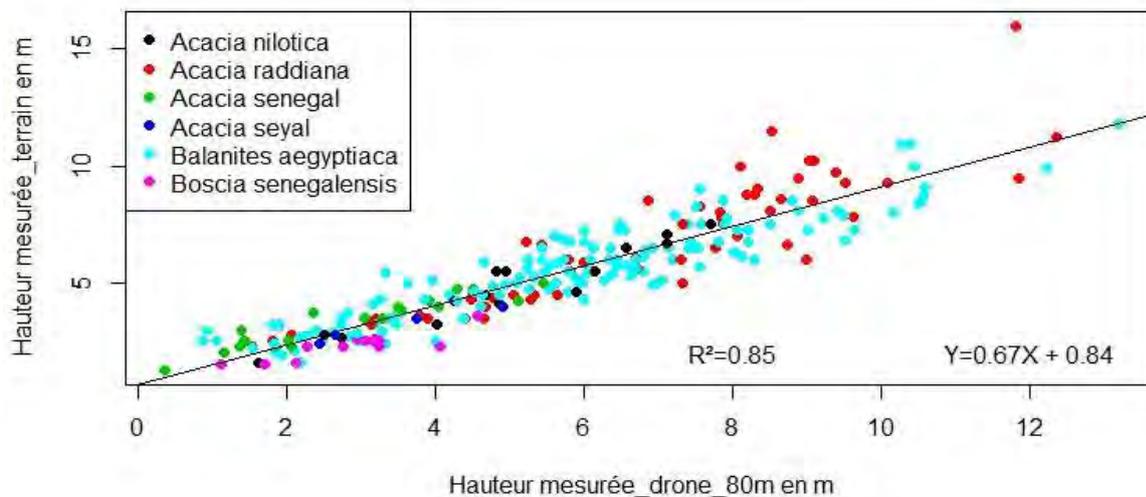


Analyse des mesures de hauteur totale de ligneux estimées par photogrammétrie

Les analyses ont été faites sur 249 individus composés de six (06) espèces végétales ligneuses avec une dominance de *Balanites aegyptiaca* (figure 16).

A. Estimation de la hauteur des ligneux à 80 m d'altitude

La comparaison des deux mesures de hauteur, montre qu'il existe une forte corrélation entre les mesures de terrain et les mesures de photogrammétrie par drone à 80 m, avec un $R^2 = 0,85$. Par ailleurs, l'analyse des résidus montre que l'identification des espèces n'améliore pas le modèle. En revanche, l'analyse des résidus par parcelle améliore légèrement le modèle. On remarque aussi que sur les 249 individus mesurés, il y a un arbre dont la hauteur mesurée par



drone ne correspond pas à la hauteur réelle.

Figure 7: Régression linéaire sur les mesures de hauteur à 80 m

B. Estimation de la hauteur totale des ligneux à 30 m d'altitude

Contrairement au résultat obtenu à 80 m sur la comparaison des hauteurs, on remarque la corrélation entre les deux types de mesure à 30 m est très faible, avec un $R^2= 0,066$.

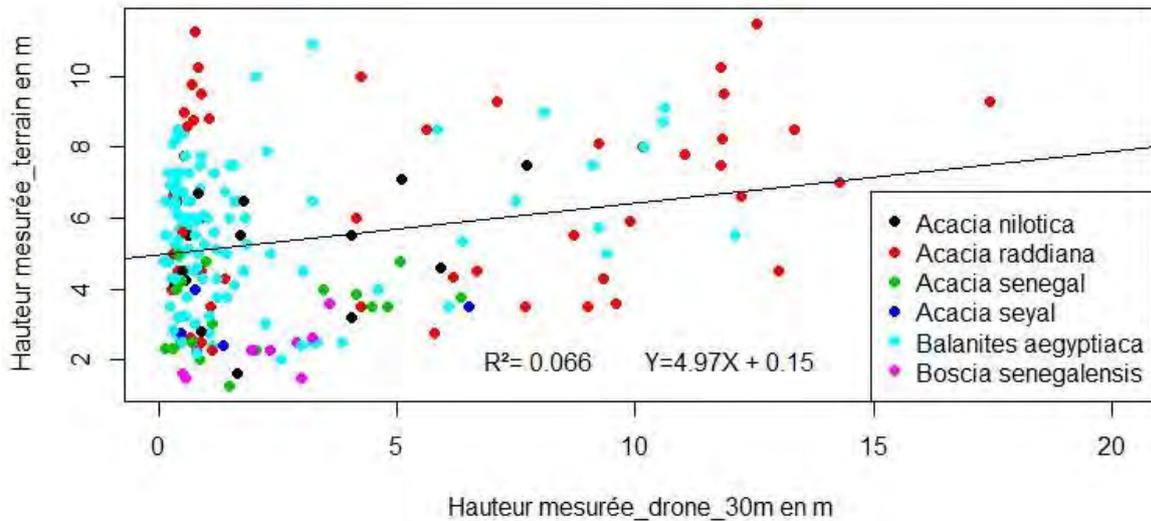


Figure 8 : Régression linéaire sur les mesures de hauteurs à 30 m

Des analyses précédentes, il ressort que la hauteur des arbres peut être mesurée par photogrammétrie par drone, mais seulement à une altitude de vol supérieure ou égale à 80 m. La précision des mesures à cette altitude (80 m) étant de 0,694 m soit 70 cm.

3. Analyse des mesures de surface du houppier estimées par photogrammétrie

La comparaison des deux types de mesures montre qu'il existe une forte corrélation entre elles aussi bien à 80 m qu'à 30 m. Dans les deux cas, l'analyse des résidus montre que l'identification des espèces n'améliore pas le modèle. Cependant, l'analyse des résidus par parcelle améliore légèrement le modèle. Aussi, on remarque que le modèle est plus significatif à 80 m ($R^2 = 0,93$), qu'à 30 m ($R^2 = 0,89$). De même, la précision du modèle à 80 m ($5,49 \text{ m}^2$) est meilleure que celle à 30m ($7,82 \text{ m}^2$).

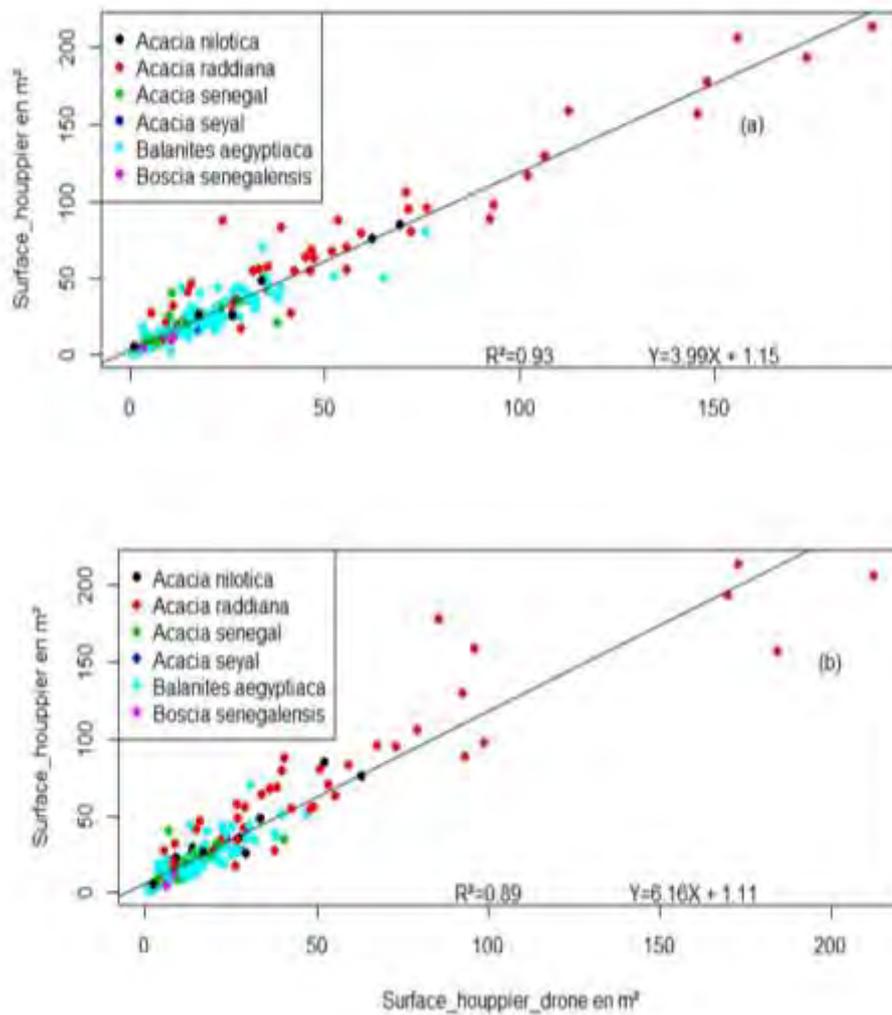


Figure 9 : Régression linéaire sur les mesures de surface de houppier à 80 m d'altitude (a) et à 30 m d'altitude (b).

Par ailleurs, de l'observation des CHM à 80 m et 30 m (figure 19), on remarque que certains arbres présents à 80 m (à gauche), n'apparaissent pas à 30 m (à droite).

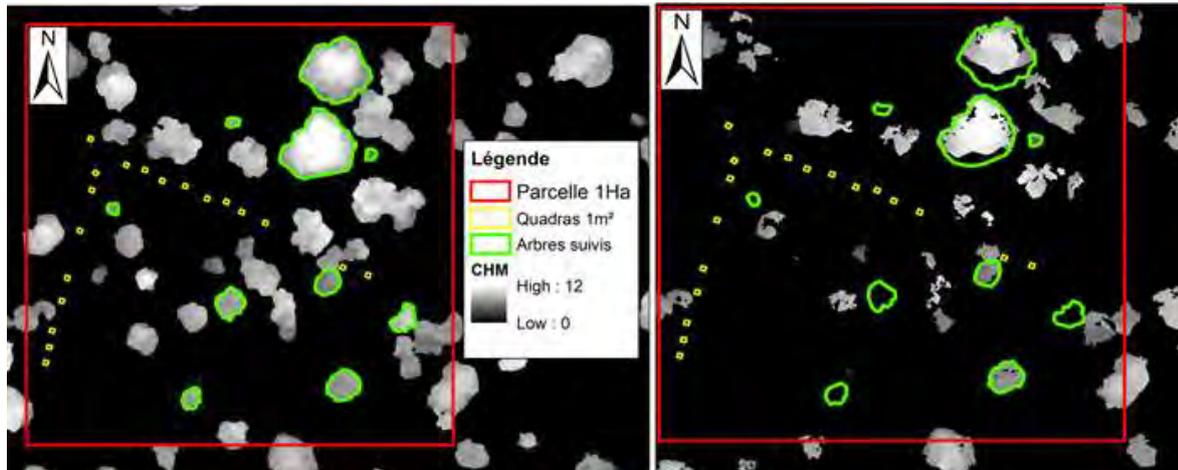


Figure 10 : Comparaison entre les CHM à 80 m (à gauche) et 30 m (à droite)

De plus, contrairement au CHM à 80 m, on remarque les arbres sont très mal représentés à 30 m. De ces analyses, on retient qu'il est aussi préférable de faire des vols à au moins 80 m d'altitude pour faire des mesures sur la surface du houppier.

Estimation des poids de biomasses fraîche et sèche des herbacées

1. Comparaison des CHM obtenus à partir du drone et de l'appareil photographique

L'orthophotographie et le CHM obtenues à 30 m pour les herbacées après traitement des images ne sont pas de bonne qualité. On remarque que l'herbe est invisible dans les quadras. Cependant, sur le CHM de la vidéo (à 1m), on les distingue bien.

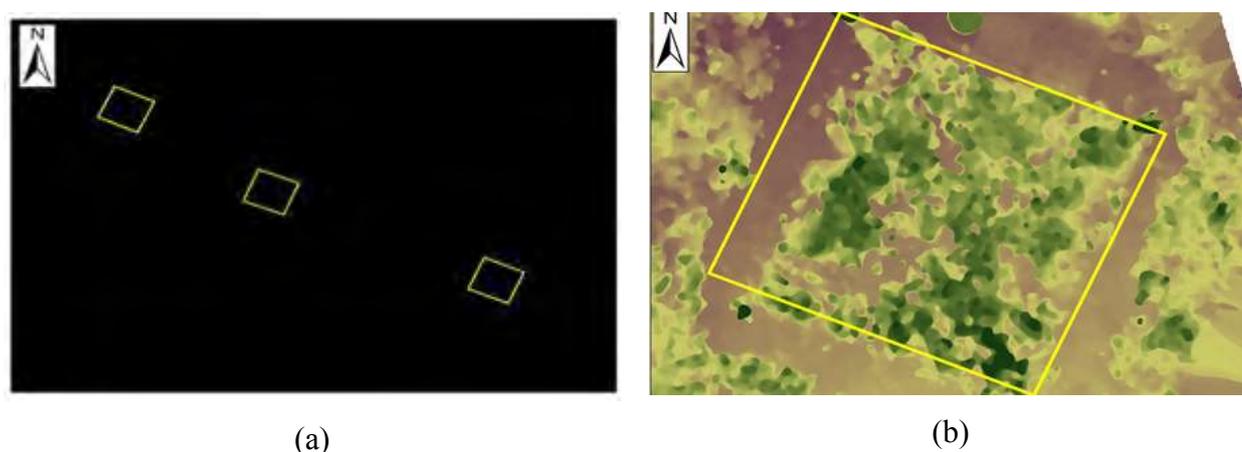


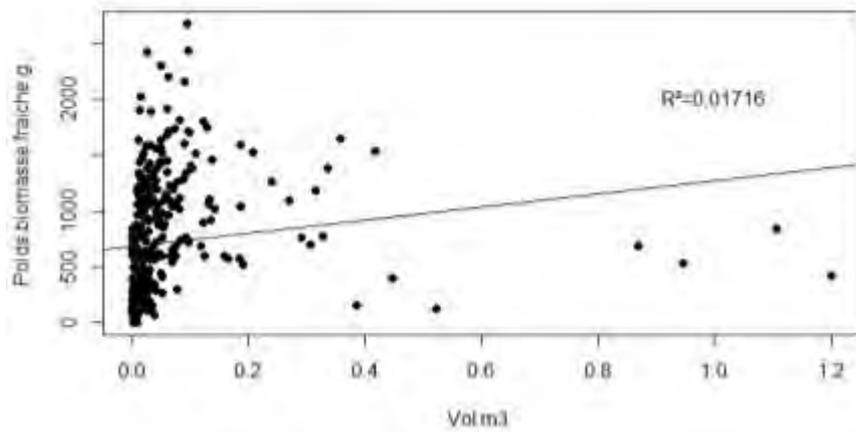
Figure 11 : Comparaison des CHM à 30 m (a) et CHM à 1m avec vidéo (b)

2. Prédiction du volume de biomasse des herbacées à partir du drone

A. Analyse de la prédiction du volume de biomasse faite avec le drone

La comparaison des mesures à 30 m, montre qu'il n'existe pas de corrélation ($R^2 = 0,017$) entre le poids de biomasse fraîche mesuré et le volume de biomasse estimé par photogrammétrie avec drone. Même-ci, l'utilisation du poids de biomasse sèche améliore un peu le modèle avec un $R^2 = 0,031$.

(a)



(b)

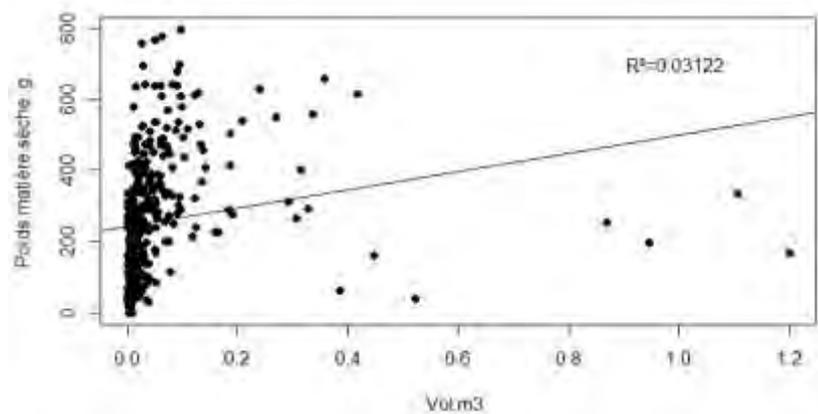
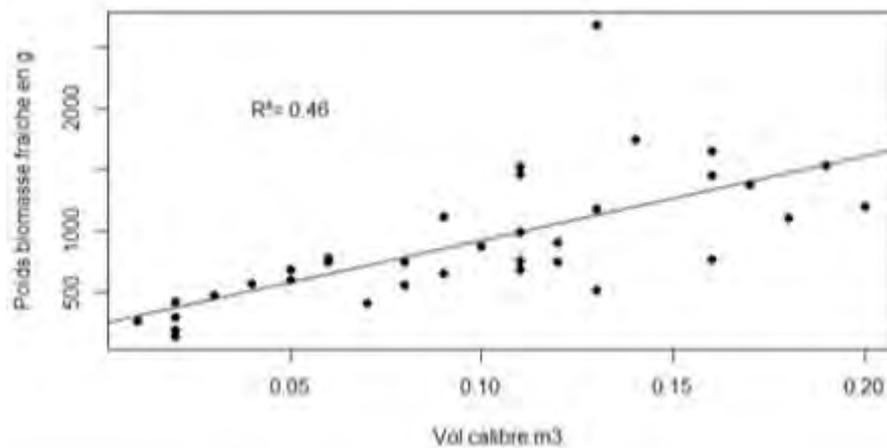


Figure 12: Prédiction du volume de biomasse avec drone ; à partir du poids de biomasse fraîche (a) et (b) : à partir du poids de biomasse sèche.

B. Analyse de la prédiction faite avec l'appareil photographique

Pour la vidéo, le modèle de la prédiction du poids de biomasse fraîche par le volume mesuré, donne un résultat significatif avec p-value : $4.12e-06$ et un $r^2 = 0,46$ (figure a). De plus, la prédiction du volume mesuré avec le poids de biomasse sèche, améliore le modèle avec un p-value : $5,848e-08$, et un $R^2 = 0,58$ (figure b).

(a)



(b)

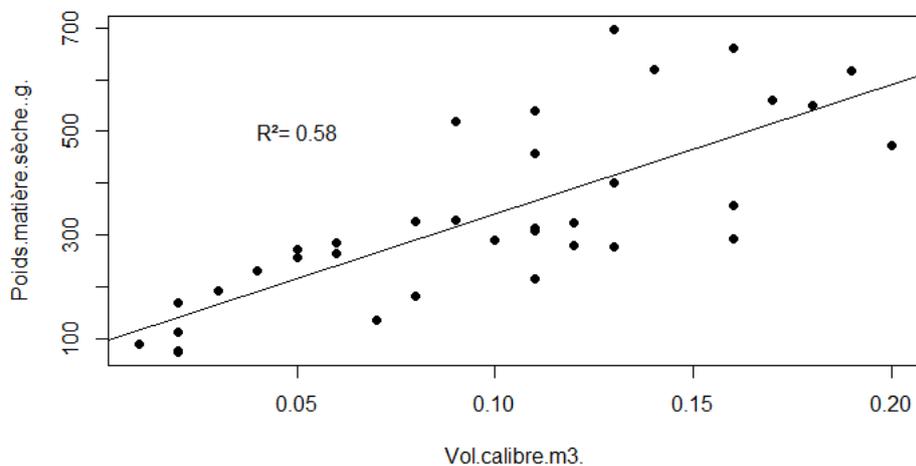


Figure 13 : Prédiction du volume de biomasse avec appareil photographique ; à partir du poids de biomasse fraîche (a) et (b) : à partir du poids de biomasse sèche.

La prédiction du volume de biomasse avec le poids frais par photogrammétrie à 30 m n'est donc pas concluante avec un drone „low-cost“ même si les résultats obtenus avec la vidéo le sont. De plus on peut noter que l'utilisation du poids de biomasse sèche pour la prédiction est préférable à celle du poids de biomasse fraîche.

DISCUSSION

Il existe peu d'étude sur l'utilisation des drones en milieu sahélien pour l'étude de la végétation naturelle. La plupart des études scientifiques faites sur la végétation naturelle en Afrique, ont été faites en milieu tropical humide [(Delley & Chatelain, 2013),(Ngabinzeke *et al.*, 2017)]. De façon générale, les résultats de cette étude montrent un bon potentiel d'utilisation de la photogrammétrie par drone pour l'évaluation des caractéristiques d'une végétation naturelle sahélienne.

1. Influence de l'Altitude de vol sur les mesures obtenues par photogrammétrie drone

Les résultats obtenus vérifient la première hypothèse de notre étude selon laquelle l'altitude de vol adapté dépend de la taille de l'objet étudié. En effet, les résultats obtenus sur les ligneux avec un vol à 80 m (figure :16) sont satisfaisants contrairement à ceux obtenus à 30m. Concernant, la surface du houppier, même s'il y a une forte corrélation entre les mesures directes de terrain et les mesures photogrammétriques aussi bien à 80 m qu'à 30 m ; le résultat à 80m est meilleur. De même, les résultats obtenus sur les herbacées avec le vol à 30 m ne sont pas satisfaisants, contrairement à ceux obtenus à 1m avec l'appareil photographique. Cette différence entre 30 m et 80 m pour les ligneux, peut s'expliquer par le fait qu'à cette altitude, la distance focale entre l'objectif de l'appareil et l'arbre photographié est insuffisante pour que le même arbre soit visible sur plusieurs photos. Ce qui a entraîné une reconstitution de mauvaise qualité et a donné un CHM peu exploitable. Ainsi, contrairement au CHM à 80 m, les arbres sont mal représentés sur celui à 30 m ; et certains notamment les petits arbres ne s'y voient pas. Il est donc préférable de faire des vols à au moins 80m pour les mesures sur les ligneux. Par rapport aux herbacées, l'effet est inverse : la distance focale est très grande ; ce qui a donné des images floues et de résolution faible, ne permettant pas de les distinguer, compte tenu de leur petite taille.

2. Précision de la hauteur totale et de la surface du houppier des arbres

Les résultats obtenus avec le vol à 80 m, ont permis une bonne distinction des arbres pour des hauteurs comprises entre 1 et 12 m avec une précision de 70 cm. De même, les mesures de hauteurs totales individuelles obtenues sont à 85% égales à celles obtenues par mesures de terrain. Ce résultat est semblable à celui obtenu par (Sarron *et al.*, 2018) dans leur étude sur des vergers de mangues au Sénégal. Cependant, ce résultat comporte quelques imperfections.

Les hauteurs ont été légèrement surestimées par rapport aux mesures de terrain, probablement à cause du niveau du sol, qui n'est pas plat. En effet, l'un des arbres mesurés se trouvait sur une termitière, et la hauteur estimée par le drone a été la hauteur de ce dernier, plus celle de la termitière. Le drone n'a donc pas pu distinguer la termitière de l'arbre. Ceci est dû au fait qu'il n'est pas possible de voir en dessous des arbres sur l'orthophotographie (obtenue par un plan de vol vertical). Notons cependant que la différence de hauteur peut également être due à la précision du dendromètre utilisé ou aux erreurs probables de mesures sur le terrain.

Par ailleurs, à 80 m d'altitude de vol, les mesures de surface de houppier obtenues par photogrammétrie sont aussi corrélées à 93% aux mesures directes de terrain avec une précision de 5,49 m². Ce résultat est favorisé par le fait que, la densité des arbres est faible, de sorte que les houppiers des arbres peuvent être assez facilement individualisés sur des photos (Picard et al., 2006). Des résultats semblables ont été aussi obtenus par d'autres chercheurs telles que (Sarron *et al.*, 2018), Lisein, (2016), Tu *et al.*, (2019), qui ont utilisé la photogrammétrie pour évaluer la surface du houppier d'un arbre. Nous pouvons donc dire que les caractéristiques (hauteur et surface du houppier) peuvent être évaluées par la photogrammétrie par drone en savane sahélienne. Cette étude a également révélé que d'autres paramètres tels que la densité d'arbre par hectare, et le taux de recouvrement peuvent être facilement évalués par photogrammétrie drone. De plus, l'utilisation de cette méthode serait plus avantageuse en termes de coût et de rapidité dans les travaux de suivi et évaluation de la végétation en milieu sahélien. Ce qui pourrait alléger la tâche aux forestiers. Cependant, le diamètre du tronc d'arbre n'a pas pu être évalué, le tronc n'étant pas visible sur les photos. De même, le volume de biomasse des arbres n'a pas pu être estimé, faute d'inexistence d'équations allométriques basées sur la hauteur et/ou la surface du houppier pour toutes les espèces étudiées.

3. Précision des volumes de biomasse des herbacées

L'évaluation du volume de biomasse par drone à 30 m n'a pas été concluante. L'utilisation du paramètre (hauteur des herbes) aurait peut-être donné un meilleur résultat. Cependant, les résultats obtenus avec la vidéo sont significatifs avec des p-values = 4,12e-06 et p-values = 5,848e-08, respectivement pour la prédiction avec poids de biomasse fraîche et celle avec le poids de biomasse sèche. De plus on peut noter que l'utilisation du poids de biomasse sèche pour la prédiction ($R^2 = 0,58$) est meilleure que la prédiction avec le poids de

biomasse humide ($R^2 = 0,46$). Ce résultat pourrait être amélioré par une analyse colorimétrique. Par ailleurs, une technique similaire pourrait être réalisée avec un appareil photo ayant des bandes de couleurs, surtout dans l'infrarouge. Il est toutefois encourageant, de savoir qu'en améliorant le protocole, on pourrait prédire la biomasse herbacée. L'utilisation de cette technique sur vidéo pourrait amener à la création d'un observatoire participatif. Ainsi, à long terme, cette technique pourrait être utilisée pour l'évaluation rapide du volume de biomasse disponible par les gestionnaires.