

Des systèmes d'imagerie pour l'analyse anatomique et physiologique des plantes

Yann CHÉNÉ¹, Étienne BELIN¹, Philippe LUCIDARME¹,
François CHAPEAU-BLONDEAU¹, Tristan BOUREAU², David ROUSSEAU³

¹Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (LISA), Université d'Angers,
62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France.

²IRHS, INRA, UMR 1345, Université d'Angers,
42 rue Gorges Morel, 49071 Beaucouzé, France.

³Université de Lyon, CREATIS ; CNRS UMR 5220 ; INSERM U1044 ;
Université Lyon 1 ; INSA-Lyon ; 69621 Villeurbanne, France.

yann.chene@univ-angers.fr

Resumé

Nous présentons l'utilisation d'un capteur d'imagerie RVB-Profondeur pour la mesure de caractéristiques anatomiques et physiologiques des plantes. Tout d'abord, nous présentons l'utilisation d'une plante artificielle pour analyser la précision du capteur de profondeur. Cette plante artificielle est aussi utilisée lors de la mise en place d'un algorithme de segmentation des feuilles. Ensuite, nous présentons l'utilisation d'attributs anatomiques des feuilles pour analyser la croissance et l'équilibre de la plante. Puis, nous continuons par exposer les différentes étapes nécessaires à la mise en place d'un capteur multimodalité pour faire des mesures physiologiques sur les plantes. Pour finir, nous présentons le couplage du capteur RVB-Profondeur avec un plateau tournant pour analyser le feuillage des plantes. Les acquisitions du capteur RVB-Profondeur sont synchronisées avec la rotation du plateau tournant pour analyser la valeur esthétique des plantes ornementales. Tous ces travaux montrent l'intérêt de l'instrumentation et de l'imagerie innovantes pour contribuer à l'analyse quantitative automatisée des végétaux.

Mots-clés: Imagerie, RVB-Profondeur, Thermographie, Sans fil, Plateau tournant, Phénotypage.

1 Introduction

Les sciences du végétal sollicitent actuellement de nombreuses collaborations avec les sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC). En effet, avec les avancées récentes dans le domaine de la génétique, une problématique des sciences du végétal, le phénotypage, est le recueil de caractères anatomiques et/ou physiologiques sur de grandes populations. Ces caractères peuvent être recueillis à des échelles variables, de la semence à la canopée, en passant par la plante entière. Ces caractères sont ensuite mis en corrélation avec le génome des plantes afin d'identifier les marqueurs génétiques par exemple de résistance ou d'esthétique des végétaux. Les STIC donnent accès à des outils utilisables tout au long du processus de phénotypage, de l'acquisition au stockage des données, en passant par leurs traitements. Les capteurs sans fil et les systèmes d'imagerie permettent des acquisitions en champs et en chambres de culture. Leur utilisation améliore la fiabilité et la rapidité des mesures et des traitements par rapport aux méthodes actuelles (notateurs experts). Dans certains cas, cela donne accès à de nouvelles informations non accessibles pour l'homme. La multiplication des systèmes issus des STIC pour

aider au phénotypage donne actuellement lieu à la mise en place de plateformes d'ingénierie et d'instrumentation dédiées aux problématiques des sciences du végétal. En France, les principales plateformes, dites de phénotypage, se trouvent à Montpellier, Dijon, Clermont-Ferrand et Angers. Dans cet article, nous présentons nos contributions sur l'implantation, sur la plateforme de phénotypage d'Angers, de plusieurs systèmes d'imagerie utilisant un capteur RVB-Profondeur.

2 Apport d'une plante artificielle

Lors de la mise en place d'une chaîne de traitement de l'information, des échantillons de tests sont utilisés pour valider des choix technologiques ou algorithmiques. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour vérifier la précision du capteur ou la robustesse d'un algorithme. Pour les sciences du vivant, les échantillons de tests ne sont pas toujours accessibles, par exemple lors de mesures sur l'être humain, ou disponibles, par exemple lors de mesures sur une plante. À l'image de certaines pratiques du domaine médicale, nous avons conçu une plante artificielle mono-axiale (voir la Fig. 1A). Cette plante artificielle est composée de huit plans verticaux situés à différentes positions le long d'un axe principal. L'espace en profondeur, de quelques centimètres, entre deux plans successifs est globalement équivalent à l'espace entre deux feuilles des plantes mono-axiales étudiées sur la plateforme de phénotypage d'Angers.

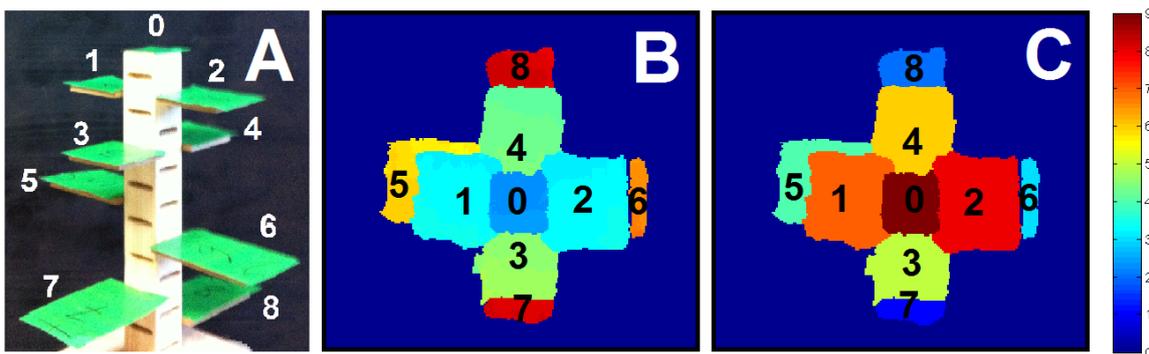


FIGURE 1 – Une plante artificielle (A) est utilisée sur la plateforme de phénotypage d'Angers pour vérifier la précision du capteur de profondeur et pour servir d'échantillon de test lors de la mise en place d'un algorithme de segmentation. La segmentation des plans de la plante artificielle (C) est faite à partir d'une image de profondeur (B) en appliquant un algorithme original que nous avons développé [1].

Nous utilisons cette plante artificielle comme échantillon de test lors de la mise en place d'une chaîne de traitement de l'information pour faire des mesures anatomiques sur les plantes mono-axiales à l'aide d'un capteur de profondeur bas-coût d'introduction récente [1]. Pour effectuer ces mesures anatomiques, nous avons choisi de placer le capteur de profondeur en vue de dessus. Tout d'abord, la plante artificielle est utilisée pour vérifier la précision du capteur de profondeur. Des images de profondeur de la plante artificielle en vue de dessus sont acquises pour différentes distances entre le capteur de profondeur et le premier plan de la plante artificielle. Les distances obtenues avec le capteur de profondeur sont comparées aux distances réelles. Ces comparaisons permettent de déterminer l'erreur moyenne absolue, moyenne des valeurs absolues des différences entre les valeurs réelles et les valeurs obtenues avec le capteur, en fonction de la distance entre le capteur de profondeur et le premier plan de la plante artificielle (plan 0 sur la Fig. 1A). Comme montré par la

Fig. 2, l'erreur moyenne absolue du capteur de profondeur suit une évolution quadratique avec la distance, comme aussi établi dans [2].

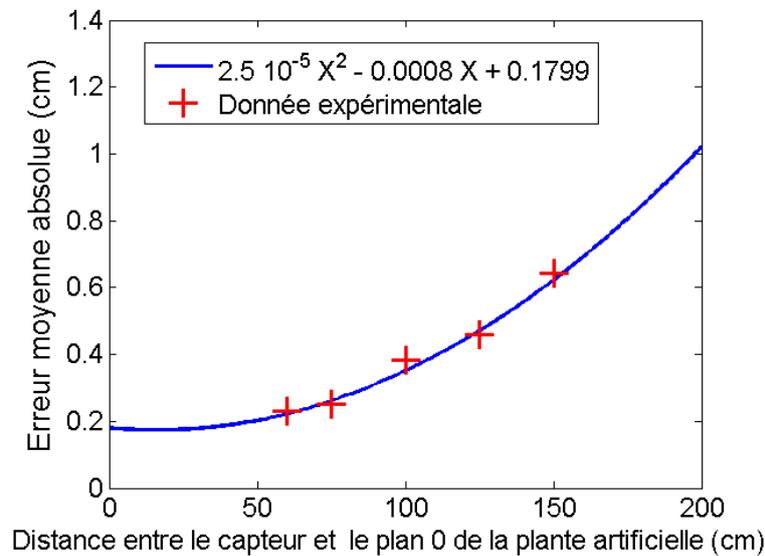


FIGURE 2 – L'erreur moyenne absolue (moyenne des valeurs absolues des différences entre les valeurs réelles et les valeurs obtenues avec le capteur) du capteur de profondeur bas coût d'introduction récente en fonction de la distance entre le capteur de profondeur et le premier plan de la plante artificielle (plan 0 sur la Fig. 1A).

Comme nous venons de le montrer, la précision de ce capteur de profondeur est limitée mais ce capteur peut être utilisé pour résoudre certaines problématiques anatomiques portant sur les feuilles des plantes mono-axiales en vue de dessus [1]. Pour faire des mesures anatomiques sur les feuilles d'une plante mono-axiale en vue de dessus, la première étape est de séparer les feuilles. Cette séparation des feuilles est faite à l'aide d'un algorithme original que nous avons développé [1]. Nous avons utilisé la plante artificielle comme échantillon de test lors de la mise en place de cet algorithme. Les images de la Fig. 1C donne le résultat de l'application de l'algorithme de segmentation pour séparer les différents plans de la plante artificielle à partir de l'image de profondeur donnée par la Fig. 1B. Une fois que l'algorithme fonctionnait sur la plante artificielle, nous avons effectué des tests sur plusieurs échantillons réels pour vérifier la robustesse de l'algorithme. Les images de la Fig. 3 illustrent la segmentation des feuilles d'une plante réelle. La segmentation des feuilles des plantes réelles en vue dessus, nous permet d'effectuer des analyses anatomiques sur chaque feuille de la plante.

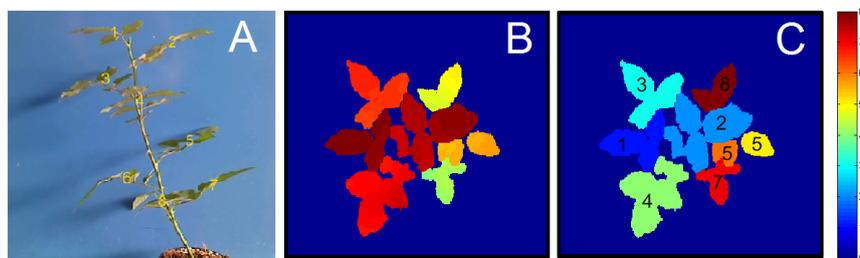


FIGURE 3 – La segmentation des feuilles (C) d'une plante mono-axiale (A) est faite à partir d'une image de profondeur (B) en appliquant un algorithme original que nous avons développé [1]. (Extrait de [1])

3 Utilisation des données anatomiques

La séparation des feuilles donne accès à des caractéristiques anatomiques portant sur les feuilles individuelles, par exemple la hauteur moyenne de la feuille, son aire visible, son centre de gravité visible, son orientation. Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour tester l'existence de régularités quantitatives dans l'organisation des végétaux. Tout au long de la croissance de la plante, des feuilles apparaissent le long de l'axe principal en se positionnant à des hauteurs (inverse de la profondeur quand le capteur de profondeur est placé en vue de dessus) croissantes. Chacune de ces feuilles pousse selon une orientation choisie pour optimiser l'équilibre de la plante mais aussi la capture de l'énergie lumineuse par la feuille.

Dans ce contexte, il est intéressant d'analyser l'évolution de l'orientation des feuilles en fonction de la hauteur pour vérifier la présence, ou non, d'une récurrence dans le choix de l'orientation de chacune des feuilles. Pour obtenir des valeurs d'angles toujours croissantes à partir de la profondeur la plus faible, nous avons défini une "spirale" partant du point de plus faible profondeur et reliant les points par profondeur croissante dans le diagramme polaire représentant la profondeur de la feuille en fonction de son orientation. La Fig. 4 donne le diagramme polaire et la spirale pour la plante de la Fig. 3. Pour chaque passage i par 0° de la spirale, les valeurs d'orientations sont augmentées de $i \times 360^\circ$. La suite de Fibonacci est une loi de récurrence dont les termes sont reliés à de nombreux phénomènes naturels, notamment des caractéristiques architecturales de certains végétaux [3]. Le Tab. 1 donne les valeurs des orientations des feuilles de la plante de la Fig. 3 mais aussi les valeurs attendues pour une suite de Fibonacci. Ce tableau montre que les orientations des feuilles ne sont pas choisies selon une loi simple de Fibonacci. Des études supplémentaires doivent être réalisées pour valider ou non la présence d'une loi de récurrence dans le choix, par la plante, des orientations des feuilles.

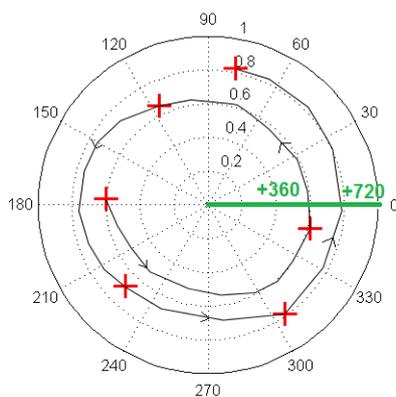


FIGURE 4 – Le diagramme polaire de la profondeur de la feuille (en m) en fonction de son orientation (en $^\circ$) pour la plante de la Fig. 4. Nous avons défini une "spirale" partant du point de plus faible profondeur et reliant les points par profondeur croissante. Pour chaque passage i par 0° de la spirale, les valeurs d'orientations sont augmentées de $i \times 360^\circ$.

Il peut aussi être intéressant d'effectuer une étude de l'équilibre de la plante d'un point de vue mécanique. L'équilibre de la plante est géré intrinsèquement par la plante qui peut actionner certains mécanismes internes pour assurer cet équilibre. Ces mécanismes induisent des couples et des forces appliqués à l'axe principal de la plante notamment

feuille	Distance Capteur-Feuille (en m)	Orientation (\vec{Oy}, \vec{CE}) (en °)	Prévision Fibonacci $F_n = F_{n-2} + F_{n-1}$
1	0.600	176	X
2	0.614	347	X
3	0.653	476	523
4	0.684	585	823
7	0.791	665	1061
8	0.825	799	1250

TABLE 1 – La profondeur, l’orientation déduite de la “spirale” de la Fig. 4 et les valeurs attendues pour une suite de Fibonacci pour les feuilles de la plante de la Fig. 3.

lors de l’apparition de nouvelles feuilles. Lorsque l’on considère une plante isolée, les forces appliquées sont donc ces forces induites et le poids de chacune des feuilles. La segmentation des feuilles permet d’avoir accès au poids apparent des feuilles visibles (ou partiellement visibles) en vue de dessus. Si l’on suppose que la densité surfacique des feuilles est constante et égale à 1, la masse apparente d’une feuille est égale à l’aire apparent de la feuille. Connaissant la masse de la partie visible de la feuille, le poids apparent est égale au produit de la masse apparente et de l’accélération de pesanteur. À partir de l’image de profondeur, il est aussi possible de trouver la position du centre de gravité apparent M de la feuille. Le produit vectoriel du poids apparent et du vecteur \vec{OM} apparent (O est la position de la tige pour la feuille la plus haute) permet de calculer le “moment apparent” du poids de chacune des feuilles. Le Tab. 2 donne le poids apparent, le vecteur \vec{OM} apparent et le moment apparent du poids de chacune des feuilles de la plante de la Fig. 3. Les approximations induites par la propriété apparente des attributs calculables avec une seule image de profondeur perturbent, a priori, la simulation mécanique de la plante. Ces approximations peuvent être réduites en utilisant des plantes différentes (feuilles toutes entièrement visibles) ou en faisant une reconstruction tridimensionnelle plus complète de la plante à l’aide plusieurs images de profondeur de la plante. Lorsque ces approximations seront contournées, il sera alors envisageable d’utiliser les théorèmes fondamentaux de la statique pour déterminer la valeur des forces et couples induits par la plante pour assurer son équilibre.

feuille	\vec{OM} apparent	Le poids \vec{P} apparent	Moment apparent du poids $\vec{OM} \wedge \vec{P}$
1	(-0.0018, -0.0231, -0.0070)	(0, 0, -2.2 10 ⁵)	(0.5 10 ⁵ , -0.04 10 ⁵ , 0)
2	(-0.0167, 0.0621, 0.0070)	(0, 0, -3.9 10 ⁵)	(-2.4 10 ⁵ , -0.6 10 ⁵ , 0)
3	(0.0588, -0.0097, 0.0460)	(0, 0, -3.6 10 ⁵)	(0.3 10 ⁵ , 2.1 10 ⁵ , 0)
4	(-0.0725, -0.0184, 0.0770)	(0, 0, -2.7 10 ⁵)	(0.5 10 ⁵ , -2 10 ⁵ , 0)
7	(-0.0946, 0.0842, 0.1840)	(0, 0, -1.7 10 ⁵)	(-1.4 10 ⁵ , -1.6 10 ⁵ , 0)
8	(0.0418, 0.0867, 0.218)	(0, 0, -1.4 10 ⁵)	(-1.2 10 ⁵ , 0.6 10 ⁵ , 0)

TABLE 2 – Le vecteur apparent, le poids apparent et le moment apparent du poids pour chaque feuille de la plante de la Fig. 3.

4 Un capteur de profondeur et une autre modalité d'imagerie

D'autres problématiques végétales portent sur les propriétés physiologiques des feuilles des plantes mono-axiales. Les données physiologiques (présence/absence d'eau, de chlorophylle, de pathogènes...) des plantes peuvent être mises en évidence avant même leurs apparitions visuelles par des modalités d'imagerie hautes technologies comme les capteurs de fluorescence de chlorophylle, de thermographie ou hyperspectrale. Le manque de contraste entre les feuilles sur une image acquise avec une de ces modalités d'imagerie ne permet pas de faire, avec cette seule image, la segmentation des feuilles ainsi que l'analyse physiologique. Par contre, l'association d'un capteur de profondeur (segmentation des feuilles) et d'une modalité d'imagerie physiologique donne la possibilité d'analyser le comportement physiologique pour chaque feuille individuellement.



FIGURE 5 – *Le système multimodalité pour observer la dynamique de population des pathogènes pour chaque feuille individuellement sans destruction ni intrusion. Ce système est composé d'un capteur de profondeur à éclairage structuré et d'une caméra thermique. La présence de pathogènes sur une feuille est mise en contraste par une baisse de température sur l'image thermique. Ce couplage multimodalité a la capacité de remplacer les méthodes actuelles sur feuilles uniques (destructives ou intrusives).*

Les pathogènes sont des agents infectieux qui attaquent les feuilles des plantes en les desséchant. Des études biologiques actuelles portent sur l'observation des dynamiques de population des pathogènes à la surface des feuilles des plantes. Ces études ont pour but de créer des espèces de plantes qui résisteront aux attaques des pathogènes. Une caméra thermique permet de détecter la présence de pathogènes avant même l'apparition des symptômes visuels [4]. Jusqu'à présent, les acquisitions sont faites sur feuille unique, soit sur feuille détachée (contrôle destructif), soit à l'aide d'un système d'isolement (contrôle intrusif). Ces acquisitions concernent les feuilles supérieures de plantes mono-axiales. Nous exposons dans cet article les différentes étapes pour la mise en place d'un système d'imagerie multimodalité composé d'un capteur de profondeur et d'une caméra thermique [5]. Ce système ouvre la possibilité d'analyser dans le temps la dynamique de population des pathogènes pour chaque feuille individuellement mais aussi pour la plante entière.

La première étape pour la mise en place de ce capteur est la calibration. La calibration permet de déterminer les paramètres intrinsèques (focales, distorsions) et les positions relatives de chaque modalité d'imagerie. La méthode de calibration [6], utilisée pour cet article, nécessite plusieurs acquisitions d'un plan (calibration du capteur de profondeur) sur lequel est fixé un damier (calibration de la caméra thermique). Le damier devant être contrasté en thermographie, nous avons utilisé un plan métallique sur lequel nous avons fixé un damier en papier réalisant un fort contraste en émissivité. La Fig. 6 donne un exemple de scène utilisée pour calibrer le système multimodalité que nous proposons. Les paramètres calculés lors de la calibration permettent ensuite de projeter l'image de profondeur (voir la Fig. 7B) délivrée par le capteur de profondeur dans le plan de l'image du

capteur thermographique (voir la Fig. 7A). Pour finir, les masques obtenus lors de la segmentation des feuilles dans l'image de profondeur projetée (voir la Fig. 7C) sont appliqués à l'image physiologique pour retrouver les données physiologiques pour chaque feuille individuelle de la plante. La Fig. 7D montre la présence de dépassements sur les bords des feuilles (présence de la température du fond ou d'une autre feuille). Ces dépassements, minimes, sont dus aux approximations lors de l'étape de calibration mais aussi à la précision du capteur de profondeur. La méthode exposée dans cet article est valable pour toute association du capteur de profondeur avec un des capteurs physiologiques cités plus haut.

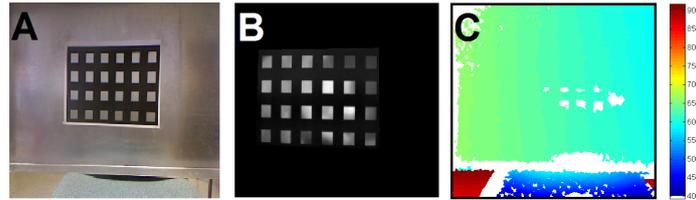


FIGURE 6 – Exemple de scènes pour la calibration d'un capteur multimodalité composé d'un capteur de profondeur et d'une caméra thermographique. A : Image RVB de la scène (non utilisée pour la calibration). B : Image thermographique de la scène. La calibration de la caméra thermographique se fait à partir du damier de calibration. Le damier de calibration doit donc être contrasté en température ou en émissivité (un damier en papier sur une surface métallique). C : L'image de profondeur de la scène. La scène doit être composée d'un plan de calibration (plan contenant le damier). La calibration mutuelle se fait en comparant les équations des plans obtenus pour chaque capteur.

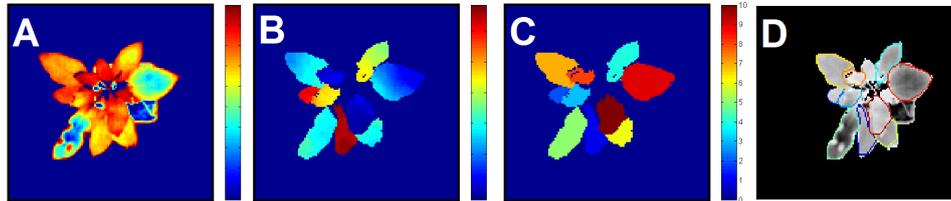


FIGURE 7 – Images acquises pour une plante mono-axiale avec le capteur multimodalité placé en vue de dessus. A : image thermographique de la plante. B : image de profondeur projetée dans le plan de l'image thermographique grâce aux paramètres de calibration. C : image des feuilles segmentées avec l'algorithme de segmentation de [1]. D : La performance de la calibration est montrée en transposant la couleur de chacun des masques, obtenus avec l'image segmentée, dans l'image thermographique

5 Un capteur RVB-Profondeur et un plateau tournant

La complexité architecturale et la présence du feuillage compliquent la reconstruction tridimensionnelle complète d'une plante mono-axiale ou non (nuage de points des branches et du feuillage simultanément). Pour certaines problématiques de phénotypage, cette complication naturelle peut être contournée. Par exemple, le feuillage constitue une information quantitative de la valeur esthétique des plantes ornementales. La quantification de cette valeur esthétique est faite par des opérateurs experts, dans la plupart des cas, par des inspections visuelles directes ou par l'intermédiaire de photographies couleurs [7]. Nous proposons de quantifier la valeur esthétique des plantes ornementales à partir

d'images RVB et de profondeur acquises tout autour de la plante. Nous avons conçu un instrument d'acquisition automatique composé d'un plateau tournant (rotation de la plante) synchronisé avec la prise d'images d'un capteur RVB-Profondeur bas-coût d'introduction récente (voir la Fig. 8A) [8].

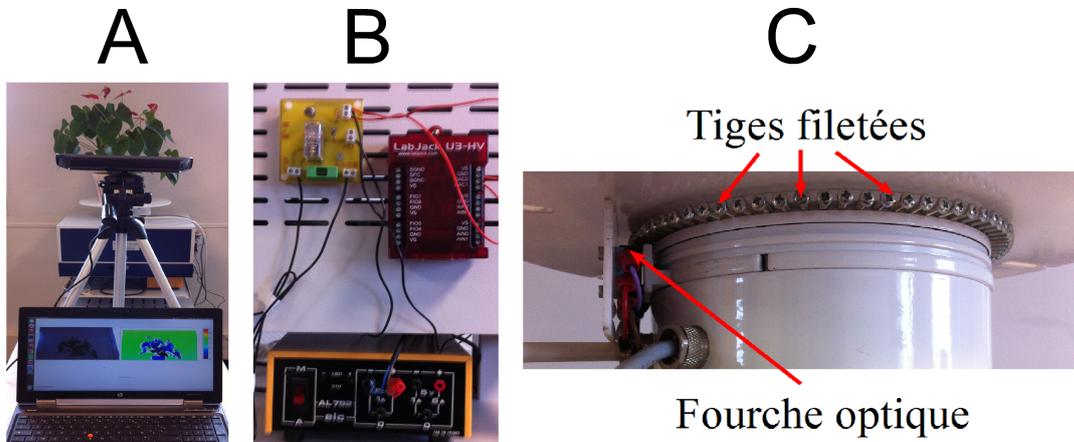


FIGURE 8 – A : Le plateau tournant est synchronisé avec un capteur RVB-Profondeur afin de pouvoir quantifier la valeur esthétique des plantes ornementales. Cette synchronisation permet d'acquérir les images RVB et de profondeur de la plante (maximum 15kg) pour chaque rotation de 5° du plateau tournant (72 paires d'images au total). Les acquisitions durent une vingtaine de minutes. B : Le système LabJack déclenche la rotation du plateau tournant en envoyant une impulsion électrique au système rotatif. C : La fourche optique détecte le passage d'une tige filetée puis arrête la rotation.

Le plateau tournant a été conçu pour répondre à des contraintes de coût et de transport. Il permet d'acquérir des images RVB-Profondeur de plantes pouvant peser jusqu'à 15kg. Les images sont acquises à chaque rotation de 5° du plateau tournant, pour un total de 72 images tout autour de la plante. Le système rotatif a été réalisé afin de minimiser le coût du passage d'un fonctionnement en continu à un fonctionnement "pas à pas" de 5° . Un système LabJack connecté à un programme informatique déclenche la rotation en envoyant une impulsion électrique au système rotatif (voir la Fig. 8B). Des tiges filetées sont placées à intervalle régulier sur la partie en rotation. À chaque rotation, une fourche optique détecte le passage d'une tige filetée puis arrête la rotation (voir la Fig. 8C). La durée des acquisitions tout autour de la plante est d'une vingtaine de minutes. Pour chaque rotation, l'acquisition de la paire d'images RVB-Profondeur (voir la Fig. 9A et la Fig. 9C) est effectuée après un délai de stabilisation de la plante (temps de stabilisation des mouvements des tiges et des feuilles).

Le traitement des 72 paires d'images est ensuite effectué par l'intermédiaire d'une interface que nous avons développée (voir la Fig. 10). Cette interface permet, à partir de l'image RVB et de l'image de profondeur, le calcul et l'export d'une variété de descripteurs du feuillage et de son enveloppe englobante. Les descripteurs sont déduits de l'image binarisée de l'image RVB (voir la Fig. 9B) ou de l'image de profondeur (voir la Fig. 9C). Les descripteurs portant sur l'image binarisée de l'image RVB sont invariants selon la position du capteur. Par exemple, le rapport de l'aire sur l'aire fermée décrit la compacité interne du feuillage tandis que le nombre de sommets de l'enveloppe convexe décrit le caractère plus ou moins compact de l'enveloppe extérieure. L'image de profondeur est utilisée pour définir des descripteurs de taille (hauteur et largeur), de volume (volume apparent), de symétrie (verticale et horizontale) et de complexité du feuillage (caractéristiques fractales). Ces

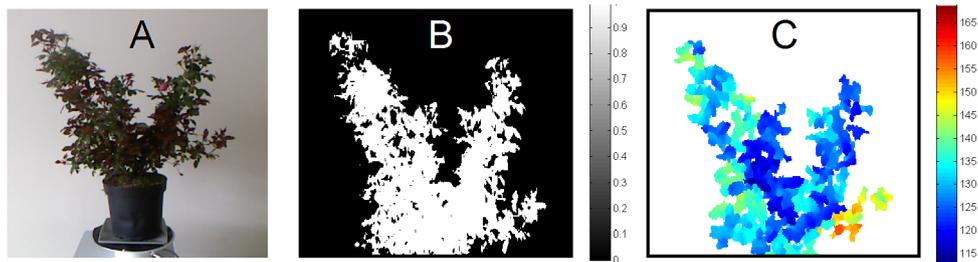


FIGURE 9 – Exemple d'une paire d'images du capteur RVB-Profondeur pour une rotation du plateau tournant. Les descripteurs du feuillage et de son enveloppe englobante, permettant une quantification de la valeur esthétique des plantes ornementales, sont calculés à partir de l'image binarisée (B) de l'image RVB (A) de la plante et de son image de profondeur (C).

descripteurs sont invariants en éclairage (tant qu'il n'y a pas d'infrarouges qui perturbent la mesure de profondeur) et en position. Les paires d'images RVB-Profondeur sont acquises tous les 5° autour de la plante. Cette rotation permet d'indiquer la symétrie de la plante par rapport à chacun des descripteurs. La Fig. 11B illustre la symétrie de deux plantes différentes pour le même descripteur (compacité interne du feuillage). Les descripteurs numériques, qu'ils soient obtenus avec l'image binarisée de l'image RVB ou l'image de profondeur, ainsi que leur symétrie en rotation pourront ensuite être mis en corrélation avec des termes exprimés par des panels d'experts durant des analyses sensorielles. Le but à terme est de remplacer l'analyse sensorielle, subjective car liée à la perception du panel, par l'association de descripteurs numériques permettant de quantifier la valeur esthétique des plantes ornementales.

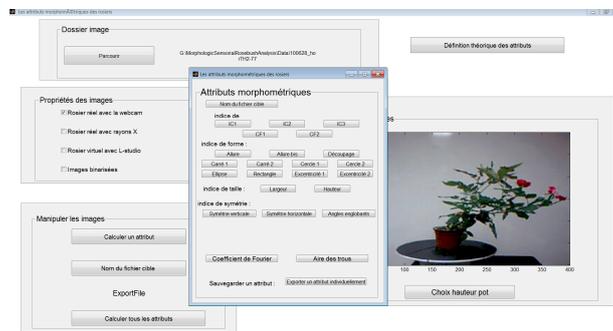


FIGURE 10 – L'interface logicielle permettant le traitement des paires d'images du capteur RVB-Profondeur tout autour de la plante. Cette interface permet le calcul des descripteurs numériques du feuillage et de son enveloppe englobante pour quantifier la valeur esthétique des plantes ornementales.

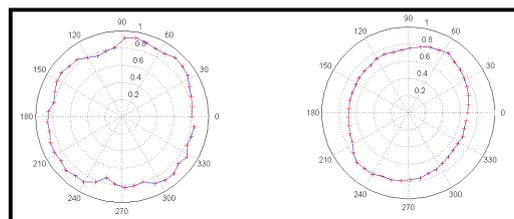


FIGURE 11 – Évolution d'un même descripteur (compacité interne du feuillage) pour deux plantes différentes.

6 Conclusion

Les instruments d'imagerie pour le phénotypage présentés dans ce rapport donnent accès à de nouvelles informations pour les biologistes. Ces informations étaient auparavant inaccessibles du fait de leur coût matériel ou en temps. Ces instruments peuvent aussi être adaptés à d'autres problématiques végétales. Le capteur de profondeur peut être utilisé seul pour effectuer d'autres mesures anatomiques. Il peut aussi être couplé à d'autres modalités d'imagerie physiologiques pour des études portant sur les feuilles des plantes mono-axiales. Le plateau tournant peut être associé à d'autres modalités d'imagerie afin de mettre en place de nouveaux descripteurs sur le feuillage des plantes. Outre les capteurs d'imagerie présentés dans cet article, des interactions avec le domaine du végétal sont possibles pour toutes les étapes de la chaîne de l'information, de l'acquisition au stockage des données, en passant par leur traitement. Ces interactions riches et variées peuvent être mises en place à différentes échelles végétales, de la semence à la canopée, et elles illustrent l'intérêt de l'instrumentation et de l'imagerie innovantes pour contribuer à l'analyse quantitative automatisée des végétaux.

Références

- [1] Y. Chéné, D. Rousseau, P. Lucidarme, J. Bertheloot, P. Morel, E. Belin, F. Chapeau-Blondeau. "On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants." *Computers and Electronics in Agriculture*, 82 :122–127, 2012.
- [2] K. Khoshelham, S.O. Elberink. "Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications." *Sensors*, 12 :1437–1454, 2012.
- [3] I. Stewart "Mathematics of Life." *Basic Books*, 2011.
- [4] E. Belin, D. Rousseau, T. Boureau, V. Caffier. "Thermography versus chlorophyll fluorescence imaging for detection and quantification of apple scab." *Computers and Electronics in Agriculture*, 90 :159–163, 2013.
- [5] Y. Chéné, E. Belin, F. Chapeau-Blondeau, V. Caffier, T. Boureau, D. Rousseau. "Anatomo-functional bimodality imaging for plant phenotyping : An insight through depth imaging coupled to thermal imaging." S. Dutta Gupta, Y. Ibaraki, eds., *Plant Image Analysis : Fundamentals and Applications*, CRC Press 2013 (sous presse). 3, 2013.
- [6] C. Herrera, J. Kannala, J. Heikkilä. "Joint depth and color camera calibration with distortion correction." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34 :2058–2064, 2012.
- [7] R. Boumaza, S. Demotes Mainard, L. Huche Thelie, V. Guérin. "Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush." *Journal of Sensory Studies*, 24 :774–796, 2009.
- [8] Y. Chéné, E. Belin, F. Coadou, F. Chapeau-Blondeau, L. Hardouin, D. Rousseau. "Instrumentation et capteurs innovants appliqués au phénotypage automatisé des végétaux." In *6^{ème} Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation*, 29-30 janvier 2013, Lyon, France.