

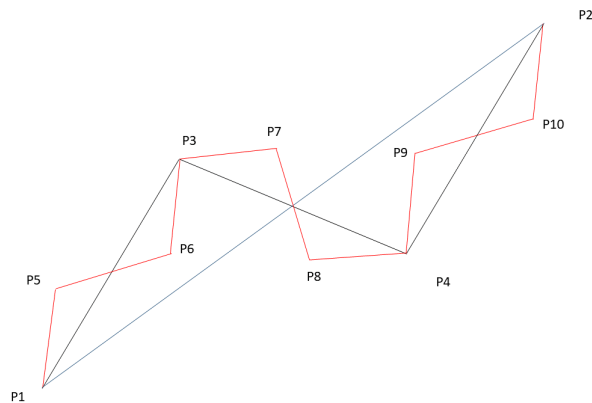


Fig. 2.22.: Division d'une arête P_1P_2 en neuf arêtes dans le cas où $\mathbf{Co} = 2$.

Le cas général : étude inductive

Nous exprimons maintenant les valeurs générales pour le périmètre \mathcal{P} et l'aire de l'enveloppe convexe \mathcal{CH} , en sachant que l'aire $\mathcal{A} = 1$ par construction.

Soit \mathcal{P}_n et \mathcal{CH}_n le périmètre et l'aire de l'enveloppe convexe pour les valeurs de concavité telle que $\mathbf{Co} = n$. Nous savons des précédents cas que :

$$\mathcal{P}_0 = \frac{2R}{3} + \sqrt{\frac{8R}{3} + \frac{6}{R}} \quad (2.19)$$

$$\mathcal{P}_1 = \alpha \mathcal{P}_0 \quad (2.20)$$

$$\mathcal{CH}_0 = 1 \quad (2.21)$$

$$\mathcal{CH}_1 = 1 + \frac{R}{18} + \frac{1}{12R} \quad (2.22)$$

En généralisant l'étude faite dans la section 2.3.2 , il est aisé de voir que lorsque la valeur de la concavité \mathbf{Co} augmente de 1, alors chaque côté est divisé en trois et la longueur associée est multipliée par un facteur constant $\alpha = \frac{1}{9}(2\sqrt{10} + \sqrt{13})$. On peut ainsi écrire que :

$$\forall n \geq 1, \mathcal{P}_n = \alpha \mathcal{P}_{n-1} = \alpha^n \mathcal{P}_0 \quad (2.23)$$

Posons maintenant P_1P_2 un côté de l'hexagone initial. Quand $\mathbf{Co} = n, n \geq 1$, ce côté est divisé en 3^n côtés (voir exemple sur la figure 2.19). Notons $P_1P_{3^{n-1}+2}$ le premier de ces côtés.

Nous avons vu dans les précédents cas que lorsque $\mathbf{Co} = 1$, seule l'aire du triangle $P_1P_3P_2$ est ajoutée à l'aire de l'enveloppe convexe (voir figure 2.22). De la même façon, lorsque $\mathbf{Co} = 2$, seule l'aire du triangle $P_1P_5P_3$ est ajoutée à l'aire de l'enveloppe convexe. En généralisant, lorsque $\mathbf{Co} = n$, seule l'aire du triangle $P_1P_{3^{n-1}+2}P_{3^{n-2}+2}$ est ajoutée à l'aire de l'enveloppe convexe.

En utilisant le même raisonnement que dans les sections précédentes, l'aire d'un tel

triangle est $\frac{L_{n-1}^2}{18}$ avec L_{n-1} la longueur du côté $P_1 P_{3^{n-2}+2}$. L_{n-1} peut être calculée de façon récursive avec l'équation Eq. (2.7):

$$L_0 = \|P_1 P_2\| = L \quad (2.24)$$

$$L_1 = \|P_1 P_3\| = \frac{\sqrt{10}}{9} L_0 = \frac{\sqrt{10}}{9} L \quad (2.25)$$

$$L_2 = \|P_1 P_5\| = \frac{\sqrt{10}}{9} L_1 = \left(\frac{\sqrt{10}}{9}\right)^2 L \quad (2.26)$$

$$\dots \quad (2.27)$$

$$L_{n-1} = \|P_1 P_{3^{n-2}+2}\| = \frac{\sqrt{10}}{9} L_{n-2} = \left(\frac{\sqrt{10}}{9}\right)^{n-1} L \quad (2.28)$$

En conséquence, pour chaque côté de longueur L de l'hexagone initial, augmenter la concavité \mathbf{Co} de $n-1$ à n , $n \geq 1$, augmente localement l'aire de l'enveloppe convexe d'un facteur de $\frac{L_{n-1}^2}{18} = \left(\frac{10}{81}\right)^{n-1} \frac{L^2}{18}$. Comme deux de ces côtés ont une longueur de $\sqrt{\frac{R}{6}}$ et les quatre autres une longueur de $\sqrt{\frac{R}{6} + \frac{3}{8R}}$ (2.23), nous calculons par récurrence l'aire de l'enveloppe convexe \mathcal{CH} :

$$\mathcal{CH}_0 = 1 \quad (2.29)$$

$$\forall n \geq 1, \mathcal{CH}_n = \mathcal{CH}_{n-1} + \left(\frac{10}{81}\right)^{n-1} \frac{1}{18} \left(2\frac{R}{6} + 4\left(\frac{R}{6} + \frac{3}{8R}\right)\right) \quad (2.30)$$

$$= \mathcal{CH}_{n-1} + \left(\frac{10}{81}\right)^{n-1} \frac{1}{18} \left(R + \frac{3}{2R}\right) \quad (2.31)$$

$$= \mathcal{CH}_0 + \frac{1}{18} \left(R + \frac{3}{2R}\right) \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{10}{81}\right)^i \quad (2.32)$$

$$= 1 + \frac{9}{142} \left(R + \frac{3}{2R}\right) \left(1 - \left(\frac{10}{81}\right)^n\right) \quad (2.33)$$

2.3.3 Visualisation du modèle dans l'espace des descripteurs "traditionnel"

Je rappelle brièvement ici les définitions des descripteurs dits "traditionnel" utilisés :

- *Aspect Ratio*: $AR = \mathbf{R}$
- *Circularité*: $Ci = 4\pi\left(\frac{A}{\overline{p}^2}\right)$

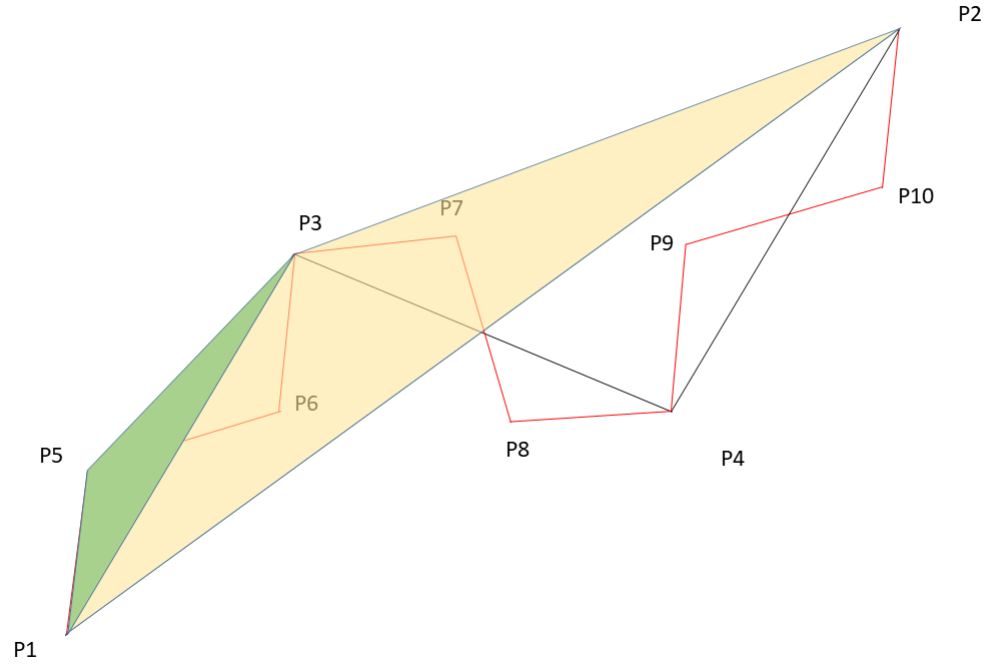


Fig. 2.23.: En vert, aire ajoutée à l'enveloppe convexe dans le modèle de feuille synthétique dans le cas où $\mathbf{Co} = 2$.

- *Solidité*: $S = \frac{A}{c\mathcal{H}}$

Je peux maintenant exprimer ces indicateurs en fonction des critères du modèle synthétique \mathbf{Co} et \mathbf{R} . Pour chaque valeur de \mathbf{Co} entre 0 et 5, les courbes C_i en fonction de $1/AR$, S^8 en fonction de $1/AR$ et C_i en fonction de S^8 sont tracées sur les illustrations données dans M. Li et al. (2018) (voir figure 2.24).

2.3.4 Conclusion de la validation

On constate sur les figures 2.24 que notre modèle couvre une large diversité d'espèces. Les feuilles des plantes des familles Passiflora, Solanaceae, Brassicaceae, Alstroemeria, et Viburnum peuvent être représentées par notre modèle.

2.4 Données synthétiques générées pour les futurs tests

Maintenant que le modèle de nuage de points synthétique de feuille est défini et validé, il est nécessaire de décrire les jeux de données qui sont utilisés dans la suite de l'étude. Nous commencerons par les jeux de données utilisés pour l'analyse

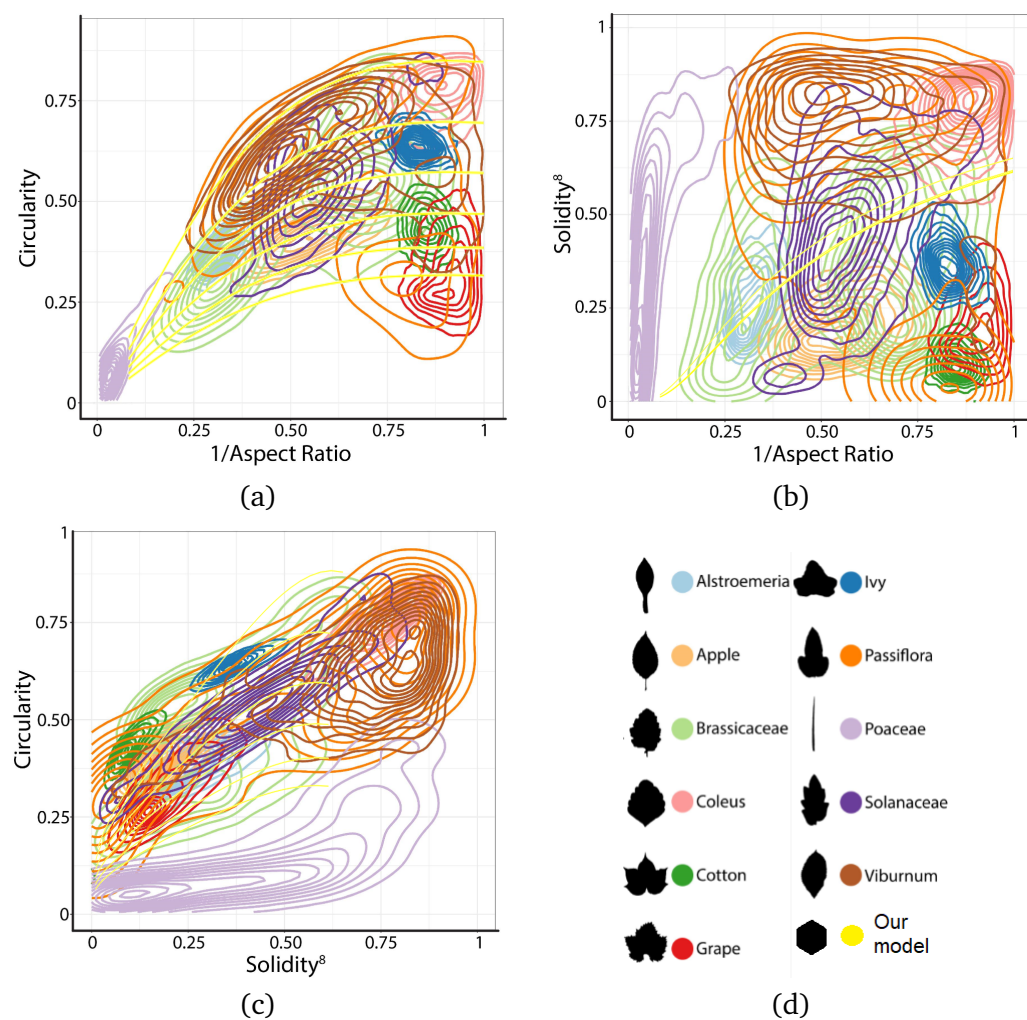


Fig. 2.24.: Visualisation du morphospace de la base de données issues de l'article de Li et du modèle de nuage de points de feuille synthétique, (a) inverse ratio en fonction de la circularité, (b) inverse du ratio en fonction de la solidité⁸, (c) solidité⁸ en fonction de la circularité et (d) la légende des couleurs utilisées pour chaque espèce, en jaune ajout de notre modèle (M. Li et al., 2018).

de sensibilité des différentes méthodes de reconstruction de surface. Puis nous aborderons les jeux de données pour l'étude du comportement des méthodes de reconstruction de surface par rapport à chaque critère du modèle synthétique de nuage de points de feuille.

2.4.1 Données tests pour l'analyse de sensibilité

Les objectifs de l'analyse de sensibilité et les résultats obtenus sont expliqués dans la section 3.4. Parmi les objectifs décrits et étudiés, il est mentionné que les paramètres des méthodes de reconstruction de surface doivent permettre de gérer la plage la plus large possible de variations pour un critère. Dans ce cas, il est nécessaire de générer les nuages de points pour cette étude en prenant des valeurs variées pour chaque critère.

Un objectif supplémentaire est de déterminer l'influence d'un paramètre. Pour simplifier les interprétations, seule la valeur par défaut d'un critère est modifiée. La liste des valeurs prises pour chaque jeu de données est décrite dans le tableau 2.3. L'intervalle des valeurs choisies pour chaque critère est large. Une seule exécution de la génération est utilisée, ce qui donne au final 140 nuages de points.

Critère	Paramètre(s)	Valeurs par critère
Ratio L/l	R	1.2,1.5,1.7,2,2.5,3,5,7,10,12
Courbure	Cu	20,40,60,80,100,120,140,160,180,200, 220,240, 260,280,300,320,340,360 °
Concavité	Co	1,2,3,4,5 itérations
Motif	S.p	Aléatoire ou Régulier
Densité	D	50,100,200,500,1000,2000,4000,5000,6000, 7000,10000,15000,20000,25000,50000,75000 pts/m ²
Densité NU	NU	1.5,2,2.5,3,3.5,4,5,6,8,10
Bruit	N	0.006,0.007,0.008, 0.01,0.02,0.05,0.07,0.08,0.1,0.15 0.18,0.21,0.21,0.24,0.27,0.3,0.33,0.36,0.4,0.43,0.45 0.008,0.04,0.08,0.12,0.16,0.2,0.24 m 0.1,0.13,0.2,0.25,0.33 m
Recalage	M.d M.l	
Trou	H	0.006,0.0074,0.0104,0.0116,0.0134,0.0164,0.0196,0.021,0.026, 0.036 m

Tab. 2.3.: Récapitulatif des valeurs pour chaque critère utilisées pour générer les nuages de points de feuilles synthétiques pour l'analyse de sensibilité en plus des valeurs par défaut (voir tableau 2.1). Les longueurs sont exprimées comme un ratio avec la distance entre la base et l'apex de la feuille : 0.12 signifie 12% de cette distance.

Sur la figure 2.25, quelques exemples de nuages de points générés sont montrés.

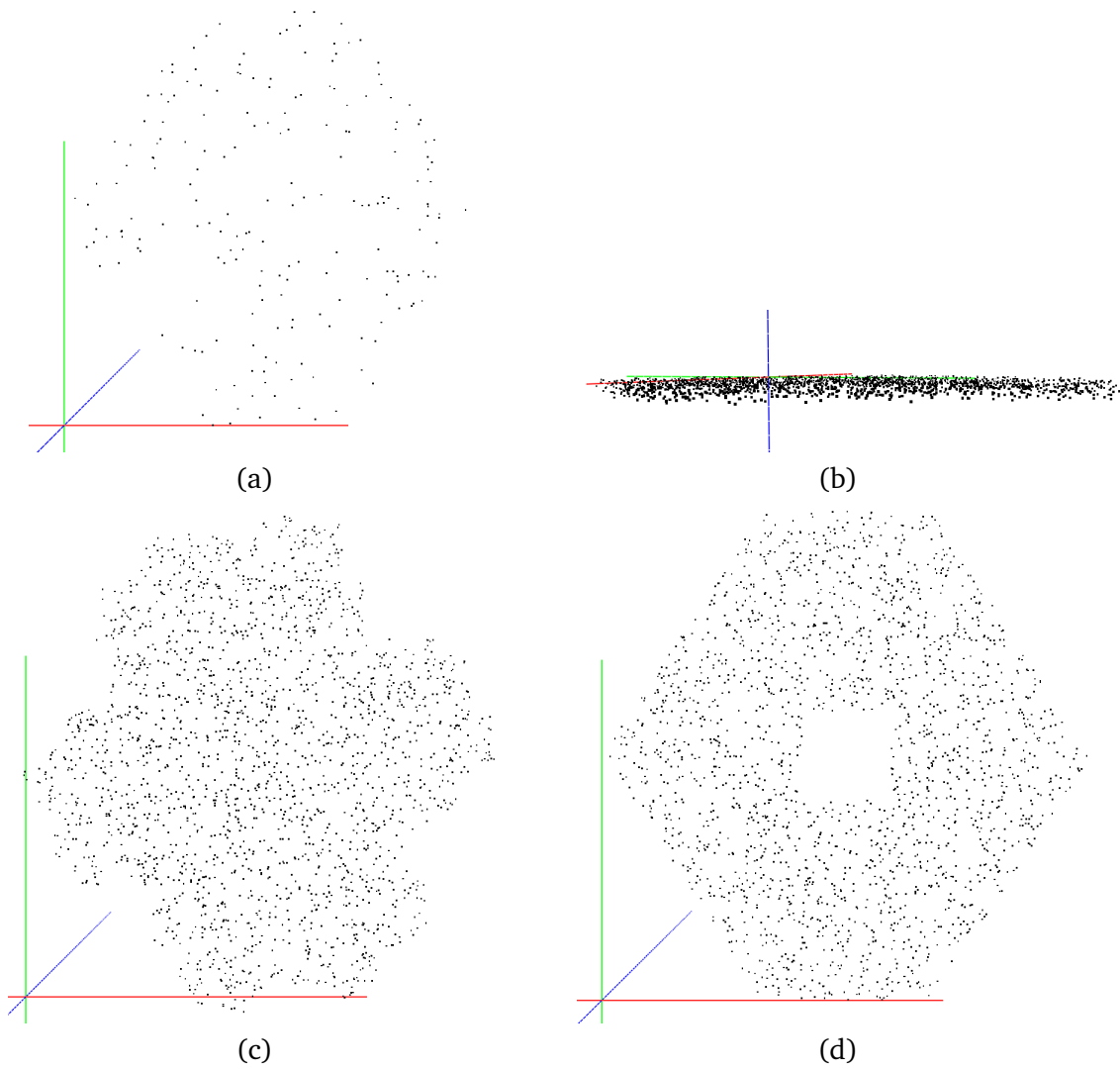


Fig. 2.25.: Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour un critère qui est indiqué par la suite. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $D = 200 \text{ points}/m^2$, (b) $N = 0,07$, (c) $Co = 4$, (d) $H = 0.18m$.

2.4.2 Cas particuliers

Alpha-Shape

L'implémentation utilisée dans l'étude de la méthode de l'Alpha-Shape ne permet pas de supporter des nuages de points totalement plans (voir détails sur la méthode dans la section 3.3.1). Tous les critères sauf ceux concernant le recalage, le bruit et la courbure produisent des nuages de points qui ne sont donc pas supportés par le logiciel utilisé. Pour permettre à la méthode de fonctionner, un autre jeu de données est généré pour cette méthode. Les mêmes valeurs sont utilisées sauf pour le niveau de bruit qui est posé égal à 0,00001, c'est-à-dire un bruit pratiquement nul. Les jeux de données pouvant être utilisés, car non-plans, ne sont pas régénérés et sont utilisés comme tels. Les valeurs utilisées dans le jeu de donnée Alpha-Shape sont récapitulées dans le tableau 2.4.

Critère	Paramètre(s)	Valeur bruit	Valeurs par critère
Ratio L/l	R	0.00001	1.2,1.5,1.7,2,2.5,3,5,7,10,12
Courbure	Cu	0	20,40,60,80,100,120,140,160,180,200,220,240, 260,280,300,320,340,360 °
Concavité	Co	0.00001	1,2,3,4,5 itérations
Motif	S.p	0.00001	Aléatoire ou Régulier
Densité	D	0.00001	50,100,200,500,1000,2000,4000,5000,6000,7000,10000,15000,20000,25000,50000,75000 pts/m ²
Densité NU	NU	0.00001	1.5,2,2.5,3,3.5,4,5,6,8,10
Bruit	N	0	0.006,0.007,0.008,0.01,0.02,0.05,0.07,0.08,0.1,0.150.18,0.21,0.21,0.24,0.27,0.3,0.33,0.36,0.4,0.43,0.45
Recalage	M.d	0	0.008,0.04,0.08,0.12,0.16,0.2,0.24 m
	M.l	0	0.1,0.13,0.2,0.25,0.33 m
Trou	H	0.00001	0.006,0.0074,0.0104,0.0116,0.0134,0.0164,0.0196,0.021,0.026, 0.036 m

Tab. 2.4.: Récapitulatif des valeurs pour chaque critère pour la génération des nuages de points de feuilles synthétiques utilisées pour l'analyse de sensibilité. Valeur par défaut du bruit pour chaque jeu de données par critère.

Méthodes basées sur les courbes de Bézier

Notre étude comprend également deux méthodes basées sur les courbes de Bézier : le modèle de feuille de Bézier (voir détails dans la sous-section 3.3.2) et la méthode de Bézier élaguée (voir détails dans 3.3.2). Pour des questions de temps d'exécution détaillées respectivement dans les sections 3.4.4 et 3.4.4 le jeu de données d'analyse de sensibilité a été fortement réduit. Le tableau 2.5 présente les valeurs des critères utilisés pour générer les fichiers de l'analyse de sensibilité pour ces deux méthodes.

Nom Nuage	Critère	Valeurs critère
D03	Densité	200 points/ m^2
D08	Densité	5000 points/ m^2
D016	Densité	75000 points/ m^2
H01	Trou	0.06 m
H010	Trou	0.6 m
N02	Bruit	0.007
N07	Bruit	0.07
Cu03	Courbure	60 °
Cu06	Courbure	120 °
Cu010	Courbure	200 °
Cu014	Courbure	280 °
R02	Ratio L/l	1.5
R08	Ratio L/l	7
Co01	Concavité	1
Co05	Concavité	5

Tab. 2.5.: Liste des nuages de points utilisés pour l'analyse de sensibilité des méthodes basées sur les surfaces de Bézier. Le nom du nuage est donné, puis le critère qui est modifié et sa nouvelle valeur. Les autres critères ont leurs valeurs par défaut 2.1.

2.4.3 Données tests pour l'analyse du comportement des méthodes. Tous les autres critères ont leurs valeurs par défaut.

Pour notre étude de sensibilité et notre étude de robustesse des méthodes, un ensemble de nuages de points synthétiques a été généré en faisant varier indépendamment les valeurs de chaque critère. Les valeurs utilisées dans le modèle de nuage de points de feuille synthétique sont récapitulées dans le tableau 2.6.

1240 nuages de points de feuilles ont été générés de cette façon pour l'ensemble de notre étude. Afin de prendre en compte le caractère aléatoire de la génération de données, 10 nuages de points différents sont générés avec les mêmes paramètres pour chaque critère.

Le cas d'Alpha-Shape est toujours particulier, car l'implémentation utilisée ne permet pas de gérer les nuages de points plans. Il s'agit des mêmes limites que celles présentées dans la section précédente 2.4.2. Dans ce cas, pour tous les nuages de points où c'est nécessaire, un nouveau nuage de points est généré en utilisant les mêmes valeurs pour chaque critère. Sauf pour le critère de bruit, lequel est fixé à 0.00001 : un bruit extrêmement faible, mais qui permet l'exécution de l'algorithme sur les données d'entrée.

Critère	Paramètre(s)	Valeurs par critère
Ratio L/l	R	1,1.2,1.5,1.7,2,2.5,3,5,7,10,12
Courbure	Cu	0,20,40,60,80,100,120,140,160,180,200, 220,240,260,280,300,320,340,360 °
Concavité	Co	0,1,2,3,4,5 itérations
Motif	S.p S.n	Aléatoire ou Régulier 0,0.00000004,0.00000008,0.00000004 ,0.00000008, 0.0000004,0.0000008,0.000004,0.000008,0.0004,0.0008
Densité	D	50,100,200,500,1000,2000,4000,5000,6000, 7000,10000,15000,20000,25000,50000,75000 pts/m ²
Densité NU	NU	1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,5,6,8,10
Acquisition noise	N	0, 0.006,0.007,0.008, 0.01,0.02,0.05,0.07,0.08,0.1,0.15
Recalage	M.d M.l	0,0.008,0.04,0.08,0.12,0.16,0.2,0.24 m 0,0.1,0.13,0.2,0.25,0.33 m
Trou	H	0,0.06,0.12,0.18,0.24,0.3,0.36,0.42,0.48,0.54, 0.6 m

Tab. 2.6.: Récapitulatif des valeurs pour chaque critère pour la génération des nuages de points de feuilles synthétiques utilisées pour l'analyse du comportement de chaque méthode par rapport à chaque critère.

2.5 Conclusion

Le modèle proposé pour la génération de nuages de points de feuille synthétique permet d'augmenter la taille des jeux de tests pour les méthodes de traitement de nuage de points de feuilles. Elle permet aussi d'avoir un contrôle très fort sur les caractéristiques géométriques de ce nuage de points et de modéliser de nombreuses situations différentes. Par exemple, on peut très bien modéliser une variété de feuilles très allongées, ne présentant pas de concavité, acquise dans un environnement à bruit variable moyen avec un LiDAR. Ou encore on peut modéliser un jeu de donnée de feuille ayant un ratio longueur/largeur proche de 1, mais ayant des concavités faibles et des données manquantes et de petites tailles. La validation du modèle dans la section 2.3 permet de donner de la confiance dans le modèle et dans les conclusions des études qui sont réalisées sur des données générées par ce modèle.

En profitant de cette souplesse, les jeux de données générés pour la comparaison des méthodes de reconstruction de surface à partir d'un nuage de points montrent un large panel de valeurs par critère différent. Il est clair que les critères liés à l'acquisition peuvent être maîtrisés en partie par les protocoles d'acquisition, et que beaucoup des valeurs proposées sont alors en dehors des valeurs réalistes pour le critère. Par exemple, un bruit à plus de 15% est très rare lors d'acquisitions bien menées. Et si un nuage de points présente cette quantité de bruit, il est généralement écarté, car inutilisable. Cependant, il est important de tester les méthodes de reconstruction en dehors des paramètres habituels pour des questions de robustesse.

Le modèle qui est défini ici possède cependant des limites intrinsèques à sa construction. En effet, il est par exemple impossible de modéliser certaines caractéristiques géométriques qui sont pourtant présentes dans nos données réelles comme les torsions. De plus, le modèle de concavité est uniforme sur la frontière. Notre modèle doit être considéré comme un premier pas vers la modélisation de formes géométriques de feuilles, incluant notamment des feuilles non symétriques, multilobes ou composées. Ces modèles de feuilles sont des cas particulièrement intéressants, car répandus dans la nature.

Estimation de la surface foliaire par la reconstruction de surface à partir d'un nuage de points : méthodes et processus de l'étude

3.1 Contexte

Nous disposons à présent de nuages de points de plantes de maïs dans un champ et de nuages de points synthétiques de feuilles pouvant modéliser une large variété d'espèces taxonomiques différentes (voir sections 2.4 et 1.1). Nous allons aussi ajouter à notre propre base de données des nuages de points provenant d'expérimentations sur de jeunes pousses, donc des petites plantes, de Hétroy-Wheeler et al. (2016). Ces données seront présentées en détail dans la section 3.5.1. Avec l'ensemble de ces données, nous pouvons à présent étudier les caractéristiques architecturales des feuilles de nos plantes.

Ces mesures sont essentielles pour l'étude de la physiologie des plantes et des arbres pour l'agronomie ainsi que pour la foresterie. La hauteur, les angles des branches ou les aires des feuilles des plantes sont utilisés dans des études sur la croissance, du phénotypage ou même pour de l'inventaire de plantes. Elles sont effectuées de façon entièrement manuelle directement sur la plante. Certaines d'entre elles demandent à ce que la plante soit coupée pour être effectuée. Ces mesures manuelles sur les plantes réelles souffrent de nombreuses limitations. Elles ont un coût conséquent en termes de main-d'œuvre et de temps. Des erreurs sont faites facilement, quand la mesure n'est tout bonnement pas réalisable, ce qui est par exemple le cas pour les mesures suivies dans le temps.

Lors de cette dernière décennie, des technologies de scanner laser et de photogrammétrie ont été proposées pour résoudre ce problème. Ces technologies permettent de créer un modèle virtuel de la plante sous forme d'un nuage de points 3D qui peut être étudié numériquement, laissant la plante intacte lors de ce processus. Les caractéristiques géométriques et les mesures sont donc accessibles via traitements informatiques et peuvent même être déterminées automatiquement. Les mesures sont variées et peuvent concerner tous les organes de la plante. Il peut s'agir de

mesures globales comme la hauteur de la plante, le nombre de feuilles ou d'entrenœuds, la présence d'épis ou de fleurs. Ou il peut s'agir de mesures plus spécifiques à certains organes comme le nombre de grains sur un épi ou la longueur d'une des feuilles (voir figure 3.1). Il y a de nombreux paramètres architecturaux à mesurer pour connaître le stade de développement d'une plante et son état de santé.

L'aire d'une feuille en particulier est très utile pour accéder à des paramètres physiologiques clefs. En effet, la feuille est directement liée au processus d'évapotranspiration et aussi à son accès à la lumière pour l'enclenchement du processus de photosynthèse (Trimble, 2019). C'est donc une mesure intermédiaire essentielle pour le calcul du Leaf Area Index (LAI) ou indice foliaire. Il est calculé en considérant une feuille unilatérale et la projection orthogonale de celle-ci sur le sol (voir figure 3.1). Cette mesure permet de caractériser la canopée des plantes et de connaître la quantité de lumière captée par la plante. Dans le cas du maïs par exemple, la taille de la feuille supérieure de la canopée permet de connaître le stade de développement de la plante ainsi que son état de santé. On peut aussi argumenter que reconstruire la surface de la plante permet d'accéder à d'autres mesures caractéristiques de celle-ci comme sa longueur, sa plus grande et plus petite largeur. L'accès à ces mesures peut permettre le développement d'un modèle robuste et générique de la plante. Ce modèle peut ensuite être utilisé dans différentes applications comme la reconnaissance d'espèce ou la détection de maladie sur une plante.

Le dispositif de référence pour la mesure expérimentale de l'aire d'une feuille est le planimètre (Leaf Area Meter). Il s'agit d'un appareil de mesure qui aplatit mécaniquement les feuilles et détecte les contours de la surface (voir figure 3.2).

Dans notre cas, trois étapes sont nécessaires pour obtenir la mesure de l'aire de la surface d'une feuille à partir du nuage de points d'une plante. En premier lieu, il faut segmenter les points appartenant à une unique feuille du reste de la plante. Ensuite, un modèle de la surface de la feuille est calculé à partir de ces points. Enfin, on utilise le modèle précédemment obtenu pour calculer l'aire de la feuille. Dans cette thèse, je ne présenterai pas le processus de segmentation d'un nuage de points de plante. Je considère que nous avons à disposition les nuages de points segmentés de chaque plante par organe, que la segmentation soit faite manuellement ou automatiquement. Ce chapitre de thèse est consacré à l'étude de la deuxième étape à savoir la création de modèles de surface de feuille à partir d'un nuage de points 3D. Je fais quelques hypothèses simplificatrices qui ne correspondent pas complètement à la réalité de l'acquisition. Cependant, ce choix est justifié dans la suite de cette section.

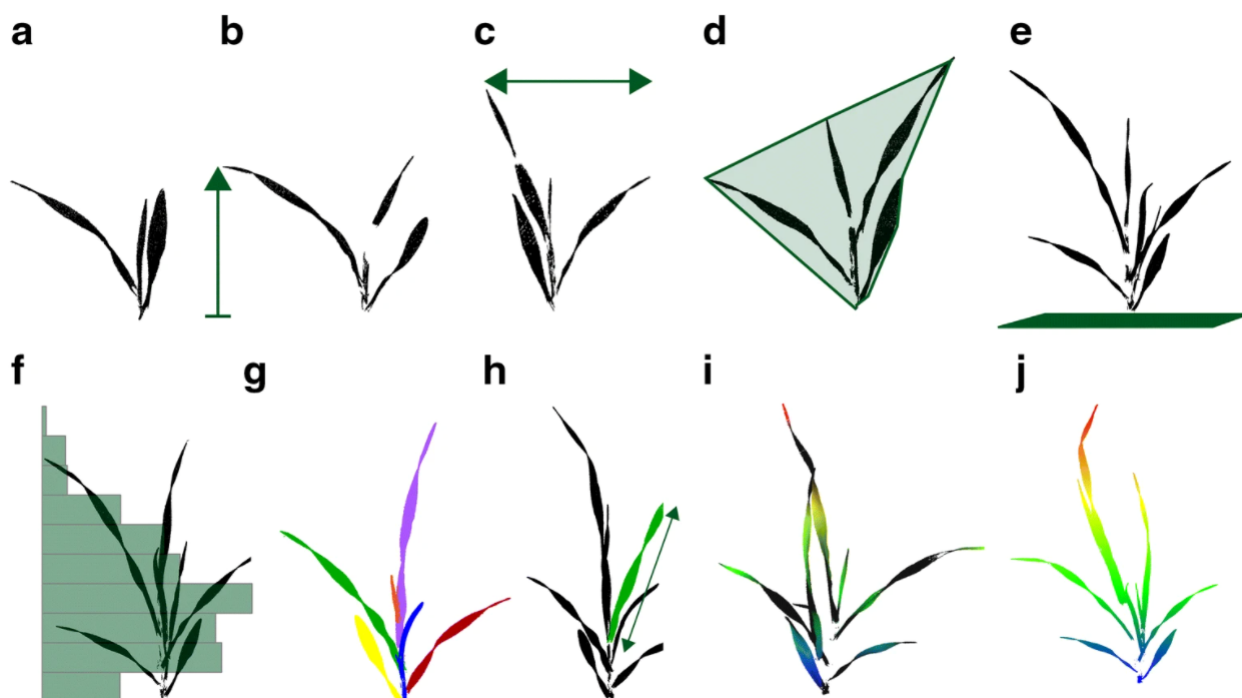


Fig. 3.1.: Exemple de traits architecturaux pouvant être extrait d'un nuage de points 3D illustré sur (a) une jeune pousse d'orge. Des données non complexes comme (b) la hauteur de la plante, (c) la largeur de la plante, (d) l'enveloppe convexe de la plante, (e) l'aire projetée des feuilles. Des paramètres plus complexes sont aussi accessibles après différents traitements comme (f) la densité de la surface foliaire, (g) le nombre de feuilles, (h) la longueur de chaque feuille. La carte d'inclinaison (i) et de hauteur (j) peut aussi être calculée. (issue de Paulus (2019)).

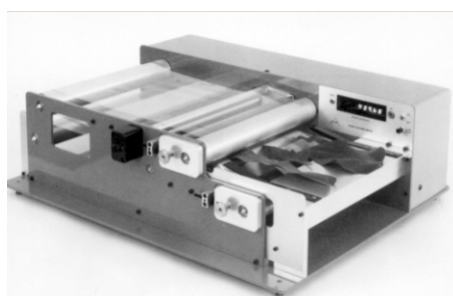


Fig. 3.2.: Appareil de mesure mécanique de l'aire de la feuille, ici le modèle LiCOR-LI-3100 utilisé dans le jeu de données présenté dans la section 1.1.

Il y a trois grandes familles d'approches pour obtenir une surface à partir d'un nuage de points 3D dans la littérature. La première famille consiste à connecter des points voisins en un maillage. On approche ensuite l'aire de la feuille par la somme de la surface des triangles qui composent le maillage. La deuxième approche est basée sur l'approximation du nuage de points par un modèle de surface paramétrique. La surface est ensuite maillée sur l'échantillon d'intérêt. L'aire est calculée à partir de la somme des aires de ces mailles. La troisième et dernière famille d'approche est basée sur la création d'une surface implicite à partir du nuage de points. La surface est ensuite découpée puis maillée.

Cette deuxième étape correspond à l'interpolation ou l'approximation d'un nuage de points 3D de feuille par une surface continue. La troisième étape du processus de mesure est directement dépendante de l'étape précédente. Il s'agit de calculer et additionner les aires des triangles du maillage reconstruit sur la surface obtenue. En effet, les surfaces continues définies paramétriquement ou implicitement sont elles aussi maillées.

Il n'existe pas de consensus dans l'état de l'art sur l'existence d'une méthode ou d'une approche supérieure aux autres pour la reconstruction de surface à partir d'un nuage de point 3D. Toutes les méthodes sont donc étudiées et comparées vis-à-vis de leurs performances sur notre problématique.

Les objectifs de cette étude sont multiples:

- Vérifier qu'il existe au moins une méthode fiable et précise permettant la reconstruction de surface à partir d'un nuage de points ;
- Déterminer alors pour toutes les méthodes dans quelles conditions une reconstruction fiable et précise est obtenue ;
- Décrire les meilleures méthodes en fonction des propriétés des nuages de points d'entrée ;
- Déterminer quelles limites existent aujourd'hui à la reconstruction de surface à partir d'un nuage de points.

En parallèle de l'étude de chaque méthode en elle-même, nous posons pour notre application les contraintes suivantes :

- Le processus complet d'estimation de la mesure pour chaque méthode doit être automatique ;

- L'algorithme doit être robuste et fiable pour des feuilles de plantes les plus variées possibles ;
- Le processus doit être accessible à l'ensemble de la communauté des biologistes et agronomes travaillant avec ces mesures, sans connaissance approfondie en géométrie ou en informatique.

Ces contraintes font que je me limite dans mon étude aux méthodes de l'état de l'art dont un code est accessible gratuitement et en licence libre. Quant au besoin d'automatisation de la procédure, il vient du fait que la mesure sur plante numérisée se fera au terme du projet dans le cadre du phénotypage haut débit . Dans ce cas, il sera impossible de choisir pour chaque feuille de chaque plante une nouvelle méthode de reconstruction de surface et décider de ses nouveaux paramètres d'exécution. Cependant, toutes les méthodes ne permettent pas un traitement automatique de nuages de points 3D variés. C'est pourquoi des stratégies d'automatisation du choix des paramètres ont été mises en place, quand il a été possible de le faire. L'ensemble des algorithmes et leurs modifications éventuelles sont présentés dans la suite de ce chapitre dans la section 3.3. Il s'agit de la Triangulation 2.5D, Alpha-Shape, BPA, Reconstruction incrémentale, B-Spline et Poisson échantillé. De plus, une nouvelle méthode simple, mais performante est proposée, Bézier élagué, et une autre méthode de l'état de l'art, Modèle de feuille de Bézier, est adaptée puis implémentée pour la reconstruction de surface de feuille.

Dans ce chapitre, je vais d'abord faire un état de l'art concis des méthodes utilisées pour obtenir la mesure de l'aire d'une feuille ainsi que des études comparatives de méthodes de mesures numériques des caractéristiques géométriques d'une plante à partir d'un nuage de points. Ensuite, je présenterai brièvement l'ensemble des données réelles utilisées. Puis je présenterai en détail les algorithmes de prétraitement et les méthodes de reconstruction étudiées. Enfin, je développerai la méthodologie de l'étude comparative des résultats de reconstruction.

3.2 Mesure architecturale sur nuage de points: état de l'art

Il n'existe pas de méthode de référence en ce qui concerne la mesure numérique sur nuage de points de caractéristiques architecturales des plantes. L'étude comparative de différentes méthodes pour obtenir la mesure de l'aire d'une feuille n'a pas été entreprise auparavant ; mais des études partielles pour d'autres types de mesures ont été effectuées. Je m'en suis inspiré et vais les présenter dans la section 3.2.1. Les

méthodes sont très nombreuses, je présenterai les principales dans la section 3.2.2 et j'expliquerai pourquoi elles sont retenues ou non.

3.2.1 Étude comparative des méthodes de reconstruction de surface pour les feuilles: état de l'art

Comme écrit dans l'introduction de ce chapitre, il n'existe pas à notre connaissance d'étude comparative des différents algorithmes de reconstruction de surface de feuille à partir d'un nuage de points 3D. Cependant, quelques articles de l'état de l'art comparent les performances de 2 ou 3 méthodes de reconstruction de surface dans le cadre de l'étude de feuilles de plantes. Par exemple, dans Loch et al. (2005), la comparaison concerne d'un côté une approche de maillage appelé linear triangle LIN*, et de l'autre côté, une approche par création de triangles de Clough-Tocher* pour une surface paramétrique cubique par morceaux. Ces deux méthodes sont utilisées pour reconstruire une surface à partir de nuage de points de feuilles de frangipanier (*Plumeria japonica*) et de *Brachychiton acerifolius*.

Plus récemment, Daryl M. Kempthorne et al. (2014b) et Moa'Ath N. Oqielat (2019) ont comparé les résultats de méthodes de reconstruction à des modèles paramétriques de surfaces de feuilles. Dans ces études, les modèles de surface sont évalués par rapport à la distance euclidienne ou maximale de la surface reconstruite au nuage de points initial. Cependant aucune évaluation de l'aire de la feuille n'a été menée. Dans l'article de Daryl M. Kempthorne et al. (2014b), les trois méthodes comparées sont toutes des méthodes qui ont déjà été appliquées à la reconstruction de surface de feuilles. Ce sont les D^2 -Splines (Arcangeli et al., 2004), les thin plate splines* de lissage par éléments finis (Roberts et al., 2003) et la méthode Clough-Tocher de fonctions de base radiale (M. Oqielat et al., 2009). Dans l'article de Moa'Ath N. Oqielat (2019), l'auteur montre la validité d'une nouvelle approche de reconstruction de surface de feuille présentée dans le même article et la compare avec son ancienne méthode présentée en 2009 et un modèle paramétrique de la feuille.

L'article présentant le travail se rapprochant le plus de ce que l'on cherche à effectuer est Dupuis et al. (2016). Plus précisément, comme dans l'article de Loch et al. (2005), Dupuis et al. (2016) se sont intéressés à une méthode de triangulation 2D des points projetés sur le plan le plus proche du nuage de points puis repositionnés dans l'espace 3D à leurs positions initiales. Cette méthode a été comparée à la construction d'un modèle de surface paramétrique B-Spline élaguée pour que ses frontières correspondent à celles de l'alpha-shape (Edelsbrunner and Mücke, 1994a). Les deux modèles ont été évalués sur des nuages de points LiDAR provenant d'un système de cale étalon*. Ces nuages de points ne sont testés que vis-à-vis d'un seul paramètre correspondant à l'épaisseur du nuage de points et pouvant simuler le bruit

d'acquisition. Dans ces conditions, les auteurs ont montré que les reconstructions BSplines étaient plus précises que la méthode de triangulation. Dans cette thèse nous avons choisi de garder la même technique de triangulation, mais nous avons choisi une méthode B-Spline plus avancée (Mörwald et al., 2016).

Des études comparatives de méthodes de reconstruction de surface pour d'autres organes de plantes existent. Åkerblom et al. (2015) présentent une comparaison effectuée sur les branches d'un arbre entre cinq modèles géométriques. Ces modèles sont évalués sur des données synthétiques de formes géométriques diverses. Ces méthodes ont aussi été testées sur des nuages de points réels acquis par LiDAR terrestre.

Une autre étude présentée par Xie et al. (2021) s'intéresse au processus d'obtention de la géométrie 3D du fruit de rosier châtaigne (*Rosa roxburghii*). Après une étude sur les différentes étapes de prétraitement pour la simplification du nuage de points, les auteurs comparent quatre méthodes de reconstruction de surface : Poisson, Poisson échantillonné, Reconstruction incrémentale et Triangulation de Delaunay. La meilleure reconstruction est déterminée par l'erreur relative de différence d'aire ainsi que le nombre de sommets et de mailles.

La méthodologie qui a été utilisée dans cette thèse est similaire à celle de Åkerblom et al. (2015). Cependant le problème est plus complexe, car l'acquisition de nuages de points de feuilles est soumise à plus d'aléas et est plus sensible que l'acquisition de branches. Celles-ci sont plus rigides et bien moins déformables, donc moins soumises aux bruits et erreurs d'alignement.

D'un point de vue beaucoup plus large, Berger et al. (2017) fournissent une étude exhaustive des méthodes de reconstruction à partir de nuages de points 3D. Cependant leur étude s'est plus concentrée sur les maillages de surfaces sans bord alors que les feuilles sont des surfaces à bord.

3.2.2 Algorithmes de reconstruction 3D : une sélection

De nombreux articles se sont intéressés aux méthodes de reconstruction de surface à partir d'un nuage de points dans le cas général comme Berger et al., 2017. Cependant dans cette section, je présente uniquement les différentes méthodes de reconstruction de surface qui ont été utilisées dans l'état de l'art sur des nuages de points 3D de feuilles.

Des méthodes classiques de reconstruction de surface à partir de nuages de points ont bien sûr été utilisées. Dans la section précédente Poisson, Poisson échantillonné, Reconstruction incrémentale et Triangulation de Delaunay sont mentionnées (Xie et al., 2021). Ces méthodes sont aussi employées dans d'autres études. La reconstruction

incrémentale est aussi utilisée par D. Li, Shi, et al. (2020) pour des nuages de points de Marante (*Maranta arundinacea*) et Cane du muet (*Dieffenbachia picta*) acquis par multivues et par D. Li, Cao, et al. (2019) pour un Scindapsus doré (*Epipremnum Aureum*), un Faux philodendron (*Monstera deliciosa*), une plante paon (*Calathea Makoyana*) et un lierre du Népal (*Hedera nepalensis*). À partir des reconstructions de surface, les auteurs de D. Li, Shi, et al. (2020) déduisent les mesures de longueur et largeur des feuilles ainsi que leurs inclinaisons. Une autre méthode classique est celle de Dupuis et al. (2016) qui propose d'ajuster une surface B-Spline au nuage de points puis de limiter la frontière en la faisant correspondre à celle obtenue par la méthode de l'Alpha-shape. On peut encore citer de la section précédente la méthode de Triangulation 2D des points projetés sur le meilleur plan, puis repositionnés dans l'espace 3D à leurs positions initiales (Dupuis et al., 2016). Enfin dans Yun, M. Gao, et al. (2013), les nuages de points acquis avec un scanner laser 3D dans un environnement forestier sont reconstruits avec la méthode de Triangulation de Delaunay.

D'autres méthodes généralistes, mais moins classiques ont été employées comme les D^2 -Splines (Arcangeli et al., 2004) ou celles présentées dans Loch et al. (2005) à savoir linear triangle LIN et triangles de Clough-Tocher pour une surface paramétrique cubique par morceaux. Une variante de la dernière méthode est présentée et utilisée par M. Oqielat et al. (2009); mais la version originale est décrite dans M. Oqielat et al. (2009) pour des données scanner de feuilles de Langue de feu (*Anthurium*). Yidan et al. (2016) et Lei et al. (2015) utilisent une triangulation de Delaunay associée à une courbe B-Spline pour délimiter le contour pour étudier l'architecture du colza.

Outre les méthodes généralistes plus ou moins classiques, il existe des méthodes reposant sur des connaissances a priori sur la géométrie des feuilles. Dans la section précédente, j'ai cité le travail de Roberts et al. (2003) utilisant les thin plate splines de lissage par la méthode des éléments finis. Michael P Pound et al. (2014) représentent les plantes comme une succession de petites sections planes. Les bords de chaque feuille sont raffinés grâce à la méthode des surfaces de niveau*. Yun, W. Li, et al. (2014) cherchent à reconstruire la géométrie d'arbres Michelia et Cerisiers du Japon acquis par la technologie LiDAR. La première étape de leur méthode est de placer dans le nuage de points 3D les frontières précises de la feuille avec une méthode d'ajustement polynomial*. Ensuite, l'algorithme extrait les veines centrales et latérales de la feuille avec un algorithme de squelettisation*. Pour limiter l'influence d'artefacts d'acquisition sur le modèle final, une surface de Bézier est utilisée. Pour les mêmes plantes, une autre méthode est proposée par Yun, Chen, et al. (2017) et est basée sur l'ajustement de surface polynomiale avec le Moving Least Square (MLS)*. Ensuite, une triangulation de Delaunay est associée pour transformer la surface en un maillage.

Un modèle de surface paramétrique est proposé par W. Wu et al. (2021) pour

les plants de thé (*Camellia sinensis*) de deux variétés différentes (*zhongcha 108* et *Maolv*). Une ACP* est utilisée pour obtenir un plan permettant d'ajuster les orientations et positions du nuage de points. Ensuite le nuage de points est divisé en différentes sections dont certaines sont sélectionnées pour générer un ensemble de points qui serviront à ajuster une B-Spline. Après cet ajustement, la B-Spline est transformée en NURBS* par une minimisation de l'erreur d'ajustement avec l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire*.

Pour permettre de prendre en compte les topologies complexes des feuilles comme les rotations ou les courbures (par exemple le blé), Daryl M Kempthorne et al. (2014a) propose un algorithme qui fait pivoter et translater les points du nuage. La méthode d'ajustement utilisant le lissage discret des D^2 -splines est ensuite utilisée dans ce nouvel espace. La surface est ensuite représentée par des formes linéaires compactes avec la méthode des éléments finis*.

D'autres types de splines sont utilisées par Whebell et al. (2021) sur des feuilles de plants de tomates et piments. Pour gérer le bruit dans les données, des splines polyharmoniques sont utilisées puis les nouveaux points sont interpolés.

Pour les feuilles de soja et de betterave, Ando et al. (2021) développent une méthode de reconstruction prenant en compte des connaissances a priori sur leurs géométries. L'objectif est de déterminer deux composantes d'une feuille : sa forme générale et sa déformation.

Il est intéressant de noter qu'il existe des méthodes d'estimation de l'aire de feuille ne demandant pas de passer par la reconstruction d'une surface. Masuda (2021) propose de compter le nombre de points autour d'une tige et de déduire de ce nombre et de la densité de points dans le nuage de points l'aire des feuilles du plant de tomate étudié. Cependant, son erreur relative est d'environ 20%. On ne considère donc pas ce genre d'approche par estimation, d'autant plus que l'on ne requiert aucune garantie sur la distribution des points dans le nuage.

3.2.3 Choix des méthodes de reconstruction de surface pour l'étude

Dans l'introduction de ce chapitre ont été présentés l'ensemble des objectifs de l'étude. Les méthodes se basant sur des connaissances a priori sont écartées, car les modèles ne sont adaptés qu'à une seule morphologie de feuille. Elles ne permettent pas de traiter l'ensemble des cas de formes de feuille. La plupart des autres méthodes sont éliminées car il est impossible de trouver une implémentation en libre accès. Dans le cas de la méthode de Poisson, elle est écartée. Car elle reconstruit la surface d'un volume fermé qui ne correspond pas à la géométrie plane des feuilles (voir

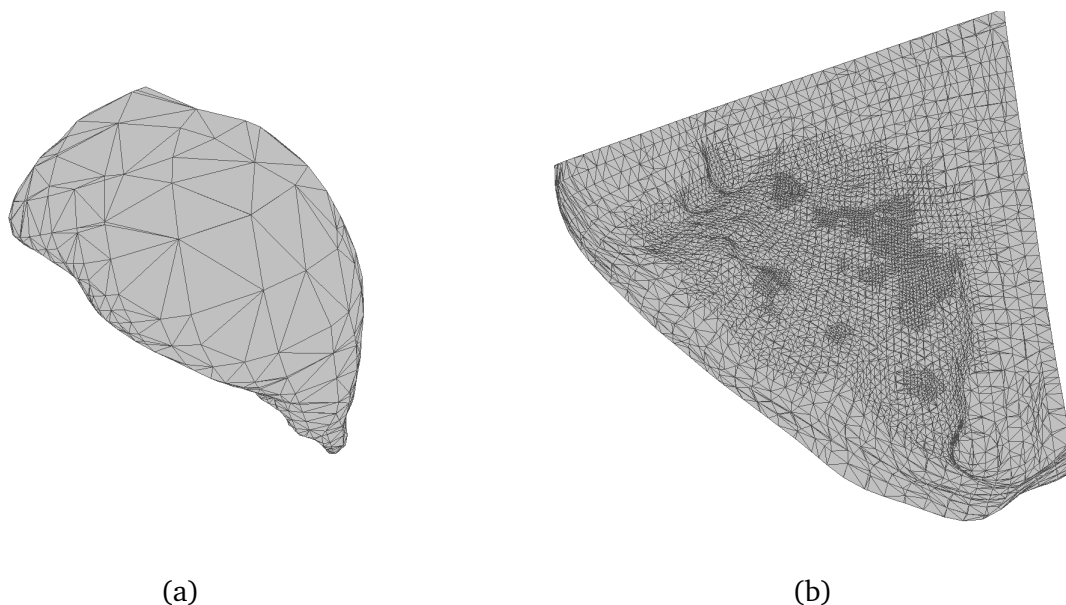


Fig. 3.3.: Illustration des reconstructions obtenues respectivement avec l'algorithme de Poisson (Kazhdan, Bolitho, et al., 2006) et (b) l'algorithme de reconstruction de Poisson écrantée (Kazhdan and Hoppe, 2013) sans étape d'élagage sur un nuage de points du jeu de données du bouleau (présenté dans la section 3.5.1). (a) Création d'un maillage volumique avec la reconstruction de Poisson. (b) Création d'une surface ouverte continue avec la reconstruction de Poisson écrantée.

figure 3.3). En revanche, sa version écrantée donne des résultats cohérents avec la réalité.

Au final voici la liste des méthodes retenues pour notre étude comparative :

- Triangulation 2.5D
- Alpha-Shape
- Algorithme du BPA (Ball-pivoting)
- Reconstruction incrémentale
- B-Spline
- Modèle de feuille de Bézier (BLM) (méthode implémentée car le code n'est disponible en accès libre)
- Bézier élagué (méthode proposée)
- Poisson écranté

Elles sont présentées en détail dans la section 3.3.

3.3 Méthodes de reconstruction de surface

Dans cette section, les méthodes de reconstruction de surface choisies pour l'étude sont présentées en détail. Pour chacune d'entre elles, leurs fonctionnements et leurs paramètres sont présentés. Ces méthodes ont été choisies pour plusieurs raisons. La première est leur utilisation dans des articles de l'état de l'art pour la reconstruction de surface à partir de nuage de points 3D, que ce soit des feuilles ou d'autres types d'objets, et en second leur accessibilité. Concernant Poisson, en plus de son accessibilité, il s'agit d'une méthode de reconstruction de surface de référence. Pour les méthodes basées sur les courbes de Bézier, elles ont été choisies, car cette famille de méthodes est aussi très utilisée dans les problématiques de reconstruction de maillages. De plus, il existait dans l'état de l'art une méthode de modélisation de feuille par des courbes de Bézier (Chaurasia and Beardsley, 2017). C'est pourquoi ce sont les seules méthodes que l'on a codées entièrement et dont le code va être mis à disposition en ligne.

On cherche à fournir ici un guide pour les utilisateurs finaux (physiologistes des plantes, agronomes, etc.). On se placera donc exclusivement dans la problématique d'obtention de la mesure de l'aire de la feuille. On rappelle que les contraintes de l'étude guidant le choix de ces méthodes sont leur accessibilité, leur utilisation et la possibilité d'automatiser les traitements.

3.3.1 Reconstruction de maillage

Quatre méthodes de reconstruction de maillage ont été sélectionnées, car elles ont déjà été appliquées à la reconstruction de feuilles (voir section 3.2.2).

Triangulation 2.5D

En considérant qu'une feuille est un objet de dimension 2 (c'est-à-dire n'ayant aucune épaisseur), l'approche la plus simple pour reconstruire sa surface est de trianguler les projections de ses points dans un plan. Puis la structure du maillage dans le plan est appliquée dans l'espace 3D du nuage de points initial (Hétroy-Wheeler et al., 2016) (voir figure 3.4). Ce processus, parfois appelé *triangulation 2.5D*, utilise la méthode d'ajustement d'un plan par les moindres carrés (Best fit plane least square)* pour trouver le plan de projection puis utilise la triangulation de Delaunay 2D dans ce plan. L'implémentation de CloudCompare a été utilisée pour obtenir les résultats (CloudCompare (version 2.11.0) 2020). Cette implémentation met à disposition une

étape de post-traitement consistant à filtrer les arêtes de longueur supérieure à un seuil. Ce seuil est le seul paramètre de la méthode et est désactivé par défaut (noté 0 dans la suite de la thèse).

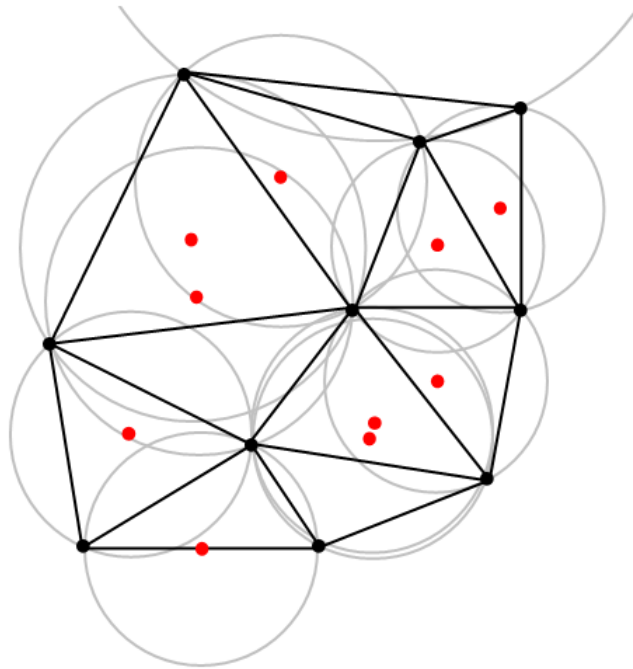


Fig. 3.4.: Illustration de la triangulation de Delaunay (en noir) et cercles circonscrits (en gris) avec leurs centres (en rouge).

L'analyse de sensibilité a montré que désactiver le post-traitement permettait d'obtenir les meilleurs résultats dans la plupart des cas (voir section pour plus de détails 3.4.4). Sur la figure 3.5, on peut voir quelques exemples de maillages reconstruits avec la méthode Triangulation 2.5D.

Alpha-Shape

La frontière de la triangulation de Delaunay $2D^*$ est l'ensemble du nuage de points. C'est du coup une assez mauvaise approximation pour les objets non convexes. En tant que sous-ensemble de la triangulation de Delaunay, les alpha-shapes sont plus adaptés au maillage des objets concaves. L'algorithme n'a qu'un seul paramètre α supérieur ou égal à 0. Ce paramètre restreint l'ensemble des triangles valides et permet donc d'obtenir des reconstructions non convexes. Quand $\alpha = +\infty$ la reconstruction est l'enveloppe convexe du nuage de points. Quand $\alpha = 0$, la reconstruction dégénère vers l'ensemble des points du nuage. L'Alpha-shape a été utilisé en 2 dimensions pour estimer la surface de feuilles de plantes (Michael P. Pound et al. (2016)). Elle a aussi été utilisée en 3 dimensions dans Chaudhury et al. (2019).

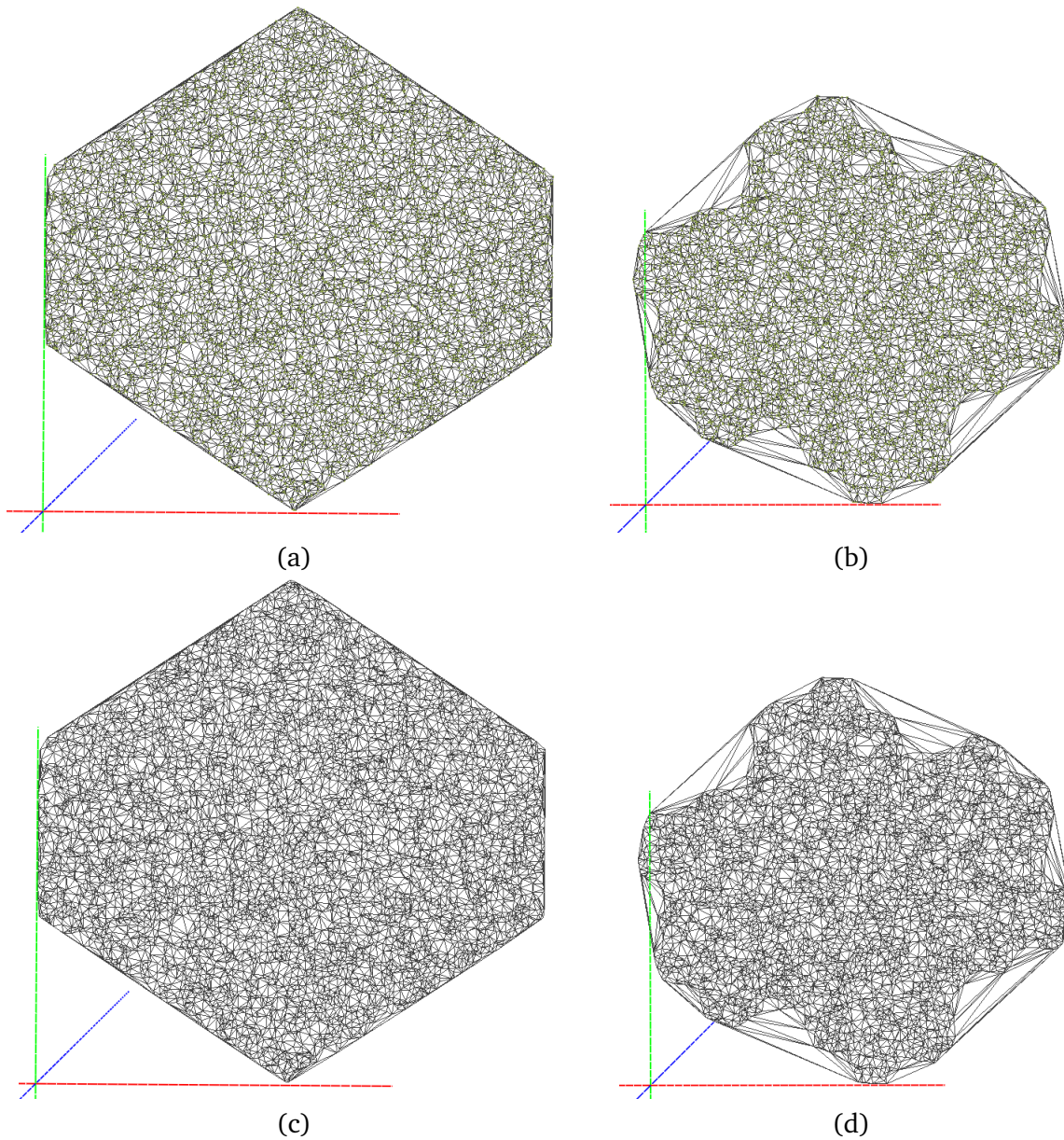


Fig. 3.5.: Résultats de reconstruction avec l'algorithme de Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction Triangulation 2.5D et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{D} = 75000 \text{ points}/m^2$. (b) Reconstruction Triangulation 2.5D et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{Co} = 2$. (c) Reconstruction Triangulation 2.5D obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{D} = 75000 \text{ points}/m^2$. (d) Reconstruction Triangulation 2.5D obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{Co} = 2$.

Hoppe et al. (1992) et Edelsbrunner and Mücke (1994b) définissent l'algorithme Alpha-Shape en 3 dimensions de la manière suivante :

Algorithme 1 Algorithme Alpha-Shape

Require: $0 < \alpha < \infty$

\mathcal{P} nuage de points

Définir α -ball : boules ouvertes de rayon α

for all p_k point de \mathcal{P} **do**

Créer du sommet V_k dans le maillage

if

$\exists V_j \in \mathcal{P}$

tel que V_k et V_j soit sur la frontière de l' α -ball et qu' α -ball soit vide **then**

Créer l'arête reliant V_j et V_k

else

Passer au point suivant

end if

end for

Cependant l'implémentation de l'algorithme ne supporte pas les nuages de points plans. Les données synthétiques particulières non planes utilisée dans notre étude sont présentées dans la section 2.4.2. Avec cet algorithme la reconstruction est un maillage hermétique qui a donc une épaisseur, car c'est la frontière d'un volume (même si l'épaisseur peut être très petite). On considère le maillage comme ayant une épaisseur fine négligeable et on approxime la surface de la feuille par la moitié de la surface de la forme 3D. Cette approximation n'est pas toujours vraie par exemple dans les cas de fortes courbures (voir figure 3.6).

Les Alpha-Shapes sont implémentées dans Meshlab (Cignoni et al., 2008) et dans la bibliothèque Open3D Zhou et al. (2018). Dans nos tests on utilise les alpha-shapes implémentés dans la bibliothèque Open3D. La valeur optimale de α dépend de la densité du nuage de points et de la taille de sa caractéristique géométrique la plus fine. On suppose que la caractéristique la plus fine est suffisamment échantillonnée, c'est-à-dire que le nuage de points est assez dense. J'ai développé une méthode automatique d'optimisation du choix de la valeur α pour nos nuages de points basée sur les statistiques de la distance au plus proche voisin. Deux statistiques sont utilisées indépendamment : la médiane et le premier décile. Les méthodes correspondantes sont nommées respectivement **Alpha-Shape Médian** et **Alpha-Shape Décile**. Nos tests ont montré que la méthode **Alpha-Shape Médian** donnait des résultats légèrement meilleurs que **Alpha-shape Décile** (voir section 3.4.4).

Il est à noter que l'algorithme de génération d'alpha-shapes telles qu'implémentées dans Open3D échoue sur certains nuages de points pour des problèmes de tétraédrisa-

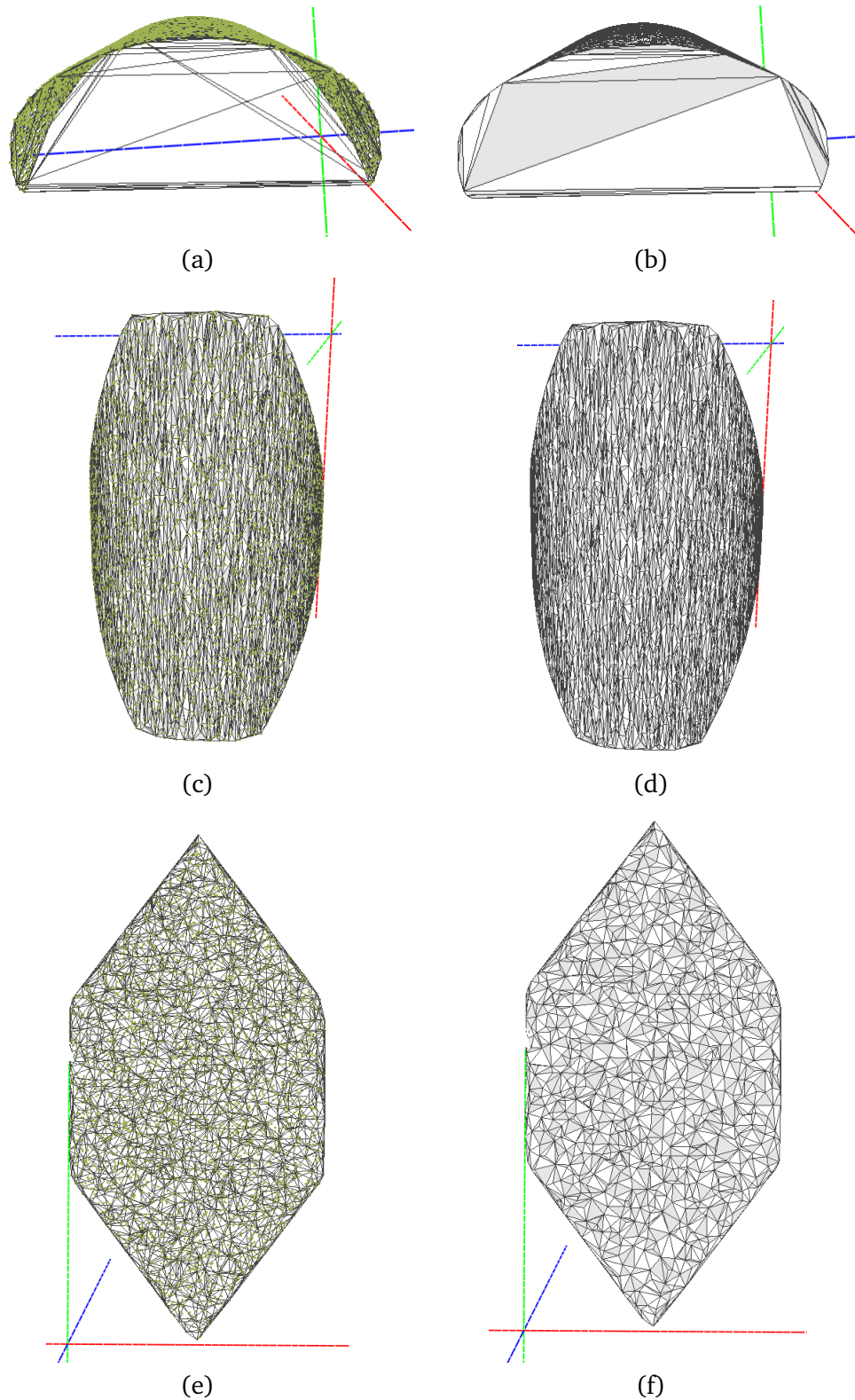


Fig. 3.6.: Résultats de reconstruction avec l'algorithme de l'Alpha-Shape. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction Alpha-Shape et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{Cu} = 180^\circ$ (a) vue arrière, (c) vue du dessus. Reconstruction Alpha-Shape obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{Cu} = 180^\circ$ (b) vue arrière, (d) vue du dessus. Reconstruction Alpha-Shape et nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{R} = 2$ (a) avec le nuage de points d'entrée (vert), (b) sans le nuage de points d'entrée.

Algorithme 2 Alpha-shape automatisé

Require: \mathcal{P} nuage de points

Poser mc_α paramètre de l'algorithme automatisé

for all p in \mathcal{P} **do**

 Trouver q in \mathcal{P} plus proche voisin de p

 Calculer la distance euclidienne de q à p

end for

Calculer σ , la médiane (ou le décile) des distances obtenues précédemment

Multiplier mc_α par σ pour obtenir α

Effectuer l'algorithme alpha-shape sur \mathcal{P} avec le paramètre α

tion* connus, mais non modifiables. Par ailleurs, une autre méthode d'automatisation a été testée, basée sur la diagonale de la boîte englobante, mais les résultats étaient très mauvais. Cette méthode est détaillée dans la section 3.4.4. C'est pourquoi pour la suite de l'étude seuls les résultats de la version **Alpha-shape Médian** sont utilisés. On définit un unique paramètre mc_α pour notre étude de sensibilité qui est la médiane de la distance des points à leur plus proche voisin. Mon analyse de sensibilité a montré qu'il existe deux valeurs optimales pour le paramètre (pour plus de détails, voir la section 3.4.4). Si les données ont des concavités alors $mc_{\alpha 1} = 1$ est la meilleure valeur. Dans les autres cas, $mc_{\alpha 2} = 15$ donne des résultats optimaux. Dans l'article de Chaudhury et al. (2019) la valeur $\alpha = 0.6$ était choisie empiriquement, ce qui a du sens, car l'étude se concentre sur une seule plante dont le nuage de points numérisé est très bien défini et sans artefacts d'acquisition.

Algorithme du Ball-Pivoting (BPA)

L'algorithme BPA (littéralement en français, algorithme de pivot de boule) est un algorithme classique de reconstruction de maillage 3D (Bernardini et al., 1999). Le maillage de sortie de cette méthode est un sous-ensemble de l'Alpha-shape représentant un maillage d'une surface issue de l'interpolation du nuage de points d'entrée. En démarrant d'un triangle graine, l'algorithme construit par itération le maillage en faisant pivoter une boule autour des arêtes frontières du maillage jusqu'à ce que la boule rentre en contact avec un point. Avec ce point il crée un nouveau triangle avec l'arête. Le paramètre du BPA est le rayon de la boule ρ (voir figure 3.7). Cet algorithme est implémenté dans le logiciel Meshlab et dans la bibliothèque Open3D. J'ai choisi d'utiliser l'implémentation de Meshlab car elle propose une version améliorée qui produit des maillages plus consistants que la stricte version implémentée dans Open3D. Cette version a 2 autres paramètres. Le premier est un rayon de cluster cr exprimé en pourcentage de ρ et le deuxième est un seuil θ sur les angles des triangles exprimés en degrés.

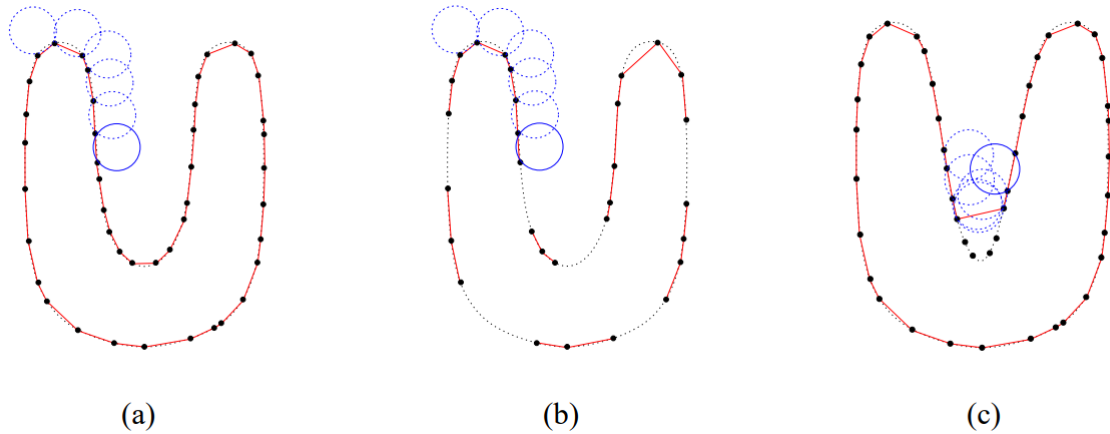


Fig. 3.7.: Illustration du fonctionnement de l'algorithme BPA en deux dimensions. (a) cercle de rayon ρ pivote de point en point, les connectant avec des arêtes. (b) Lorsque la densité de l'échantillonnage est trop basse, des trous sont créés parce que des arêtes ne sont pas formées. (c) Lorsque la courbure est trop forte et est plus grande que $\frac{1}{\rho}$, certains points ne peuvent pas être atteints par la boule pivot et des caractéristiques sont alors manquantes dans la reconstruction (Bernardini et al., 1999).

Algorithme 3 Algorithme BPA de Meshlab

Require: $0 \leq \rho$ rayon de la boule pivotante

if $\rho = 0$ **then**

Procédure automatique de choix de ρ basée sur la taille de la boîte englobante

else

Garder la valeur de ρ d'entrée

end if

Require: $0 \leq cr \leq 100$ rayon de cluster

Require: $0 \leq \theta \leq 360$ seuil sur les angles en degré

Require: \mathcal{P} nuage de points

Trouver un triangle graine dans \mathcal{P} tel que l'intérieur est vide

Tourner la boule de rayon ρ autour des arêtes frontière des maillages

if La balle rentre en contact avec un point **then**

if si l'angle du triangle est inférieur au seuil θ **then**

Créer un nouveau triangle avec ce point

if la distance entre le nouveau sommet et le précédent est inférieur à cr **then**

Fusionner les 2 triangles

else

Garder le nouveau triangle tel quel

end if

else

Ne pas créer de nouveau triangle et arrêter le pivot de la boule

end if

else

Changer de triangle graine

end if

Jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de points à considérer

La méthode d'optimisation automatique proposée par Meshlab pour le choix ρ s'appelle l'auto-guess ou estimation automatique. C'est le centième de la longueur de la diagonale de la boîte englobante du nuage de points. Pour plus de détails sur le choix des paramètres et l'analyse de sensibilité, se référer à la section 3.4.4.

Il est à noter que l'algorithme BPA est souvent utilisé plusieurs fois de suite dans la littérature afin de capturer des détails de tailles différentes et accommoder des densités de points différentes. Dans notre cas, nous nous sommes limités à une seule passe dans un cadre d'automatisation de la chaîne de traitement. La sortie de l'algorithme BPA est certes toujours une surface 2-variété mais elle peut créer des épaisseurs doubles ou triples à certains endroits en cas de problème d'alignement du nuage de points ou de bruit trop élevé (voir figure 3.8).

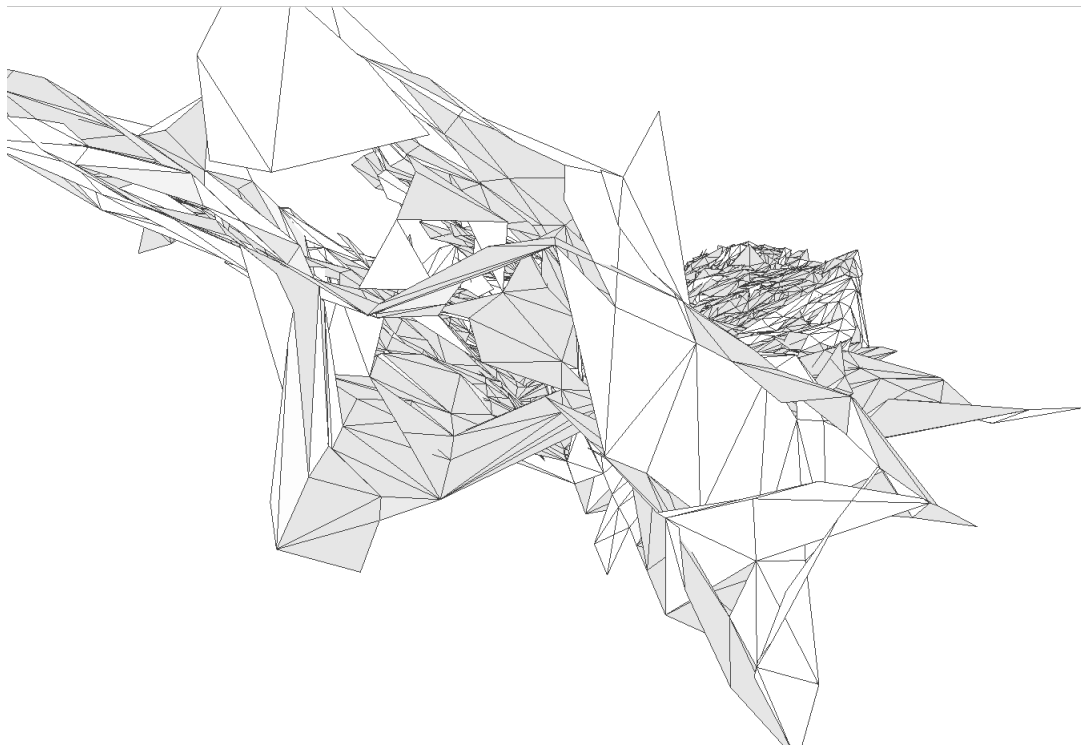


Fig. 3.8.: Reconstruction avec de multiples épaisseurs obtenues l'algorithme BPA à partir d'un nuage de point du jeu de donnée de maïs acquis par le LiDAR. La vue est rapprochée dans le sens de la longueur de la feuille.

Reconstruction incrémentale

Développée pour des applications de robotique, une méthode de reconstruction incrémentale de maillage est décrite dans Marton et al. (2009). La méthode est conçue pour être rapide et robuste au bruit. À cette fin, c'est une méthode incrémentale qui ré-échantillonne le nuage de points. Par conséquent, il n'y a pas de contraintes de fermeture de la surface ou d'interpolation des données. Cet algorithme est implémenté dans la bibliothèque PCL Rusu et al. (2007) et a été utilisée par D. Li, Cao,

et al. (2019) pour l'estimation de l'air de la feuille après un sous-échantillonnage et un lissage des nuages de points d'entrée. Cet algorithme a sept paramètres. Le plus impactant est le ratio μ de la distance d'un point à son plus proche voisin. On le place à $\mu = 5$ pour les tests comme ce qui est recommandé dans la publication originale et les autres paramètres à leurs valeurs par défaut. La méthode est une modification de la méthode proposée par Gopi and Krishnan (2002) afin de la rendre plus robuste au bruit et plus générique (pas d'hypothèse de densité locale ou de surface lisse globale). La gestion des formes anguleuses est alors possible. Pour plus de détails sur l'analyse de sensibilité, se référer à la section 3.4.4.

Des illustrations de résultat de reconstruction de surface obtenues avec cet algorithme sont disponibles dans la figure 3.9).

Algorithme 4 Reconstruction incrémentale

Require: $\mu > 0$

Require: k nombre de voisins à considérer

Require: \mathcal{P} nuage de points

Choisir un triangle graine

while $p \in \mathcal{P}$ libre **do**

Sélectionner les k plus proches voisins de p dans une sphère de rayon $r = \mu d_0$ avec d_0 distance entre p et son plus proche voisin.

Projeter le voisinage sur le plan approximativement tangentiel à la surface du voisinage obtenue par WLS plane.

Trier les petits triangles.

Utiliser l'algorithme robuste MLS pour générer un échantillonnage localement uniforme (Rusu et al., 2007) quand la variation de densité dans le nuage de points est trop forte.

Créer les points pour remplir les trous d'après la densité moyenne de points spécifiée par l'utilisateur à une courbure donnée. Inférer linéairement pour les autres valeurs de courbure (J. Wang and Oliveira, 2003).

Ordonner les points voisins projetés autour de p selon la valeur de $\sin^2\theta$, θ étant l'angle du point de voisinage considéré dans le repère centré en p dans le plan de projection par rapport à un axe x arbitraire.

Filtrer les points selon des critères de visibilité et d'angles (paramètres angles min et max)

Trianguler dans l'ordre les points restant du voisinage avec p

end while

3.3.2 Modèles paramétriques

Différentes familles de surfaces paramétriques ont été utilisées pour approcher les formes des feuilles. Généralement, les modèles proposés sont flexibles et s'adaptent très bien aux variations morphologiques des feuilles de plantes. Dans notre étude, nous disposons uniquement des nuages de points 3D. C'est pourquoi les méthodes demandant l'apport d'autres informations ou des connaissances a priori comme la

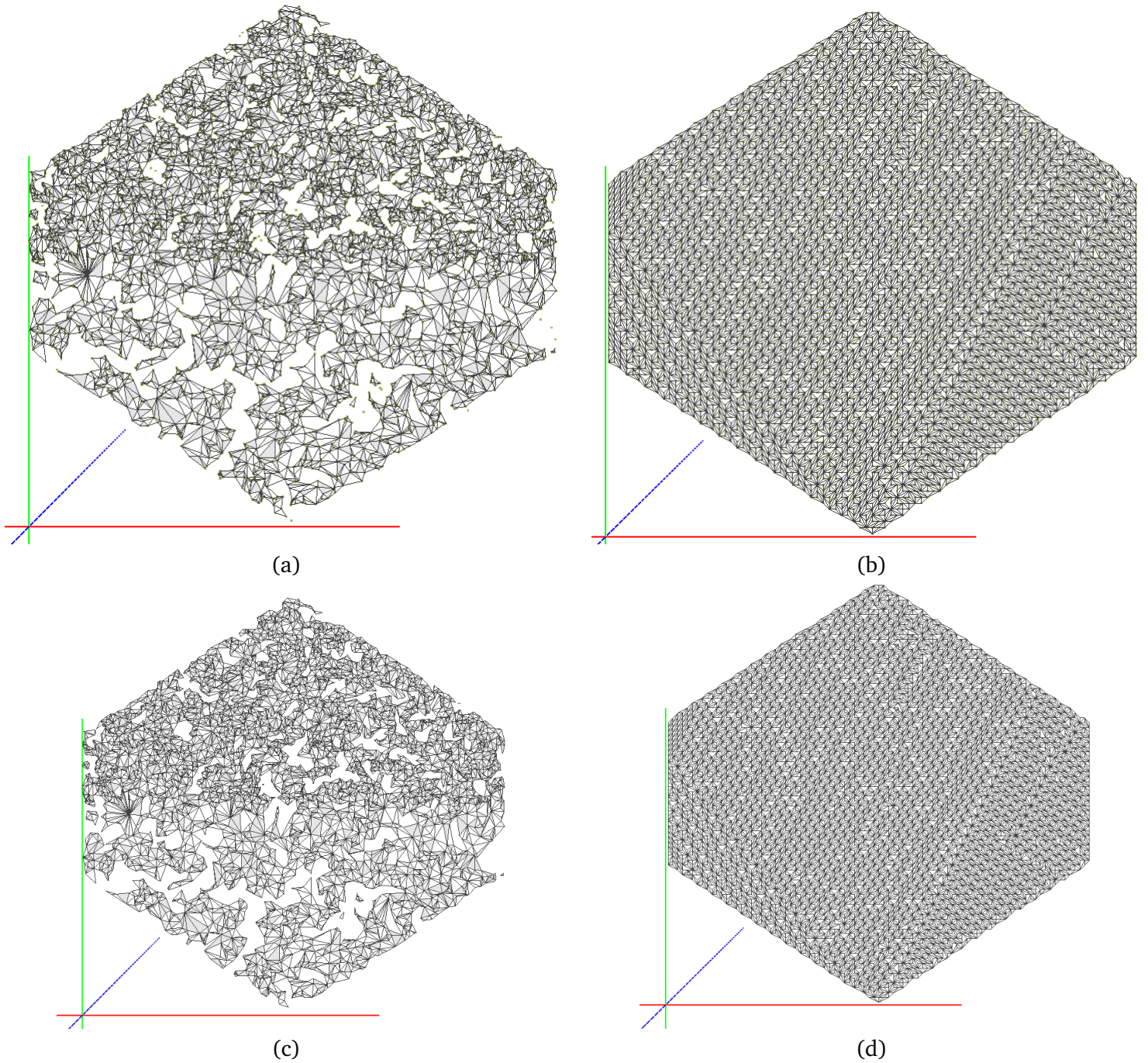


Fig. 3.9.: Résultats de reconstruction avec l'algorithme de Reconstruction incrémentale. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $DNU = 2.5$. (b) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $S.p$ est régulier. (c) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $DNU = 2.5$. (d) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tels que $S.p$ est régulier.

veine centrale ou les veines des feuilles (H. Wang et al., 2009) sont écartées. On dispose donc de deux modèles principaux, les B-Splines et les surfaces de Bézier.

B-Spline

Dans l'étude de Dupuis et al. (2016), les auteurs comparent les performances d'estimation de l'aire de la surface d'une feuille entre des surfaces B-Splines et des modèles de maillages. Ils définissent d'abord une grille régulière 2D en utilisant les axes principaux du nuage de points. Puis ils définissent les nœuds de la B-spline grâce à ces axes. La B-Spline est alors élaguée en utilisant la frontière de l'Alpha-Shape de la forme. Récemment Harmening and Paffenholz (2021) ont proposé une méthode de B-Spline alternative pour calculer l'aire d'une feuille. Cette méthode repose sur le calcul précis de la courbe frontière autour du nuage de points de la feuille. L'approche proposée par Mörwald et al. (2016) est plus intéressante pour deux raisons principales. Tout d'abord, cette approche est disponible et accessible, car elle est implémentée dans la PCL. Ensuite, cette méthode supporte la concavité en utilisant une méthode d'élagage robuste basée sur une B-Spline fermée. Cette approche requiert l'utilisation de 19 paramètres. Cependant, comme remarqué par Mörwald et al. (2016), l'utilisation des valeurs par défaut suffit pour obtenir la plupart du temps un résultat probant. Ces valeurs sont donc utilisées sauf pour l'ordre de la B-Spline o , le raffinement rf , le nombre d'itérations i et la résolution du maillage rs qui sont respectivement fixées à 3, 3, 5, 64. En effet le paramètre de raffinement a un très grand impact sur le temps de calcul 3.1. Il s'agit de trouver le compromis entre le temps de calcul et la précision globale finale du maillage. Cette valeur est choisie après une analyse de sensibilité présentée dans la section 3.4.4.

Nombre de points \ Raffinement	2	3	4	5
1000	3	5	60	4185
5000	10	19	171	5804
10000	22	39	318	7716

Tab. 3.1.: Temps d'exécution (s) pour 10 nuages de points avec la méthode de reconstruction de surface B-Spline. Les paramètres d'exécutions sont les valeurs par défaut et $o = 3$, $i = 5$ et $rs = 64$.

On peut voir dans la figure 3.10 des exemples de maillages résultats issus de la méthode.

L'étape d'initialisation est le processus d'ajout des premiers points de contrôle de la B-Spline. Le cercle circonscrit au nuage de points est déterminé et 4 points sont disposés à $\frac{\pi}{4}$ d'intervalle. L'étape de terminaison est la vérification en fin de boucle de la condition de fin d'exécution, ici si le changement incrémental avec les points de contrôle descend sous le seuil configuré. La paramétrisation correspond à la transposition dans le repère local au point étudié des données et paramètres de

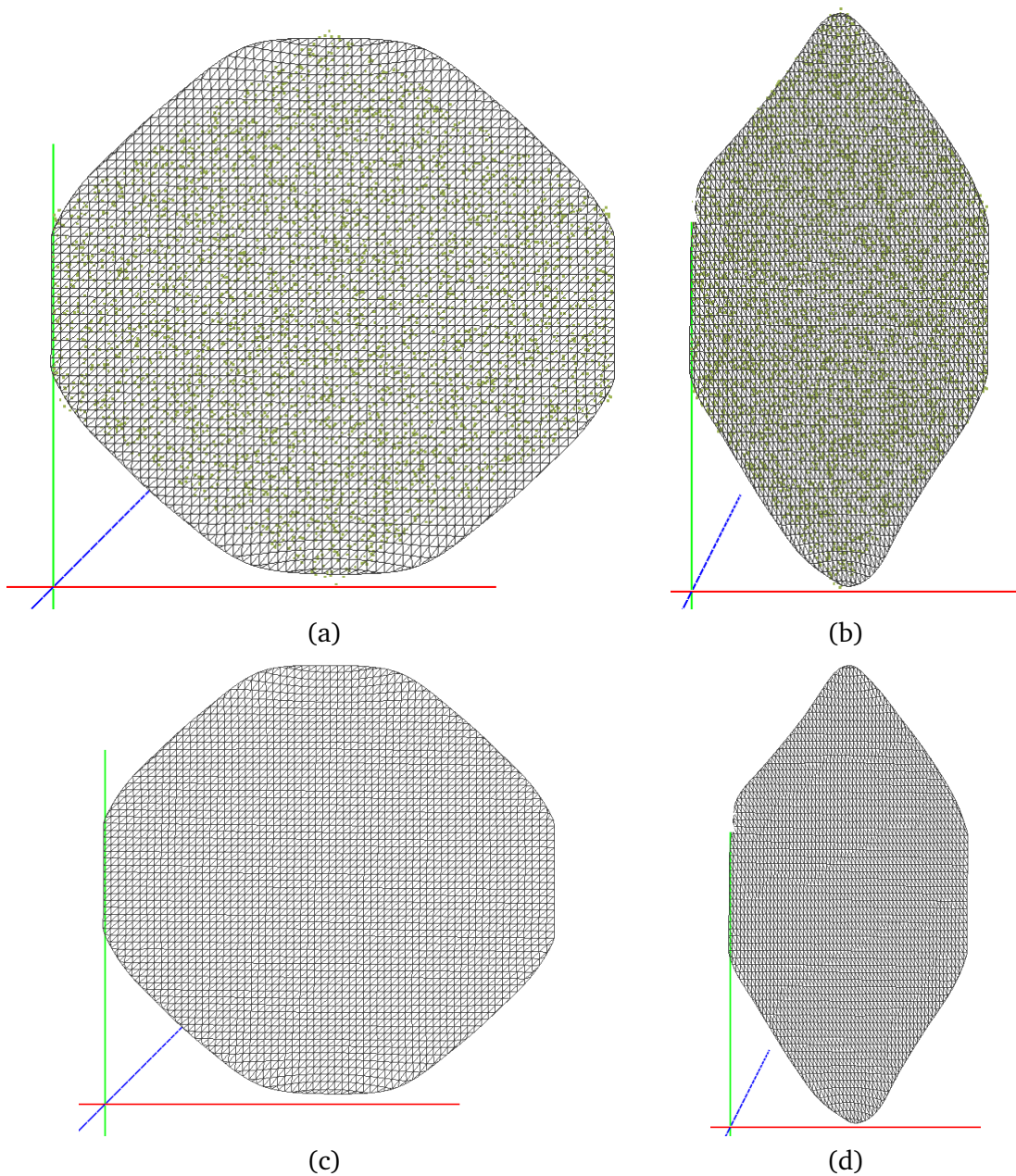


Fig. 3.10.: Résultats de reconstruction avec la méthode B-Spline. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $D = 4000 \text{ points}/m^2$. (b) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $R = 2$. (c) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $D = 4000 \text{ points}/m^2$. (d) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $R = 2$.

Algorithme 5 Algorithme B-Spline d'après Mörwald et al. (2016)

Require: \mathcal{P} nuage de points

Initialisation

▷ Terminaison

while non *terminé* **do**

for all p_i point de \mathcal{P}

▷ Paramétrisation

do

 Trouver le footpoint pour p_i avec la méthode de Newton*

end for

for all ξ_k point médian des ξ

▷ CF

do

 Trouver le point $p_{c,k}^*$ le plus proche de $c(\bar{\xi}_k)$

end for

$\min_{b_j} f(b_j)$

▷ équation de Gauss

for all ξ_k point médian des ξ

▷ EAKI

do

 Trouver le point p_i le plus proche de $c(\bar{\xi}_k)$

if $\|p_i - c(\bar{\xi}_k)\|^2 > \epsilon_a$ **then**

 Insérer un nouveau nœud contrôle à $\bar{\xi}_k$

end if

end for

end while

l'exécution. Le footpoint est le point le plus proche du point considéré dans la boucle en cours d'exécution au sens de la méthode de Newton. L'étape CF correspond à l'étape de remplissage de concavités (Concavity Filling dans l'article) qui permet à la courbe ajustée de ne pas être attirée par le point plus proche dans le cas où la densité de points dans la zone de support est très grande. C'est un mécanisme de gestion des bordures bruitées. L'équation de Gauss correspond à la solution du problème des moindres carrés original d'ajustement de la courbe. EAKI (Error adaptative Knot Insertion) est un mécanisme introduit par Mörwald et al. (2016) qui permet d'introduire des nœuds de contrôle de façon plus adaptée. Le mécanisme permet d'introduire des nœuds de contrôle dans les zones où l'erreur est au-dessus du seuil spécifié par l'utilisateur.

Modèle de feuille de Bézier

Un modèle paramétrique de feuille a été proposé par Chaurasia and Beardsley (2017) et est basé sur les surfaces de Bézier. Dans ce modèle, une feuille est représentée par trois surfaces de Bézier dérivée des trois composantes principales d'une feuille : la veine centrale, la silhouette droite et la silhouette gauche. Le modèle utilise des courbes de Bézier du 3e degré pour l'ensemble de la structure de la surface sauf pour la veine centrale qui est au 4e degré. Il y a en plus quatre courbes de Bézier

additionnelles qui décrivent la partie intérieure de la feuille. Étant donné les courbes des silhouettes et de la veine centrale, on peut construire une cartographie UV* sur laquelle les paramètres du modèle peuvent être optimisés, en incluant la veine centrale. (voir figure 3.11) La surface de Bézier résultant est ensuite échantillonnée de façon régulière puis maillée. Il n'existe pas à notre connaissance d'implémentation disponible publiquement de cette méthode, c'est pourquoi nous avons réalisé notre propre implémentation. Le paramètre principal de la méthode est le nombre de lignes de scan s défini comme le nombre d'intervalles réguliers de la veine centrale. Cette valeur est fixée à 50 après notre analyse de sensibilité présentée dans la section 3.4.4.

Cependant, le premier objectif de cette méthode est de capturer la forme réelle d'une feuille monolobe, pour ensuite l'utiliser dans des applications graphiques 3D, notamment artistiques. Ainsi une partie de l'intérêt du modèle et du processus est la manipulation en forme libre du modèle de feuille obtenu de façon intuitive par des paramètres ayant une signification sémantique forte. Dans le cadre de notre étude, on ne cherche qu'à étendre les applications potentielles de cette méthode de modélisation de feuilles à la mesure en 3D.

Algorithme 6 Algorithme de modèle de la feuille de Bézier

Require: \mathcal{P} nuage de points

Calculer l'ACP de \mathcal{P}

Projeter le nuage de points sur le plan principal donné par l'ACP

Obtenir la base et l'apex sur le nuage de points projeté et définir initialement l'axe central

Définir les vecteurs nœuds des silhouettes droite et gauche ainsi que les quatre courbes de Bézier longilignes intermédiaires F_{droite} , F_{gauche} , G_{droite} , G_{gauche} .

Faire une cartographie UV des points du nuage projetés normalisés

Minimiser la fonction objectif différence au carré du cartographie UV avec le modèle actuel de feuille par les courbes de Bézier

Il est à noter que dans notre implémentation, deux algorithmes de minimisation sont disponibles : la descente de gradient* et Levenberg-Marquardt*. Pour la suite de l'étude et l'ensemble des résultats, l'algorithme de minimisation utilisé est Levenberg-Marquardt. Plus de détails sur ce choix sont disponibles dans la section 3.4.4.

Bézier élagué

L'utilisation de courbes de Bézier pour modéliser la veine centrale et les silhouettes de la feuille (Chaurasia and Beardsley, 2017) correspond à l'observation botanique des feuilles réelles. Cependant, ce modèle spécifique introduit de la rigidité notamment à cause de la symétrie imposée par rapport à l'axe central. C'est pourquoi j'ai aussi considéré un modèle de surface de Bézier généraliste, afin de lever cette limitation

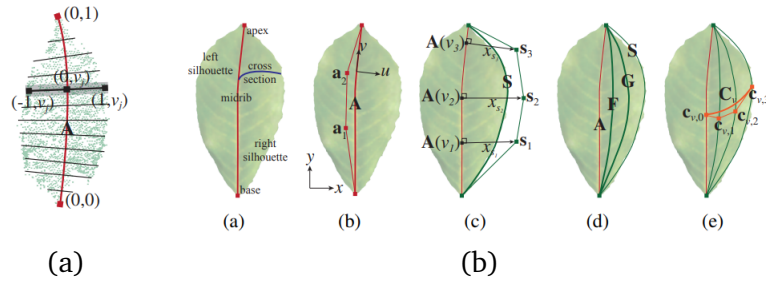


Fig. 3.11.: Schémas de positionnement des (a) lignes de scan et des (b) courbes de Bézier et points de contrôles et dans le modèle de feuille de Bézier (Chaurasia and Beardsley, 2017).

et de permettre des reconstructions qui correspondent plus précisément au nuage de points d'entrée. Dans cette méthode, on utilise d'abord une transformation affine pour projeter le nuage de point de la feuille dans le domaine 2D en utilisant l'ajustement d'un plan par les moindres carrés (Best fit plane lest square) où :

- le nuage de point transformé tient parfaitement dans la boîte englobante unitaire (de (0,0) à (1,1)) .
- la base et l'apex de la feuille sont fixés à (0.5,0) et (0.5,1) respectivement.

On considère ensuite cette projection comme une cartographie UV du nuage de points d'entrée. On utilise la méthode de l'approximation linéaire aux moindres carrés* pour obtenir la surface de Bézier adaptée.

Algorithme 7 Reconstruction de surface par Bézier

Require: \mathcal{P} nuage de points

ACP de \mathcal{P}

Transformer affinement le nuage de points sur le plan d'après les axes de la ACP

Fixer la base et l'apex dans le nuage de point

Faire une cartographie UV du nuage de points dans le plan

Initialiser les nœuds de contrôle de la surface de Bézier

Optimiser la surface de Bézier avec les moindres carrés linéaires

Mailler de la surface

Transformer de manière inverse pour revenir dans l'espace 3D

En tout dernier, il s'agit d'élaguer la surface. La surface de Bézier est seulement maillée dans l'intervalle $[u_{min}, u_{max}]$ dans chacune des n tranches du paramètre v .

La méthode proposée nécessite seulement 4 paramètres. dU et dV indiquent le degré de la surface de Bézier reconstruite.

Algorithme 8 Méthode d'élagage pour Bézier élagué

Require: \mathcal{P} nuage de points

Require: \mathcal{S} surface reconstruite à partir de \mathcal{P}

Require: cartographie UV du nuage de point dans un plan (c'est-à-dire celui calculé précédemment)

for all ligne de scan v **do**

 Déterminer u_{min} et u_{max}

 Refaire les maillages de la ligne v dans l'intervalle $[u_{min}, u_{max}]$

end for

Les paramètres $meshU$ et $meshV$ indiquent la résolution du maillage le long des axes respectivement u et v (le nombre de lignes de scan n est automatiquement fixé à $meshV$). Les valeurs choisies pour ces paramètres sont $dU = 2$, $dV = 4$, $meshU = 5$, $meshV = 40$. L'analyse de sensibilité de la méthode est détaillée dans la section 3.4.4. L'étape d'élagage est donc dépendante du nombre de lignes de scan, mise en paramètre. Ce paramètre dépend de la densité du nuage de points.

3.3.3 Modélisation implicite

La modélisation implicite a été appliquée avec succès aux nuages de points et constitue une des approches majeures de la reconstruction de surfaces (Hoppe et al. (1992); Kazhdan and Hoppe (2013); Kazhdan, Bolitho, et al. (2006); Morel et al. (2018)). Cette approche consiste en l'approximation d'un ensemble de points sur une surface implicite. Cette surface implicite est ensuite maillée afin d'approcher la surface échantillonnée.

Reconstruction de Poisson écrantée

Le problème de la reconstruction d'une surface implicite à partir d'un nuage de points avec des normales peut être formulé comme un problème de Poisson. Cette formulation a été proposée par Kazhdan, Bolitho, et al. (2006) pour reconstruire des surfaces hermétiques et a ensuite été étendue aux surfaces ouvertes (Kazhdan and Hoppe, 2013). Cette méthode est connue sous le nom de la reconstruction de Poisson écrantée et les auteurs fournissent le code ainsi que les exécutable avec des exemples d'utilisation. Le paramètre le plus important de l'algorithme est le paramètre d'élagage tt . D'après l'analyse de sensibilité (présentée dans la section 3.4.4), la profondeur de l'arbre est de $td = 8$, poids du point $pw = 4$, échelle de l'exposant $es = 3$ pour la pondération adaptative et la précision $acc = 0.001$. Cette méthode a été utilisée par Vázquez-Arellano et al. (2018) pour obtenir l'aire de la surface de feuilles de maïs. La sortie de l'algorithme de reconstruction de Poisson écrantée est un maillage avec une estimation locale de la densité de points associée à chaque sommet. Kazhdan and Hoppe (2013) ont donc recommandé d'élaguer en

fonction d'un seuil par rapport à cette valeur. L'analyse de sensibilité nous a menés à utiliser la moyenne de la densité locale sur le nuage de points comme valeur de seuil *tt*.

3.4 Analyse de sensibilité

L'objectif ici est de sélectionner pour chaque paramètre la meilleure valeur en termes de résultats globaux sur les aspects numériques (estimation de l'aire de la feuille), mais aussi géométriques et topologiques. Comme le traitement doit se faire de manière automatique, l'ensemble des données de tests est varié afin de prendre en compte les multiples cas de figure possibles. De cette façon, il ne sera pas nécessaire d'avoir des ensembles de données triées par caractéristiques ni même connaître celles-ci. J'ai donc généré un ensemble de données permettant de faire cette analyse 2.4. Il est important de tester les méthodes de façon à garantir une robustesse globale sur l'ensemble des valeurs de critères possible. Ces valeurs de critères possibles représentent deux choses distinctes. Les premières sont choisies pour modéliser les caractéristiques des nuages de points acquis. Les secondes sont choisies hors des valeurs réalistes et sont extrêmes. Ces dernières valeurs ont une double utilité. En effet, elles permettent de tester les limites des différents algorithmes de reconstruction de surface et aussi de tester l'influence profonde de chaque paramètre sur les surfaces reconstruites.

L'analyse de sensibilité est réalisée en deux étapes distinctes. D'abord, l'analyse est faite indépendamment par critère, ce qui nous permet d'obtenir des conclusions pour chaque critère. Dans un second temps, on considère pour les résultats finaux l'ensemble des critères en réutilisant les résultats moyennés par critère.

3.4.1 Paramètres testés

D'un point de vue quantitatif, l'analyse de sensibilité se fait avec l'ERM et l'ERAM. Ces moyennes sont calculées sur l'ensemble des fichiers attachés à un critère, ce qui me permet d'obtenir des conclusions en rapport à un critère uniquement et de trouver quels paramètres de reconstruction sont optimaux pour chaque critère. Je regarde ensuite la moyenne des moyennes par critère pour chaque ensemble de paramètres testés. Généralement, il y a concordance : les paramètres ayant les meilleures moyennes sur l'ensemble des critères sont aussi ceux qui sont les meilleurs sur le plus de critères pris de façon individuelle.

Je présente maintenant le protocole exact d'analyse de sensibilité suivant le nombre de paramètres d'une méthode de reconstruction de surface.

Méthodes avec un unique paramètre

Pour ces méthodes, l'optimisation des valeurs de l'unique paramètre est directe et ne demande pas plus de tests, même s'il s'agit d'un métaparamètre.

Méthodes avec plusieurs paramètres

Lorsqu'un paramètre est optimisé, il reste à savoir s'il est le plus critique en termes de sensibilité et s'il fonctionne bien avec les autres paramètres. L'étude se déroule comme suit :

1. Optimisation indépendante de chaque paramètre
2. Tests des paramètres optimaux simultanément
3. Comparaison des résultats des paramètres optimaux avec les paramètres par défaut et les meilleurs résultats de l'étape précédente d'optimisation indépendante
4. Conclusion sur l'importance de chaque paramètre et sélection de la combinaison de paramètres optimaux.

Dans le tableau 3.2, la liste des valeurs testées pour l'analyse de sensibilité pour chaque méthode et chaque paramètre est donnée.

3.4.2 Méthode de choix des paramètres optimaux

D'un point de vue qualitatif, est considérée comme une erreur toute surface non réaliste par rapport au nuage de points initial. Cette étude se place dans une problématique générale de mesure, mais la précision numérique ne suffit pas ici à garantir un résultat adéquat. En effet, une contrainte de réalisme et de robustesse géométrique est essentielle pour assurer la répétabilité de nos résultats et la précision des mesures sur de nouvelles données. Les résultats sont entièrement ignorés si les erreurs géométriques sont trop fréquentes pour l'ensemble de paramètres, même si cela ne concerne qu'un critère. Cette limite est posée à plus de la moitié des nuages de points d'un jeu de données de critère. Si les surfaces reconstruites ne sont pas satisfaisantes géométriquement ou topologiquement sur un nombre de fichiers supérieur à la limite décrite précédemment, l'ensemble du jeu de données est considéré comme un échec.

Outre l'aspect subjectif de cette notion d'échec pour les reconstructions (hors échec de création de maillage), les erreurs géométriques ou topologiques restent des notions

Méthode	Paramètres (unité)	Valeurs
Triangulation 2.5D	dmn	0 , 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 300, 400, 410, 420, 430, 440, 450, 460, 470, 480, 490, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000
Alpha-Shape Médian	mc_α	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15 , 20, 25, 30
BPA	ρ (% BBOX) cr (% ρ) θ (°)	0 , 0.5, 1, 3, 5 5, 10, 20, 50 50, 90, 120, 150, 180
Reconstruction incrémentale	μ (% BBOX) Radius (% BBOX) Nombre de points Angle de surface maximal (rad) Angle minimum (rad) Angle maximal (rad) Consistance des normales	1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5 0.1, 0.025 , 0.05, 0.1, 0.8, 1, 1.5 50, 100 , 150, 200, 300, 400, 500 $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{2}$, π , $\frac{5\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{2}$, 2π $\frac{\pi}{32}$, $\frac{\pi}{18}$, $\frac{\pi}{9}$, $\frac{\pi}{5}$ π , $\frac{2\pi}{3}$, 2π vrai, faux
B-Spline	o rf i rs	2, 3 , 4, 5 2, 3 , 5 5, 10, 15, 20 32, 64 , 128, 256
Modèle de feuille de Bézier	$meshU$ $meshV$ s	5 , 10, 20 20, 30, 40 , 20, 30, 40, 50
Bézier élagué	dU dV $meshU$ $meshV$	2 , 3, 4, 5, 6 2, 3, 4 , 5, 6 5, 10, 20 20, 30, 40
Poisson	td pw es acc (m) tt	4, 6, 8 , 10, 12, 14 1, 2, 4 , 5 1, 2, 3 0.00001, 0.0001, 0.001 , 0.01 5e, 10e, 15e, 20e, 25e, 50e , 75e, 80e, 85e, 90e, 95e (-percentile)

Tab. 3.2.: Valeurs testées dans l'analyse de sensibilité pour chaque paramètre de chaque méthode étudiée. Les valeurs en gras sont les valeurs optimales qui sont utilisées dans la suite de la thèse.

dépendantes de la méthode étudiée. En effet, si la surface résultat issue de l'Alpha-shape est un volume, elle ne sera pas considérée comme mauvaise géométriquement, car c'est le résultat attendu. Cependant, un volume sera considéré comme une erreur géométrique dans le cas de la méthode de Poisson par exemple, car on s'attend à une surface comme résultat de cette méthode (voir les figures 3.12 et 3.13).

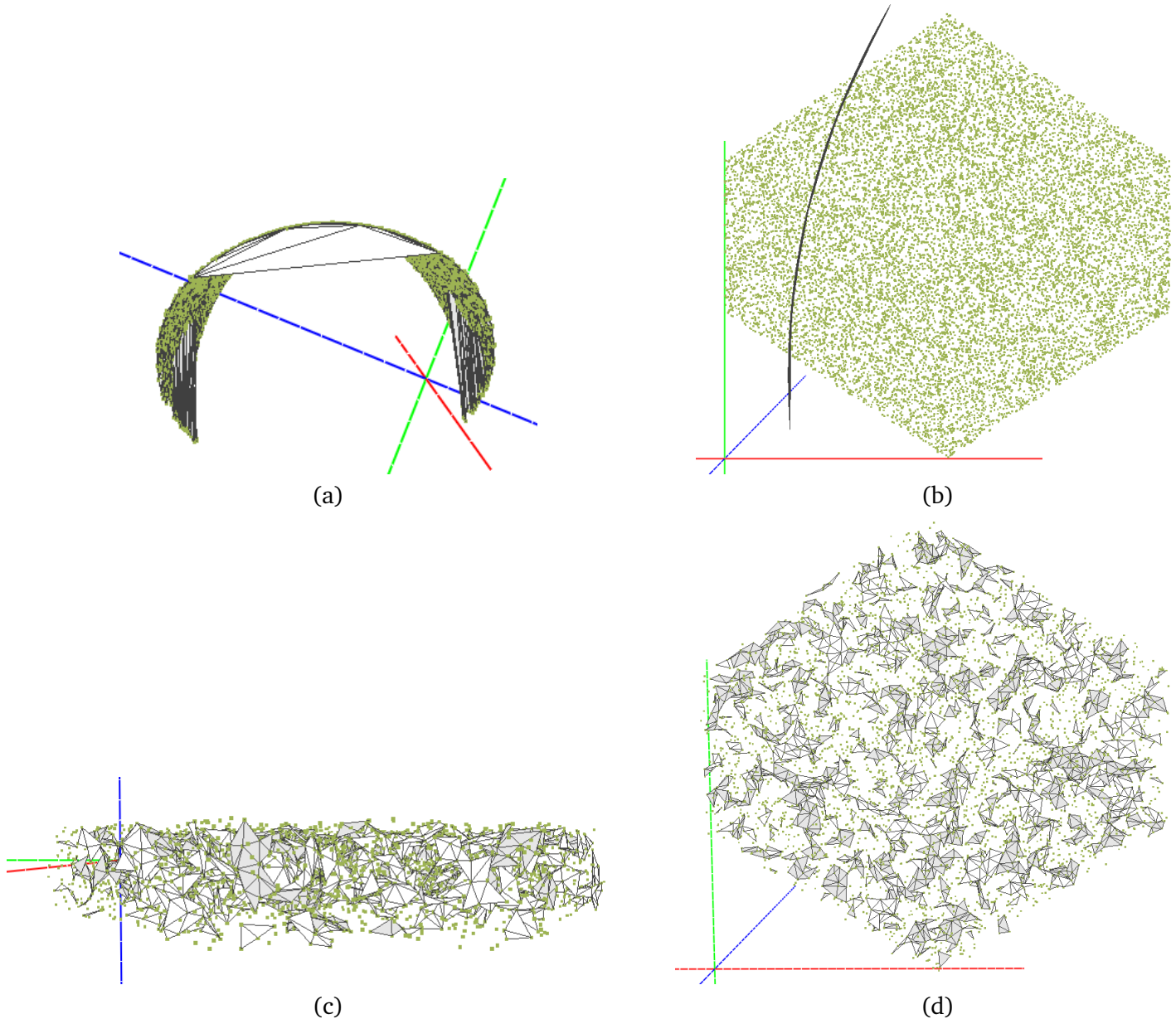


Fig. 3.12.: Quelques résultats présentant différents types d'échecs, de reconstruction de maillage ou de surface (Partie 1). Les points verts représentent le nuage de points d'entrée. (a) Triangulation 2.5D. (b) Bézier élagué. BPA (c) vue latérale, (d) vue du dessus.

D'un point de vue global, un maillage présentant une face dégénérée (face d'aire proche de 0) ou même une absence de résultat est systématiquement considéré comme un cas d'échec.

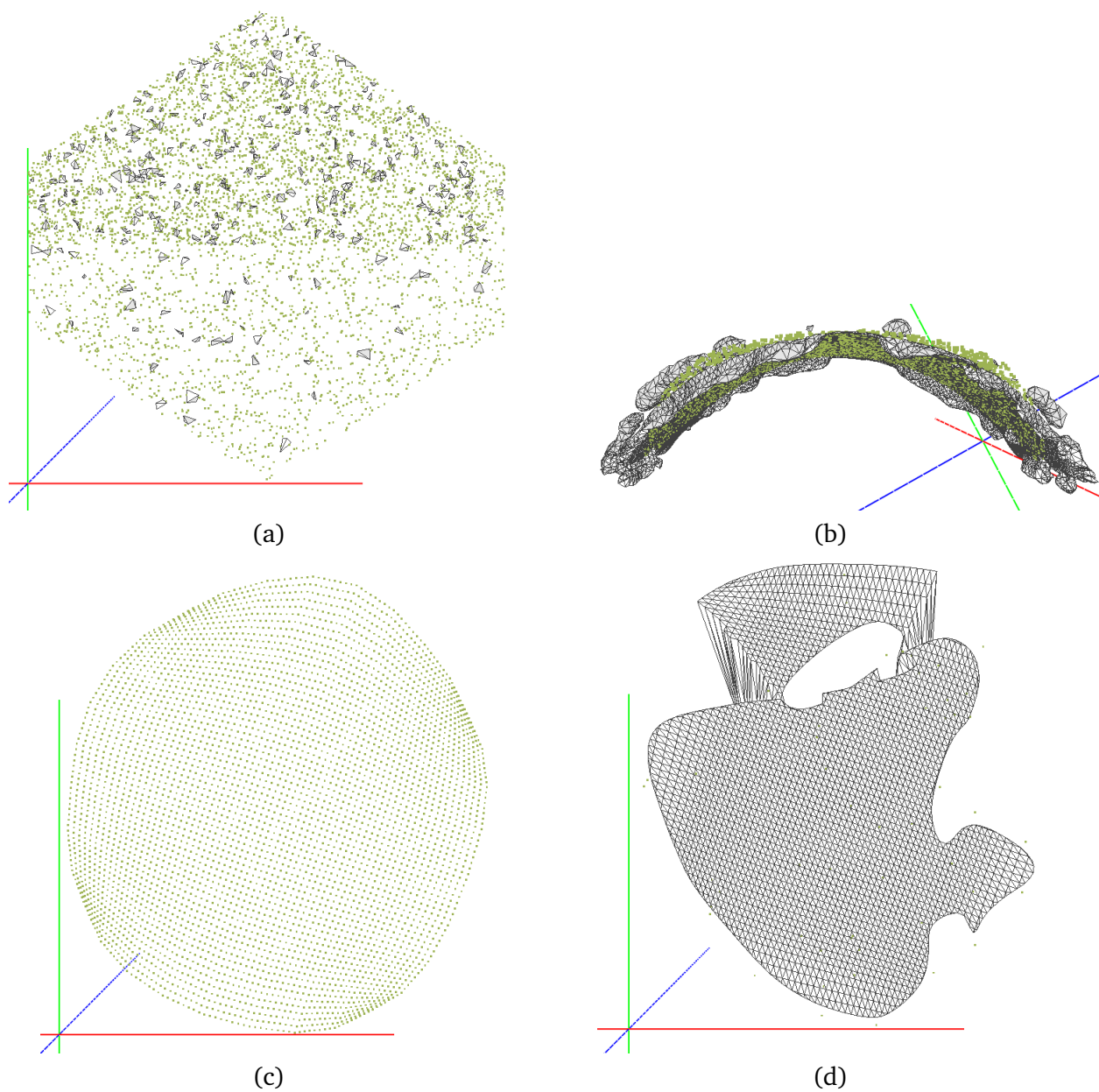


Fig. 3.13.: Quelques résultats présentant différents types d'échecs, de reconstruction de maillage ou de surface (Partie 2). Les points verts représentent le nuage de points d'entrée. (a) Alpha-Shape, (b) Poisson échanté, (c) et (d) B-Spline.

3.4.3 Résultats généraux sur les méthodes

J'ai réalisé une analyse de sensibilité, afin de déterminer quels étaient les paramètres les plus importants pour chaque méthode ainsi que leur niveau de sensibilité et leur plage de valeurs de fonctionnement optimal. En plus de la valeur de l'aire de la feuille, les qualités géométriques et topologiques des reconstructions sont vérifiées. Les surfaces trop inexactes, éloignées du nuage de points ou encore les surfaces non planes sont écartées (sauf cas particulier de l'Alpha-Shape présenté dans la section 3.3.1), tout comme des surfaces présentant des trous ou des intersections sur elles-mêmes (voir des illustrations d'erreurs de reconstruction sur la figure 3.12). Un sous-ensemble des données synthétiques présenté dans la section 2.4.1 a été généré. Chaque critère a été étudié indépendamment et sur des plages de valeurs larges dépassant qu'il est usuel de voir en réalité. Toutes les valeurs sont répertoriées dans le tableau 3.2.

Pour quelques méthodes, certains paramètres dépendent de la densité ou de la taille du nuage de points. Il est dans ce cas difficile de choisir une valeur fixe pour ce paramètre. Des *métaparamètres* liant les paramètres aux caractéristiques du nuage de points sont alors introduits. Le même protocole d'analyse de sensibilité que les autres paramètres est utilisé pour déterminer leurs valeurs. Pour la **Triangulation 2.5D**, on introduit le métaparamètre dmn défini comme la diagonale de la boîte englobante divisée par le nombre de points dans le nuage. Pour **Alpha-Shape**, la distribution des distances des points à leur plus proche voisin est calculée et la médiane est sélectionnée. Finalement, l'étape d'élagage de la reconstruction de Poisson dépend aussi de la densité du nuage de points initial. La moyenne de la densité locale de points est utilisée comme seuil déterminant la frontière de la surface. Plus de détails sur le fonctionnement de ces méta-paramètres ont été donnés dans la section 3.3.

Les tableaux de résultats de l'analyse de sensibilité donnent des indications sur la qualité des maillages qui sont quantitativement bons (voir figure 3.14).

3.4.4 Détail méthode par méthode

Dans cette partie je détaille les résultats obtenus lors l'analyse de sensibilité et je justifie méthode par méthode pourquoi il n'est pas nécessaire de faire une optimisation jointe de tous les paramètres.

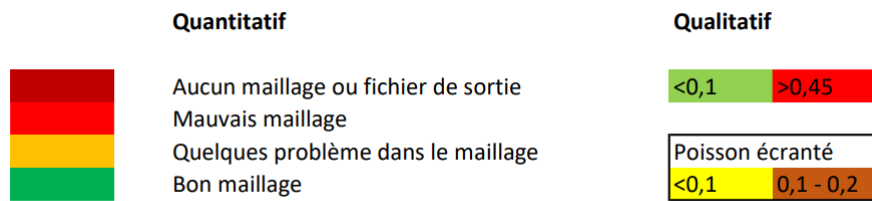


Fig. 3.14.: Légende utilisée dans les tableaux de résultats de l'analyse de sensibilité pour faciliter la lecture et donner des indications de qualité. Le chiffre en gras est l'erreur minimale en norme obtenue pour chaque critère.

Triangulation 2.5D

La méthode de Triangulation 2.5D n'a aucun paramètre. Dans l'implémentation de cette méthode dans *CloudCompare* ((version 2.11.0) 2020), un seul paramètre *dmn*, qui est la longueur maximale autorisée pour un côté du maillage, est proposé pour permettre de contrôler la reconstruction. Le détail de son fonctionnement est expliqué dans la section 3.3.1. Comme la méthode n'a qu'un seul paramètre dans tous les cas, la méthode d'analyse de sensibilité peut être simplement utilisée sans questions quant à l'optimisation jointe.

Les moyennes par critère sont présentées sur la figure 3.15.

longueur côté méta	Densité	Régulier	Ratio échantillonnage NU	Trou	Recalage	Courbure	Concavité	Ratio L/	Bruit	Moyenne
0,00	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	2,32	1,04	0,14	0,00	15,47
0,20	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	2,13
0,50	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage
1,00	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage
2,00	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	-1,00
3,00	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	aucun maillage	-1,00
5,00	-1,00	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
6,00	-1,00	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
7,00	-1,00	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
8,00	-1,00	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
9,00	-0,99	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
10,00	-0,99	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
15,00	-0,95	aucun maillage	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,99
20,00	-0,93	-0,20	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,90
25,00	-0,90	-0,20	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,90
30,00	-0,87	-0,16	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,89
40,00	-0,81	-0,15	-1,00	-1,00	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,98	-0,88
50,00	-0,78	-0,13	-0,99	-0,99	-0,97	-1,00	-1,00	-1,00	-0,94	-0,87
60,00	-0,75	-0,11	-0,97	-0,94	-0,94	-1,00	-1,00	-0,99	-0,90	-0,85
70,00	-0,73	-0,10	-0,93	-0,91	-0,99	-1,00	-0,98	-1,00	-0,99	-0,83
80,00	-0,72	-0,09	-0,90	-0,88	-0,97	-0,99	-0,96	-0,93	-0,81	-0,81
90,00	-0,71	-0,08	-0,85	-0,84	-0,95	-0,99	-0,98	-0,76	-0,97	-0,79
100,00	-0,69	-0,08	-0,80	-0,80	-0,93	-0,98	-0,93	-0,71	-0,81	-0,76
150,00	-0,61	-0,06	-0,57	-0,57	-0,72	-0,86	-0,72	-0,59	-0,43	-0,59
200,00	-0,51	-0,05	-0,41	-0,44	-0,50	-0,50	-0,32	-0,23	-0,69	-0,44
300,00	-0,32	-0,04	-0,19	-0,29	-0,16	-0,69	-0,11	-0,09	-0,49	-0,26
400,00	-0,17	-0,03	-0,07	-0,23	-0,04	-0,54	-0,03	-0,04	-0,26	-0,16
410,00	-0,16	-0,03	-0,06	-0,23	-0,03	-0,52	-0,03	-0,03	-0,24	-0,15
420,00	-0,15	-0,03	-0,06	-0,23	-0,02	-0,51	-0,03	-0,03	-0,21	-0,14
430,00	-0,13	-0,03	-0,05	-0,23	-0,01	-0,50	-0,02	-0,03	-0,18	-0,13
440,00	-0,12	-0,03	-0,05	-0,22	0,00	-0,49	-0,02	-0,03	-0,16	-0,12
450,00	-0,11	-0,03	-0,04	-0,22	0,01	-0,47	-0,01	-0,02	-0,13	-0,12
460,00	-0,10	-0,03	-0,04	-0,22	0,02	-0,46	-0,01	-0,02	-0,10	-0,11
470,00	-0,09	-0,03	-0,04	-0,22	0,05	-0,45	-0,01	-0,03	-0,07	-0,10
480,00	-0,08	-0,03	-0,03	-0,22	0,08	-0,44	-0,01	-0,04	-0,07	-0,09
490,00	-0,07	-0,03	-0,03	-0,22	0,09	-0,43	-0,01	-0,02	-0,01	-0,08
500,00	-0,06	-0,03	-0,03	-0,21	0,10	-0,42	0,00	-0,02	-0,07	-0,07
520,00	-0,04	-0,03	-0,02	-0,21	0,10	-0,40	0,00	-0,02	-0,06	-0,06
540,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,21	0,11	-0,38	0,00	-0,01	-0,05	-0,05
560,00	0,00	-0,03	-0,02	-0,21	0,11	-0,36	0,00	-0,01	-0,04	-0,04
580,00	0,01	-0,03	-0,02	-0,21	0,12	-0,34	0,00	-0,01	-0,02	-0,02
600,00	0,03	-0,03	-0,02	-0,20	0,14	-0,33	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
650,00	0,06	-0,03	-0,01	-0,20	0,16	-0,29	0,01	-0,01	0,02	0,02
700,00	0,09	-0,03	-0,01	-0,20	0,20	-0,26	0,01	-0,01	0,05	0,05
750,00	0,12	-0,03	-0,01	-0,19	0,20	-0,23	0,01	-0,01	0,08	0,08
800,00	0,14	-0,03	-0,01	-0,19	0,21	-0,20	0,02	-0,01	1,08	1,11
850,00	0,17	-0,03	-0,01	-0,18	0,25	-0,18	0,02	-0,01	1,30	0,15
900,00	0,18	-0,03	-0,01	-0,18	0,25	-0,16	0,02	-0,01	1,52	0,18
950,00	0,19	-0,03	-0,01	-0,17	0,30	-0,14	0,02	-0,01	1,73	0,21
1000,00	0,19	-0,03	-0,01	-0,17	0,39	-0,12	0,03	-0,01	1,94	0,25

Fig. 3.15.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité 2.5D. Voir 3.14 pour la légende.

De nombreuses valeurs ont été testées et on a atteint un palier d'amélioration pour l'ensemble des critères avec les valeurs du paramètre. Cependant ce ne sont pas pour les mêmes valeurs de paramètre suivant le critère. Dans tous les cas, les meilleures valeurs sont comprises entre $dmn = 700$ et $dmn = 1000$, sauf lorsque l'on considère uniquement les données du critère concavité. En effet, le filtrage de post-traitement proposé ne peut qu'enlever de l'information. Cet effet est dû à la méthode de construction de nos données synthétique. Pour les nuages de points ne présentant aucune concavité, toutes les arêtes des maillages sont incluses dans la surface. Les filtrer amène à de la perte d'information directe. Dans le cas de données présentant uniquement de la concavité, le filtrage des arêtes plus grandes qu'un certain seuil permet de se rapprocher de la forme attendue du maillage et d'en améliorer la mesure. Pour le critère de concavité, la valeur optimale est $dmn = 540$. L'algorithme possède des valeurs optimales de filtrage divergentes suivant les caractéristiques intrinsèques des données d'entrée. Lorsque le post-traitement est désactivé avec $dmn = 0$, les performances dépassent pour quatre critères les résultats obtenus avec le choix d'un métaparamètre. Sur l'ensemble des critères, la qualité des reconstructions pour les critères de bruit et de recalage est toujours mauvaise. Dans ce cas, il est possible de dire que la stratégie d'optimisation donne en majorité les meilleurs résultats partout où ils sont possibles.

En conclusion, le choix de $dmn = 0$ est la plus performante en général pour la méthode de reconstruction. De plus l'erreur d'estimation attendue est toujours une erreur de mesure excédentaire qui est bornée par la forme des concavités.

Alpha-Shape

La méthode Alpha-Shape n'a qu'un seul paramètre α , la méthode décrite ci-dessus (voir section 3.4.1) est simplement appliquée. La méthode Alpha-Shape nécessite de définir un métaparamètre. En effet d'après le fonctionnement de l'algorithme (voir section 3.3.1), le meilleur paramètre α dépend de la densité du nuage de points. J'ai proposé et testé trois méthodes différentes d'optimisation du choix du métaparamètre.

Les moyennes par critère selon la valeur du métaparamètre sont présentées sur la figure 3.16.

La première chose que l'on remarque est que la méthode d'automatisation par la boîte englobante ne permet pas d'obtenir d'aussi bons résultats que les méthodes par médiane et premier percentile. Il est possible que la valeur du méta-paramètre nécessaire ne soit jamais atteinte pour obtenir la même précision. Elle est donc laissée de côté au profit des deux méthodes basées sur les statistiques. Parmi ces

Algorithme	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox
paramètre alpha meta	1	10	50	100	200	300	400	500
Densité	aucun maillage	-0,9592	-0,7685	-0,5460	-0,2485	-0,1566	-0,0360	0,0220
Régulier	aucun maillage	-0,3200	-0,1782	-0,1267	-0,1042	-0,0956	-0,0883	-0,0878
Ratio échantillonnage NU	aucun maillage	-1,0000	-0,9958	-0,9708	-0,9182	-0,8716	-0,8304	-0,7928
Trou	aucun maillage	-0,9997	-0,9080	-0,5568	-0,2274	-0,1978	-0,1917	-0,1849
Recalage	aucun maillage	aucun maillage	-0,9797	-0,7505	-0,6276	-0,5592	-0,5585	-0,4931
Courbure	aucun maillage	aucun maillage	-0,9962	-0,9598	-0,9004	-0,8477	-0,8007	-0,7574
Concavité	aucun maillage	aucun maillage	-0,9768	-0,5606	-0,0465	0,0125	0,0172	0,0225
Ratio L/I	aucun maillage	-0,9993	-0,6222	-0,2396	-0,0044	0,0037	0,0033	0,0032
Bruit	aucun maillage	aucun maillage	-0,9737	-0,5994	2,1819	1,9733	1,8758	1,1598

Algorithme	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian
paramètre alpha meta	1	2	3	4	5	6	7	10
Densité	-0,1317	-0,1279	-0,0684	-0,0530	-0,0428	-0,0241	-0,0212	-0,0202
Régulier	-0,0652	-0,0860	-0,0846	-0,0838	-0,0829	-0,0804	-0,0788	-0,0775
Ratio échantillonnage NU	-0,7419	-0,5647	-0,3031	-0,2183	-0,1473	-0,0576	-0,0294	-0,0191
Trou	-0,1920	-0,1427	0,0058	0,0062	0,0068	0,0082	0,0089	0,0093
Recalage	-0,4648	-0,2194	-0,0292	0,0127	0,0436	0,0848	0,1004	0,1089
Courbure	-0,6215	-0,4240	-0,2655	-0,2089	-0,1637	-0,1137	-0,0998	-0,0914
Concavité	0,0277	0,0660	0,1109	0,1329	0,1379	0,1456	0,1458	0,1461
Ratio L/I	0,0019	0,0034	0,0071	0,0084	0,0102	0,0127	0,0138	0,0145
Bruit	0,7921	0,7510	0,7434	0,7440	0,7459	0,7488	0,7507	0,7518

Algorithme	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile
paramètre alpha meta	1	2	3	4	5	6	7	10
Densité	-0,1928	-0,1701	-0,1043	-0,0801	-0,0667	-0,0357	-0,0303	-0,0225
Régulier	-0,0494	-0,0864	-0,0856	-0,0851	-0,0843	-0,0824	-0,0810	-0,0799
Ratio échantillonnage NU	-0,8246	-0,6857	-0,4310	-0,3350	-0,2411	-0,1076	-0,0593	-0,0372
Trou	-0,2028	-0,1910	-0,1122	-0,0499	0,0058	0,0069	0,0078	0,0083
Recalage	-0,5578	-0,4013	-0,1217	-0,0558	-0,0034	0,0570	0,0805	0,0929
Courbure	-0,7315	-0,5621	-0,3126	-0,3029	-0,2368	-0,1504	-0,1212	-0,1091
Concavité	0,0181	0,0337	0,0819	0,0941	0,1188	0,1425	0,1455	0,1457
Ratio L/I	0,0030	0,0005	0,0032	0,0046	0,0063	0,0091	0,0109	0,0118
Bruit	2,9451	0,7715	0,7445	0,7437	0,7437	0,7467	0,7485	0,7499

Fig. 3.16.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour l'Alpha-Shape. (a) Version BBox, (b) Version Décile, (c) Version Médiane. Voir 3.14 pour la légende.

deux autres méthodes, l'utilisation de la médiane ou du premier percentile donne des résultats pratiquement identiques. Pour la suite, seule la méthode d'automatisation du méta-paramètre basée sur la médiane est utilisée. Le méta-paramètre est noté mc_α .

Quelle que soit la valeur de mc_α , le jeu de données du critère de bruit reste à un niveau d'erreur stable, mais élevé. Il est possible que la méthode ne permette pas la gestion du bruit. Pour les autres critères, l'erreur moyenne diminue quand la valeur du paramètre augmente, excepté le jeu de données sur le critère de la concavité a le comportement inverse. La conclusion est que la méthode ne peut pas être optimale à la fois pour le critère de concavité et l'ensemble des autres critères. Si l'ensemble de données a des concavités alors $mc_{\alpha 1} = 1$ est la meilleure valeur. Dans les autres cas, $mc_{\alpha 2} = 15$ donne des résultats optimaux.

Au final, pour garantir les meilleurs résultats possibles avec un processus automatique, le paramètre optimisé choisi est celui qui permet de gérer la plus grande diversité. Le paramètre choisi est donc $mc_{\alpha 2} = 15$.

BPA

La version originale de l'algorithme de reconstruction de BPA n'a besoin que d'un seul paramètre qui est ρ le rayon de la boule. La version implémentée dans Meshlab et utilisée possède elle deux paramètres en plus : le rayon de cluster cr exprimé en pourcentage de ρ et θ un seuil sur les angles des triangles exprimés en degré. Pour plus d'informations sur le fonctionnement de l'algorithme, se référer à la section 3.3.1. Pour le choix de la valeur de ρ , Meshlab propose une méthode automatique appelée autoguess. Elle est activée lorsque $\rho = 0$. Il est tout de même important de vérifier si cette optimisation est valide, car il n'y a aucune source validant la démarche. Les moyennes par critère selon la valeur des différents paramètres sont présentées sur la figure 3.17.

rayon	0	0,5	1	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
rayon de clustering	20	20	20	20	20	5	10	50	100	20	20	20	5	10
seuil de l'angle	90	90	90	90	90	90	90	90	90	50	120	180	50	50
Densité	0,0377	-0,6736	-0,3948	-0,1470	-0,2600	0,0416	0,0405	-0,0115	-0,4642	-0,0843	0,0583	0,0786	-0,0832	-0,0851
Régulier	-0,0411	-0,1164	-0,0191	-0,1318	-0,2517	-0,0411	-0,0411	-0,0410	-0,1171	-0,0411	-0,0411	-0,0299	-0,0411	-0,0411
Ratio échantillonnage NU	-0,1851	-0,8743	-0,3688	-0,0461	-0,1774	-0,1819	-0,1824	-0,2292	-0,6529	-0,1851	-0,1851	-0,1804	-0,1819	-0,1824
Trou	-0,2424	-0,9313	-0,3630	-0,2477	-0,3266	-0,2401	-0,2402	-0,2744	-0,6659	-0,2424	-0,2424	-0,2344	-0,2401	-0,2402
Recalage	0,2037	-0,9383	-0,1330	0,2274	0,1291	0,2080	0,2075	0,1432	-0,3432	0,1974	0,2059	0,2149	0,2017	0,2005
Courbure	-0,0654	-0,9157	-0,1775	-0,0479	-0,1417	-0,0629	-0,0636	-0,0956	-0,4784	-0,0655	-0,0654	-0,0603	-0,0631	-0,0637
Concavité	-0,0280	-0,9138	-0,1853	-0,0361	-0,1228	-0,0261	-0,0265	-0,0571	-0,5359	-0,0280	-0,0280	-0,0227	-0,0261	-0,0265
Ratio L/I	-0,0380	-0,9141	-0,1881	-0,0444	-0,1387	-0,0299	-0,0304	-0,2294	-0,6565	-0,0380	-0,0380	-0,0305	-0,0299	-0,0002
Bruit	0,3539	-0,9839	-0,6048	7,6889	9,2476	0,3706	0,3682	0,1839	-0,3388	-0,2286	0,4880	0,5345	-0,2232	-0,2273
Moyenne	-0,0005	-0,8068	-0,2705	0,8017	0,8842	0,0042	0,0036	-0,0679	-0,4726	-0,0795	0,0169	0,0300	-0,0763	-0,0740

Fig. 3.17.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la BPA. Voir 3.14 pour la légende.

Comme il y a plusieurs paramètres, il faut justifier la non-utilisation de l'optimisation jointe pour l'analyse de sensibilité. Cette justification peut être argumentée directement à partir du fonctionnement de l'algorithme. Tout d'abord, le paramètre d'angle θ est indépendant des deux autres paramètres, car il est utilisé dans une étape de filtrage du maillage additionnel post-reconstruction. Le paramètre cr contrôle quant à lui la structure générale du maillage, il permet la simplification du maillage dans le cas d'un nuage de points très dense, ce qui est aussi une étape post-reconstruction indépendante.

Les paramètres par défaut de la méthode sont ceux définis par défaut dans l'interface Meshlab à savoir : $\rho = 0$, $cr = 20$ et $\theta = 90^\circ$. Dans la première étape de l'analyse de sensibilité, chacun est varié indépendamment. On peut conclure quant à l'importance et la sensibilité de chaque paramètre indépendamment. Lorsque cr varie, les résultats restent stables tant que $cr < 50$ puis au-delà de cette valeur, les résultats sont moins bons pour tous les critères. Ceci s'explique par une simplification excessive du maillage. Les résultats sont très stables en dépit de la variation de θ , on peut conclure que ce paramètre n'a que très peu d'influence sur la qualité du résultat. Enfin le paramètre ρ est le paramètre le plus important, c'est celui qui provoque des variations de forme et de mesure les plus grandes. Les valeurs déduites automatiquement par le logiciel Meshlab donnent les meilleurs résultats sauf dans les cas où le

ratio d'échantillonnage n'est pas à 1. Il est cependant clair que la meilleure valeur pour ce paramètre est $\rho = 0$ pour utiliser la méthode d'optimisation de paramètre de Meshlab.

La deuxième étape de l'analyse est de vérifier que les meilleures valeurs des paramètres indépendamment donnent les meilleurs résultats lorsqu'ils sont combinés. Comme le paramètre θ a une influence négligeable, l'étude se concentre sur cr et les valeurs de cr sont limitées entre 5 et 50, $\theta = 50$ et $\rho = 0$. Dans ce cas l'influence du paramètre cr est pratiquement négligeable. L'ensemble des résultats est stable.

Les valeurs optimisées choisies pour la suite de l'étude pour le BPA sont donc : $\rho = 0$, $cr = 50$ et $\theta = 180$.

Reconstruction Incrémentale

La méthode de Reconstruction Incrémentale détaillée dans la section 3.3.1 possède 7 paramètres. Pour l'analyse de sensibilité, je me suis aidée du guide de l'utilisateur PCL Rusu et al. (2007) pour le réglage des paramètres. Cependant, j'ai aussi testé des valeurs hors des intervalles conseillés. Comme il y a plusieurs paramètres, il faut justifier l'utilisation de notre méthode d'analyse de sensibilité au lieu d'une optimisation jointe. Les paramètres sont les suivants :

- μ : limite le rayon de recherche pour les points voisins. Ce paramètre est choisi afin de gérer les zones de densité basse dans les nuages de points. Il est aussi dépendant du paramètre *Nombre de points*.
- *Nombre de points*: limite le nombre de points dans le voisinage. Ce paramètre est choisi pour gérer les zones de densité haute dans les nuages de points. Il est aussi dépendant du paramètre μ .
- *Radius*: paramètre qui fixe la longueur maximale d'un côté d'un triangle. Il est indépendant des autres paramètres parce qu'il est le seul impliqué dans une étape de filtrage indépendante du reste du processus.
- *Angle de surface maximal* : contrôle le seuil à partir duquel les normales de la surface sont considérées comme consistantes. Ce mécanisme n'est pas activé pour nos surfaces, il n'a aucun impact sur la reconstruction.
- *Angle minimum* : contrains l'angle minimum dans chaque triangle. La valeur du paramètre doit toujours être différente et inférieure à celle du paramètre *Angle maximal*, et être différente de zéro. Ce paramètre est utilisé dans un processus de filtrage indépendant des autres dans le fonctionnement de l'algorithme.

- *Angle maximal* : contrains la valeur maximale des angles dans chaque triangle. Il est utilisé dans un processus de filtrage indépendant des autres dans le fonctionnement de l'algorithme.
- *Consistance des normales* : contrôle l'activation du filtre sur les côtés des triangles dont les normales ne sont pas dans l'intervalle définies par le paramètre *Angle de surface maximal*. Le processus activé par ce paramètre permet de reconstruire une surface présentant une zone anguleuse ou deux surfaces très proches. Dans notre cas, les feuilles ne présentent pas ce genre de géométrie. Il est donc désactivé avec le paramètre booléen fixé à faux.

Les deux paramètres étant en relation *Nombre de point* et *Radius* fonctionnent ensemble pour l'étape de recherche de voisins et gèrent deux zones indépendantes du nuage de points (haute et basse densité). L'ensemble des résultats obtenus pour l'analyse de sensibilité est présenté sur la figure 3.18. L'analyse de sensibilité réalisée

Rayon	Mu	Nombre maxi	Angle maxima	Angle minimum	Angle maxima	Consistence d	nom paramèt	Densité	Régulier	Ratio échantil	Trou	Recalage	Courbure	Concavité	Ratio L/I	Bruit	Moyenne
0,01	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P1	-0,8317	-0,1092	-0,9686	-0,9836	-0,9848	-0,9787	-0,9787	-0,9791	-0,9964	-0,8679
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P2	-0,5597	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4535	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7443	-0,4624
0,05	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P3	-0,4171	0,0783	-0,2835	-0,4104	-0,0509	-0,2333	-0,2391	-0,2518	0,2454	-0,1736
0,1	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P4	-0,3221	0,0648	-0,2414	-0,4102	-0,0440	-0,2323	-0,2375	-0,2494	2,4705	0,0887
0,5	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P5	-0,2224	0,0774	-0,2411	-0,4102	-0,0440	-0,2323	-0,2375	-0,2494	2,8785	0,1466
0,8	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P6	-0,2224	0,0774	-0,2411	-0,4102	-0,0440	-0,2323	-0,2375	-0,2494	2,8785	0,1466
1	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P7	-0,2224	0,0774	-0,2411	-0,4102	-0,0440	-0,2323	-0,2375	-0,2494	2,8785	0,1466
1,5	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P8	-0,2224	0,0774	-0,2411	-0,4102	-0,0440	-0,2323	-0,2375	-0,2494	2,8785	0,1466
0,025	1,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P9	-0,7977	-0,0075	-0,8800	-0,8887	-0,8323	-0,8518	-0,8518	-0,8538	-0,8885	-0,7613
0,025	2	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P10	-0,7243	0,0245	-0,7029	-0,7124	-0,6100	-0,6218	-0,6223	-0,6316	-0,7883	-0,5988
0,025	3	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P11	-0,4597	0,1339	-0,4823	-0,5045	-0,3792	-0,3497	-0,3620	-0,3679	-0,7282	-0,3889
0,025	4	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P12	-0,3870	0,7258	-0,4385	-0,4606	-0,3254	-0,3000	-0,3102	-0,3106	-0,7180	-0,2805
0,025	5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P13	-0,3730	0,8726	-0,4277	-0,4481	-0,3093	-0,2827	-0,2931	-0,2951	-0,7150	-0,2524
0,025	2,5	50	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P14	-0,4886	0,0909	-0,5542	-0,5747	-0,4503	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7433	-0,4511
0,025	2,5	150	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P15	-0,5090	0,1157	-0,5542	-0,5747	-0,4597	-0,4294	-0,4465	-0,4532	-0,7448	-0,4506
0,025	2,5	200	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P16	-0,5092	0,1199	-0,5542	-0,5747	-0,4623	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7452	-0,4517
0,025	2,5	300	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P17	-0,5093	0,1172	-0,5542	-0,5747	-0,4693	-0,4622	-0,4465	-0,4532	-0,7457	-0,4553
0,025	2,5	400	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P18	-0,5093	0,1309	-0,5542	-0,5747	-0,4741	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7460	-0,4519
0,025	2,5	500	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P19	-0,5093	0,1315	-0,5542	-0,5747	-0,4807	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7462	-0,4526
0,025	2,5	100	Pi/2	Pi/18	2*Pi/3	False	P20	-0,5510	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4529	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7146	-0,4580
0,025	2,5	100	Pi	Pi/18	2*Pi/3	False	P21	-0,5510	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4529	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7146	-0,4580
0,025	2,5	100	5*Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P22	-0,5510	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4529	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7146	-0,4580
0,025	2,5	100	3*Pi/2	Pi/18	2*Pi/3	False	P23	-0,5510	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4529	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7146	-0,4580
0,025	2,5	100	2*Pi	Pi/18	2*Pi/3	False	P24	-0,5510	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4529	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7146	-0,4580
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/32	2*Pi/3	False	P25	-0,5607	0,0647	-0,5557	-0,5762	-0,4543	-0,4422	-0,4503	-0,4564	-0,7417	-0,4636
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/9	2*Pi/3	False	P26	-0,5659	0,0475	-0,5587	-0,5782	-0,4607	-0,4473	-0,4517	-0,4595	-0,7502	-0,4694
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/5	2*Pi/3	False	P27	-0,5813	0,0029	-0,5804	-0,5999	-0,4863	-0,4759	-0,4795	-0,4861	-0,7589	-0,4939
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/18	Pi	False	P28	-0,4965	0,0693	-0,5171	-0,5448	-0,4231	-0,4038	-0,4096	-0,4185	-0,7358	-0,4311
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi	False	P29	-0,4656	0,0785	-0,5046	-0,5351	-0,4109	-0,3898	-0,4034	-0,4032	-0,7267	-0,4179
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	True	P30	-0,5618	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4656	-0,4448	-0,4465	-0,4532	-0,8436	-0,4755
0,1	3	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P1	-0,1860	0,1466	-0,0958	-0,3007	0,1533	-0,1004	-0,0955	-0,1070	3,3830	0,3108
0,025	2,5	100	Pi/4	Pi/18	2*Pi/3	False	P2	-0,5597	0,0647	-0,5542	-0,5747	-0,4535	-0,4398	-0,4465	-0,4532	-0,7443	-0,4624

Fig. 3.18.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la Reconstruction incrémentale. Voir 3.14 pour la légende.

indépendamment pour chaque paramètre montre que la plupart d'entre eux ont une influence très limitée sur la qualité des résultats. *Angle minimum* n'a aucun impact sur la reconstruction tant que sa valeur reste sous le seuil de $\frac{\pi}{5}$. Les seuls paramètres ayant de l'importance sont dans l'ordre μ , et dans une mesure moindre le rayon et le nombre maximal de points. Les conseils donnés par le guide de l'utilisateur sont aussi pertinents, car on retrouve les résultats attendus avec les valeurs par défaut conseillées.

B-Spline

Le modèle B-Spline possède 19 paramètres à configurer. Le fonctionnement de l'algorithme est expliqué dans la section 3.3.2. Parmi les 19 paramètres, 4 ont été étudiés dans l'analyse de sensibilité. Mörwald et al. (2016) explique que sauf cas très particulier, les paramètres par défaut suffisent pour la plupart des applications, ce qui est explicable par le fonctionnement de l'algorithme. Il y a deux processus indépendants qui forment l'algorithme B-Spline et qui ont chacun leurs propres paramètres :

- Initialisation de la surface et ajustement de la B-Spline :
 - *Ordre*: ordre (ou degré) polynomial de la surface B-Spline. C'est un paramètre très important qui contrôle la famille de formes possibles pour la surface. Plus haut est le degré, plus complexe peut être la surface reconstruite.
 - *Raffinement* : nombre d'itérations pour le raffinement. Le raffinement est le processus dans lequel un point de contrôle est inséré dans l'espace. C'est aussi un paramètre important, car il contrôle la définition de la courbe dans l'espace local au point de contrôle. Comme un point de contrôle définit localement la forme de la surface, plus il y a de points de contrôle, plus il y a de contraintes sur la forme de la surface. Cependant, ce paramètre est limité par son influence sur le temps d'exécution de la méthode (voir table 3.3).
 - *Itérations* : nombre d'itérations après que l'étape de raffinement est complétée. C'est un paramètre important qui permet de gérer la précision générale de la forme.
 - *Résolution de maillage* : nombre de sommets dans chaque direction paramétrique pour la triangulation de la surface B-Spline. Ce paramètre n'a pas d'influence sur la mesure de l'aire sauf dans les cas où il ne permet pas de visualiser le plus petit détail d'intérêt. En effet, dans ces conditions il est trop bas, un phénomène de lissage survient.
 - *Lissage intérieur* : comme son nom l'indique, s'occupe du niveau de lissage pour l'intérieur de la surface. Pour ce paramètre, une valeur différente de la valeur par défaut est intéressante dans le cas de nuages de points présentant des caractéristiques très particulières (par exemple, le nuage de points est vide en son centre). Dans les autres cas, changer la valeur de ce paramètre provoque des instabilités.

- *Poids intérieur* : poids pour l'optimisation de l'intérieur de la surface. Pour ce paramètre, une valeur différente de la valeur par défaut est intéressante dans le cas de nuages de points présentant des caractéristiques très particulières (par exemple, le nuage de points présente des zones vides). Dans les autres cas, une autre valeur de paramètre crée des instabilités.
 - *Lissage de frontière* : lissage de la frontière de la surface. Ce paramètre est inutile à cause de l'étape d'élagage de la surface.
 - *Poids de frontière* : poids pour lisser la frontière de la surface. Ce paramètre est inutile à cause de l'étape d'élagage de la surface.
- Élagage de la surface B-Spline avec une courbe B-Spline :
 - *addCPsAccuracy* : nombre de points de contrôle à ajouter pour la précision. Il permet de contrôler la distance entre la région support de la courbe et les points de contrôle. Si la distance entre deux points de contrôle est au-dessus du seuil fixé par ce paramètre, alors un nouveau point de contrôle est ajouté. Par définition, une valeur de ce paramètre au-dessus de la valeur par défaut ne permet pas d'améliorer la mesure de l'aire. Une valeur en dessous ne donne aucune amélioration notable d'après nos tests.
 - *addCPsIteration* : nombre d'itérations autorisé sans ajouter de points de contrôle.
 - *maxCPs* : nombre maximal de points de contrôle qui peuvent être utilisés. C'est un paramètre qui permet de limiter l'exécution du processus d'ajout de points de contrôle. Par défaut, la valeur est très large et aucune modification n'est nécessaire comme il n'impacte pas l'estimation de l'aire de la surface.
 - *Précision* : précision moyenne de la courbe ajustée par rapport aux régions supports. Si la distance cumulée des points de la surface à la courbe d'élagage est au-dessus de ce seuil, un point de contrôle est ajouté. Par définition, augmenter la valeur de ce paramètre ne permet pas d'améliorer la précision de l'estimation de l'aire. Une valeur en dessous ne donne aucune amélioration notable d'après nos tests.
 - *Itérations* : nombre maximal d'itérations. Ce paramètre permet de rendre impossible une boucle infinie. Par défaut la valeur est très grande et

aucune modification n'est nécessaire comme cela n'impacte ni la surface ni l'estimation de l'aire.

- *Résolution du point le plus proche* : nombre de points de contrôle devant appartenir à chaque zone support (0 = désactivation du processus). Le mécanisme est désactivé par défaut, car il n'est utile que dans des cas d'usage très spécifiques, par exemple les nuages de points n'ayant pas suffisamment de points à leur frontière.
- *Poids du point le plus proche* : poids pour l'ajustement de la courbe aux points les plus proches. Il est désactivé pour les mêmes raisons que celles présentées juste au-dessus.
- *Sigma 2 du point le plus proche* : seuil pour la recherche de points les plus proches pour le côté extérieur de la courbe. Les points pour lesquels la distance à la courbe est supérieure sont écartés.
- *Sigma 2 intérieur* : seuil pour la recherche de points les plus proches pour le côté intérieur de la courbe. Les points pour lesquels la distance à la courbe est supérieure sont écartés. Si la valeur du paramètre est diminuée, les résultats ne peuvent pas être améliorés par définition. Une valeur plus haute de ce paramètre ne change pas les résultats de manière significative d'après nos tests.
- *Lissage de concavités* : en fonction du signe du paramètre, la courbe a une tendance à se courber soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur. La valeur par défaut du paramètre permet de contrebalancer la tendance de la B-Spline à suivre les limites des nuages de points dans les zones où il manque des points.
- *Lissage* : poids du terme de lissage. Le phénomène de lissage est déjà inhérent et est implicite à la fonction B-Spline. Ce paramètre est utile dans le cas où la frontière est très bruitée.

La plupart des paramètres n'ont pas d'influence sur la forme de la surface ou sur l'estimation de l'aire. D'autres sont spécifiquement utilisés dans des cas particuliers où les nuages de points d'entrée ont des caractéristiques particulières. Les paramètres nécessitant une étude plus poussée sont l'ordre de la B-Spline o et le raffinement rf . Et ces paramètres sont limités en termes de valeurs possibles. C'est pourquoi une optimisation jointe n'est pas nécessaire. Sur la figure 3.19, l'ensemble des résultats des moyennes par critère pour l'analyse de sensibilité des principaux paramètres d'exécution sont présentés.

Nombre de points \ Raffinement	2	3	4	5
1000	3	5	60	4185
5000	10	19	171	5804
10000	22	39	318	7716

Tab. 3.3.: Temps d'exécution (s) pour 10 nuages de points avec la méthode de reconstruction de surface B-Spline. Les paramètres d'exécutions sont les valeurs par défaut et $o = 3$, $i = 5$ et $rs = 64$.

unsigned order	2	3	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3
unsigned refinement	3	3	3	3	2	5	3	3	3	3	3	3
unsigned iterations	10	10	10	10	10	10	5	15	20	10	10	10
unsigned mesh_resolution	64	64	64	64	64	64	64	64	64	32	128	256
Densité	aucun maillag	0,0434	-0,0084	0,0000	0,0174	0,0094	0,0156	0,0243	0,0177	0,0423	0,0439	0,0436
Régulier	aucun maillag	0,0349	0,0022	0,0000	0,0366	0,0316	0,0368	0,0420	0,0498	0,0342	0,0351	0,0351
Ratio échantillonnage NU	aucun maillag	0,0387	-0,0756	0,0000	0,0435	0,0381	0,0436	0,0359	0,0325	0,0382	0,0389	0,0389
Trou	aucun maillag	0,0994	0,0022	0,0000	0,0997	0,0829	0,0787	0,0950	0,0931	0,0989	0,0996	0,0996
Recalage	aucun maillag	0,4211	-0,1212	0,0000	0,2994	0,5775	0,3912	0,4343	0,4625	0,4144	0,4229	0,4234
Courbure	aucun maillag	0,0432	0,0022	0,0000	0,0350	0,0479	0,0513	0,0595	0,0476	0,0422	0,0507	0,0435
Concavité	aucun maillag	0,0671	0,0022	0,0000	0,0656	0,0671	0,0702	0,0678	0,0691	0,0670	0,0671	0,0672
Ratio L/I	aucun maillag	0,1068	0,0022	0,0000	0,1116	0,1030	0,1113	0,1031	0,1003	0,1063	0,1070	0,1070
Bruit	aucun maillag	3,0715	0,0022	0,0000	1,8386	4,8658	2,7262	3,1912	2,8428	3,0156	3,0846	3,0894
Moyenne		0,4362	-0,0213		0,2831	0,6470	0,3917	0,4504	0,4128	0,4288	0,4389	0,4386

Fig. 3.19.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la reconstruction basée B-Spline. Voir 3.14 pour la légende.

Le temps d'exécution est largement augmenté lorsque le paramètre rf dépasse la valeur de 3. C'est pourquoi l'étude de ce paramètre est très limitée et il est fixé au maximum possible (3) en tenant compte d'un compromis temps d'exécution-qualité des résultats. Lorsque l'ordre de la B-Spline est trop bas (2) ou trop élevé (5) la reconstruction échoue. Il y a trop (ou pas assez) de degrés de liberté. Il ne reste comme valeur possible que 3 ou 4. Les meilleures estimations sont obtenues avec l'ordre de la B-Spline fixé à 3.

En plus des valeurs par défaut de tous les paramètres listés ci-dessus, l'ordre de la B-Spline o , le raffinement rf , le nombre d'itérations i et la résolution du maillage rs sont respectivement fixés à 3, 3, 5, 64.

Modèle de feuille de Bézier

Cet algorithme est détaillé dans la section 3.3.2. Une note explique qu'il y a deux versions de l'algorithme implémentées : l'une ayant une méthode de minimisation utilisant la descente de gradient et l'autre utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Ces deux implémentations ont donc un nombre de paramètres différent même s'ils possèdent une partie commune. De plus le temps d'exécution est différent et peut être très long suivant les paramètres choisis. Les deux implémentations sont étudiées comme s'il s'agissait de méthodes différentes.

Je présente tout d'abord les paramètres communs aux deux versions :

- nombre de ligne de scan s

- *meshU*
- *meshV*

Ces trois paramètres sont indépendants dans la méthode. En effet le paramètre *s* définit la forme de la surface. Les paramètres *meshU* et *meshV* quant à eux sont utilisés dans l'étape de maillage de la surface. Ils décrivent le nombre de triangles dans deux directions orthogonales de l'espace. C'est pourquoi ces trois paramètres sont indépendants et n'ont pas besoin d'être optimisés conjointement.

Lorsque la minimisation est faite avec l'algorithme Levenberg-Marquardt, il n'y a pas d'autres paramètres dans la méthode. Cependant, dans la version implémentant une descente de gradient, il y a 5 nouveaux paramètres :

- *deltaXnumericalGrad*
- *gradientStep*
- *nMaxIter*
- *gradientNormStop*
- *errorimprovementStop*

Les valeurs testées pour chaque paramètre pour les deux implémentations sont listées dans les figures 3.20 et 3.4. Et le temps d'exécution pour chaque fichier est indiqué dans les tableaux 3.5 et 3.6.

nScanLine	20	30	40	50	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
nSampleU	5	5	5	5	10	20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
nSampleV	20	20	20	20	20	30	40	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
deltaXnumericalGrad	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	1E-10	0,000000001	0,000000001	0,0000001	0,0001	0,001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
gradientStep	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
nMaxIter	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
gradientNormStop	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
errorimprovementStop	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
Nom paramètres	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	

nScanLine	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
nSampleU	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
nSampleV	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
deltaXnumericalGrad	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
gradientStep	0,0000001	0,000000001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
nMaxIter	100000	100000	50000	75000	200000	1000000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
gradientNormStop	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	1E-11	1E-11	0,000000001	0,0000001	0,0000001	1E-11	1E-11	1E-11	1E-11	1E-11	1E-11	1E-11	1E-11
errorimprovementStop	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	0,000000001	0,000000001	0,0000001	0,0000001	0,00001	0,0001	0,001
	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35		

Fig. 3.20.: Paramètres d'exécution utilisés pour l'analyse de sensibilité du modèle de feuille de Bézier implémentée avec la descente de gradient.

L'ensemble des tests pour cette méthode est particulier, car comme l'exécution est moins rapide et peut très facilement durer plusieurs minutes voir pour certains nuages et certains paramètres d'exécution, plusieurs heures, l'étude de sensibilité

Nom Paramètre	ligne de scans	<i>meshU</i>	<i>meshV</i>
P1	20	5	20
P2	30	5	20
P3	40	5	20
P4	50	5	20
P5	30	10	20
P6	30	20	20
P7	30	5	30
P8	30	5	40
P9	30	5	20
P10	50	5	40
P11	50	5	30
P12	50	5	20
P13	50	5	10
P14	50	5	5

Tab. 3.4.: Paramètres d'exécution utilisés pour l'analyse de sensibilité du modèle de feuille de Bézier implémentée avec l'algorithme LM.

se fait sur un jeu de données restreint présenté dans la section 2.4.2. Les résultats obtenus pour chaque méthode sont présentés sur la figure 3.21.

Les meilleurs paramètres pour le Modèle de feuille de Bézier sont donc ceux qui donnent le meilleur résultat numérique : s vaut 50, $meshU$ vaut 5 et $meshV$ vaut 40.

De façon générale, les paramètres d'optimisation de descente de gradient influent peu sur le résultat (numérique ou géométrique). Car l'amélioration de la mesure varie entre ± 0.03 pour l'ERAM. Les nuages qui ne permettent pas de reconstruire un bon maillage sont systématiquement les mêmes, quelle que soit la valeur des paramètres d'exécution, alors même que la mesure de l'aire de la feuille synthétique est assez précise même pour ces nuages (avec une valeur aussi basse que 0.001 et 0.01 pour l'ERAM). L'ensemble de ces phénomènes se vérifient aussi avec la version de l'implémentation basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Les résultats de mesure sont sensiblement meilleurs avec l'implémentation par descente de gradient (environ ± 0.03 d'ERAM de gagné) mais le temps d'exécution est très variable pour cette version de la méthode. Afin de garantir une stabilité de temps d'acquisition des résultats et du processus d'optimisation, l'implémentation avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt est choisie pour la suite de l'étude.

Bézier élagué

La méthode de Bézier élaguée possède 4 paramètres qui sont dU , dV , $meshU$ et $meshV$. D'après la section 3.3.2 qui décrit le fonctionnement de l'algorithme, les

Paramètres \ Temps (s)	D03	D08	D016	H01	H010	N02	N07	Cu03
P1	31	0	8	7	5	7	8	16
P2	25	0	7	6	5	12	8	17
P3	24	0	7	7	4	7	8	16
P4	23	0	7	6	4	7	7	16
P5	27	0	7	7	5	7	8	16
P6	26	0	7	7	5	8	8	17
P7	26	0	7	7	5	7	7	16
P8	26	0	7	7	4	7	8	16
P9	26	0	7	7	5	7	7	16
P10	26	0	8	7	1	7	10	16
P11	26	0	5	1	4	5	7	7
P12	30	0	7	6	4	7	8	16
P13	26	0	7	7	4	7	8	16
P14	26	0	7	7	4	7	8	17
P15	26	0	7	7	4	7	7	16
P16	1	0	1	1	1	1	1	2
P17	3	0	2	1	1	1	2	16
P18	88	0	17	16	9	23	19	65
P19	313	0	0	0	0	0	0	142
P20	7	0	0	0	0	0	0	0
P21	26	0	8	6	5	7	7	16
P22	27	0	7	7	4	7	7	17
P23	27	0	7	7	5	7	8	16
P24	26	0	7	7	4	7	8	16
P25	32047	98	2287	2269	1041	2247	2372	2254
P26	32443	96	2235	2223	1070	2292	2303	2249
P27	32579	95	2220	2242	1045	2293	2244	2217
P28	32211	95	2228	2268	1028	2243	2329	2228
P29	31779	96	2237	2273	1021	2255	2216	2274
P30	760	101	468	301	275	446	467	715
P31	480	17	184	72	122	166	169	409
P32	207	2	19	13	11	15	23	152
P33	13	0	2	2	1	2	2	7
P34	7	0	0	0	0	0	0	2
P35	7	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3.5.: Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec la descente de gradient (Partie 1).

Paramètres \ Temps (s)	Cu06	Cu010	Cu014	R02	R08	Co01	Co05
P1	16	9	14	5	2	8	8
P2	15	8	15	5	1	7	8
P3	16	15	8	14	5	1	7
P4	15	8	14	4	1	8	7
P5	15	8	14	5	1	8	7
P6	16	8	14	5	1	9	7
P7	15	8	14	5	1	8	7
P8	16	8	14	5	1	1	7
P9	15	8	14	5	1	7	7
P10	15	8	14	6	1	11	9
P11	15	8	12	5	1	7	4
P12	15	8	14	5	1	7	8
P13	15	8	14	5	1	7	7
P14	15	8	14	5	1	8	7
P15	15	8	14	5	1	7	7
P16	1	1	1	2	2	1	1
P17	11	2	5	1	0	1	1
P18	30	17	54	7	1	22	19
P19	47	0	54	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0	0
P21	16	8	14	5	1	8	7
P22	15	8	14	5	1	8	8
P23	15	8	14	5	1	8	7
P24	15	8	14	5	1	8	7
P25	2233	2215	2308	2220	2219	2241	2238
P26	2258	2258	2245	2249	2242	2241	2241
P27	2250	2220	2255	2259	2305	2263	2266
P28	2250	2229	2271	2250	2255	2214	2276
P29	2229	2315	2210	2249	2225	2244	2256
P30	758	475	580	191	98	462	474
P31	373	167	283	29	16	162	163
P32	108	25	47	10	5	15	13
P33	3	2	5	0	0	2	2
P34	0	0	0	0	0	0	0
P35	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3.6.: Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec la descente de gradient (Partie 2).

Paramètres \ Nom configuration	P1	P2	P3	P4	P5	P6
<i>s</i>	20	30	40	50	20	20
<i>meshU</i>	5	5	5	5	10	20
<i>meshV</i>	20	20	20	20	20	30
<i>deltaXnumericalGrad</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>gradientStep</i>	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
<i>gradientNormStop</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	100000	100000	100000	100000
<i>errorimprovementStop</i>	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
Paramètres \ Nom configuration	P7	P8	P9	P10	P11	P12
<i>s</i>	20	20	20	20	20	20
<i>meshU</i>	5	5	5	5	5	5
<i>meshV</i>	40	20	20	20	20	20
<i>deltaXnumericalGrad</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>gradientStep</i>	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
<i>gradientNormStop</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	100000	100000	100000	100000
<i>errorimprovementStop</i>	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
Paramètres \ Nom configuration	P13	P14	P15	P16	P17	P18
<i>s</i>	20	20	20	20	20	20
<i>meshU</i>	5	5	5	5	5	5
<i>meshV</i>	20	20	20	20	20	20
<i>deltaXnumericalGrad</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>gradientStep</i>	0,00001	0,00001	0,00001	0,001	0,0001	0,000001
<i>gradientNormStop</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	100000	100000	100000	100000
<i>errorimprovementStop</i>	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001

Tab. 3.7.: Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité.

Paramètres \ Nom configuration	P19	P20	P21	P22	P23	P24
<i>s</i>	20	20	20	20	20	20
<i>meshU</i>	5	5	5	5	5	5
<i>meshV</i>	20	20	20	20	20	20
<i>deltaXnumericalGrad</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	$1e-10$	$1e-9$	$1e-8$
<i>gradientStep</i>	0,0000001	0,00000001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
<i>gradientNormStop</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	50000	750000	200000	1000000
<i>errorimprovementStop</i>	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
Paramètres \ Nom configuration	P25	P26	P27	P28	P29	P30
<i>s</i>	20	20	20	20	20	20
<i>meshU</i>	5	5	5	5	5	5
<i>meshV</i>	20	20	20	20	20	20
<i>deltaXnumericalGrad</i>	$1e-6$	$1e-4$	0,0001	0.001	0,0000001	0,0000001
<i>gradientStep</i>	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
<i>gradientNormStop</i>	$1e-11$	$1e-10$	$1e-9$	0,0000001	0,000001	$1e-11$
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	100000	100000	100000	100000
<i>errorimprovementStop</i>	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	$1e-9$
Paramètres \ Nom configuration	P31	P32	P33	P34	P35	
<i>s</i>	20	20	20	20	20	
<i>meshU</i>	5	5	5	5	5	
<i>meshV</i>	20	20	20	20	20	
<i>deltaXnumericalGrad</i>	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	
<i>gradientStep</i>	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	
<i>gradientNormStop</i>	$1e-11$	$1e-11$	$1e-11$	$1e-11$	$1e-11$	
<i>nMaxIter</i>	100000	100000	100000	100000	100000	
<i>errorimprovementStop</i>	0,00000001	0,00000001	0,00001	0,0001	0,001	

Tab. 3.8.: Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité de la version descente de gradient.

Paramètres \ Nuage	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
D03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N02	153	155	145	56	153	152	154	157	155	57	56	58	57	56
N07	51	27	80	46	27	26	27	27	27	46	46	46	46	46
Cu03	49	124	194	183	120	124	122	122	125	183	185	181	180	180
Cu06	110	542	349	480	534	516	516	521	527	473	476	478	467	474
Cu010	89	222	49	24	223	228	228	222	226	23	23	23	24	23
Cu014	32	95	54	119	91	91	91	91	90	115	119	118	115	118
R02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 3.9.: Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec l'optimisation LM.

Paramètres \ Nom configuration	<i>s</i>	<i>meshU</i>	<i>meshV</i>
P1	20	5	20
P2	30	5	20
P3	40	5	20
P4	50	5	20
P5	30	10	20
P6	30	20	20
P7	30	5	30
P8	30	5	40
P9	30	5	20
P10	20	5	20
P11	20	5	10
P12	20	5	30
P13	20	5	40
P14	20	5	50

Tab. 3.10.: Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité de la version LM.

Fig. 3.21.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour le modèle de feuille basée Bézier. (a) Version algorithme LM, version algorithme descente de gradient respectivement (a) première et (b) seconde partie. Voir 3.14 pour la légende.

paramètres sont indépendants entre eux. La forme est décrite par les 2 paramètres dU et dV qui travaillent dans des dimensions orthogonales de l'espace local de la surface. Par conséquent ces deux paramètres sont indépendants entre eux, mais aussi indépendants de $meshU$ et $meshV$ qui sont eux impliqués dans la création du maillage à partir de la surface. Les paramètres $meshU$ et $meshV$ sont eux aussi indépendants, car travaillant dans des directions orthogonales de l'espace local de la surface. De plus les paramètres dU et dV sont limités, car ils définissent l'ordre des courbes support de la surface. Cependant, il y a un paramètre caché dans cette implémentation : la valeur de $meshU$ est aussi utilisée pour déterminer le nombre de lignes de scan dans la construction de la surface. Ce paramètre lie les deux étapes indépendantes et les rend dépendantes l'une de l'autre. Cependant, l'influence de ce paramètre sur les résultats de ces deux étapes n'est pas égale. En effet, le paramètre $meshU$ en tant que paramètre indiquant le nombre de triangles du maillage n'a pas de conséquence sur la forme ou la mesure comme vue dans la section précédente 3.3.2. En revanche, le paramètre de lignes de scan est important pour la forme, ce qui est mis en évidence dans l'analyse de sensibilité. En effet, les résultats sont meilleurs lorsque le paramètre $meshU$ est adapté à la densité du nuage de points. Dans le cas où il y a trop peu de points dans chaque zone définie par les lignes de scans, alors la forme est moins bien définie (illustration du phénomène dans la figure 3.23). Ce qui est donc entièrement dû au mécanisme des lignes de scan. En dehors de ce cas de figure, la valeur de $meshU$ n'a que très peu d'influence sur le résultat. La méthode d'analyse de sensibilité proposée est donc applicable à la méthode de Bézier élaguée. Le résultat moyen par critère de l'analyse de sensibilité est donné sur la figure 3.22.

La contrainte $dV \leq dU$ est mise en lumière avec ces résultats. En effet si les valeurs des paramètres ne respectent pas cette condition alors la méthode ne permet tout simplement pas de reconstruire de surface. Quelles que soient les valeurs des paramètres, si l'ensemble des paramètres respecte la condition énoncée précédemment, alors il y a peu de variation à la fois sur l'aspect géométrique et numérique des résultats (l'amélioration est de l'ordre de ± 0.03 pour l'ERAM). Les meilleurs paramètres sont choisis en prenant les paramètres donnant les meilleurs résultats numériques, c'est-à-dire $dU = 2$, $dV = 4$, $meshU = 5$ et $meshV = 40$.

Poisson écranté

Le fonctionnement de la méthode est présenté dans la section 3.3.3. Elle est explicitement constituée de deux processus consécutifs : l'ajustement de surface puis l'élagage. Ces étapes sont indépendantes, mais sans élagage, il est impossible d'étudier les performances de l'ajustement de surface. C'est dans notre cas l'étape la plus importante de la méthode. Elles sont donc étudiées indépendamment en

patch deg U	2	3	4	5	6	4	4	4	4	4	4	4
patch deg V	4	4	4	4	4	2	3	4	5	6	4	4
nSampleU	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20
nSampleV	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Densité	-0,8299	-0,6266	0,0422	0,0422	0,0422	0,0422	0,0422	0,0422	0,1445	-0,3747	0,0422	0,0422
Recalage	-0,9231	-0,0183	0,1574	0,1488	0,1630	0,1419	0,1487	0,1574	0,2306	-0,2669	0,1683	0,1699
Ratio échantil	-0,8829	1,7704	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	2,1526	-0,2750	0,0506	0,0506
Bruit horizont	-0,9835	1,0022	0,0870	0,0870	0,0870	0,0870	0,0870	0,0870	1,5192	-0,1699	0,0870	0,0870
Trou	-0,8693	-0,4499	0,0673	0,0673	0,0673	0,0673	0,0673	0,0673	1,8483	-0,2454	0,0673	0,0673
Bruit	-0,5727	-1,0000	0,0779	0,0786	0,0819	0,0761	0,0765	0,0779	1,8835	-0,3014	0,0783	0,0784
Courbure	-0,9137	0,9963	-0,0311	-0,0310	-0,0276	-0,0361	-0,0398	-0,0311	1,8835	-0,3947	-0,0244	-0,0229
Ratio L/I	-0,7847	-0,0884	0,0818	0,0818	0,0818	0,0818	0,0818	0,0818	1,5951	-0,4352	0,0818	0,0818
Concavité	-0,9815	-0,6674	0,0943	0,0943	0,0943	0,0943	0,0943	0,0943	-1,0000	-0,3582	0,0943	0,0943
Moyenne	-0,8602	0,1020	0,0697	0,0688	0,0712	0,0672	0,0676	0,0697	1,1397	-0,3135	0,0717	0,0721

(a)

patch deg U	4	4	2	3	2	3	4	2	3	4	5
patch deg V	4	4	3	3	4	4	4	5	5	5	5
nSampleU	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
nSampleV	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Densité	0,0077	0,0136	-0,0539	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158	0,0158
Recalage	0,1204	0,1033	0,0759	0,0860	0,0909	0,0960	0,1033	0,0920	0,0979	0,1004	0,1039
Ratio échantil	0,0213	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036
Bruit horizont	0,0512	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356
Trou	0,0352	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179	0,0179
Bruit	0,0448	0,0255	0,0238	0,0238	0,0244	0,0247	0,0255	0,0247	0,0248	0,0260	0,0288
Courbure	-0,0530	-0,0660	-0,0851	-0,0864	-0,0700	-0,0725	-0,0660	-0,0706	-0,0718	-0,0657	-0,0619
Ratio L/I	0,0436	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223
Concavité	0,0643	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378
Moyenne	0,0373	0,0215	0,0086	0,0173	0,0198	0,0201	0,0217	0,0199	0,0204	0,0215	0,0226

(b)

Fig. 3.22.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la méthode de Bézier élagué. (a) Première partie et (b) seconde partie. Voir 3.14 pour la légende.

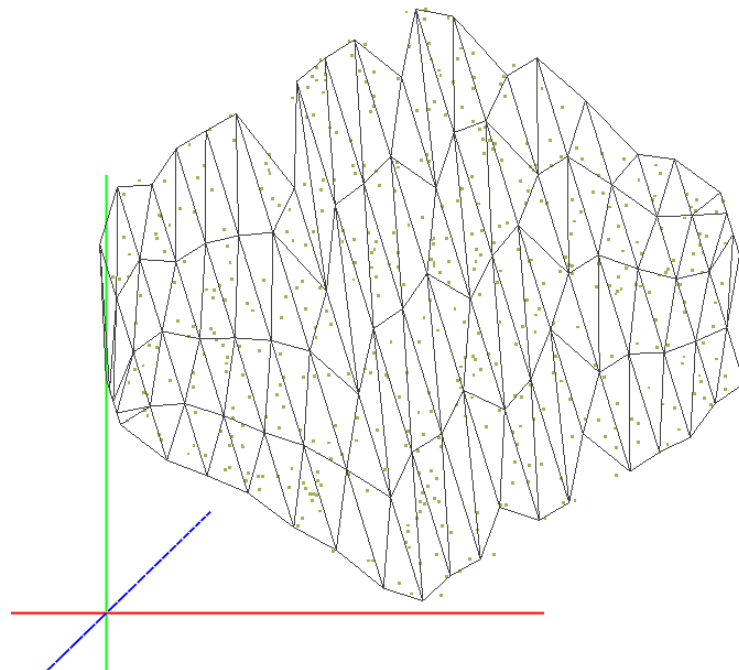


Fig. 3.23.: Nuage de points (vert) tels que $D = 500\text{pts}/m^2$ reconstruit avec la méthode de Bézier élagué. La densité du nuage de points est trop faible pour permettre un élagage sans erreurs.

se concentrant principalement sur l'étape d'élagage. Cette étape ne possède qu'un seul paramètre. Le processus d'ajustement de surface a quatre paramètres. Ils n'ont pas une grande influence sur les résultats. Le paramètre de profondeur est une borne supérieure qui est optimisée par un processus interne à l'algorithme pour l'adapter au nuage de points. Le paramètre de précision n'a pratiquement aucune influence sur la forme finale du maillage et est choisi uniquement pour limiter le temps d'exécution de l'algorithme. Les deux autres paramètres poids du point pw et échelle de l'exposant es n'acceptent que des entiers naturels comme valeurs. Les différentes combinaisons peuvent être testées manuellement. J'applique donc l'approche d'analyse de sensibilité décrite précédemment à la méthode de reconstruction de Poisson échantillonnée et les résultats numériques de l'étude sont présentés sur la figure 3.24.

depth	pointWeight	adaptative	Exj accuracy	facteur trimm	Densité	Régulier	Ratio échantil	Trou	Recalage	Courbure	Concavité	Ratio L/I	Bruit
4	4	1	0,001	0	0,2204	-0,0236	0,0395	0,1094	0,2274	0,7638	0,1332	3,8785	1,8679
6	4	1	0,001	0	0,3384	0,0475	-0,1010	0,1560	0,4589	0,4053	0,0775	1,4340	4,0706
8	4	1	0,001	0	0,2430	0,0465	-0,3671	-0,1363	0,2013	0,0614	-0,0301	0,3501	3,8680
10	4	1	0,001	0	0,2171	0,0511	-0,4385	-0,1443	0,1697	0,0166	-0,0476	0,0149	3,8760
12	4	1	0,001	0	0,2156	0,0514	-0,4380	-0,1435	0,1701	0,0164	-0,0475	0,0137	3,8785
14	4	1	0,001	0	0,2164	0,0514	-0,4380	-0,1434	0,1701	0,0168	-0,0467	0,0138	3,8787
8	1	1	0,001	0	0,2113	0,0500	-0,3812	-0,1383	0,1491	0,0487	-0,0358	0,3470	3,2539
8	2	1	0,001	0	0,2445	0,0411	-0,3748	-0,1391	0,1780	0,0551	-0,0340	0,3461	3,5801
8	5	1	0,001	0	0,2448	0,0523	-0,3637	-0,1348	0,2078	0,0633	-0,0290	0,3497	3,9624
8	4	2	0,001	0	0,2158	0,0408	-0,3754	-0,1391	0,1529	0,0519	-0,0338	0,3461	2,9944
8	4	3	0,001	0	0,1880	0,0135	-0,3809	-0,1377	0,0962	0,0369	-0,0357	0,3455	1,7666
8	4	1	0,0001	0	0,2453	0,0408	-0,3671	-0,1364	0,2014	0,0610	-0,0295	0,3501	3,8682
8	4	1	0,00001	0	0,2509	0,0404	-0,3671	-0,1364	0,2014	0,0612	-0,0302	0,3500	3,8682

Fig. 3.24.: Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la méthode de reconstruction Poisson échantillonnée avec notre méthode statistique basée sur la moyenne pour l'élagage. Voir 3.14 pour la légende.

L'automatisation de l'élagage avec une méthode basée sur une statistique de densité locale est probante au vu des résultats obtenus. En effet, de très bons résultats sont obtenus sur plusieurs critères avec les mêmes statistiques (médiane et moyenne) et ce quel que soit la valeur des autres paramètres. Cela confirme l'importance de l'étape d'élagage. Pour la suite de l'étude de sensibilité pour les autres paramètres d'ajustement de surface de l'algorithme de Poisson échantillonné, je me concentre sur les résultats obtenus avec les deux valeurs d'élagage de la moyenne et la médiane. J'observe deux comportements différents qui dépendent moins des paramètres que du critère étudié. En effet, pour les critères où de très bons résultats numériques sont observés, ils restent très bons, quelles que soient les valeurs des paramètres (la variation est de l'ordre de ± 0.02 pour l'ERM). Cependant, pour les autres critères, la variation entre les performances de différents jeux de paramètres est extrêmement large, elle peut plus que tripler. Ce phénomène n'est pas à attribuer aux valeurs des paramètres. Ces variations sont entièrement dues à la méthode qui n'est tout simplement pas robuste pour ces critères. La cause est le processus dans le cas du bruit. Pour les autres critères, cela est dû au processus d'élagage automatique qui est biaisé. Plus de détails sont donnés dans la section 4.1.

Après l'analyse des différentes combinaisons possibles, les paramètres d'exécution qui donnent des résultats optimaux sont les suivants : la profondeur de l'arbre est fixée à $td = 8$, poids du point $pw = 4$, échelle de l'exposant $es = 3$ pour la pondération adaptative et la précision $acc = 0.001$. La statistique tt pour l'élagage est la moyenne.

3.4.5 Limites de l'analyse de sensibilité pour les paramètres des méthodes

Les limites de notre étude et de nos hypothèses sont multiples. Le premier point est qu'il est possible que, pour une même méthode et un même ensemble de paramètres d'exécution, les résultats s'améliorent pour un critère, mais se dégradent pour d'autres. Il y a toujours un compromis à trouver entre les différents critères pour chaque méthode (les particularités sont discutées dans la section 3.4.3). Dans les cas les plus extrêmes, les valeurs optimales des paramètres sont totalement différentes et/ou en opposition pour différents critères.

Le deuxième point est le fait que chaque critère n'est pas représenté de façon égale dans la plupart des jeux de données. Par exemple, un problème de densité ou de bruit peut être bien plus fréquent dans un jeu de données qu'un problème de mauvais alignement. Comme l'étude se place dans un contexte de pipeline automatique pour lequel la vérification manuelle de tous les nuages de points est inenvisageable, tous les critères du modèle de feuille synthétique utilisé sont considérés avec une importance égale, ce qui peut ne pas correspondre à la réalité d'une acquisition.

Le troisième point concerne la méthode d'analyse de sensibilité en elle-même. En effet, la valeur optimisée des paramètres des méthodes de reconstruction n'est optimale que dans des cas où l'ensemble des paramètres est indépendant. La méthode optimale de choix de valeurs de paramètres est l'optimisation jointe. Il s'agit dans cette méthode d'optimiser simultanément l'ensemble des paramètres. Pour chaque méthode, j'ai détaillée les raisons pour lesquelles la méthode utilisée est suffisante et l'optimisation jointe des paramètres non nécessaire.

3.5 Méthodologie d'obtention des résultats comparatifs

Dans cette section, la méthode de comparaison entre les différents modèles géométriques de surface de feuille est expliquée. Dans un premier temps, je présente l'ensemble des données réelles. Ensuite, je décris les mesures de performance utilisées pour cette étude.

3.5.1 Données réelles

Afin d'évaluer les modèles géométriques dans des scénarios d'application réels, différentes plantes et variétés ont été scannées et/ou photographiées, collectées et mesurées pour obtenir les valeurs de la réalité terrain. Après avoir suivi le protocole d'acquisition décrit dans le chapitre 1, les données sont reconstruites (voir section 1.2) et segmentées à la main. Puis elles sont associées manuellement à la mesure de terrain réelle grâce à leurs noms et positions relatives (visible en photogrammétrie). En plus des données du pipeline pour le maïs, des données LiDAR issues de la foresterie sont utilisées. Ces nuages de points sont présentés et utilisés dans l'article de Hétroy-Wheeler et al. (2016). Ces derniers permettent de comparer une plus large variété de formes de feuilles et de conditions d'acquisition, ce qui permet d'obtenir une meilleure fiabilité sur l'étude des méthodes de reconstruction de la surface d'une feuille pour la mesure de l'aire. Elles permettent aussi d'étendre à un domaine connexe (la foresterie) la validité de cette étude.

Les plantes issues de la foresterie sont des jeunes pousses de châtaigner commun (*Castanea sativa* Mill.), de chêne rouge d'Amérique (*Quescus rubra* L.) et de bouleau blanc (*Betula pendula* Roth) (voir figure 3.25). Ces arbres ont été scannés par un Leica Geosystems HDS-6100 LiDAR depuis trois positions situées à 1m50. Les nuages de points ont été ensuite segmentés avec la méthode décrite dans Hétroy-Wheeler et al. (2016). Aucune feuille n'est plane. De plus certaines feuilles souffrent de problèmes d'alignement et de trous, notamment les nuages de points correspondant au châtaigner. Les feuilles de chêne sont toutes concaves et trois d'entre elles ont des données manquantes. Le bouleau présente beaucoup de bruit, mais il est notamment concentré sur les frontières des feuilles.

Les mesures de référence ont été réalisées en laboratoire avec un planimètre (CI-203, CID, Camas, WA). Nous avons ajouté nos données de maïs issu de nos expériences présentées en section 1.2.4. Les feuilles sont longues avec un fort ratio longueur/largeur et courbée. Elles montrent aussi des torsions. Dans le cas du LiDAR il y a quelques problèmes d'alignement qui sont limités, mais notables; dans le cas de la photogrammétrie, les densités sont irrégulières. Les mesures d'aire de

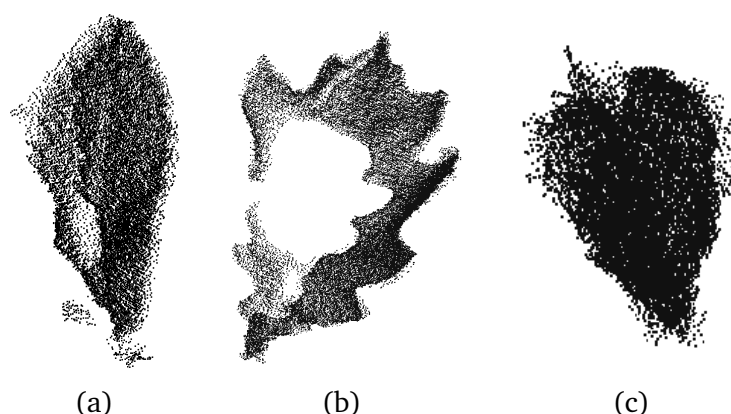


Fig. 3.25.: Exemple d'un nuage de points des jeux de données (a) châtaigner, (b) chêne et (c) bouleau (Hétroy-Wheeler et al., 2016).

feuille ont été mesurées par un planimètre Licor-LI-3100 (voir figures 3.26 et 3.28 pour l'illustration du processus d'acquisition et de mesure). Un récapitulatif des caractéristiques des nuages de points de la base de données utilisée est disponible dans les figures 3.11 et 3.27.

Jeu de données	Nb de feuille	Aire de la surface foliaire	Nb de points par nuage	Densité de points
Châtaigner	19	4 – 52 cm ²	964 – 18108	20 – 50 pts/cm ²
Chêne	10	9 – 110 cm ²	2950 – 45673	23 – 45 pts/cm ²
Bouleau	7	8 – 27 cm ²	3301 – 11745	31 – 35 pts/cm ²
Maïs (LiDAR)	12	36 – 202 cm ²	3541 – 39314	47 – 234 pts/cm ²
Maïs (photo)	10	36 – 202 cm ²	3334 – 20579	7 – 42 pts/cm ²

Tab. 3.11.: Caractéristiques générales des jeux de données réelles : nombre de feuilles, aire de la feuille mesurée, nombre de points par feuilles et densité de points.

3.5.2 Prétraitement des nuages de points de données réelles

Dans cette étude, on suppose que le nuage de points a été segmenté et on s'intéresse uniquement à une feuille individuelle. Cependant, les nuages de points peuvent toujours contenir du bruit et des points aberrants.

Comme contribution additionnelle, j'ai étudié l'impact de méthodes classiques de filtrage sur la reconstruction. Une partie de l'ensemble des données réelle a été filtré manuellement. Puis deux méthodes de filtrage automatique ont été sélectionnées et appliquées. La première est la méthode de suppression de points statistiquement aberrants (appelée en anglais Statistical Outlier Removal (SOR)) de Rusu et al. (2007) qui est basée sur la distance d'un point à ses voisins. Le filtre enlève les points du nuage qui sont à une distance du point le plus proche supérieure à l'écart-type standard calculé sur l'ensemble du nuage de points. La seconde méthode de filtrage automatique est la régression des moindres carrés transposés, décrite par Alexa

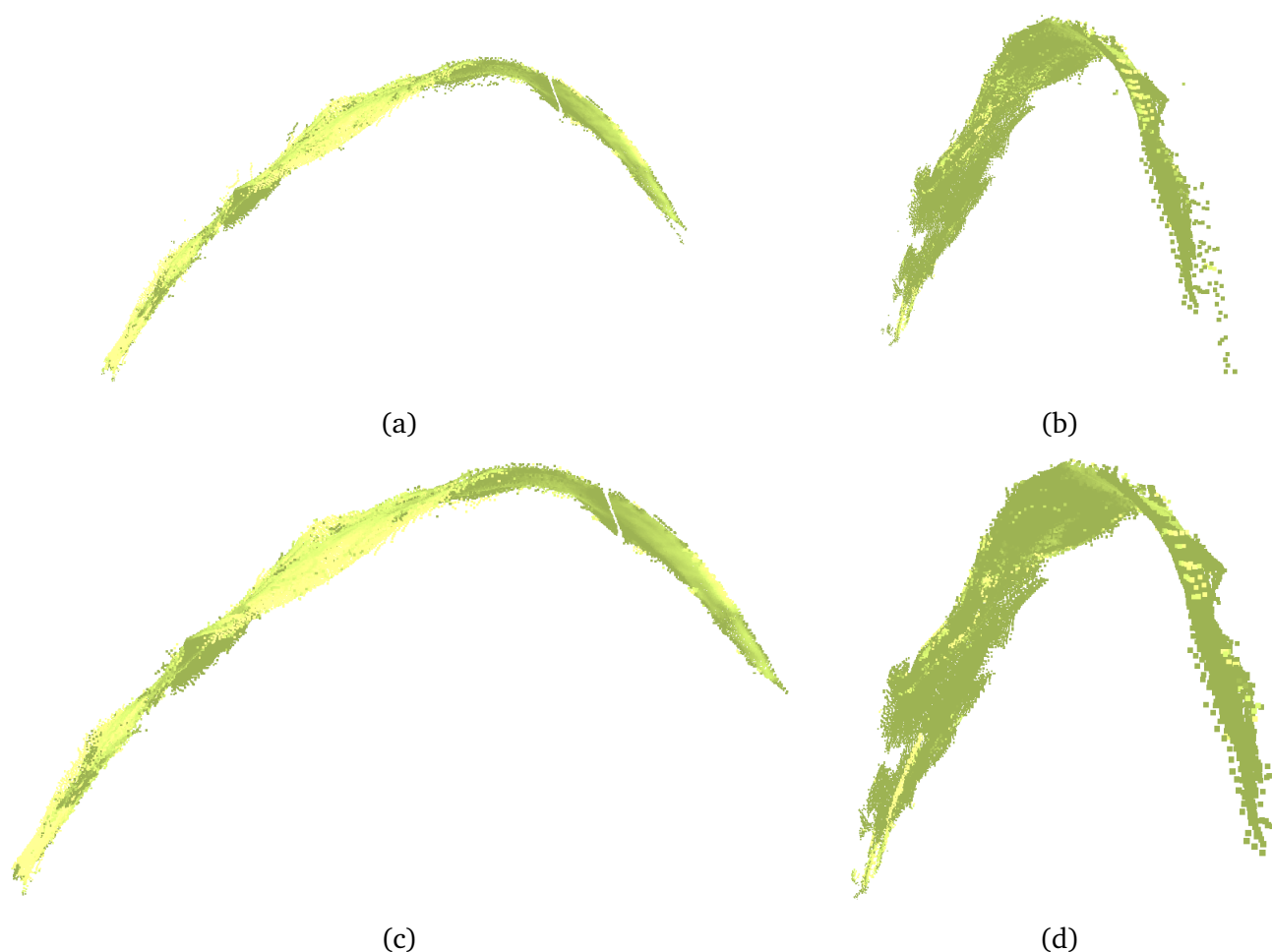


Fig. 3.26.: Nuages de points d'une même feuille issus de l'acquisition par LiDAR FARO (voir section 1.1). Nuage de points segmenté manuellement de façon **permissive** (a) vue latérale (b) vue oblique. Nuage de points segmenté manuellement de façon **stricte** (a) vue latérale (b) vue oblique. (voir à la section 4.2).

Jeu de données	Densité des nuages de points (points par cm^2)									
Châtaigner	38	23	31	31	29	34	38	23	28	20
	40	30	30	23	31	19	50	25	28	
Chêne	34	37	34	45	23	42	36	34	40	
Bouleau	34	35	33	34	34	34	31			
Maïs (photo)	72	70	82	88	92	47	69	178	180	234
Maïs (LiDAR)	40	36	124	48	73	94	41	76	159	40
	63	202								

Fig. 3.27.: Tableau récapitulatif des densités des nuages de points calculés avec CloudCompare en points par cm^2 pour tous les jeux de données réels.

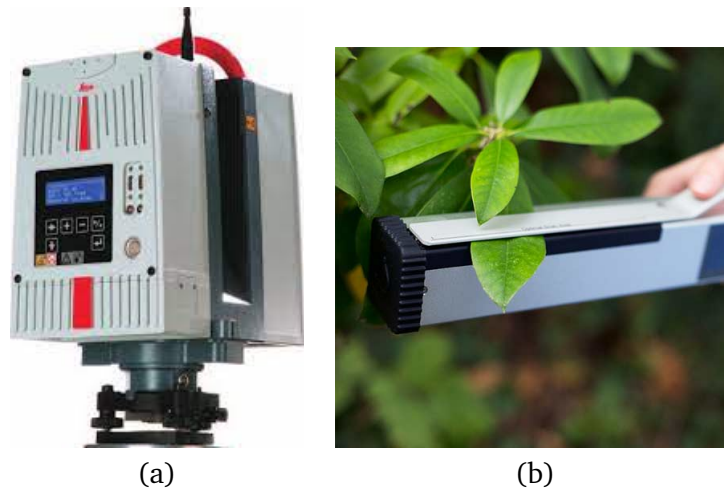


Fig. 3.28.: Image des instruments de mesure utilisés pour acquérir la base de données de nuages de points issue de l'article Hétroy-Wheeler et al. (2016). (a) Leica Geosystems HDS-6100, (b) planimètre (CI-203, CID, Camas, WA.).

et al. (2001) en anglais sous le nom Moving Least Square (MLS). Cette méthode est implémentée dans le logiciel CloudCompare et projette chaque point sur une surface lisse définie comme le point stationnaire de l'opérateur de projection. MLS peuvent aussi être utilisés pour sur- ou sous-échantillonner les nuages de points. Cependant dans notre cadre on se limite à la réduction/ l'élimination du bruit. Plus de détails sont disponibles dans les sections suivantes sur le fonctionnement de ces deux méthodes.

Au total, les données réelles ont été reconstruites sans prétraitement ou une partie voir un filtrage manuel, ce qui correspond à la création de deux nouveaux ensembles de données réelles. Puis les données réelles sont à nouveau filtrées avec soit la méthode SOR, soit la méthode MLS, soit la succession des méthodes SOR puis MLS. Cela représente au total cinq versions différentes du même ensemble de données initial et permet de comparer les effets des prétraitements sur les résultats de reconstruction et de mesure de l'aire de la feuille.

Régression des moindres carrés transposés (MLS)

La méthode de la régression des moindres carrés transposés (MLS) est utilisée de multiples façons dans l'étude des nuages de points. Elle permet de faire du sur-échantillonnage ou sous-échantillonnage de nuage de points. Dans notre cas on s'y intéresse pour ses propriétés lissantes typiques des surfaces implicites. L'implémentation utilisée est celle de PCL qui se base sur l'article Alexa et al. (2001) par l'intermédiaire du Wrapper de Cloudcompare. On présente brièvement le principe de fonctionnement de la méthode et les propriétés attendues sur nos nuages de points après le filtrage. Je recommande pour une présentation rapide des méthodes des moindres carré (Least Square (LS)) et des moindres carrées pondérées

(Weighted Least Square (WLS)) la lecture de Nealen (2004). Ces deux méthodes sont en effet la base de la formulation de l'algorithme MLS.

De façon générale, la méthode est basée sur le principe de la géométrie différentielle disant qu'une surface globalement et infiniment continue est en chacun de ses points localement infiniment continue. Le deuxième principe de base utilisé est la minimisation de l'erreur géométrique entre la surface approchée qui est calculée et la surface théorique dont le nuage de points obtenu est l'échantillonnage.

On peut donc considérer localement la surface point par point et résoudre localement l'équation minimisant l'erreur entre la position des points et la surface continue locale pondérée par la distance au point considéré. La méthode utilisée est rendue plus robuste grâce à l'utilisation des plans tangents locaux de projection qui servent à écrire dans un domaine local les équations de minimisation d'erreur géométrique. La famille de fonctions solutions dans notre cas est celle des polynômes.

On opère les calculs sur l'ensemble des points du nuage de points. On fusionne l'ensemble des résultats locaux en un résultat global, en considérant les résultats sur leur propre support.

Dans les faits, on utilise les paramètres par défaut de la méthode MLS proposés par Cloudcompare. Le rayon de voisinage, appelé Search Radius dans le logiciel, est calculé par rapport à chaque nuage de point automatiquement. Les paramètres par défaut sont donnés comme les plus performants pour du lissage d'après l'étude de performance réalisée dans Nealen (2004).

Avec ces paramètres, on garde le même nombre de points, mais on s'attend à une réduction significative du bruit et un lissage des surfaces des feuilles (voir figure 3.29).

Méthode de suppression de points statistiquement aberrants (SOR)

La méthode de suppression de points statistiquement aberrants (Statistical Outlier Removal (SOR)) est basée sur l'étude locale statistique de la distance de chaque point à ses voisins comparée à une limite adaptative aux caractéristiques locales de ces distances. Les deux paramètres de l'algorithme sont le nombre de points voisins n à utiliser pour le calcul des statistiques et le coefficient sigma de proportionnalité σ tel que : *seuil = moyenne distances + σ * écart - type distances*.

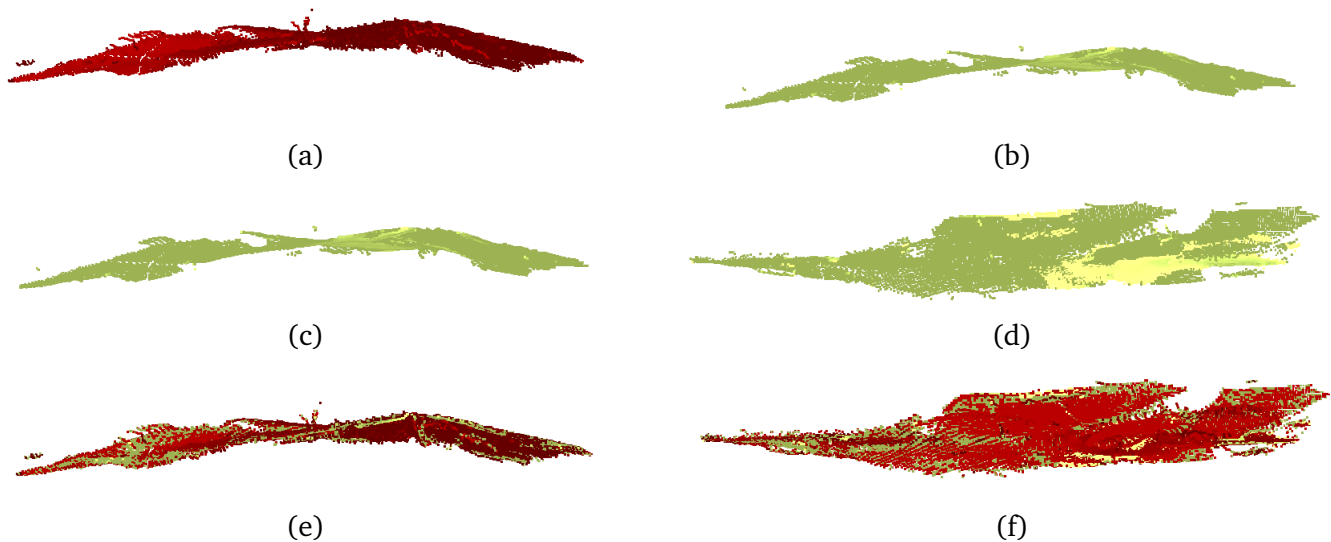


Fig. 3.29.: Filtrage par MLS sur un nuage de points de feuille issue de notre expérimentation pour l'acquisition de données sur le maïs par LiDAR FARO. Nuage de point original en rouge (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Nuage de point filtré en vert par MLS (c) vue latérale, (d) vue du dessus. Nuage de point original (rouge) superposé au nuage de point filtré par MLS (vert) (e) vue latérale, (f) vue du dessus.

C'est-à-dire, que pour chaque point du nuage de points, on sélectionne n voisins pour lesquels on calcule la distance euclidienne au point étudié. On utilise la distribution de distance obtenue pour calculer la moyenne et l'écart type associé. On peut alors calculer un seuil *seuil* maximum de distance au point considéré au-delà duquel le point est considéré comme un point aberrant et est donc filtré. On effectue cette opération sur tous les points du nuage de points.

Les paramètres choisis pour notre exécution sont $n = 10$ et $\sigma = 1.5$.

La principale propriété de ce filtre est d'enlever les points aberrants du nuage de points (voir figure 3.30), contrairement au précédent qui diminue le bruit.

3.5.3 Méthodologie

On a évalué la précision des méthodes sélectionnées en comparant leurs résultats aux valeurs acquises sur la réalité terrain. Pour chaque paramètre on utilise les paramètres optimaux issus de l'analyse de sensibilité globale faite auparavant. Chaque méthode a été appliquée sur les données présentées dans la section 2.4. La base de données de test est conçue pour prendre en compte l'aspect aléatoire de la génération de nuages de points synthétique. Pour chaque jeu de données issues d'acquisitions réelles, les méthodes ont été testées sur les versions originales et prétraitées des nuages de points (voir la sous-section 3.5.2).

Une fois la reconstruction de surface effectuée pour chaque méthode, les surfaces et

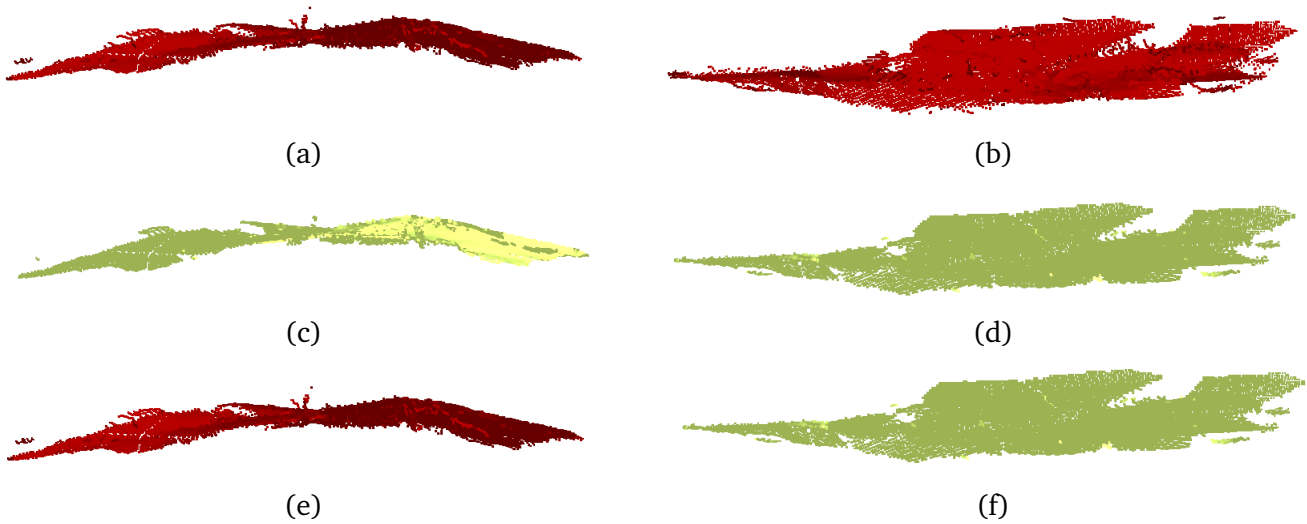


Fig. 3.30.: Filtrage par SOR sur un nuage de points de feuille issue de notre expérimentation pour l'acquisition de données sur le maïs par LiDAR FARO. Nuage de point original en rouge (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Nuage de point filtré en vert par SOR (c) vue latérale, (d) vue du dessus. Nuage de point original (rouge) superposé au nuage de point filtré par SOR (vert) (e) vue latérale, (f) vue du dessus.

maillages résultats sont évalués avec l'Erreur Relative Moyenne (ERM) et l'Erreur Relative Absolue Moyenne (ERAM) pour chaque jeu de données:

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ER_i \quad (3.1)$$

où n est le nombre de nuages de points considérés dans l'ensemble de données et l'erreur relative pour le $i^{ème}$ nuage de points ER_i est :

$$ER_i = \frac{\|A_{e_i} - A_{t_i}\|}{A_{t_i}} \quad (3.2)$$

où A_{e_i} est l'aire de la surface estimée et A_{t_i} l'aire de la surface mesurée en vérité terrain,

et

$$ERAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ERA_i \quad (3.3)$$

où n est le nombre de nuages de points considérés dans l'ensemble de données et l'erreur relative pour le $i^{ème}$ nuage de points ERA_i est :

$$ERA_i = \frac{A_{e_i} - A_{t_i}}{A_{t_i}} \quad (3.4)$$

où A_{e_i} est l'aire de la surface estimée et A_{t_i} l'aire de la surface mesurée en vérité terrain.

L'ERM permet d'obtenir des informations sur les tendances d'évaluation de la mesure. Suivant le signe du résultat de l'Erreur Relative (ER), on peut déterminer si on tend vers une sous-évaluation ou au contraire une sur-évaluation de la mesure.

L'ERAM permet d'obtenir des informations sur la norme moyenne de l'erreur indépendamment de la tendance de l'erreur. Elle permet d'éviter des phénomènes de compensation qui peuvent se produire dans le calcul de l'ERM.

Dans la suite de la thèse, je n'utilise que les tableaux présentant l'ERM. En effet, pour chaque résultat, le phénomène de compensation est évalué et il n'est jamais suffisant pour changer les conclusions obtenues avec l'ERM. Les deux valeurs et l'étude de compensation sont présentées en annexe A.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, différentes méthodes de reconstruction de surface à partir d'un nuage de points sont présentées ainsi que deux méthodes de filtrage classique. Certaines méthodes sont implémentées pour cette étude (Modèle de feuille de Bézier et Bézier élagué) et les autres sont disponibles dans des logiciels ou bibliothèques en libre accès et ouverts (Open3D, CloudCompare, PCL,...). Les méthodes ayant au moins un paramètre dépendant de caractéristiques intrinsèques des nuages de points d'entrée sont automatisées grâce à l'implémentation d'une méthode permettant de choisir de manière optimisée ce paramètre (Triangulation 2.5D, Alpha-Shape et reconstruction de Poisson échantillé). La méthodologie pour l'étude comparative des différentes méthodes de reconstruction et les mesures de performances ont été explicitées. Les nuages de points 3D réels ajoutés à l'étude issus de la foresterie ont été décrits. L'analyse de sensibilité de chaque méthode est présentée afin de garantir l'obtention de résultats optimaux de mesure.

De plus, l'ajout aux méthodes de reconstruction de surface Triangulation 2.5D, Alpha-Shape et Poisson échantillé de méthodes automatiques de choix de paramètres permet une automatisation complète du traitement des données. Cependant, ces méthodes peuvent sans aucun doute être elles-mêmes améliorées pour être plus robustes. Plus de détails seront donnés dans le chapitre suivant.

La géométrie des feuilles de test et les modalités d'acquisition sont très variées. Cependant, les feuilles composées ne sont pas du tout testées dans notre analyse. L'étude de ces formes de feuilles demanderait sans aucun doute une adaptation profonde du protocole de l'étude comparative et du choix des méthodes de reconstruction de surface.

Les limitations de notre étude comparative sont dues en majeure partie aux choix des méthodes de reconstruction de surface qui sont sélectionnées. En effet, il existe

de nombreuses méthodes de reconstruction de surface. Cependant, beaucoup sont soit trop spécialisées, soit non disponibles en libre accès. Une ouverture et une mise à disposition des implémentations permettraient de disposer de nouvelles méthodes, peut-être moins généralistes, mais plus adaptées aux géométries des feuilles.

En dehors de la méthodologie qui se base quantitativement sur la mesure de l'aire et qualitativement sur la forme des maillages, et outre le fait que c'est cette mesure de surface foliaire qui est intéressante biologiquement. Il est possible d'utiliser d'autres mesures pour déterminer les performances des méthodes de reconstruction de surface, par exemple, la longueur et la largeur maximales de la feuille. Une autre stratégie de vérification de la validité de la reconstruction est de comparer la surface reconstruite au modèle 3D de la vérité terrain de la feuille. Ce qui permettrait de mesurer la forme de la reconstruction de manière quantitative et non plus qualitative.

En suivant la méthodologie expliquée dans ce chapitre, les résultats détaillés dans le chapitre 4 sont obtenus.

Analyse des résultats de l'approche comparative

L'ensemble de la méthodologie de comparaison a été présentée dans le chapitre précédent et les données utilisées pour les tests présentées dans la section 2.4.3 (données synthétiques) et dans le chapitre 1 et la section 3.5.1 (données réelles). Dans ce chapitre, je présenterai l'ensemble des résultats de mes expérimentations obtenues pour toutes les méthodes ainsi que les conclusions que j'en ai tiré. Tout d'abord, je décrirai le comportement des méthodes par rapport à chaque critère de mon modèle de nuage de points 3D de feuille grâce aux résultats sur les données synthétiques. Ensuite, je détaillerai l'influence sur les résultats des méthodes de prétraitement. Enfin, je présenterai les performances de chaque méthode pour les données réelles. Ceci me permettra de conclure à la fois sur la robustesse et le comportement des méthodes, mais aussi de valider les comportements décrits sur les données synthétiques.

4.1 Résultats sur les données synthétiques

L'influence de chaque critère du modèle de nuage de points sur l'estimation de la mesure de l'aire de la surface de la feuille synthétique est illustrée dans les figures 4.1 et 4.2. Chaque point de chaque courbe représente la moyenne des résultats de 10 tests obtenus avec les mêmes valeurs de critères (voir la description de la base de données de tests synthétiques dans la sous-section 2.4.3).

On peut noter en premier lieu que les méthodes produisent des résultats similaires sur des nuages de points de forme simple et de bonne qualité (ERM entre -0.2 et 0.2) ce qui correspond à un nuage de points dont les critères sont à la valeur par défaut dans notre modèle. Il n'y a que la méthode de reconstruction incrémentale qui sous-estime ici systématiquement les mesures d'aire de surface d'environ 25%. C'est un problème qui vient du choix des paramètres dans l'analyse de sensibilité.

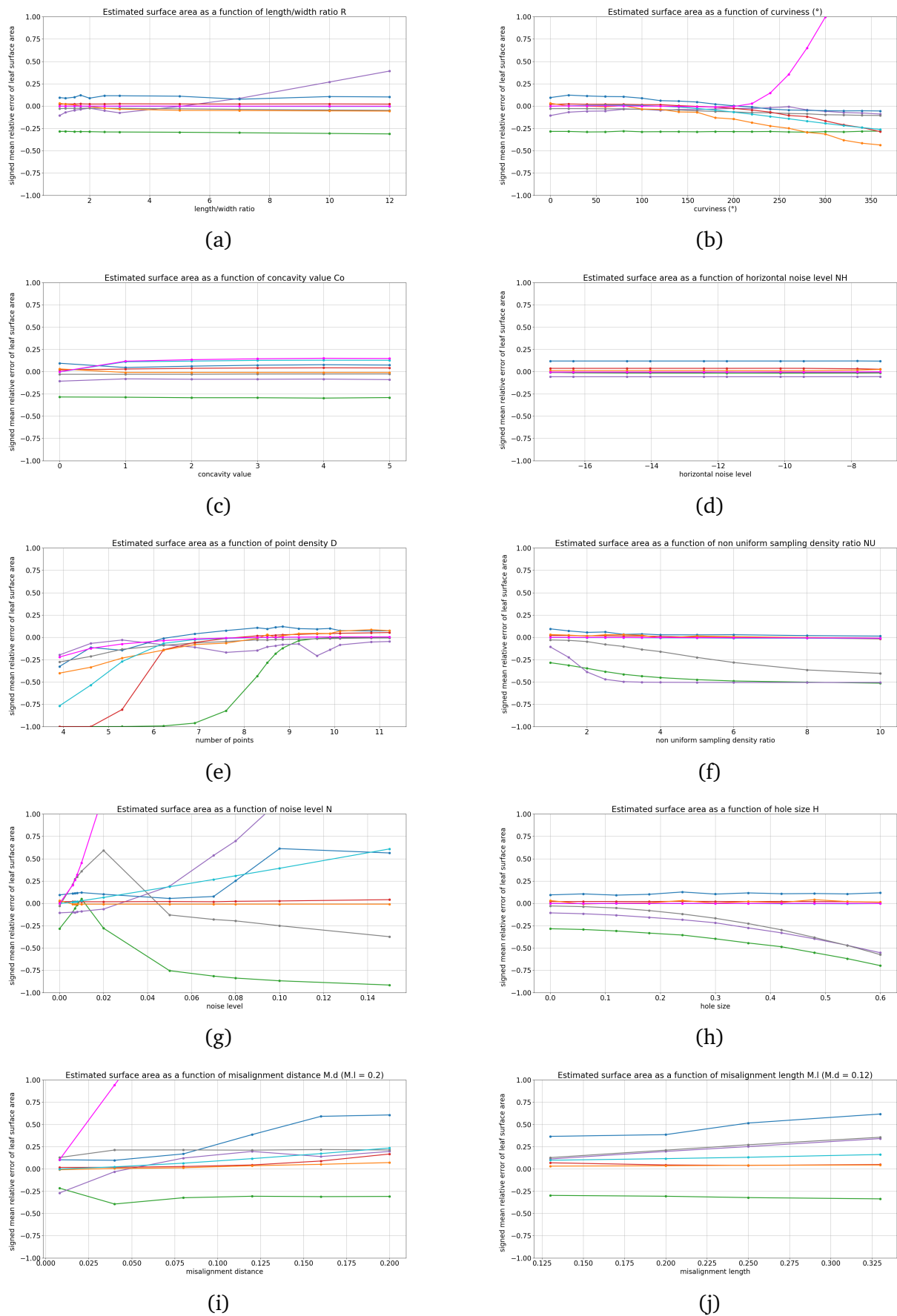
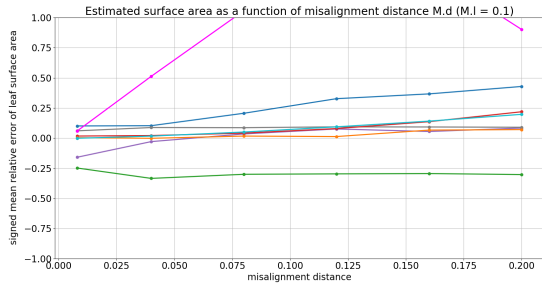
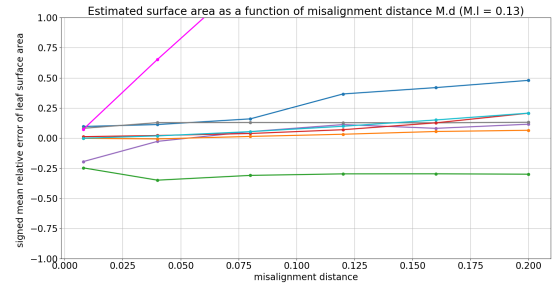


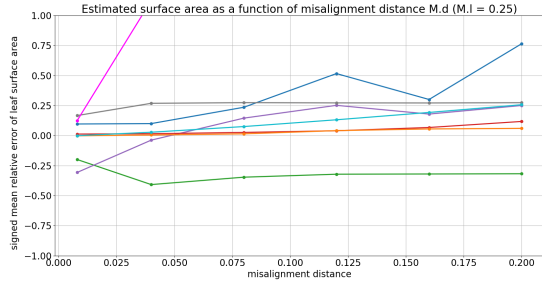
Fig. 4.1.: Influence de chaque critère sur l'estimation de la surface foliaire avec les méthodes de reconstruction **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson échantonné**: (a) R, (b) Cu, (c) Co, (d) S.n, (e) D, (f) NU, (g) N, (h) H, (i) M.d, (j) M.l.



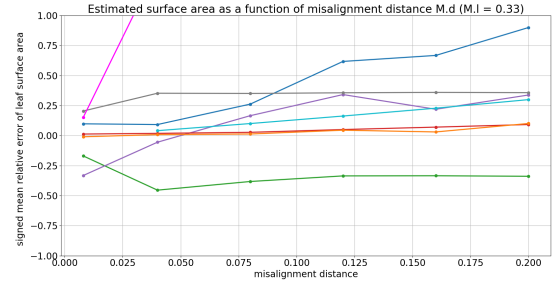
(a)



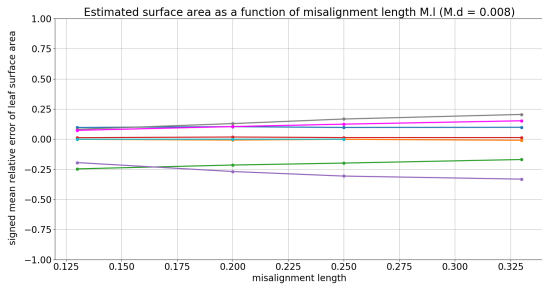
(b)



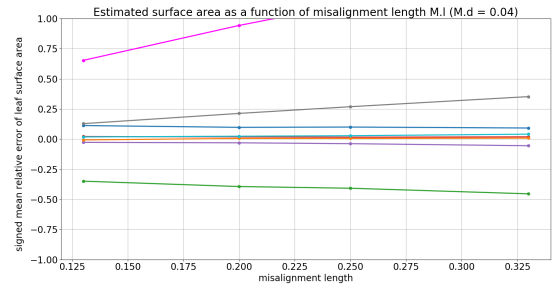
(c)



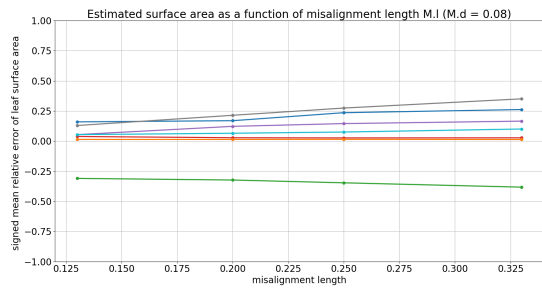
(d)



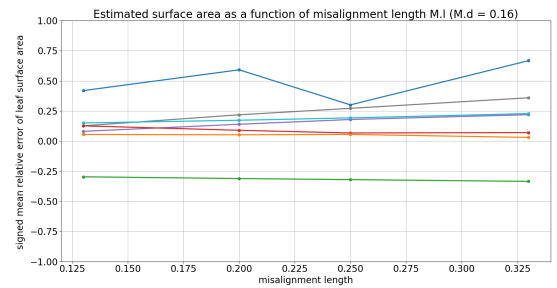
(e)



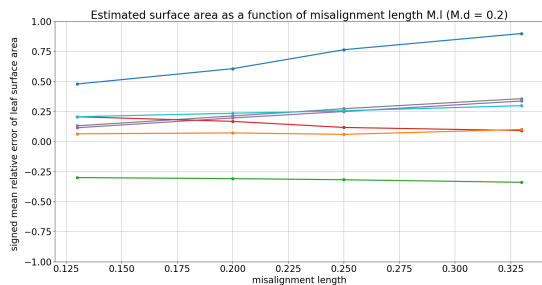
(f)



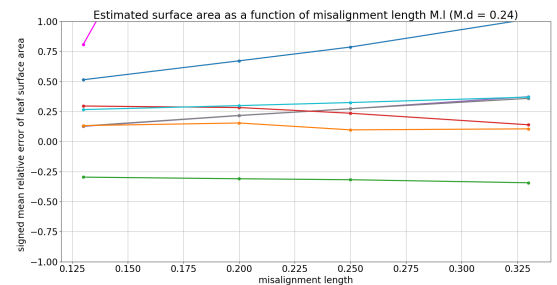
(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. 4.2.: Influence de différentes valeurs de **M.d** et **M.l** sur l'estimation de la surface foliaire avec les méthodes de reconstruction **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson écrantée**.

4.1.1 Ratio longueur/largeur

De façon générale, ce critère a un impact faible sur l'estimation de l'aire de la surface d'une feuille. En effet l'ERM varie très peu (environ 0.05) sauf pour la reconstruction de Poisson. Ceci s'explique par l'étape d'élagage basée sur la densité locale qui est utilisée. En effet, la densité n'est pas homogène dans l'espace lorsque le ratio est différent de 1. La direction de la longueur est alors privilégiée en termes de densité de points. La répartition de la valeur de densité locale est alors plus haute dans la direction privilégiée que dans la direction orthogonale. Par conséquent, la forme est mieux définie dans la direction de la longueur que dans la direction de la largeur. Des illustrations des résultats de reconstruction sur cette forme sont fournies dans la figure 4.3.

4.1.2 Courbure

Les méthodes les plus robustes à la courbure sont le BPA, la reconstruction incrémentale et la méthode de Poisson (voir figure 4.4), qui produisent des maillages consistants même pour des feuilles très courbées. Les méthodes Modèle de feuille de Bézier, Bézier élagué et Triangulation 2.5D supposent que la feuille est similaire à une élévation de surface. C'est pourquoi ces méthodes ne sont pas adéquates pour reconstruire des courbes de plus de 180 ° où des plis apparaissent et la précision décroît (voir figure 4.5). Au seuil des 360 °, les méthodes Alpha-shape et B-Spline produisent des maillages erronés (voir figure 4.6). Même si l'estimation de l'aire à partir de leurs reconstructions de surface est précise par rapport à la vérité terrain, ces méthodes ne peuvent pas être utilisées dans ces conditions. De plus Alpha-shape produit des volumes 3D qui ne prennent pas en compte la courbure, ce qui explique pourquoi la précision diminue avec l'augmentation de la courbure.

4.1.3 Concavité

D'après nos expériences, toutes les méthodes donnent presque la même estimation constante de la mesure de l'aire de la surface dans cet ensemble de données basé concavité. Même si les méthodes Modèle de Feuille de Bézier et Bézier élagué ne sont pas supposées théoriquement pouvoir correctement capturer les formes concaves. On suppose que cette réussite numérique est due à l'algorithme de construction des concavités utilisé qui les distribue de façon symétrique autour de la frontière (voir figure 4.7). Cette précision pourrait très bien ne pas être aussi bonne avec d'autres types de concavités. Comme la triangulation 2.5D est très proche de la triangulation de Delaunay le maillage résultant est très proche de l'enveloppe convexe du nuage de points ce qui explique une surestimation (voir figure 4.8). La méthode Alpha-shape

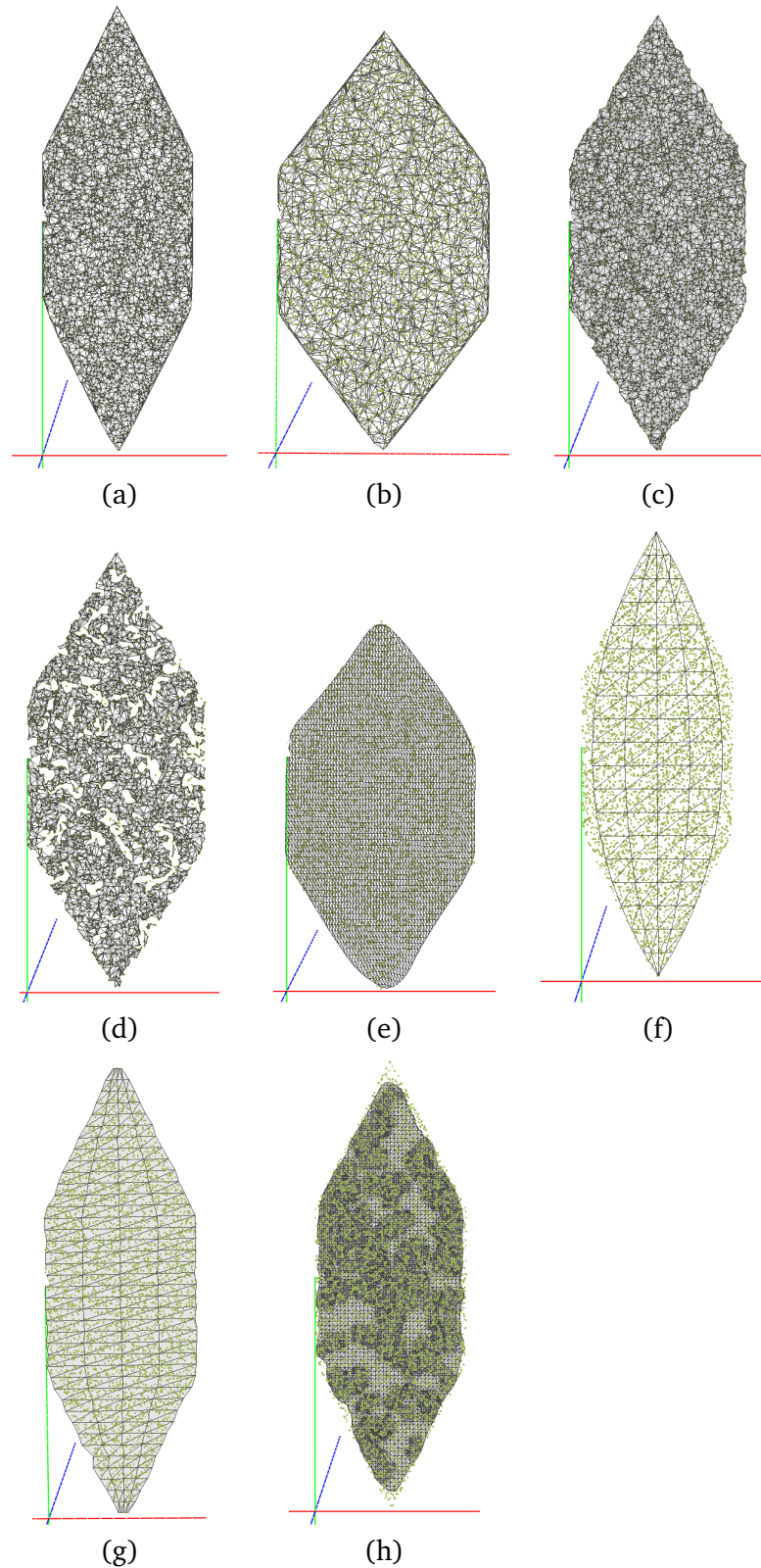


Fig. 4.3.: Reconstructions de surface à partir de nuages de points (vert) qui ont une valeur de R non par défaut. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $R = 3$ avec la Triangulation 2.5D, (b) $R = 2, 5$ avec l'Alpha-Shape, (c) $R = 2, 5$ avec la BPA, (d) $R = 2, 5$ avec la Reconstruction Incrémentale, (e) $R = 2$ avec B-Spline, (f) $R = 3$ avec le modèle de feuille de Bézier, (g) $R = 3$ avec la Bézier élagué, (h) $R = 3$ avec la reconstruction de Poisson écranté.

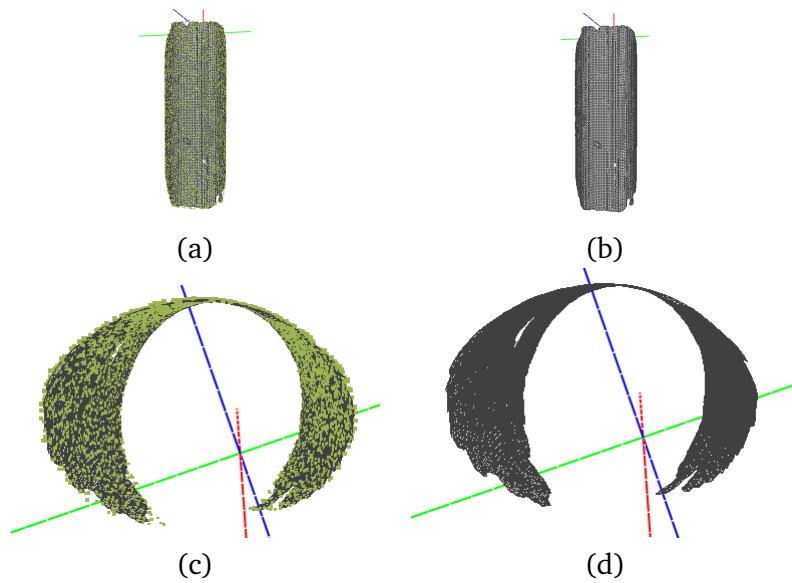


Fig. 4.4.: Reconstruction de Poisson écrantée sur le nuage de points tel que $Cu = 340^\circ$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Surface et nuages de points (vert) superposés (a) vue du dessus, (b) vue arrière. Surface (c) vue du dessus, (d) vue arrière.

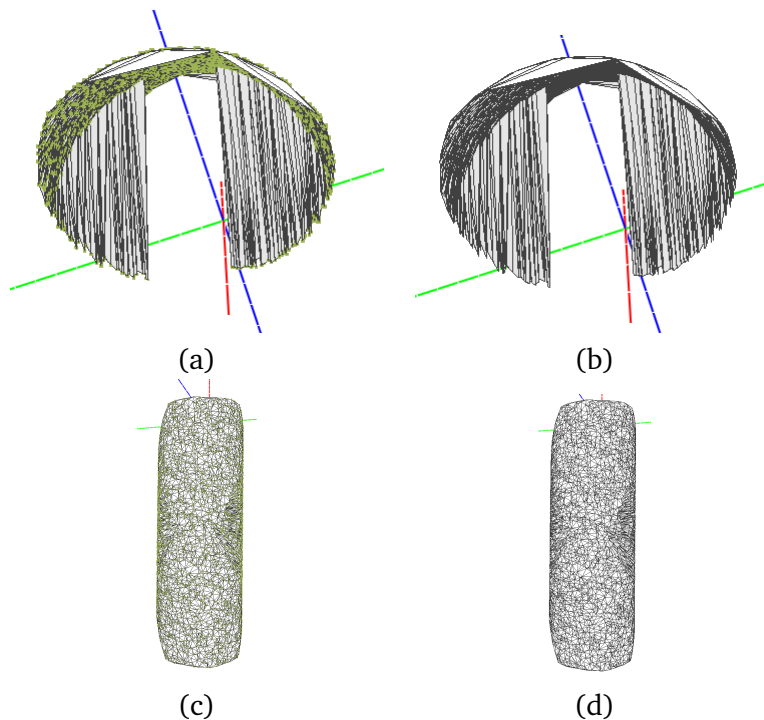


Fig. 4.5.: Reconstruction de la Triangulation 2.5D sur le nuage de points tel que $Cu = 340^\circ$ qui échoue. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Surface et nuages de points (vert) superposés (a) vue du dessus, (b) vue arrière. Surface (c) vue du dessus, (d) vue arrière.

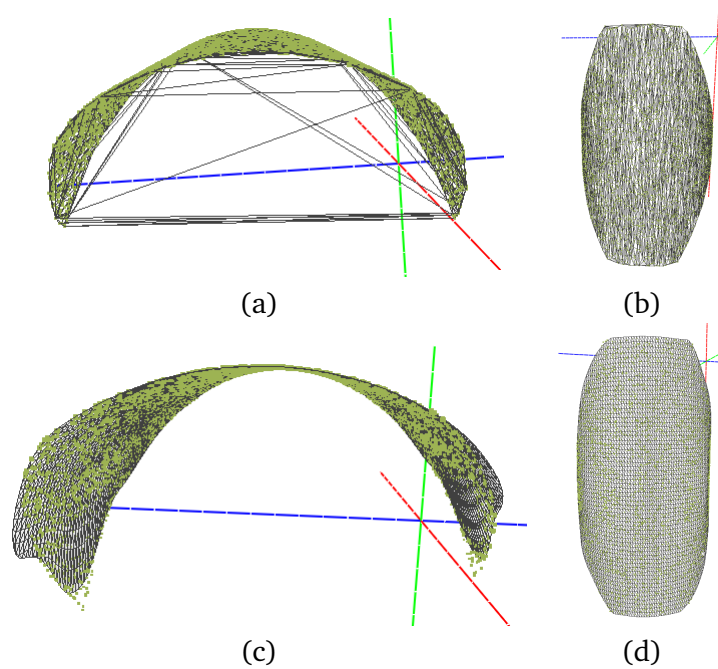


Fig. 4.6.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction Alpha-Shape sur le nuage de points (vert) $Cu = 180^\circ$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Reconstruction B-Spline sur le nuage de points (vert) $Cu = 180^\circ$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.

surestime aussi l'aire de la surface à cause du métaparamètre choisi qui n'est pas adapté dans ce cas comme montré par l'analyse de sensibilité de l'algorithme réalisé (voir figure 4.9). Des illustrations des résultats de reconstruction avec les autres méthodes sont données dans la figure 4.10.

4.1.4 Motif d'échantillonnage

Toutes les méthodes sont stables avec un échantillonnage régulier quel que soit le niveau de bruit horizontal $C.n$ donné.

4.1.5 Densité d'échantillonnage

Comme on pouvait s'y attendre, dans le cas d'une densité de points suffisamment élevée (≥ 1000 points), les estimations de surface sont précises pour toutes les méthodes sauf pour la Reconstruction incrémentale qui a besoin d'environ 6000 points. Quand la densité de points diminue, toutes les méthodes tendent à sous-estimer l'aire de la surface à cause de l'apparition de trous dans la reconstruction, car la frontière du nuage de points n'est pas suffisamment caractérisée. Les méthodes les plus robustes par rapport à une densité faible sont la méthode de reconstruction

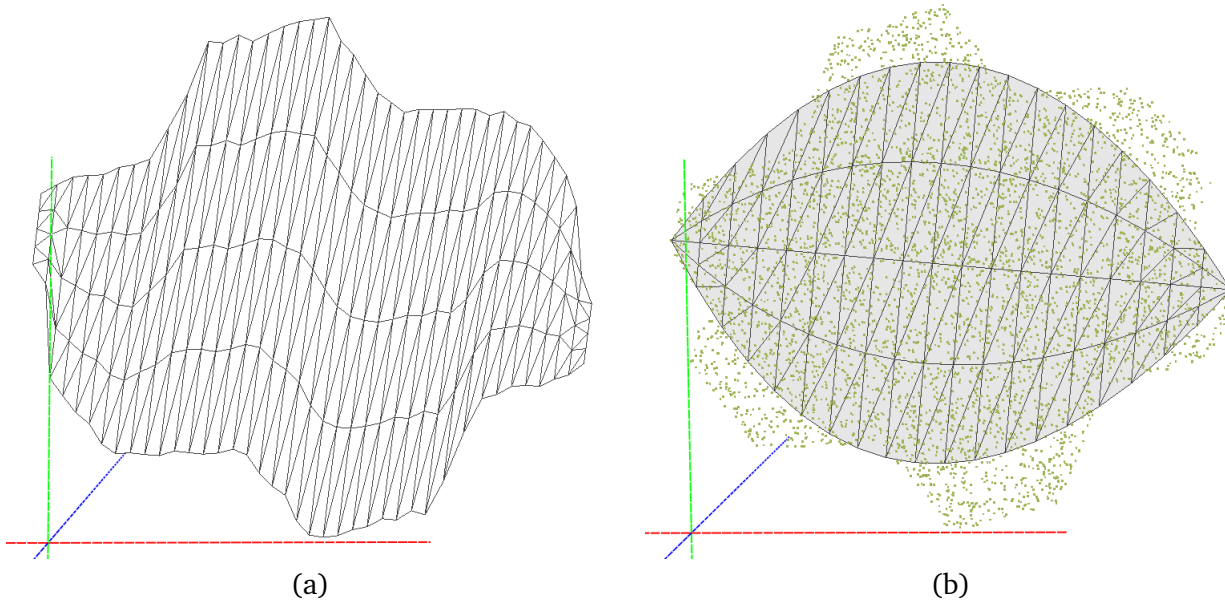


Fig. 4.7.: Reconstruction (a) de Bézier élagué et (b) du modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points (vert) synthétique tel que $\mathbf{Co} = 1$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.

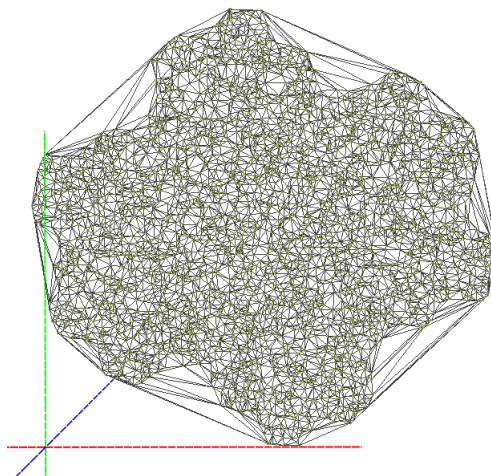


Fig. 4.8.: Reconstruction par la Triangulation 2.5D du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{Co} = 2$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.

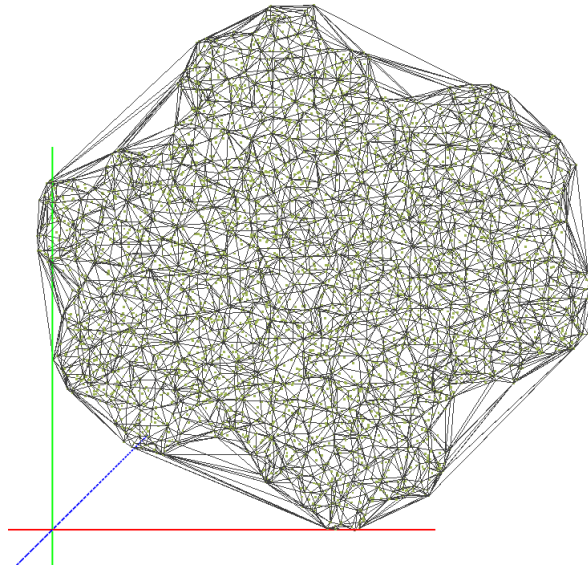


Fig. 4.9.: Reconstruction par Alpha-Shape du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{Co} = 3$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.

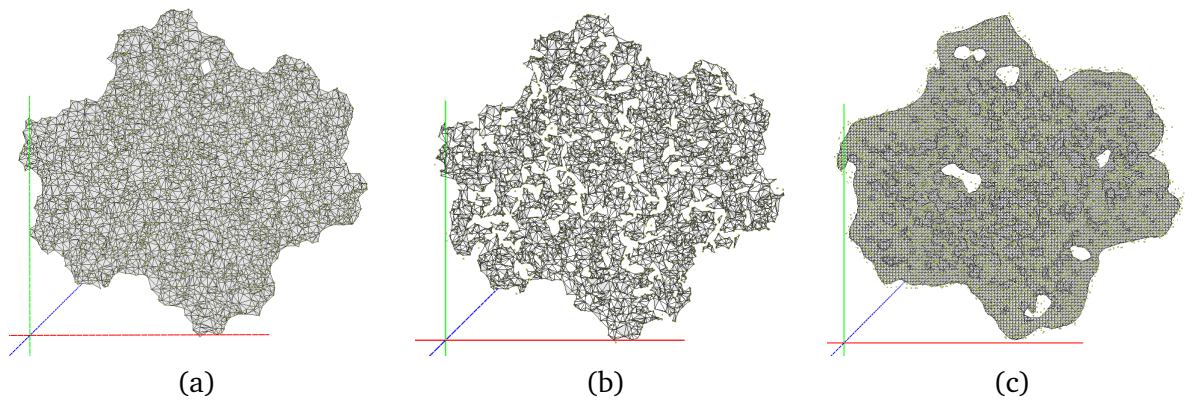


Fig. 4.10.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la BPA du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{Co} = 3$. Reconstruction par la reconstruction incrémentale du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{Co} = 3$. Reconstruction par la reconstruction de Poisson écrantée du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{Co} = 1$.

de Poisson et Triangulation 2.5D (voir illustration des reconstructions dans la figure 4.11).

4.1.6 Échantillonnage non uniforme

Toutes les méthodes sont stables par rapport à un échantillonnage non uniforme (c'est-à-dire ratio d'échantillonnage différent de 1) excepté la Reconstruction incrémentale, BPA et Poisson (illustration des surfaces pour les méthodes robustes dans la figure 4.12). La reconstruction incrémentale et BPA sont dépendantes de l'uniformité des distances entre les points afin de créer un maillage par l'intermédiaire de leur paramètre : respectivement μ , le rayon pour le premier et ρ pour le second. Quant à la reconstruction de Poisson, les paramètres statistiques de densité utilisés dans l'étape d'élagage sont biaisés. La zone du nuage de points où la densité est la plus faible est alors filtrée (voir figure 4.14 pour les résultats avec les méthodes non robustes).

4.1.7 Bruit d'acquisition

Les modèles paramétriques sont de loin les plus robustes aux bruits (voir illustration des surfaces résultats dans la figure 4.14). Les méthodes de Bézier élagué et de Modèle de feuille de Bézier donnent des résultats précis même en présence d'un niveau de bruit élevé. La méthode B-Spline produit des résultats précis à condition que le bruit soit sous un seuil maximal (de 0.07), au-delà de cette valeur, elle tend à surestimer l'aire de la feuille.

Comme la Triangulation 2.5D fait une triangulation directe du nuage de points d'entrée, elle produit de nombreux triangles pour lesquelles la hauteur est directement corrélée au niveau de bruit (voir figure 4.15). Cela augmente artificiellement l'aire calculée qui est donc toujours surestimée. Le même problème se produit dans le cas de la Reconstruction incrémentale, mais dans ce cas une sous-estimation a lieu, car la méthode limite la taille des triangles créés, ce qui donne un maillage troué (voir illustration des reconstructions dans la figure 4.17. Pour un très petit niveau de bruit, Alpha-Shape crée un volume borné par 2 surfaces parallèles et d'épaisseur très fine qui se rapproche bien de l'hypothèse d'approximation qui est faite (l'aire de la surface du maillage est le double de l'aire attendue de la feuille). Pour un niveau de bruit plus élevé, le volume n'est plus du tout fin et cette approximation ne tient plus. Elle entraîne une surestimation toujours plus grande quand le bruit augmente (voir figure 4.18).

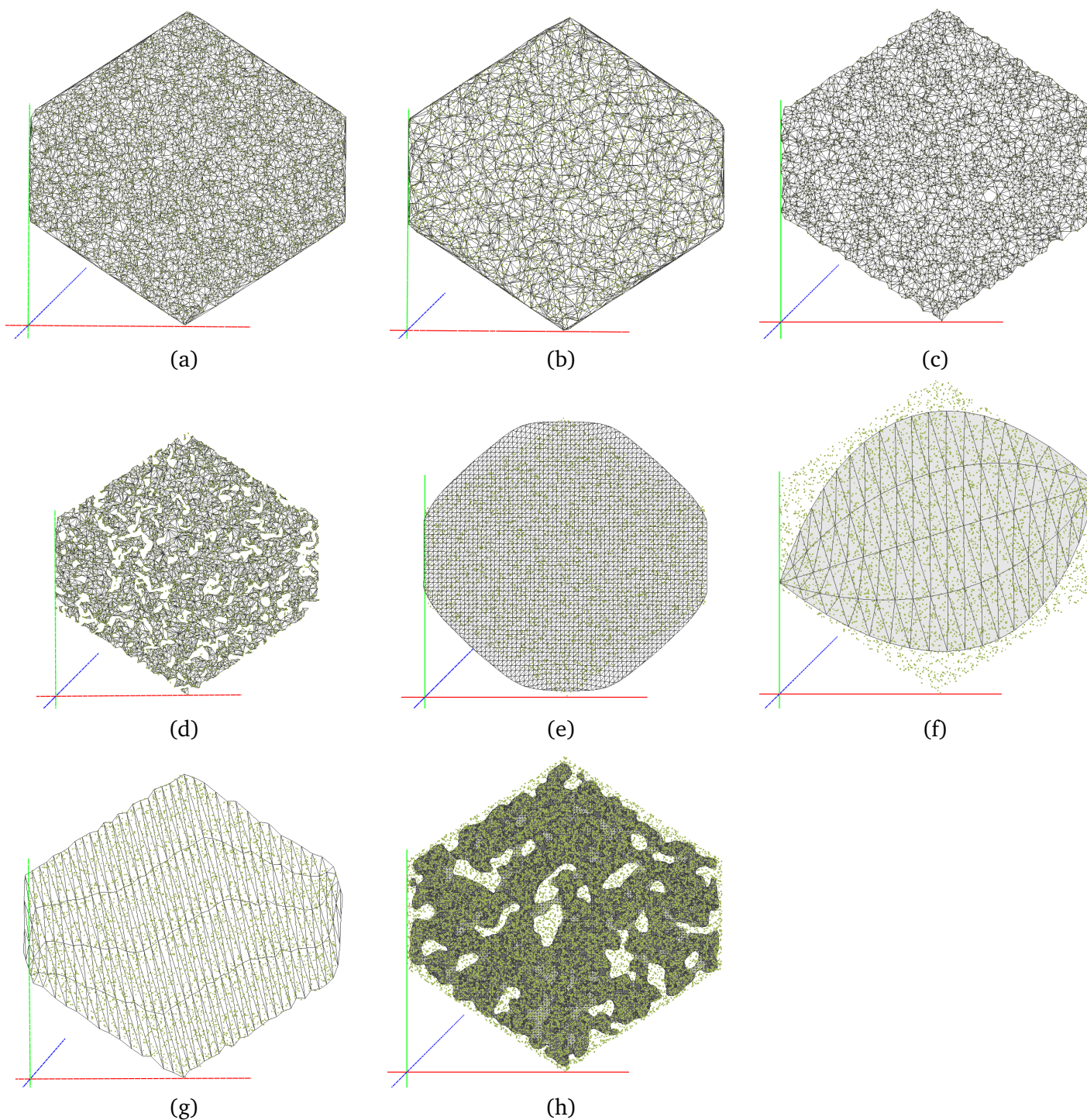


Fig. 4.11.: Reconstructions de surface à partir de nuages de points qui ont une valeur de D non par défaut. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $D = 7000 \text{ points}/m^2$ avec la Triangulation 2.5D, (b) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec l'Alpha-Shape, (c) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec la BPA, (d) $D = 6000 \text{ points}/m^2$ avec la Reconstruction Incrémentale, (e) $D = 4000 \text{ points}/m^2$ avec B-Spline, (f) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec le modèle de feuille de Bézier, (g) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec la Bézier élagué, (h) $D = 15000 \text{ points}/m^2$ avec la reconstruction de Poisson écranté.

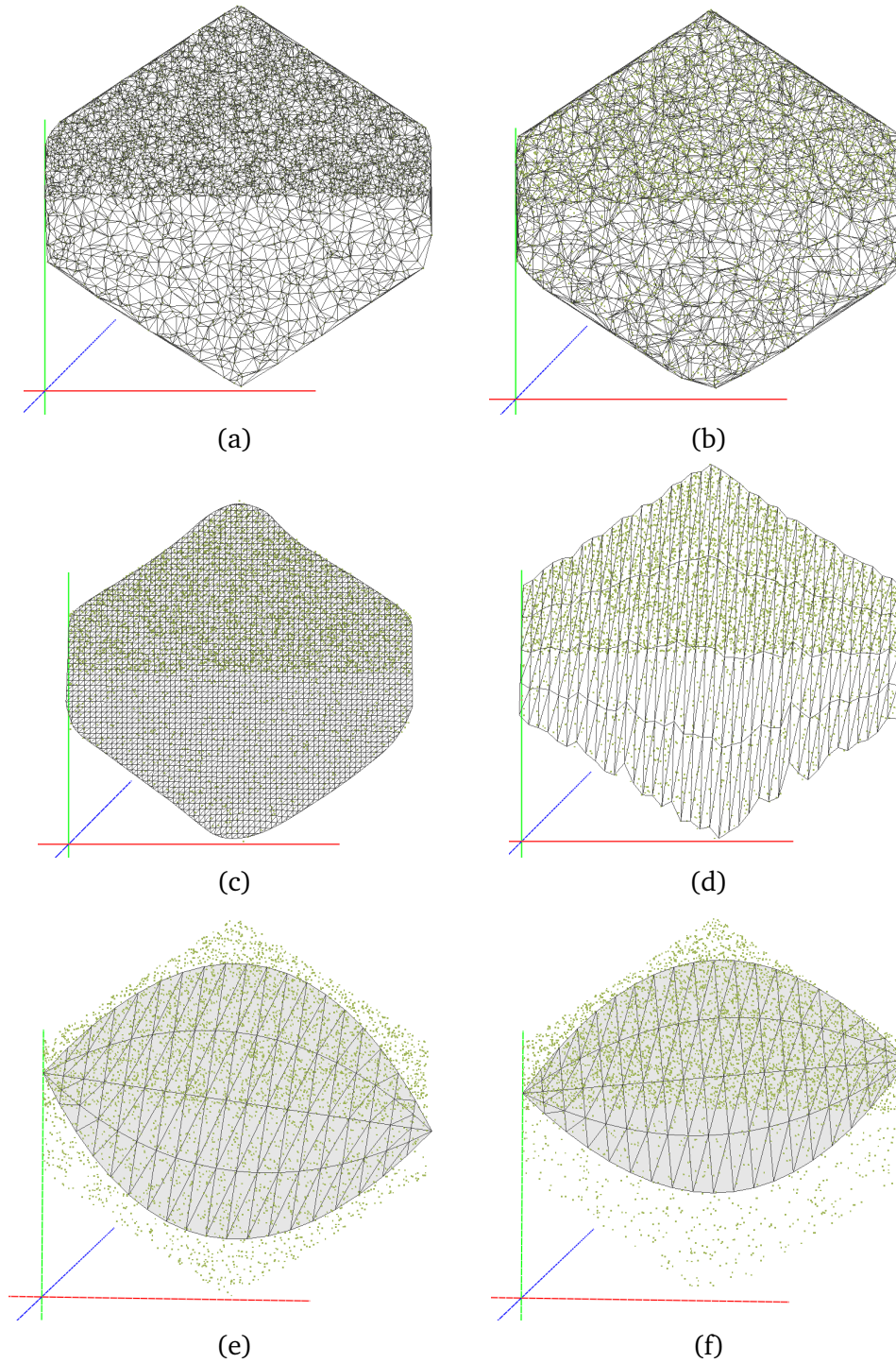


Fig. 4.12.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la Triangulation 2.5D du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 5$. (b) Reconstruction par Alpha-Shape du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 3.5$. Reconstruction par B-Spline du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 6$. Reconstruction par Bézier élagué du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 6$. Reconstruction par le modèle de feuille de Bézier du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 2.5$. Reconstruction par le modèle de feuille de Bézier du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 8$. L'ensemble de ces méthodes sont robustes au critère et les maillages sont de bonne qualité.

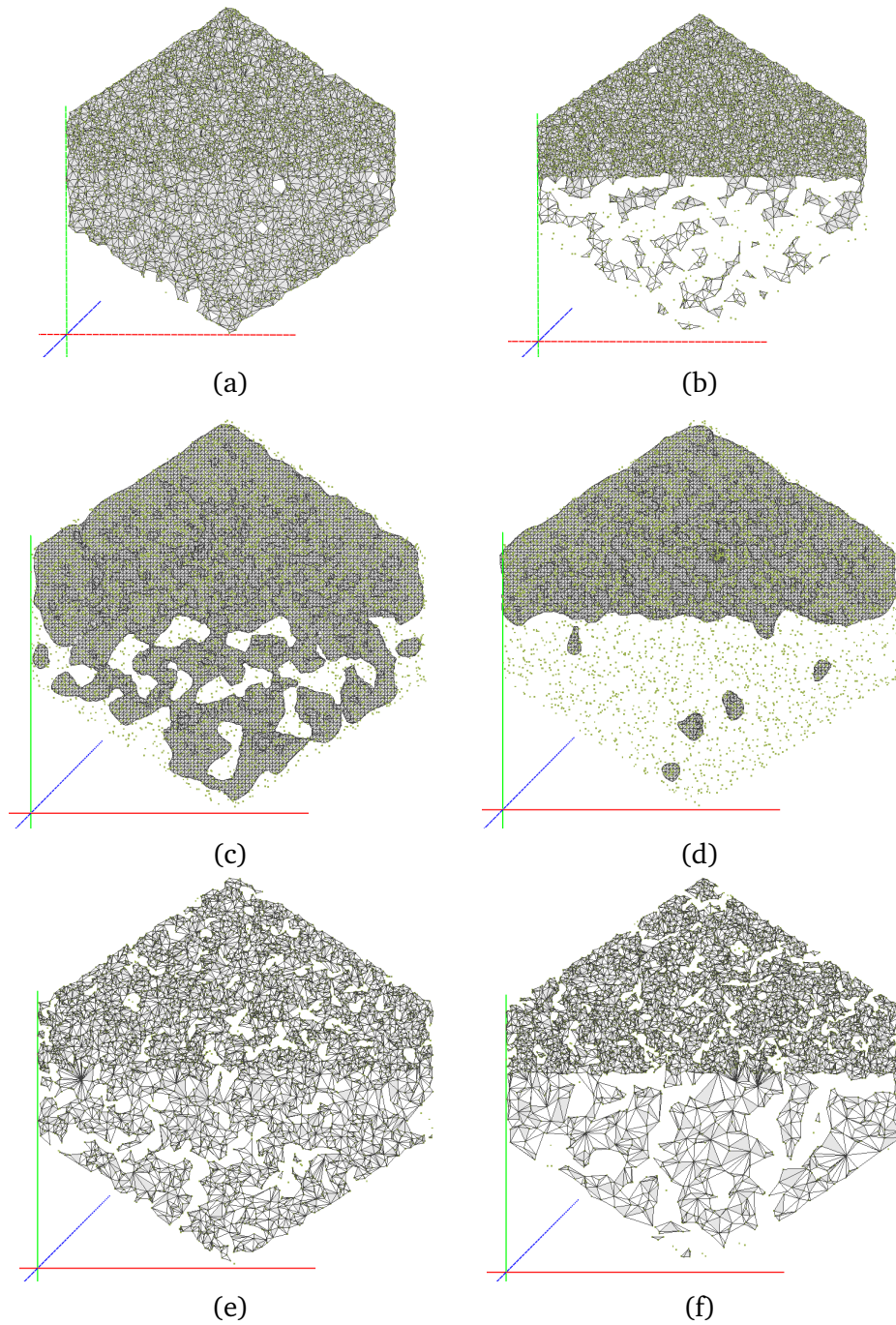


Fig. 4.13.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la BPA du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{NU} = 2$ et (b) tel que $\mathbf{NU} = 8$. (c) Reconstruction par la reconstruction de Poisson écrantée du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{NU} = 1.5$ et tel que (d) $\mathbf{NU} = 2.5$. (e) Reconstruction par la Reconstruction incrémentale du nuage de points synthétique (vert) tel que $\mathbf{NU} = 2.5$ et (f) tel que $\mathbf{NU} = 8$. Les méthodes ne sont pas robustes pour ce critère.

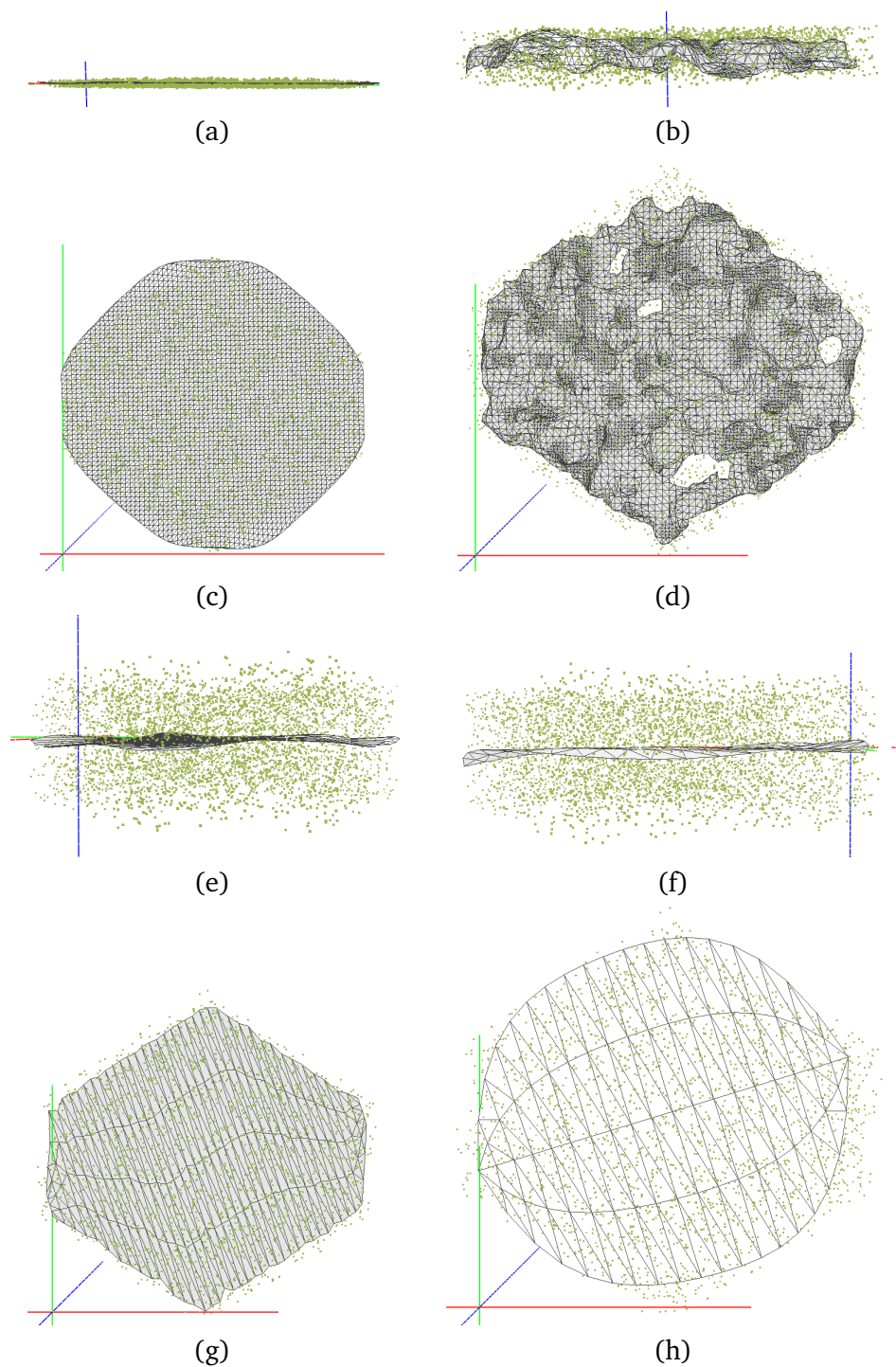


Fig. 4.14.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Exemples de reconstructions par les méthodes paramétriques sur les nuages de points synthétiques (vert) bruités. Reconstruction B-Spline sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,01$ (a) vue latérale, (c) vue du dessus. Reconstruction de Poisson échantillonnée sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,05$ (b) vue latérale, (d) vue du dessus. Reconstruction de Bézier élagué sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,15$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Reconstruction avec le modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,15$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.

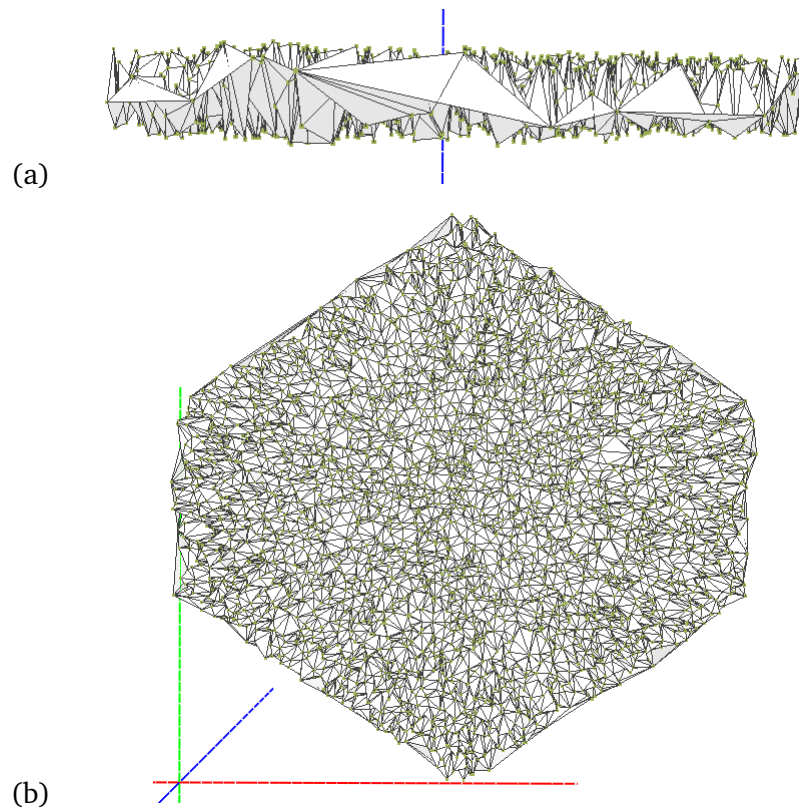


Fig. 4.15.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par la Triangulation 2.5D sur le nuage de points tel que $N = 0.05$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.

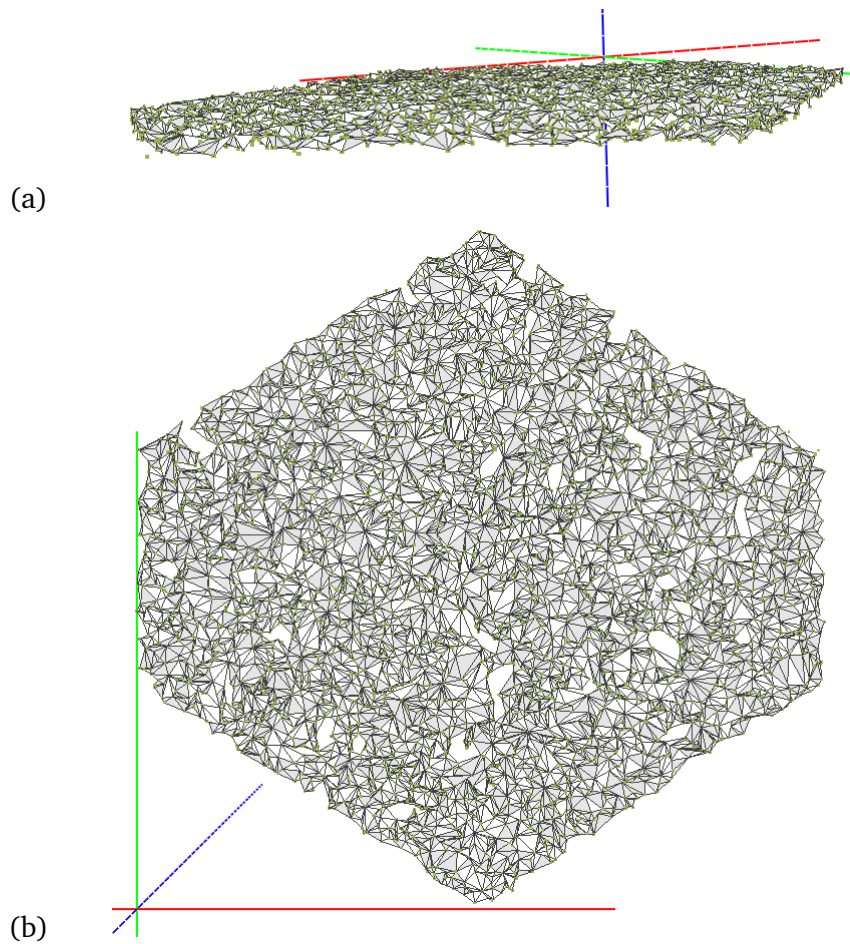


Fig. 4.16.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par la Reconstruction incrémentale sur le nuage de points tel que $N = 0.02$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.

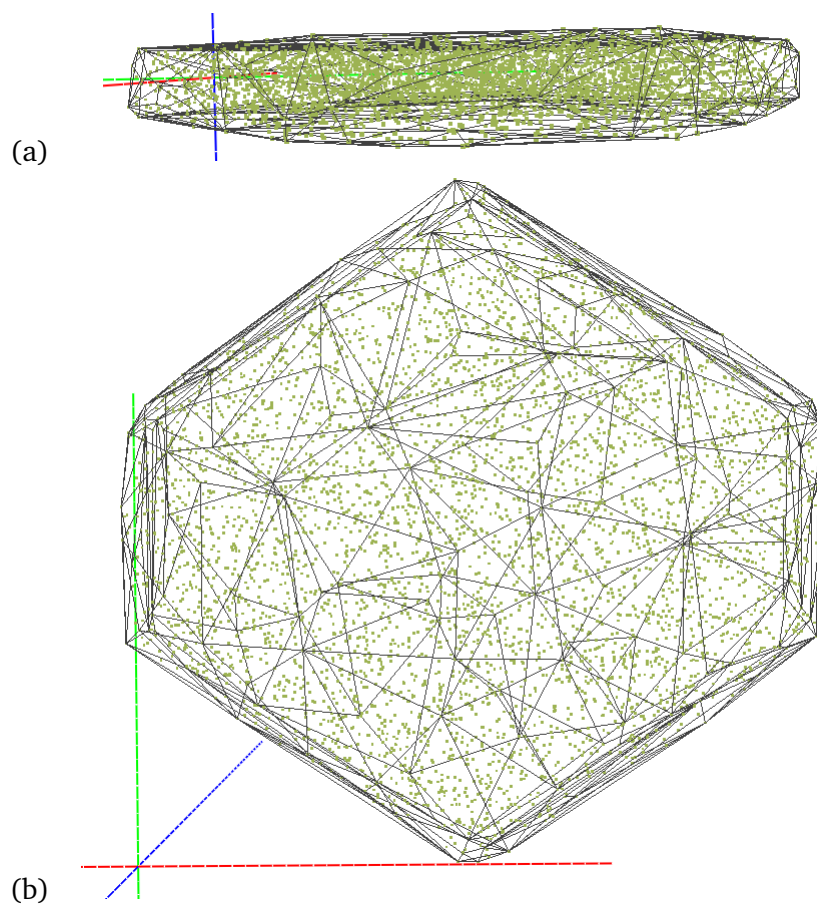


Fig. 4.17.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par Alpha-Shape sur le nuage de points tel que $N = 0.05$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.

L'étape d'élagage automatique de Poisson est une méthode basée sur la densité de points locale et son calcul est biaisé avec la dispersion sur un plus grand volume du même nombre de points (voir illustration de la reconstruction dans la figure 4.18). Les résultats obtenus par BPA sont imprévisibles en présence de bruit, comme mis en évidence par le comportement chaotique de la courbe de résultat (voir la figure 4.1). L'algorithme a en sortie soit une surface, soit un volume, ce qui rend difficile l'établissement de règles générales pour le calcul de l'aire comme dans le cas de l'Alpha-Shape. De plus, l'introduction du bruit fait diminuer la densité générale et le maillage résultant est rempli de trous.

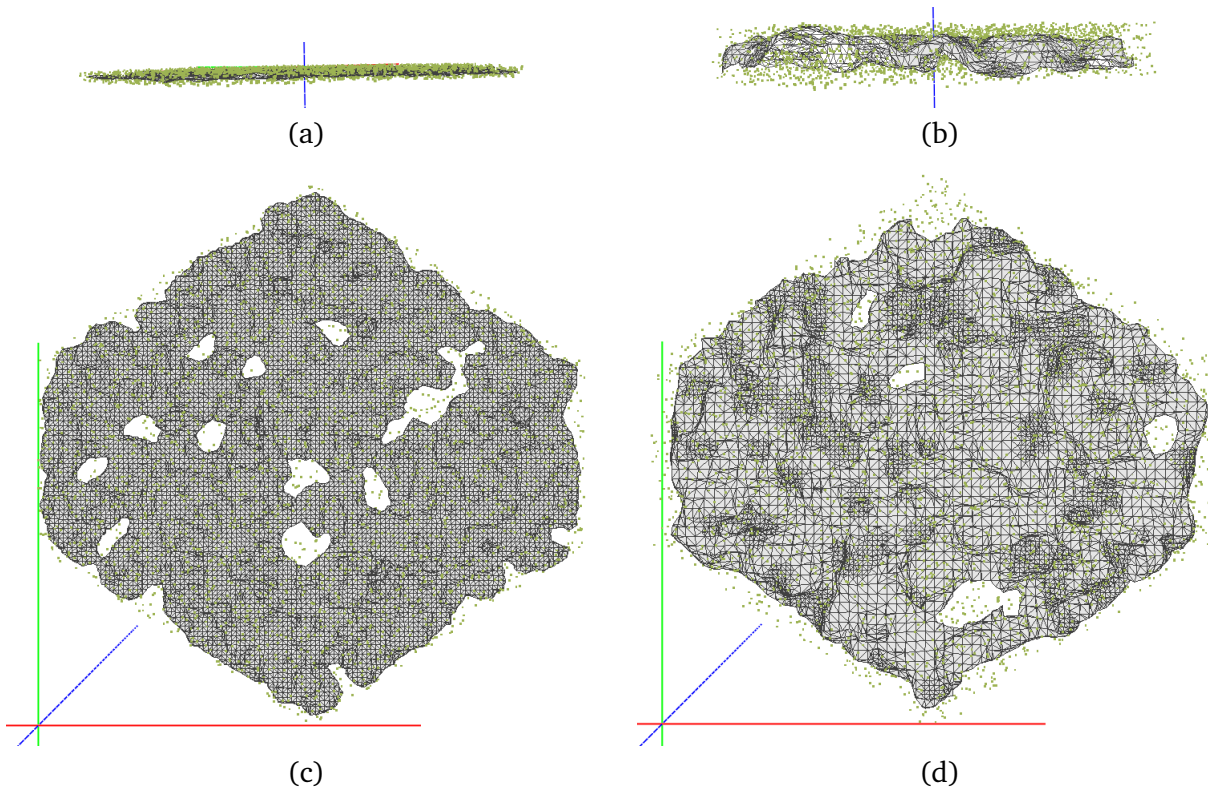


Fig. 4.18.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par Poisson échantillonné sur le nuage de points tel que (a) (c) $N = 0.01$, et (b) (d) $N = 0.05$.

4.1.8 Recalage/alignement

Il s'agit du seul critère ayant deux paramètres.

L'approche la plus robuste à ce critère est la reconstruction incrémentale. Ceci est dû au fait que la restriction de taille de triangle permet la reconstruction de deux surfaces planes distinctes (voir illustration de la reconstruction dans la figure 4.20). La Triangulation 2.5D est très sensible au problème du recalage et les aires résultats sont largement surestimées ($ERM \geq 1$, c'est pourquoi la courbe correspondante n'est pas visible sur le graphe de la figure 4.2). Cette méthode crée des triangles entre les deux surfaces, une grande longueur de chevauchement provoque la création de nombreux triangles, une grande distance de décalage provoque la création de

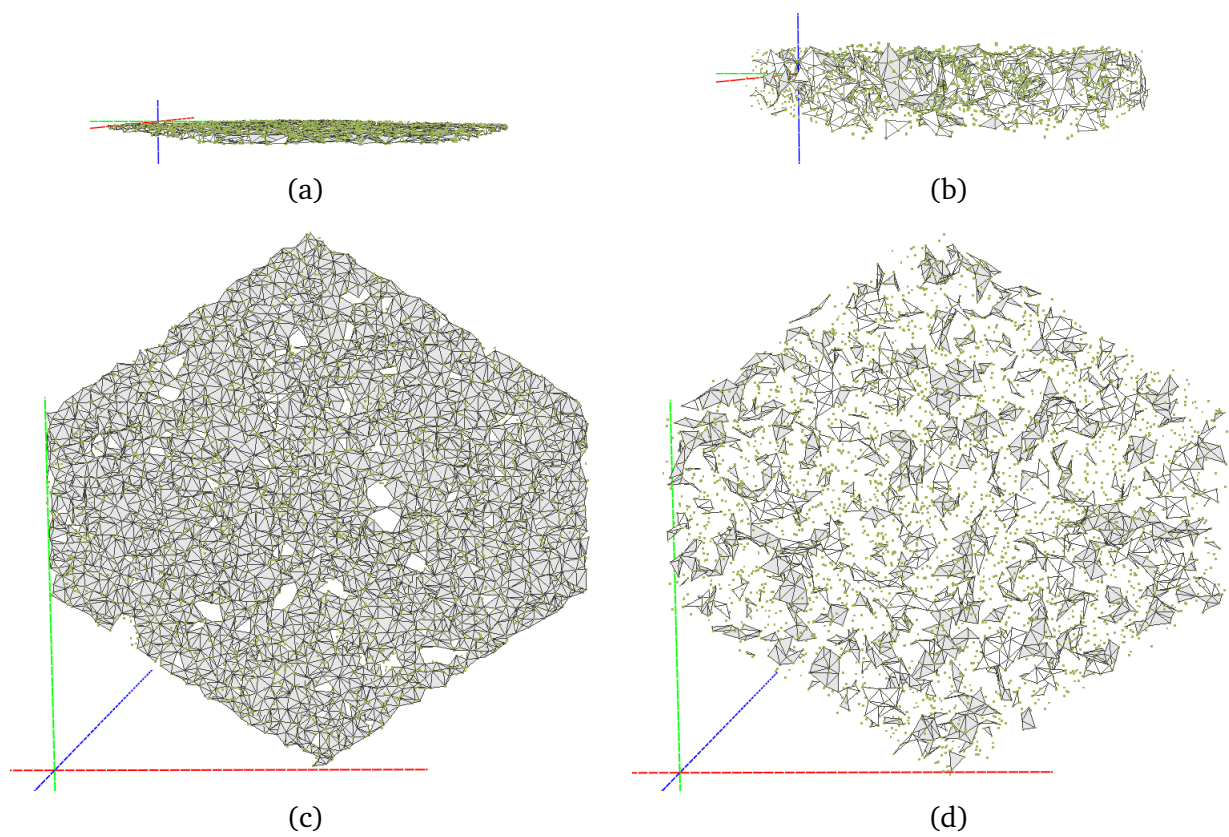


Fig. 4.19.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par BPA sur le nuage de points tel que (a) (c) $N = 0.007$, et (b) (d) $N = 0.07$.

très grands triangles. Ainsi la surestimation augmente aussi bien avec l'un des paramètres du problème de recalage que l'autre (voir illustration de reconstruction dans la figure 4.21). La méthode BPA est sensible à la distance de recalage, car la boîte englobante du nuage de points est modifiée de façon plus forte par un problème de recalage que de longueur (voir figure 4.22). Quant aux méthodes de Bézier, l'étape de projection dans l'algorithme élimine le problème de longueur de recalage, mais pas le problème de distance (voir figure 4.23). La méthode B-Spline est robuste aux problèmes de recalage si la distance de recalage est inférieure à un seuil (≤ 0.05 ERM) car c'est un cas très proche d'un problème de densité non uniforme et de bruit combinés (voir figure 4.24). Au contraire, la méthode de Poisson sous-estime l'aire de la surface de la feuille à cause du phénomène expliqué précédemment: la non-uniformité de l'échantillonnage du nuage de point étant une des limites de notre étape d'élagage (voir figure 4.25). Quand la distance est trop large, B-Spline surestime de plus en plus la surface de la feuille à mesure que la longueur de superposition augmente (voir figure 4.24), parce que l'algorithme essaie de créer une seule surface approchant les deux demi-plans simultanément.

4.1.9 Trou

Toutes les méthodes sont robustes aux trous sauf le BPA, la Reconstruction incrémentale et Poisson. Comme le BPA et la Reconstruction incrémentale exploitent la densité du nuage de points, les trous plus grands qu'un seuil correspondant à une distance moyenne entre les points ne peuvent pas être maillés, ce qui provoque une sous-estimation de l'aire. Dans le cas de l'étape d'élagage basée sur la densité locale dans l'algorithme de Poisson, le résultat est similaire (voir figure 4.26). Les bons résultats des autres méthodes sont illustrés dans la figure 4.27. Il est important de rappeler que seuls les effets d'un trou à l'intérieur de la feuille ont été étudiés. Les trous situés à la frontière des nuages de points (qui modifie donc la forme du nuage) ne sont pas étudiés comme expliqué dans la section 2.2.

4.2 Résultat du prétraitement des données

Les méthodes de prétraitements détaillées dans la sous-section 3.5.2 sont appliquées sur l'ensemble des nuages de points de données réelles. Je compare par jeux de données les résultats de chaque filtre et une conclusion générale est tirée. Un aparté sur le filtrage manuel des nuages de points des jeux de données se rapportant au maïs est d'abord effectué.

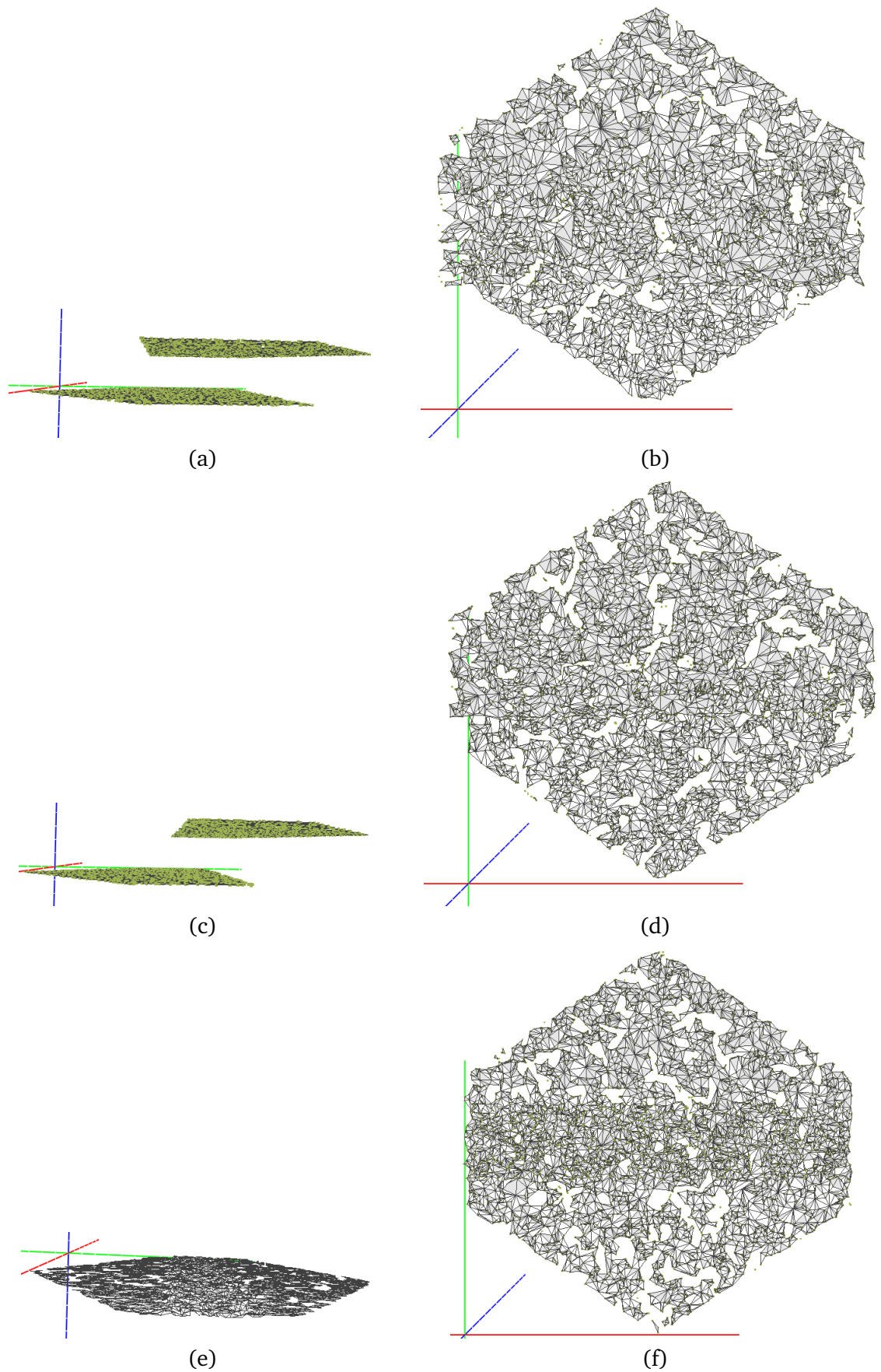


Fig. 4.20.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la méthode de Reconstruction Incrémentale. (a) et (b) $M.l = 0.1$ et $M.d = 0.12$. (c) et (d) $M.l = 0.25$ et $M.d = 0.12$. (e) et (f) $M.l = 0.2$ et $M.d = 0.008$.

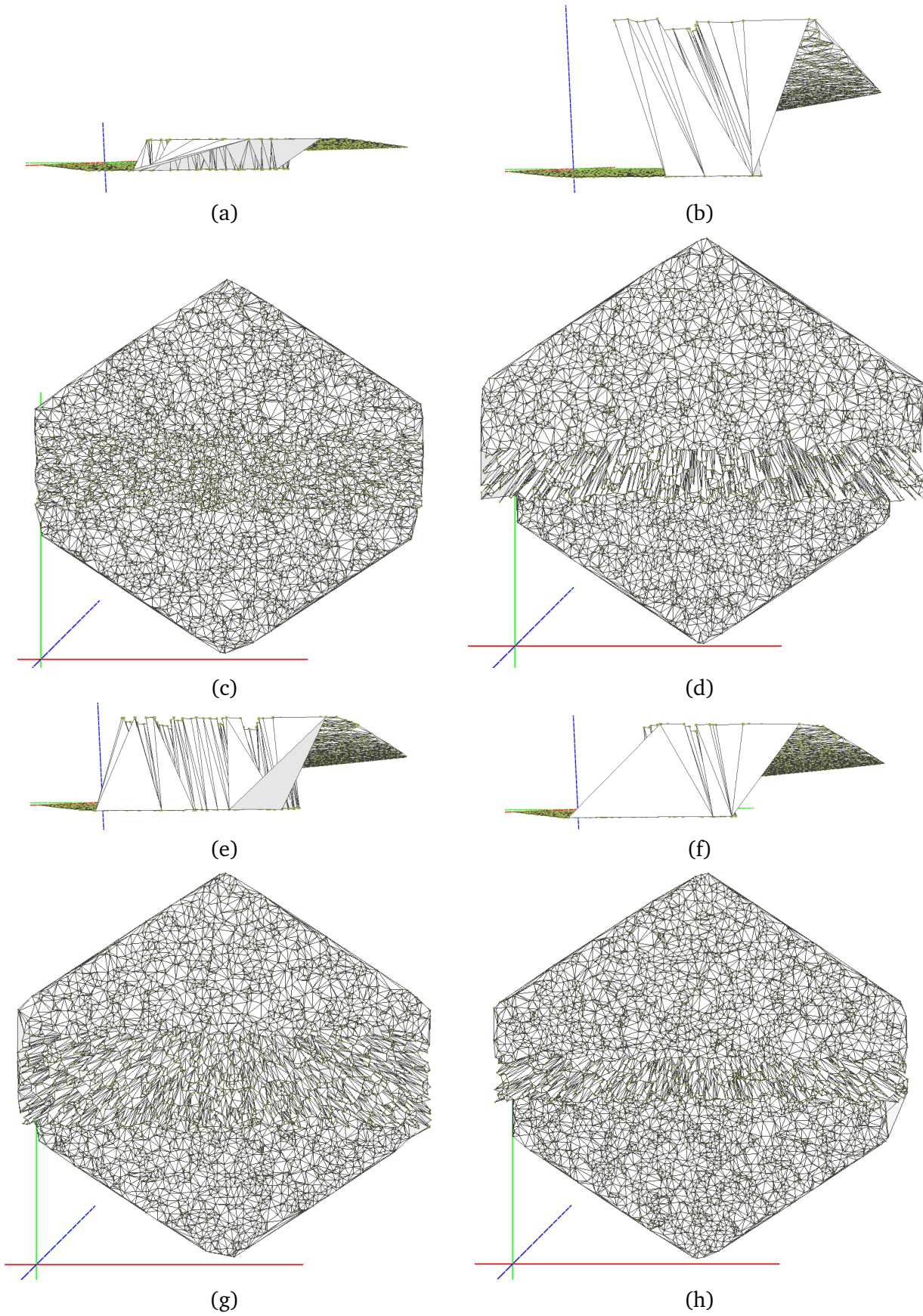


Fig. 4.21.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la Triangulation 2.5D. (a) et (c) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.04m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$. (e) et (g) $M.l = 0.13m$ et $M.d = 0.12m$. (f) et (h) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.12m$.

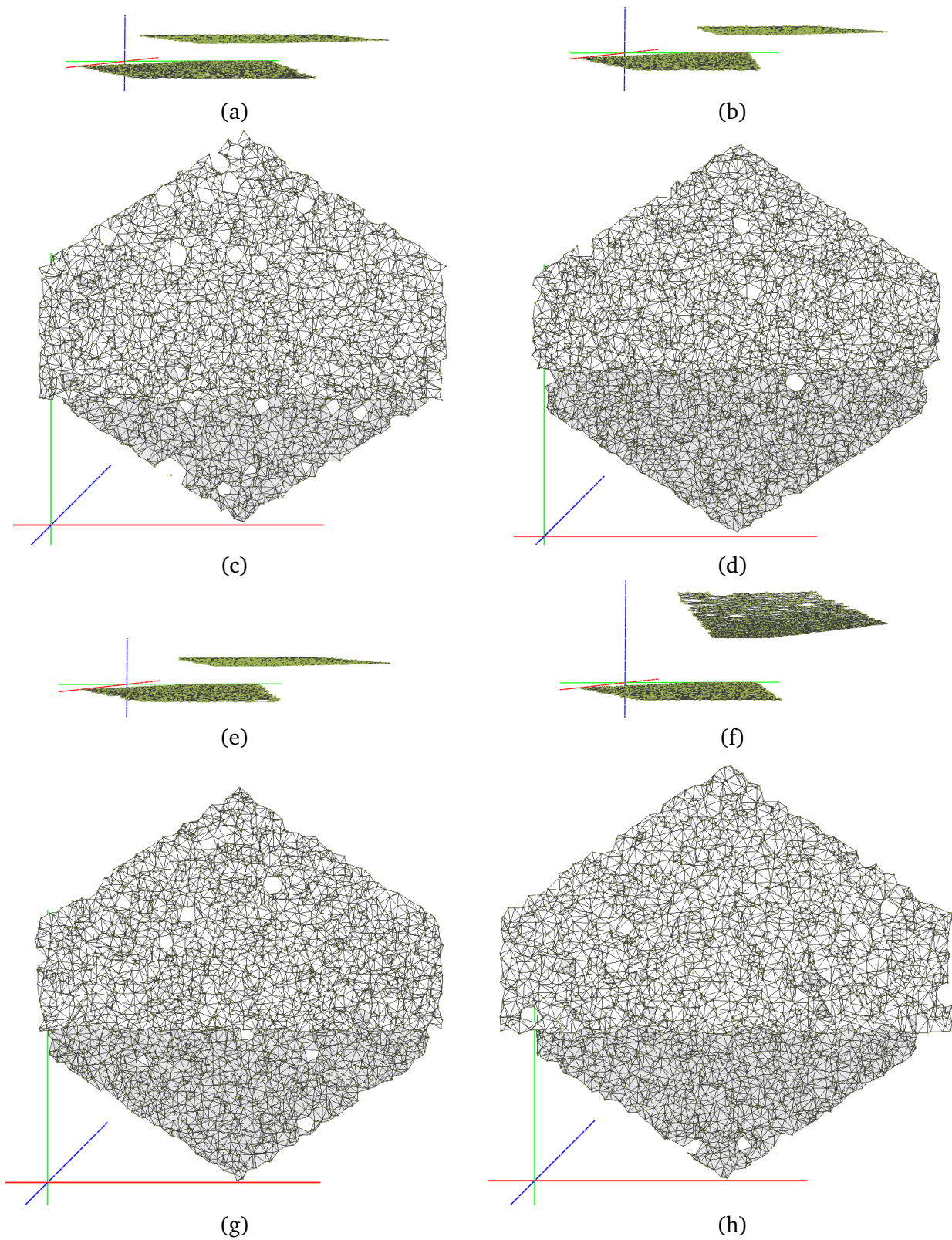


Fig. 4.22.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la BPA. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.08m$. (b) et (d) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.08m$. (e) et (g) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.08m$. (f) et (h) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$.

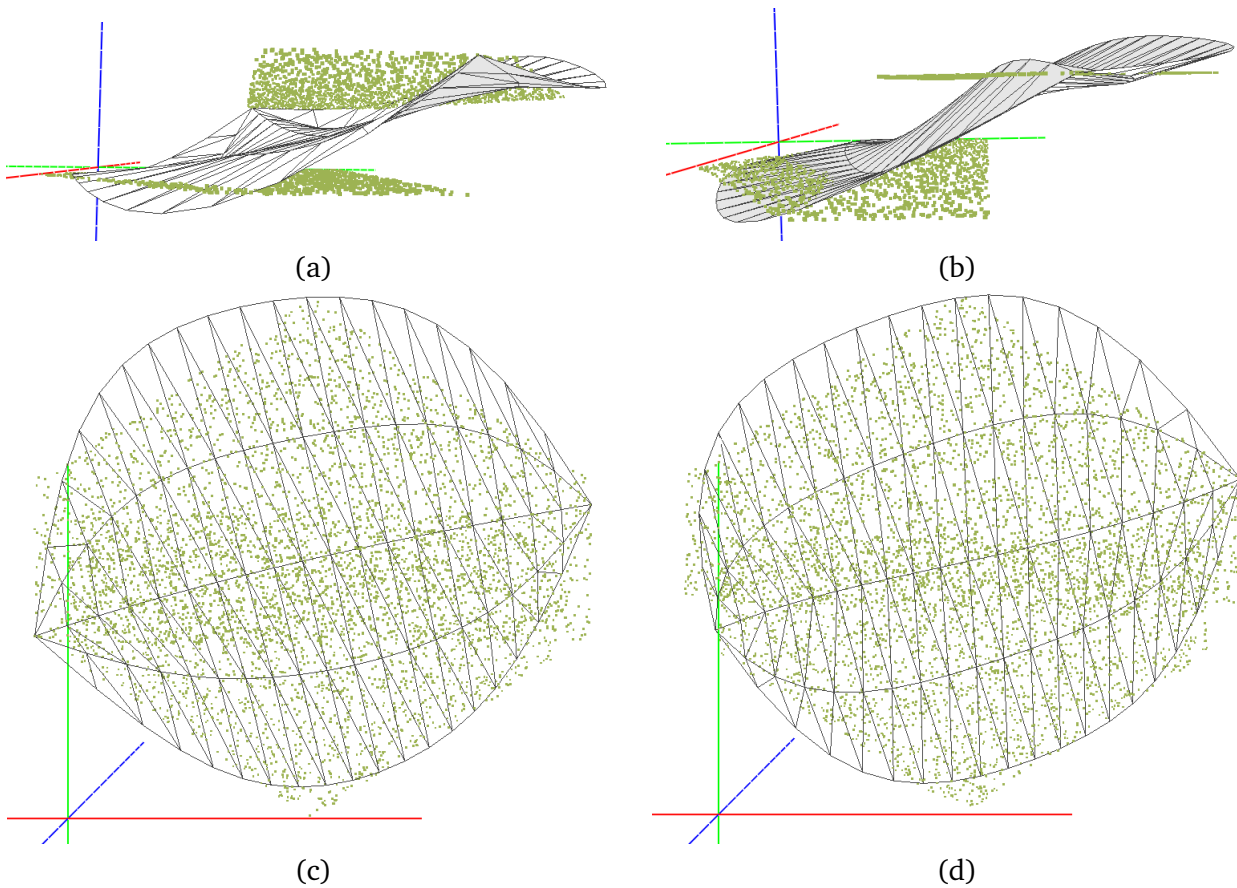


Fig. 4.23.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec le modèle de feuille de Bézier. (a) et (c) $M.l = 0.13m$ et $M.d = 0.16m$. (b) et (d) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.16m$.

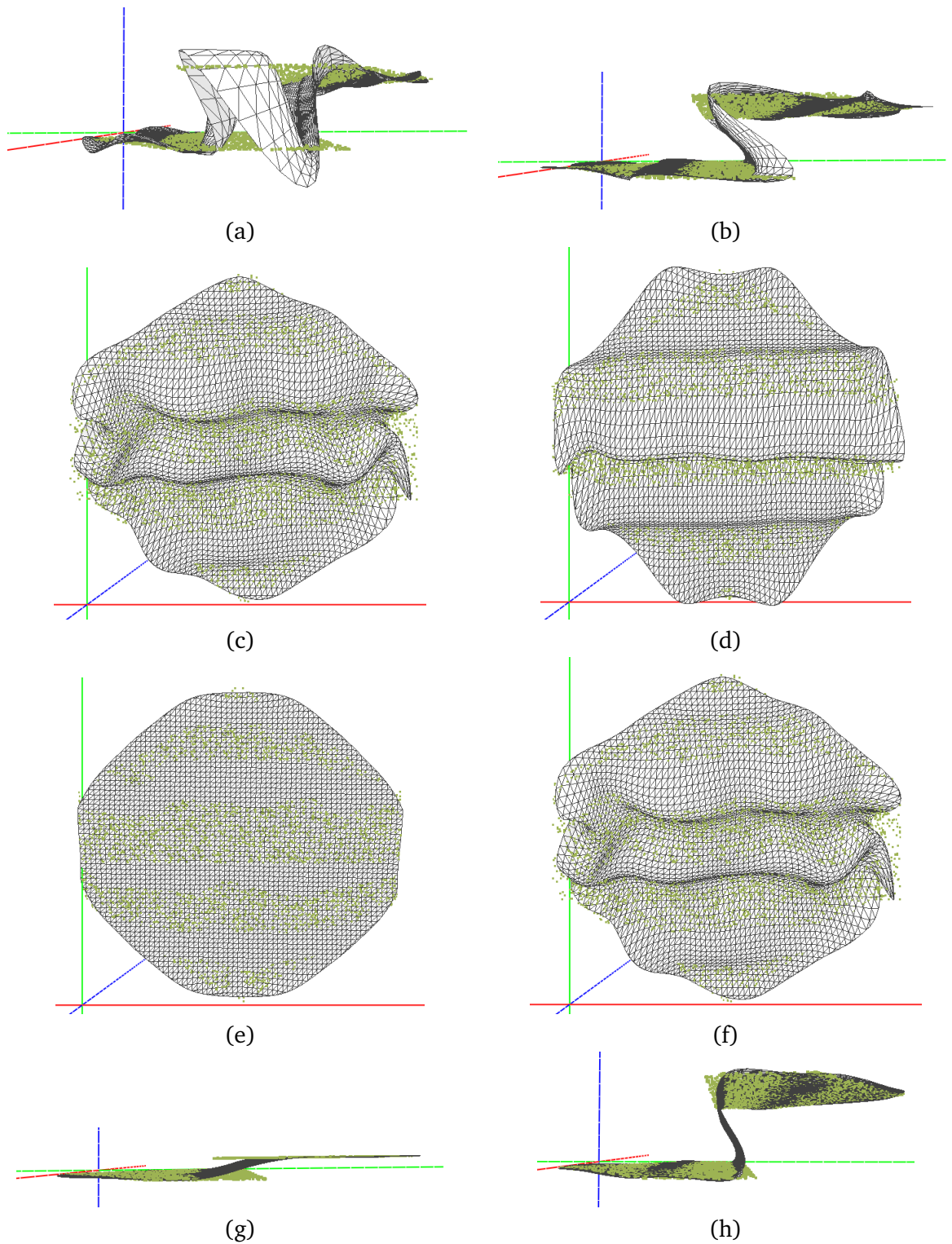


Fig. 4.24.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec le B-Spline. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.16m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.16m$. (e) et (g) $M.l = 0.33m$ et $M.d = 0.04m$. (f) et (h) $M.l = 0.33m$ et $M.d = 0.2m$.

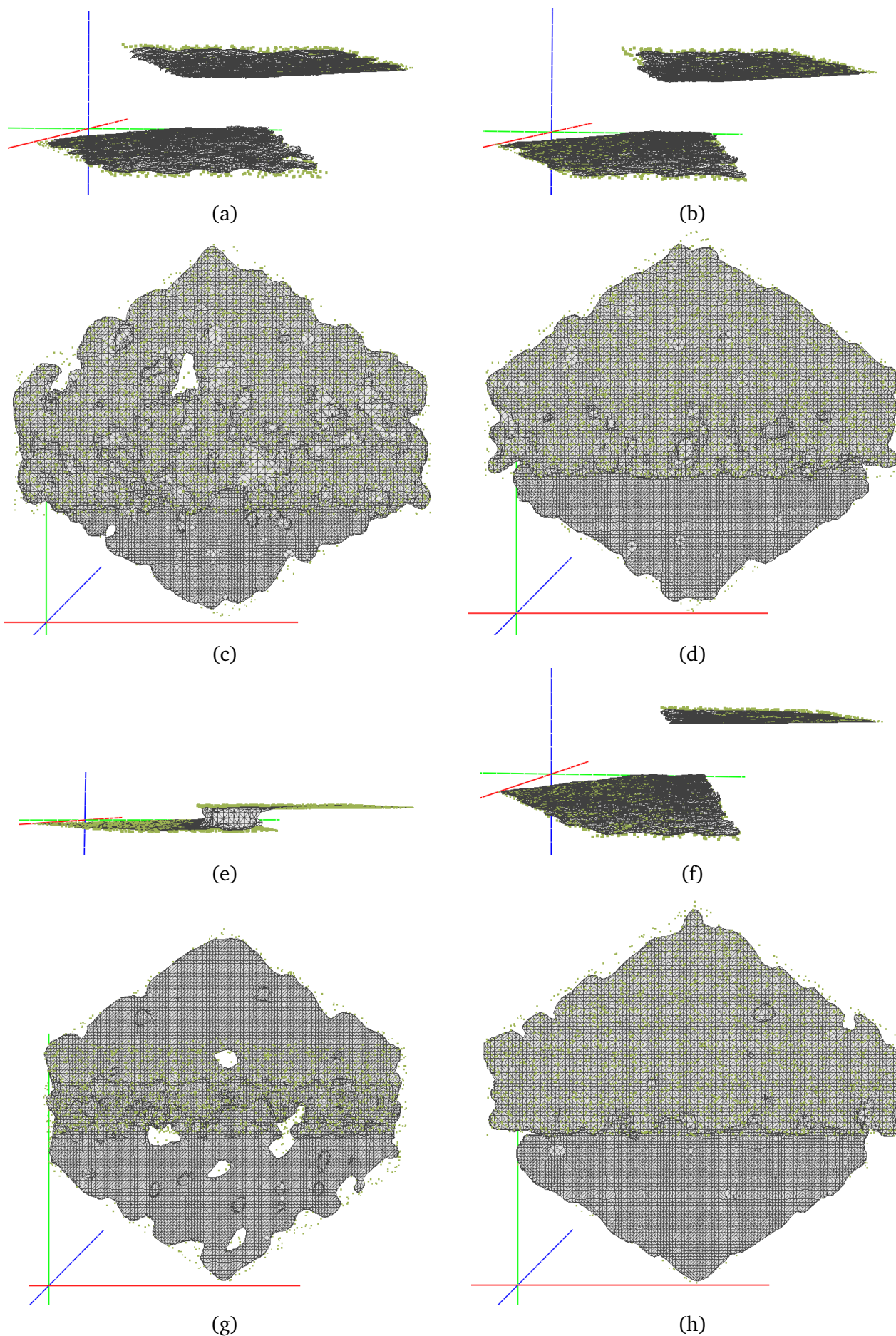


Fig. 4.25.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec Poisson écranté. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.2m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$. (e) et (g) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.04m$. (f) et (h) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.2m$.

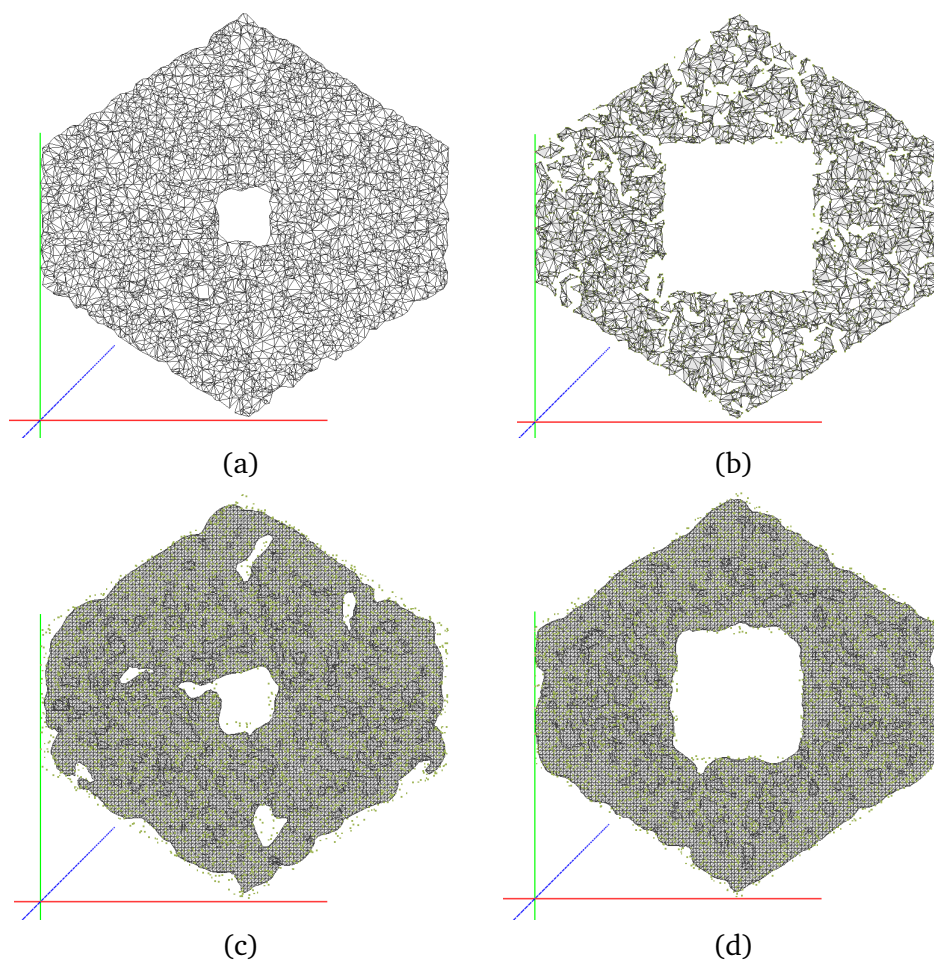


Fig. 4.26.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur des nuages de points synthétiques du critère Trou. (a) Reconstruction par BPA sur le nuage de points (vert) $H = 0.12m$. (b) Reconstruction incrémentale sur le nuage de points $H = 0.36$. Reconstruction par Poisson écranté sur le nuage de points (c) $H = 0.12m$ et (d) $H = 0.3m$.

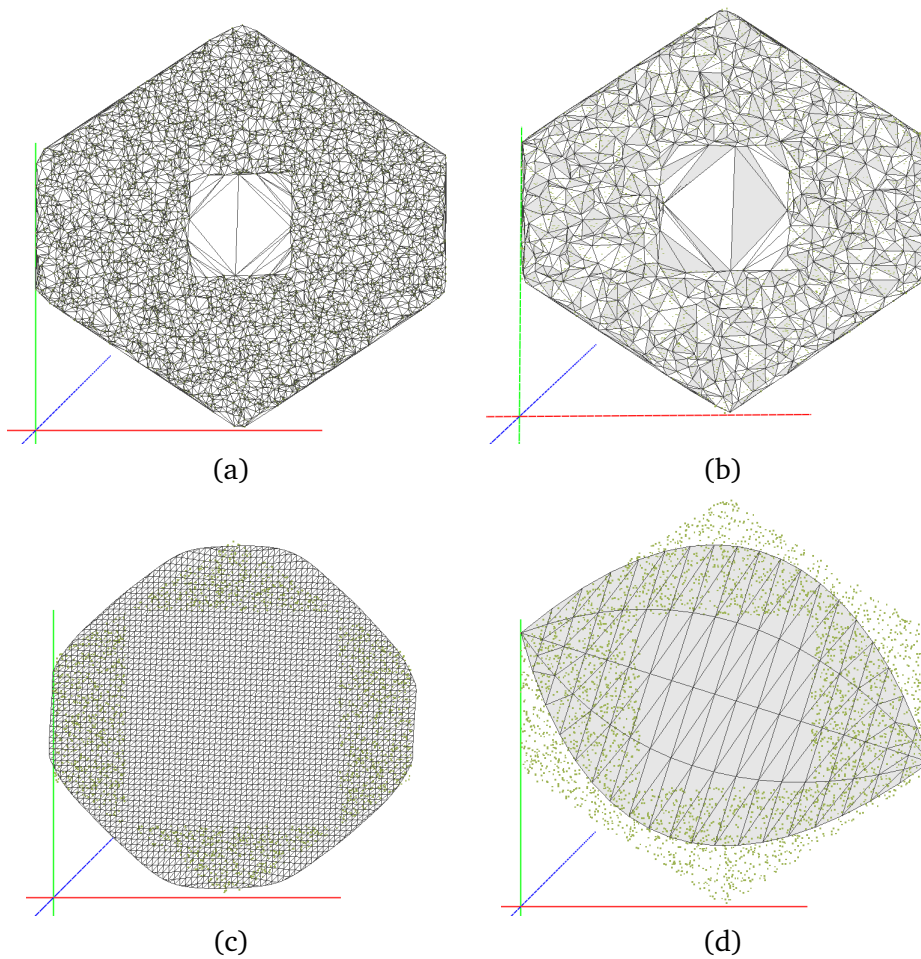


Fig. 4.27.: L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur des nuages de points synthétiques du critère Trou. (a) Reconstruction par Triangulation 2.5D sur le nuage de points (vert) $H = 0.24m$. (b) Reconstruction Alpha-Shape sur le nuage de points $H = 0.3m$. Reconstruction par Poisson échantillé sur le nuage de points (c) Reconstruction par B-Spline sur le nuage de points $H = 0.6m$. (d) Reconstruction par modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points $H = 0.42m$.

4.2.1 Influence d'un filtre manuel

Les jeux de données de maïs ont été préparés manuellement une fois l'acquisition de nuages de points obtenue. La segmentation de chaque feuille repose sur l'interprétation par l'opérateur de la forme 3D du nuage de points. Certains points peuvent porter à confusion, notamment dans le cas d'un problème d'alignement (voir figure 4.28). Il est donc nécessaire de décider des limites de la segmentation d'un nuage de



Fig. 4.28.: Un nuage de points du jeu de données LiDAR (voir 1.1 qui présente des points aberrants, des zones d'occultation et quelques problèmes de recalage.

points. J'ai décidé de considérer deux résultats de segmentation différents. Le premier cas est celui où l'ensemble des points se rapportant à la feuille est conservé, dans le cas d'un problème d'alignement. Je nomme pour la suite ce mode de segmentation, *la segmentation manuelle permissive*. Le second cas est celui où seuls les points se rapportant à une seule surface cohérente de la feuille sont sélectionnés. Ainsi on efface manuellement, au mieux, les points issus d'un problème de recalage. La zone du nuage de points à conserver est celle qui représente la feuille la plus grande. Je nomme dans la suite ce jeu de données le jeu de données de **segmentation manuelle strict**.

Ces deux résultats sont plausibles suivant le mécanisme de fonctionnement de l'algorithme de segmentation utilisé dans un mode automatique. On doit cependant noter que comme la segmentation est manuelle, il se peut que quelques erreurs de filtrage aient été faites.

Pour l'étude de l'influence de ce filtrage sur les résultats, je regarde l'ensemble des résultats obtenus. Je laisse la discussion sur l'influence des autres méthodes pour les sous-sections suivantes.

L'ensemble des résultats sont sensiblement les mêmes et les différences majeures se trouvent dans la dispersion des résultats de mesure. Les rares cas où la variation est élevée correspondent à des cas uniques, notamment pour la méthode de Poisson. Par exemple, c'est le cas avec la reconstruction par Poisson écranté du jeu de données issu du LiDAR FARO puis une segmentation manuelle stricte puis un prétraitement avec l'algorithme MLS. Les différences ne sont pas suffisamment significatives pour justifier une segmentation stricte et encore moins un filtrage manuel qui sont coûteux en temps, d'autant plus que des erreurs peuvent être ajoutées dans le cas où cette segmentation est effectuée manuellement.

Pour la suite de l'étude, je me limite donc à l'utilisation des jeux de données de segmentation manuelle permissive.

4.2.2 Jeu de données issu de la foresterie (châtaignier, bouleau et chêne)

L'ensemble des résultats pour les différents jeux de données des feuilles d'arbres sont sous forme de tableaux par méthode dans des tableaux du A.22 au 4.8 et des diagrammes en boîte 4.29.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	1, 7	1, 0	0, 08	−0, 09
	2, 2	1, 4	0, 17	−0, 006
	2, 6	1.8	0.37	0.18
Chêne	1.5	1.1	0.07	−0.05
	1.9	1.4	0.2	0.15
	2.4	1.8	0.37	0.33
Bouleau	2.0	1.2	0.11	−0.36
	2.2	1.4	0.17	−0.014
	2.4	1.5	0.27	0.08

Tab. 4.1.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la triangulation 2.5D.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	0.15	−0.011	−0.0009	−0.09
	0.26	0.07	0, 13	−0.02
	0.38	0.23	0.28	0.15
Chêne	0.13	0.004	0.02	−0.065
	0.28	0.15	0.13	0.086
	0.30	0.23	0.24	0.20
Bouleau	0.27	0.07	0.17	−0.03
	0.36	0.09	0.21	0.034
	0.4	0.19	0.27	0.13

Tab. 4.2.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec Alpha-Shape.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	0.78	0.51	-0.10	-0.23
	0.91	0.67	-0.05	-0.16
	1.12	0.88	0.08	-0.06
Chêne	0.679	0.40	-0.14	-0.23
	0.71	0.57	-0.11	-0.18
	0.79	0.65	-0.05	-0.11
Bouleau	0.49	0.25	-0.13	-0.21
	0.53	0.33	-0.11	-0.19
	0.66	0.58	-0.012	-0.12

Tab. 4.3.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la BPA.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	1.6	1.16	-0.018	-0.18
	2.0	1.5	0.08	-0.11
	2.3	1.7	0.18	-0.06
Chêne	1.4	1.0	-0.01	-0.22
	1.7	1.2	-0.02	-0.11
	2.0	1.5	0.02	-0.06
Bouleau	2	1.5	0.02	-0.13
	2.1	1.55	0.1	-0.09
	2.2	1.63	0.21	-0.06

Tab. 4.4.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la Reconstruction incrémentale.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	0.1	-0.09	0.03	-0.15
	0.2	0.67	0.11	-0.06
	0.34	0.88	0.2	-0.01
Chêne	-0.07	-0.06	-0.01	-0.09
	0.09	0.02	0.05	-0.006
	0.14	0.1	0.12	0.03
Bouleau	0.1	-0.03	0.033	-0.09
	0.21	0.05	0.039	-0.07
	0.28	0.07	0.18	0.03

Tab. 4.5.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec B-Spline.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	-0.004	-0.07	-0.012	-0.04
	0.15	0.09	0, 15	0.05
	0.24	0.18	0.25	0.18
Chêne	-0.59	-0.03	-0.004	-0.04
	-0.004	0.02	0.10	-0.018
	0.05	0.08	0.21	0.125
Bouleau	0.06	-0.07	-0.06	-0.07
	0.15	0.04	0.15	-0.03
	0.25	0.06	0.27	0.06

Tab. 4.6.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec le modèle de feuille de Bézier.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	-0.05	-0.019	-0.07	-0.19
	0.02	-0.08	0,09	-0.09
	0.12	0.23	0.11	0.02
Chêne	-0.06	-0.14	-0.08	-0.15
	-0.004	-0.1	-0.05	-0.09
	0.05	0.001	0.03	-0.005
Bouleau	-0.05	-0.14	-0.06	-0.14
	-0.03	-0.1	-0.04	-0.12
	0.1	-0.02	0.08	-0.03

Tab. 4.7.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec Bézier élagué.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Châtaignier	-0.005	-0.07	-0.011	-0.04
	0.15	0.09	0.15	0.05
	0.24	0.18	0.25	0.18
Chêne	-0.006	-0.03	-0.004	-0.04
	0.12	0.02	0.1	0.018
	0.22	0.08	0.21	0.12
Bouleau	0.06	-0.07	0.06	-0.07
	0.15	0.04	0.15	0.03
	0.25	0.06	0.27	0.06

Tab. 4.8.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la reconstruction de Poisson écranté.

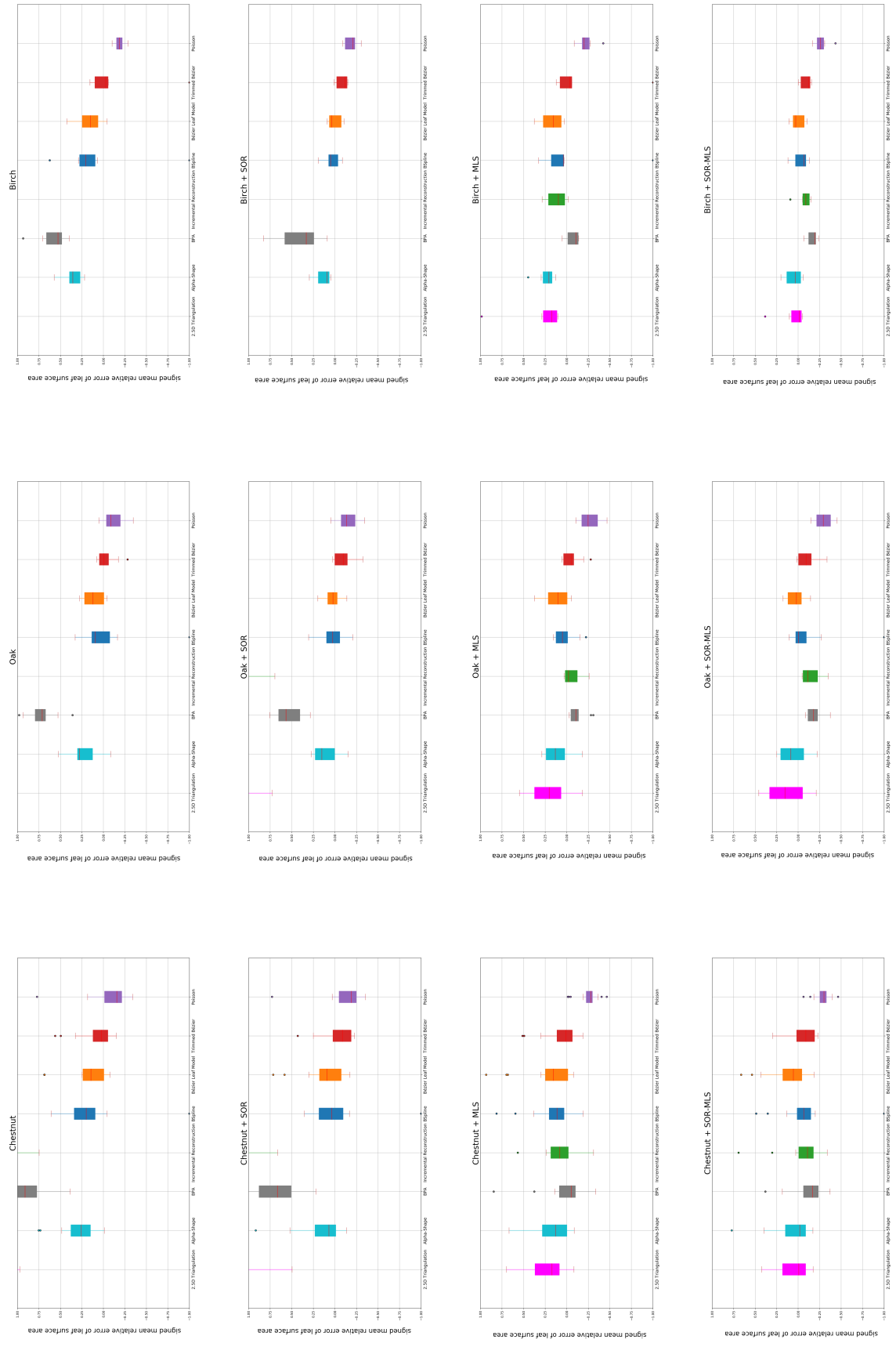


Fig. 4.29.: Diagramme en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée forestier pour chaque méthode de reconstruction de surface pour toutes les méthodes de filtrage étudiées. **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson écrantée**.

Les meilleurs résultats pour le bouleau sont obtenus, suivant la méthode, soit sur le jeu de données filtré avec la méthode MLS (2.5D Triangulation, Alpha-Shape, Reconstruction Incrémentale, B-spline, Poisson), soit avec SOR-MLS (BPA, Modèle de Feuille de Bézier, Bézier élagué). Dans le cas du jeu de données du chêne, les meilleurs résultats sont obtenus avec un filtrage MLS (BPA, Reconstruction Incrémentale, Bézier élagué) SOR-MLS (2.5D Triangulation, Alpha-shape, B-Spline, Modèle de Feuille de Bézier) ou dans le cas de Poisson, sur le jeu de données original. Et enfin dans le cas du châtaignier les mêmes résultats sont obtenus sauf pour la méthode de Bézier élagué qui donne de meilleurs résultats avec le jeu de données original et la méthode B-Spline qui donne de meilleures mesures avec la succession de filtres SOR-MLS.

4.2.3 Jeux de données du maïs

Dans la figure 4.30 les résultats des mesures sont présentés. La tendance qui se dégage est que l'utilisation de prétraitement améliore quasi systématiquement la mesure. Cependant, l'apport de chaque méthode n'est pas équivalent. En définitive, dans les tableaux A.25 et A.26 l'ensemble des différences de résultats est donné.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	1.4	0.81	0.18	-0.05
	1.9	1.3	0.61	0.30
	4.5	3.6	2.8	2.4
Maïs (Photogrammétrie)	0.73	0.44	0.66	0.37
	3.0	1.3	2.7	1.2
	3.4	2.6	3.1	2.4

Tab. 4.9.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la Triangulation 2.5D.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	0	-0.11	0.05	-0.14
	0	-0.001	0.19	-0.03
	0.19	0.56	0.76	0.6
Maïs (Photogrammétrie)	0.2	0.097	0.17	0.096
	0.83	0.72	0.79	0.68
	1.5	0.92	1.4	0.91

Tab. 4.10.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Alpha-Shape.

Les meilleurs résultats pour le maïs acquis par LiDAR sont obtenus, suivant la méthode, soit sur le jeu de données filtré avec la méthode MLS (BPA, Reconstruction Incrémentale, Modèle de Feuille de Bézier), soit avec SOR-MLS (Triangulation 2.5D, Alpha-Shape, B-Spline). Dans les cas particuliers de Poisson et Bézier élagué, les meilleurs résultats sont obtenus sur le jeu de données initial.

Dans le cas du jeu de données de maïs acquis par photogrammétrie, les meilleurs

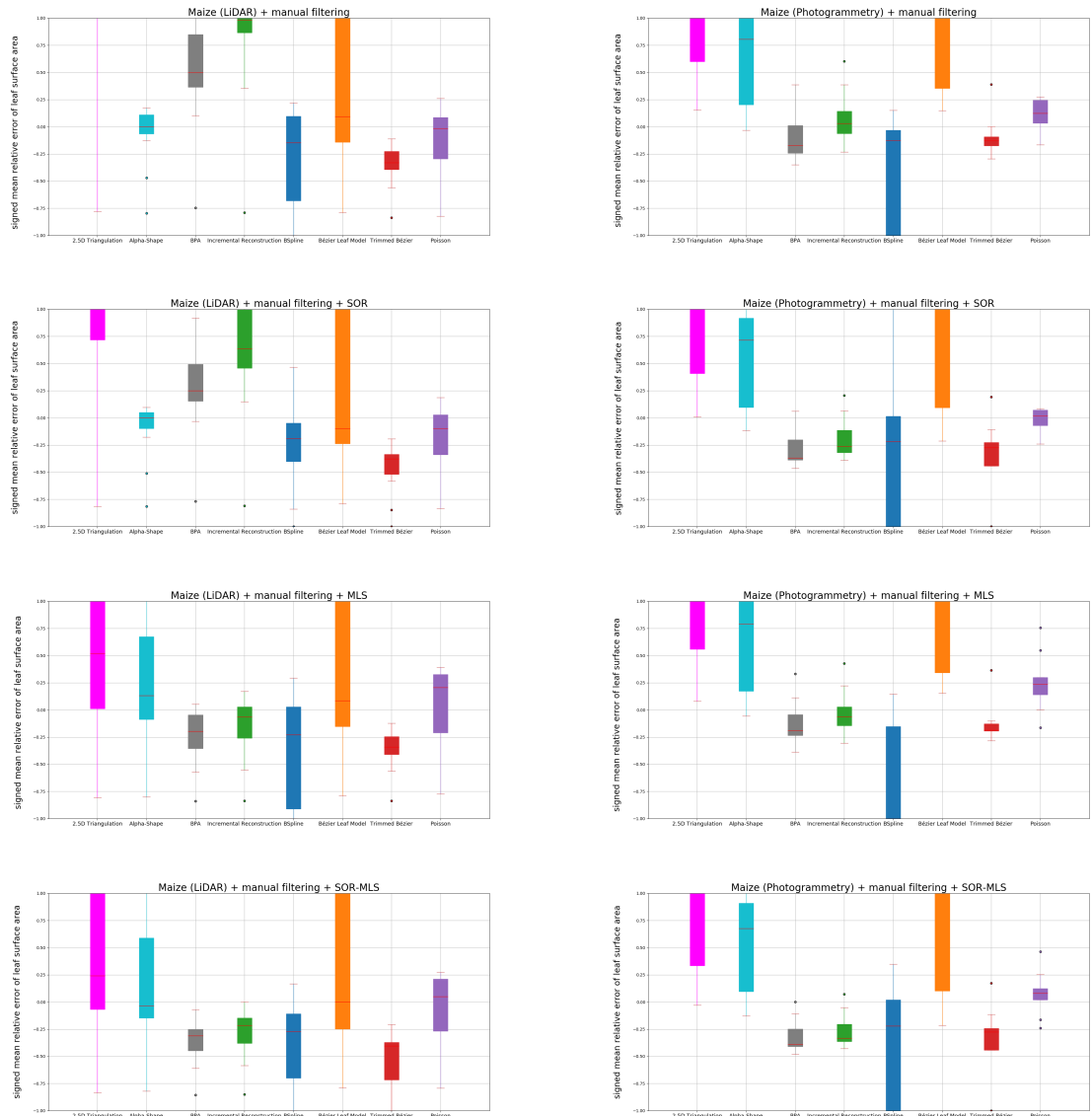


Fig. 4.30.: Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée de maïs de la section 1.1 pour chaque méthode de reconstruction de surface pour toutes les méthodes de filtrage étudiées. **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson** échantillonnée.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	0.36	0.19	-0.36	-0.44
	0.51	0.24	-0.2	-0.30
	0.87	0.58	-0.1	-0.22
Maïs (Photogrammétrie)	-0.24	-0.37	-0.23	-0.37
	-0.14	-0.3	-0.16	-0.32
	0.014	-0.19	0.04	-0.089

Tab. 4.11.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la BPA.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	0.88	−0.51	−0.25	−0.37
	1.0	0.7	−0.05	−0.17
	1.4	1.1	0.04	−0.13
Maïs (Photogrammétrie)	−0.04	−0.3	−0.14	−0.34
	0.08	−0.19	−0.06	−0.25
	0.18	−0.11	0.03	−0.18

Tab. 4.12.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Reconstruction incrémentale.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	−1	−0.7	−1	−0.38
	−0.5	−0.18	−1	−0.20
	−0.05	−0.13	−0.4	−0.07
Maïs (Photogrammétrie)	−0.07	−0.2	−1	−1
	0.16	−0.1	0.21	−1
	0.64	0.39	0.53	−0.081

Tab. 4.13.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec B-Spline.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	−0.13	−0.23	−0.15	−0.241
	.0.1	−0.09	0.08	−0.11
	1	1.1	1.0	1.1
Maïs (Photogrammétrie)	0.56	0.09	0.34	0.10
	1.54	1.2	1.6	1.2
	2.76	1.8	2.5	2.4

Tab. 4.14.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec le modèle de feuille de Bézier.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	−0.38	−0.51	−0.39	−0.51
	. − 0.320	−0.37	−0.33	−0.38
	−0.20	−0.32	−0.24	−0.34
Maïs (Photogrammétrie)	−0.25	−0.45	−0.19	−0.45
	−0.16	−0.25	−0.17	−0.26
	−0.09	−0.21	−0.12	−0.22

Tab. 4.15.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Bézier élagué.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Maïs (LiDAR)	−0.13	−0.23	−0.15	−0.24
	0.1	−0.09	0.08	−0.11
	1	1.1	1.02	1.09
Maïs (Photogrammétrie)	0.56	0.09	0.34	0.10
	1.54	1.17	1.6	1.18
	2.76	1.8	2.5	2.4

Tab. 4.16.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la reconstruction de Poisson échanté.

résultats pour chaque méthode sont obtenus avec les différentes combinaisons de filtres. Les mesures avec BPA et Reconstruction Incrémentale sont optimisées avec le filtre MLS, Triangulation 2.5D et Alpha-Shape fonctionnent le mieux pour la combinaison de filtres SOR-MLS, enfin pour B-Spline, Modèle de Feuille de Bézier et Poisson c'est la méthode SOR qui permet d'obtenir les meilleurs résultats.

4.2.4 Conclusion générale sur l'utilisation des méthodes de pré-traitement

Il est clair que dans la quasi-totalité des cas présentés précédemment, la précision de la mesure est améliorée lorsque des méthodes de prétraitement sont utilisées. Cependant, l'apport de chacun d'entre eux est dépendant à la fois du jeu de données et de la méthode de reconstruction de surface. De plus, il y a de nombreux cas où l'apport de précision après un filtre est moindre (< 0.03 ERM). C'est un phénomène surtout présent lorsque les résultats obtenus avec les filtres SOR-MLS et MLS uniquement sont comparés. Dans le cas du prétraitement avec SOR, une différence non négligeable de précision est apportée. Cependant, par rapport au filtrage par MLS, les améliorations sont globalement moins systématiques sur l'ensemble des méthodes. De l'ensemble de ces faits, on peut tirer la conclusion que pour un processus automatique devant être robuste à une large variété de données d'entrées, le prétraitement avec l'algorithme MLS est recommandé. Dans la suite de la présentation des résultats pour les données réelles, je n'utiliserai que les résultats obtenus après un prétraitement par MLS.

4.3 Résultats sur données réelles

Il est maintenant possible d'évaluer les performances des méthodes de reconstruction de surface à partir d'un nuage de points 3D sur nos données réelles. Dans cette évaluation, on considère l'erreur de mesure comme l'erreur relative moyenne entre l'aire de la surface estimée avec la méthode étudiée et l'aire de la surface mesurée manuellement et considérée comme la vérité terrain (voir section 3.5.3). Les résultats sont présentés sous la forme de diagrammes en boîte d'erreur pour toutes les feuilles pour chaque plante et pour chaque méthode de reconstruction de surface.

4.3.1 Châtaignier, Chêne et Bouleau

Aussi bien pour les données issues du bouleau que du châtaignier (voir figure 4.31), toutes les méthodes surestiment l'aire des feuilles, sauf les méthodes de Bézier élagué et BPA qui donnent une sous-estimation de la surface foliaire. La surestimation

systematique peut être expliquée par la présence de trous causés par les insectes qui sont remplis comme des concavités (voir figure 4.32). C'est aussi pourquoi certaines méthodes ne peuvent pas récupérer de façon précise la forme de la bordure de la feuille. La bordure de la surface reconstruite va au-delà du nuage de points au lieu de suivre sa frontière (voir figure 4.33). La méthode de Bézier élagué est très précise alors que le BPA a tendance à sous-estimer l'aire de la feuille (voir illustration des autres reconstructions de surface dans 4.34). Les résultats sont similaires pour le chêne sauf que cette fois la reconstruction incrémentale est plus précise, car la densité de point est plus élevée. Il faut aussi noter que Bézier élagué et B-Spline ont toutes les deux échoué à produire des maillages pour certaines feuilles du bouleau (voir les nuages de points en question 4.35). Cependant on peut toujours dire que la méthode la plus robuste et précise pour ces données est la méthode de Bézier élagué.

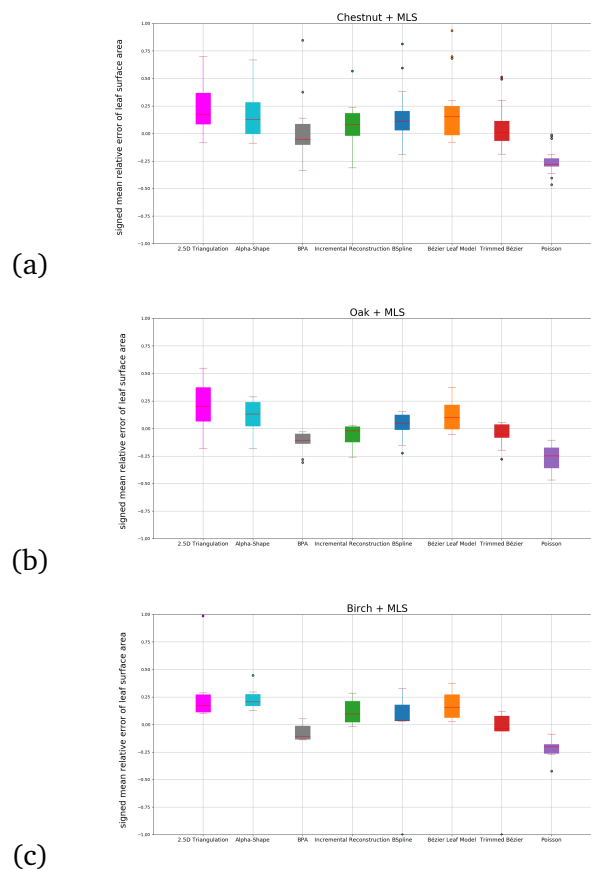


Fig. 4.31.: Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée de foresterie de la section 3.5.1 filtré avec MLS pour chaque méthode de reconstruction de surface. **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson échantonné**.

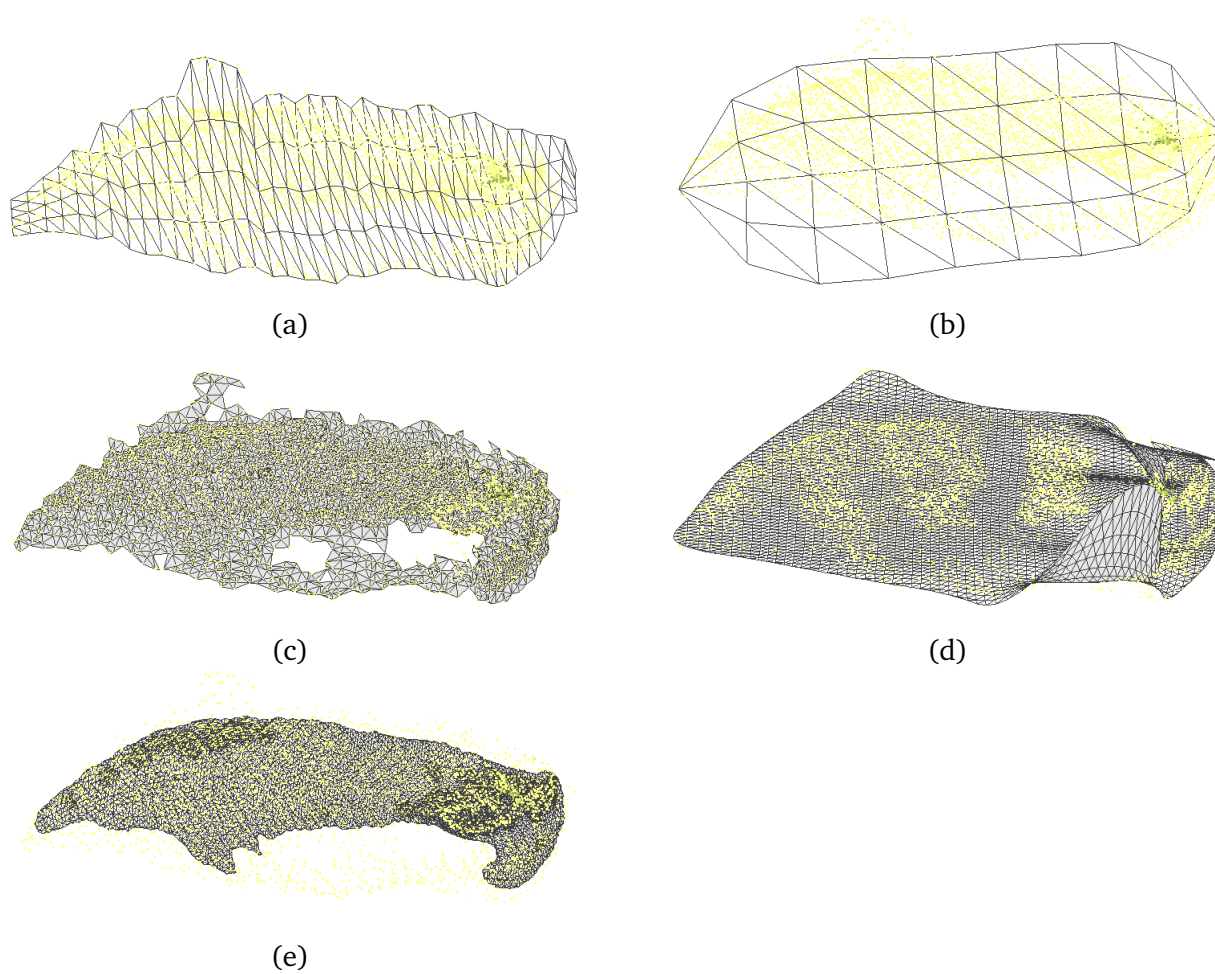


Fig. 4.32.: Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie châtaignier (vert) superposé à la reconstruction par (a) Bézier élagué , (b) modèle de feuille de Bézier, (c) BPA, (d) B-Spline, (e) Poisson écranté.

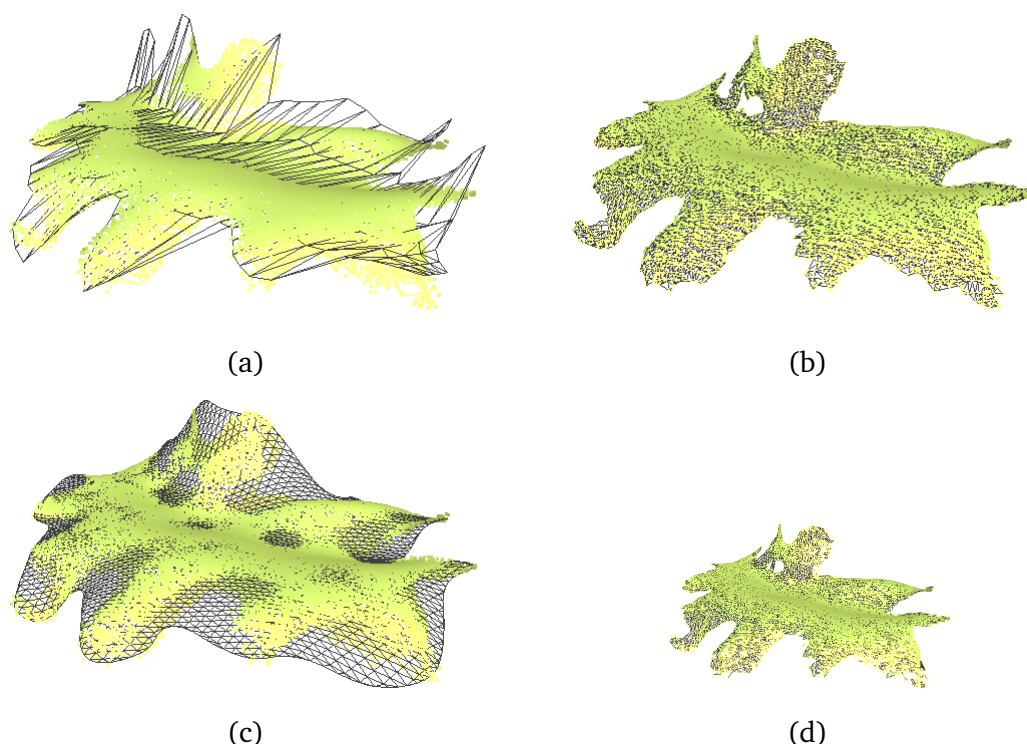


Fig. 4.33.: Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie chêne (vert) superposé à la reconstruction par (a) Bézier élagué , (b) BPA, (c) B-Spline, (d) Reconstruction incrémentale.

4.3.2 Maïs

La figure 4.36 montre le diagramme de résultat concernant les jeux de données du maïs.

Les résultats du maïs acquis avec un LiDAR et du maïs acquis par photogrammétrie sont similaires, ce qui indique que pour ces méthodes, le processus d'acquisition choisi n'a que peu d'impact sur la précision de la mesure.

La plupart des méthodes sont largement dispersées en termes d'erreur sur l'aire de la feuille et sont donc peu robustes. Ces résultats sont principalement dus à la géométrie de la feuille. Dans le cas de la reconstruction de Poisson le ratio longueur/largeur élevé met en échec la méthode (voir figure 4.3.2). La courbure élevée des feuilles est la raison de l'échec des méthodes Alpha-Shape et B-Spline (voir figures 4.37 et

Dans ce cas, les meilleures méthodes sont celles qui présentent des performances supérieures dans le cas des feuilles forestières (voir la sous-section précédente 4.3.1). Cependant elles sous-estiment toutes la surface foliaire. Dans le cas de ces jeux de

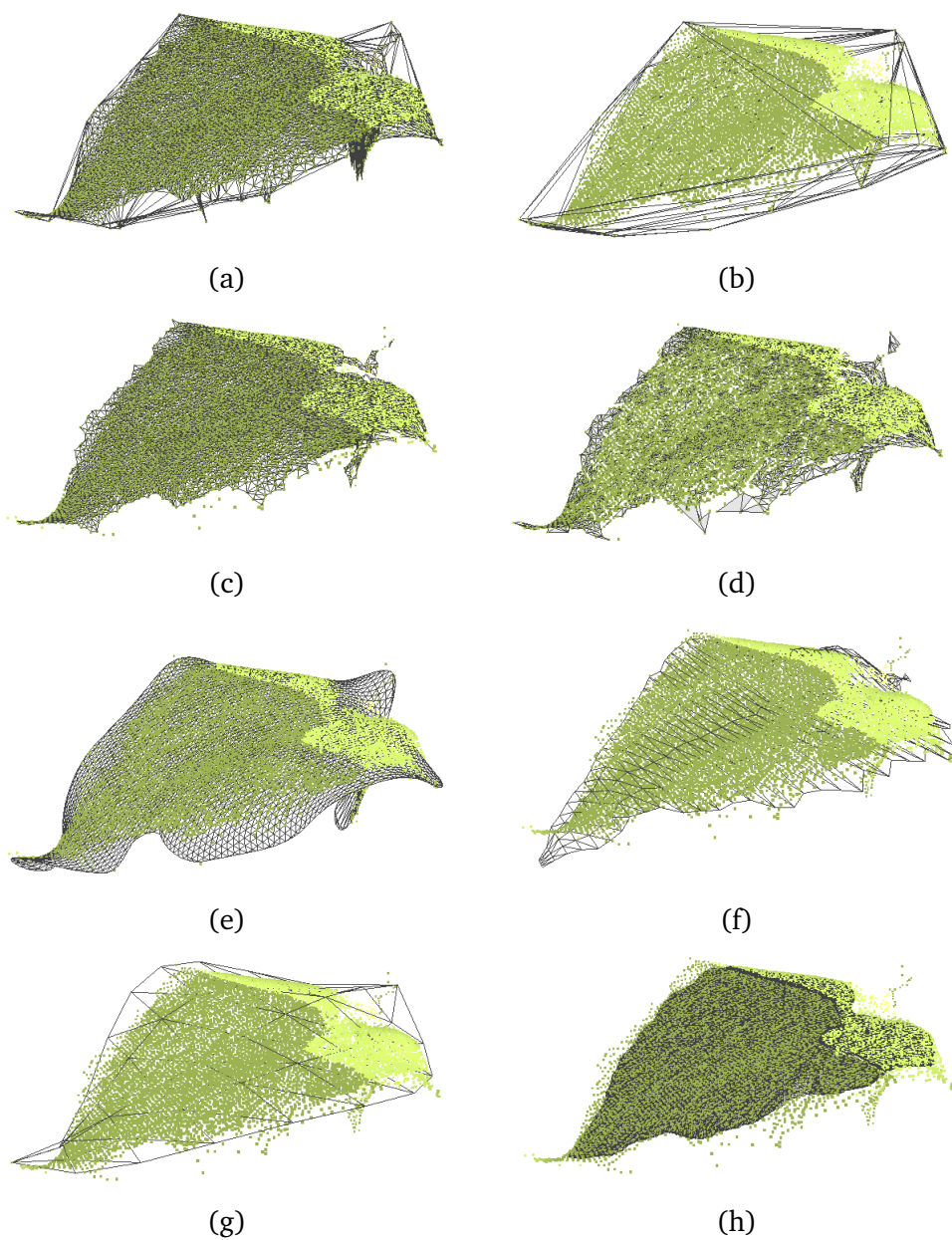


Fig. 4.34.: Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie bouleau (vert) superposé à la reconstruction par (a) la Triangulation 2.5D, (b) l'Alpha-shape, (c) la BPA, (d) la Reconstruction incrémentale, (e) la B-Spline, (f) le modèle de feuille de Bézier, (g) le Bézier élagué, (h) Poisson écranté.

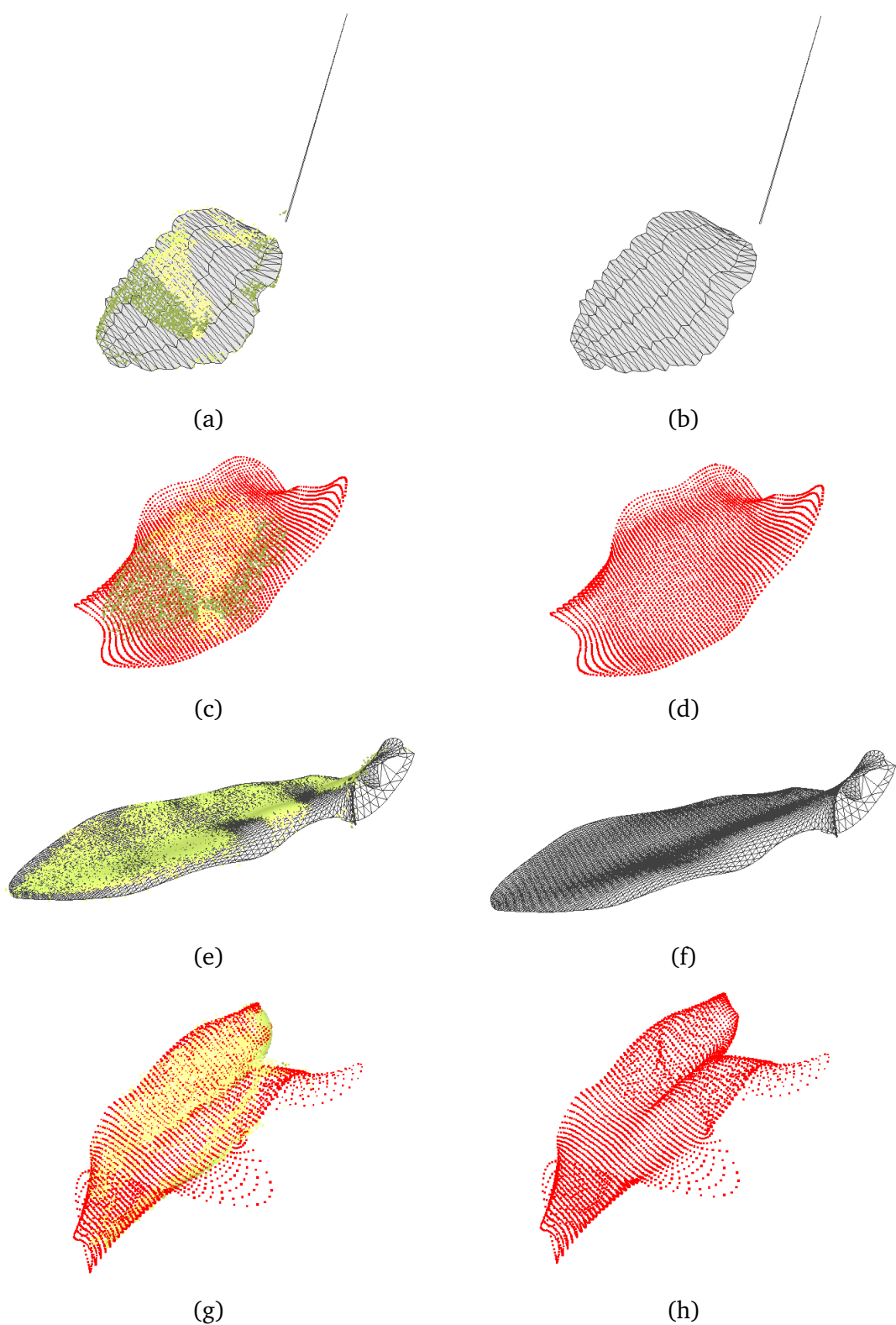


Fig. 4.35.: Visualisation d'échec de reconstruction sur des nuages de points du jeu de données de foresterie (vert) avec (a)(b) Bézier élagué , et B-Spline (c) à (h).

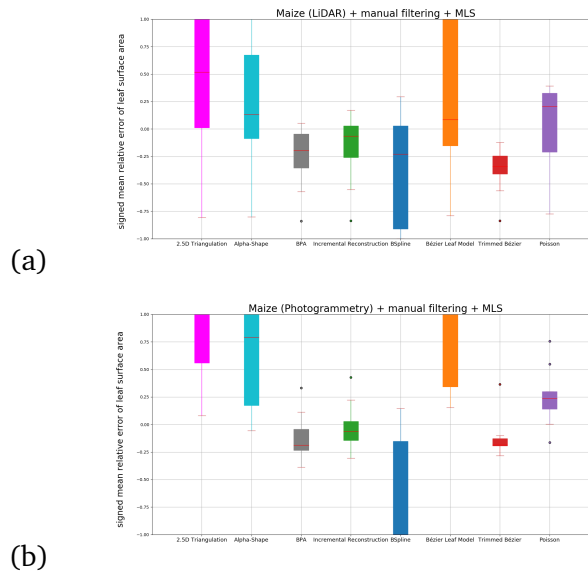


Fig. 4.36.: Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de données de maïs de la section 1.1 filtré avec MLS pour chaque méthode de reconstruction de surface. **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson échantillonné**.

données, la méthode la plus précise est la Reconstruction incrémentale. Elle a la meilleure valeur d'erreur médiane. Cependant la méthode la plus robuste est la méthode de Bézier élagué car les résultats sont moins dispersés, mais elle est moins précise en moyenne. De plus elle a aussi des difficultés à trouver le meilleur plan de projection, ce qui la rend largement moins fiable géométriquement (voir les figures 4.39, 4.40 et 4.41).

4.3.3 Conclusion sur la performance sur les données réelles

La base de données de nuages de points acquis sur différents types de plantes est variée et complexe. Les tests sur ces données permettent de parvenir à plusieurs conclusions. Tout d'abord, grâce aux tests sur les jeux de données concernant le maïs, il est pertinent de déduire que les modalités d'acquisition n'ont pas d'influence sur les performances des méthodes de reconstruction de surface. On peut aussi conclure que la méthode de Bézier élaguée sort du lot en termes de robustesse et de précision des résultats. Cependant, cette méthode présente des limites claires en termes de performance dans les cas où la géométrie de la feuille dépasse son cadre d'application. Ce cadre de fonctionnement est une fonction des deux critères géométrique de description de la forme de la feuille : la courbure et le ratio longueur/largeur. Le phénomène en jeu est détaillé dans les figures 4.39, 4.40 et 4.41. Dans les cas où

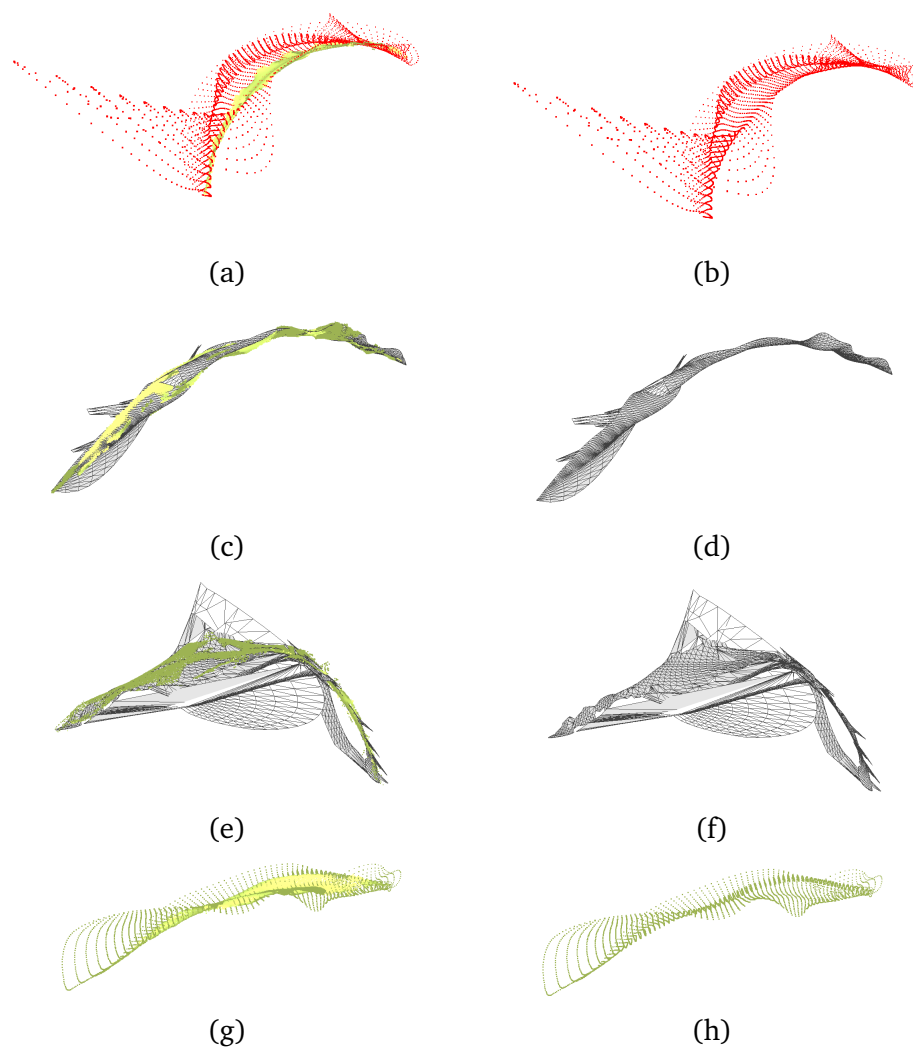


Fig. 4.37.: Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme B-Spline. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (h) photogrammétrie.

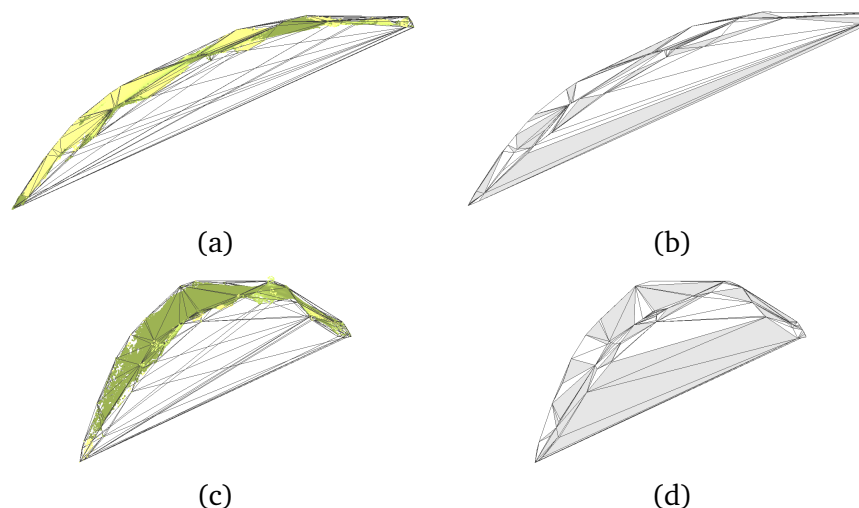


Fig. 4.38.: Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme Alpha-Shape. Différents nuages de points de (a) et (b) LiDAR et de (c) à (d) photogrammétrie.

la géométrie de la feuille est inadaptée à la méthode Bézier élagué, la méthode optimale conseillée est la Reconstruction incrémentale.

4.4 Conclusion et discussion des résultats de mesure de surface foliaire

Les résultats des sections 4.1 et 4.3 sont cohérents avec l'analyse sur les données synthétiques, car le comportement des modèles peut être expliqué par la combinaison des comportements décrits indépendamment sur les critères du modèle de feuille synthétiques. Les tests sur les données réelles acquises viennent donc compléter et valider l'étude sur les données synthétiques. Ils soulignent de plus l'impact de critères qui n'ont pas été modélisés dans notre approche synthétique. On peut citer par exemple les différentes natures de bruit comme le bruit présent en bordure des feuilles présent dans l'ensemble des données du bouleau, ou la présence de trous séparant en plusieurs clusters distincts les nuages de points de feuilles présents dans les données du chêne ou du maïs issu de la photogrammétrie.

Les résultats obtenus avec les données synthétiques montrent que les critères impactant le plus les méthodes de reconstruction de surface sont la courbure, puis le bruit d'acquisition et enfin les problèmes de recalage. Les modèles paramétriques sont robustes au bruit ainsi qu'aux problèmes de recalage jusqu'à un certain seuil, mais ne peuvent pas parfaitement convenir aux courbures élevées. Au contraire, la Reconstruction incrémentale a une sensibilité au critère du bruit élevé, mais pas aux critères de recalage et de courbure.

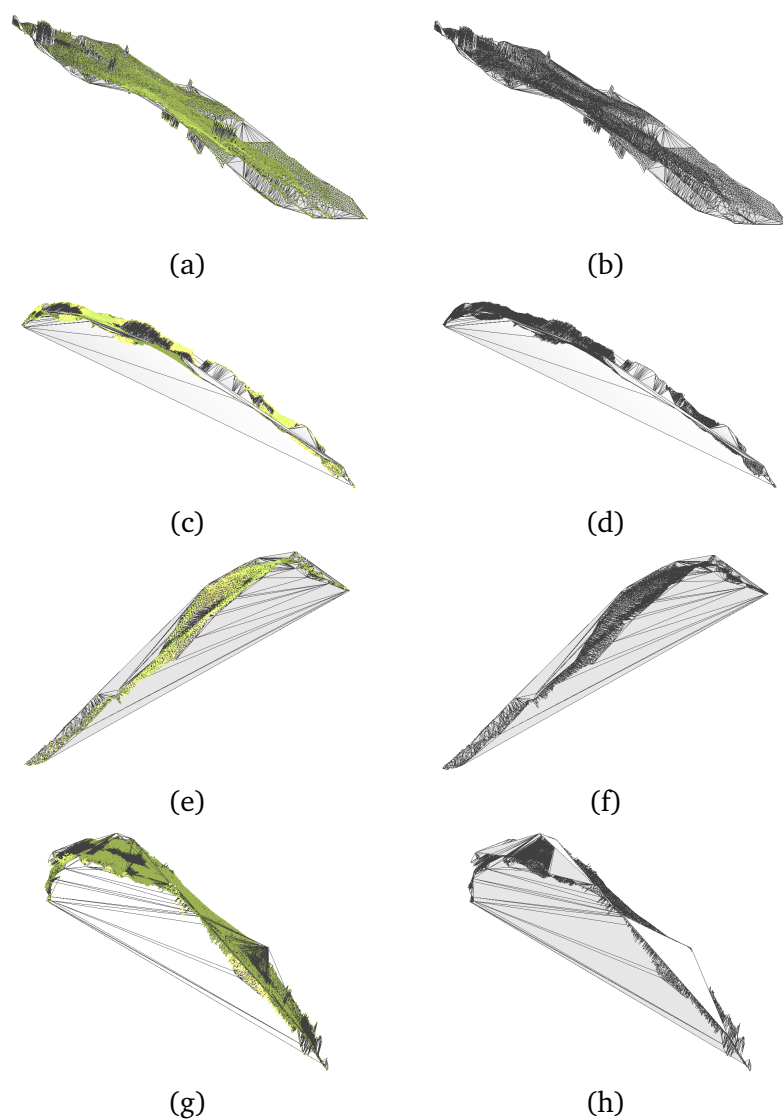


Fig. 4.39.: Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant Triangulation 2.5D. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (h) photogrammétrie.

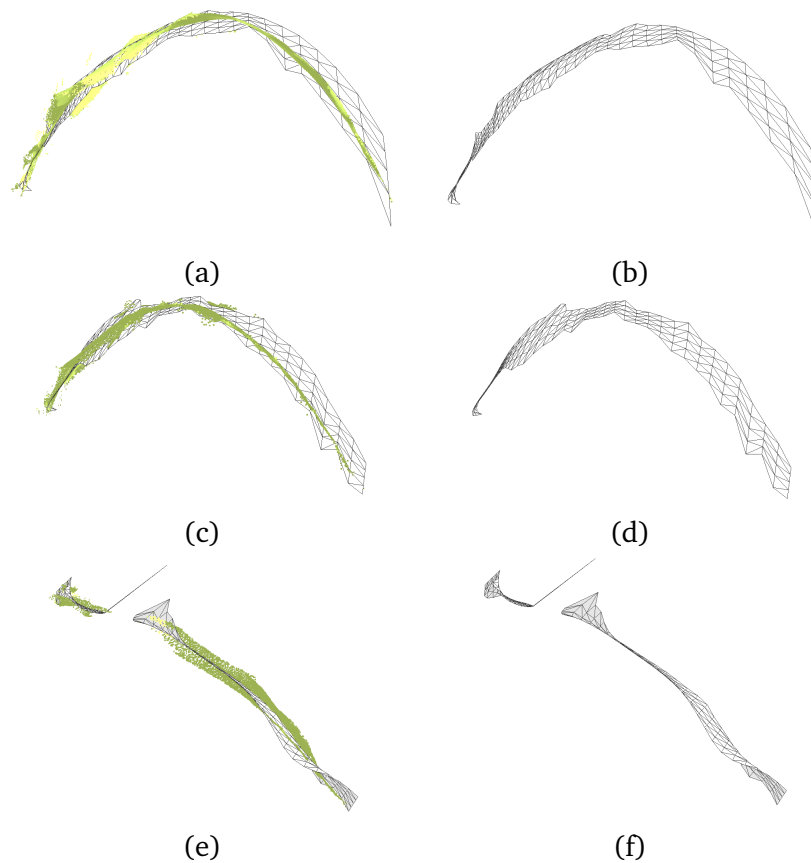


Fig. 4.40.: Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme Bézier élagué. Différents nuages de points de (a) à (b) LiDAR et de (c) à (f) photogrammétrie.

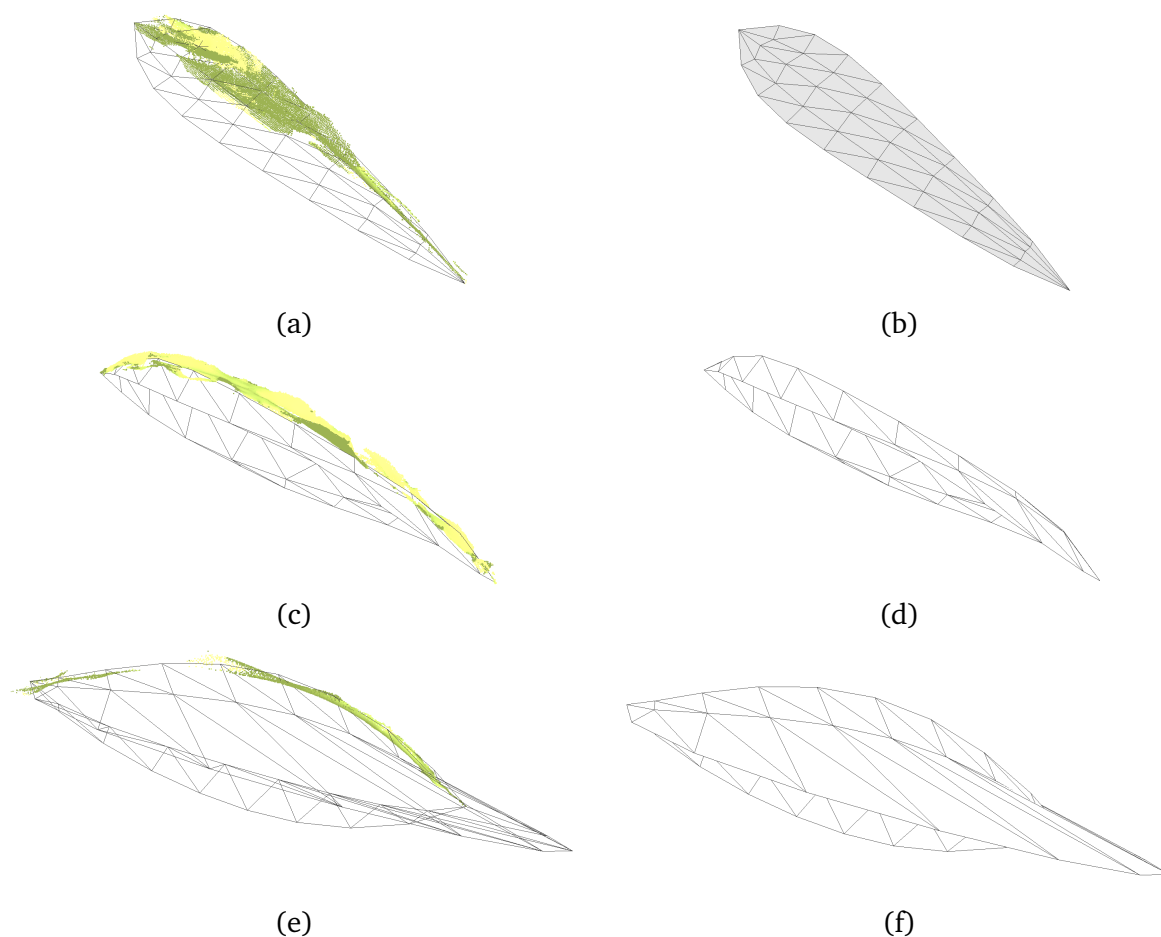


Fig. 4.41.: Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme du modèle de feuille de Bézier. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (f) photogrammétrie.

Une conclusion additionnelle est que le filtre MLS améliore grandement les performances de mesure de l'aire et accroît la robustesse de l'ensemble des méthodes. En revanche, ce n'est pas entièrement le cas pour le filtre SOR. Il est donc recommandé de filtrer systématiquement les données avec le filtre MLS.

L'ensemble des résultats permet de conclure que la combinaison du filtre MLS suivi par la reconstruction de surface avec l'algorithme de Bézier élagué est le processus recommandé. Il donnera les résultats les plus précis et robustes.

Cependant, les conclusions présentées plus haut doivent être nuancées. Dans le cas d'une feuille à géométrie hautement courbée et au ratio longueur/largeur non proche de 1 (comme le maïs dans nos tests), cette méthode peut sous-estimer l'aire de la feuille. Comme l'erreur est consistante sur l'ensemble des jeux de données, une solution pourrait être de prendre manuellement la mesure d'une seule feuille et de reporter le ratio entre la valeur vérité terrain mesurée et la valeur donnée par l'algorithme. Ce ratio représenterait le coefficient d'erreur de la méthode à reporter sur les résultats des autres feuilles de la plante. Une autre possibilité serait de calculer le seuil géométrique d'échec de la méthode Bézier élagué sur la feuille par rapport à la valeur de son ratio longueur/largeur et son taux de courbure. Au-delà du seuil de fonctionnement, la meilleure méthode de reconstruction de surface est alors la méthode de Reconstruction incrémentale.

Une autre note importante sur cette étude est que la qualité des nuages de points est élevée même si loin d'être parfaite. De ce fait, il n'y a eu aucune différence de résultats de mesure en fonction des modalités d'acquisition parce que les nuages de points sont de qualité suffisante pour réaliser cette étude. C'est pourquoi il est important pour obtenir des résultats précis et robustes de garantir la qualité du nuage de points 3D utilisé en entrée.

Conclusion

Différentes problématiques concernant l'obtention de données sur l'architecture des plantes en plein champ et le traitement de ces dernières pour obtenir la mesure de leur surface foliaire ont été étudiées dans cette thèse. Un schéma illustrant l'ensemble de la chaîne de traitement de la thèse est disponible dans la figure 4.42. Je me suis intéressé principalement à seulement une partie de ces étapes. Tout d'abord, je

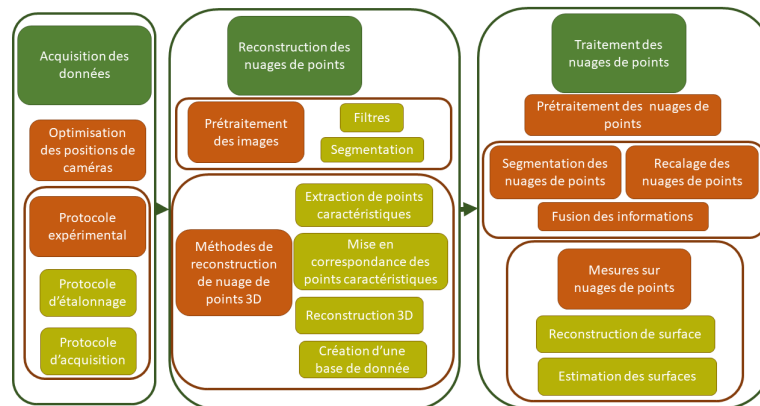


Fig. 4.42.: Chaîne de traitement de l'information de phénotypage, de l'acquisition à la mesure, principales étapes.

décrit dans le premier chapitre comment j'ai mis en place un protocole expérimental et obtenu une base de données d'images associées à des mesures de références de l'aire des feuilles et d'autres mesures architecturales. Puis la méthode la plus adaptée et performante de reconstruction de nuages de points 3D a été identifiée. Il s'agit du pipeline proposé par le logiciel COLMAP. La qualité de la reconstruction 3D obtenue montre qu'un pipeline basé sur la multivue pour des acquisitions avec la Phénomobile en plein champ peut donner des bons résultats à condition que le processus soit consolidé. COLMAP est ensuite utilisé pour construire une base de données de nuages de points 3D, elle aussi associée aux mesures architecturales de références. En plus des données de photogrammétrie, des données issues de scans LiDAR pour ces mêmes plantes ont été acquises en parallèle.

J'ai ensuite cherché à obtenir la mesure de la surface foliaire à partir des nuages de

points. Il n'y a eu jusqu'à présent aucune étude comparant les performances des méthodes de reconstruction de surface pour la mesure de la surface foliaire. Or les données acquises lors de notre expérimentation présentent simultanément plusieurs caractéristiques qui peuvent mettre en échec des méthodes de reconstruction de surfaces. Et il n'est pas aisé de trouver des bases de données de nuages de points de plante accompagnées des mesures de références nécessaires. Afin de pouvoir, à la fois, rendre plus robuste l'étude comparative et augmenter la taille des jeux de données d'étude, un modèle de nuage de points de feuille synthétique est créé et décrit dans le chapitre 2. Il permet de décrire avec neuf critères les caractéristiques géométriques des nuages de points de feuilles. Trois critères (ratio longueur/largeur, courbure et concavité) se rapportent à la forme intrinsèque des feuilles. Les six autres critères se rapportent directement aux modalités et conditions d'acquisition (motifs d'échantillonnage, bruit horizontal, densité, échantillonnage non uniforme, bruit d'acquisition, recalage, trou). Ce modèle de feuille synthétique est flexible et les critères sont facilement ajustables. Il est ensuite validé pour des applications agronomiques en vérifiant qu'il permet bien de modéliser la géométrie des feuilles de différentes espèces.

Un jeu de données de nuages de points de feuilles issus de la foresterie est ajouté à l'ensemble des données pour l'étude. Une fois toutes les données de tests assemblées, les méthodes de reconstruction de surface sélectionnées pour l'étude sont présentées. Il y a peu de méthodes de l'état de l'art qui sont à la fois disponibles en libre accès et non spécialisées. Une nouvelle méthode appelée Bézier élagué est proposée. Les autres méthodes étudiées sont la Triangulation 2.5D, l'Alpha-Shape, le BPA, la Reconstruction incrémentale, la B-Splines, le Modèle de feuille de Bézier et la reconstruction de Poisson écrantée. La méthodologie de l'étude comparative est détaillée dans le chapitre 3 et les paramètres de chaque méthode optimisés pour permettre l'automatisation de l'étude par des non-experts en informatique. Une démarche de choix automatique des valeurs des paramètres est développée pour les méthodes Triangulation 2.5D, Alpha-Shape et Poisson écrantée, car un de leurs paramètres est dépendant des caractéristiques intrinsèques du nuage de points d'entrée. Des algorithmes de filtrage classique (SOR et MLS) des nuages de points d'entrée sont aussi examinés afin de composer le meilleur pipeline possible de mesure.

Enfin, dans le chapitre 4, les résultats de l'étude comparative sont discutés. Une première conclusion concerne les prétraitements, ils permettent bien d'améliorer les performances des mesures. On conseille alors d'utiliser l'algorithme MLS. J'ai aussi pu montrer que la modalité d'acquisition du nuage de points n'a pas d'influence sur le résultat de la mesure tant que le nuage de points est de qualité suffisante. La méthode de reconstruction de surface la plus robuste est la méthode proposée Bézier élagué, qui présente également les meilleurs résultats, sauf lorsque la courbure et le ratio longueur/largeur sont tous les deux trop grands. Dans ce cas particulier, la

meilleure méthode est la Reconstruction incrémentale.

Les principales contributions de cette thèse sont donc la participation à la mise en place d'une procédure d'acquisition de nuages de points 3D de plantes de maïs aux champs par multivue. Puis la constitution d'une base de données de nuages de points 3D de plantes de maïs dans des conditions proches de celle de la culture. Dans le cadre de la mesure sur nuage de points, une méthode de reconstruction de surface a été proposée et validée pour l'estimation de la surface foliaire individuelle. Enfin, un modèle paramétrique de nuage de points de feuille synthétique est présenté et validé pour des applications agronomiques.

Cependant, ce travail présente des limites. Lors du processus d'acquisition, des problèmes expérimentaux inattendus ont rendu l'obtention des paramètres d'étalonnage complet impossible. L'environnement de l'acquisition ne correspond pas entièrement aux conditions d'acquisition en milieu extérieur non protégé. En effet, la serre a atténué les effets des principales sources d'erreurs que sont le vent et les changements de luminosité. Le placement optimal des caméras n'a pas pu être validé dans ces expériences, alors que ces données sont essentielles pour obtenir un nuage de points 3D à l'échelle et avec des déformations et artefacts minimaux. De même, les informations complètes pour le recalage des nuages de points de différentes modalités n'ont pas pu être obtenues.

Les données synthétiques créées modélisent de nombreuses caractéristiques géométriques des nuages de points de feuilles. Mais, comme vu dans le jeu de données acquis par Phénofixe et les tests de reconstruction de surface, il existe d'autres critères qui ne sont pas encore modélisés comme les torsions de feuilles. De même, le modèle est limité en termes de variété de formes de concavité.

L'étude des meilleures méthodes de reconstruction de surface pour la mesure de la surface foliaire est elle aussi limitée. En effet, la plupart des méthodes de l'état de l'art ne sont pas mises à disposition ce qui restreint à la fois l'utilisation des dites méthodes et aussi la portée de l'étude comparative.

Pratiquement, l'ensemble de la chaîne de traitement, à l'exception près de la segmentation, est présenté dans cette thèse, de l'acquisition à l'obtention de mesures. La qualité des résultats finaux est dépendant de l'ensemble de la chaîne de traitement, mais le processus d'acquisition est l'étape qui détermine la précision et la fiabilité maximale atteignable pour l'ensemble du système. Contrairement à d'autres applications, il n'est pas possible d'atténuer ou supprimer les causes d'erreurs et d'artefacts. Il faut donc aménager le processus d'acquisition en lui-même pour le rendre robuste aux conditions expérimentales. Il y a plusieurs façons d'y parvenir et l'une d'entre elles, qui n'est pas présentée dans cette thèse, est de placer les caméras à des positions optimales qui minimiseraient les occultations et le nombre de caméras et maximiseraient la fiabilité de la reconstruction. Une autre façon d'aménager le

protocole d'acquisition est de garantir l'obtention de paramètres d'étalonnage précis. Ils permettront de garantir une reconstruction de nuage de points précise et robuste (Dai et al. (2014) et Belhaoua et al. (2009)).

Une fois le protocole fiabilisé avec Phénofixe, les performances pourront être testées avec la Phénomobile dans un champ en extérieur. Il est aussi possible d'étendre le champ d'application en utilisant le dispositif pour le phénotypage d'autres cultures. De plus comme le protocole d'acquisition est systématique, répétable et non destructif, l'acquisition de données de phénotypage à différent stade de croissance peut alors ouvrir la porte à l'exploitation d'une nouvelle dimension temporelle. Le suivi de croissance des plantes est alors possible à partir de ces données.

En plus des images pour la reconstruction par photogrammétrie, des scans LiDAR ont été produits mais ils ne sont pas exploités. Afin de mettre à profit l'ensemble des données acquises, il faudrait mettre en place une chaîne de traitement spécifique qui permettrait de rendre les nuages de points exploitables. Une fois ces nuages de points LiDAR nettoyés, il sera possible d'étudier quantitativement les performances des deux modalités d'acquisition de Phénofixe et de décider des avantages et inconvénients de chacune d'entre-elle. Pour effectuer cette comparaison, des algorithmes de recalage fiable et automatique en milieu complexe sont nécessaires.

Une fois que l'ensemble des acquisitions sont réalisées, il faut pouvoir exploiter ces données acquises. Pour récupérer des nuages de points à partir d'images la reconstruction est l'étape clef. Comme il a été expliqué dans la thèse dans la section 1.2, les méthodes de l'état de l'art pour la reconstruction géométrique sont suffisamment performantes et ne nécessitent pas de travail d'amélioration. Il serait cependant intéressant d'examiner l'apport potentiel d'une segmentation binaire des plantes du fond des images en amont de la reconstruction. Ce qui pourrait d'une part limiter les erreurs comme la construction de points sous le niveau du terrain pour des logiciels avec Metashape. D'autre part, augmenter la précision de l'étape de mise en correspondance des points caractéristiques des images et par voie de conséquence, améliorer la précision générale de la reconstruction.

Un autre type de méthode de reconstruction, basé sur l'apprentissage profond, est en plein essor (voir section 1.2). Ces méthodes ne donnent pas encore de résultats aussi précis qu'avec les méthodes classiques basées géométrie (Prokopenko and Dupont, 2019). Cependant, elles démontrent déjà des cas d'exploitations intéressants qui ne sont pas gérés par les méthodes classiques: comme des objets déformables ou le remplissage de zones occultées. On peut considérer deux problématiques distinctes à partir des travaux de cette thèse. En premier il est possible d'étudier les méthodes de reconstructions basées sur l'apprentissage profond qui permettrait de s'affranchir de contraintes lors de l'acquisition. Par exemple, le recouvrement de toutes les

zones de la plante pourrait ne plus être nécessaire en utilisant des méthodes n'ayant besoin que d'une vue unique. Et cela permettrait d'augmenter la zone couverte et reconstruite par le système sans augmenter le nombre de caméras. La contrainte de synchronicité pourrait aussi être supprimée en utilisant avantageusement les méthodes robustes aux déformations. En second, il est possible de se concentrer sur la création d'une base de données d'apprentissage pour les algorithmes d'apprentissage profond. Pour les applications de phénotypage sur nuage de points 3D, ces bases de données sont très importantes, car très rares. Il n'y a donc pas suffisamment de données disponibles, pour concevoir et valider ces méthodes. L'étoffement de ma base de données d'images et des nuages de points reconstruit et l'ajout de labels favoriserait l'avancement de l'ensemble des problématiques d'apprentissage profond sur les nuages de points 3D dans le domaine agronomique.

Une étape très importante de la chaîne de traitement qui n'est pas étudiée dans cette thèse est l'étape de segmentation. Les nuages de points que j'ai acquis et reconstruits présentent de nombreuses caractéristiques qui rendent difficile la segmentation. La principale est la présence de zones occultées qui séparent en plusieurs clusters des points appartenant à la même plante voire au même organe. Ce genre de défauts du nuage de points sont largement éliminés dans les autres applications en milieu contrôlé ou par acquisition manuelle. Il faut donc concevoir une méthode robuste à ce genre d'artefacts. Les algorithmes d'apprentissage profond sont ici aussi une voie d'étude qui est possible. Même si, la difficulté de trouver la base de données d'apprentissage, reste identique. S. Jin et al. (2019) propose par exemple un modèle qui peut être testé sur nos données. Cependant, il est ici possible d'envisager un travail sur la transmission de labels de l'image au nuage de points. En effet, les algorithmes sont bien plus évolués et performants dans le cadre du traitement de l'image et les bases de données sont bien plus riches, ce qui permettrait d'obtenir une première base de données labellisée de nuage de points pour la segmentation. Une autre classe de méthode de segmentation qui peut être adaptée à notre cas applicatif sont les méthodes qui se basent sur des techniques plus "classiques", comme des méthodes basées graphes ou basées primitives géométriques, auxquelles on ajoute des connaissances a priori. Ces méthodes sont moins généralistes, mais elles permettent de mieux maîtriser le processus de la segmentation. L'objectif de la segmentation dans notre chaîne de traitement est multiple, il s'agit d'abord d'identifier les individus entre eux dans le champ et ensuite de détecter les organes et les attribuer aux bons individus le cas échéant. Il y a donc plusieurs niveaux d'études et la meilleure stratégie pour cette segmentation multiéchelles mérite d'être étudiée plus en profondeur. Il est peut-être plus efficace de segmenter directement dans le nuage de points 3D l'ensemble des organes puis de détecter les individus plutôt que l'inverse. Il est aussi envisageable de faire plusieurs segmentations dans le cas du nuage de points issu de la photogrammétrie. Les organes peuvent être segmentés sur les images et les labels seraient projetés dans le nuage de points reconstruit. Les

labels peuvent ensuite être affinés dans l'espace 3D.

Le modèle synthétique de nuage de points de feuille présenté dans cette thèse est une première approche qui a permis d'augmenter, et de contrôler, la diversité des nuages de points de feuille dans la base de données de l'étude comparative des méthodes de reconstruction. Afin d'améliorer la représentativité de ce modèle, on peut travailler sur l'ajout de nouveaux critères qui n'ont pas encore été modélisés comme les torsions de feuilles. Ou encore, on peut étoffer des critères existants comme un critère d'acquisition. Par exemple le bruit qui peut être distribué de façon non uniforme dans le nuage de points acquis, il peut être très présent au bord de feuilles et absent en son intérieur. Un autre critère, géométrique cette fois, qui peut être enrichi, est le critère de concavité qui présente dans la nature de larges variations de formes, de la forme de dentelure aux larges lobes arrondis. Dans le chapitre 2, on a vu qu'il existait d'autre modèle de feuilles présentant chacune leurs avantages et inconvénients. Les méthodes permettent soit une très bonne description, mais sont peu interprétables et la configuration des paramètres est alors difficile, soit c'est le contraire, elles ont une précision faible, mais sont facilement configurables. Une idée de développement serait d'étendre les méthodes de l'état de l'art avec nos critères pour générer de nouveaux nuages de points synthétiques de feuilles. Ce qui permettrait d'obtenir directement des nuages de points valides pour les applications en agronomie et de forme plus libre. Une dernière voie d'amélioration pour la génération de nuage de points synthétique est de créer un générateur de nuage de points de feuilles basé sur l'apprentissage profond, ce qui permettrait de prendre en compte des géométries de feuille de façon plus souple que lorsqu'un modèle géométrique précis est utilisé. À terme, la génération de nuages de points synthétiques de feuille peut déverrouiller les problèmes de quantité de données disponibles pour les méthodes d'apprentissage par ordinateur.

L'objectif final de cette thèse était de mesurer la surface des feuilles individuelles et pour ce faire trouver la méthode la plus performante en réalisant une étude comparative. Le cadre de l'étude a énormément restreint le type et le nombre de méthodes étudiées. Dans un contexte de chaîne de traitement automatique destinée à plusieurs types de plantes, il faut que les algorithmes et méthodes utilisées soient robustes à un ensemble large de nuages de points de feuilles aux caractéristiques très différentes. Une amélioration éventuelle de la chaîne de traitement serait d'ajouter plus tôt une étape de détection automatique d'espèce de la plante. En l'associant à un arbre de décision, il serait alors possible d'utiliser des méthodes spécialisées plus précises qui exploitent des informations connues a priori. L'étude serait alors centrée non plus sur la meilleure méthode de reconstruction de surface de feuille globale, mais les meilleures méthodes de reconstruction de surface de feuille en fonction des propriétés des feuilles détectables a priori. Ce qui est une suite logique des résultats de notre étude comparative, car on a déjà montré qu'aucune méthode

n'était globalement la meilleure pour tous les types de feuilles (voir chapitre 4). Une autre possibilité est les méthodes d'apprentissage profond qui prendraient en compte implicitement des informations a priori.

L'estimation de la surface foliaire n'est pas la seule mesure d'intérêt pour les agronomes et la base de données acquises décrite dans le chapitre 1 met à disposition d'autres mesures de références des feuilles comme sa longueur, sa largeur minimale et sa largeur maximale. Une chaîne de traitement automatique de l'extraction de ces données à partir du nuage de points 3D peut être mise en place. De cette façon, en plus de l'obtention de cette donnée architecturale, les feuilles seront décrites géométriquement selon plusieurs paramètres caractéristiques. En comparant ces mesures estimées aux mesures de références, une évaluation quantitative directe de la qualité du nuage de points peut être faite sans accès à un modèle géométrique numérique représentant la vérité. Et l'ensemble du processus peut être validé a posteriori.

Bibliographie

- Adamczyk, Marcin, Paweł Liberadzki, and Robert Sitnik (2018). „Temperature compensation method for digital cameras in 2D and 3D measurement applications“. In: *Sensors* 18.11, p. 3685 (cit. on p. 38).
- Åkerblom, Markku, Pasi Raunonen, Mikko Kaasalainen, and Eric Casella (2015). „Analysis of geometric primitives in quantitative structure models of tree stems“. English. In: *Remote Sensing* 7.4, pp. 4581–4603 (cit. on p. 113).
- Alexa, Marc, Johannes Behr, Daniel Cohen-Or, et al. (2001). „Point Set Surfaces“. In: *Proceedings of the Conference on Visualization '01. VIS '01*. San Diego, California: IEEE Computer Society, pp. 21–28 (cit. on pp. 163, 165).
- Alsadik, Bashar, Markus Gerke, George Vosselman, Afrah Daham, and Luma Jasim (2014). „Minimal camera networks for 3D image based modeling of cultural heritage objects“. In: *Sensors* 14.4, pp. 5785–5804 (cit. on p. 39).
- Ando, Ryuhei, Yuko Ozasa, and Wei Guo (2021). „Robust Surface Reconstruction of Plant Leaves from 3D Point Clouds“. In: *Plant Phenomics* 2021 (cit. on p. 115).
- Arcangeli, Rémi, Maria Cruz López de Silanes, and Juan José Torrens (2004). *Multidimensional minimizing splines: Theory and applications*. Springer Science & Business Media (cit. on pp. 112, 114).
- b82160, Blend Swap User (2017). *High Poly Hydrant*. <https://www.blendswap.com/blends/view/87541> (cit. on p. 51).
- Bartoš, Karol, Katarína Pukanská, and Janka Sabová (2014). „Overview of available open-source photogrammetric software, its use and analysis“. In: *International Journal for Innovation Education and Research (IJIER)* 2.4, pp. 62–70 (cit. on pp. 53, 54).
- Beauchêne, Katia, Fabien Leroy, Antoine Fournier, et al. (2019). „Management and characterization of abiotic stress via PhénoField®, a high-throughput field phenotyping platform“. In: *Frontiers in plant science* 10, p. 904 (cit. on pp. 9, 10, 12).
- Belhaoua, Abdelkrim, Sophie Kohler, and Ernest Hirsch (2009). „Estimation of 3d reconstruction errors in a stereo-vision system“. In: *Modeling aspects in optical metrology II*. Vol. 7390. International Society for Optics and Photonics, p. 73900X (cit. on pp. 69, 224).
- Benet, B (2009). „Réalisation du système BECAM PORTIQUE pour l'acquisition d'images sur deux raies de betteraves“. PhD thesis. irstea (cit. on p. 9).
- Bensmihen, Sandra, Andrew I Hanna, Nicolas B Langlade, et al. (2008). „Mutational spaces for leaf shape and size“. In: *Hfsp Journal* 2.2, pp. 110–120 (cit. on p. 76).

- Berger, Matthew, Andrea Tagliasacchi, Lee M. Seversky, et al. (2017). „A Survey of Surface Reconstruction from Point Clouds“. In: *Comput. Graph. Forum* 36.1, pp. 301–329 (cit. on pp. 81, 113).
- Bernardini, Fausto, Joshua Mittleman, Holly Rushmeier, Claudio Silva, and Gabriel Taubin (1999). „The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 5.4, pp. 349–359 (cit. on pp. 122, 123).
- Bernotas, Gytis, Livia CT Scorza, Mark F Hansen, et al. (2019). „A photometric stereo-based 3D imaging system using computer vision and deep learning for tracking plant growth“. In: *GigaScience* 8.5, giz056 (cit. on pp. 6, 8).
- Bevington, Philip R, D Keith Robinson, J Morris Blair, A John Mallinckrodt, and Susan McKay (1993). „Data reduction and error analysis for the physical sciences“. In: *Computers in Physics* 7.4, pp. 415–416 (cit. on p. 264).
- Bianco, Simone, Gianluigi Ciocca, and Davide Marelli (2018). „Evaluating the performance of structure from motion pipelines“. In: *Journal of Imaging* 4.8, p. 98 (cit. on pp. 40, 47, 48, 51, 52).
- Blinn, James F (1978). „Simulation of wrinkled surfaces“. In: *ACM SIGGRAPH computer graphics* 12.3, pp. 286–292 (cit. on p. 267).
- Blum, Harry et al. (1967). *A transformation for extracting new descriptors of shape*. Vol. 43. MIT press Cambridge, MA (cit. on p. 268).
- BMF, Blend Swap User (2016). *Willys Jeep Circa 1944*. <https://www.blendswap.com/blends/view/82687> (cit. on p. 51).
- Bookstein, Fred L. (1989). „Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations“. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 11.6, pp. 567–585 (cit. on p. 269).
- Bradley, Andrew P (1997). „The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms“. In: *Pattern recognition* 30.7, pp. 1145–1159 (cit. on p. 53).
- Bradski, G. (2000). „The OpenCV Library“. In: *Dr. Dobb's Journal of Software Tools* (cit. on p. 36).
- Buck-Sorlin, GH (2002). „L-system model of the vegetative growth of winter barley“. In: *Fifth German workshop on artificial life*. Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH Lübeck, pp. 53–64 (cit. on p. 75).
- CALAS, Guillaume (2009). „Optimisation par essaim particulière“. In: *Une* 3.3 (cit. on p. 267).
- Catmull, Edwin and Raphael Rom (1974). „A class of local interpolating splines“. In: *Computer aided geometric design*. Elsevier, pp. 317–326 (cit. on p. 265).
- Chaudhury, Ayan, Christopher Ward, Ali Talasaz, et al. (2019). „Machine Vision System for 3D Plant Phenotyping“. In: *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics* 16.6, pp. 2009–2022 (cit. on pp. 118, 122).
- Chaurasia, Gaurav and Paul Beardsley (2017). „Editable Parametric Dense Foliage from 3D Capture“. In: *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 5315–5324 (cit. on pp. 117, 129–131).

- Chéné, Yann, David Rousseau, Philippe Lucidarme, et al. (2012). „On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants“. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 82, pp. 122–127 (cit. on p. 5).
- Chi, Y-T, C-F Chien, and T-T Lin (2003). „Leaf shape modeling and analysis using geometric descriptors derived from Bezier curves“. In: *Transactions of the ASAE* 46.1, p. 175 (cit. on p. 76).
- Chitwood, Daniel H and Wagner C Otoni (2017). „Morphometric analysis of Passiflora leaves: the relationship between landmarks of the vasculature and elliptical Fourier descriptors of the blade“. In: *GigaScience* 6.1, giw008 (cit. on p. 76).
- Cignoni, Paolo, Marco Callieri, Massimiliano Corsini, et al. (2008). „MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool“. In: *Eurographics Italian Chapter Conference*. Ed. by Vittorio Scarano, Rosario De Chiara, and Ugo Erra. <http://www.meshlab.net/>. The Eurographics Association (cit. on p. 120).
- Colliaux, David, T Wintz, and P Hanappe (2017). „Bringing phenotyping to the farm: An evaluation of 3D reconstruction of plants in outdoor environment“. In: *Communication présentée à l'International Conference on Computer Vision ...* (cit. on pp. 6, 8).
- Confalonieri, Roberto, Francesca Orlando, Livia Paleari, et al. (2016). „Uncertainty in crop model predictions: what is the role of users?“. In: *Environmental Modelling & Software* 81, pp. 165–173 (cit. on p. 75).
- Corporation, SONY (2020). *Imaging Edge Mobile*. <http://support.d-imaging.sony.co.jp/app/iemobile/fr/> (cit. on p. 21).
- Coussement, Jonas, Kathy Steppe, Peter Lootens, Isabel Roldan-Ruiz, and Tom De Swaef (2018). „A flexible geometric model for leaf shape descriptions with high accuracy“. In: *Silva Fennica* 52.2 (cit. on p. 76).
- Dai, Fei, Youyi Feng, and Ryan Hough (2014). „Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications“. In: *Visualization in Engineering* 2.1, p. 2 (cit. on pp. 69, 224).
- Danilevicz, Monica F, Philipp E Bayer, Benjamin J Nestor, Mohammed Bennamoun, and David Edwards (2021). „Resources for image-based high-throughput phenotyping in crops and data sharing challenges“. In: *Plant Physiology* 187.2, pp. 699–715 (cit. on p. 71).
- Dauzat, Jean, Pascal Clouvel, Delphine Luquet, and Pierre Martin (2008). „Using virtual plants to analyse the light-foraging efficiency of a low-density cotton crop“. In: *Annals of botany* 101.8, pp. 1153–1166 (cit. on p. 75).
- Delaunay, Boris et al. (1934). „Sur la sphere vide“. In: *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk* 7.793-800, pp. 1–2 (cit. on p. 269).
- Dgemmell1960, Free 3D User (2017). *Small Garden Statue*. <https://free3d.com/3d-model/statue-92429.html> (cit. on p. 51).
- Dornbusch, Tino, Peter Wernecke, and Wulf Diepenbrock (2007). „A method to extract morphological traits of plant organs from 3D point clouds as a database for an architectural plant model“. In: *Ecological Modelling* 200.1-2, pp. 119–129 (cit. on p. 75).
- Dupuis, Jan, Christoph Holst, and Heiner Kuhlmann (Mar. 2016). „Laser Scanning Based Growth Analysis of Plants as a New Challenge for Deformation Monitoring“. In: *Journal of Applied Geodesy* 10.1, pp. 37–44 (cit. on pp. 112, 114, 127).

- Dutagaci, Helin, Pejman Rasti, Gilles Galopin, and David Rousseau (2020). „ROSE-X: an annotated data set for evaluation of 3D plant organ segmentation methods“. In: *Plant methods* 16.1, pp. 1–14 (cit. on p. 71).
- Eberly, David (1999). „Distance between point and triangle in 3D“. In: *Magic Software*, <http://www.magic-software.com/Documentation/pt3tri3.pdf> (cit. on p. 49).
- Edelsbrunner, Herbert and Ernst P. Mücke (1994a). „Three-Dimensional Alpha Shapes“. In: *ACM Trans. Graph.* 13.1, pp. 43–72 (cit. on p. 112).
- (1994b). „Three-Dimensional Alpha Shapes“. In: *ACM Trans. Graph.* 13.1, pp. 43–72 (cit. on p. 120).
- Evers, Jochem B, Jan Vos, Christian Fournier, Bruno Andrieu, Michael Chelle, et al. (2005). „Towards a generic architectural model of tillering in Gramineae, as exemplified by spring wheat (*Triticum aestivum*)“. In: *New Phytologist* 166.3, pp. 801–812 (cit. on p. 75).
- Evers, Jochem B, Jan Vos, Christian Fournier, Bruno Andrieu, Michaël Chelle, et al. (2007). „An architectural model of spring wheat: evaluation of the effects of population density and shading on model parameterization and performance“. In: *Ecological Modelling* 200.3-4, pp. 308–320 (cit. on pp. 75, 76).
- Fawcett, Tom (2006). „An introduction to ROC analysis“. In: *Pattern recognition letters* 27.8, pp. 861–874 (cit. on p. 264).
- Foundation, Blender (2020). *Blender*. <https://www.blender.org/> (cit. on p. 50).
- Fournier, Christian and Bruno Andrieu (1998). „A 3D architectural and process-based model of maize development“. In: *Annals of botany* 81.2, pp. 233–250 (cit. on p. 75).
- (1999). „ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability“. In: *Agronomie* 19.3-4, pp. 313–327 (cit. on p. 75).
- Fournier, Christian, Bruno Andrieu, S Ljutovac, and Sébastien Saint-Jean (2003). *ADEL-wheat: a 3D architectural model of wheat development* (cit. on p. 75).
- Furukawa, Yasutaka, Brian Curless, Steven M Seitz, and Richard Szeliski (2010). „Towards internet-scale multi-view stereo“. In: *2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. IEEE, pp. 1434–1441 (cit. on p. 51).
- Furukawa, Yasutaka and Jean Ponce (2009). „Accurate, dense, and robust multiview stereopsis“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 32.8, pp. 1362–1376 (cit. on pp. 51, 264, 267).
- Geoffreymarchal, Blend Swap User (2017). *Empire Vase*. <https://www.blendswap.com/blends/view/90518> (cit. on p. 51).
- Godin, Christophe and Hervé Sinoquet (2005). „Functional–structural plant modelling“. In: *New phytologist* 166.3, pp. 705–708 (cit. on p. 265).
- Gonzalez-Aguilera, Diego and Javier Gomez-Lahoz (2008). „From 2D to 3D through modelling based on a single image“. In: *The Photogrammetric Record* 23.122, pp. 208–227 (cit. on p. 42).
- Gonzalez-Lorenzo, Aldo (2020). *Homologie persistante*. <https://aldo-gonzalez-lorenzo.pedaweb.univ-amu.fr/2020/smacud11-homologie-persistante.html#/> (cit. on p. 266).

- Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (2016). *Deep Learning*. <http://www.deeplearningbook.org>. MIT Press (cit. on p. 264).
- Gopi, M and Shankar Krishnan (2002). „A fast and efficient projection-based approach for surface reconstruction“. In: *Proceedings. XV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. IEEE, pp. 179–186 (cit. on p. 125).
- Griwodz, Carsten, Simone Gasparini, Lilian Calvert, et al. (2021). „AliceVision Meshroom: An open-source 3D reconstruction pipeline“. In: *Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference*, pp. 241–247 (cit. on p. 46).
- Guibas, Leonidas J, Donald E Knuth, and Micha Sharir (1992). „Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams“. In: *Algorithmica* 7.1, pp. 381–413 (cit. on p. 269).
- Guo, YAN, Yuntao Ma, Zhigang Zhan, et al. (2006). „Parameter optimization and field validation of the functional–structural model GREENLAB for maize“. In: *Annals of botany* 97.2, pp. 217–230 (cit. on p. 75).
- Han, Xian-Feng, Hamid Laga, and Mohammed Bennamoun (2019). „Image-based 3D object reconstruction: State-of-the-art and trends in the deep learning era“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 43.5, pp. 1578–1604 (cit. on p. 44).
- Harmening, Corinna and Jens-André Paffenholz (2021). „A Fully Automated Three-Stage Procedure for Spatio-Temporal Leaf Segmentation with Regard to the B-Spline-Based Phenotyping of Cucumber Plants“. In: *Remote Sensing* 13.1 (cit. on p. 127).
- Hasan, Md Mehedi, Joshua P Chopin, Hamid Laga, and Stanley J Miklavcic (2018). „Detection and analysis of wheat spikes using convolutional neural networks“. In: *Plant Methods* 14.1, pp. 1–13 (cit. on pp. 6, 9).
- Henke, Michael, Stephan Huckemann, Winfried Kurth, Branislav Sloboda, et al. (2014). „Reconstructing leaf growth based on non-destructive digitizing and low-parametric shape evolution for plant modelling over a growth cycle“. In: *Silva Fennica* 48.2 (cit. on p. 75).
- Hétroy-Wheeler, Franck, Eric Casella, and Dobrina Boltcheva (2016). „Segmentation of tree seedling point clouds into elementary units“. In: *International Journal of Remote Sensing* 37.13, pp. 2881–2907 (cit. on pp. 107, 117, 162, 163, 165).
- Hirschmuller, Heiko (2007). „Stereo processing by semiglobal matching and mutual information“. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 30.2, pp. 328–341 (cit. on p. 46).
- Homologie persistante: une introduction non mathématique avec des exemples* (2021). <https://ichi.pro/fr/homologie-persistante-une-introduction-non-mathematique-avec-des-exemples-27989575844816> (cit. on p. 266).
- Hoppe, Hugues, Tony DeRose, Tom Duchamp, John McDonald, and Werner Stuetzle (July 1992). „Surface Reconstruction from Unorganized Points“. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 26.2, pp. 71–78 (cit. on pp. 120, 132).
- Horn, Berthold KP (1987). „Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions“. In: *Josa a* 4.4, pp. 629–642 (cit. on p. 266).
- Huang, Po-Han, Kevin Matzen, Johannes Kopf, Narendra Ahuja, and Jia-Bin Huang (2018). „Deepmvs: Learning multi-view stereopsis“. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2821–2830 (cit. on p. 44).

- Iglhaut, Jakob, Carlos Cabo, Stefano Puliti, et al. (2019). „Structure from motion photogrammetry in forestry: A review“. In: *Current Forestry Reports* 5.3, pp. 155–168 (cit. on pp. 41, 44).
- Iwata, Hiroyoshi, Hirohisa Nesumi, Seishi Ninomiya, Yasushi Takano, and Yasuo Ukai (2002). „Diallel analysis of leaf shape variations of citrus varieties based on elliptic Fourier descriptors“. In: *Breeding Science* 52.2, pp. 89–94 (cit. on p. 76).
- Jay, Sylvain, Gilles Rabatel, Xavier Hadoux, Daniel Moura, and Nathalie Gorretta (2015). „In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using Structure from Motion“. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 110, pp. 70–77 (cit. on pp. 9, 10).
- Jin, Shichao, Yanjun Su, Shang Gao, et al. (2019). „Separating the structural components of maize for field phenotyping using terrestrial LiDAR data and deep convolutional neural networks“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 58.4, pp. 2644–2658 (cit. on p. 225).
- Jin, Yiwei, Diqiong Jiang, and Ming Cai (2020). „3D reconstruction using deep learning: a survey“. In: *Communications in Information and Systems* 20.4, pp. 389–413 (cit. on p. 44).
- Kaitaniemi, Pekka, Peter M Room, and Jim S Hanan (1999). „Architecture and morphogenesis of grain sorghum, *Sorghum bicolor* (L.) Moench“. In: *Field Crops Research* 61.1, pp. 51–60 (cit. on p. 75).
- Kazhdan, Michael, Matthew Bolitho, and Hugues Hoppe (2006). „Poisson Surface Reconstruction“. In: *Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing. SGP '06*. Cagliari, Sardinia, Italy: Eurographics Association, pp. 61–70 (cit. on pp. 116, 132).
- Kazhdan, Michael and Hugues Hoppe (2013). „Screened poisson surface reconstruction“. In: *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 32.3, pp. 1–13 (cit. on pp. 116, 132).
- Kempthorne, Daryl M, Ian W Turner, John A Belward, et al. (2014a). „Surface reconstruction of wheat leaf morphology from three-dimensional scanned data“. In: *Functional Plant Biology* 42.5, pp. 444–451 (cit. on p. 115).
- Kempthorne, Daryl M., Ian W. Turner, and John A. Belward (2014b). „A Comparison of Techniques for the Reconstruction of Leaf Surfaces from Scanned Data“. In: *SIAM Journal on Scientific Computing* 36.6, B969–B988 (cit. on p. 112).
- Khanna, Raghav, Lukas Schmid, Achim Walter, et al. (2019). „A spatio temporal spectral framework for plant stress phenotyping“. In: *Plant methods* 15.1, pp. 1–18 (cit. on p. 71).
- Klingenberg, Christian Peter (2008). „Novelty and “homology-free” morphometrics: what’s in a name?“ In: *Evolutionary Biology* 35.3, pp. 186–190 (cit. on p. 268).
- Knapitsch, Arno, Jaesik Park, Qian-Yi Zhou, and Vladlen Koltun (2017). „Tanks and temples: Benchmarking large-scale scene reconstruction“. In: *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 36.4, pp. 1–13 (cit. on p. 50).
- Krainin, Michael, Brian Curless, and Dieter Fox (2011). „Autonomous generation of complete 3D object models using next best view manipulation planning“. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, pp. 5031–5037 (cit. on p. 39).
- Kuhl, Frank P and Charles R Giardina (1982). „Elliptic Fourier features of a closed contour“. In: *Computer graphics and image processing* 18.3, pp. 236–258 (cit. on pp. 263, 265).

- Laga, Hamid, Laurent Valentin Jospin, Farid Boussaid, and Mohammed Bennamoun (2020). „A survey on deep learning techniques for stereo-based depth estimation“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (cit. on p. 44).
- Lam, TY (2003). „Hamilton’s quaternions“. In: *Handbook of algebra*. Vol. 3. Elsevier, pp. 429–454 (cit. on p. 268).
- Lei, Hongyun, Chengda Lin, Ruifang Zhai, and Yidan Yao (2015). „Research on rapeseed plant modeling and optimization from 3D point cloud“. In: *2015 Fourth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-geoinformatics)*. IEEE, pp. 184–188 (cit. on p. 114).
- Li, Dawei, Yan Cao, Guoliang Shi, et al. (2019). „An Overlapping-Free Leaf Segmentation Method for Plant Point Clouds“. In: *IEEE Access* 7, pp. 129054–129070 (cit. on pp. 114, 124).
- Li, Dawei, Guoliang Shi, Weijian Kong, Sifan Wang, and Yang Chen (2020). „A leaf segmentation and phenotypic feature extraction framework for multiview stereo plant point clouds“. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13, pp. 2321–2336 (cit. on p. 114).
- Li, Mao, Hong An, Ruthie Angelovici, et al. (2018). „Topological data analysis as a morphometric method: using persistent homology to demarcate a leaf morphospace“. In: *Frontiers in plant science* 9, p. 553 (cit. on pp. 88–91, 99, 100, 268).
- Liénard, Jean, Andre Vogs, Demetrios Gatzoulis, and Nikolay Strigul (2016). „Embedded, real-time UAV control for improved, image-based 3D scene reconstruction“. In: *Measurement* 81, pp. 264–269 (cit. on p. 53).
- LLC, Agisoft (2020). *Agisoft Metashape*. <https://www.agisoft.com/> (cit. on pp. 45, 46).
- Loch, Birgit I., John A. Belward, and Jim S. Hanan (2005). „Application of surface fitting techniques for the representation of leaf surfaces“. In: *International Congress on Modelling and Simulation: Advances and Applications for Management and Decision Making (MODSIM)*, pp. 1272–1278 (cit. on pp. 112, 114).
- Lowe, David G (1999). „Object recognition from local scale-invariant features“. In: *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. Vol. 2. Ieee, pp. 1150–1157 (cit. on p. 268).
- Marton, Zoltan Csaba, Radu Bogdan Rusu, and Michael Beetz (2009). „On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Point Clouds“. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ICRA’09. Kobe, Japan: IEEE Press, pp. 2829–2834 (cit. on p. 124).
- Masuda, Takeshi (2021). „Leaf Area Estimation by Semantic Segmentation of Point Cloud of Tomato Plants“. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 1381–1389 (cit. on p. 115).
- MATLAB version 9.3.0.713579 (R2017b) (2017). The Mathworks, Inc. Natick, Massachusetts (cit. on p. 36).
- Milkyduhan, Blend Swap User (2013). *BiCycle Textured*. <https://www.blendswap.com/blends/view/67563> (cit. on p. 51).

- Minervini, Massimo, Mario V Giuffrida, Pierdomenico Perata, and Sotirios A Tsaftaris (2017). „Phenotiki: An open software and hardware platform for affordable and easy image-based phenotyping of rosette-shaped plants“. In: *The Plant Journal* 90.1, pp. 204–216 (cit. on pp. 5, 6).
- Mohammadikaji, Mahsa, Stephan Bergmann, Stephan Irgenfried, et al. (2017). „Probabilistic surface inference for industrial inspection planning“. In: *Applications of Computer Vision (WACV), 2017 IEEE Winter Conference on*. IEEE, pp. 1008–1016 (cit. on p. 39).
- Morel, Jules, Alexandra Bac, and Cédric Véga (2018). „Surface reconstruction of incomplete datasets: A novel Poisson surface approach based on CSRBF“. In: *Computers and Graphics* 74, pp. 44–55 (cit. on p. 132).
- Mörwald, Thomas, Jonathan Balzer, and Markus Vincze (Feb. 2016). „Modeling Connected Regions in Arbitrary Planar Point Clouds by Robust B-Spline Approximation“. In: *Robot. Auton. Syst.* 76.C, pp. 141–151 (cit. on pp. 113, 127, 129, 146).
- Moulon, Pierre and Alessandro Bezi (2011). „Python photogrammetry toolbox: a free solution for three-dimensional documentation“. In: *ArcheoFoss*, pp. 1–12 (cit. on p. 47).
- Moulon, Pierre, Pascal Monasse, Romuald Perrot, and Renaud Marlet (2016). „Openmvg: Open multiple view geometry“. In: *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*. Springer, pp. 60–74 (cit. on p. 47).
- Mundermann, Lars, Yvette Erasmus, Brendan Lane, Enrico Coen, and Przemyslaw Prusinkiewicz (2005). „Quantitative modeling of Arabidopsis development“. In: *Plant physiology* 139.2, pp. 960–968 (cit. on p. 75).
- Nealen, Andrew (2004). „An as-short-as-possible introduction to the least squares, weighted least squares and moving least squares methods for scattered data approximation and interpolation“. In: URL: <http://www.nealen.com/projects> 130.150, p. 25 (cit. on p. 166).
- Neto, Joao Camargo, George E Meyer, David D Jones, and Ashok K Samal (2006). „Plant species identification using Elliptic Fourier leaf shape analysis“. In: *Computers and electronics in agriculture* 50.2, pp. 121–134 (cit. on p. 76).
- Ng, Ren (2006). *Digital light field photography*. stanford university (cit. on p. 264).
- Oqielat, MN, IW Turner, and JA Belward (2009). „A hybrid Clough–Tocher method for surface fitting with application to leaf data“. In: *Applied Mathematical Modelling* 33.6, pp. 2582–2595 (cit. on pp. 112, 114).
- Oqielat, Moa’Ath N. (2019). „Surface fitting methods for modelling leaf surface from scanned data“. In: *Journal of King Saud University - Science* 31.2, pp. 215–221 (cit. on p. 112).
- Osher, Stanley and Ronald P Fedkiw (2001). „Level set methods: an overview and some recent results“. In: *Journal of Computational physics* 169.2, pp. 463–502 (cit. on p. 269).
- Özyeşil, Onur, Vladislav Voroninski, Ronen Basri, and Amit Singer (2017). „A survey of structure from motion*.“ In: *Acta Numerica* 26, pp. 305–364 (cit. on p. 40).
- Papoutsoglou, Evangelia A, Daniel Faria, Daniel Arend, et al. (2020). „Enabling reusability of plant phenomic datasets with MIAPPE 1.1“. In: *New Phytologist* 227.1, pp. 260–273 (cit. on p. 71).
- Paulus, Stefan (2019). „Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping“. In: *Plant Methods* 15.1, pp. 1–13 (cit. on pp. 10, 109).

- Piegl, Les and Wayne Tiller (1996). *The NURBS book*. Springer Science & Business Media (cit. on p. 267).
- Pock, Thomas, Lukas Zebedin, and Horst Bischof (2011). „TGV-fusion“. In: *Rainbow of computer science*. Springer, pp. 245–258 (cit. on p. 46).
- Poulin-Girard, Anne-Sophie, Simon Thibault, and Denis Laurendeau (2016). „Influence of camera calibration conditions on the accuracy of 3D reconstruction“. In: *Optics express* 24.3, pp. 2678–2686 (cit. on pp. 39, 42, 45).
- Pound, Michael P, Andrew P French, Erik H Murchie, and Tony P Pridmore (2014). „Surface reconstruction of plant shoots from multiple views“. In: *European Conference on Computer Vision*. Springer, pp. 158–173 (cit. on p. 114).
- Pound, Michael P., Andrew P. French, John A. Fozard, Erik H. Murchie, and Tony P. Pridmore (2016). „A patch-based approach to 3D plant shoot phenotyping“. In: *Machine Vision and Applications* 27, pp. 767–779 (cit. on p. 118).
- Probst, Alexandra, Demetrios Gatzolis, and Nikolay Strigul (2018). „Intercomparison of photogrammetry software for three-dimensional vegetation modelling“. In: *Royal Society open science* 5.7, p. 172192 (cit. on pp. 53, 54).
- Prokopetc, Kristina and Romain Dupont (2019). „Towards Dense 3D Reconstruction for Mixed Reality in Healthcare: Classical Multi-View Stereo vs Deep Learning“. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*, pp. 0–0 (cit. on pp. 44, 224).
- Prusinkiewicz, Przemyslaw and Aristid Lindenmayer (2012). *The algorithmic beauty of plants*. Springer Science & Business Media (cit. on p. 266).
- Rahaman, Hafizur and Erik Champion (2019). „To 3D or not 3D: choosing a photogrammetry workflow for cultural heritage groups“. In: *Heritage* 2.3, pp. 1835–1851 (cit. on p. 53).
- Regard3D (2020). <http://www.regard3d.org/> (cit. on p. 47).
- Remondino, Fabio (2011). „Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning“. In: *Remote sensing* 3.6, pp. 1104–1138 (cit. on p. 39).
- Roberts, Stephen, Markus Hegland, and Irfan Altas (2003). „Approximation of a thin plate spline smoother using continuous piecewise polynomial functions“. In: *SIAM journal on numerical analysis* 41.1, pp. 208–234 (cit. on pp. 112, 114).
- Rohlf, F James and Leslie F Marcus (1993). „A revolution morphometrics“. In: *Trends in ecology & evolution* 8.4, pp. 129–132 (cit. on p. 268).
- Rouaud, Mathieu (2014). *Calcul d'incertitudes*. Paris, France: Creative Commons (cit. on p. 263).
- Rupnik, Ewelina, Mehdi Daakir, and Marc Pierrot Deseilligny (2017). „MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry“. In: *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2.1, pp. 1–9 (cit. on p. 46).
- Rusu, Radu Bogdan, Nico Blodow, Zoltan Marton, Alina Soos, and Michael Beetz (2007). „Towards 3D object maps for autonomous household robots“. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3191–3198 (cit. on pp. 124, 125, 144, 163).

- Schonberger, Johannes L and Jan-Michael Frahm (2016). „Structure-from-motion revisited“. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 4104–4113 (cit. on pp. 40, 46).
- Schönberger, Johannes L, Enliang Zheng, Jan-Michael Frahm, and Marc Pollefeys (2016). „Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo“. In: *European Conference on Computer Vision*. Springer, pp. 501–518 (cit. on p. 42).
- Schunck, David, Federico Magistri, Radu Alexandru Rosu, et al. (2021). „Pheno4D: A spatio-temporal dataset of maize and tomato plant point clouds for phenotyping and advanced plant analysis“. In: *Plos one* 16.8, e0256340 (cit. on p. 72).
- Seitz, Steven M, Brian Curless, James Diebel, Daniel Scharstein, and Richard Szeliski (2006). „A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms“. In: *2006 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'06)*. Vol. 1. IEEE, pp. 519–528 (cit. on p. 50).
- Shen, Shuhan (2013). „Accurate multiple view 3d reconstruction using patch-based stereo for large-scale scenes“. In: *IEEE transactions on image processing* 22.5, pp. 1901–1914 (cit. on p. 43).
- Snively, Noah, Steven M Seitz, and Richard Szeliski (2008). „Modeling the world from internet photo collections“. In: *International journal of computer vision* 80.2, pp. 189–210 (cit. on p. 47).
- SRL, Menci software (2020). *OPK Bundle*. <https://www.menci.com/en/photogrammetry-software/aereo-opk/bundle.html> (cit. on p. 45).
- Stegmann, Mikkel B and David Delgado Gomez (2002). „A brief introduction to statistical shape analysis“. In: *Informatics and mathematical modelling, Technical University of Denmark, DTU* 15.11 (cit. on p. 263).
- Stella, Tommaso, N Frasso, G Negrini, et al. (2014). „Model simplification and development via reuse, sensitivity analysis and composition: a case study in crop modelling“. In: *Environmental modelling & software* 59, pp. 44–58 (cit. on p. 75).
- Strauss, Sören, Janne Lempe, Przemyslaw Prusinkiewicz, Miltos Tsiantis, and Richard S Smith (2020). „Phyllotaxis: is the golden angle optimal for light capture?“ In: *New Phytologist* 225.1, pp. 499–510 (cit. on p. 75).
- Sun, Shangpeng, Changying Li, Andrew H Paterson, et al. (2018). „In-field high throughput phenotyping and cotton plant growth analysis using LiDAR“. In: *Frontiers in Plant Science* 9, p. 16 (cit. on pp. 5, 7).
- Tang, Chengzhou and Ping Tan (2018). „Ba-net: Dense bundle adjustment network“. In: *arXiv preprint arXiv:1806.04807* (cit. on p. 44).
- Trimble, Scott (2019). *Leaf Area - How Why Measuring Leaf Area is Vital to Plant Research*. <https://cid-inc.com/blog/leaf-area-how-why-measuring-leaf-area-is-vital-to-plant-research/> (cit. on p. 108).
- Van den Heuvel, Frank A (1998). „3D reconstruction from a single image using geometric constraints“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53.6, pp. 354–368 (cit. on p. 42).

- Vázquez-Arellano, Manuel, David Reiser, Dimitrios Paraforos, Miguel Garrido-Izard, and Hans Griepentrog (2018). „Leaf Area Estimation of Reconstructed Maize Plants Using a Time-of-Flight Camera Based on Different Scan Directions“. In: *Robotics* 7.4, p. 63 (cit. on p. 132).
- Virlet, Nicolas, Kasra Sabermanesh, Pouria Sadeghi-Tehran, and Malcolm J Hawkesford (2016). „Field Scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring“. In: *Functional Plant Biology* 44.1, pp. 143–153 (cit. on pp. 9, 11).
- Viscosi, Vincenzo and Andrea Cardini (2011). „Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for beginners“. In: *PloS one* 6.10, e25630 (cit. on p. 268).
- Wang, Haoxing, Wuming Zhang, Guoqing Zhou, Guangjian Yan, and Nicholas Clinton (2009). „Image-based 3D corn reconstruction for retrieval of geometrical structural parameters“. In: *International Journal of Remote Sensing* 30.20, pp. 5505–5513 (cit. on p. 127).
- Wang, Jianning and Manuel M Oliveira (2003). „A hole-filling strategy for reconstruction of smooth surfaces in range images“. In: *16th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI 2003)*. IEEE, pp. 11–18 (cit. on p. 125).
- Watanabe, Tomonari, Jim S Hanan, Peter M Room, et al. (2005). „Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling“. In: *Annals of botany* 95.7, pp. 1131–1143 (cit. on p. 75).
- Whebell, Riley M, Timothy J Moroney, Ian W Turner, Ravindra Pethiyagoda, and Scott W McCue (2021). „Implicit reconstructions of thin leaf surfaces from large, noisy point clouds“. In: *Applied Mathematical Modelling* (cit. on p. 115).
- Wu, Changchang et al. (2011). „VisualSFM: A visual structure from motion system“. In: (cit. on p. 46).
- Wu, Wenchao, Yongguang Hu, and Yongzong Lu (2021). „Parametric Surface Modelling for Tea Leaf Point Cloud Based on Non-Uniform Rational Basis Spline Technique“. In: *Sensors* 21.4, p. 1304 (cit. on p. 114).
- Xie, Zhiping, Yancheng Lang, and Luqi Chen (2021). „Geometric Modeling of Rosa roxburghii Fruit Based on Three-Dimensional Point Cloud Reconstruction“. In: *Journal of Food Quality* 2021 (cit. on p. 113).
- Yao, Yao, Zixin Luo, Shiwei Li, et al. (2019). „Recurrent mvsnets for high-resolution multi-view stereo depth inference“. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5525–5534 (cit. on p. 44).
- Yidan, Yao, Lin Chengda, Zhai Ruifang, and Chen Kun (2016). „Rapeseed 3D reconstruction and morphological parameter measurement based on laser point cloud“. In: *2016 Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*. IEEE, pp. 1–6 (cit. on p. 114).
- Young, David A (2010). „Growth-Algorithm Model of Leaf Shape“. In: *arXiv preprint arXiv:1004.4388* (cit. on p. 76).
- Yun, Ting, Bangqian Chen, Weizheng Li, Yuan Sun, and Lianfeng Xue (2017). „Using point cloud data for tree organ classification and real leaf surface construction“. In: *Bulgarian Chemical Communications* 49.1, pp. 288–296 (cit. on p. 114).

- Yun, Ting, Mingxing Gao, Yanming Wang, and Xiaofeng Liu (2013). „Computational-geometry-based plant organs classification and foliage 3D reconstruction from point cloud data“. In: *Sensors & Transducers* 156.9, p. 217 (cit. on p. 114).
- Yun, Ting, Weizheng Li, Yuan Sun, and Lianfeng Xue (2014). „Leaf Model Reconstruction and Mechanical Deformation Based on Laser Point Cloud“. In: *International Journal Bioautomation* 18.3, p. 265 (cit. on p. 114).
- Zelditch, Miriam L, Donald L Swiderski, and HH Sheets (2012). *Geometric morphometrics for biologists: a primer*. academic press (cit. on p. 268).
- Zhou, Qian-Yi, Jaesik Park, and Vladlen Koltun (2018). „Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing“. In: *arXiv:1801.09847*. <http://www.open3d.org/> (cit. on p. 120).
- Zienkiewicz, Olgierd C, Robert Leroy Taylor, and Jian Z Zhu (2005). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier (cit. on p. 267).

Table des figures

1.1	Dispositif Phenotiki de Minervini et al. (2017) composé d'une caméra et d'un Raspberry Pi.	6
1.2	Illustration du système d'acquisition de Sun et al. (2018). (A) vue avant de la plateforme d'acquisition; (B) vue arrière la plateforme d'acquisition; (C) modèle 3D de la plateforme d'acquisition; (D) Visualisation centrée sur les capteurs.	7
1.3	Dispositif d'acquisition de Colliaux et al. (2017) sur un chemin circulaire autour d'une plante.	8
1.4	Dispositif PS-Plant d'acquisition issue de l'article de Bernotas et al. (2019). (A) Le dispositif PS-Plant est constitué de NIR LED disposées de façon circulaire autour d'une caméra centrale positionnée à la verticale des plantes. Les lignes rouges décrivent les directions des rayons lumineux. (B) et (C) montrent le système complet respectivement la vue latérale et du dessus. Chaque LED est positionnée à un angle de 30 °de façon à minimiser la distribution de rayon lumineux dans le champ de vue. Les LED et la caméra sont statiques.	8
1.5	Véhicule d'acquisition de Hasan et al. (2018) pour l'acquisition en champ. (A) Position de la caméra avec une vue oblique sur le cadre de montage de capteurs monté sur le wagon à quatre roues. (B) Schéma de montage du dispositif d'acquisition vue de profil. Une image échantillon prise avec le dispositif est insérée en haut à droite.	9
1.6	Plateforme de phénotypage Becam (Jay et al., 2015)).	10
1.7	Composants de <i>Rothamsted's Field Scanalyzer</i> (Virlet et al., 2016).	11
1.8	(a) Huit Phénofield® d'Arvalis. (b) Une Phénofield® dans un champ expérimental (Beauchêne et al., 2019).	12
1.9	Environnement d'acquisition pour l'expérience. (a) Phénofixe positionnée dans la serre. (b) Phénofixe et le dispositif expérimental complet (station d'étalonnage, capteur et champ de maïs) mis en place.	14
1.10	Phénofixe en position basse.	14
1.11	Schéma de la configuration expérimentale globale. X correspond à un plant de maïs.	15
1.12	Image des mires et informations de reconnaissance. De gauche à droite, mire "brune", mire "sol", mire "noire".	17
1.13	Une sphère réfléchissante.	18

1.14	Ensemble de la station d'étalonnage en bout de champ composé des tris mires et des deux sphères réfléchissantes.	18
1.15	Quelques plants de maïs utilisés lors de l'expérience.	19
1.16	Le numéro du plant de maïs se trouve sur l'étiquette orange. Les numéros vont de 1 à 48.	20
1.17	Caméra SONY-RXO.	20
1.18	Illustration Lidar SICK et Lidar sur Phénofixe.	21
1.19	Positionnement du LiDAR FARO pour l'acquisition.	22
1.20	Montage global des capteurs, du champ de maïs et de Phénofixe pour l'acquisition.	23
1.21	Disposition de chaque plant dans chaque champ (numéros).	24
1.22	Mesure de disposition de chaque capteur sur Phénofixe.	25
1.23	Schéma des mesures réalisées sur les feuilles de maïs. (a) Détails des différentes distances mesurées: la largeur la plus grande (L) et la plus petite (l) de la feuille. La distance (d1) de la base au point central à la hauteur de la zone la plus large de la feuille et la distance (d2) entre le point central au niveau le plus large de la feuille à l'apex. (b) Surface foliaire.	30
1.24	Exemples d'images acquises par le système de caméra présenté sous la forme de la séquence d'acquisition. La configuration de caméra correspond à CC12 dans le champ CP2.	31
1.25	Acquisition par LiDAR SICK en position 1 dans le champ 3. (a) Vue du dessus, (b) vue oblique, (c) vue arrière, (d) vue avant, (e) et (f) vues latérales.	32
1.26	Acquisition par LiDAR SICK en position 1 dans le champ 3 en vue oblique approchée.	33
1.27	Acquisition du champ CP3 par le LiDAR FARO. (a) Vue du dessus, (b) et (d) vues latérales, (c) vue arrière, (e) vue oblique du dessus.	34
1.28	Acquisition du champ CP3 par le LiDAR FARO avec des vues rapprochées. (a) Vue rapprochée sur un problème de recalage au niveau de la feuille. (b) Vue rapprochée du dessus sur le rang central. (c) Vue rapprochée de problème de bruit autour des feuilles.	35
1.29	Séquence d'images d'une caméra occultée par un fil de batterie du montage d'acquisition.	36
1.30	Illustration de l'échec d'acquisition par le LiDAR SICK. (a) interruption de l'acquisition. Échec de l'acquisition par le LiDAR SICK des deux sphères réfléchissantes pour le recalage. (b) Vue du dessus globale. (c) Vue du dessus rapproché sur les sphères. (d) Vue latérale rapprochée sur les sphères.	37
1.31	Exemple de détection de points caractéristiques sur une image issue de l'acquisition avec Phénofixe. Les points caractéristiques sont obtenus avec le logiciel VisualSFM et ils sont marqués par des points rouges.	38

1.32	Description des principales étapes du processus de SFM illustrées avec nos données de l'acquisition de la section 1.1.	40
1.33	Description des principales étapes du processus de reconstruction multivue illustrées avec nos données de l'acquisition de la section 1.1. . . .	43
1.34	Schéma du calcul de la distance entre la vérité terrain (maillage) et le nuage de points avec la distance d'Eberly pour la mesure de performance de la reconstruction de nuage de points.	49
1.35	Schéma de la génération de la base de données synthétique d'images pour la reconstruction. (a) Modèle 3D. (b) Mise en place de la scène dans le logiciel Blender. (c) Déplacement de la caméra autour de l'objet. (d) Rendu d'images. (e) Vérité terrain des poses de la caméra et du modèle géométrique 3D.	50
1.36	Tableaux d'évaluation quantitative des différentes reconstructions sur les modèles étudiés. \bar{x} est la moyenne de la distance du nuage de points à la vérité terrain. N_p est le nombre de points reconstruit. (a) Pour la multivue. (b) Pour la SFM. (Bianco et al., 2018).	51
1.37	Exemple de reconstruction dense sur les différents modèles avec les différents logiciels d'intérêt (Bianco et al., 2018).	52
1.38	Reconstruction du nuage de points avec VisualSFM (partie1). (a) (b) (c) Vues du dessus, (d) vue oblique rapprochée.	56
1.39	Reconstruction du nuage de points avec VisualSFM (partie2). (a) (b) vues latérales, (c) (d) vues latérales approchées.	57
1.40	Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité moyenne. (a) Vue du dessus. (b) Vue latérale. (c) Vue arrière.	58
1.41	Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. (a) (b) Vue du dessus. (c) Vue arrière. (d) Vue latérale.	59
1.42	Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. Vues rapprochées des nuages de points des feuilles. (a) Occultation. (b) Bruit. (c) Détail du champ.	60
1.43	Résultats de la reconstruction avec Agisoft Metashape de qualité haute. (a) Détails des déformations de la zone d'étalonnage. (b) Détail de la reconstruction des sphères réfléchissantes. (c) Points du nuage sous le niveau de la terre.	60
1.44	Nuage de points reconstruit avec le logiciel COLMAP. (a) Vue du dessus. (b) Vue latérale. (c) Vue arrière.	62
1.45	Nuage de points reconstruit avec le logiciel COLMAP. (a) Détails de la station d'étalonnage. (b) Détails du champ avec différente densité de nuage de points. (c) Détails du champ vu du dessus pour les occultations.	63
1.46	Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de L4 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC13.	65

1.47	Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de V3 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC12.	66
1.48	Exemple d'un nuage de points dans la base de données. Reconstruction avec les images de C2 sur le champ CP3 avec la configuration des caméras CC11.	67
1.49	Positions dans l'espace des caméras pour chaque image au-dessus du champ lors de l'acquisition de CP3 pour la configuration des capteurs CC11 calculée avec COLMAP. (a) Vue latérale. (b) Vue oblique.	68
1.50	Dans le logiciel COLMAP, visualisation des différentes configurations des caméras sélectionnées pour chaque jeu de données de reconstruction multivue pour créer la base de données de nuage de points. Chaque couleur représente un jeu de données différent. (a) (b) Configurations en ligne respectivement CP3 \CC11 et CP3 \CC12. (b) Configurations en vague de CP3 \CC12. (d) Configuration en carré pour CP3 \CC11.	68
2.1	Nuage de point généré avec les valeurs par défaut de chaque critère détaillé dans le tableau 2.1.	77
2.2	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le ratio Longueur/largeur. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $R = 1$, (b) $R = 2$, (c) $R = 10$	79
2.3	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la courbure. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $C_u = 40^\circ$, (b) $C_u = 140^\circ$, (c) $C_u = 300^\circ$ vue d'en haut et (c) $C_u = 40^\circ$, (d) $C_u = 140^\circ$, (f) $C_u = 300^\circ$ vue latérale.)	79
2.4	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la concavité. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $C_o = 1$, (b) $C_o = 3$, (c) $C_o = 5$ vues du dessus.	80
2.5	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le motif régulier. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.(a) 509 points/ m^2 , (b) 7019 points/ m^2 , (c) 75331 points/ m^2 vus du dessus.	81
2.6	Comparaison pour les mêmes densités de points entre le motif régulier et le motif aléatoire du modèle de feuille synthétique. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) 509 points/ m^2 , (b) 7019 points/ m^2 , (c) 75331 points/ m^2 avec le motif régulier. (d) 500/ m^2 points, (e) 7000/ m^2 points, (f) 75000/ m^2 points avec le motif aléatoire.	82

2.7	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le bruit horizontal (et un motif d'échantillonnage régulier). L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $S.n = 0.0000004$ m, (b) $S.n = 00008$ m.	82
2.8	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la densité de points. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) 500 points, (b) 7000 points, (c) 75000 points.	83
2.9	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour un ratio d'échantillonnage non uniforme. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $NU = 2$, (b) $NU = 4$, (c) $NU = 10$	83
2.10	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le niveau de bruit d'acquisition. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $N = 0,007$, (b) $N = 0,05$, (c) $N = 0,1$ m.	84
2.11	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour le recalage. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a)(c) $M.d = 0.008$ m et $M.l = 0.1$ m, (b)(d) $M.d = 0.008$ m et $M.l = 0.33$ m, (e)(f) $M.d = 0.12$ m et $M.l = 0.2$ m, (g)(i) $M.d = 0.24$ m et $M.l = 0.1$ m, (h)(j) $M.d = 0.24$ m et $M.l = 0.33$ m. Vues respectivement du dessus et latéralement. . . .	85
2.12	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour la taille de trou. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $H = 0.06$, (b) $H = 0.36$, (c) $H = 0.54$ m.	86
2.13	Exemples de nuages de points générés en changeant simultanément plusieurs critères pour visualiser la variété géométrique des nuages de points générés. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (e) représentent le Nuage 1 , (b) et (f) représentent le Nuage 2 , (c) et (g) représentent le Nuage 3 ,(d) et (h) représentent le Nuage 4 vu respectivement du dessus et latéralement. Voir le tableau2.2 pour connaître les valeurs exactes utilisées pour chaque nuage.	87
2.14	Tableau décrivant les espèces et les références assemblées pour créer la base de données issue de l'article de Li (M. Li et al., 2018).	89
2.15	Visualisation du morphospace de la base de données issue de l'article de Li, (a) inverse ratio en fonction de la circularité, (b) inverse du ratio en fonction de la solidité ⁸ , (c) solidité ⁸ en fonction de la circularité et (d) la légende des couleurs utilisées pour chaque espèce (M. Li et al., 2018).	90
2.16	Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $R = 1$ et $Co = 0$	92

2.17	Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $\mathbf{R} = 1$ et $\mathbf{Co} = 0$, où l'aire \mathcal{A}_1 est colorée en vert et \mathcal{A}_2 est colorée en orange. . .	92
2.18	Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $\mathbf{Co} = 0$. . .	93
2.19	Géométrie de la feuille du modèle synthétique dans le cas où $\mathbf{Co} = 1$. . .	95
2.20	Chaque arête P_1P_2 est divisée en trois nouvelles arêtes P_1P_3 , P_3P_4 et P_4P_2 quand \mathbf{Co} augmente.	96
2.21	En jaune, aire ajoutée à l'enveloppe convexe dans le cas où $\mathbf{Co} = 1$ dans notre modèle de feuille synthétique.	96
2.22	Division d'une arête P_1P_2 en neuf arêtes dans le cas où $\mathbf{Co} = 2$	96
2.23	En vert, aire ajoutée à l'enveloppe convexe dans le modèle de feuille synthétique dans le cas où $\mathbf{Co} = 2$	99
2.24	Visualisation du morphospace de la base de données issues de l'article de Li et du modèle de nuage de points de feuille synthétique, (a) inverse ratio en fonction de la circularité, (b) inverse du ratio en fonction de la solidité ⁸ , (c) solidité ⁸ en fonction de la circularité et (d) la légende des couleurs utilisées pour chaque espèce, en jaune ajout de notre modèle (M. Li et al., 2018).	100
2.25	Illustrations de nuage de points générées avec le modèle synthétique en utilisant les valeurs par défaut sauf pour un critère qui est indiqué par la suite. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $\mathbf{D} = 200\text{points}/m^2$, (b) $\mathbf{N} = 0,07$, (c) $\mathbf{Co} = 4$, (d) $\mathbf{H} = 0.18m$	102
3.1	Exemple de traits architecturaux pouvant être extrait d'un nuage de points 3D illustré sur (a) une jeune pousse d'orge. Des données non complexes comme (b) la hauteur de la plante, (c) la largeur de la plante, (d) l'enveloppe convexe de la plante, (d) l'aire projetée des feuilles. Des paramètres plus complexes sont aussi accessibles après différents traitements comme (f) la densité de la surface foliaire, (g) le nombre de feuilles, (h) la longueur de chaque feuille. La carte d'inclinaison (i) et de hauteur (j) peut aussi être calculée. (issue de Paulus (2019)). . .	109
3.2	Appareil de mesure mécanique de l'aire de la feuille, ici le modèle LiCOR-LI-3100 utilisé dans le jeu de données présenté dans la section 1.1.	109
3.3	Illustration des reconstructions obtenues respectivement avec l'algorithme de Poisson (Kazhdan, Bolitho, et al., 2006) et (b) l'algorithme de reconstruction de Poisson écrantée (Kazhdan and Hoppe, 2013) sans étape d'élagage sur un nuage de points du jeu de données du bouleau (présenté dans la section 3.5.1). (a) Création d'un maillage volumique avec la reconstruction de Poisson. (b) Création d'une surface ouverte continue avec la reconstruction de Poisson écrantée.	116
3.4	Illustration de la triangulation de Delaunay (en noir) et cercles circonscrits (en gris) avec leurs centres (en rouge).	118

3.5	Résultats de reconstruction avec l'algorithme de Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction Triangulation 2.5D et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{D} = 75000$ points/ m^2 . (b) Reconstruction Triangulation 2.5D et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{Co} = 2$. (c) Reconstruction Triangulation 2.5D obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{D} = 75000$ points/ m^2 . (d) Reconstruction Triangulation 2.5D obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{Co} = 2$	119
3.6	Résultats de reconstruction avec l'algorithme de l'Alpha-Shape. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction Alpha-Shape et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{Cu} = 180^\circ$ (a) vue arrière, (c) vue du dessus. Reconstruction Alpha-Shape obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{Cu} = 180^\circ$ (b) vue arrière, (d) vue du dessus. Reconstruction Alpha-Shape et nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{R} = 2$ (a) avec le nuage de points d'entrée (vert), (b) sans le nuage de points d'entrée.	121
3.7	Illustration du fonctionnement de l'algorithme BPA en deux dimensions. (a) cercle de rayon ρ pivote de point en point, les connectant avec des arêtes. (b) Lorsque la densité de l'échantillonnage est trop basse, des trous sont créés parce que des arêtes ne sont pas formées. (c) Lorsque la courbure est trop forte et est plus grande que $\frac{1}{\rho}$, certains points ne peuvent pas être atteints par la boule pivot et des caractéristiques sont alors manquantes dans la reconstruction (Bernardini et al., 1999). . .	123
3.8	Reconstruction avec de multiples épaisseurs obtenues l'algorithme BPA à partir d'un nuage de point du jeu de donnée de maïs acquis par le LiDAR. La vue est rapprochée dans le sens de la longueur de la feuille.	124
3.9	Résultats de reconstruction avec l'algorithme de Reconstruction incrémentale. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{DNU} = 2.5$. (b) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{S.p}$ est régulier. (c) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{DNU} = 2.5$. (d) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tels que $\mathbf{S.p}$ est régulier.	126
3.10	Résultats de reconstruction avec la méthode B-Spline. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{D} = 4000$ points/ m^2 . (b) Reconstruction et nuage de points d'entrée (vert) tels que $\mathbf{R} = 2$. (c) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{D} = 4000$ points/ m^2 . (d) Reconstruction obtenue à partir du nuage de points d'entrée tel que $\mathbf{R} = 2$	128

3.11	Schémas de positionnement des (a) lignes de scan et des (b) courbes de Bézier et points de contrôles et dans le modèle de feuille de Bézier (Chaurasia and Beardsley, 2017).	131
3.12	Quelques résultats présentant différents types d'échecs, de reconstruction de maillage ou de surface (Partie 1). Les points verts représentent le nuage de points d'entrée. (a) Triangulation 2.5D. (b) Bézier élagué. BPA (c) vue latérale, (d) vue du dessus.	136
3.13	Quelques résultats présentant différents types d'échecs, de reconstruction de maillage ou de surface (Partie 2). Les points verts représentent le nuage de points d'entrée. (a) Alpha-Shape, (b) Poisson écranté, (c) et (d) B-Spline.	137
3.14	Légende utilisée dans les tableaux de résultats de l'analyse de sensibilité pour faciliter la lecture et donner des indications de qualité. Le chiffre en gras est l'erreur minimale en norme obtenue pour chaque critère. .	139
3.15	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la Triangulation 2.5D. Voir 3.14 pour la légende. . . .	140
3.16	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour l'Alpha-Shape. (a) Version BBox, (b) Version Décile, (c) Version Médiane. Voir 3.14 pour la légende.	142
3.17	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la BPA. Voir 3.14 pour la légende.	143
3.18	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la Reconstruction incrémentale. Voir 3.14 pour la légende.	145
3.19	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la reconstruction basée B-Spline. Voir 3.14 pour la légende.	149
3.20	Paramètres d'exécution utilisés pour l'analyse de sensibilité du modèle de feuille de Bézier implémentée avec la descente de gradient. . . .	150
3.21	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour le modèle de feuille basée Bézier. (a) Version algorithme LM, version algorithme descente de gradient respectivement (a) première et (b) seconde partie. Voir 3.14 pour la légende.	157
3.22	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la méthode de Bézier élagué. (a) Première partie et (b) seconde partie. Voir 3.14 pour la légende.	159
3.23	Nuage de points (vert) tels que $D = 500\text{pts}/m^2$ reconstruit avec la méthode de Bézier élagué. La densité du nuage de points est trop faible pour permettre un élagage sans erreurs.	159
3.24	Moyenne de l'ERM pour chaque critère et paramètre de l'analyse de sensibilité pour la méthode de reconstruction Poisson écranté avec notre méthode statistique basée sur la moyenne pour l'élagage. Voir 3.14 pour la légende.	160

3.25	Exemple d'un nuage de points des jeux de données (a) châtaigner, (b) chêne et (c) bouleau (Hétroy-Wheeler et al., 2016).	163
3.26	Nuages de points d'une même feuille issus de l'acquisition par LiDAR FARO (voir section 1.1). Nuage de points segmenté manuellement de façon permissive (a) vue latérale (b) vue oblique. Nuage de points segmenté manuellement de façon stricte (a) vue latérale (b) vue oblique. (voir à la section 4.2).	164
3.27	Tableau récapitulatif des densités des nuages de points calculés avec CloudCompare en points par cm^2 pour tous les jeux de données réels.	164
3.28	Image des instruments de mesure utilisés pour acquérir la base de données de nuages de points issue de l'article Hétroy-Wheeler et al. (2016). (a) Leica Geosystems HDS-6100, (b) planimètre (CI-203, CID, Camas, WA.).	165
3.29	Filtrage par MLS sur un nuage de points de feuille issue de notre expérimentation pour l'acquisition de données sur le maïs par LiDAR FARO. Nuage de point original en rouge (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Nuage de point filtré en vert par MLS (c) vue latérale, (d) vue du dessus. Nuage de point original (rouge) superposé au nuage de point filtré par MLS (vert) (e) vue latérale, (f) vue du dessus.	167
3.30	Filtrage par SOR sur un nuage de points de feuille issue de notre expérimentation pour l'acquisition de données sur le maïs par LiDAR FARO. Nuage de point original en rouge (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Nuage de point filtré en vert par SOR (c) vue latérale, (d) vue du dessus. Nuage de point original (rouge) superposé au nuage de point filtré par SOR (vert) (e) vue latérale, (f) vue du dessus.	168
4.1	Influence de chaque critère sur l'estimation de la surface foliaire avec les méthodes de reconstruction Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA , Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson échantée : (a) R , (b) Cu , (c) Co , (d) S.n , (e) D , (f) NU , (g) N , (h) H , (i) M.d , (j) M.l	172
4.2	Influence de différentes valeurs de M.d et M.l sur l'estimation de la surface foliaire avec les méthodes de reconstruction Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA , Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson échantée	173
4.3	Reconstructions de surface à partir de nuages de points (vert) qui ont une valeur de R non par défaut. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) R = 3 avec la Triangulation 2.5D, (b) R = 2, 5 avec l'Alpha-Shape, (c) R = 2, 5 avec la BPA, (d) R = 2, 5 avec la Reconstruction Incrémentale, (e) R = 2 avec B-Spline, (f) R = 3 avec le modèle de feuille de Bézier, (g) R = 3 avec la Bézier élagué, (h) R = 3 avec la reconstruction de Poisson échantée.	175

4.4	Reconstruction de Poisson échantillonnée sur le nuage de points tel que $C_u = 340^\circ$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Surface et nuages de points (vert) superposés (a) vue du dessus, (b) vue arrière. Surface (c) vue du dessus, (d) vue arrière.	176
4.5	Reconstruction de la Triangulation 2.5D sur le nuage de points tel que $C_u = 340^\circ$ qui échoue. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Surface et nuages de points (vert) superposés (a) vue du dessus, (b) vue arrière. Surface (c) vue du dessus, (d) vue arrière.	176
4.6	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction Alpha-Shape sur le nuage de points (vert) $C_u = 180^\circ$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Reconstruction B-Spline sur le nuage de points (vert) $C_u = 180^\circ$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus.	177
4.7	Reconstruction (a) de Bézier élagué et (b) du modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points (vert) synthétique tel que $C_o = 1$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.	178
4.8	Reconstruction par la Triangulation 2.5D du nuage de points synthétique (vert) tel que $C_o = 2$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu.	178
4.9	Reconstruction par Alpha-Shape du nuage de points synthétique (vert) tel que $C_o = 3$. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. .	179
4.10	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la BPA du nuage de points synthétique (vert) tel que $C_o = 3$. Reconstruction par la reconstruction incrémentale du nuage de points synthétique (vert) tel que $C_o = 3$. Reconstruction par la reconstruction de Poisson échantillonnée du nuage de points synthétique (vert) tel que $C_o = 1$	179
4.11	Reconstructions de surface à partir de nuages de points qui ont une valeur de D non par défaut. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) $D = 7000 \text{ points}/m^2$ avec la Triangulation 2.5D, (b) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec l'Alpha-Shape, (c) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec la BPA, (d) $D = 6000 \text{ points}/m^2$ avec la Reconstruction Incrémentale, (e) $D = 4000 \text{ points}/m^2$ avec B-Spline, (f) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec le modèle de feuille de Bézier, (g) $D = 5000 \text{ points}/m^2$ avec la Bézier élagué, (h) $D = 15000 \text{ points}/m^2$ avec la reconstruction de Poisson échantillonné.	181

- 4.12 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la Triangulation 2.5D du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 5$. (b) Reconstruction par Alpha-Shape du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 3.5$. Reconstruction par B-Spline du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 6$. Reconstruction par Bézier élagué du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 6$. Reconstruction par le modèle de feuille de Bézier du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 2.5$. Reconstruction par le modèle de feuille de Bézier du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 8$. L'ensemble de ces méthodes sont robustes au critère et les maillages sont de bonne qualité. 182
- 4.13 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) Reconstruction par la BPA du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 2$ et (b) tel que $NU = 8$. (c) Reconstruction par la reconstruction de Poisson échantillonnée du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 1.5$ et tel que (d) $NU = 2.5$. (e) Reconstruction par la Reconstruction incrémentale du nuage de points synthétique (vert) tel que $NU = 2.5$ et (f) tel que $NU = 8$. Les méthodes ne sont pas robustes pour ce critère. . 183
- 4.14 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Exemples de reconstructions par les méthodes paramétriques sur les nuages de points synthétiques (vert) bruités. Reconstruction B-Spline sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,01$ (a) vue latérale, (c) vue du dessus. Reconstruction de Poisson échantillonnée sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,05$ (b) vue latérale, (d) vue du dessus. Reconstruction de Bézier élagué sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,15$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. Reconstruction avec le modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points synthétique tel que $N = 0,15$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. 184
- 4.15 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par la Triangulation 2.5D sur le nuage de points tel que $N = 0.05$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. 185
- 4.16 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par la Reconstruction incrémentale sur le nuage de points tel que $N = 0.02$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. 186
- 4.17 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par Alpha-Shape sur le nuage de points tel que $N = 0.05$ (a) vue latérale, (b) vue du dessus. 187
- 4.18 L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par Poisson échantillonné sur le nuage de points tel que (a) (c) $N = 0.01$, et (b) (d) $N = 0.05$ 188

4.19	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstruction par BPA sur le nuage de points tel que (a) (c) $N = 0.007$, et (b) (d) $N = 0.07$	189
4.20	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la méthode de Reconstruction Incrémentale. (a) et (b) $M.l = 0.1$ et $M.d = 0.12$. (c) et (d) $M.l = 0.25$ et $M.d = 0.12$. (e) et (f) $M.l = 0.2$ et $M.d = 0.008$	191
4.21	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la Triangulation 2.5D. (a) et (c) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.04m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$. (e) et (g) $M.l = 0.13m$ et $M.d = 0.12m$. (f) et (h) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.12m$	192
4.22	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec la BPA. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.08m$. (b) et (d) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.08m$. (e) et (g) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.08m$. (f) et (h) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$	193
4.23	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec le modèle de feuille de Bézier. (a) et (c) $M.l = 0.13m$ et $M.d = 0.16m$. (b) et (d) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.16m$	194
4.24	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec le B-Spline. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.16m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.16m$. (e) et (g) $M.l = 0.33m$ et $M.d = 0.04m$. (f) et (h) $M.l = 0.33m$ et $M.d = 0.2m$	195
4.25	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur les nuages de points synthétiques du critère de recalage avec Poisson écranté. (a) et (c) $M.l = 0.1m$ et $M.d = 0.2m$. (b) et (d) $M.l = 0.2m$ et $M.d = 0.2m$. (e) et (g) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.04m$. (f) et (h) $M.l = 0.25m$ et $M.d = 0.2m$	196
4.26	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur des nuages de points synthétiques du critère Trou. (a) Reconstruction par BPA sur le nuage de points (vert) $H = 0.12m$. (b) Reconstruction incrémentale sur le nuage de points $H = 0.36$. Reconstruction par Poisson écranté sur le nuage de points (c) $H = 0.12m$ et (d) $H = 0.3m$	197

4.27	L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. Reconstructions sur des nuages de points synthétiques du critère Trou. (a) Reconstruction par Triangulation 2.5D sur le nuage de points (vert) $H = 0.24m$. (b) Reconstruction Alpha-Shape sur le nuage de points $H = 0.3m$. Reconstruction par Poisson écranté sur le nuage de points (c) Reconstruction par B-Spline sur le nuage de points $H = 0.6m$. (d) Reconstruction par modèle de feuille de Bézier sur le nuage de points $H = 0.42m$	198
4.28	Un nuage de points du jeu de données LiDAR (voir 1.1 qui présente des points aberrants, des zones d'occultation et quelques problèmes de recalage.	199
4.29	Diagramme en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée forestier pour chaque méthode de reconstruction de surface pour toutes les méthodes de filtrage étudiées. Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA, Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson écrantée	203
4.30	Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée de maïs de la section 1.1 pour chaque méthode de reconstruction de surface pour toutes les méthodes de filtrage étudiées. Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA, Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson écrantée	205
4.31	Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée de foresterie de la section 3.5.1 filtré avec MLS pour chaque méthode de reconstruction de surface. Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA, Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson écrantée	208
4.32	Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie châtaignier (vert) superposé à la reconstruction par (a) Bézier élagué , (b) modèle de feuille de Bézier, (c) BPA, (d) B-Spline, (e) Poisson écranté.	209
4.33	Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie chêne (vert) superposé à la reconstruction par (a) Bézier élagué , (b) BPA, (c) B-Spline, (d) Reconstruction incrémentale.	210
4.34	Visualisation d'un nuage de points du jeu de données de foresterie bouleau (vert) superposé à la reconstruction par (a) la Triangulation 2.5D, (b) l'Alpha-shape, (c) la BPA, (d) la Reconstruction incrémentale, (e) la B-Spline, (f) le modèle de feuille de Bézier, (g) le Bézier élagué, (h) Poisson écranté.	211
4.35	Visualisation d'échec de reconstruction sur des nuages de points du jeu de données de foresterie (vert) avec (a)(b) Bézier élagué , et B-Spline (c) à (h).	212

4.36	Diagrammes en boîte de l'ERM de l'estimation de la surface foliaire pour chaque jeu de donnée de maïs de la section 1.1 filtré avec MLS pour chaque méthode de reconstruction de surface. Triangulation 2.5D , Alpha-Shape , BPA , Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson écrantée	213
4.37	Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme B-Spline. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (h) photogrammétrie.	214
4.38	Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme Alpha-Shape. Différents nuages de points de (a) et (b) LiDAR et de (c) à (d) photogrammétrie.	215
4.39	Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant Triangulation 2.5D. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (h) photogrammétrie.	216
4.40	Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme Bézier élagué. Différents nuages de points de (a) à (b) LiDAR et de (c) à (f) photogrammétrie.	217
4.41	Visualisation d'échecs de reconstruction sur des nuages de points (vert) du jeu de données de maïs filtré avec MLS en utilisant l'algorithme du modèle de feuille de Bézier. Différents nuages de points de (a) à (d) LiDAR et de (e) à (f) photogrammétrie.	218
4.42	Chaîne de traitement de l'information de phénotypage, de l'acquisition à la mesure, principales étapes.	221
A.1	Résultats moyennes par critère analyse de sensibilité Alpha-shape pour l'ERAM	273
A.2	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 40°, (b) et (e) Cu = 240°, (c) et (f) Cu = 340°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	274
A.3	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant Alpha-Shape. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 60°, (b) et (e) Cu = 180°, (c) et (f) Cu = 360°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	274

A.4	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la BPA. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (c) Cu = 40°, (b) et (d) Cu = 340°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	275
A.5	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 80°, (b) et (e) Cu = 180°, (c) et (f) Cu = 360°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	275
A.6	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode B-Spline. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 60°, (b) et (e) Cu = 200°, (c) et (f) Cu = 340°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	276
A.7	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode du modèle de feuille de Bézier. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 80°, (b) et (e) Cu = 220°, (c) et (f) Cu = 380°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	277
A.8	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode de Bézier élagué. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 60°, (b) et (e) Cu = 220°, (c) et (f) Cu = 340°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	277
A.9	Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la reconstruction de Poisson échantillé. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) Cu = 60°, (b) et (e) Cu = 220°, (c) et (f) Cu = 340°, respectivement vue latérale et vue du dessus.	278
A.10	Influence de chaque critère sur l'estimation de la surface foliaire d'après l'ERAM pour les méthodes Triangulation 2.5D , Alpha-Shape Médiane , BPA , Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson échantillé : (a) R , (b) Cu , (c) Co , (d) S.n , (e) D , (f) NU , (g) N , (h) H , (i) M.d , (j) M.l	279
A.11	Résultats de l'estimation sur les jeux de données synthétiques de recalage avec l'ERAM pour différentes valeurs de M.d et M.l	280

A.12	Diagramme en boîte pour l'ERAM de la surface foliaire sur les jeux de données réelles pour les méthodes de reconstruction Triangulation 2.5D , Alpha-Shape Médiane , BPA , Reconstruction incrémentale , B-Spline , Modèle de feuille de Bézier , Bézier élagué et Poisson : (a) châtaigner (b) chêne (c) bouleau (d) maïs (LiDAR) (e) maïs (photo). Les traits aux extrémités représentent les valeurs minimales et maximales des erreurs pour une méthode de reconstruction donnée sur un jeu de nuage de points donné (sauf pour les points aberrants), une boîte représente l'erreur entre le 25e et 75e pourcentile, la ligne dans la boîte l'erreur médiane, la moyenne est représentée par une croix. Les erreurs sont considérées comme aberrant si elles se trouvent à une distance supérieure à 1.5 fois la longueur de la boîte à quelque extrémité que ce soit.	288
------	--	-----

Liste des tableaux

1.1	Distance en cm entre le Lidar SICK et Phénofixe pour chaque configuration de LiDAR (CCYZ) pour toutes les configurations de champ (CPZ).	25
1.2	Distance entre les caméras et le LiDAR SICK sur Phénofixe pour chaque configuration de LiDAR. La position d'origine de la mesure de distance entre les caméras pour le tableau 1.3 est précisée dans la colonne origine.	26
1.3	Distance entre la position d'origine (voir tableau 1.2) et chaque caméra pour toutes les configurations de capteurs (en cm). La notation A = Angle. On ajoute un angle à la caméra. Cet angle n'est pas mesuré et on met autant que possible le centre de la caméra vers le rang central.	27
1.4	Tableau des caractéristiques principales des logiciels de reconstruction étudiée.	55
2.1	Valeurs par défaut pour chaque critère du modèle de nuage de points de feuille synthétique.	78
2.2	Tableau des valeurs des critères utilisés pour générer les nuages de points présentés dans la figure 2.13 avec mon modèle de nuage de points de feuille.	86
2.3	Récapitulatif des valeurs pour chaque critère utilisées pour générer les nuages de points de feuilles synthétiques pour l'analyse de sensibilité en plus des valeurs par défaut (voir tableau 2.1). Les longueurs sont exprimées comme un ratio avec la distance entre la base et l'apex de la feuille : 0.12 signifie 12% de cette distance.	101
2.4	Récapitulatif des valeurs pour chaque critère pour la génération des nuages de points de feuilles synthétiques utilisées pour l'analyse de sensibilité. Valeur par défaut du bruit pour chaque jeu de données par critère.	103
2.5	Liste des nuages de points utilisés pour l'analyse de sensibilité des méthodes basées sur les surfaces de Bézier. Le nom du nuage est donné, puis le critère qui est modifié et sa nouvelle valeur. Les autres critères ont leurs valeurs par défaut 2.1.	104

2.6	Récapitulatif des valeurs pour chaque critère pour la génération des nuages de points de feuilles synthétiques utilisées pour l'analyse du comportement de chaque méthode par rapport à chaque critère.	105
3.1	Temps d'exécution (s) pour 10 nuages de points avec la méthode de reconstruction de surface B-Spline. Les paramètres d'exécutions sont les valeurs par défaut et $o = 3$, $i = 5$ et $rs = 64$	127
3.2	Valeurs testées dans l'analyse de sensibilité pour chaque paramètre de chaque méthode étudiée. Les valeurs en gras sont les valeurs optimales qui sont utilisées dans la suite de la thèse.	135
3.3	Temps d'exécution (s) pour 10 nuages de points avec la méthode de reconstruction de surface B-Spline. Les paramètres d'exécutions sont les valeurs par défaut et $o = 3$, $i = 5$ et $rs = 64$	149
3.4	Paramètres d'exécution utilisés pour l'analyse de sensibilité du modèle de feuille de Bézier implémentée avec l'algorithme LM.	151
3.5	Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec la descente de gradient (Partie 1).	152
3.6	Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec la descente de gradient (Partie 2).	153
3.7	Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité.	154
3.8	Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité de la version descente de gradient.	155
3.9	Temps d'exécution en (s) pour chaque nuage de points (voir notation correspondante dans le tableau) et pour chaque paramètre (voir notation) pour l'algorithme BLM avec l'optimisation LM.	156
3.10	Valeurs de paramètres pour l'analyse de sensibilité de la version LM.	156
3.11	Caractéristiques générales des jeux de données réelles : nombre de feuilles, aire de la feuille mesurée, nombre de points par feuilles et densité de points.	163
4.1	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la triangulation 2.5D.	200
4.2	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec Alpha-Shape.	200
4.3	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la BPA.	201
4.4	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la Reconstruction incrémentale.	201

4.5	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec B-Spline.	201
4.6	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec le modèle de feuille de Bézier. . .	201
4.7	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec Bézier élagué.	202
4.8	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données forestier avec la reconstruction de Poisson échantillonné	202
4.9	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la Triangulation 2.5D	204
4.10	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Alpha-Shape. . . .	204
4.11	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la BPA.	205
4.12	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Reconstruction incrémentale.	206
4.13	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec B-Spline.	206
4.14	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec le modèle de feuille de Bézier.	206
4.15	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec Bézier élagué. . . .	206
4.16	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERM pour chaque filtre du jeu de données agronomique (voir 1) avec la reconstruction de Poisson échantillonné.	206
A.1	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur du ratio Longueur/largeur R	278
A.2	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de courbure Cu	281
A.3	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de concavité Co	281
A.4	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de densité D .	281
A.5	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur d'échantillonnage non uniforme NU	282
A.6	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de bruit d'acquisition N	282
A.7	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.2$	282

A.8	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.04$	282
A.9	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.008$	283
A.10	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.08$	283
A.11	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.12$	283
A.12	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.16$	283
A.13	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec $M.d = 0.24$	284
A.14	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec $M.l = 0.1$	284
A.15	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec $M.l = 0.13$	284
A.16	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec $M.l = 0.2$	285
A.17	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec $M.l = 0.25$	285
A.18	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec $M.l = 0.33$	285
A.19	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur de trou H	285
A.20	$MARE - \ MRE\ $ pour chaque méthode et chaque valeur bruits horizontal HN	286
A.21	Pour chaque critère différence de norme la plus haute pour chaque méthode.	286
A.22	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du châtaigner.	287
A.23	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du chêne.	289
A.24	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du bouleau.	289
A.25	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du maïs (LiDAR).	290
A.26	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du maïs Photogrammétrie).	290
A.27	Premier quartile, médiane et troisième quartile of the $MARE$ de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données Châtaigner.	291
A.28	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données chêne.	291

A.29	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données bouleau.	292
A.30	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données maïs (LiDAR).	292
A.31	Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données maïs (photo).	293
A.32	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de Triangulation 2.5D.	294
A.33	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Alpha-Shape.	294
A.34	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction BPA.	295
A.35	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de Reconstruction incrémentale.	295
A.36	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction B-spline.	296
A.37	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Modèle de feuille de Bézier.	296
A.38	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Bézier élagué.	297
A.39	Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Poisson échanté.	297
A.40	Moyenne de la médiane de ERM par filtrage sur l'ensemble des jeux de données.	297

Glossaire

ACP analyse en composantes principales, méthode d'analyse des données qui permet de les décrire sur une base orthogonale. Les axes de cette base sont les composantes principales des données. Elle permet, parmi plusieurs autres applications, de faire de la description de données ou de les décorréler . 115, 130, 131

ajustement d'un plan par les moindres carrés (Best fit plane lest square) algorithme utilisant la formulation des moindres carrés pour résoudre le problème du plan minimisant la distance euclidienne à l'ensemble des points du nuage de points 3D (Rouaud, 2014) . 117, 131

ajustement polynomial processus d'approximation de points de données par une courbe qui est décrite par une fonction polynomiale . 114

analyse de Fourier Elliptique méthode développée en premier dans Kuhl and Giardina (1982) qui permet de décrire les contours fermés grâce aux coefficients de Fourier et le chain code. Voir plus de détail dans Descripteurs Elliptique de Fourier basé sur le même principe . 76

analyse procustéenne dans le domaine de la statistique, c'est une méthode de comparaison de formes. L'idée est de rendre les formes étudiées les plus proches possibles en utilisant des transformations conservant les formes. Une forme de référence est choisie (arbitrairement ou non) et on calcule la distance entre les formes à la fin des opérations de superposition des formes. Cette méthode d'analyse est utilisée par de nombreux domaines comme la biologie, l'archéologie, la médecine ou encore la psychologie après avoir élargi la méthodologie avec le développement de l'analyse de Procuste généralisée (Stegmann and Gomez, 2002). 88

appareil photographique plénoptique appareil photographique numérique qui permet de capter d'autres informations du champ lumineux comme sa direction et la profondeur des objets (Ng, 2006) . 6

apprentissage profond sous-famille des méthodes d'apprentissage automatique. Ces méthodes sont basées sur l'apprentissage d'un haut niveau d'abstraction à partir des données en utilisant en particulier des transformations non linéaires sur plusieurs niveaux ou couches (Goodfellow et al., 2016). 43

approximation linéaire aux moindres carrés résolution du problème d'ajustement par les moindres carrés en utilisant des fonctions linéaires (Bevington et al., 1993) . 131

cale étalon système qui mesure des longueurs avec précision en empilant des blocs . 112

caméra temps de vol caméra permettant d'acquérir une scène 3D . La technologie est basée sur le calcul du temps de vol pour qu'un éclair de lumière parviennent jusqu'à l'objet ou la scène depuis la caméra. Cette distance est calculée pour chaque pixel de l'image. 6

carte de fréquentation matrice (ou carte), elle associe à une zone une couleur qui traduit l'intervalle de valeur de la grandeur étudiée . 54

cartographie UV technique qui permet de projeter des informations 2D dans l'espace 3D. Les lettres U et V représentent les 2 dimensions des informations. Dans notre cas, il s'agit d'un repère de l'espace 2D projeté sur la surface de feuille 3D . 130–132

CMVS algorithme proposé par Furukawa and Ponce, 2009 de reconstruction de nuages de points qui prend en entrée la sortie d'une reconstruction par SFM. Puis qui décompose le jeu d'images d'entrées en différents ensembles de tailles acceptables pour un ordinateur. Chaque ensemble est reconstruit indépendamment et en parallèle. Puis les reconstructions sont réunies et forment un nuage de points complet . 51

courbe ROC mesure de performance des systèmes de classification binaire. Elle donne le taux de vrai positif en fonction du taux de faux positif (Fawcett, 2006). Elle permet de calculer des indicateurs importants pour l'évaluation du système, par exemple la sensibilité . 53

courbes d'Hermite aussi appelée Spline cubique d'Hermite, c'est une spline de degré trois qui est utilisé pour obtenir une fonction continue à partir de points et leurs dérivées. C'est une courbe qui est donc utilisée pour de l'interpolation. Catmull and Rom (1974) est le premier à les décrire et les utiliser. 75

descente de gradient algorithme d'optimisation itératif basé sur les fonctions différentielles. À chaque itération, la solution intermédiaire est déplacée dans le sens opposée au gradient de la fonction objectif qu'on cherche à minimiser. . 130, 149–151

Descripteurs Elliptique de Fourier descripteurs de forme basée sur les techniques de compression sans perte de chain code et de série de Fourier. Le principe des chain codes est de coder séparément les composantes connexes d'une image (aussi appelé "blob") monochrome. Pour chaque composante, un point de la frontière est choisi et ses coordonnées sont encodées. L'encodeur se déplace ensuite le long de la frontière et transmet à chaque pas la direction de son mouvement. Le déplacement est fini lorsque l'encodeur retourne à son point de départ. Ce procédé est répété pour tous les "blobs" de l'image. Il existe de nombreuses techniques de chain codes. Les coefficients de la série de Fourier sont dérivés du chain code qui est périodique sur le contour (Kuhl and Giardina, 1982). 88, 263

enveloppe convexe description . 89

FSPM (Functional-Structural Plant Modelling). Ensemble de modèles pour décrire la croissance d'une plante en combinant les facteurs physiologiques et environnementaux. Ils peuvent être accompagnés d'une représentation en 3 dimensions de la plante. (Sources Godin and Sinoquet (2005)) . 74

homologie persistantes méthode cherchant à visualiser un espace à différentes échelles. En changeant les échelles, on peut éliminer les artefacts éventuels dus au bruit ou à l'échantillonnage par exemple. Ainsi des caractéristiques présentent sur différentes échelles sont probablement plus représentative de la véritable forme sous-jacente de l'espace. Cette méthode pose des contraintes de représentation sur l'espace et sur une fonction distance déterminant une notion d'échelle (mathématiquement une filtration). Pour plus de détails, d'information, d'illustration et d'exemple voir *Homologie persistante: une introduction non mathématique avec des exemples* (2021) ou Gonzalez-Lorenzo (2020). 88

indice foliaire grandeur sans dimension exprimant la surface foliaire d'une canopée par unité de surface au sol . 108

L-système aussi appelé système de Lindermayer, il permet la modélisation du processus de développement de plantes (et de bactéries) sous forme de grammaire formelle. Le principe de base est de décrire des objets complexes en décrivant une structure initiale simple et quelques règles de comportement simples. Le système ainsi décrit est amorcé et une nouvelle génération est produite à partir de l'état de la génération en cours et des règles décrites. Pour en savoir plus se référer à l'article Prusinkiewicz and Lindenmayer (2012). 75

Levenberg-Marquardt algorithme de minimisation d'une fonction de plusieurs variables. Il repose sur les deux algorithmes de descente du gradient et de Gauss-Newton. Et il est le plus stable d'entre eux. . 130, 149–151

linear triangle LIN triangle d'un maillage reconstruit par interpolation linéaire . 112, 114

morphométrie étude quantitative de la géométrie des formes, généralement en biologie. Elle est basée en particulier sur une approche statistique . 88

méthode de Horn méthode permettant de trouver la relation entre deux systèmes de coordonnées pour au moins trois points. Le problème est exprimé sous une forme analytique et repose sur l'utilisation de quaternion pour la représentation des rotations. La méthode est décrite dans l'article Horn (1987). 48

méthode de Newton algorithme permettant de trouver les zéros d'une fonction réelle en utilisant le développement de Taylor de celle-ci. En supposant une bonne initialisation (proche du zéro de la fonction recherché), on calcule l'intersection entre la droite tangente à ce point et l'axe des abscisses. Puis itérativement, avec le nouveau point, on construit une suite qui converge vers le zéro de la fonction. 129

méthode des éléments finis méthode d'analyse numérique pour résoudre des équations aux dérivées partielles numériquement. Elle repose sur le principe de discrétisation du problème puis de linéarisation de l'équation différentielle. Elle est donc résolue de façon approchée et numérique (Zienkiewicz et al., 2005) . 115

NURBS fonctions qui généralisent les B-Splines (nom complet : B-Splines rationnelles non uniformes). Elles permettent d'utiliser des techniques d'ajustement de courbe sur des formes mises en échec avec les B-splines uniformes (plus de détails dans Piegl and Tiller (1996)) . 115

optimisation par essaim particulaire algorithme d'optimisation inspirée du monde du vivant. Dans l'espace des solutions, elle repose sur des règles de déplacement simple des particules qui représentent les solutions. Par itération, l'algorithme converge vers un minimum global (CALAS, 2009) . 115

phytomer dans le cadre de la FSPM, il s'agit de l'unité de base de la modélisation de la structure de la plante. 75

placage de normales (normal mapping) technique permettant de donner des textures ou du relief aux modèles 2D ou 3D sans ajouter de nouveaux polygones au modèle. Il s'agit donc d'une image couleur (rvb) comprenant quatre canaux supplémentaires : X,Y,Z et normale du texel (pixel de texture). Elle décrit donc l'orientation et l'élévation de la surface pour l'application de la texture. 50

placage de relief (ou bump-mapping en anglais) technique permettant de donner des textures ou du relief aux modèles 2D ou 3D. Il s'agit alors de simuler les effets par des jeux d'ombres et de lumières sur la surface du modèle sans modifier ledit modèle par ailleurs (Blinn, 1978) . 50

pmvs algorithme de reconstruction multivue qui prend un ensemble d'images et de paramètres de caméra et reconstruit la structure 3D. L'algorithme ignore automatiquement les objets non rigides. La sortie de l'algorithme donne un nuage de points 3D orienté (plus de détails dans l'article (Furukawa and Ponce, 2009)) . 51

Point d'intérêt (ou landmark) technique de morphométrie basée sur l'analyse procrustéenne utilisée dans de nombreux domaines (par exemple la médecine, l'archéologie ou la biologie). Il s'agit de définir des points d'intérêts homologues à l'ensemble des formes que l'on veut comparer. La sélection de ces points est une étape cruciale pour cette méthode et il n'existe aucune définition absolue des points d'intérêts à choisir. Une fois l'ensemble de ces points choisis, l'objectif est de superposer les points homologues de deux formes étudiées. Pour ce faire on utilise à ce moment les techniques de l'analyse procrustéenne pour enlever les variations dues à des homologies. Les différences de coordonnées restantes à la fin de ces opérations sont les paramètres de déformations entre les deux formes géométriques étudiées. L'un des désavantages de cette

technique pour les applications biologiques sur les feuilles est qu'elles n'ont pas toutes des points pouvant être utilisés comme points d'intérêt évidents. D'autant plus quand il s'agit de comparer des feuilles ayant des morphologies diverses (ie des feuilles simples contre des feuilles composées) où des points homologues ne sont pas aisément identifiable. Pour plus de détails et d'illustrations voir les ressources suivantes : Viscosi and Cardini (2011), M. Li et al. (2018), Rohlf and Marcus (1993), Zelditch et al. (2012) et Klingenberg (2008). 88

pseudo points d'intérêt (ou pseudo-landmarks) dans le cas où les formes n'acceptent pas des points d'intérêt homologues ou très peu, on utilise des pseudopoints d'intérêt qui sont choisis de façon à échantillonner le contour (ou la surface) des formes de façon plus complètes. Plus il y a de points d'intérêt et de pseudopoints d'intérêt, meilleure est la définition de la forme. 88

quaternion nombres englobant les nombres réels et complexes dans un système où la multiplication n'est plus commutative (Lam, 2003) . 49

robust MLS méthode de régression linéaire des moindres carrés dont les hypothèses de validité sont moins fortes. Elle permet de donner des résultats plus fiables même quand les données ne permettent pas l'application d'une régression des moindres carrés . 125

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) algorithme reposant sur le calcul de descripteurs qui sont indépendants de l'échelle, la luminosité ou encore l'orientation dans l'image (Lowe, 1999) . 40

squelettisation classe d'algorithme du domaine de l'étude de formes. L'objectif est de déterminer les courbes qui centralisent la forme originale. Le principe est décrit dans la première fois dans Blum et al. (1967) . 114

surfaces de niveau méthode de mesure qui modélise un objet (déformable ou non) comme la section d'un plan mobile successif qui est une courbe (plus de détails dans Osher and Fedkiw (2001)) . 114

thin plate splines splines à qui un critère de résistance à la courbure est ajouté. Elle est définie dans Bookstein (1989) . 112, 114

triangles de Clough-Tocher défini par 12 paramètres : les positions dans l'espace de ses trois sommets et les trois composantes de la dérivée au centre de gravité

du triangle. Cette paramétrisation du triangle est utilisée dans un processus d'interpolation de nuages de points. Une triangulation des nuages de points est d'abord opérée pour créer un réseau de triangles de Clough-Tocher, puis une interpolation avec les paramètres est effectuée. 112, 114

triangulation de Delaunay 2D la triangulation de Delaunay 2D d'un ensemble de points est une triangulation telle qu'aucun point de l'ensemble n'est à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles de la triangulation. Les triangles de Delaunay maximisent le plus petit angle. Les triangulations de Delaunay en 2D peuvent être étendues à l'espace 3D en raisonnant non plus sur des cercles, mais des boules (Guibas et al., 1992). 118

tétraédrisation processus de maillage d'un nuage de point en prenant comme primitive un tétraèdre (Delaunay et al., 1934). 120

WLS plane cas généralisé d'ajustement d'un plan avec la régression linéaire pondérée de la méthode des moindres carrés. Dans cette version, la variance des observations est prise en compte dans la régression . 125

Acronymes

EFD Elliptical Fourier Descriptors. 88

ENSG École nationale des sciences géographiques. 46

ER Erreur Relative. 169

ERAM Erreur Relative Absolue Moyenne. 133, 151, 158, 160, 168, 169, 254–256, 260, 261, 273, 278–280, 284, 287–293

ERM Erreur Relative Moyenne. 133, 140, 142, 143, 145, 149, 157, 159, 160, 168, 169, 171, 174, 190, 200–208, 213, 248, 253, 254, 258, 259, 261, 278, 284, 294–297

FSPM Functional-Structural Plant Modelling. 74, 75

ICP Iterative Closest Point. 48

IGN Institut National de l'information géographique et forestière. 46

LAI Leaf Area Index. 28, 108

LS Least Square. 165

MLS Moving Least Square. 114, 165, 166, 200, 204, 207, 219

PCL Point Cloud Library. 124, 144

RVB Rouge Vert Bleu. 39

SFM Structure From Motion. 9–11, 39–49, 53, 55, 69, 70

SOR Statistical Outlier Removal. 163, 165, 166, 204, 207, 219

WLS Weighted Least Square. 166

Annexes

A.1 Analyse de Sensibilité résultat de l'ERAM

(a)

Algorithme	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox	BBox
paramètre alpha meta	1	10	50	100	200	300	400	500	
Densité	aucun maillage	0,9592	0,7685	0,5460	0,2718	0,1819	0,0587	0,0853	
Régulier	aucun maillage	0,3200	0,1782	0,1267	0,1042	0,0956	0,0883	0,0878	
Ratio échantillonnage NU	aucun maillage	1,0000	0,9958	0,9708	0,9182	0,8716	0,8304	0,7928	
Trou	aucun maillage	0,9997	0,9080	0,5568	0,2290	0,1998	0,1930	0,1857	
Recalage	aucun maillage	aucun maillage	0,9797	0,7505	0,6276	0,5592	0,5585	0,4931	
Courbure	aucun maillage	aucun maillage	0,9962	0,9598	0,9004	0,8477	0,8007	0,7574	
Concavité	aucun maillage	aucun maillage	0,9768	0,5606	0,0599	0,0125	0,0172	0,0225	
Ratio L/I	aucun maillage	0,9993	0,6222	0,2399	0,0123	0,0067	0,0049	0,0038	
Bruit	aucun maillage	aucun maillage	0,9737	0,6195	2,4024	1,9733	1,8758	1,1598	

(b)

Algorithme	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian	Médian
paramètre alpha meta	1	2	3	4	5	6	7	10
Densité	0,1462	0,1411	0,0832	0,0685	0,0593	0,0418	0,0396	0,0391
Régulier	0,0652	0,0861	0,0851	0,0843	0,0834	0,0810	0,0795	0,0782
Ratio échantillonnage NU	0,7419	0,5647	0,3031	0,2183	0,1473	0,0576	0,0294	0,0191
Trou	0,1945	0,1476	0,0058	0,0062	0,0068	0,0082	0,0089	0,0093
Recalage	0,4648	0,2475	0,2050	0,1985	0,1878	0,1705	0,1616	0,1552
Courbure	0,6215	0,4240	0,2655	0,2092	0,1690	0,1252	0,1130	0,1047
Concavité	0,0277	0,0660	0,1109	0,1329	0,1379	0,1456	0,1458	0,1461
Ratio L/I	0,0030	0,0034	0,0071	0,0084	0,0102	0,0127	0,0138	0,0145
Bruit	0,7921	0,7510	0,7434	0,7440	0,7459	0,7488	0,7507	0,7518

(c)

Algorithme	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile	Décile
paramètre alpha meta	1	2	3	4	5	6	7	10
Densité	0,2124	0,1833	0,1178	0,0943	0,0816	0,0524	0,0478	0,0405
Régulier	0,0494	0,0864	0,0859	0,0855	0,0848	0,0829	0,0815	0,0805
Ratio échantillonnage NU	0,8246	0,6857	0,4310	0,3350	0,2411	0,1076	0,0593	0,0372
Trou	0,2046	0,1932	0,1187	0,0588	0,0058	0,0069	0,0078	0,0083
Recalage	0,5578	0,4013	0,2101	0,2046	0,2014	0,1829	0,1729	0,1660
Courbure	0,7315	0,5621	0,3541	0,3029	0,2368	0,1573	0,1311	0,1209
Concavité	0,0181	0,0337	0,0819	0,0941	0,1188	0,1425	0,1455	0,1457
Ratio L/I	0,0079	0,0040	0,0032	0,0046	0,0063	0,0091	0,0109	0,0118
Bruit	2,9451	0,7715	0,7445	0,7437	0,7437	0,7467	0,7485	0,7499

Fig. A.1.: Résultats moyennes par critère analyse de sensibilité Alpha-shape pour l'ERAM

A.2 Résultats sur les données synthétique

A.2.1 Visualisation pour le critère de la courbure

Visualisation pour toutes les méthodes de reconstruction de résultats obtenue sur le jeu de données du critère de courbure A.2 à A.9.

A.2.2 Résultats ERAM sur les jeux de données synthétiques

Résultats ERAM sur les jeux de données synthétiques dans les figures A.10 et A.11.

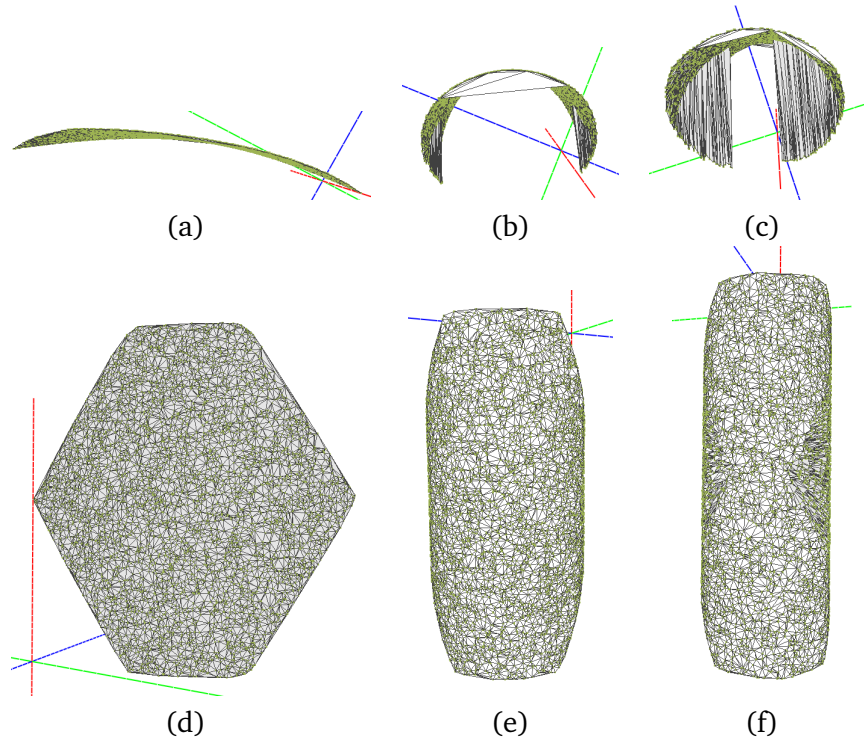


Fig. A.2.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 40^\circ$, (b) et (e) $Cu = 240^\circ$, (c) et (f) $Cu = 340^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

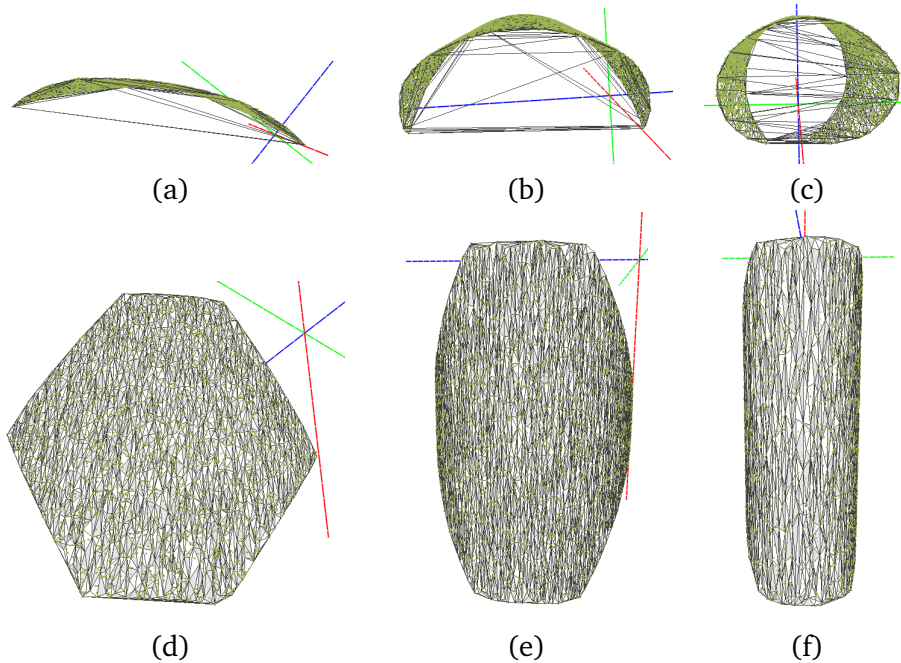


Fig. A.3.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant Alpha-Shape. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 60^\circ$, (b) et (e) $Cu = 180^\circ$, (c) et (f) $Cu = 360^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

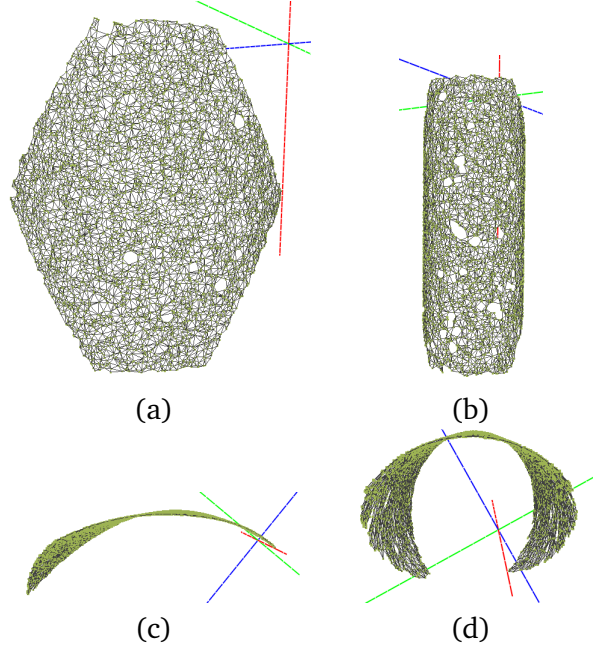


Fig. A.4.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la BPA. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (c) $Cu = 40^\circ$, (b) et (d) $Cu = 340^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

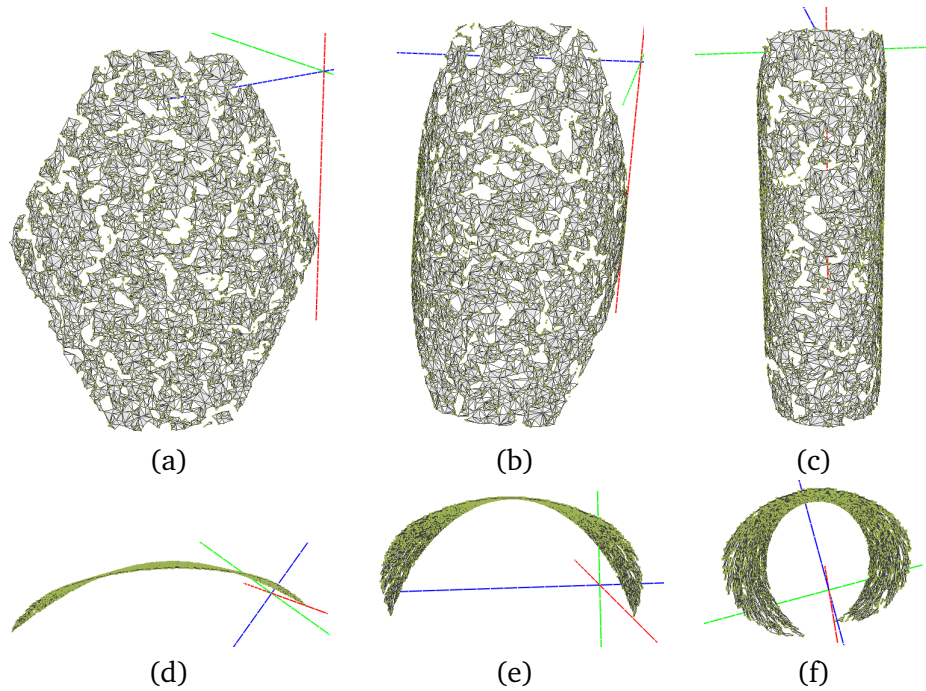


Fig. A.5.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la Triangulation 2.5D. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 80^\circ$, (b) et (e) $Cu = 180^\circ$, (c) et (f) $Cu = 360^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

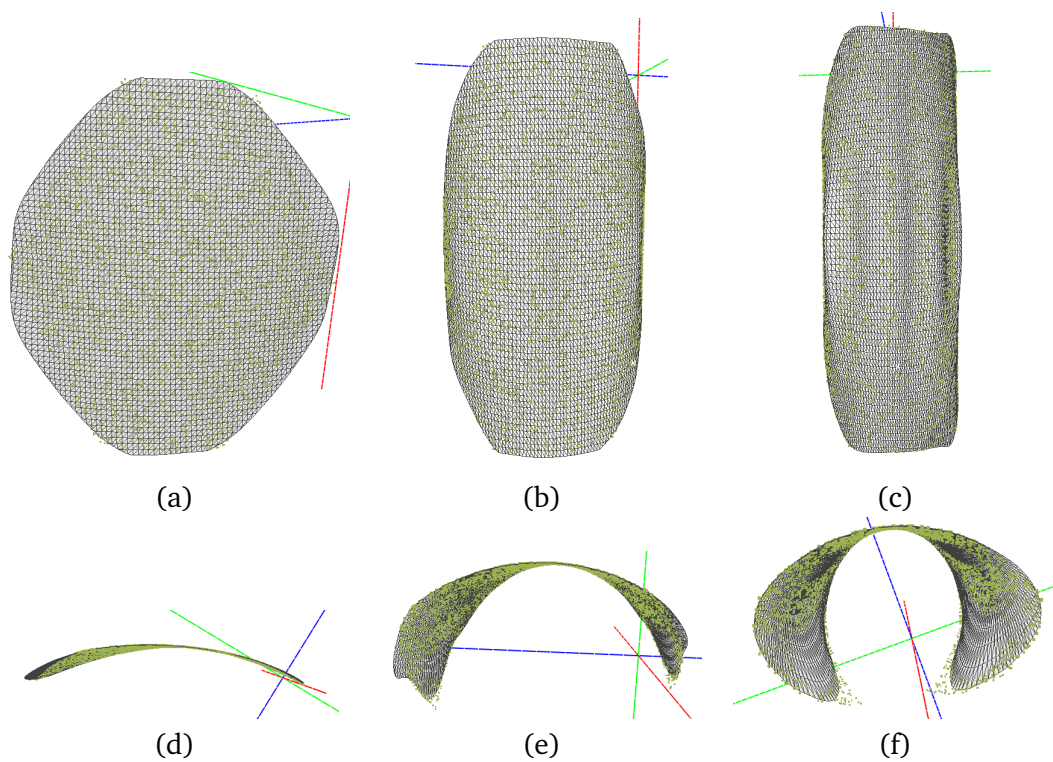


Fig. A.6.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode B-Spline. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 60^\circ$, (b) et (e) $Cu = 200^\circ$, (c) et (f) $Cu = 340^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

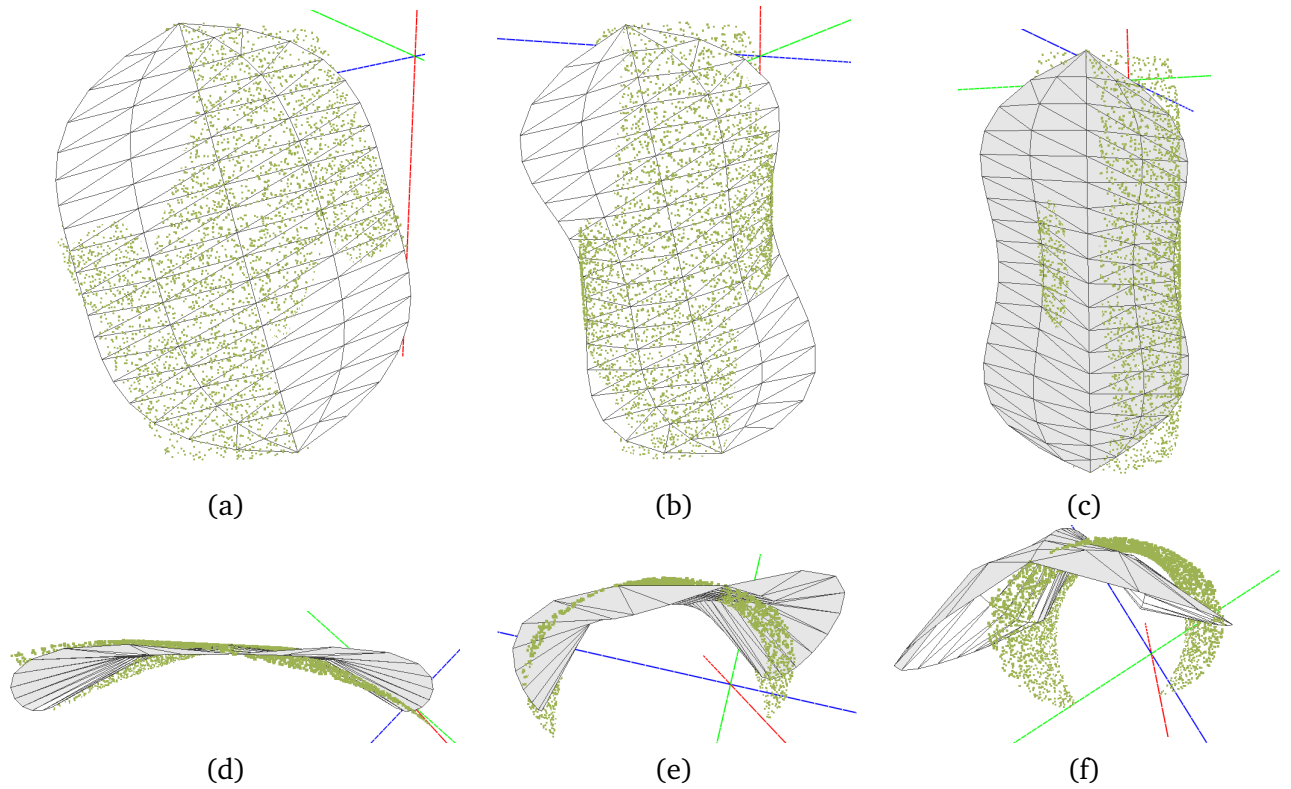


Fig. A.7.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode du modèle de feuille de Bézier. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 80^\circ$, (b) et (e) $Cu = 220^\circ$, (c) et (f) $Cu = 380^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

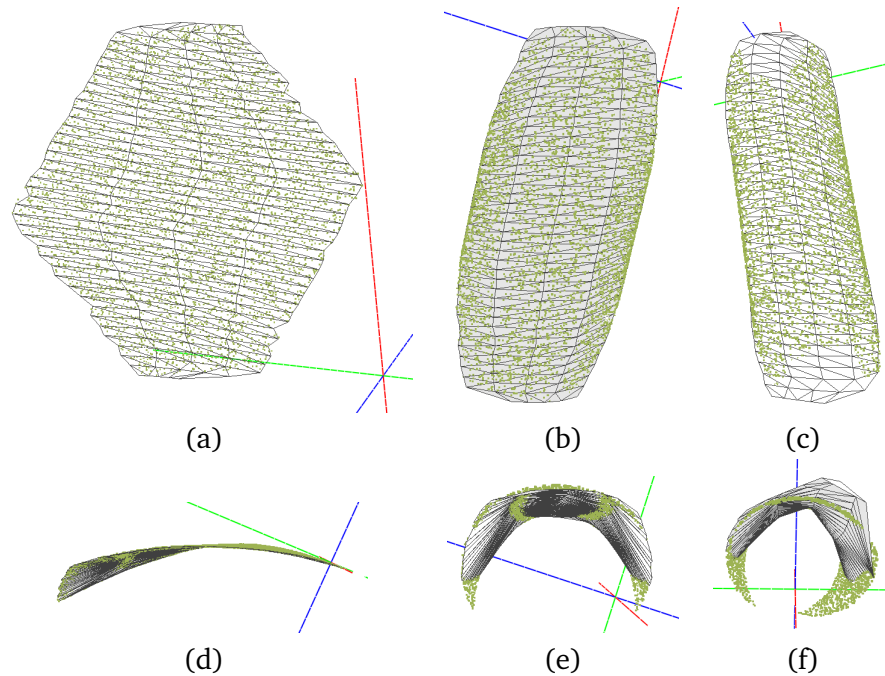


Fig. A.8.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la méthode de Bézier élagué. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 60^\circ$, (b) et (e) $Cu = 220^\circ$, (c) et (f) $Cu = 340^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

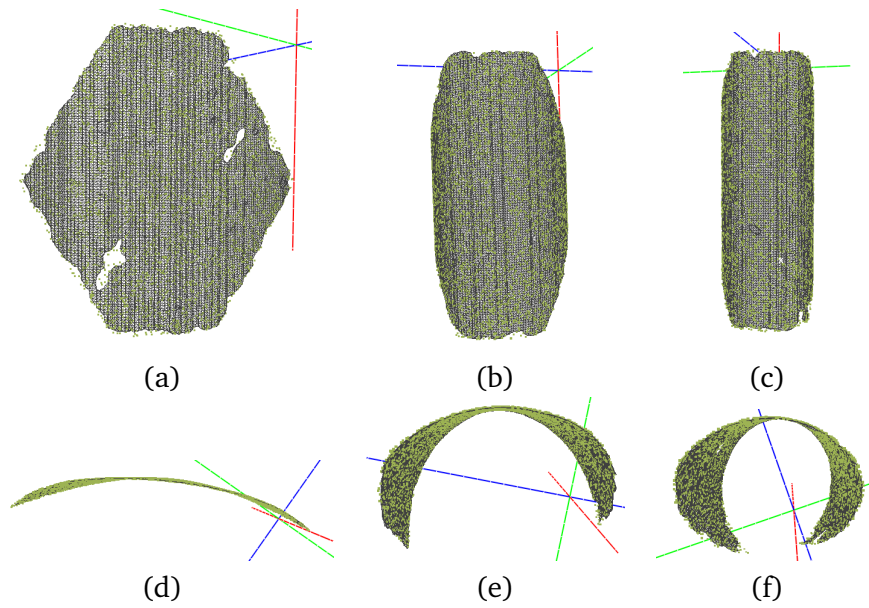


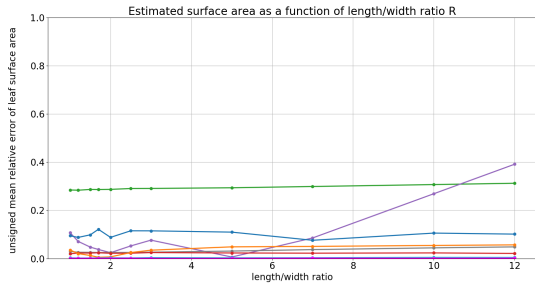
Fig. A.9.: Reconstruction de nuage de points synthétiques de feuille avec différente valeur de courbure en utilisant la reconstruction de Poisson écranté. L'espace 3D est décrit par les axes rouge, vert et bleu. (a) et (d) $Cu = 60^\circ$, (b) et (e) $Cu = 220^\circ$, (c) et (f) $Cu = 340^\circ$, respectivement vue latérale et vue du dessus.

A.2.3 Étude de compensation des erreurs sur les jeux de données synthétiques

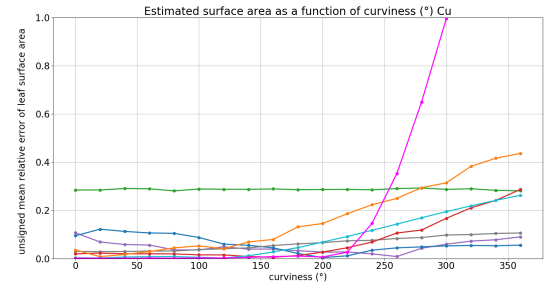
Les tableaux A.1 à A.21 présentent l'étude du phénomène de compensation avec l'ERM en la comparant avec les résultats obtenus avec ERAM.

R values	1	1.2	1.5	1.7	2	2.5	3	5	7	10	12
Triangulation 2.5D	$3e - 05$	0.0002	0.0004	0.0005	0.0001	0.0002	$6e - 05$	0	$5e - 05$	$7e - 05$	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0

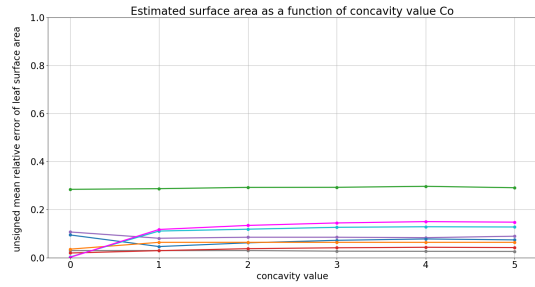
Tab. A.1.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur du ratio Longueur/largeur R.



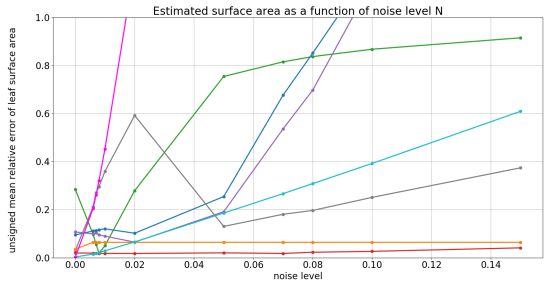
(a)



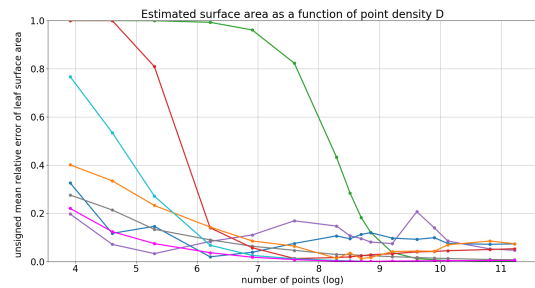
(b)



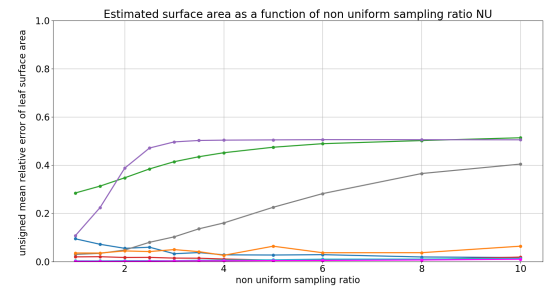
(c)



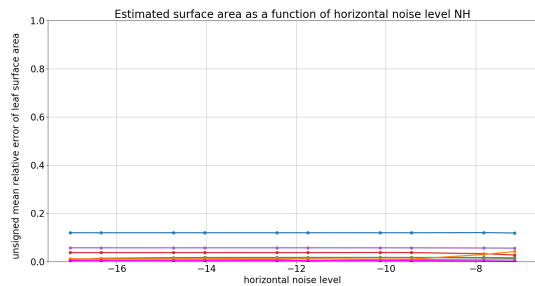
(d)



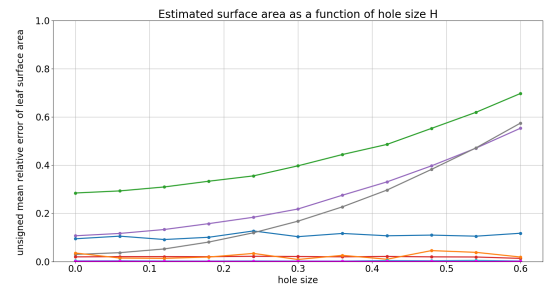
(e)



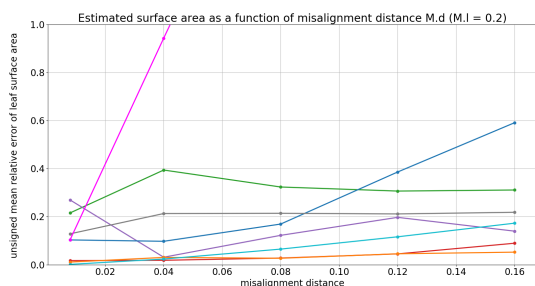
(f)



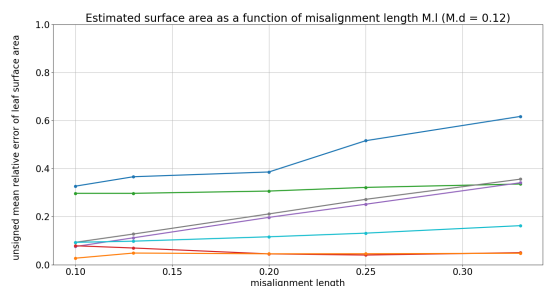
(g)



(h)

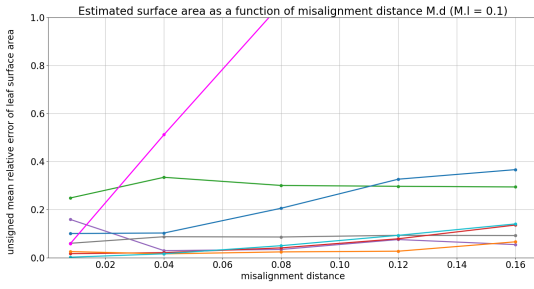


(i)

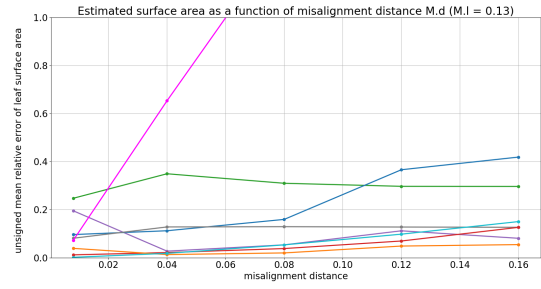


(j)

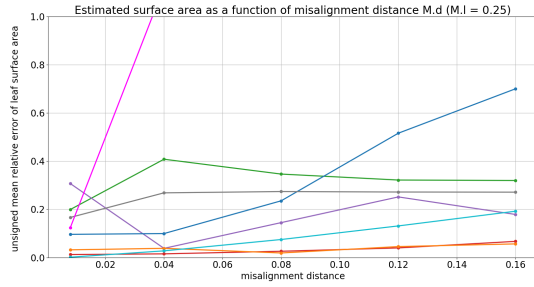
Fig. A.10.: Influence de chaque critère sur l'estimation de la surface foliaire d'après l'ERAM pour les méthodes **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape Médiane**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson échantillé**: (a) R, (b) Cu, (c) Co, (d) S.n, (e) D, (f) NU, (g) N, (h) H, (i) M.d, (j) M.l.



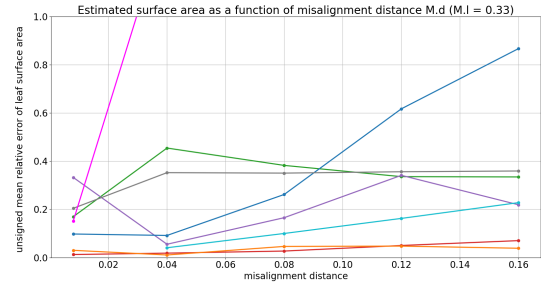
(a)



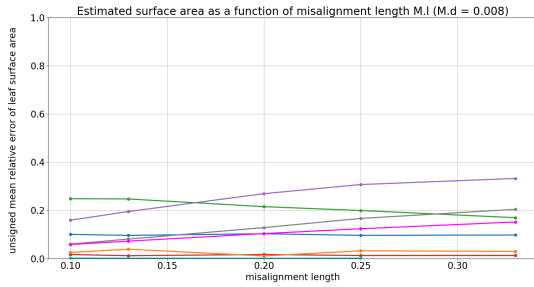
(b)



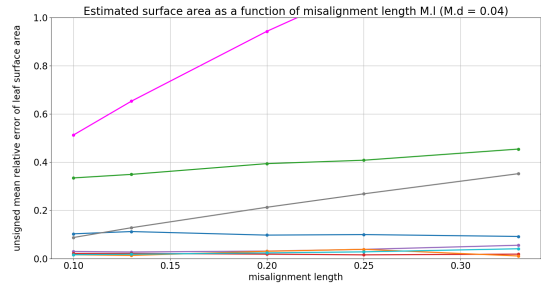
(c)



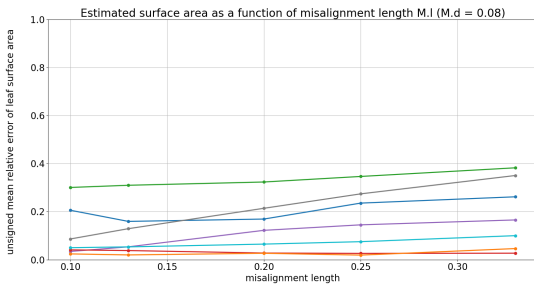
(d)



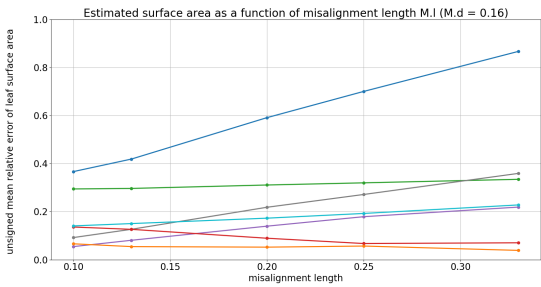
(e)



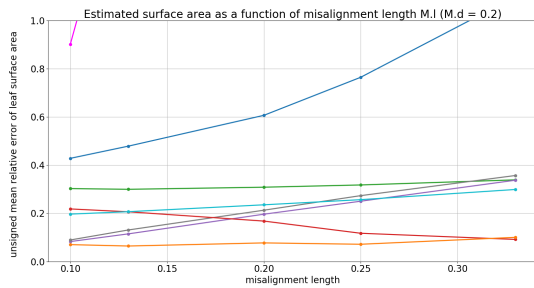
(f)



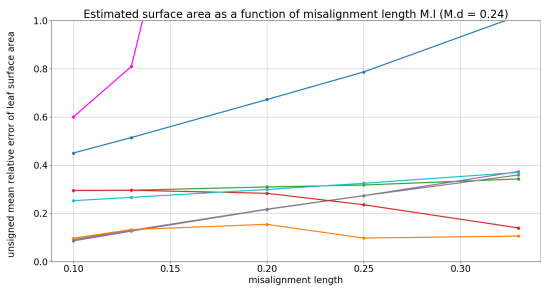
(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. A.11.: Résultats de l'estimation sur les jeux de données synthétiques de recalage avec l'ERAM pour différentes valeurs de $M.d$ et $M.l$.

Cu values	Triangulation 2.5D	Alpha-Shape	BPA	Reconstruction incrémentale	B-Spline	Modèle de feuille de Bézier	Bézier
0	0	0	0	0	0	0	
20	0.0006	0	0	0	0	0	
40	0.0003	0	0	0	0	0	
60	0.0001	0	0	0	0	0.001	
80	0.0007	0	0	0	0	0	
100	0.001	0	0	0	0	0.006	
120	0.0007	0.001	0	0	0	0.0002	
140	0.0003	0	0	0	0	0.005	0.
160	0	0	0	0	0	0.009	0.
180	0	0	0	0	0	0.02	
200	0.0003	0	0	0	0.002	0.02	
220	0	0	0	0	0	0	
240	0	0	0	0	0	0	
260	0	0	0	0	0	0.05	
280	0	0	0	0	0	0.01	
300	0	0	0	0	0	0.03	
320	0	0	0	0	0	0	
340	0	0	0	0	0	0	
360	3e - 05	0	0	0	0	0	

Tab. A.2.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de courbure **Cu**.

Co values	0	1	2	3	4	5
Triangulation 2.5D	3e - 05	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0

Tab. A.3.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de concavité **Co**.

D values	Triangulation 2.5D	Alpha-Shape	BPA	Reconstruction incrémentale	B-Spline	Modèle de feuille de Bézier	Bézier
50	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0.003	0	0
200	0	0	0	0	0.0006	0	0
500	0	0	0	0	0.008	0	0
1000	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0
4000	0	0	0	0	0	0	0
5000	3e - 05	0	0	0	0	0	0
6000	0.0007	5e - 05	0	0	0	0	0
7000	0.0002	0.0001	0	0	0	0	0
10000	0.0001	0.0	0	0	0	0	0
15000	0	0	0	0	0	0	0
20000	0	0	0	0	0	0	0
25000	0	0	0	0	0	0	0
50000	0	0	0	4e - 05	0	0	0
75000	0	0	0	1e - 05	0	0	0

Tab. A.4.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de densité **D**.

NU values	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4	5	6	8	10
Triangulation 2.5D	$3e-05$	0	0.0002	$8e-05$	0	$3e-05$	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0.001	0.004	0.004	0.0005	0.001
Poisson échanté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.5.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur d'échantillonnage non uniforme NU.

N values	0.0	0.006	0.007	0.008	0.01	0.02	0.05	0.07	0.08	0.1	0.15
Triangulation 2.5D	$3e-05$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0.001	0	0.2	0.6	0.6	0.6	1
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0.009	0.005	0.002	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poisson échanté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.6.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de bruit d'acquisition N.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0.2
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson échanté	0	0	0	0	0

Tab. A.7.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.I avec M.d = 0.2.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0.003	0.0006	0	0.008	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson échanté	0	0	0	0	0

Tab. A.8.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.I avec M.d = 0.04.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0.0002	0.0002	0.0004	0.0004	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0.009	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0

Tab. A.9.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage **M.I** avec $M.d = 0.008$.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0.003
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0

Tab. A.10.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage **M.I** avec $M.d = 0.08$.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0.4	0.2
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0

Tab. A.11.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage **M.I** avec $M.d = 0.12$.

M.I valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0

Tab. A.12.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage **M.I** avec $M.d = 0.16$.

M.l valeurs	0.1	0.13	0.2	0.25	0.33
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0.002	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0

Tab. A.13.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de longueur de recalage M.l avec M.d = 0.24.

M.l valeurs	0.008	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0.0002	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0.003	0	0.003	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.14.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec M.l = 0.1.

M.l valeurs	0.008	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0.0002	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0.01	0.0006	0	0.002	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.15.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance M.d avec M.l = 0.13.

La différence entre Erreur Relative Absolue Moyenne et Erreur Relative Moyenne est sous le seuil de 0.01 pour pratiquement tous les jeux de données, pour pratiquement toutes les méthodes de reconstruction, ce qui n'est pas significatif pour l'interprétation des résultats. Seuls quatre cas peuvent être remarqués comme ayant un phénomène de compensation en quantité notable. Cependant, on remarque en examinant les graphes résultats que ce sont exclusivement des cas de figure où la valeur du critère est au-dessus des limites acceptables pour la méthode en question. Ainsi mes conclusions ne sont pas changées.

A.3 Résultat jeux de données réelles

M.l valeurs	0.008	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0.0004	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.16.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance **M.d** avec M.l = 0.2.

M.l valeurs	0.008	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0.0004	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0.4	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0.008	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.17.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance **M.d** avec M.l = 0.25.

M.l valeurs	0.008	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
Triangulation 2.5D	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0.2	0.2	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0.003	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.18.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de recalage distance **M.d** avec M.l = 0.33.

H valeurs	0.0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36	0.42	0.48	0.54	0.6
Triangulation 2.5D	$3e - 05$	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001	0.0002	0.0007	0.0005	$9e - 05$	0.0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$5e - 05$
BPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.19.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur de trou **H**.

HN values	0	$4e-08$	$8e-08$	$4e-07$	$8e-07$	$4e-06$	$8e-06$	$4e-05$	$8e-05$	$4e-04$	$8e-04$
Triangulation 2.5D	$3e-05$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alpha-Shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reconstruction incrémentale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B-Spline	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Modèle de feuille de Bézier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bézier élagué	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poisson écranté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. A.20.: $MARE - \|MRE\|$ pour chaque méthode et chaque valeur bruits horizontal HN.

	2.5D Tri.	Alpha-Shape	BPA	Inc. Rec.	B-Spline	BLM	Trim. Bézier	Poisson écranté
R	0.0005	0	0	0	0	0	0	0.001
Cu	0.001	0.001	0	0	0.002	0.05	0.002	0.0004
Co	$3e-05$	0	0	0	0	0	0	0
D	0.0007	0.0001	0	$4e-05$	0.008	0	0	0.003
NU	0.0002	0	0	0	0.003	0	0.004	0
N	$3e-05$	0	0	0	1	0.009	0	0
M.d (M.l = 0.2)	0	0	0	0	0.2	0	0	0
M.d (M.l = 0.04)	0	0	0	0	0	0.008	0	0
M.d (M.l = 0.008)	0	0.0004	0	0	0	0.009	0	0
M.d (M.l = 0.08)	0	0	0	0	0	0.003	0	0
M.d (M.l = 0.12)	0	0	0	0	0.4	0	0	0
M.d (M.l = 0.16)	0	0	0	0	0	0	0	0
M.d (M.l = 0.24)	0	0	0	0	0	0.002	0	0
M.l (M.d = 0.1)	0	0.0002	0	0	0	0.003	0	0
M.l (M.d = 0.13)	0.0	0.0002	0	0	0	0.01	0	0
M.l (M.d = 0.2)	0.0	0.0004	0	0	0	0	0	0
M.l (M.d = 0.25)	0	0.0004	0	0	0	0.008	0	0
M.l (M.d = 0.33)	0	0	0	0	0.2	0.003	0	0
H	0.0007	$5e-05$	0	0	0	0	0.002	0

Tab. A.21.: Pour chaque critère différence de norme la plus haute pour chaque méthode.

A.3.1 Résultat ERAM sur les données réelles

Résultats pour les jeux de données réelles avec le filtrage MLS et l'ERAM dans la figure A.12.

A.3.2 Résultats statistiques sur le jeu de données forestier

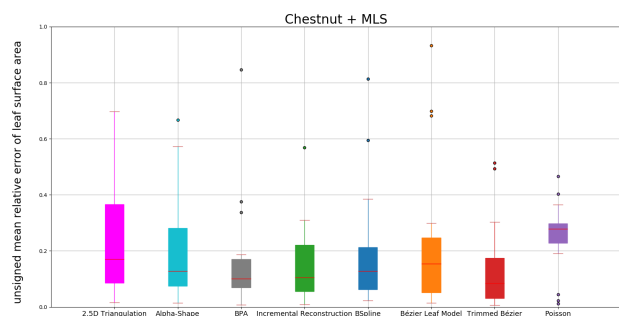
Filtres	Statistiques	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	Q1	1.69	1.01	0.09	0.08
	Médiane	2.19	1.39	0.17	0.14
	Q3	2.62	1.84	0.36	0.18
Alpha-Shape	Q1	0.15	0.04	0.08	0.06
	Médiane	0.26	0.09	0.13	0.13
	Q3	0.38	0.23	0.28	0.17
BPA	Q1	0.78	0.51	0.07	0.12
	Médiane	0.91	0.67	0.10	0.19
	Q3	1.12	0.88	0.17	0.25
Reconstruction incrémentale	Q1	1.64	1.16	0.06	0.07
	Médiane	2.00	1.51	0.11	0.13
	Q3	2.35	1.75	0.22	0.23
B-Spline	Q1	0.16	0.05	0.06	0.06
	Médiane	0.22	0.13	0.11	0.12
	Q3	0.38	0.31	0.22	0.19
Modèle de feuille de Bézier	Q1	0.04	0.08	0.05	0.05
	Médiane	0.15	0.15	0.15	0.14
	Q3	0.24	0.18	0.25	0.18
Bézier élagué	Q1	0.03	0.08	0.03	0.08
	Médiane	0.09	0.14	0.08	0.15
	Q3	0.15	0.20	0.17	0.22
Poisson écranté	Q1	0.06	0.08	0.23	0.25
	Médiane	0.18	0.20	0.28	0.30
	Q3	0.25	0.26	0.3	0.33

Tab. A.22.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du châtaigner.

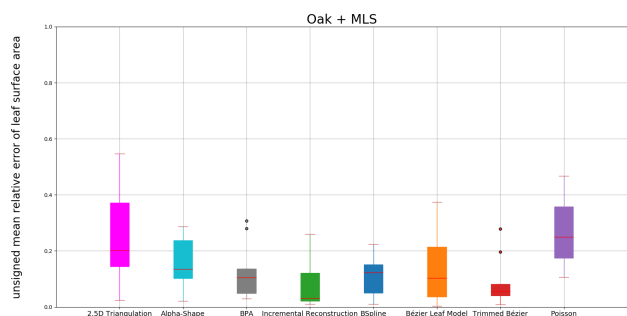
A.3.3 Résultats statistiques sur le jeu de données maïs

A.3.4 Statistiques ERAM pour chaque méthode et chaque filtre sur les données réelles

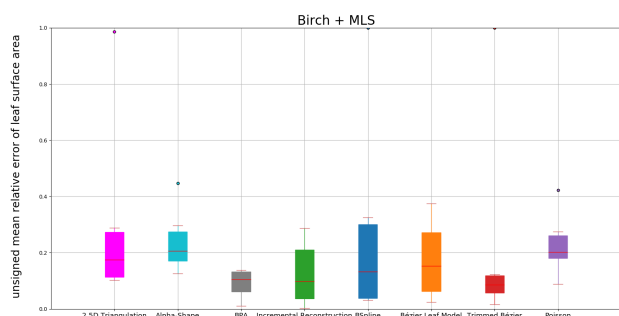
Les tableaux A.27 à A.31 donne les résultats statistiques du premier quartile, médianes et troisièmes quartiles pour l'ERAM de chacun de jeux de données réels. Ces statistiques confirment les résultats présentés dans la section 4.



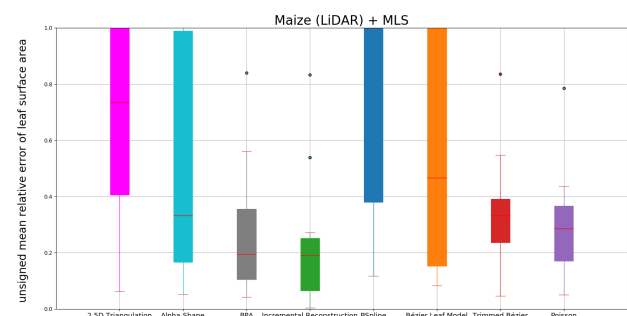
(a)



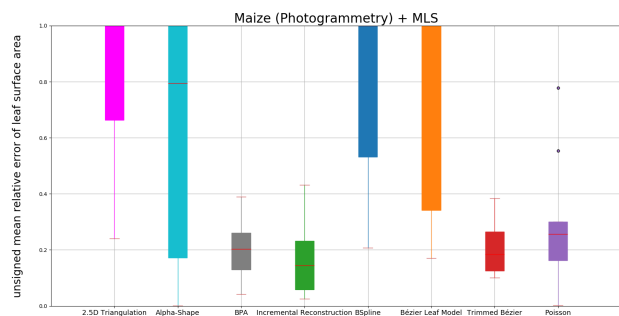
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. A.12.: Diagramme en boîte pour l'ERAM de la surface foliaire sur les jeux de données réelles pour les méthodes de reconstruction **Triangulation 2.5D**, **Alpha-Shape** **Médiane**, **BPA**, **Reconstruction incrémentale**, **B-Spline**, **Modèle de feuille de Bézier**, **Bézier élagué** et **Poisson**: (a) châtaigner (b) chêne (c) bouleau (d) maïs (LiDAR) (e) maïs (photo). Les traits aux extrémités représentent les valeurs minimales et maximales des erreurs pour une méthode de reconstruction donnée sur un jeu de nuage de points donné (sauf pour les points aberrants), une boîte représente l'erreur entre le 25e et 75e pourcentage, la ligne dans la boîte l'erreur médiane, la moyenne est représentée par une croix. Les erreurs sont considérées comme aberrant si elles se trouvent à une distance supérieure à 1.5 fois la longueur de la boîte à quelque extrémité que ce soit.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	1.51	1.12	0.15	0.09
	1.87	1.35	0.20	0.16
	2.41	1.76	0.37	0.33
Alpha-Shape	0.13	0.12	0.10	0.09
	0.28	0.15	0.13	0.09
	0.30	0.23	0.24	0.21
BPA	0.67	0.40	0.05	0.11
	0.71	0.57	0.11	0.18
	0.8	0.65	0.14	0.23
Reconstruction incrémentale	1.4	1.03	0.02	0.06
	1.68	1.22	0.03	0.11
	2.03	1.55	0.12	0.23
B-Spline	0.1	0.06	0.05	0.03
	0.14	0.1	0.12	0.09
	0.16	0.21	0.15	0.11
Modèle de feuille de Bézier	0.02	0.03	0.04	0.04
	0.12	0.08	0.1	0.1
	0.22	0.14	0.21	0.14
Bézier élagué	0.04	0.03	0.04	0.02
	0.06	0.1	0.06	0.09
	0.08	0.15	0.08	0.15
Poisson écranté	0.05	0.07	0.18	0.21
	0.09	0.14	0.25	0.29
	0.2	0.23	0.36	0.38

Tab. A.23.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du chêne.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	2.01	1.24	0.11	0.03
	2.19	1.38	0.17	0.04
	2.38	1.51	0.27	0.09
Alpha-Shape	0.27	0.07	0.17	0.05
	0.36	0.09	0.21	0.06
	0.4	0.19	0.27	0.13
BPA	0.49	0.25	0.06	0.12
	0.53	0.33	0.11	0.19
	0.66	0.58	0.13	0.21
Reconstruction incrémentale	1.99	1.48	0.04	0.07
	2.11	1.55	0.1	0.10
	2.20	1.63	0.21	0.13
B-Spline	0.19	0.06	0.04	0.06
	0.26	0.07	0.13	0.09
	0.54	0.08	0.30	0.11
Modèle de feuille de Bézier	0.06	0.06	0.06	0.05
	0.15	0.08	0.15	0.08
	0.25	0.1	0.27	0.10
Bézier élagué	0.05	0.03	0.06	0.03
	0.1	0.12	0.09	0.12
	0.15	0.14	0.12	0.14
Poisson écranté	0.15	0.12	0.18	0.22
	0.18	0.21	0.20	0.26
	0.22	0.23	0.26	0.3

Tab. A.24.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du bouleau.

Filtres	aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	1.42	0.91	0.41	0.2
	1.90	1.25	0.73	0.45
	4.46	3.64	2.84	2.57
Alpha-Shape	0	0.02	0.17	0.07
	0	0.18	0.33	0.19
	0.19	0.97	0.99	0.95
BPA	0.41	0.21	0.11	0.22
	0.53	0.32	0.2	0.30
	0.87	0.08	0.36	0.44
Reconstruction incrémentale	0.88	0.53	0.07	0.13
	1.0	0.71	0.19	0.17
	1.41	1.11	0.25	0.37
B-Spline	0.19	0.16	0.38	0.18
	0.77	0.19	1.0	0.23
	1.0	0.92	1.0	0.68
Modèle de feuille de Bézier	0.13	0.22	0.15	0.22
	0.47	0.47	0.47	0.45
	1.10	1.23	1.16	1.25
Bézier élagué	0.20	0.33	0.24	0.34
	0.32	0.37	0.33	0.38
	0.38	0.52	0.39	0.51
Poisson écranté	0.09	0.07	0.78	0.16
	0.17	0.18	0.17	0.26
	0.29	0.28	0.29	0.36

Tab. A.25.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du maïs (LiDAR).

Filtres	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	0.73	0.44	0.66	0.37
	3.00	1.26	2.69	1.17
	3.37	2.62	3.06	2.42
Alpha-Shape	0.20	0.10	0.17	0.11
	0.83	0.72	0.79	0.68
	1.47	0.92	1.42	0.91
BPA	0.14	0.19	0.13	0.09
	0.21	0.3	0.20	0.32
	0.26	0.37	0.26	0.67
Reconstruction incrémentale	0.08	0.16	0.06	0.18
	0.18	0.21	0.14	0.25
	0.23	0.3	0.23	0.34
B-Spline	0.16	0.2	0.53	0.21
	0.64	0.4	1.0	1.0
	1.0	1.0	1.0	1.0
Modèle de feuille de Bézier	0.56	0.21	0.34	0.1
	1.54	1.17	1.61	1.18
	2.76	1.80	2.54	2.41
Bézier élagué	0.16	0.21	0.13	0.22
	0.17	0.25	0.18	0.26
	0.28	0.45	0.27	0.45
Poisson écranté	0.07	0.06	0.16	0.11
	0.22	0.08	0.26	0.15
	0.25	0.13	0.30	0.29

Tab. A.26.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode et chaque filtre du jeu de données du maïs Photogrammétrie).

Filtres	Statistiques	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	Q1	1.69	1.01	0.09	0.08
	Médiane	2.19	1.39	0.17	0.14
	Q3	2.62	1.84	0.36	0.18
Alpha-Shape	Q1	0.15	0.04	0.08	0.06
	Médiane	0.26	0.09	0.13	0.13
	Q3	0.38	0.23	0.28	0.17
BPA	Q1	0.78	0.51	0.07	0.12
	Médiane	0.91	0.67	0.10	0.19
	Q3	1.12	0.88	0.17	0.25
Reconstruction incrémentale	Q1	1.64	1.16	0.06	0.07
	Médiane	2.00	1.51	0.11	0.13
	Q3	2.35	1.75	0.22	0.23
B-Spline	Q1	0.16	0.05	0.06	0.06
	Médiane	0.22	0.13	0.11	0.12
	Q3	0.38	0.31	0.22	0.19
Modèle de feuille de Bézier	Q1	0.04	0.08	0.05	0.05
	Médiane	0.15	0.15	0.15	0.14
	Q3	0.24	0.18	0.25	0.18
Bézier élagué	Q1	0.03	0.08	0.03	0.08
	Médiane	0.09	0.14	0.08	0.15
	Q3	0.15	0.20	0.17	0.22
Poisson écranté	Q1	0.06	0.08	0.23	0.25
	Médiane	0.18	0.20	0.28	0.30
	Q3	0.25	0.26	0.3	0.33

Tab. A.27.: Premier quartile, médiane et troisième quartile of the *MARE* de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données Châtaigner.

Filtres	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	1.51	1.12	0.15	0.09
	1.87	1.35	0.20	0.16
	2.41	1.76	0.37	0.33
Alpha-Shape	0.13	0.12	0.10	0.09
	0.28	0.15	0.13	0.09
	0.30	0.23	0.24	0.21
BPA	0.67	0.40	0.05	0.11
	0.71	0.57	0.11	0.18
	0.8	0.65	0.14	0.23
Reconstruction incrémentale	1.4	1.03	0.02	0.06
	1.68	1.22	0.03	0.11
	2.03	1.55	0.12	0.23
B-Spline	0.1	0.06	0.05	0.03
	0.14	0.1	0.12	0.09
	0.16	0.21	0.15	0.11
Modèle de feuille de Bézier	0.02	0.03	0.04	0.04
	0.12	0.08	0.1	0.1
	0.22	0.14	0.21	0.14
Bézier élagué	0.04	0.03	0.04	0.02
	0.06	0.1	0.06	0.09
	0.08	0.15	0.08	0.15
Poisson écranté	0.05	0.07	0.18	0.21
	0.09	0.14	0.25	0.29
	0.2	0.23	0.36	0.38

Tab. A.28.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données chêne.

Filtres	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	2.01	1.24	0.11	0.03
	2.19	1.38	0.17	0.04
	2.38	1.51	0.27	0.09
Alpha-Shape	0.27	0.07	0.17	0.05
	0.36	0.09	0.21	0.06
	0.4	0.19	0.27	0.13
BPA	0.49	0.25	0.06	0.12
	0.53	0.33	0.11	0.19
	0.66	0.58	0.13	0.21
Reconstruction incrémentale	1.99	1.48	0.04	0.07
	2.11	1.55	0.1	0.10
	2.20	1.63	0.21	0.13
B-Spline	0.19	0.06	0.04	0.06
	0.26	0.07	0.13	0.09
	0.54	0.08	0.30	0.11
Modèle de feuille de Bézier	0.06	0.06	0.06	0.05
	0.15	0.08	0.15	0.08
	0.25	0.1	0.27	0.10
Bézier élagué	0.05	0.03	0.06	0.03
	0.1	0.12	0.09	0.12
	0.15	0.14	0.12	0.14
Poisson écranté	0.15	0.12	0.18	0.22
	0.18	0.21	0.20	0.26
	0.22	0.23	0.26	0.3

Tab. A.29.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données bouleau.

Filtres	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	1.42	0.91	0.41	0.2
	1.90	1.25	0.73	0.45
	4.46	3.64	2.84	2.57
Alpha-Shape	0	0.02	0.17	0.07
	0	0.18	0.33	0.19
	0.19	0.97	0.99	0.95
BPA	0.41	0.21	0.11	0.22
	0.53	0.32	0.2	0.30
	0.87	0.08	0.36	0.44
Reconstruction incrémentale	0.88	0.53	0.07	0.13
	1.0	0.71	0.19	0.17
	1.41	1.11	0.25	0.37
B-Spline	0.19	0.16	0.38	0.18
	0.77	0.19	1.0	0.23
	1.0	0.92	1.0	0.68
Modèle de feuille de Bézier	0.13	0.22	0.15	0.22
	0.47	0.47	0.47	0.45
	1.10	1.23	1.16	1.25
Bézier élagué	0.20	0.33	0.24	0.34
	0.32	0.37	0.33	0.38
	0.38	0.52	0.39	0.51
Poisson écranté	0.09	0.07	0.78	0.16
	0.17	0.18	0.17	0.26
	0.29	0.28	0.29	0.36

Tab. A.30.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données maïs (LiDAR).

Filtres	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR-MLS
Triangulation 2.5D	0.73	0.44	0.66	0.37
	3.00	1.26	2.69	1.17
	3.37	2.62	3.06	2.42
Alpha-Shape	0.20	0.10	0.17	0.11
	0.83	0.72	0.79	0.68
	1.47	0.92	1.42	0.91
BPA	0.14	0.19	0.13	0.09
	0.21	0.3	0.20	0.32
	0.26	0.37	0.26	0.67
Reconstruction incrémentale	0.08	0.16	0.06	0.18
	0.18	0.21	0.14	0.25
	0.23	0.3	0.23	0.34
B-Spline	0.16	0.2	0.53	0.21
	0.64	0.4	1.0	1.0
	1.0	1.0	1.0	1.0
Modèle de feuille de Bézier	0.56	0.21	0.34	0.1
	1.54	1.17	1.61	1.18
	2.76	1.80	2.54	2.41
Bézier élagué	0.16	0.21	0.13	0.22
	0.17	0.25	0.18	0.26
	0.28	0.45	0.27	0.45
Poisson écranté	0.07	0.06	0.16	0.11
	0.22	0.08	0.26	0.15
	0.25	0.13	0.30	0.29

Tab. A.31.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de l'ERAM pour chaque méthode de reconstruction et chaque filtres sur le jeu de données maïs (photo).

A.3.5 Résultats du filtrage en prétraitement

Résultats statistiques (Premier quartile, médiane and troisième quartile) pour chaque jeu de données réelles avec toutes les combinaisons de filtrage testé et pour chaque méthode dans les tableaux A.32 à A.40.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	1,7	1,0	0,08	-0,09
	2,2	1,4	0,17	-0,006
	2,6	1,8	0,37	0,18
Chêne	1,5	1,1	0,07	-0,05
	1,9	1,4	0,2	0,15
	2,4	1,8	0,37	0,33
Bouleau	2,0	1,2	0,11	-0,36
	2,2	1,4	0,17	-0,014
	2,4	1,5	0,27	0,08
maïs (LiDAR)	1,4	0,81	0,18	-0,05
	1,9	1,3	0,61	0,30
	4,5	3,6	2,8	2,4
maïs (photo)	0,73	0,44	0,66	0,37
	3,0	1,3	2,7	1,2
	3,4	2,6	3,1	2,4

Tab. A.32.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de Triangulation 2.5D.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	0,15	-0,011	-0,0009	-0,09
	0,26	0,07	0,13	-0,02
	0,38	0,23	0,28	0,15
Chêne	0,13	0,004	0,02	-0,065
	0,28	0,15	0,13	0,086
	0,30	0,23	0,24	0,20
Bouleau	0,27	0,07	0,17	-0,03
	0,36	0,09	0,21	0,034
	0,4	0,19	0,27	0,13
maïs (LiDAR)	0	-0,11	0,05	-0,14
	0	-0,001	0,19	-0,03
	0,19	0,56	0,76	0,6
maïs (photo)	0,2	0,097	0,17	0,096
	0,83	0,72	0,79	0,68
	1,5	0,92	1,4	0,91

Tab. A.33.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Alpha-Shape.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	0.78	0.51	-0.10	-0.23
	0.91	0.67	-0.05	-0.16
	1.12	0.88	0.08	-0.06
Chêne	0.679	0.40	-0.14	-0.23
	0.71	0.57	-0.11	-0.18
	0.79	0.65	-0.05	-0.11
Bouleau	0.49	0.25	-0.13	-0.21
	0.53	0.33	-0.11	-0.19
	0.66	0.58	-0.012	-0.12
Maïs (LiDAR)	0.36	0.19	-0.36	-0.44
	0.51	0.24	-0.2	-0.30
	0.87	0.58	-0.1	-0.22
Maïs (photo)	-0.24	-0.37	-0.23	-0.37
	-0.14	-0.3	-0.16	-0.32
	0.014	-0.19	0.04	-0.089

Tab. A.34.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction BPA.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	1.6	1.16	-0.018	-0.18
	2.0	1.5	0.08	-0.11
	2.3	1.7	0.18	-0.06
Chêne	1.4	1.0	-0.01	-0.22
	1.7	1.2	-0.02	-0.11
	2.0	1.5	0.02	-0.06
Bouleau	2	1.5	0.02	-0.13
	2.1	1.55	0.1	-0.09
	2.2	1.63	0.21	-0.06
maïs (LiDAR)	0.88	-0.51	-0.25	-0.37
	1.0	0.7	-0.05	-0.17
	1.4	1.1	0.04	-0.13
maïs (photo)	-0.04	-0.3	-0.14	-0.34
	0.08	-0.19	-0.06	-0.25
	0.18	-0.11	0.03	-0.18

Tab. A.35.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de Reconstruction incrémentale.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	0.1	-0.09	0.03	-0.15
	0.2	0.67	0.11	-0.06
	0.34	0.88	0.2	-0.01
Chêne	-0.07	-0.06	-0.01	-0.09
	0.09	0.02	0.05	-0.006
	0.14	0.1	0.12	0.03
Bouleau	0.1	-0.03	0.033	-0.09
	0.21	0.05	0.039	-0.07
	0.28	0.07	0.18	0.03
maïs (LiDAR)	-1	-0.7	-1	-0.38
	-0.5	-0.18	-1	-0.20
	-0.05	-0.13	-0.4	-0.07
maïs (photo)	-0.07	-0.2	-1	-1
	0.16	-0.1	0.21	-1
	0.64	0.39	0.53	-0.081

Tab. A.36.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction B-spline.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	-0.004	-0.07	-0.012	-0.04
	0.15	0.09	0.15	0.05
	0.24	0.18	0.25	0.18
Chêne	-0.59	-0.03	-0.004	-0.04
	-0.004	0.02	0.10	-0.018
	0.05	0.08	0.21	0.125
Bouleau	0.06	-0.07	-0.06	-0.07
	0.15	0.04	0.15	-0.03
	0.25	0.06	0.27	0.06
Maïs (LiDAR)	-0.13	-0.23	-0.15	-0.241
	.0.1	-0.09	0.08	-0.11
	1	1.1	1.0	1.1
Maïs (photo)	0.56	0.09	0.34	0.10
	1.54	1.2	1.6	1.2
	2.76	1.8	2.5	2.4

Tab. A.37.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Modèle de feuille de Bézier.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	-0.05	-0.019	-0.07	-0.19
	0.02	-0.08	0.09	-0.09
	0.12	0.23	0.11	0.02
Chêne	-0.06	-0.14	-0.08	-0.15
	-0.004	-0.1	-0.05	-0.09
	0.05	0.001	0.03	-0.005
Bouleau	-0.05	-0.14	-0.06	-0.14
	-0.03	-0.1	-0.04	-0.12
	0.1	-0.02	0.08	-0.03
maïs (LiDAR)	-0.38	-0.51	-0.39	-0.51
	-0.320	-0.37	-0.33	-0.38
	-0.20	-0.32	-0.24	-0.34
maïs (photo)	-0.25	-0.45	-0.19	-0.45
	-0.16	-0.25	-0.17	-0.26
	-0.09	-0.21	-0.12	-0.22

Tab. A.38.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Bézier élagué.

Filtre	Aucun filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Châtaigner	-0.005	-0.07	-0.011	-0.04
	0.15	0.09	0.15	0.05
	0.24	0.18	0.25	0.18
Chêne	-0.006	-0.03	-0.004	-0.04
	0.12	0.02	0.1	0.018
	0.22	0.08	0.21	0.12
Bouleau	0.06	-0.07	0.06	-0.07
	0.15	0.04	0.15	0.03
	0.25	0.06	0.27	0.06
maïs (LiDAR)	-0.13	-0.23	-0.15	-0.24
	0.1	-0.09	0.08	-0.11
	1	1.1	1.02	1.09
maïs (photo)	0.56	0.09	0.34	0.10
	1.54	1.17	1.6	1.18
	2.76	1.8	2.5	2.4

Tab. A.39.: Premier quartile, médiane et troisième quartile de ERM de chaque jeu de données pour la méthode de reconstruction Poisson échanté.

Filtre	Aucune filtre	SOR	MLS	SOR+MLS
Médiane MRE	0.65	0.38	0.19	0.01

Tab. A.40.: Moyenne de la médiane de ERM par filtrage sur l'ensemble des jeux de données.

Acquisition et reconstruction 3D de cultures pour l'estimation de surfaces de feuilles individuelles

Résumé

En agriculture, il est important de pouvoir caractériser l'état, le fonctionnement et la santé des cultures. Le phénotypage est l'étude de ces caractéristiques et l'une des mesures les plus importantes est la surface foliaire car elle donne beaucoup d'indication sur la santé et le développement de la plante. L'utilisation de nouveaux capteurs permet d'envisager des mesures répétables et non destructrices contrairement aux méthodes actuelles.

Le travail de cette thèse est dans un premier temps de générer un nuage de points acquis dans des conditions proches de celles en champs, et dans un second temps, obtenir des mesures architecturales sur les différents organes des plantes. D'abord je présente une méthode de création de données synthétique puis des acquisitions sur un champ de maïs sous serre avec des mesures de références. Ensuite la méthodologie d'étude est détaillée et les résultats de reconstruction de surface de feuille et de mesures présentés.

Mots clés :

Numérisation, mesure surface foliaire, nuage de points 3D, reconstruction de surface.

Résumé en anglais

Information on crops health, state and development are valuable for agriculture. Phenotyping is the study of these characteristics and one of the major is leaf surface measure as it gives numerous indication on the plant health and development. Using new sensors, it is now possible to get repeatable and non-destructive measures contrary to actual methods.

First in this thesis, I present our point clouds data obtained in conditions close to the open-fields. Second, architectural measures on different organs of the plants are then obtained. Then a method to create synthetic point clouds is developed and acquisition on a maize crop in a greenhouse with reference measures are produced. The study methodology is detailed and results on surface reconstruction from points clouds are explained.

Keywords :

Digitization, leaf surface measures, 3D point clouds, surface reconstruction