



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org



AFPF – Maison Nationale des Eleveurs – 149 rue de Bercy – 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 – Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Française pour la Production Fourragère

Le drone, un nouvel outil au service de la sélection pour estimer la hauteur des plantes fourragères

F. Surault, E. Roy, A.-J. Escobar-Gutiérrez, P. Barre

Le drone est un outil de plus en plus utilisé dans de nombreux domaines et en particulier en agriculture. La méthode présentée permet d'estimer la hauteur de plantes fourragères à partir de photos prises d'un drone. Cette méthode revêt un intérêt tout particulier pour la sélection végétale.

RÉSUMÉ

Le sélectionneur a besoin de réaliser des mesures de hauteur sur des milliers de plantes dans des expérimentations en plantes isolées, mesures réalisées manuellement avec une règle graduée ou électronique. La méthode basée sur la photogrammétrie (reconstruction en 3 dimensions) à partir de photos prises d'un drone a permis d'estimer la hauteur de plantes de dactyle dans une pépinière de sélection. Les mesures réalisées sont corrélées ($R^2 = 0,77$) avec celles des méthodes manuelles. Même si les hauteurs estimées avec le drone sont légèrement inférieures aux hauteurs manuelles, la méthode avec le drone permet de classer les variétés aussi bien qu'avec une méthode de mesure manuelle. Cette nouvelle méthode, rapide et économique, pourrait être utilisée en routine en sélection fourragère dans les années à venir.

SUMMARY

Drones: a new tool for assessing forage crop height and thus improving breeding efforts

Drone use is increasing in many domains, including in agriculture. Here, we describe a method for estimating the height of forage plants using photos taken by drones. It employs photogrammetry (photo-based 3D reconstructions). It was used to measure the height of orchard grass in a plant breeding facility. The drone-based results were correlated ($R^2=0,77$) with the results obtained using manual methods. Although the drone-based heights were slightly shorter than the manually measured heights, the drone-based method classified varieties as effectively as the manual approach. This new method, which is rapid and inexpensive, could become routine in forage crop breeding efforts in the future.

Chez les graminées et les légumineuses fourragères, le travail du sélectionneur consiste à créer des variétés productives, avec une bonne répartition de la production sur l'année, offrant une valeur alimentaire élevée et une bonne résistance aux maladies (HUMPHREYS, 2005 ; SAMPOUX *et al.*, 2011). Ce premier travail de sélection est réalisé par des tris successifs d'individus sur la base de phénotypes dans des expérimentations en plantes isolées composées de plusieurs milliers d'individus. Le tri des plantes les plus prometteuses est réalisé à l'aide de notations visuelles (résistances aux maladies, vigueur de repousse, date d'épiaison...) et de mesures manuelles. Les principales mesures réalisées sont généralement des hauteurs naturelles ou étirées des plantes qui sont parfois remplacées par une notation de 1 à 9. La hauteur naturelle

est la distance entre le sol et le sommet des limbes (graminées) ou des tiges (légumineuses) les plus hauts. La hauteur étirée est la distance entre le sol et les limbes étirés ou les tiges étirées les plus longs. Ces mesures traduisent la capacité de la plante à produire de la biomasse. La vitesse de repousse d'une plante en pépinière après une coupe est même un des meilleurs critères prédictifs de sa capacité à produire de la biomasse en peuplement dense (HAZARD et GHESQUIÈRE, 1997). Toutefois, le calcul de cette vitesse de repousse requiert de connaître les cinétiques de croissance. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des mesures de hauteur, répétées tous les 10 jours pendant les 6 à 8 premières semaines de repousse. Ces observations sont réalisées manuellement à l'aide d'une règle graduée ou d'une règle électronique (Herbomètre® modifié). Elles sont

AUTEURS

INRA, UR04 Pluridisciplinaires Prairies et Plantes Fourragères (URP3F), Le Chêne - RD 150, CS 80006, F-86600 Lusignan ; fabien.surault@inra.fr

MOTS CLÉS : Espèce fourragère, hauteur d'herbe, méthode d'estimation, prairie, sélection variétale.

KEY-WORDS : Cultivar breeding, estimation method, forage species, grassland, grass height.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Surault F., Roy E., Escobar-Gutiérrez A.J., Barre P. (2018) : «Le drone, un nouvel outil au service de la sélection pour estimer la hauteur des plantes fourragères», *Fourrages*, 236, 281-288.

très consommatrices de temps et particulièrement pénibles pour l'expérimentateur ce qui peut limiter le nombre de plantes à mesurer ou la fréquence des mesures de hauteur sur des expérimentations de plusieurs milliers de plantes.

Les **différentes méthodes** utilisables aujourd'hui **pour estimer la hauteur des plantes fourragères** sont :

- **La télédétection par laser ou Lidar** (pour *light detection and ranging*) qui peut être utilisée pour estimer la production de micro-parcelles de plantes fourragères (GAMKHAR *et al.*, 2017) ou estimer la biomasse d'une prairie (COOPER *et al.*, 2017) à l'aide d'un laser porté par un chariot roulant au-dessus des plantes. Cette méthode permet une représentation de la plante en trois dimensions avec plusieurs données disponibles comme la hauteur, la largeur ainsi que le volume. Cette méthode présente néanmoins plusieurs inconvénients. Le coût d'achat du laser est élevé, environ 15 000 €, auquel il faut ajouter le coût de conception et de fabrication d'un vecteur (chariot motorisé). Cette méthode est relativement lente puisque l'acquisition des spectres est réalisée plante par plante.

- **L'utilisation d'un drone équipé d'une caméra multispectrale**. Le principe repose sur l'acquisition d'images prises simultanément à différentes longueurs d'onde qui, après traitement informatique, permettent le calcul de différents indices de végétation. Ces indices, comme le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ou le GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), permettent de générer une image affichant la couverture végétale ou la biomasse du couvert. Cette méthode est utilisée depuis quelques années sur céréales et colza, pour raisonner la fertilisation minérale azotée, élaborer des cartes d'hétérogénéité des parcelles ou sur des essais afin de comparer le comportement de plusieurs micro-parcelles. Sur prairies, des études sont en cours pour prédire la biomasse végétale disponible dans des parcelles chez des éleveurs (FOUGÈRE, 2016). Les premiers résultats montrent qu'il existe une bonne corrélation entre la biomasse estimée avec l'Herbomètre® et celle estimée avec les images prises avec le drone. Cette méthode est intéressante car elle permet de balayer plusieurs dizaines d'hectares en seulement quelques minutes. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients. Le coût de la caméra multispectrale reste assez dissuasif (15 000 €) et sa résolution est trop faible pour travailler en plante individuelle.

- **La reconstruction en trois dimensions (3D) par photogrammétrie**. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un logiciel permettant de reconstruire une scène en trois dimensions à partir de photos prises avec un drone dans le spectre visible. Son coût est raisonnable (8 000 €) comparé aux autres méthodes. Il comprend l'achat d'un drone semi-professionnel équipé d'une caméra « classique », d'un logiciel de reconstruction 3D et d'un matériel informatique performant. Le principal inconvénient est le grand nombre de photos nécessaires pour obtenir une reconstruction 3D de qualité. Quelques études ont montré l'intérêt de cette méthode pour mesurer la hauteur de plantes en micro-parcelles (BENDIG *et al.*, 2013 ; BROCKS *et al.*, 2016 ; CHANG *et al.*, 2017), pour estimer la biomasse de différents types de végétation (CUNLIFFE *et al.*, 2016) ou de prairies (COOPER *et al.*, 2017).

Des tests préliminaires de reconstruction réalisés sur des pépinières avec des photos prises à partir d'un ballon à gaz captif, dans un premier temps, puis d'un drone, dans un deuxième temps, nous ont convaincu de l'intérêt de cette méthode.

L'objectif du travail présenté ici est **la mise au point et le développement de cette méthode pour estimer la hauteur de plantes de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans une expérimentation en plantes isolées**. Pour cela nous avons déterminé : i) la relation existant entre des hauteurs de plantes mesurées manuellement et des hauteurs de plantes estimées avec cette méthode et ii) l'intervalle de confiance de l'estimation de la hauteur par le drone. Afin de prouver l'efficacité du concept pour la sélection génétique, nous avons appliqué ces méthodes au classement de variétés et de populations d'amélioration de dactyle.

1. Matériel et méthodes

■ Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé était une pépinière de plantes isolées de dactyle, repiquées en 2015 à 70 cm d'écartement, à Lusignan (latitude 46,403454°N, longitude 0,078529°E). Cette **pépinière de 1 710 plantes** était composée de 57 variétés et populations d'amélioration de dactyle (pour simplifier, elles sont appelées variétés dans la suite du document). Chaque variété était représentée par une ligne de 10 plantes répétée sur trois blocs. Chaque bloc était entouré par des plantes de bordure. Entre les plantes, le sol était maintenu nu par un binage mécanique régulier.

■ Méthodes de mesure de la hauteur des plantes

• La règle graduée

L'un des deux matériels utilisé pour mesurer la hauteur des plantes est la règle graduée. Cette dernière est graduée tous les centimètres. On mesure la hauteur naturelle des plantes, distance entre le sol et le sommet des limbes les plus hauts, sans les étirer. Utilisation de la règle graduée nécessite la présence de deux expérimentateurs, un qui mesure et un qui note.

• La règle électronique

Le second matériel utilisé pour mesurer la hauteur des plantes est la règle électronique. Il s'agit d'un Herbomètre® électronique (ARVALIS) à plateau (marque SODALEC) qui a été modifié. Pour ces mesures, le plateau d'origine a été remplacé par un plateau transparent afin de voir la plante. Lors des mesures, le plateau de l'Herbomètre® est retenu par l'expérimentateur et la mesure de hauteur est déclenchée lorsque le plateau touche les limbes les plus hauts. On mesure bien la hauteur naturelle de la plante et non pas une hauteur compressée ou une densité. Ce matériel ne permet pas de mesurer des plantes supérieures à 373 mm de hauteur. Utilisation de la règle électronique mobilise un seul expérimentateur.

• Le drone

Pour les prises de vue, nous avons utilisé un drone semi-professionnel (marque DJI, modèle Phantom 4 Advanced). Il était équipé d'une caméra avec un capteur de 1 pouce et de 20 mégapixels. La technique de **la reconstruction 3D nécessite un nombre important de photos** avec un fort taux de recouvrement des clichés, environ 130 à 150 photos pour 100 m² de pépinière. Après des essais préalables sur la pépinière, nous avons pu déterminer que la hauteur optimale de prise de vue du drone devait être comprise entre 4,5 et 9 mètres de hauteur. Cette plage de hauteur offre un bon compromis entre la taille du pixel, le nombre de photos générées et le temps de calcul machine sans provoquer de turbulence au niveau du feuillage des plantes. La vitesse d'avancement du drone était de 1 à 2 km/heure avec un déclenchement automatique des photos toutes les 2 secondes. Sur le drone, la caméra était positionnée au nadir (à la verticale du sol). Si le déclenchement des photos était automatique, le pilotage du drone (direction, vitesse d'avancement et altitude) restait quant à lui manuel.

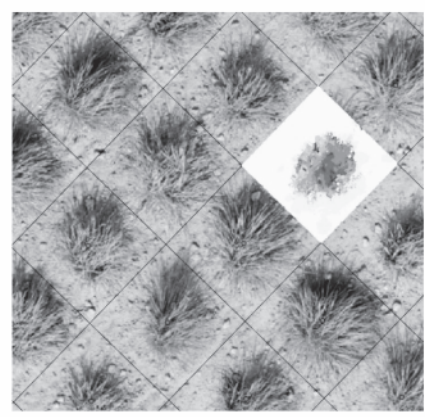


FIGURE 1 : Sur la photo prise par le drone : délimitation des plantes sous forme de polygones et nuage de points obtenu.

FIGURE 1 : Picture taken by the drone: plants are defined using polygons and point clouds.



FIGURE 2 : Reconstruction de la pépinière en 3 dimensions à partir du nuage de points (Photoscan).

FIGURE 2 : 3D reconstruction of the breeding facility using the point cloud.

Pour chaque date, **un nuage de points en trois dimensions a été généré à l'aide du logiciel Agisoft Photoscan v1.2** (Agisoft LLC, St Petersburg, Russia). Quatre points de repères au sol ont été géo-référencés à l'aide d'un GPS centimétrique (ProFlex 500 Magellan) et identifiés manuellement sur les photos. Les paramètres de traitement par défaut ont été utilisés et le nuage de points de la scène a été exporté au format ASCII.

À l'aide d'Agisoft Photoscan, les 3 blocs ont été délimités manuellement par un polygone pour être ensuite divisés automatiquement en 570 polygones à l'aide d'un script en langage Python représentant le nombre de plantes par bloc. **Chaque plante a ainsi été délimitée par un polygone** (figure 1) et les 1710 polygones ont été enregistrés au format *shapefile* avec leurs coordonnées ainsi que les attributs des plantes (identifiant, numéro du bloc, de la ligne et de la colonne). Une image de la reconstruction 3D de la pépinière est présentée sur la figure 2.

Le fichier du nuage de points de l'essai étant très volumineux, il a été découpé en 1710 fichiers correspondant aux 1710 plantes ou polygones.

Enfin, les hauteurs des plantes ont été calculées en faisant la différence entre l'altitude du point le plus haut de la plante et l'altitude du sol. L'altitude du sol a été obtenue pour chaque plante en faisant la moyenne des altitudes des points du sol. Les points du sol ont été déterminés en traçant l'histogramme de répartition des altitudes de tous les points avec un pas de 2 cm. Ayant une allure bimodale, les points ont été séparés en 2 classes au niveau du changement de pente. La première classe correspond aux points du sol et la deuxième à la partie aérienne de la plante (figure 3). Le calcul de la hauteur des plantes a été réalisé par un programme développé en langage Python, générant un fichier résultat au format texte avec les hauteurs de chaque plante à chaque date de mesure.

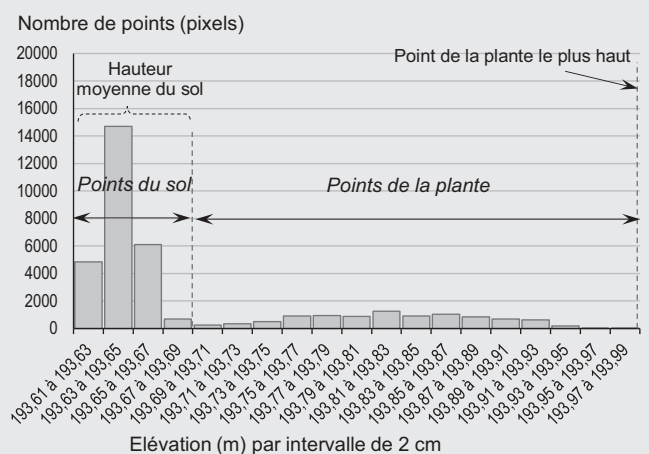


FIGURE 3 : Exemple de répartition des points par classe d'élévation (altitude par rapport au niveau de la mer) à l'intérieur d'un polygone.

FIGURE 3 : Example of a point distribution according to elevation class (altitude relative to sea level) within a polygon.

Date	Codification mesure	Type de mesure	Nb plantes mesurées	Nb plantes/ variété/bloc
21/09/2017	RELEC-1	Hauteur naturelle mesurée avec la règle électronique, 1 ^{er} passage	684	4
	RELEC-2	Hauteur naturelle mesurée avec la règle électronique, 2 ^{ème} passage	684	4
	RELEC-1-2	Hauteur moyenne de RELEC_1 et de RELEC_2	684	4
	DRONE-1	Hauteur naturelle estimée avec le drone	684	4
13/10/2017	DRONE-2	Hauteur naturelle estimée avec le drone	1 710	10
16/10/2017	RELEC-3	Hauteur naturelle mesurée avec la règle électronique	1 710	10
	REGLE-1	Hauteur naturelle mesurée avec la règle graduée	1 710	10

TABLEAU 1 : Liste des observations réalisées sur la pépinière.

TABLE 1 : List of measurements obtained for the plant breeding facility.

■ Description des deux séries de mesure

Deux séries de mesure de hauteur manuelle associées à des prises de vue avec le drone ont été réalisées sur la pépinière **le 21 septembre et le 16 octobre 2017** (tableau 1). A ces deux dates, les conditions météorologiques étaient favorables avec une absence de vent. Il est préférable que les feuilles des plantes bougent le moins possible pour obtenir une bonne reconstruction 3D.

• Première série de mesure

Le 21 septembre 2017 après-midi, des mesures de la hauteur naturelle des plantes ont été réalisées **avec la règle électronique** sur 684 plantes de la pépinière (57 variétés x 4 plantes/ligne x 3 répétitions). A la suite de cette première mesure intitulée «RELEC-1», une seconde mesure de la hauteur des plantes avec la règle électronique intitulée «RELEC-2» a été réalisée par le même opérateur et avec le même matériel. L'objectif de ces deux mesures était d'évaluer la répétabilité de cette méthode. Un **vol de drone**, intitulé «DRONE-1», a été réalisé le même jour, pendant les mesures avec la règle électronique, à environ 6 m de hauteur en suivant la méthodologie décrite ci-dessus.

• Deuxième série de mesure

Le 16 octobre 2017, des mesures de la hauteur naturelle des plantes ont été réalisées sur l'ensemble des plantes de la pépinière. La hauteur des 1 710 plantes a été mesurée en même temps par un premier expérimentateur **avec la règle électronique** (RELEC-3) et par un deuxième expérimentateur **avec une règle graduée** (REGLE-1). Un **vol de drone** (DRONE-2) avait été réalisé 3 jours avant, le 13 octobre 2017, à une hauteur d'environ 5 m.

■ Analyse des données

Pour les analyses de variance, ce sont les moyennes des 4 plantes pour le 21 septembre ou des 10 plantes pour les 13 et 16 octobre par variété et par bloc qui ont été utilisées.

• Comparaison des méthodes de mesure de la hauteur des plantes

Des régressions linéaires ont été réalisées pour comparer les hauteurs des plantes obtenues avec les différentes méthodes de mesure. Nous avons comparé les mesures réalisées avec la règle électronique (RELEC-1 vs RELEC-2), les mesures manuelles et le drone (REGLE-1 et RELEC-3 vs

DRONE-2) et enfin les mesures réalisées aux deux dates avec la règle électronique et le drone (RELEC-1-2 vs DRONE-1 et RELEC-3 vs DRONE-2). Pour chaque comparaison, des intervalles de prédiction ($P \leq 0,05$) d'une méthode par une autre, ont été calculés à partir de l'estimation de l'erreur standard.

Afin de comparer les méthodes de mesure, des analyses de variance factorielles ont été réalisées en suivant le modèle linéaire général :

$$Y = \mu + \text{VARIÉTÉ} + \text{MÉTHODE} + \text{BLOC} + \text{VARIÉTÉ} \times \text{MÉTHODE} + ee$$

• Classement des variétés avec les différentes méthodes de mesure

Afin de déterminer si la méthode de mesure de la hauteur modifie le classement des variétés, une analyse de variance et un test de Tukey ($P \leq 0,05$) ont été réalisés pour chaque méthode de mesure, le 21 septembre pour RELEC-1, RELEC-2 et DRONE-1 et les 13 et 16 octobre pour DRONE-2, RELEC-3 et REGLE-1 en suivant le modèle linéaire général (glm) :

$$Y = \mu + \text{VARIÉTÉ} + \text{BLOC} + ee.$$

Des corrélations de Spearman sur les rangs des variétés ont été réalisées afin d'évaluer la concordance entre les méthodes sur le classement des variétés.

2. Résultats et discussion

■ Comparaison des hauteurs réalisées avec la règle électronique

Les hauteurs obtenues lors des deux mesures avec la règle électronique sont représentées sur la figure 4. La hauteur moyenne des plantes est de 275 mm pour la première série de mesure (RELEC-1) et de 270 mm pour la seconde (RELEC-2). Entre ces deux hauteurs manuelles réalisées par le même opérateur, le coefficient de corrélation (r^2) est de 0,84 et le coefficient de variation est de 4,6%. **La corrélation entre les deux séries de mesure à la règle électronique est bonne même si les hauteurs sont en moyennes plus faibles de 5 mm pour RELEC-2.** Cette différence est significative ($P = 0,0032$) mais n'impacte pas le classement des variétés (tableau 2). Cet écart entre les deux séries de mesure montre toute la variabilité existant autour des mesures de la hauteur des plantes. Les hauteurs plus faibles au deuxième passage (RELEC-2) sont liées à l'expéri-

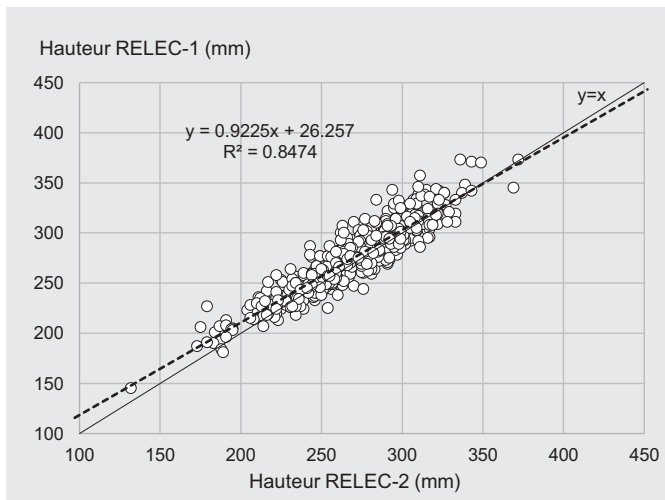


FIGURE 4 : Relation entre les deux mesures de hauteur réalisées avec la règle électronique, RELEC-1 et RELEC-2 le 21 septembre 2017 (sur 684 plantes).

FIGURE 4 : Relationship between the 2 height measurements obtained with the digital calipers RELEC-1 and RELEC-2 on September 21, 2017 (n=684 plants).

mentateur (baisse de concentration ou fatigue physique) ou à la présence de vent qui modifie le port des plantes.

L'intervalle de prédiction d'une hauteur à la règle électronique (RELEC-1) par une autre hauteur à la règle électronique (RELEC-2) est de $\pm 24,3$ mm.

■ Comparaison des hauteurs réalisées avec les règles à celles estimées avec le drone

Les mesures de hauteur réalisées le 16 octobre 2017 sur les 1710 plantes de la pépinière avec la règle graduée

(21/09/2017) Facteur	RELEC-1 vs RELEC-2		RELEC-1-2 vs DRONE-1	
	F	Pr > F	F	Pr > F
BLOC	0,25	0,7801	2,53	0,0818
VARIETE	5,62	< 0,0001	4,50	< 0,0001
METHODE	8,90	0,0032	41,47	< 0,0001
VARIETE*METHODE	0,06	1,0000	0,15	1,0000

(13+16/10/17) Facteur	RELEC-3 vs REGLE-1		REGLE-1 vs DRONE-2		RELEC-3 vs DRONE-2	
	F	Pr > F	F	Pr > F	F	Pr > F
BLOC	10,29	< 0,0001	16,46	< 0,0001	1,09	0,3382
VARIETE	5,00	< 0,0001	5,70	< 0,0001	4,71	< 0,0001
METHODE	105,33	< 0,0001	209,72	< 0,0001	25,28	< 0,0001
VARIETE*						
METHODE	0,28	1,0000	0,26	1,0000	0,21	1,0000

TABEAU 2 : Analyses de variance factorielles pour la comparaison des 3 méthodes de mesure de la hauteur des plantes : règle électronique (RELEC), règle graduée (REGLE) et drone.

TABLE 2 : Results of the ANOVA comparing the 3 plant-height measurement methods: digital calipers (RELEC), ruler (REGLE) and drone.

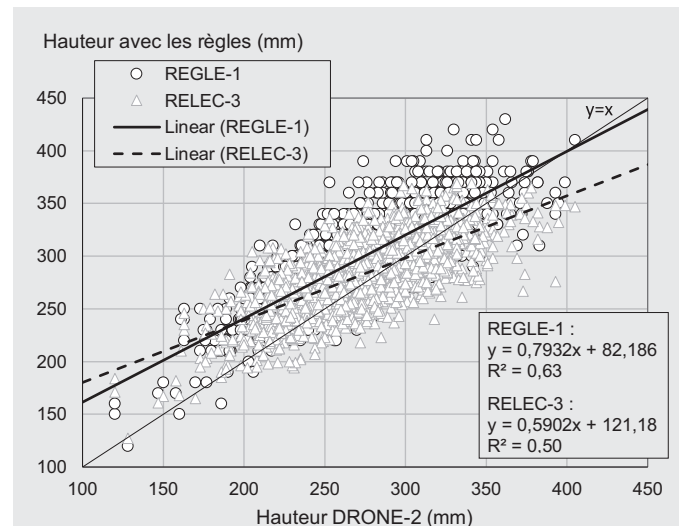


FIGURE 5 : Relation entre les hauteurs de plante mesurées avec la règle graduée (REGLE-1) ou avec la règle électronique (RELEC-3) et celles estimées avec le drone (DRONE-2) sur l'ensemble de la pépinière en octobre 2017.

FIGURE 5 : Relationship between the height measurements obtained using the ruler (REGLE-1) or the digital calipers (RELEC-3) and the drone (DRONE-2) across the entire plant breeding facility in October 2017.

(REGLE-1) et la règle électronique (RELEC-3) sont comparées sur la figure 5 aux hauteurs estimées avec le drone (DRONE-2). Avec la règle électronique, les mesures sont réalisées tous les millimètres contrairement à la règle graduée où elles sont réalisées tous les centimètres. Cela explique la discontinuité des valeurs sur l'axe des ordonnées pour la série de données REGLE-1. **Le coefficient de corrélation entre la règle graduée et le drone est de 0,63 et il est de 0,50 entre la règle électronique et le drone.** Les intervalles de prédiction d'une hauteur réalisée avec la règle électronique ou avec la règle graduée par une hauteur estimée avec le drone sont respectivement de $\pm 46,6$ mm et $\pm 48,1$ mm. Si l'on compare les deux méthodes manuelles, l'intervalle de prédiction d'une hauteur à la règle électronique (RELEC-3) par une hauteur à la règle graduée (REGLE-1) est de $\pm 48,8$ mm. Ce dernier intervalle montre, comme pour les mesures du 21 septembre 2017, toute la variabilité existant autour de ces mesures de la hauteur des plantes liée aux hétérogénéités du sol et à l'expérimentateur.

■ Comparaison des hauteurs réalisées avec la règle électronique à celles estimées avec le drone

Les relations entre les mesures réalisées avec la règle électronique et avec le drone sont représentées sur la figure 6.

A la première date (RELEC-1-2), les hauteurs mesurées et estimées sont bien corrélées avec un R^2 de 0,77. **Le drone tend à sous-estimer la hauteur des plantes et en particulier les plantes les plus petites.** La hauteur des plantes est en moyenne plus faible de 13 mm avec le drone comparée à la règle électronique. L'intervalle de prédiction

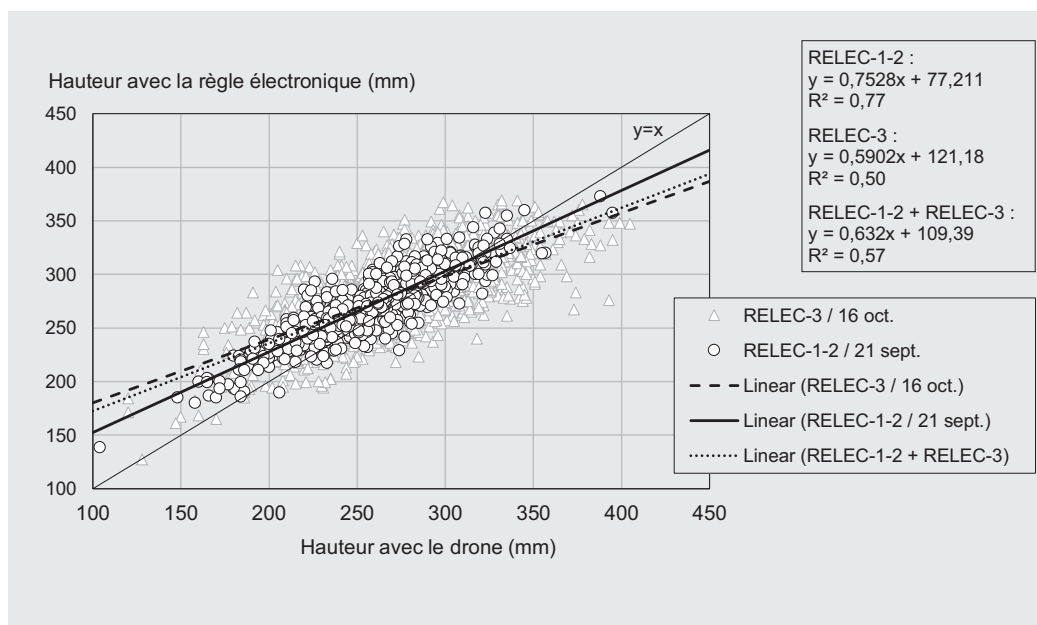


FIGURE 6 : Relation entre les hauteurs des plantes mesurées avec la règle électronique et estimées avec le drone le 21 septembre (RELEC-1-2 vs DRONE-1) et les 13 et 16 octobre, 2017 (RELEC-3 vs DRONE-2).

FIGURE 6 : Relationship between the height measurements obtained using the digital calipers and the drone on September 21, 2017 (RELEC-1-2 vs DRONE-1) and on October 13&16, 2017 (RELEC-3 vs DRONE-2).

d'une hauteur réalisée avec la règle électronique par une hauteur estimée avec le drone est de $\pm 32,1$ mm. Cet intervalle de prédiction est proche de celui obtenu entre les deux passages avec la règle électronique (± 24 mm).

Pour les hauteurs des 13 et 16 octobre (RELEC-3), la corrélation est moins bonne avec un R^2 de 0,5 et l'intervalle de prédiction est plus élevé avec $\pm 46,6$ mm. Les trois jours de décalage entre le passage du drone et les mesures réalisées avec la règle électronique peuvent expliquer ces résultats. De plus, la présence de vent le 16 octobre lors de la réalisation des hauteurs manuelles a pu altérer la précision de ces mesures.

Les équations des trois régressions sont proches. Par la suite, on ne cherchera pas à appliquer un modèle pour prédire les hauteurs manuelles avec le drone. On considère que la méthode avec le drone est validée et que les hauteurs estimées avec cette méthode sont directement utilisables même si ces dernières sont très légèrement inférieures à celles obtenues avec la règle électronique.

■ Effet de la méthode de mesure et classement des variétés

Comme le montrent les résultats des analyses de variance présentés dans le tableau 2, il y a toujours un effet significatif VARIÉTÉ et MÉTHODE sur la hauteur des plantes. Pour une même méthode de mesure, comme RELEC-1 et RELEC-2, **l'effet MÉTHODE, dans ce cas expérimentateur, sur les hauteurs des plantes reste très significatif** ($P \leq 0,01$). Cependant, pour chaque comparaison, l'interaction VARIÉTÉ x MÉTHODE est non significative avec des valeurs de F proches de zéro. Cette absence d'interaction indique que, **malgré les différences de hauteur entre les méthodes de mesure, le classement variétal reste le même.**

Afin de comparer les classements variétaux, les **mesures de hauteur** ont été analysées de façon indépendante (tableau 3). **Pour chaque méthode, l'effet variétal est toujours très significatif** ($P \leq 0,01$). Pour certaines séries de mesure, DRONE-1, RELEC-3 et DRONE-2, l'effet BLOC est aussi significatif ($P \leq 0,01$).

Les classements variétaux (test de Tukey, $P \leq 0,05$) du 21 septembre 2017 réalisés à partir des hauteurs de plantes (RELEC-1-2 et DRONE-1) mettent en évidence une différence significative minimale de 55 mm entre les variétés pour la règle électronique. Avec le drone, cette valeur est plus élevée : 69 mm.

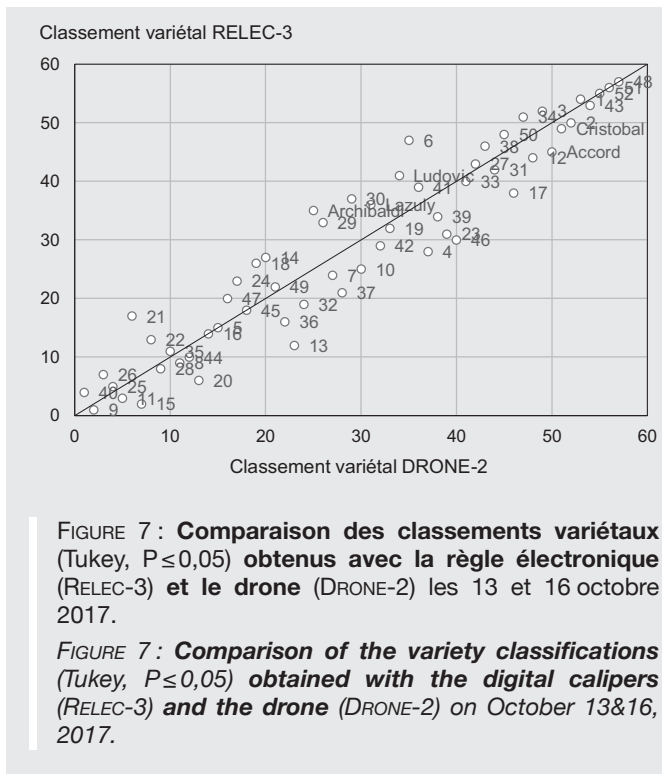
Les classements variétaux (test de Tukey, $P \leq 0,05$) réalisés les 13 et 16 octobre 2017 à partir des mesures de hauteur réalisées avec la règle électronique et le drone sont représentés sur la figure 7. La différence significative minimale entre les variétés est de 42 mm pour RELEC-3 et de 47 mm pour DRONE-2. La méthode de mesure avec le drone permet de différencier les variétés aussi bien qu'avec la règle électronique. Les cinq témoins variétaux ne sont pas différents. On note toutefois que l'ordre de ces témoins est rigoureusement le même avec les deux méthodes de mesure. A chaque date de mesure, les corrélations de

(21/09/2017)		RELEC-1-2		DRONE-1	
Facteur		F	Pr > F	F	Pr > F
VARIÉTÉ		3,00	< 0,0001	1,99	0,0010
BLOC		0,13	0,8756	4,91	0,0091

(13+16/10/17)		RELEC-3		REGLE-1		DRONE-2	
Facteur		F	Pr > F	F	Pr > F	F	Pr > F
VARIÉTÉ		2,92	< 0,0001	2,89	< 0,0001	4,05	< 0,0001
BLOC		20,39	< 0,0001	7,09	0,0013	31,55	< 0,0001

TABLEAU 3 : Résultats des analyses de variance des mesures de la hauteur des plantes réalisées le 21 septembre et les 13 et 16 octobre 2017.

TABLE 3 : Results of the ANOVA comparing the plant height measurements on September 21, and on October 13&16, 2017.



Spearman réalisées sur les rangs des variétés ne mettent pas en évidence de différence entre les méthodes.

3. Discussion

Les mesures de hauteur de plante estimées à partir de photos prises d'un drone après une étape de reconstruction 3D sont très corrélées aux mesures de hauteur classiques réalisées manuellement avec une règle électronique ou une règle graduée. Des corrélations similaires, entre des mesures de hauteur réalisées avec un laser et avec un drone, sont rapportées par MALAMBO *et al.* (2018) sur des plantes de maïs ($R^2 = 0,65$; $n = 110$) et de sorgho ($R^2 = 0,77$; $n = 250$) en micro-parcelles. Une mesure réalisée avec un drone permet de différencier les variétés quasiment aussi bien qu'une mesure réalisée avec une règle électronique et mieux qu'une mesure réalisée à la règle graduée. **La facilité d'utilisation du drone autorisera des mesures répétées permettant de reconstruire la cinétique de repousse des plantes** et ainsi de calculer la vitesse maximale de repousse qui est corrélée au rendement potentiel en peuplement dense. *In fine*, la distinction entre les variétés n'en sera que meilleure. Notre travail a porté exclusivement sur une espèce fourragère, le dactyle, et **cette méthode devra être validée** dans les mois à venir **sur les autres espèces fourragères** (graminées et légumineuses). Il s'agit de vérifier si la manière d'identifier une plante et de déterminer sa hauteur à partir des images 3D est transposable entre espèces fourragères. Pour le moment, seule la hauteur des plantes en pépinière a été prédite avec cette méthode

L'utilisation du drone permet un gain de temps dans l'acquisition des hauteurs. En effet, pour une pépinière d'environ 1700 plantes, il faut 1h30 avec le drone pour réaliser l'ensemble des photos auquel il faut ajouter

environ 1 heure de travail informatique (copie des photos, paramétrage du logiciel, vérifications des hauteurs estimées...). Comparativement pour le même nombre de plantes, 4 heures sont nécessaires à un technicien pour réaliser les mesures avec une règle électronique et 4 heures à deux expérimentateurs pour réaliser les hauteurs avec la règle graduée. Il faut aussi ajouter 15 à 30 minutes pour transférer les données et réaliser une rapide vérification des données brutes. De plus, contrairement à la règle électronique qui ne permet pas de mesurer des plantes de plus de 373 mm, le drone permet d'estimer la hauteur des plantes quelle que soit leur taille.

Le principal inconvénient de la reconstruction 3D réside dans le besoin en **ressources informatiques nécessaires**, d'une part pour reconstruire la scène en trois dimensions et obtenir le nuage de points, et d'autre part pour stocker les photos et les données du nuage de points. Pour cette pépinière de plantes isolées, le temps de calcul machine atteint presque 100 heures pour chaque vol de drone et nécessite environ 15 Go de mémoire.

Les prises de vue avec le drone, comme les mesures réalisées manuellement, nécessitent une météo clémente avec un minimum de vent afin d'assurer une reconstruction 3D de qualité.

Conclusion

Nous venons de mettre en évidence l'intérêt du drone et de la reconstruction 3D pour estimer la hauteur de plantes de dactyle dans une pépinière et classer des variétés ou du matériel en cours de sélection. D'autres informations sont accessibles *via* la reconstruction 3D comme le diamètre de la plante et son enveloppe (volume) ou par analyse d'image avec l'utilisation de la couleur pour évaluer une sensibilité à une maladie ou une entrée en sénescence. L'analyse des données avec la mise au point de la méthode de calcul pour l'obtention du diamètre et de l'enveloppe des plantes ainsi que la comparaison aux mesures réalisées manuellement sont actuellement en cours. Dans un deuxième temps, un travail va être entrepris pour déterminer l'intérêt de cette méthode pour estimer la biomasse dans des essais fourragers en micro-parcelles. En effet, cette méthode non destructive offre la possibilité d'effectuer des cinétiques de croissance qui ne sont pas réalisables actuellement sans couper le fourrage. L'utilisation de la reconstruction 3D revêt un intérêt particulier en sélection végétale et semble se limiter à ce domaine (en particulier pour réaliser des cinétiques de croissance). La faible vitesse d'acquisition des photos et le nombre important de clichés nécessaires pour obtenir une reconstruction 3D de qualité n'en font pas la méthode la mieux adaptée pour estimer la biomasse des prairies chez des éleveurs. D'autres techniques de prises de vue plus rapides (aile volante et caméra multi spectrale) avec le calcul d'indices de végétation (NDVI, GNDVI...) semblent plus appropriées.

L'utilisation de drones ou de robots de phénotypage ouvre de nouvelles perspectives en sélection végétale. Ces outils doivent permettre à terme de compléter, voire de

remplacer, des mesures manuelles ou des notations visuelles. Leur généralisation va s'accompagner de changements importants, d'un point de vue matériel avec des besoins accrus en ressources informatiques et d'un point de vue humain avec des compétences en analyse d'image et en gestion de base de données.

Accepté pour publication,
le 30 novembre 2018

Remerciements à Rodrigue Veron, Fabien Sampoux et Jessica Thoreau pour la réalisation des mesures de hauteur à la règle graduée et à la règle électronique sur la pépinière, ainsi que Thierry Bourgoïn d'Agri-Obtentions, qui nous a permis de travailler sur un de ses dispositifs expérimentaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENDIG J., BOLTEN A., BARETH G. (2013) : «UAV-based imaging for multi-temporal, very high resolution crop surface models to monitor crop growth variability», *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 6, 551-562.
- BROCKS S., BENDIG J., BARETH G. (2016) : «Toward an automated low-cost three-dimensional crop surface monitoring system using oblique stereo imagery from consumer-grade smart cameras», *J. Applied Remote Sensing*, 10, 1-19.
- CHANG A., JUNG J., MAEDA M.M., LANDIVAR J. (2017) : «Crop height monitoring with digital imagery from Unmanned Aerial System (UAS)», *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 232-237.
- COOPER S.D., ROY D.P., SCHAAF C.B., PAYNTER I. (2017) : «Examination of the potential of terrestrial laser scanning and structure-from-motion photogrammetry for rapid nondestructive field measurement of grass biomass», *Remote Sensing*, 9, 531.
- CUNLIFFE A.M., BRAZIER R.E., ANDERSON K. (2016) : «Ultra-fine landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry», *Remote Sensing of Environment*, 183, 129-143.
- FOUGÈRE M. (2016) : «Drone et prairies. Mesurer les hauteurs ou les biomasses d'herbe avec un drone», *La prairie avance, connectez-vous, Les Prairiales de Normandie*, Le Robillard, 24 novembre 2016.
- GHAMKHAR K., IRIE K., HAGEDORN M., HSIAO J., FOURIE J., GEBBIE S., FLAY C., BARRETT B., STEWART A., WERNER A. (2017) : «Using LIDAR for forage yield measurement of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) field», *Book of abstracts of the joint Meeting of EUCARPIA Fodder Crops and Amenity Grasses*, 11-14 septembre 2017, Vilnius, 57.
- HAZARD L., GHESQUIÈRE M. (1997) : «Productivity under contrasting cutting regimes of perennial ryegrass selected for short and long leaves», *Euphytica*, 95, 295-299.
- HUMPHREYS M.O. (2005) : «Genetic improvement of forage crops – past, present and future», *J. of Agricultural Science*, 143, 441-448.
- MALAMBO L., POPESCU S.C., MURRAY S.C., PUTMAN E., PUGH N.A., HORNE D.W., RICHARDSON G., SHERIDAN R., ROONEY W.L., AVANT R., VIDRINE M., MCCUTCHEN B., BALTENSPERGER D., BISHOP M. (2018) : «Multitemporal field-based plant height estimation using 3D point clouds generated from small unmanned aerial systems high-resolution imagery», *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 31-42.
- SAMPOUX J.P., BAUDOIN P., BAYLE B., BÉGUIER V., BOURDON P., CHOSSON J.F., DENEUFBOURG F., GALBRUN C., GHESQUIÈRE M., NOËL D., PIETRASZEK W., THAREL B., VIGUIÉ A. (2011) : «Breeding perennial grasses for forage usage : An experimental assessment of trait changes in diploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars released in the last four decades», *Fields Crops Research*, 123, 117-129.