

Suivi de la croissance de plantes par vision 3D

William Gélard^{1,2,3}

Ariane Herbulot^{1,2}

Michel Devy¹

Pierre Casadebaig³

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, F-31400 Toulouse, France

² Université de Toulouse, UPS, F-31400 Toulouse, France

³ AGIR, Université de Toulouse, INRA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Email : {wgelard, herbulot, devy}@laas.fr, pcasadebaig@inra.fr

Résumé

Cet article présente une approche de vision 3D permettant d'effectuer le suivi de la croissance de plantes et traite en particulier du suivi des feuilles de tournesol. Notre objectif est de calculer l'expansion foliaire sous deux conditions : plantes privées d'eau (état de stress hydrique) et plantes correctement irriguées (état de contrôle). Ces données seront ensuite exploitées par des biologistes afin d'étudier la résistance à la sécheresse de différentes variétés de tournesol. Notre méthode de suivi des feuilles par vision 3D a été évaluée sur 132 nuages de points acquis via des logiciels classiques de structure-from-motion et de stéréo multi-vues. Ces acquisitions ont été réalisées sur 12 plantes de tournesol (6 en état de stress hydrique et 6 en état de contrôle) sur une période d'un mois (11 mesures effectuées par plante). Cette méthode s'est révélée efficace sous les deux conditions (plantes irriguées et privées d'eau) afin d'effectuer le suivi de croissance d'une plante, ainsi que détecter l'apparition et la disparition de feuilles.

Mots Clef

Vision 3D, suivi de la croissances de plantes, labellisation, phénotypage 3D, tournesol.

Abstract

This article presents a 3D approach in plant growth monitoring and deals with the tracking of leaves of sunflower plants. Our aim is to compute time-series of individual leaf area, under water stress and control condition. These data will then be used by biologists to study the drought resistance of various sunflower cultivars. Our method to follow the leaves in 3D has been evaluated on a set of 132 point clouds obtained via classical structure-from-motion techniques and multi-view stereo software. These 3D acquisitions have been performed on 12 sunflower plants (6 water-stressed, 6 well-watered) during a period of one month (11 measurement date per sunflower plant). The method gives promising results for both conditions (water-stressed and well-watered), for different species and is able to follow the growth of the plants, as well as to detect new leaf emergence and leaf decay.

Keywords

3D vision, plant monitoring, labelling, 3D plant phenotyping, Sunflower plants.

1 Introduction

Durant la dernière décennie, les efforts déployés pour répondre à l'augmentation grandissante de la demande alimentaire ont conduit au développement de méthodes de génotypage permettant aux biologistes d'acquérir de meilleures connaissances sur les bases génétiques des plantes. En vue de s'adapter au changement climatique et de développer une agriculture durable, les recherches se sont orientées vers une meilleure connaissance des relations liant les gènes (ADN) aux phénotypes (caractéristiques visuelles) dans un milieu donné afin d'accélérer et d'améliorer la sélection des plantes [2, 4]. Actuellement, tandis que les méthodes de génotypage évoluent rapidement, les principales méthodes de phénotypage sont, quant à elles, toujours manuelles, invasives et parfois destructives (l'acquisition des mesures requiert la destruction des plantes). Dans un effort d'amélioration et de modernisation de ces méthodes de phénotypage, les récentes études tendent vers le développement de méthodes automatiques, non invasives et non destructives, via l'utilisation de capteurs visuels.

Animé par l'enjeu de la lutte contre le réchauffement climatique et en vue d'étudier l'impact de la sécheresse sur les cultures de tournesol, l'Institut National de la Recherche Agronomique travaille actuellement sur un projet de recherche portant sur l'adaptation des tournesols à la sécheresse. Une plateforme semi-isolée, appelée HELIAPHEN (voir Figure 1), a été mise au point à Toulouse, afin de cultiver et surveiller jusqu'à 1300 pots de tournesol, ainsi que de contrôler leurs états de stress hydrique en fonction des demandes des biologistes. Les récentes études ont mis en avant l'utilisation de données visuelles 3D afin d'extraire automatiquement les caractéristiques visuelles des plantes [10, 12, 16]. De plus, ces études ont également montré que l'usage de méthodes classiques de structure-from-motion est bien adapté à la reconstruction



FIGURE 1 – Plateforme HELIAPHEN

3D des plantes à partir d’images acquises par des capteurs bas-coût tels que des appareils photos numériques et peut être utilisé pour réaliser du phénotypage 3D [10, 16]. Dans [7, 8, 9], nous avons abordé la reconstruction et la segmentation 3D en vue (1) d’obtenir un modèle 3D d’une plante sous forme d’un nuage de points 3D construit à partir de photos et (2) d’extraire la tige, de segmenter, labelliser et calculer la surface des feuilles dans ces nuages de points 3D.

Nous traitons ici du problème du suivi temporel d’une plante au cours de sa croissance, le suivi d’un objet vivant tel qu’une plante s’avère être un challenge. En effet, une plante pousse de manière imprédictible et aléatoire en fonction des conditions climatiques (ensoleillement, température, irrigation, etc.), ainsi que de la qualité des sols. Lors de la croissance, les feuilles bougent, grandissent et peuvent en cacher certaines, d’autres peuvent disparaître (celles en train de mourir) ou apparaître (celles en train de pousser) ce qui complexifie le problème. Le suivi des plantes au cours de leur croissance est aujourd’hui encore, un des problèmes majeurs dans le phénotypage. Nous proposons de le résoudre en utilisant des méthodes de traitement d’images et de vision 3D. Pour relever ce challenge, nous disposons de plantes cultivées en pot individuel dans la plateforme semi-isolée de l’INRA à Toulouse. Comme présenté dans [8], nous isolons une plante en pot et prenons une centaine d’images autour de chaque plante sous des conditions d’illumination et de vent contrôlées. On utilise ensuite des logiciels classiques de structure-from-motion et stéréo multi-vues tels que OpenMVG [13] et PMVS/CMVS [5, 6] afin d’obtenir des nuages de points 3D des plantes. Après avoir filtré ces nuages de points pour ne conserver que la plante (on retire l’arrière plan et le pot), nous appliquons un algorithme d’extraction de tige permettant de faciliter la segmentation des feuilles à partir de plusieurs fonctions : clustering sur les coordonnées euclidiennes, croissance de régions, etc [9].

Le point de départ de la méthode décrite dans ce papier est donc un nuage de points 3D d’une plante de tournesol dont la tige et les feuilles ont été préalablement seg-

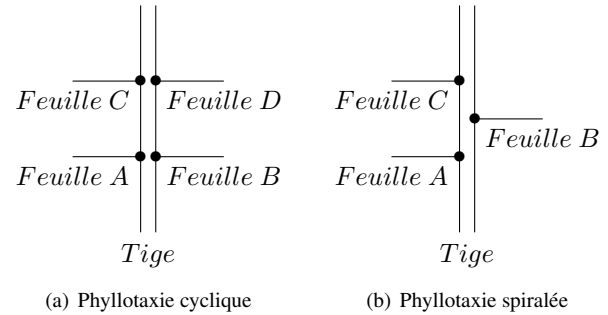


FIGURE 2 – Différence entre phyllotaxie cyclique and spiralee

mentées. Nous nous intéressons au suivi des feuilles pendant la croissance des plantes et introduisons une méthode de labellisation nous permettant d’effectuer ce suivi 3D. La section 2 présente notre méthode de suivi des feuilles au cours de la croissance d’une plante. La section 3 montre les résultats obtenus sur un jeu de 12 tournesols suivis sur une période d’un mois. La section 4 tire les conclusions sur l’utilisation de cette méthode et présente également des perspectives pour les travaux futurs.

2 Méthode

Comme notre principal objectif est de suivre l’expansion foliaire des plantes de tournesol au cours de leurs croissances afin d’évaluer leur capacité de photosynthèse, nous nous sommes orientés vers le suivi d’objet 3D, consistant ici à suivre chaque feuille individuellement. Pour atteindre cet objectif, nous avons développé une méthode avec (1), une étape de labellisation initiale permettant d’affecter aux feuilles un label unique en s’appuyant sur la phyllotaxie (terme provenant du grec *taxis* qui signifie arrangement et *phullon* qui signifie feuille et permettant de décrire comment les feuilles apparaissent et s’organisent le long d’une tige [1]) et (2), une étape de propagation des labels dans une séquence de modèles construits pendant la croissance d’une plante, permettant de s’assurer que les labels n’ont pas changé entre les différentes acquisitions malgré les éventuelles disparitions et apparitions de feuilles, et ainsi être en mesure de suivre les feuilles au cours du temps.

Nous allons présenter notre méthode de labellisation pour suivre les feuilles au cours de la croissance d’une plante, ainsi qu’introduire la phyllotaxie du tournesol. Dans un premier temps, nous détaillerons l’étape de labellisation initiale et ensuite l’étape de propagation des labels.

2.1 Labellisation des feuilles

Phyllotaxie. La principale fonction attribuée à la phyllotaxie est d’accroître la capacité d’une plante à intercepter la lumière pour effectuer la photosynthèse, en minimisant les ombres portées entre les différentes feuilles. L’arrangement des feuilles est régulier et est le résultat de contrôle biochimique pendant l’initiation et l’expansion des feuilles. Un

nœud désigne l'endroit où apparaissent les feuilles le long d'une tige : l'organisation des nœuds respecte des règles bien précises et propres à chaque variété de plantes.

Dans la nature on retrouve essentiellement deux types de phyllotaxie : cyclique ou spiralée. S'il y a deux feuilles ou plus par nœud, l'arrangement est dit **cyclique**. Dans ce cas les feuilles d'un même nœud forment une spire avec un angle constant entre chaque feuille. S'il y a deux feuilles par nœud, la phyllotaxie cyclique est dite opposée et l'angle entre les feuilles est de 180° , les paires de feuilles peuvent être alignées les unes au-dessus des autres (comme sur la Figure 2(a)) ou être orientées de 90° . S'il y a plus de deux feuilles par nœud, la phyllotaxie cyclique est dite verticillée. Par exemple, s'il y a trois feuilles par nœud, l'angle entre les feuilles sera de 120° , s'il y en a quatre, l'angle sera de 90° et ainsi de suite. En revanche, s'il n'y a qu'une seule feuille par nœud, l'arrangement est dit **spiralé** et les feuilles s'étalent autour de la tige en spirale. L'angle formé entre deux feuilles successives est appelé **angle de divergence**, il représente comment une nouvelle feuille sur la plante se positionne par rapport à la précédente. Cet angle de divergence est toujours constant mais diffère selon les variétés [3]. Il peut se calculer en comptant le nombre de feuilles présentes dans la spirale génératrice, c'est-à-dire, le nombre de feuilles nécessaires pour que deux feuilles soient alignées l'une au-dessus de l'autre, ainsi que le nombre de tours effectués autour de la tige avant que ces feuilles ne soient alignées. Ce qui donne la formule suivante :

$$\alpha = \frac{\text{Nombre de tours}}{\text{Nombre de feuilles}} \cdot 360^\circ \quad (1)$$

Par exemple, dans la famille des *Gramineae*, la feuille du deuxième nœud est à l'opposé de la feuille du premier nœud, la troisième feuille est au-dessus de la première, la quatrième au-dessus de la deuxième et ainsi de suite (comme sur la Figure 2(b)). Clairement, un seul tour est réalisé avant qu'une feuille se trouve au-dessus d'une autre, et seulement deux feuilles composent cette spirale, l'angle de divergence ici est donc

$$\alpha = 1/2 \cdot 360^\circ = 180^\circ. \quad (2)$$

C'est d'autant plus intéressant de noter que dans les types communs de phyllotaxie, les fractions de divergence angulaire suivent la séquence de Fibonacci : $1/2, 1/3, 2/5, 3/8, 5/13, \dots$ et sont une approximation du nombre d'or $\phi = 137.5^\circ$ comme expliqué dans [11].

Concernant les tournesols, Rey *et al.* [15] ont identifié deux types de phyllotaxie dépendant du stade de croissance. Les premières feuilles présentent une phyllotaxie cyclique (dite *opposite decussate*), c'est-à-dire que ces feuilles apparaissent en paire avec un angle de 90° entre chaque paire. Ensuite (en général à partir de la septième feuille), les plantes de tournesols présentent une phyllotaxie spiralée avec un angle de divergence $\alpha = 137.5^\circ$. Les premières paires de feuilles ont tendance à disparaître très rapidement afin de laisser place aux feuilles s'arrangeant en spirale.

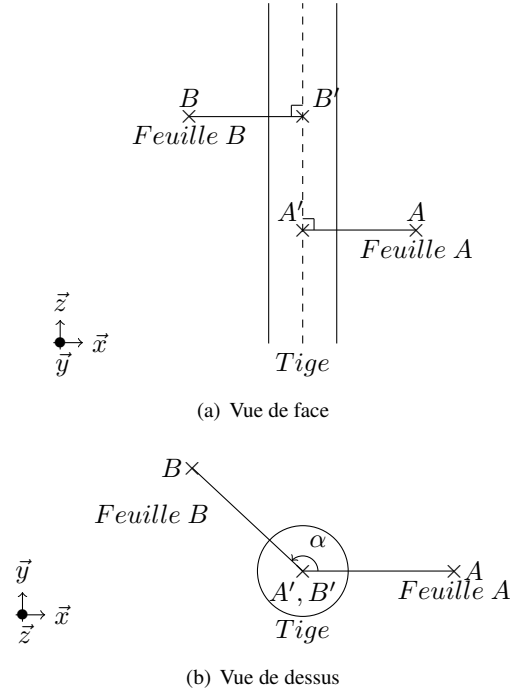


FIGURE 3 – Description du calcul d'un angle de divergence

Algorithme 1 : Labellisation initiale des feuilles

Entrée : Feuilles

Sortie : Feuilles labellisées

```

1 // Trier les feuilles en fonction de leur hauteur d'insertion
2 trier (feuilles) ;
3 pour chaque (feuille dans feuilles) faire
4     feuilleBis ← feuille.suivante;
5     feuilleTer ← feuilleBis.suivante;
6     si (feuilleBis.hauteur ≈ feuilleTer.hauteur) alors
7         α1 = angleDivergent(feuille, feuilleBis);
8         α2 = angleDivergent(feuille, feuilleTer);
9         si (α2 - 137.5° < α1 - 137.5°) alors
10            | echanger (feuilleBis, feuilleTer);
11        fin
12    fin
13 fin

```

Labellisation initiale des feuilles. Sachant que la phyllotaxie d'une plante de tournesol est spiralée, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule feuille par nœud, la première idée a été d'ordonner les feuilles en fonction de leur hauteur d'insertion sur la tige et de leur affecter un label associé à leur ordre d'apparition sur la tige. Ainsi la feuille la plus basse recevra le label 0, la suivante le label 1 et ainsi de suite. De plus, sachant que l'angle de divergence théorique vaut $\alpha = 137.5^\circ$, nous l'avons utilisé afin de détecter et corriger d'éventuelles erreurs de labellisation. Les angles de divergence sont toujours calculés dans le sens anti-horaire comme le montre la Figure 3 et en appliquant la formule

suivante :

$$\alpha = \begin{cases} \arccos(\vec{L}_A \cdot \vec{L}_B) & \text{si } \det(\vec{L}_A, \vec{L}_B) \geq 0 \\ 360 - \arccos(\vec{L}_A \cdot \vec{L}_B) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

avec \vec{L}_A & \vec{L}_B représentant *Feuille A* & *Feuille B* et le déterminant $\det(\vec{L}_A, \vec{L}_B)$ permet de déterminer le sens de l'angle.

Dans [8], nous avons montré que cet angle de divergence peut ne pas respecter le modèle lorsque deux feuilles ont une hauteur d'insertion proche (aussi appelé distance inter-nœud). Dans ce cas, il suffit d'inverser le label des deux feuilles en question et de recalculer l'angle de divergence de manière à vérifier que celui-ci respecte à nouveau le modèle. Toutes ces observations nous ont conduit au développement de l'Algorithme 1 qui est utilisé comme étape initiale de labellisation des feuilles pour chaque plante de tournesol. L'étape suivante consiste à vérifier ces labels en propageant ceux obtenus à l'acquisition précédente, et de s'assurer que les feuilles ont conservé leurs labels entre deux acquisitions.

2.2 Propagation des labels

En vue de pouvoir mettre en œuvre notre méthode, nous avons effectué des acquisitions 3D tous les 2 à 5 jours et appliqué l'Algorithme 1 de labellisation des feuilles sur chaque nuage de points. De plus, durant les acquisitions, nous avons pris le soin de toujours placer les plantes dans la même orientation entre les différentes dates d'acquisition, ceci afin de calculer l'angle de divergence entre la première feuille et l'axe X du repère 3D, permettant de définir l'orientation de la plante (repère 3D placé au pied de la tige avec les axes X et Y dans le plan du sol et l'axe Z orienté le long de la tige). Nous avons appelé cet angle, l'angle de divergence de référence : α_{ref} , comme illustré sur la Figure 4. Le problème majeur réside au niveau des hauteurs d'insertion des feuilles et plus précisément de la distance inter-nœud. Du fait que les plantes de tournesol sont des végétaux dont la croissance dépend de l'environnement tel que les conditions climatiques (ensoleillement, température, irrigation, etc.), cette croissance est aléatoire (la plateforme dans laquelle les plantes sont cultivées permet de contrôler uniquement le niveau d'irrigation), la distance inter-nœud varie de manière aléatoire et dans certains cas, deux feuilles proches à un instant peuvent se retrouver éloignées quelques jours plus tard, entraînant ainsi une potentielle confusion au niveau de notre étape de labellisation initiale. De plus, les premières feuilles peuvent disparaître et de nouvelles apparaître à tout moment, ajoutant ainsi de la complexité au suivi des feuilles.

Dans le but de détecter et de pallier ces événements, nous avons développé l'Algorithme 2 permettant de retrouver le label de la première feuille à un instant donné, en comparant les angles de divergence obtenus à l'instant précédent. Cette comparaison s'effectue de la manière

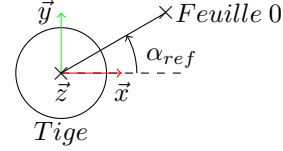


FIGURE 4 – Illustration de l'angle de divergence de référence α_{ref}

Algorithme 2 : Propagation des labels

Entrée : Angle de divergence précédent

Sortie : Premier label

```

1 somme ← 0;
2 pour chaque (angle dans angleDivergentPrécédent) faire
3   somme ← somme + angle;
4   // Détecter une rotation complète (modulo 2π)
5   si (αref - somme < -tolérance) alors
6     | αref ← αref + 360;
7   fin
8   // Comparaison des angles
9   si (|somme - αref| < tolérance) alors
10    | Correspondance trouvé;
11  fin
12 fin

```

suivante : on commence par comparer l'angle de divergence de référence d'un instant donné $\alpha_{ref(T)}$, avec celui de l'instant précédent, $\alpha_{ref(T-1)}$. Si les deux angles correspondent, cela signifie qu'aucune feuille n'a disparu et que la première feuille présente à cet instant est la même qu'à l'instant précédent. En revanche, si ces angles sont différents, nous sommes l'angle de divergence de référence précédent $\alpha_{ref(T-1)}$ avec l'angle de divergence entre la première et la deuxième feuille de l'instant précédent $\alpha_{(0-1)(T-1)}$ pour donner $\alpha_{ref2(T-1)}$. On compare ainsi ce nouvel angle $\alpha_{ref2(T-1)}$ avec $\alpha_{ref(T)}$. Si les angles correspondent, cela signifie que la première feuille présente à l'instant précédent ($T - 1$) a disparu et donc que le label de la première feuille présente à l'instant T , n'est plus 0 mais 1. On recommence ainsi de suite, jusqu'à trouver une correspondance, tout en veillant, à détecter des rotations complètes (modulo 2π). Une fois cette étape terminée, on compare tous les angles de divergence d'un instant donné avec ceux de l'instant précédent de façon à s'assurer qu'aucun label n'a été interverti et appliquons une correction le cas échéant. La détection de nouvelles feuilles se traduit par l'apparition de nouveaux labels non présents à l'instant précédent. Ces comparaisons sont flexibles à une certaine tolérance en raison de l'incertitude et du bruit liés à la reconstruction et à la segmentation 3D. Un exemple s'appuyant sur la Table 2 est donné en Section 3.3.

3 Résultats

Afin d'évaluer la répétabilité et la robustesse de notre méthode, nous avons effectué un test sur une série de 12 plantes de tournesol de 2 variétés différentes et sous 2 conditions d'irrigation (6 plantes en état de stress hydrique et 6 plantes correctement irriguées). Le test a été réalisé à l'automne 2017, entre début Septembre et mi-Novembre avec des acquisitions 3D réalisées tous les 2 à 5 jours, ce qui donne 11 acquisitions par plante pour un total de 132 nuages de points. Un exemple de suivi de croissance d'une plante de tournesol est donné Figure 5 où l'on peut constater que les feuilles ont conservé leurs labels tout au long de la période de suivi¹.

3.1 Segmentation

Comme le point de départ de notre méthode de labellisation est un nuage de points 3D d'une plante de tournesol avec les feuilles déjà segmentées, nous présentons les résultats associés à la segmentation sur les 132 nuages de points. Dans la plupart des cas, les plantes ont correctement été segmentées, seulement 4 nuages de points sur les 132 ne l'ont pas été, ce qui représente un taux d'échec de 3%. Il est intéressant de noter que ces échecs interviennent uniquement sur des plantes en état de stress avancé. Pour chaque plante correctement segmentée, 70% des feuilles ont bien été retrouvées et pour les 30% manquantes, il s'agit des petites feuilles présentes sous le couvert (celle qui sont en train d'apparaître), cependant comme montré dans [8], ces feuilles ne contribuent pas suffisamment à la capacité de photosynthèse des plantes et ne sont donc pas prises en compte par les biologistes pour leurs études de phénotypage.

3.2 Labellisation initiale des feuilles

Concernant cette étape de labellisation initiale, due à la phyllotaxie particulière d'une plante de tournesol (phyllotaxie opposée suivi d'une phyllotaxie spiralee), il est difficile de déterminer le label de la première feuille. En effet, si lorsque nous effectuons une acquisition 3D, les premières feuilles (celles apparaissant en paires) sont toujours présentes sur la tige, affecter des labels en fonction des distances inter-nœud s'avère plus délicat. De manière à pallier ce problème, nous exécutons deux fois d'affilée l'Algorithme 1 en prenant soin d'inverser le label des deux premières feuilles entre les deux exécutions, comme illustré par la Figure 6. On obtient ainsi deux configurations possibles, et on sélectionne celle qui suit le plus fidèlement possible la phyllotaxie d'un tournesol. La sélection entre les configurations s'effectue à partir de règles simples. On fixe trois angles modèles (90° , 137.5° et 180°), et on recherche l'angle modèle le plus proche de l'angle réel. On définit ensuite un ensemble de règles décrivant la phyllo-

1. En complément de cette article, ce papier est fourni avec deux vidéos : <https://homepages.laas.fr/wgelard/helia3d/rfiap.html>, illustrant le suivi de croissance sur une plante en état de stress hydrique ainsi que sur une plante correctement irriguée.

Première configuration			Seconde configuration		
Labels	Angle	Modèle	Labels	Angle	Modèle
(0-1)	183.3°	180°	(0-1)	176.65°	180°
(1-2)	91.5°	90°	(1-2)	88.3°	90°
(2-3)	173.4°	180°	(2-3)	186.5°	180°
(3-4)	111.7°	90°	(3-4)	77.7°	90°
(4-5)	152.6°	137.5°	(4-5)	207.3°	180°
(5-6)	125.8°	137.5°	(5-6)	278.4°	180°
...

TABLE 1 – Exemple de labellisation initiale des feuilles au Jour 1

taxie du tournesol, par exemple, deux paires de feuilles opposées peuvent se succéder le long de la tige avec un angle de 90° entre les paires mais ne peuvent pas être alignées l'une au dessus de l'autre. Un système de vote est ensuite utilisé pour sélectionner la configuration violant le moins de contraintes et respectant un maximum de règles. Un exemple illustrant cette sélection est donné dans la Table 1 où il est possible de voir le résultat de la labellisation initiale d'une plante au Jour 1 (correspondant à la première date d'acquisition). Dans ce cas-ci, la première configuration respecte la phyllotaxie et ne viole aucune contrainte : les premières feuilles sont opposées et apparaissent en paire avec un angle de 90° entre les paires, tandis que les feuilles suivantes ont bien un angle proche de 137.5° . Si on s'intéresse à la deuxième configuration, on peut constater que les premières feuilles respectent également la phyllotaxie du tournesol, cependant, les feuilles suivantes continuent d'apparaître en paires mais alignées les unes au dessus des autres, ce qui entraîne une violation de contrainte et ne satisfait plus le modèle. La première configuration est donc sélectionnée. Après une vérification visuelle, nous avons constaté que cette méthode a été capable de labelliser toutes les feuilles présentes dans les nuages de points, pour les deux variétés et sous deux conditions d'étude (plantes stressées et correctement irriguées).

3.3 Propagation des labels

L'objectif de l'étape de propagation des labels est double : (1) propager les labels obtenus à l'instant précédent afin de trouver le label de la première feuille, ainsi que détecter d'éventuelles disparitions de feuilles et (2), vérifier que tous les angles de divergence à un instant donné correspondent avec ceux de l'instant précédent pour s'assurer qu'aucun label n'a été interverti.

Afin d'illustrer le problème de disparition des feuilles et la solution apportée, nous présentons dans la Table 2 un résultat obtenu sur une plante dont deux de ses feuilles disparaissent 17 jours après la première date d'acquisition. Dans cette table, on donne les angles de divergence obtenus à l'acquisition précédente (celle du Jour 15). Pour le Jour 17, l'angle de divergence de référence de la première

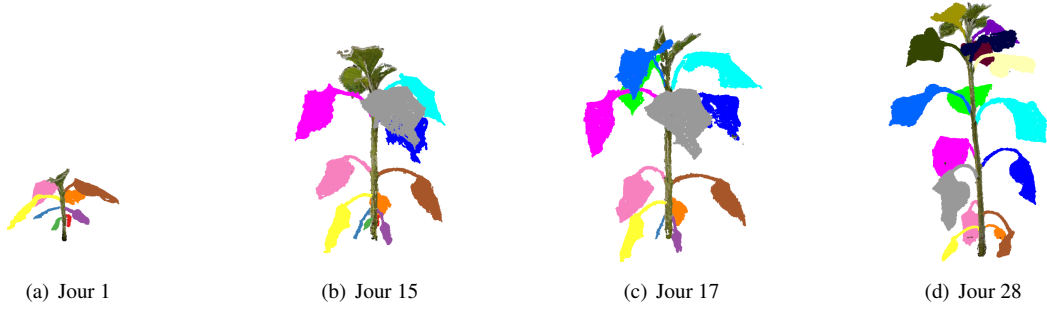


FIGURE 5 – Suivi de la croissance d'une plante

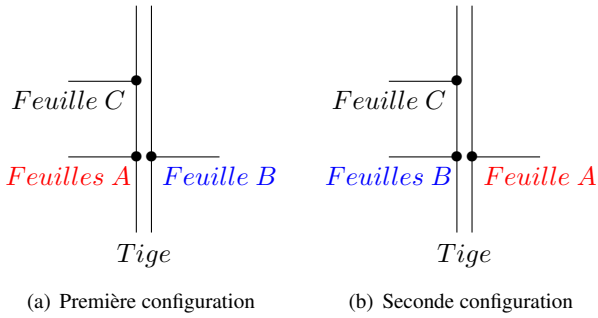


FIGURE 6 – Exemple de confusion possible

feuille avec l'axe X du repère 3D est $\alpha_{ref(17)} = 51.3^\circ$. Il est possible de retrouver le label de cette feuille en comparant $\alpha_{ref(17)}$, avec celui de l'acquisition précédente $\alpha_{ref(15)}$, ainsi que tous les angles de divergence de cette date. Dans ce cas-ci :

$$\alpha_{ref(17)} \simeq \alpha_{ref(15)} + \alpha_{(0-1)(15)} + \alpha_{(1-2)(15)} \quad (4)$$

$$= 134.6^\circ + 195.7^\circ + 83.2^\circ = 413.5^\circ \quad (5)$$

$$= 53.5^\circ (2\pi). \quad (6)$$

On constate que deux feuilles présentes au *Jour 15* ont disparu et ne sont plus présentes au *Jour 17*. On illustre également ce résultat au travers des Figures 5(b) et 5(c) où l'on peut s'apercevoir qu'effectivement les deux petites feuilles (en rouge et en vert) présentes au pied de la tige au *Jour 15* ne le sont plus au *Jour 17*.

Notre méthode a fonctionné sur les 132 nuages de points mais impose que les pots de tournesol conservent toujours la même orientation entre les acquisitions 3D. Sur les 12 tournesols, les feuilles n'ont pas disparu et apparu aux mêmes dates en fonction de la variété mais cette méthode a toujours été en mesure de le détecter et suivre les feuilles au cours de leurs croissances.

3.4 Suivi de l'expansion foliaire

Après l'affectation de labels uniques et invariants aux feuilles durant la croissance d'une plante, l'effort effectué dans l'automatisation du phénotypage s'est poursuivi vers

	Jour 15	Jour 17	
Labels	Angle	Angle	Observation
α_{ref}	134.6°	51.3°	-
$\alpha_{(0-1)}$	195.7°	-	Disparition
$\alpha_{(1-2)}$	83.2°	-	Disparition
$\alpha_{(2-3)}$	158.6°	164.4°	✓
$\alpha_{(3-4)}$	111.7°	110.2°	✓
...
$\alpha_{(11-12)}$	-	124.5°	Nouvelle feuille
$\alpha_{(12-13)}$	-	149.9°	Nouvelle feuille

TABLE 2 – Exemple de propagation de labels

le suivi automatique de l'expansion foliaire, c'est-à-dire, être capable de calculer l'aire de chaque feuille et de suivre leur évolution au cours du temps. Ce suivi d'expansion foliaire permet aux biologistes de déterminer le profil d'une variété en fonction de son niveau de stress hydrique ainsi que de déterminer leur niveau de résistance à la sécheresse.

Dans [7, 8], nous avons montré que l'utilisation des NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) [14] pour approximer une surface d'un nuage de points 3D représentant une feuille de tournesol permettait de calculer leur aire. Les premiers résultats obtenus avaient été comparés avec une méthode manuelle et destructive de phénotypage, réalisée à l'aide d'un planimètre Li-Cor (outil classique de phénotypage) et s'étaient révélés satisfaisants (différence inférieure à 10%). De nouveaux tests effectués sur 10 plantes nous ont permis d'abaisser cette différence à moins de 3%. Nous avons souhaité exploiter ces résultats pour réaliser un suivi de l'expansion foliaire sur la séquence d'acquisitions 3D sur une période d'un mois, grâce aux labels propagés comme indiqué dans les sections précédentes.

Pour obtenir la vérité-terrain lors de cette expérimentation sur le suivi de la croissance des plantes, on ne peut pas exploiter de méthode destructive, aussi les biologistes ont privilégié des mesures manuelles non destructives afin d'obte-

nir les profils d'expansion foliaire. Ces mesures manuelles, réalisées en parallèle des acquisitions 3D (une à la première date des acquisitions 3D et une à la dernière date), ont consisté à mesurer la largeur et la hauteur maximale d'une feuille sur deux puis d'estimer leur surface avec la formule suivante :

$$Surface = l \times L \times 0.7. \quad (7)$$

Concernant les feuilles non mesurées, il est également possible d'estimer leur surface en calculant la moyenne entre les feuilles qui les précèdent et celles qui les suivent. Nous avons pu constater que cette méthode ne fonctionne pas pour les feuilles apparaissant en paires (ces feuilles sont similaires et ont une surface équivalente). Cette méthode d'estimation de surface à l'aide de la largeur et la hauteur maximale d'une feuille n'est pas optimale et est beaucoup moins précise que la méthode destructive utilisant un planimètre en terme de surface mesurée. En effet, la forme d'une feuille est variable et dépend de la variété d'une plante, de son stade de croissance ainsi que des conditions climatiques. Cependant, cette méthode d'estimation est exploitée par les biologistes pour obtenir une tendance d'évolution des surfaces foliaires au cours de la croissance des plantes. Elle s'avère être suffisamment robuste et efficace pour leur permettre de réaliser leurs études de phénotypage.

La reconstruction des nuages de points 3D à l'aide des NURBS permet de calculer avec précision la surface de chaque feuille et ainsi fournir aux biologistes une mesure beaucoup plus précise de l'expansion foliaire par rapport à leur méthode d'estimation. Cette méthode de phénotypage 3D a aussi l'avantage d'être automatique (pas de perte de temps pour les biologistes) et systématique (pas d'erreur dans les labels). La validation des mesures de surface 3D via les NURBS par rapport aux mesures manuelles a donc été faite par rapport à la vérité terrain donnée par le planimètre (non exploitable dans le cadre des mesures d'expansion foliaire dans le temps). Pour valider les mesures de cette expansion foliaire obtenues à partir des acquisitions 3D, nous devons évaluer les mêmes paramètres, c'est-à-dire, longueur et largeur maximale de chaque feuille et les comparer aux mesures manuelles. Comme illustré sur la Figure 7, les premières tendances d'évolution de surface foliaire sont encourageantes quant à l'utilisation de cette méthode pour déterminer les profils d'expansion foliaire. Sur cette figure présentant la dynamique d'évolution de la surface foliaire d'une variété de tournesol au cours du temps, on peut constater que les feuilles stressées stoppent leur croissance contrairement à celle correctement irriguées.

4 Conclusion

Ce papier a présenté une approche de vision 3D développée pour suivre la croissance des plantes et appliquée sur des tournesols reconstruits en 3D grâce à des logiciels classiques de structure-from-motion et stéréo multi-vues.

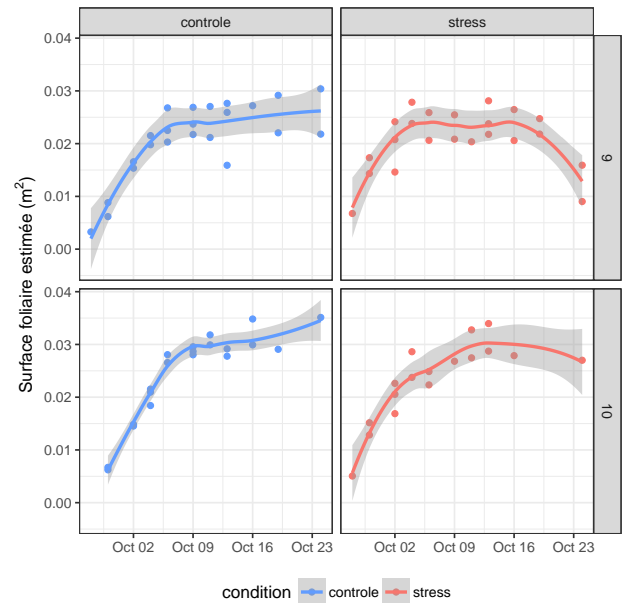


FIGURE 7 – Dynamique de la surface foliaire sous deux conditions d'irrigation : correctement irriguées (contrôle) et privées d'eau (stress). Trois plantes (d'une même variété) ont été utilisées par modalité, les courbes sont basées sur un modèle de régression polynomiale locale (loess) avec un intervalle de confiance de 95% (zone grise).

L'objectif des agronomes est de suivre la croissance de plantes en pot, et plus particulièrement de suivre leur expansion foliaire au cours du temps. Pour y parvenir, une méthode de labellisation s'appuyant sur la phyllotaxie du tournesol a été développée. Cette méthode permet de (1), suivre chaque feuille individuellement en lui affectant un label unique et invariant au cours du temps et (2), détecter l'émergence de nouvelles feuilles ainsi que la disparition de certaines durant la croissance des plantes. Cette méthode a été testée sur 12 tournesols avec 11 acquisitions effectuées sur une période de un mois et s'est révélée être performante pour suivre les feuilles sur les 132 nuages de points. Les méthodes de vision et de traitement 3D voient donc ici un domaine d'application important en permettant de renseigner les biologistes tout en préservant les plantes.

Afin d'aller plus loin dans l'automatisation du phénotypage des plantes, des études plus approfondies vont être menées sur les feuilles elles-mêmes, dans le but de pouvoir déterminer si une feuille est toujours active ou non, au sens de la photosynthèse. Pour y parvenir, nous devons caractériser l'angle de courbure du pétiole avec la tige ainsi que le repliement de la feuille sur elle-même, ou la répartition des couleurs sur sa surface, paramètres qui évoluent en fonction du stade de croissance d'une plante. Ce challenge est total puisque même au niveau agronomique, on ne dispose pas encore de suffisamment

de recul et d'informations pour faire la distinction entre des feuilles sénescents, flétries, asséchées ou mortes et pour être capable de déterminer si elles sont toujours actives ou non au sens de la photosynthèse.

Après cette première étape d'extraction de paramètres visuels (hauteur d'une plante, nombre de feuilles, surface foliaire, angle de divergences, angle de courbure, couleur des feuilles), il serait intéressant de la coupler avec des méthodes de classification supervisée classiques ou des outils d'apprentissage profond tel que les réseaux de neurones, dans l'intention de trouver des attributs optimaux permettant de différencier les feuilles actives, partiellement actives ou sénescents. Cette deuxième étape nous permettrait de déterminer jusqu'où nous pouvons automatiser le processus de phénotypage des plantes, et contribuer ainsi à répondre à l'augmentation de la demande alimentaire.

Remerciements

Les auteurs voudraient remercier Philippe Debaeke, Nicolas Langlade et Philippe Burger de l'INRA, pour leur participation dans ces travaux, à travers un projet de recherche commun portant sur le phénotypage haut-débit des tournesols ainsi que l'Agence National de la Recherche (ANR) pour le financement du projet SUNRISE.

Références

- [1] S. Boissiere, "Dynamique de la phyllotaxie," 2000. [Online]. Available : <http://www-math.sp2mi.univ-poitiers.fr/~sboissie/Recherche/Phyllotaxie.pdf>
- [2] S. Dhondt, N. Wuyts, and D. Inzé, "Cell to whole-plant phenotyping : the best is yet to come," *Trends in Plant Science*, vol. 18, no. 8, pp. 428–439, 2013.
- [3] C. Feller, C. Mazza, and F. Yerly, "Plantes, spirales et nombre : les plantes fontelles des maths ?" *Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles*, vol. 99, pp. 122–137, 2010.
- [4] F. Fiorani and U. Schurr, "Future Scenarios for Plant Phenotyping," *Annual review of plant biology*, vol. 64, pp. 267–291, 2013.
- [5] Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz, and R. Szeliski, "Towards internet-scale multi-view stereo," in *CVPR*, 2010.
- [6] Y. Furukawa and J. Ponce, "Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 8, pp. 362–1376, 2010.
- [7] W. Gélard, P. Burger, P. Casadebaig, N. Langlade, P. Debaeke, M. Devy, and A. Herbulot, "3d plant phenotyping in sunflower using architecture-based organ segmentation from 3d point clouds," in *5th International Workshop on Image Analysis Methods for the Plant Sciences*, 2016.
- [8] W. Gélard, A. Herbulot, M. Devy, and P. Burger, "Segmentation de nuages de points 3d pour le phénotypage de tournesols," in *16ème Journées Francophones des Jeunes Chercheurs en Vision par Ordinateur (ORASIS)*, 2017.
- [9] W. Gélard, A. Herbulot, M. Devy, P. Debaeke, R. F. McCormick, S. K. Truong, and J. Mullet, "Leaves segmentation in 3d point cloud," in *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. Springer International Publishing, 2017, pp. 664–674.
- [10] S. Jay, G. Rabatel, X. Hadoux, D. Moura, and N. Gorretta, "In-field crop row phenotyping from 3d modeling performed using structure from motion," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 110, pp. 70–77, 2015.
- [11] S. Kumar, "Phyllotaxy (arrangement of leaves) : Cyclic and spiral phyllotaxy." [Online]. Available : <http://www.biologydiscussion.com/leaf/phyllotaxy-arrangement-of-leaves-cyclic-and-spiral-phyllotaxy/13243>
- [12] G. Louarn, S. Carré, F. Boudon, A. Eprinchard, and D. Combes, "Characterization of whole plant leaf area properties using laser scanner point clouds," in *Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*, 2012.
- [13] P. Moulon, P. Monasse, R. Perrot, and R. Marlet, "Openmvg : Open multiple view geometry," in *Reproducible Research in Pattern Recognition*. Springer International Publishing, 2017.
- [14] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book (2Nd Ed.)*. Springer-Verlag New York, Inc., 1997.
- [15] H. Rey, J. Dauzat, K. Chenu, J.-F. Barczi, G. A. A. Dosio, and J. Lecoeur, "Using a 3-d virtual sunflower to simulate light capture at organ, plant and plot levels : Contribution of organ interception, impact of heliotropism and analysis of genotypic differences," *Ann Bot*, vol. 101, no. 8, pp. 1139–1151, 2008.
- [16] T. T. Santos and A. A. Oliveira, "Image-based 3d digitizing for plant architecture analysis and phenotyping," in *Workshop on Industry Applications (WGARI)*, 2012.