

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Liste des photos	vi
Liste des figures	vii
Liste des sigles et abréviation.....	viii
Résumé	ix
Abstract	x
INTRODUCTION.....	11
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	14
La photogrammétrie	14
1. Définition.....	14
2. Les logiciels de traitement photogramétrique	16
Les drones.....	18
1. Définition.....	18
3. Les différents types de drones	19
4. Les technologies des capteurs embarqués	21
5. L'importance des ligneux pour le pastoralisme.....	21
MATERIEL ET METHODES	23
Milieu d'étude.....	23
1. Végétation.....	23
2. Climat	25
3. Sols	26
Collecte des données	27
1. Echantillonnage	27
2. Acquisition des images/Drone et choix des plans de vol	28

3. Mesures directes des paramètres de la végétation	31
Traitement des données	33
1. Calcul des paramètres de végétation à partir des mesures directes de terrain	33
2. Estimation des paramètres de la végétation par photogrammétrie	34
RESULTATS	39
Estimation de la hauteur totale et de la surface du houppier des ligneux par photogrammétrie.....	39
1. Cartographie 3D à 80m d'altitude de vol	39
2. Analyse des mesures de hauteur totale de ligneux estimées par photogrammétrie ...	40
3. Analyse des mesures de surface du houppier estimées par photogrammétrie.....	41
Estimation des poids de biomasses fraîche et sèche des herbacées.....	44
1. Comparaison des CHM obtenus à partir du drone et de l'appareil photographique .	44
2. Prédiction du volume de biomasse des herbacées à partir du drone.....	44
DISCUSSION	47
1. Influence de l'Altitude de vol sur les mesures obtenues par photogrammétrie drone ..	47
2. Précision de la hauteur totale et de la surface du houppier des arbres	47
3. Précision des volumes de biomasse des herbacées	48
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
ANNEXES	56
Annexe 1 : Outline ArcGIS	56
Annexe 2 : Mesures sur les ligneux.....	63
Annexe 3 : Mesure sur les herbacées (vol à 30 m).....	71
Annexe 4 : Mesures sur les herbacées (vidéo à 1m).....	83
Annexe 5 : Publications et communications réalisés et à réaliser à partir de ce travail	84

Liste des photos

Photo 1: Images des différents types de drone selon l'altitude et l'endurance	19
Photo 2: Photos de drones à voile fixe.....	20
Photo 3: Exemples de drones à voilures tournantes.....	20
Photo 4: Photos d'illustration des services de l'arbre en zone pastorale ; (a) : vache se reposant à l'ombre d'un houppier de <i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Del., (b) : variation de la composition floristique hors et sous couvert des arbres au CRZ Dahra.	22
Photo 5 : Photos du matériel d'étude : faucille (a), drone Dji spark (b), peson (c) et appareil photographique canon (d).....	27
Photo 6: Photos des deux plans de vol utilisés.....	29
Photo 7 : Illustration du dispositif de réalisation de la vidéo (a) et exemple de sac poubelle de marquage des placettes (b)	30
Photo 8 : Illustration des points de prélèvement (a) et mesure de poids de la biomasse fraîche des herbacées (b) après le vol.....	31
Photo 9 : Illustrations des mesures des diamètres Est-Ouest (à gauche) et Nord-Sud (à droite) du houppier d'un arbre	32
Photo 10: Phase de densification des points d'une parcelle (a) et modèle 3D d'un quadra de 1 m ² (b).....	35
Photo 11: Orthophotographie d'un quadra de 1m ²	36

Liste des figures

Figure 1 : Principe fonctionnement de la photogrammétrie.....	14
Figure 2 : Carte de localisation du CRZ de Dahra	24
Figure 3 : Diagramme ombrothermique du département de Linguère 2011	25
Figure 4 : Carte de végétation du CRZ de Dahra en fonction du type de sol(Ndiaye, 2015) ..	26
Figure 5 : Sélection et délimitation du houppier des arbres à mesurer sur ArcGIS à 30 m et 80 m d'altitude sur une parcelle de 1ha délimitée par le carré rouge.....	37
Figure 6 : Cartes parcelle 2, avec (a) : orthophotographie, (b) : Modèle Numérique de Surface (MNS), (c) : Modèle numérique de Terrain (MNT) et (d) : Modèle de Hauteur de la Canopée (MHC). Le carré rouge représente la parcelle (1 ha), les petits carrés jaunes représentent les quadras (1 m ²) et les délimités en vert représentent les couronnes d'arbres suivis.....	39
Figure 7: Régression linéaire sur les mesures de hauteur à 80 m.....	40
Figure 8 : Régression linéaire sur les mesures de hauteurs à 30 m	41
Figure 9 : Régression linéaire sur les mesures de surface de houppier à 80 m d'altitude (a) et à 30 m d'altitude (b).....	42
Figure 10 : Comparaison entre les CHM à 80 m (à gauche) et 30 m (à droite).....	43
Figure 11 : Comparaison des CHM à 30 m (a) et CHM à 1m avec vidéo (b).....	44
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.	45
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.	46

Liste des sigles et abréviation

GNSS/INS : Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation system

VAA : Véhicule Aérien Autonome

3D : trois (03) dimensions

CHM : Canopy Height Model

DTM : Digital Terrain Model

CRZ : Centre de Recherche Zootechnique

ISRA : Institut Sénégalais de la Recherche Agricole

CERAAS : Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse

FST : Faculté des Sciences et Techniques

UCAD : Université Cheikh Anta Diop

DAAD : Deutscher Akademischer AustauschDienst, Office allemand d'échanges universitaires

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

SELMET : Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

HortSys: Horticol System

RGB: Red-Green-Blue

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

GPS: Global Positioning System

Résumé

L'utilisation des nouvelles technologies pour la recherche scientifique connaît un intérêt croissant ces dernières années. Elles permettent entre autres de réduire le temps de collecte des données. En effet, il est important de faire un suivi permanent de la production fourragère pour assurer la gestion durable de la filière pastorale. Ainsi, l'utilisation des drones permettra d'augmenter les missions de collecte et d'avoir des données en toutes saisons. Ce travail a donc permis principalement d'évaluer la faisabilité d'étudier la végétation sahélienne à l'aide d'un drone (Dji Spark) et d'un appareil photographique (Canon Ixus). Pour cela un protocole d'étude a été testé en tenant compte de différentes altitudes de vol (30 m, 80 m). L'objectif était de comparer des variables issues du drone avec des mesures de terrains. La collecte des données a été faite par acquisition d'images par drone sur 1 ha et par appareil photographique sur 1m² d'herbe, puis par mesure directe sur le terrain. Les paramètres mesurés sont ceux de la hauteur et du diamètre du houppier sur les ligneux ; et du poids de matière fraîche et sèche sur les herbacées. Au total, 249 arbres ont été sélectionnés sur 38 parcelles du CRZ de Dahra (ISRA) dans la zone sylvopastorale du Sénégal. Ensuite les données collectées ont été traitées par photogrammétrie à l'aide des logiciels Pix4D et Arcgis. Puis un test de corrélation linéaire a été fait dans R sur les deux jeux de données collectées, afin de comparer les mesures obtenues par drone aux mesures de terrain. Les résultats obtenus montrent que les drones low-costs peuvent être utilisés pour faire de la photogrammétrie de précision et ainsi servir à l'étude de la végétation en zone sahélienne. En effet, les mesures obtenues par drone sont corrélées aux mesures réelles à 85% pour la hauteur, et 93% pour le diamètre du houppier ; lorsque l'altitude de vol est de 80 m. Par ailleurs, la détermination des paramètres des herbacées n'a pas été possible par drone. La hauteur des herbacées étant trop petite et la végétation étant composée aussi d'arbres (hauteur supérieure à 10m). En revanche, ces paramètres ont pu être déterminés à partir de la vidéo à 1m hauteur avec un $R^2 = 0.46$ pour la prédiction avec le poids de biomasse fraîche. On note cependant une amélioration du modèle de prédiction en utilisant le poids de biomasse sèche (0.58). Nous concluons donc que la photogrammétrie par drone et appareil photographique présente un bon potentiel d'étude pour la végétation sahélienne. Les résultats obtenus pourraient être meilleurs en utilisant des drones plus performants et en améliorant le protocole.

Mots clés : Photogrammétrie, drone, appareil photographique, savane sahélienne, hauteur d'arbre, volume de biomasse, Pastoralisme, Sénégal.

Abstract

The use of new technologies for scientific research has become increasingly important in recent years. Among other things, they reduce the time required to collect data. Indeed, it is important to make a permanent follow-up of the crop production to ensure the sustainable management of the pastoral sector. The use of UAVs will thus make it possible to increase data collection missions and to have data in all seasons. This work mainly consists of assessing the feasibility of studying Sahelian vegetation using a UAV (Dji Spark) and a camera (Canon Ixus). For this purpose, a study protocol was tested considering different flight height (30 m, 80 m). The objective was to compare variables from the UAV with field measurements. The data were collected by image acquisition by UAV on 1 ha and camera on 1 m² of grass, then by direct measurement in the field. The valuables measured are those of crown's diameter and height on trees, and weight of fresh and dry matter on herbaceous plants. A total of 249 trees were selected from 38 plots of the agronomic research center of Darha (ISRA) in the sylvopastoral zone of Senegal. Then the collected data were processed by photogrammetry using the Pix4D and Arcgis software. Then a linear correlation test was performed in R on the two sets of data collected, to compare the measurements obtained by UAV with the field measurements. The results show that low-cost UAVs can be used for precision photogrammetry to study vegetation in the Sahelian zone. Indeed, the measurements obtained by UAV are correlated to the real measurements at 85% for the height, and 93% for the crown's diameters, when the flight altitude is 80 m. In addition, the determination of herbaceous parameters was not possible by UAV. The height of the herbaceous plants is too small and the vegetation is also composed of trees (height greater than 10 m). However, these parameters could be determined from the video at 1m height with a $R^2 = 0.46$ for prediction with the weight of fresh biomass. However, there is an improvement in the prediction model using the weight of dry biomass (0.58). Therefore, we conclude that photogrammetry by UAV and camera has good study potential for Sahelian vegetation. The results obtained could be better by using more efficient UAV and improving the protocol.

Keywords: photogrammetry, UAV, camera, tree height, Sahelian savanna, herbaceous biomass, pastoralism, Senegal.

INTRODUCTION

Le Sahel est une large entité biogéographique située entre l'équateur et le tropique du Cancer. Il est définie par un climat tropical, aride à semi-aride et s'étend sur dix pays dont le Sénégal (Hiernaux & Houérou, 2006). La distribution des précipitations au cours de la saison des pluies constitue l'un des facteurs déterminants de la diversité et de la production du couvert végétal (Hiernaux & Houérou, 2006). Au Sénégal, la saison des pluies ne dure que trois (03) mois sur douze (12) dans l'année. Ainsi, l'évolution de la végétation qui y est fortement liée, se trouve très affectée. À ces changements climatiques, s'ajoutent les actions anthropiques telles que les défrichements avec l'avancée du front agricole, l'urbanisation galopante en zones urbaines et périurbaines, les feux de brousse pour la pâture, etc. Ceci rend la disponibilité du fourrage très limitée pour les éleveurs, et les oblige à se déplacer. En effet, le nombre d'éleveurs pasteurs dans le monde est estimé entre 22 millions et plus de 200 millions. La plus grande partie d'entre eux se trouve en Afrique Sub-saharienne, où le pastoralisme est commun sur une région qui s'étend du Sénégal jusqu'à la Somalie (Jenet *et al.*, 2016).

Au Sénégal, la zone sylvopastorale (Ferlo), située au Nord et vaste de 55 561 km² (Beye, 2015), subit un processus de désertification assez avancé avec une disparition marquée du couvert végétal par la sécheresse et l'émondage abusif des ligneux par les éleveurs (Fall, 2008). De plus, on observe une forte variabilité interannuelle de la production fourragère, associée à de grandes fluctuations temporelles de la disponibilité fourragère en quantité et en qualité (Garba, 2017). Il est alors nécessaire de mettre en place des méthodes précises d'estimation de ces productions fourragères en fin de saison des pluies, en vue de faire une gestion efficace et efficiente de cette zone pour les neuf mois de la saison sèche qui suivent. Ceci évitera la surexploitation des zones de pâturage. La gestion du couvert végétal des pays sahéliens se pose donc comme un enjeu majeur pour la survie de la filière pastorale, mais aussi pour la conservation de la diversité végétale.

Cependant, les informations requises aux gestionnaires pour faire face à ce problème sont difficiles à collectées. D'habitude, ces informations s'acquièrent par des mesures de terrain exigeantes en moyens financiers et humains, et qui nécessitent beaucoup de temps. De fait, la rareté des missions de collecte entraîne un manque de données sur les productions fourragères annuelles. Or, Ces informations doivent être précises, peu coûteuses, géolocalisées et à jour. C'est ainsi que les chercheurs (forestiers en particulier) ont commencé à utiliser de manière récurrente les techniques de la télédétection dans leurs démarches

d'inventaire et de cartographie de la ressource forestière (Koch *et al.*, 2008). Ces techniques de télédétection sont aussi bien terrestres que satellitaires et aéroportées. Elles offrent la possibilité au gestionnaire d'appréhender de larges surfaces et d'y mener à bien un aménagement et une gestion sur le long terme. En utilisant ces techniques de télédétection, il est possible de s'affranchir des mesures de terrain fastidieuses et de caractériser la végétation en mettant en évidence de manière plus exhaustive leur variabilité spatiale. Mais l'utilisation des satellites à très haute résolution (résolution spatiale inférieure à 5m) est coûteuse et difficile à appliquer par temps couvert (forte couverture nuageuse pendant la saison des pluies).

Ainsi, l'avènement des drones et leur utilisation dans les domaines de la foresterie et de l'écologie pourrait aider à résoudre ce problème. En effet, le drone a pour but d'acquérir rapidement et à moindre coût des images à haute résolution, du fait de la faible hauteur de vol. Par rapport aux autres plateformes d'acquisition aériennes comme les satellites ou les avions, le drone permet d'acquérir des images à une résolution plus élevée, avec un coût d'exploitation plus faible sur les petites superficies (Matese *et al.*, 2015). De plus, la miniaturisation des capteurs, l'ère de l'imagerie numérique et les avancées en traitement d'images, portées par la grande puissance de calcul aujourd'hui disponible, promettent au secteur de la cartographie par drone de nombreuses perspectives (Remondino, 2011).

L'omniprésence de la photographie numérique et l'amélioration continue de la puissance de calcul des ordinateurs rendent aujourd'hui les techniques de photogrammétrie attrayantes et concurrentielles (Pierrot-Deseilligny & Clery, 2011). L'approche de la photogrammétrie par drone a pour avantages la facilité d'acquisition des images et l'existence d'outils peu onéreux. Néanmoins, bien que la technologie des plateformes drones ainsi que celle des capteurs soient maîtrisées, les applications possibles en écologie n'en sont pas toutes explorées.

L'objectif général de cette étude est d'élaborer un protocole d'étude par photogrammétrie, de la végétation de savanes sahéliennes à partir d'appareil photographique compact et de drones low-cost. Spécifiquement, il s'agit de :

- Déterminer les caractéristiques (hauteur totale, surface du houppier, volume de biomasse) des ligneux par cartographie 3D d'une parcelle à partir d'imagerie drone
- Déterminer les caractéristiques (volume de biomasse fraîche et sèche) des herbacées ;

- Comparer les mesures obtenues par photogrammétrie aux mesures de terrain.

À la suite de ces objectifs, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- en photogrammétrie, l'altitude de vol dépend de la taille de l'objet dont on veut mesurer les caractéristiques ;
- les caractéristiques issues d'images (à haute résolution) de drone ou appareil photographique compact sont de bons indicateurs des mesures directes de terrain ;
- la photogrammétrie au sol (par appareil photographique) est meilleure que la photogrammétrie par drone pour mesurer les caractéristiques des herbacées.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

La photogrammétrie

1. Définition

Découverte par le colonel français Aimé Laussedat en 1859, qui l'exposa à l'Académie des Sciences, la photogrammétrie fut ensuite fortement développée en Allemagne (Deplancke, 2014). Ainsi, d'après (Grussenmeyer, 2016), ce mot a été utilisé pour la première fois dans une citation en 1893, par l'architecte allemande Albrecht Meydenbauer en associant trois mots grecs : "photos" (lumière), "gramma" (quelque chose d'écrit) et "metrein" (mesure). C'est donc une technique permettant de reconstituer la forme et la position d'objets en trois dimensions sans les toucher (figure 1), à partir d'un minimum de deux photographies en deux dimensions, en utilisant la parallaxe obtenue entre ces images acquises selon des points de vue différents (Kraus & Waldhäusl, 1998). Les résultats sont ensuite utilisés sous forme de points, de modèles en trois dimensions ou d'images. Ainsi, tout ce qui peut être photographié, peut être modélisé et mesuré (Deplancke, 2014). On peut aussi la définir comme une technique de mesure qui, à partir d'informations en 2D, permet de retrouver la dimension et la position des sujets enregistrés. Elle comprend toutes les techniques qui permettent l'extraction de grandeurs depuis une photographie. Ce sont des techniques utilisant la photographie essentiellement comme un objet d'étude : l'analyse de l'image permet d'extraire une information métrique de l'objet d'intérêt (Lanzi & Margot, 2009). Par ailleurs, le principe de la photogrammétrie est de comparer deux photos d'un même objet, prises de deux points de vue différents.

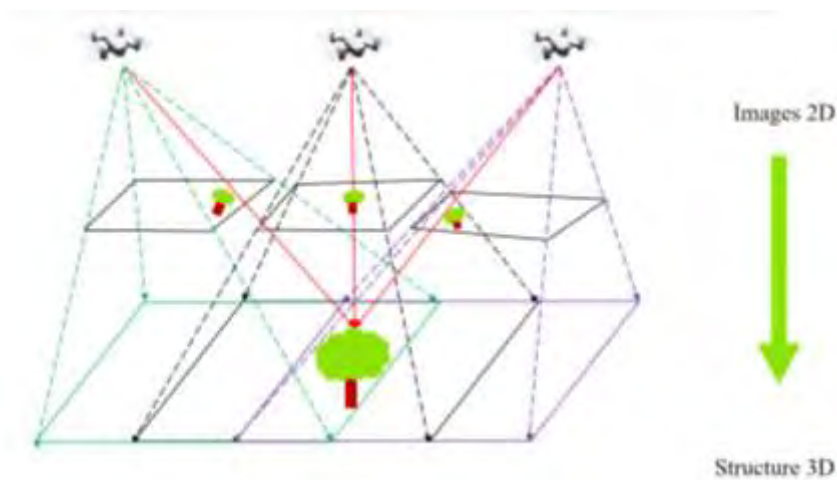


Figure 1 : Principe fonctionnement de la photogrammétrie

Il est donc nécessaire de prendre au moins deux photos du même objet pris à des positionnements différents pour qu'il soit placé dans l'espace après traitement informatique. Il faut aussi noter que la multiplication des photos permet d'augmenter la précision globale d'un modèle ainsi que de faciliter le traitement informatique en ajoutant des données complémentaires au modèle (Arles *et al.*, 2011). Cependant, lors de la photographie, les données 3D sont réduites sur une surface en 2D. Ce changement enlève l'information de la profondeur (ou de la hauteur). La photogrammétrie à travers ses techniques permet donc de retrouver l'information 3D par l'analyse de données en 2D. Ce principe peut être illustré par le mécanisme du système visuel humain. En effet, les yeux fournissent, entre deux battements de cil, deux images légèrement différentes. Le cerveau analyse ces deux images et restitue une seule image, avec une information ajoutée : le relief de la scène. Cette capacité à percevoir la 3D est également liée à l'éloignement et à la taille des objets regardés : il faut en général s'éloigner d'un objet relativement grand pour le voir en entier ; et au contraire se rapprocher d'un petit objet pour en apercevoir les détails. Cet exemple dévoile aussi les deux étapes principales du travail photogrammétrique. La première étape consiste à collecter les informations, dans l'exemple précédent, les images créées par les yeux. La deuxième étape consiste à traiter ces données de manière à évaluer des distances sur les sujets présents sur les images.

Le principe de fonctionnement de la photogrammétrie consiste à appairer chaque pixel d'une image à son homologue sur une autre image afin de pouvoir quantifier la parallaxe pour reconstituer l'altitude de cet objet. Traditionnellement, les algorithmes de mise en correspondance n'utilisaient qu'une seule paire d'images stéréoscopique ce qui limitait le nombre d'appariements pour un objet donné. Désormais, l'augmentation du recouvrement rendu plus accessible par l'imagerie numérique permet de voir un objet sur plus de deux clichés et offre ainsi, la possibilité de le voir sous plusieurs angles de vue. Ce qui facilite l'appariement d'images et le rend plus robuste (Audet, 2017). De plus, le développement d'algorithmes tenant compte de l'environnement du pixel plutôt que la valeur radiométrique ou la détection d'éléments caractéristiques a aussi évolué. Ces algorithmes permettent l'automatisation presque complète des étapes de correspondances entre images qui réduisent considérablement les étapes manuelles associées au stéréo-appariement (Leberl, *et al.*, 2010). L'avantage d'utilisation de ces algorithmes est de pouvoir créer un nuage de points photogrammétriques (NPP) tridimensionnels dont la densité est théoriquement équivalente à un point par pixel. Par exemple, une résolution de 10 cm engendre une densité de points de

100 points/m² (Audet, 2017). On distingue deux principales catégories de photogrammétrie que sont : la photogrammétrie aérienne et la photogrammétrie terrestre.

La photogrammétrie aérienne est caractérisée par un appareil photographique monté sur un véhicule volant (avion, hélicoptère...). Les images sont généralement prises verticalement, vers le sol, en suivant un plan de vol défini au préalable (Deplancke, 2014). Elle peut être qualifiée de « *photogrammétrie aérienne rapprochée* », lorsque les photographies sont prises à moins de 300m d'altitude, ou de « *photogrammétrie aérienne à grande distance* », quand les photographies sont prises à une altitude supérieure à 300m (Lanzi & Margot, 2009).

La photogrammétrie terrestre quant à elle, concerne les photographies prises à l'aide d'appareil habituellement situé à une distance de l'objet comprise entre 1 et 100 mètres. C'est le type de photogrammétrie le plus couramment utilisé, car il demande peu de moyens et est facile à mettre en œuvre (Deplancke, 2014). Elle se fait à l'aide des appareils telle que les appareils photographiques numériques.

2. Les logiciels de traitement photogrammétrique

L'utilisation des logiciels photogrammétriques est nécessaire pour la construction de modèle tridimensionnel (3D) à partir de photographies bidimensionnelles. Ainsi, on distingue, les logiciels photogrammétriques libres et commerciaux et les solutions cloud. Ce sont des solutions logicielles automatisées, qui permettent d'informatiser le calcul des orientations et de rendre la création de nuage de point entièrement automatique. Ces logiciels diffèrent selon leur coût d'acquisition, leur rapidité de calcul, leur capacité à produire un modèle de qualité, leurs outils permettant d'orienter et de mettre à l'échelle les modélisations (Arles *et al.*, 2011).

▪ **Les solutions cloud**

Ils sont principalement destinés au grand public, et permettent notamment de traiter des images qui n'ont pas été acquises selon un protocole photogrammétrique strict, au prix d'une reconstruction parfois approximative. On peut citer par exemple les logiciels 123D Catch (développé par Autodesk) et Photosynth (développé par Microsoft), utilisés par (Arles *et al.*, 2011), dans leur étude sur la « *photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière* ». Ils

sont gratuits et peuvent être téléchargés librement. On a aussi, Photomodeler implémenté dans windows (Murtiyoso *et al.*, 2016), qui lui par contre n'est pas gratuit.

- **Les logiciels libres**

Ce sont des logiciels gratuits encore appelés « Open source », qu'on peut télécharger, utiliser sans condition et même modifier pour l'adapter à un usage précis. On peut citer les logiciels Apero et Micmac (développés par le laboratoire MATIS de l'IGN), *VisualSFM*, et *PMVS* (Patch-based multi-view stereo) qui ont été testés par (Murtiyoso *et al.*, 2016) pour sa recherche. D'après ce dernier, les logiciels *Apero* et *Micmac* sont utilisés en complémentarité. En effet, le premier fournit les orientations de chaque prise de vue ainsi que le résultat de calcul d'auto-calibration. Ensuite le second utilise ces résultats pour créer le nuage de points dense. De même pour les logiciels *VisualSFM* et *PMVS* : *PMVS* effectue son appariement stéréo-vues en commençant par un nuage clairsemé généré par *VisualSFM*.

- **Les logiciels commerciaux**

Ce sont des logiciels vendus par des sociétés spécialisées en la matière et dont l'utilisation est conditionnée par l'achat d'une licence d'utilisation. Ils ont un fonctionnement professionnel et ne sont pas modifiables à cause de la fermeture de leur code source. De plus, ils ont pour avantage la possibilité d'utiliser des points d'appui qui permet ainsi de compenser d'éventuelles dérives, mais aussi de qualifier la précision des calculs (Tournadre, 2015). Il en existe plusieurs dont on peut citer entre autres : Photoscan de la société Agisoft, SURE, et Pix4D, cité par (Murtiyoso *et al.*, 2016). Par ailleurs, celui utilisé pour ce travail est le logiciel Pix4D. Il a été conçu par une société dérivée de l'école polytechnique fédérale de Lausanne spécialisée dans le traitement des images. Un rapport relativement complet est produit à la fin de chaque étape de traitement, ce qui permet de contrôler le résultat.

Les drones

1. Définition

Les drones sont, par définition, des aéronefs (machine volant plus lourd que l'air, par opposition à aérostats : plus légers que l'air) capables de voler et d'effectuer une mission sans présence humaine à bord. Cette première caractéristique essentielle justifie leur désignation de Unhabited (ou Unmanned) Aerial Vehicle (UAV) (Mecili & Chriette, 2012). Ils permettent d'embarquer des charges utiles permettant de réaliser des missions diverses et variées. Cependant, les spécialistes préfèrent parler de « Systèmes drones », puisque le drone n'est en fait qu'un des éléments d'un système, conçu et déployé pour assurer une ou plusieurs missions. En effet il est constitué de deux sous-ensembles principaux (Mecili & Chriette, 2012) :

- Un segment "air" constitué d'un ou plusieurs drones, porteurs de la charge utile adaptée à la mission (ex : caméra gyrostabilisée et/ou infrarouge, radar, brouilleurs, etc.) et des équipements de transmission.
- Un segment "sol" comprenant l'ensemble des matériels nécessaires à la préparation, à la mise en œuvre (ex : station de contrôle pilotage de la plate-forme, exploitation des données, communication, lancement et récupération des drones, etc.) et au soutien logistique (ex : maintenance et reconditionnement, etc.) du système.

À l'origine, le drone a été conçu à des fins militaires telle que la surveillance, reconnaissance et inspection autonome. Le premier développement de drone a été fait en août 1960 par les américains dans le but d'éviter les pertes en vie humaine lors de missions de reconnaissance stratégique (Noël, 2013). Depuis, le domaine d'utilisation de ces derniers s'est largement diversifié avec le développement de drone de plus en plus légers et petits en taille. Son dimensionnement est déterminé par la nature de sa mission et sa charge utile. De plus, Remodino en 2014 a remarqué que le succès du drone est aussi dû à la disponibilité des plateformes à bas coûts combinées avec des appareils photos et des systèmes de GNSS/INS (Murtiyoso *et al.*, 2016). Aujourd'hui, les progrès réalisés, à la fois dans les performances des drones et leurs équipements, leur confèrent un très large potentiel d'utilisation dans le domaine civil. Ils sont ainsi, aussi bien utilisés pour les loisirs que pour la recherche et le développement.

3. Les différents types de drones

Selon (Koehl, 2012), les caractéristiques techniques d'un VAA dépendront des missions auxquelles il pourra être employé et par conséquent son appartenance à une famille de drone. Les auteurs tels que [(Fritsch & Cramer, 2013), (Remondino *et al.*, 2014)] cité par (Murtiyoso *et al.*, 2016), ont tous catégorisés les différents types de drones dans leurs travaux à leur façon. Néanmoins, tous les trois s'accordent sur les critères de taille, de poids, d'endurance et d'altitude de vol. En fonction l'altitude et de l'endurance, on peut classer les drones en trois catégories principales (figure 2) : les drones de Moyenne Altitude et Longue Endurance (MALE), les drones de Haute Altitude et Longues Endurances (HALE) et les drones tactiques (Rida & Cherki, 2015).



Photo 1: Images des différents types de drone selon l'altitude et l'endurance

Par ailleurs, en fonction de leur structure physique, on distingue deux catégories principales de drones : les voilures fixes et les voilures tournantes.

- **Les voilures fixes** (figure 3): ce type de drone suit le principe de fonctionnement des avions classiques avec une ou plusieurs hélices et un sens de vol rectiligne dite de vol d'avancement (Murtiyoso *et al.*, 2016). Il est destiné à des missions de plus grande portée (plusieurs centaines de kilomètres) où le véhicule a besoin d'une forme aérodynamique lui permettant de minimiser sa dépense d'énergie pour atteindre son but et revenir. De plus selon leur mode d'alimentation, on distingue les voilures fixes équipées d'un moteur thermique qui lui permet une plus grande autonomie (3 heures et des altitudes de 3000 mètres) et les voilures fixes équipées d'un moteur électrique alimenté par des batteries Lithium qui limitent l'autonomie (1heure et un plafond aérien de 300 mètres)(Achette *et al.*, 2005). C'est le plus adapté pour le besoin de la

photogrammétrie classique, étant donné que sa surface de recouvrement est beaucoup plus grande que celles des drones à voilures tournantes. Mais l'inconvénient avec ce type de drone, est sa basse résistance au vent ainsi que sa limite de poids (Murtiyoso *et al.*, 2016).



Drone agricole à voilure fixe eBee SQ



Drone à voilure fixe DT26X LIDAR

Photo 2: Photos de drones à voilure fixe

- **Les voilures tournantes** (figure 4): On distingue les convertibles, les voilures tournantes carénées et les voilures tournantes à multiples hélices (Pflimlin *et al.*, 2006). Ce sont des drones qui répondent aux exigences de vol en déplacement rapide à basse altitude et le vol quasi-stationnaire, qui nécessitent des qualités aérodynamiques souvent antagonistes (Koehl, 2012).



Parrot MiniDrone Airborne Night Swat



drone octorotor / civil HT-8, HT-8 C

Photo 3: Exemples de drones à voilures tournantes

Le drone utilisé pour la réalisation de cette étude est le drone Spark de la marque DJI. C'est un drone à voilures tournantes à multiples hélices (quadrirotor). Grâce à son système optique et à son système de détection 3D, le Spark peut filmer des vidéos 1080p, prendre des photos d'une résolution de 12 mégapixels, avec une vitesse de vol maximale de 50 km/h (31 mph) et une durée de vol maximale de 16 minutes (on peut augmenter le nombre de batterie rechargeable). Il est composé d'un module infrarouge 3D situé à l'avant de l'appareil, qui recherche les obstacles pendant le vol. Ce qui lui permet d'éviter les obstacles. Par ailleurs, il dispose aussi d'une fonction „Go home” qui lui permet de retourner à son point de départ lorsque la batterie est trop faible (“Dji spark: guide de l'utilisateur,” 2017). Enfin, c'est un des drones les moins chères (500 euros) dans le commerce.

4. Les technologies des capteurs embarqués

Grâce aux progrès de la miniaturisation, de nombreux capteurs sont suffisamment petits pour être embarqués sur drones. Parmi ces capteurs, trois sont principalement utilisés en agriculture : les capteurs RGB, qui captent la lumière visible, les capteurs proche-infrarouges destinés à calculer des indicateurs comme le NDVI, et des capteurs thermiques, capables de déterminer la température de tous les points de l'image enregistrée. Le capteur embarqué sur le Dji de spark est le RGB qui capte la lumière visible.

5. L'importance des ligneux pour le pastoralisme

Le pastoralisme est un mode de vie reposant principalement sur la libre pâture des animaux, pratiqué par les communautés dans des zones considérées comme „marginales” à cause du manque d'eau, de la qualité médiocre du terre (non propice à l'agriculture), des températures extrêmes, etc. Dans ces conditions difficiles des zones arides, les éleveurs sont obligés de se déplacer constamment en quête de pâturage plus vert, et de milieu aux conditions climatiques plus favorables. Ainsi, l'introduction et/ou la préservation des arbres dans les pâturages pourrait être un élément clé dans la prévention de la désertification et l'amélioration du quotidien des pasteurs. En effet, les arbres représentent une source

importante d'alimentation animale, de matériaux de construction et de combustible mais aussi d'ombre (Jenet *et al.*, 2016).

Par exemple, en saison sèche, lorsque l'herbe devient rare et subsiste à l'état de paille, les animaux ont recours aux ligneux fourragères pour combler le déficit alimentaire (Sarr *et al.*, 2013; Bakhoum *et al.*, 2020). De plus, d'après les résultats de (Béral *et al.*, 2018) sur « *la production fourragère herbacée en agroforesterie* » ; la densité d'arbres et la manière dont les houppiers sont gérés, sont susceptibles d'impacter les quantités d'herbe produites, la phénologie de la prairie et sa valeur nutritive. Aussi, d'après nos observations personnelles sur le terrain, on remarque que le tapis herbacé est plus dense et vert sous les arbres ; et que la composition floristique est aussi différente (photo b). En effet, l'arbre modifie les conditions de microclimat, de distribution et d'infiltration de l'eau dans le sol, et améliore la fertilité du sol. Ce qui améliore la production fourragère.

Par ailleurs, les éleveurs associent généralement à leurs arbres des fonctions de maintien du bien-être des troupeaux et de production (fruits, bois, etc.) qui confèrent à ces surfaces des intérêts supplémentaires (Béral *et al.*, 2018). Le bétail peut se reposer sous les houppiers quand il fait très chaud (photo a), ce qui est important surtout dans ces régions où la température peut être extrême.



(a)



(b)

Photo 4: Photos d'illustration des services de l'arbre en zone pastorale ; (a) : vache se reposant à l'ombre d'un houppier de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., (b) : variation de la composition floristique hors et sous couvert des arbres au CRZ Dahra.

MATERIEL ET METHODES

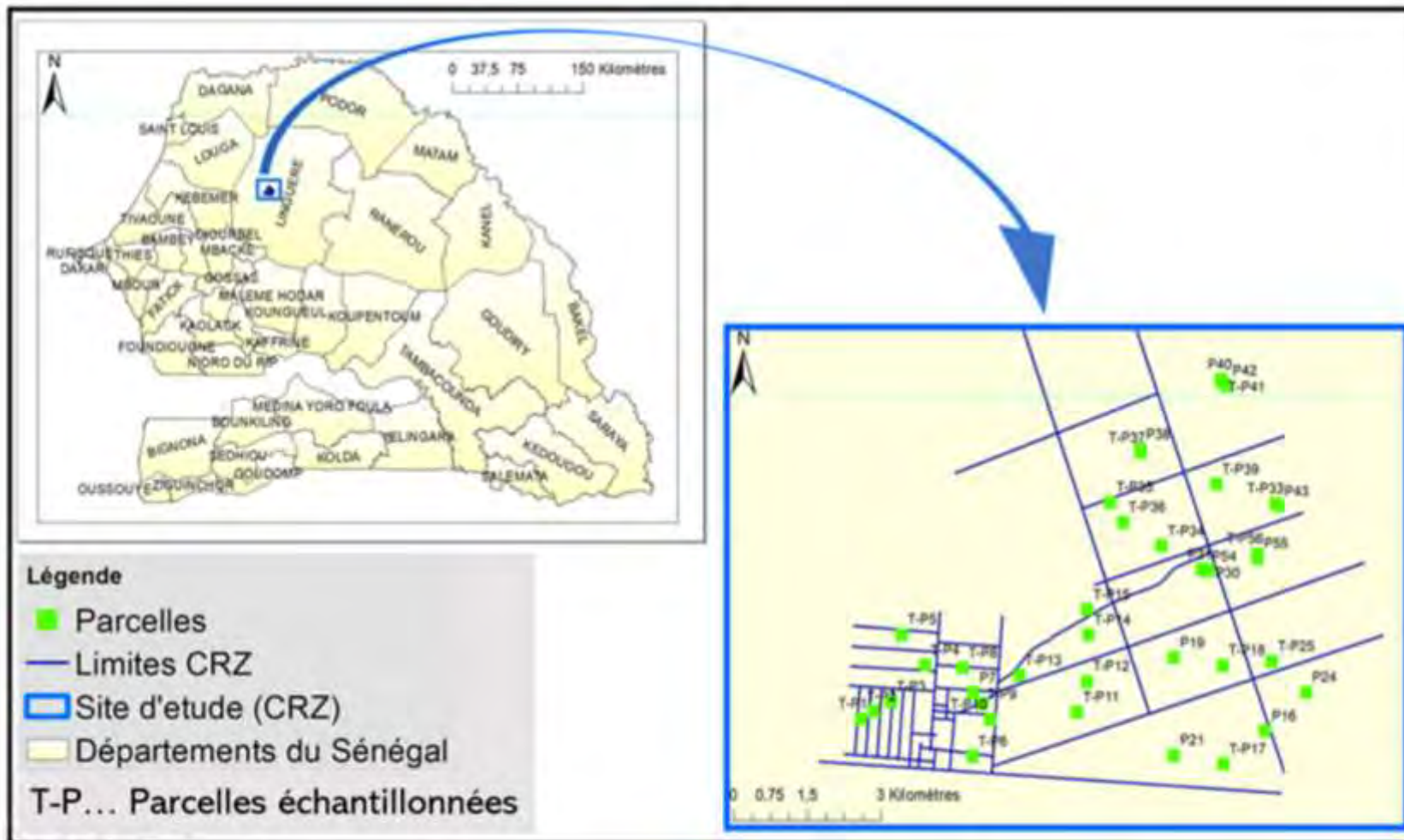
Milieu d'étude

Ce travail a été réalisé au Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Dahra, dans la région sylvopastorale du Ferlo, au Nord du Sénégal (figure 6). Ce centre a été créé en 1950, et est situé approximativement à 15°21 de latitude Nord et à 15°28 longitude Ouest. La commune de Dahra fait partie du département de Linguère, et est délimitée au Nord par la commune de Kamb et au Sud par celle de Thiamène. Le CRZ de Dahra forme une concession de 6800 ha divisée en deux parties juxtaposées, et est géré par l'ISRA. La petite concession de 900 ha abrite tous les bâtiments techniques, administratifs et les logements du personnel. La grande concession de 5900 ha comprend les terres destinées aux parcours des animaux et pour d'autres activités sylvopastorales (parcelles de production de semences, de recherches sur les essences forestières etc.) (Ndiaye, 2015).

1. Végétation

D'après (Ndiaye, 2015), la végétation du centre est très liée au type de sol et à la pluviosité. Ainsi, on observe :

- sur dune de sable, le tapis herbacé est abondant et se compose principalement de graminées annuelles. La strate ligneuse y est peu développée avec une prédominance des espèces telles que : *Combretum glutinosum*, *Balanites aegyptiaca*, *Dichrostachys glomerata*, *Boscia senegalensis*, *Guiera senegalensis*, et *Commiphora africana* ;
- dans les dépressions, le peuplement ligneux est dense. La végétation herbacée est surtout représentée par des graminées pérennes telle que : *Andropogon gayanus*, *Aristida sieberiana*, *Aristida stipoides*, *Eragrostis tremula*, etc.



Bossoukpe, 2019

Figure 2 : Carte de localisation du CRZ de Dahra

2. Climat

Le Ferlo représente la partie la plus aride et la plus chaude du Sahel sénégalais avec un climat de type tropical de mousson, semi-aride, monomodal à variante très chaude (Assouma, 2016). Le CRZ de Dahra présente une pluviométrie moyenne de 371,67 mm sur une période de 50 ans. Cette pluviométrie s'étend entre fin juin et début octobre avec un cumul moyen mensuel de 35,95 mm (sur 50 ans). Elle présente de très fortes irrégularités dans la répartition et une grande variabilité quantitative d'une année à l'autre. De plus, la température varie tout au long de l'année avec une moyenne de $29,81 \pm 2,17$ °C, un maximum de $41,06 \pm 0,72$ °C au mois de mai et un minimum de $18,84 \pm 0,84$ °C en janvier. Par ailleurs, l'humidité relative moyenne est de $43,75 \pm 17,02$ %, le vent souffle en moyenne avec une vitesse de $1,45 \pm 0,25$ m/s ; et l'insolation moyenne est de $8,24 \pm 0,93$ heures/jour (Ndiaye, 2015).

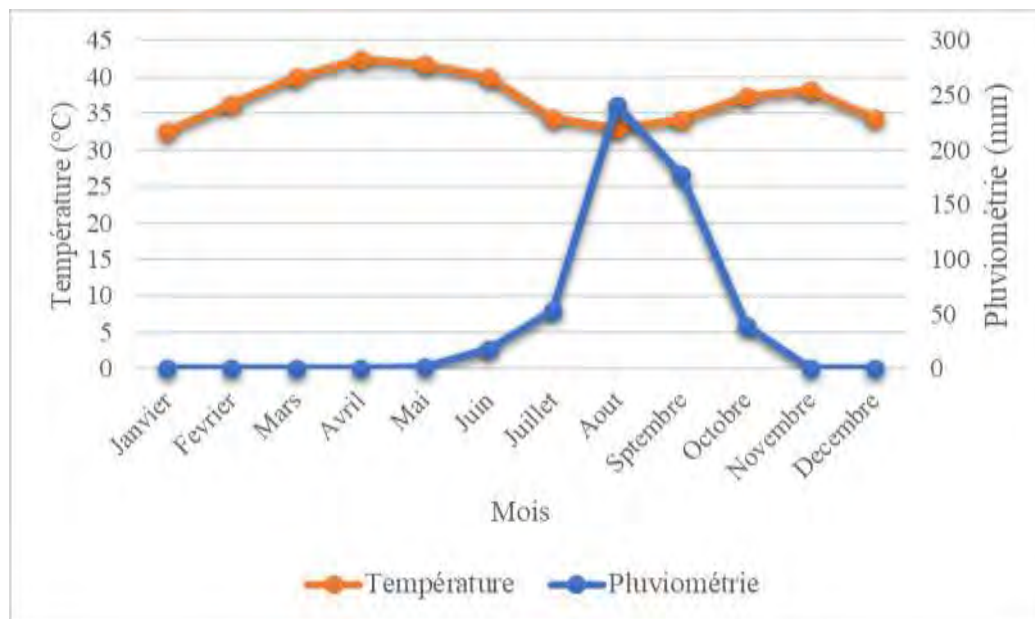


Figure 3 : Diagramme ombrothermique du département de Linguère 2011

3. Sols

Les sols de la station peuvent être regroupés en trois grands ensembles pédologiques selon leurs propriétés physiques et chimiques (Ndiaye, 2015) :

- Formations sablonneuses d'origine éolienne, qui sont dominantes
- Formations détritiques sur grès ou latérite
- Formations fluviatiles ou lacustres.

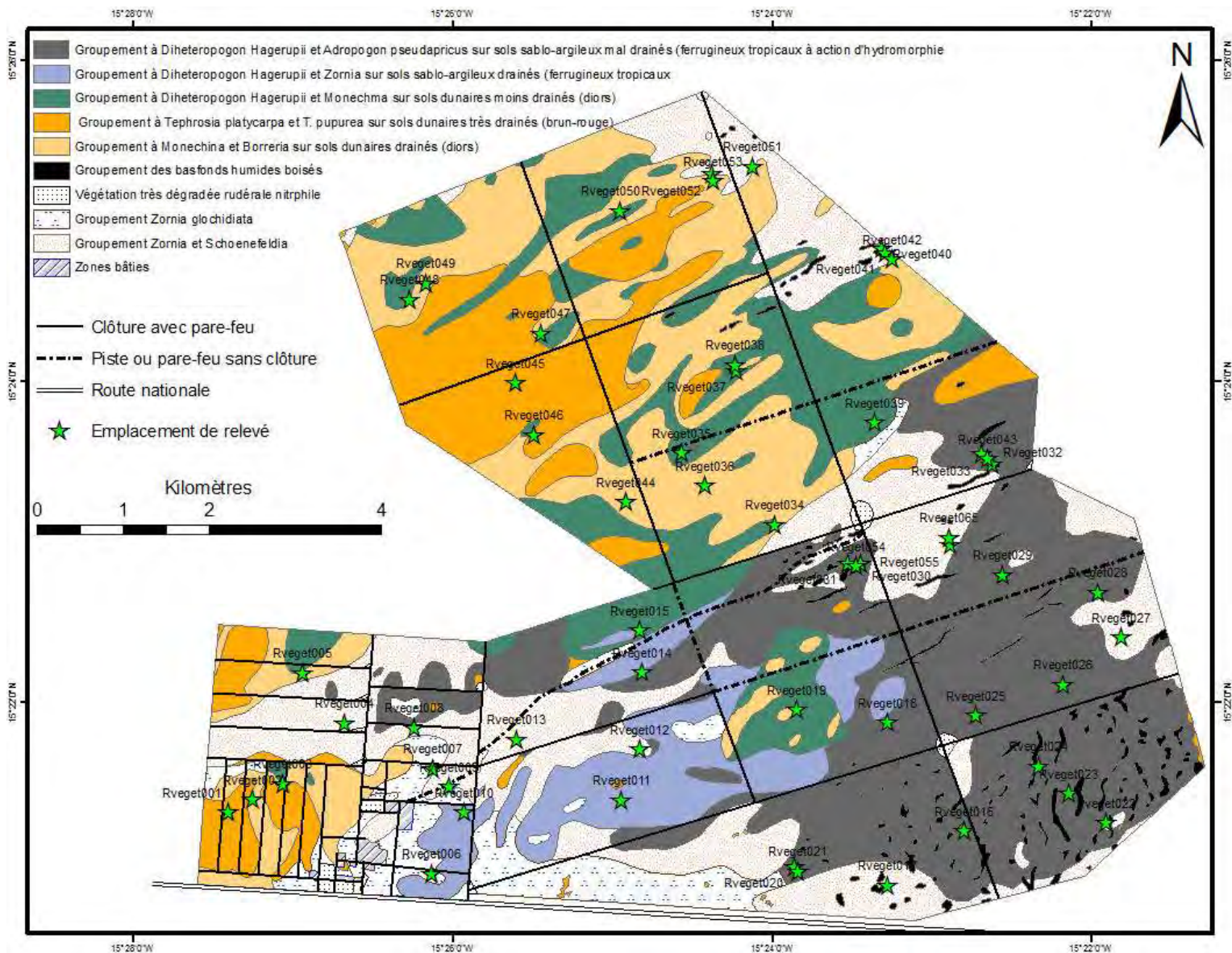


Figure 4 : Carte de végétation du CRZ de Dahra en fonction du type de sol (Ndiaye, 2015)

Collecte des données

Les données ont été collectées en deux (02) phases sur 38 parcelles de 1ha du centre de recherche zootechnique (CRZ) de Dahra. La première phase de collecte représente la phase d'acquisition des images par drone Dji Spark et à l'aide d'un appareil photo Canon de la marque Ixus 180 (20 millions de pixel, distance focale : 4,3 à 43mm, ouverture : f/3 à f/6,9) (France, 2019) et des mesures directes sur les herbacées. La deuxième phase représente celle des mesures directes de terrain sur les ligneux. Les mesures directes sur les herbacées ont été faites en même temps que l'acquisition des images parce que cela permettait d'avoir des images avant et après la coupe des herbacées.



(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 5 : Photos du matériel d'étude : faucille (a), drone Dji spark (b), peson (c) et appareil photographique canon (d).

1. *Echantillonnage*

Les parcelles ont été choisies de façon aléatoire parmi les 56 parcelles du CRZ Dahra qui étaient retenues comme sites d'échantillonnage par Ndiaye (2015) et Raynal (1964) dans leurs travaux sur la végétation du centre.

2. Acquisition des images/Drone et choix des plans de vol

L'acquisition d'images photographiques pour la cartographie de précision sur l'ensemble de la végétation de chaque parcelle a été réalisée à l'aide d'un drone de la marque Dji modèle Spark disposant de six (06) batteries de rechange. Pour ce fait, des plans de vol ont été programmés pour chacune des parcelles.

A. Programmation des vols

Les itinéraires de vol ont été définis en avant-projet avec le logiciel Excel, à partir des coordonnées du point de centre de chaque parcelle. Un fichier Excel permettant de définir l'ensemble des points qui seront parcourus par le drone et les paramètres de vol (l'altitude, la longitude, l'angle de la caméra, le positionnement du drone et la vitesse pour arriver aux points) a été créé. Ensuite, ce fichier est importé dans l'application Litchi (<https://flylitchi.com/>), qui génère automatiquement le plan de vol. Les plans de vol ainsi définis sont enregistrés sur un compte „utilisateurs“, et sont ensuite disponibles sur l'ensemble des appareils connectés à ce compte. Une fois sur le terrain, le drone connecté à l'application, exécute automatiquement la mission lorsqu'elle est lancée.

B. Choix du plan de vol

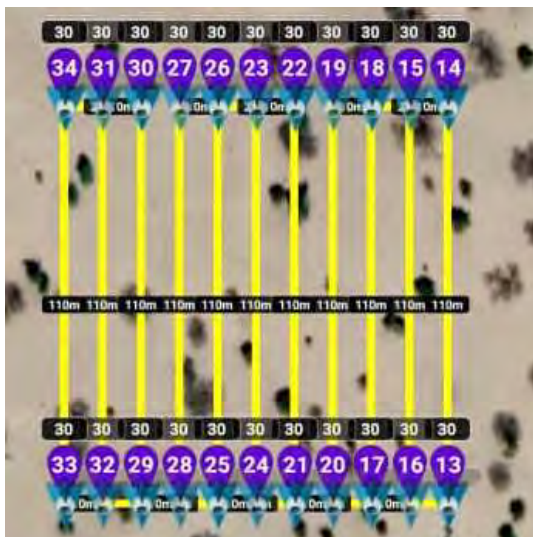
Plusieurs plans de vols ont été aussi testés en avant-projet afin de choisir le plus approprié. Pour cela, différents plans de vol (croisés et simples) ont été effectués à différentes altitudes : 80, 70, 60, 50, 30 et 20 m (Taugourdeau *et al.*, 2019). La conclusion de ces essais est qu'il est nécessaire d'effectuer des vols d'altitude supérieure ou égale à 80m pour obtenir des 3D exploitables sur les ligneux, parce qu'à ces altitudes, la résolution est proche de 3 cm/pixel pour les données issues de photographie sur des surfaces proches de 10 ha. Concernant le plan de vol, on remarque qu'il n'y avait pas de différence entre la 3D issue du vol croisé et celui du vol simple ; et que la grille simple permet d'obtenir une 3D suffisante pour répondre à nos questions de recherches. Ainsi, le même plan de vol (vol à grille simple) a été fait sur toutes les parcelles. Par ailleurs, le nombre de ligne des grilles du vol simple n'est pas le même pour les deux vols. En effet, on remarque que la grille à dix (10) lignes a donné une mauvaise modélisation 3D pour les ligneux. Les images obtenues avec ce dernier ne permettent pas de les distinguer. Alors que le vol simple à grille de cinq (05) lignes permet de bien les

distinguer. C'est ce qui justifie le choix du vol à grille simple (05 lignes) à 80m d'altitude pour l'étude des ligneux.

Contrairement aux ligneux, le modèle 3D obtenu à partir de la grille à cinq (05) lignes ne donne pas une bonne représentation 3D des herbacées. D'où le choix d'une grille plus serrée (de 10 lignes) à 30m d'altitude afin d'être plus proche des herbacées sans être perturbé par la hauteur des arbres (On peut voler plus bas dans un milieu d'étude composé uniquement d'herbacée).

Ainsi, deux vols simultanés ont été donc effectués successivement (figure 8) :

- un vol à grille simple de cinq lignes (de 100 m de long) avec un écartement entre lignes de 20 m. Ce vol a été réalisé à une altitude de 80 m pour l'étude des ligneux.
- Un vol à grille simple de dix lignes (de 100 m de long) avec une distance d'interligne de 10 m. Il a été réalisé à une altitude de 30 m pour l'étude des herbacées.



Grille de 10 lignes à 30 m



Grille de 05 lignes à 80 m

Photo 6: Photos des deux plans de vol utilisés

C. Installation des quadrats, prise de vidéo et d'images

Avant les vols, la parcelle est d'abord identifiée à partir des coordonnées GPS du point central de la parcelle, à partir desquels tous les plans de vol ont été définis. Trente (30) quadrats de 1m², sont ensuite installés aléatoirement sur la parcelle. On coupe l'herbe dans vingt (20) de ces quadrats à l'aide d'une faucille et on la pèse à l'aide d'un peson. Ensuite, on

pose un sac poubelle en forme de flèche, marqué du numéro de quadra, à côté des dix (10) autres qui restent, afin d'identifier leur position et leur nom dans la parcelle sur les images drones. Par ailleurs, l'herbe est enlevée autour d'un quadra (un des dix (10) quadras non coupés) sur une distance d'environ 10 cm pour bien délimiter le quadra et faire apparaître le niveau du sol. Une référence colorimétrique et deux pots de peintures (de dimensions connues) ont été aussi disposés au sol à côté de ce dernier pour calibrer la hauteur de l'herbe dans le quadra et faire d'éventuelles corrections de couleur pendant l'analyse. Après l'installation, une vidéo a été réalisée avec l'appareil photo sur ce quadra (figure 9). L'objectif étant de comparer les résultats de modélisation 3D obtenus à 1m du sol avec l'appareil photo avec celles obtenues à 30 m et 80 m avec le drone. Ensuite, les deux missions de vol sont lancées successivement. Pour finir, après les vols, l'herbe a été coupée dans les dix (10) quadras restant puis pesée.



(a)



(b)

Photo 7 : Illustration du dispositif de réalisation de la vidéo (a) et exemple de sac poubelle de marquage des placettes (b)

3. Mesures directes des paramètres de la végétation

A. Mesure de la biomasse des herbacées

Les données de biomasse herbacée ont été collectées pendant la saison de croissance végétale, au début du mois d'octobre 2018. La technique de collecte utilisée a été celle de placette temporaire. Les placettes temporaires sont des placettes à usage unique car elles ne sont pas matérialisées sur le terrain (Picard *et al.*, 2010). D'après (Pauwels *et al.*, 1999), ce sont des placettes mesurées une seule fois et qui caractérisent des peuplements différents à un instant donné, sans prendre en considération la cinétique de croissance (Thiombiano *et al.*, 2016). L'estimation de la biomasse herbacée a été effectuée par coupe à ras de sol des espèces herbacées dans dix (10) quadras de 1m² délimités par un cadre métallique. Un échantillon de 300 g de biomasse fraîche a été ensuite prélevé par parcelle.

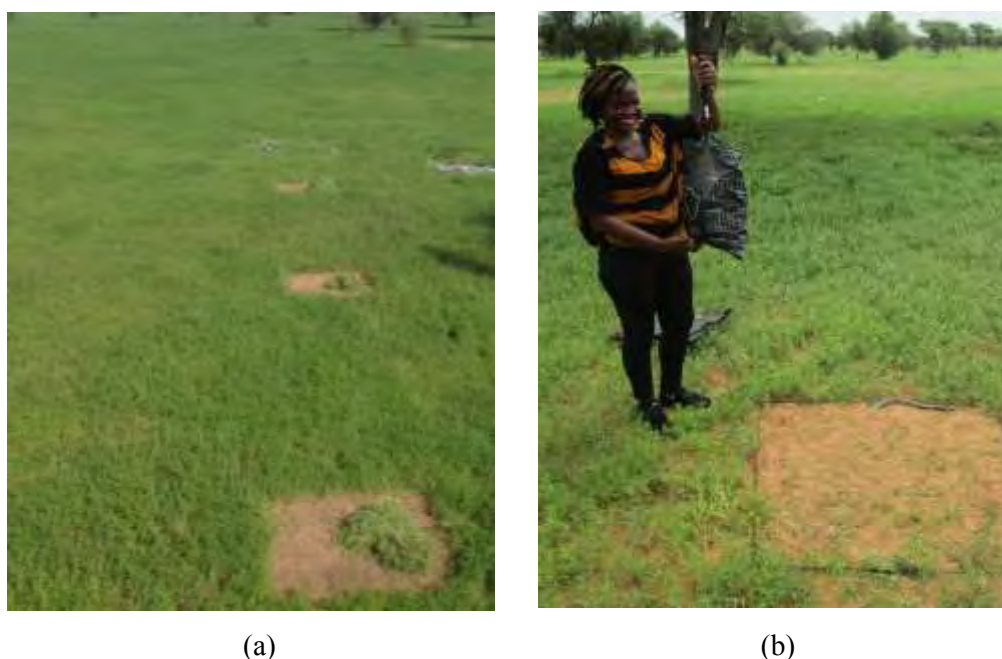


Photo 8 : Illustration des points de prélèvement (a) et mesure de poids de la biomasse fraîche des herbacées (b) après le vol

B. Mesure des paramètres dendrométriques des ligneux

Les mesures sur les ligneux ont été faites en Janvier 2019 sur 25 parcelles choisies parmi les 38 (celles sur lesquelles les vols ont été fait), et réparties de façon aléatoire sur la zone d'étude. Les parcelles ont été identifiées à partir de leur coordonnées GPS. Les paramètres mesurés sont : la hauteur totale, les diamètres Nord-Sud (NS) et Est-Ouest (EO) du houppier et le diamètre du tronc. Les mesures ont été prises sur dix (10) arbres sélectionnés par parcelle

à l'avance, et identifiés à partir de leur coordonnées GPS. Cette sélection de dix arbres s'est faite afin de prendre en compte à la fois les petits arbres et les grands arbres. Ces arbres ont été retrouvés à l'aide de la carte de la parcelle (carte réalisée après traitement des images) et de leurs coordonnées GPS. Avant de prendre les mesures, les informations suivantes ont été collectées : la date, les coordonnées géographiques (à l'aide d'un GPS), le type de formation végétale, et le nom de l'espèce. Seuls les individus adultes ayant une hauteur supérieure ou égale à 1,30m et un diamètre supérieur ou égale à 5cm ont été pris en compte, comme recommandé par (Thiombiano *et al.*, 2016), pour la zone soudanienne sèche et le sahel.

➤ **Mesure de la hauteur totale**

La hauteur totale est la distance verticale séparant le niveau du sol du sommet de l'arbre c'est-à-dire le bourgeon terminal (Rondeux, 1999). Elle a été mesurée à partir de deux visées (haut et bas) faites sur l'arbre à l'aide d'un dendromètre BUME-LEISS : une première visée (V_h) au sommet de l'arbre et une deuxième visée (V_b) au pied de l'arbre à une distance de 15m.

➤ **Mesure des diamètres du houppier**

Les diamètres du houppier ont été mesurés avec un décimètre, dans 2 directions perpendiculaires NS et EO, afin de tenir compte de la forme des houppiers, rarement circulaire et ainsi permettre une estimation la plus correcte possible du recouvrement de l'arbre (figure : 11).



Photo 9 : Illustrations des mesures des diamètres Est-Ouest (à gauche) et Nord-Sud (à droite) du houppier d'un arbre

Traitement des données

1. *Calcul des paramètres de végétation à partir des mesures directes de terrain*

À la suite de la collecte des données sur le terrain ; des paramètres spécifiques ont été calculés aussi bien pour les herbacées que les ligneux.

A. Calcul du poids de biomasse sèche des herbacées

Les échantillons d'herbes récoltés sur chacune des parcelles, ont été séchés à l'étuve à 65°C, puis pesés jusqu'au poids constant. Le pourcentage de matière sèche (%MS) est calculé par parcelle à partir des poids de matière fraîche (MF) et sèche (MS) de l'échantillon selon la formule suivante :

$$\%MS = [P(MS) \times 100] \div P(MF)$$

Par ailleurs, la masse de matière sèche dans chacun des dix quadrats (MS_Q) a été calculée à partir du pourcentage de matière sèche de leur parcelle d'après la formule suivante :

$$MS_Q = [P(MF_Q) \times \%MS] \div 100$$

Avec MF_Q = Matière fraîche par quadrat.

B. Calcul des paramètres dendrométriques (hauteur totale et surface de houppier) des ligneux

Les paramètres calculés concernant les ligneux sont la hauteur totale et la surface du houppier. Ces mesures ont été calculées à partir des formules suivantes :

➤ *Calcul de la hauteur totale des arbres*

La hauteur totale H de l'arbre mesurée a été obtenue par la relation :

$$H = [L(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)]$$

Avec : L : distance séparant l'opérateur de l'arbre, α : angle de visée haute et β : visée basse.

➤ Calcul de la surface du houppier des arbres

Le rayon moyen R de projection horizontale du houppier a d'abord été calculé, en formant la moyenne quadratique des 2 diamètres mesurés. Ainsi, on obtient :

$$R = [D_H(NS) + D_H(EO)] \div 4$$

Avec, $D_H(NS)$: Diamètre Nord-Sud du houppier et $D_H(EO)$: Diamètre Est-Ouest du houppier.

Puis on obtient la surface du houppier (S_H) d'après la formule universelle de surface d'un cylindre :

$$S_H = \pi R^2$$

2. Estimation des paramètres de la végétation par photogrammétrie

A. Traitement

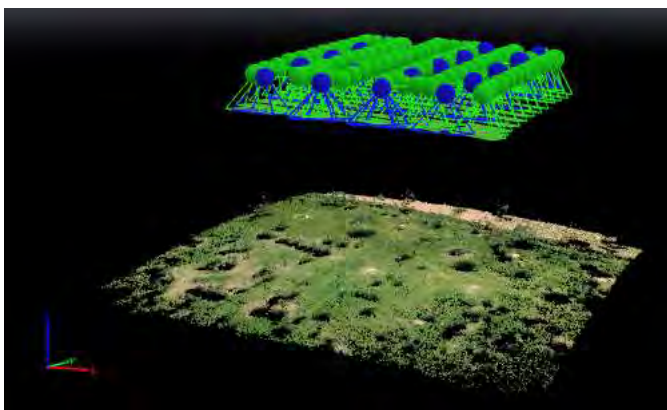
1. Création des modèles 3D : Cartographie 3D

Selon le nombre de photographies, il existe plusieurs techniques de traitements photogrammétriques. Celle utilisée ici est la photogrammétrie avec plusieurs images ou photogrammétrie multi-images, applicable seulement à travers des méthodes analytiques et numériques. Il s'agit de trouver l'orientation interne et externe de chaque image pour pouvoir ensuite effectuer des mesures (Lanzi & Margot, 2009). Waldhäusl [Kraus et Waldhäusl (1998)] définissent la photogrammétrie numérique comme toute technique de photogrammétrie analytique dans laquelle les images sont acquises par un appareil numérique ou numérisées avec le scanner. Ces systèmes effectuent les opérations mathématiques par des

algorithmes issus des principes analytiques de la photogrammétrie cité par (Lanzi & Margot, 2009).

Le traitement a été fait avec le logiciel Pix4D à partir des séries d'images géotaguées prises par drone et la vidéo de l'appareil photographique (la vidéo en a été découpé en fraction d'image avant le traitement). Il est automatique et se fait en trois étapes : l'initialisation, la densification, et création des modèles.

L'initiation correspond à la phase de recherche des points communs entre les images se recouvrant grâce à des algorithmes de correspondance automatique basés sur les caractéristiques des objets. Un ajustement de faisceaux en bloc est ensuite effectué pour calculer les positions et les orientations de chaque caméra. À ce stade, un calcul d'auto-calibration est possible en tenant compte des paramètres de calibration dans le modèle mathématique d'ajustement. L'orientation absolue ou géoréférencement (grâce au positionnement GPS des images) peut être réalisée à la suite de cette étape ou intégrée dans le calcul d'ajustement en bloc. Ensuite, grâce à un algorithme d'appariement dense, le logiciel recherche la correspondance entre pixels et génère ainsi le nuage de points densifié : c'est l'étape de densification. Enfin, à partir de ce nuage de points densifié, il produit le modèle 3D texturé où chaque point a une position x, y, et z connue. Enfin, en projetant les images drones sur ce nuage de points, le logiciel crée des images orthorectifiées et géoréférencées : ce sont les orthophotographies. Ces orthophotographies peuvent contenir différentes informations par pixel : données RGB, hauteur de surface ou modèle numérique de surface (MNS), et hauteur du sol ou modèle numérique de terrain (MNT). Ici, le traitement a été fait avec les paramètres de base proposés par le mode cartographie 3D du logiciel.



(a)



(b)

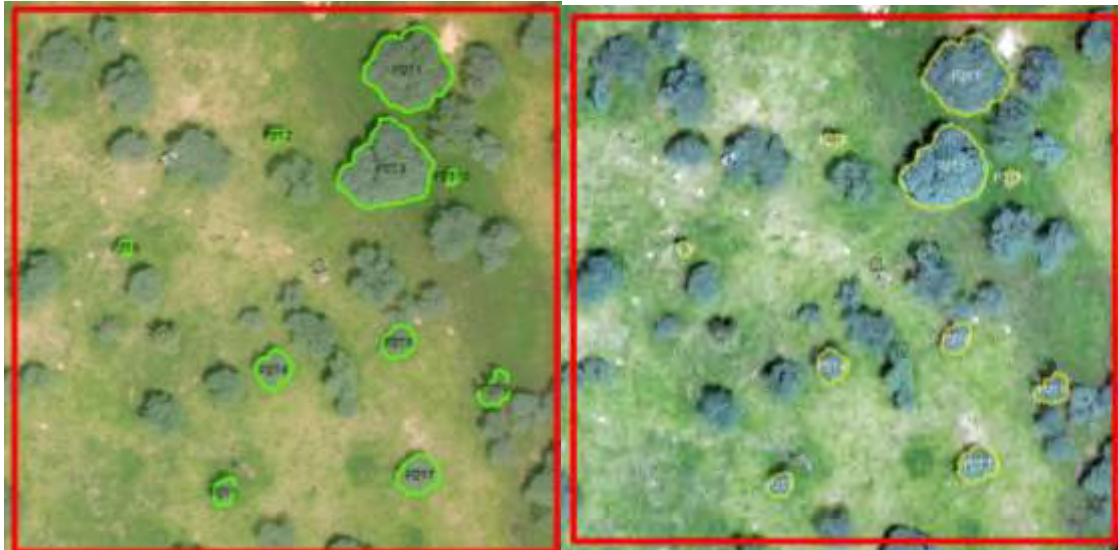
Photo 10: Phase de densification des points d'une parcelle (a) et modèle 3D d'un quadra de 1 m² (b)



Photo 11: Orthophotographie d'un quadra de 1m²

2. Extraction des données géométriques à partie de la photogrammétrie

Les cartes produites (orthophotographie, MNS, MNT) avec le logiciel Pix4D ont été importées dans le logiciel Arcgis pour y extraire les données géométriques. Dans un premier temps, les trois cartes (80 m, 30 m et vidéo) de la même parcelle ont été calées pour être bien superposées les unes au-dessus des autres. Ensuite, on délimite la parcelle (1ha) sur les deux cartes (30 m et 80 m), puis les quadras (1 m²) sur la parcelle. Par ailleurs, dix arbres (petits et grands) ont été sélectionnés sur la carte à 80 m et le contour de leurs houppiers a été délimité et numéroté manuellement. Ces mêmes arbres ont été ensuite identifiés sur la carte à 30 m (par superposition des deux cartes) afin de délimiter le contour de leurs houppiers et de leur attribuer des numéros identiques à ceux de la carte à 80 m.



Orthophotographie à 80 m d'altitude

Orthophotographie à 30 m d'altitude

Figure 5 : Sélection et délimitation du houppier des arbres à mesurer sur ArcGIS à 30 m et 80 m d'altitude sur une parcelle de 1ha délimitée par le carré rouge.

Après, le modèle de hauteur de canopée (CHM) a été calculé pour chaque carte (80 m, 30 m, 1 m) d'après la formule suivante :

$$\text{CHM} = \text{DSM} - \text{DTM}$$

Les mesures de hauteur totale et de surface de houppier ont été ensuite extraites directement à partir du CHM de chaque carte (80 m, 30 m et 1 m) par extraction des données sous ArcGIS à l'aide de la fonction « *Minus* ».

Quant au volume de biomasse, il a été calculé dans Excel en multipliant le nombre de pixel présent dans chaque quadra d'herbe (sum) par le CHM^2 de la parcelle à chaque altitude donné (30m et 1m).

$$V = \text{Sum} \times \text{CHM}^2$$

Par ailleurs, pour la vidéo, le volume a été calibré à l'aide des pots de peinture disposés à côté du quadra et dont on connaît les hauteurs réelles (l'appareil photo n'a pas de système de coordonnées géographiques).

3. Comparaisons des mesures photogrammétriques aux mesures de terrain

Après extraction des mesures géométriques par photogrammétrie, une base de données a été créée avec les deux séries de données (mesures de terrain et mesures photogrammétriques), et une régression linéaire simple a été faite avec le logiciel R. Concernant les ligneux, la comparaison a été faite entre les deux types de mesures aux différents niveaux d'altitude (80 m et 30 m) sur les paramètres : hauteur totale et surface du houppier.

Pour les herbacées, ce sont les volumes de biomasse fraîche et sèche qui ont été comparés à 30 m et 1m.

RESULTATS

Estimation de la hauteur totale et de la surface du houppier des ligneux par photogrammétrie

1. Cartographie 3D à 80m d'altitude de vol

Le traitement des images obtenues par drone a permis de réaliser des cartes 3D telles que : l'orthophotographie, le modèle numérique de surface (MNS), le modèle numérique de terrain (MNT) et le modèle de hauteur du canopée (CHM).

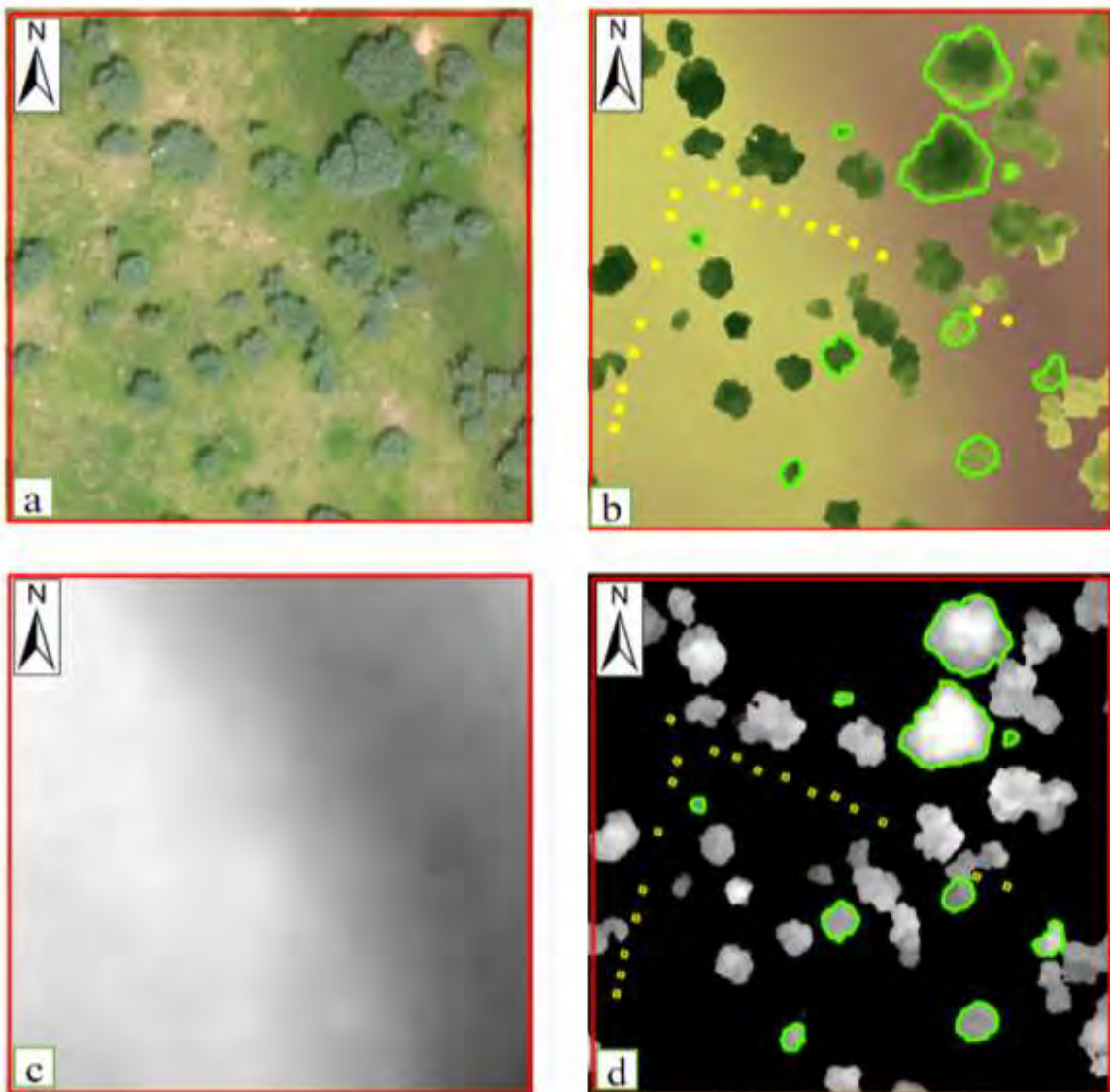


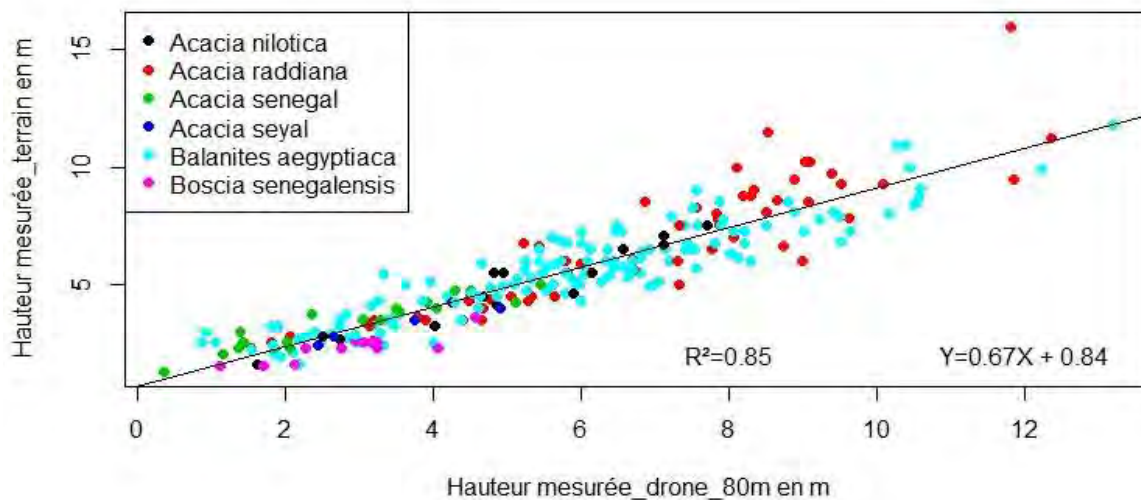
Figure 6 : Cartes parcelle 2, avec (a) : orthophotographie, (b) : Modèle Numérique de Surface (MNS), (c) : Modèle numérique de Terrain (MNT) et (d) : Modèle de Hauteur de la Canopée (MHC). Le carré rouge représente la parcelle (1 ha), les petits carrés jaunes représentent les quadras (1 m²) et les délimités en vert représentent les couronnes d'arbres suivis.

2. 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 $R^2= 0,066$.

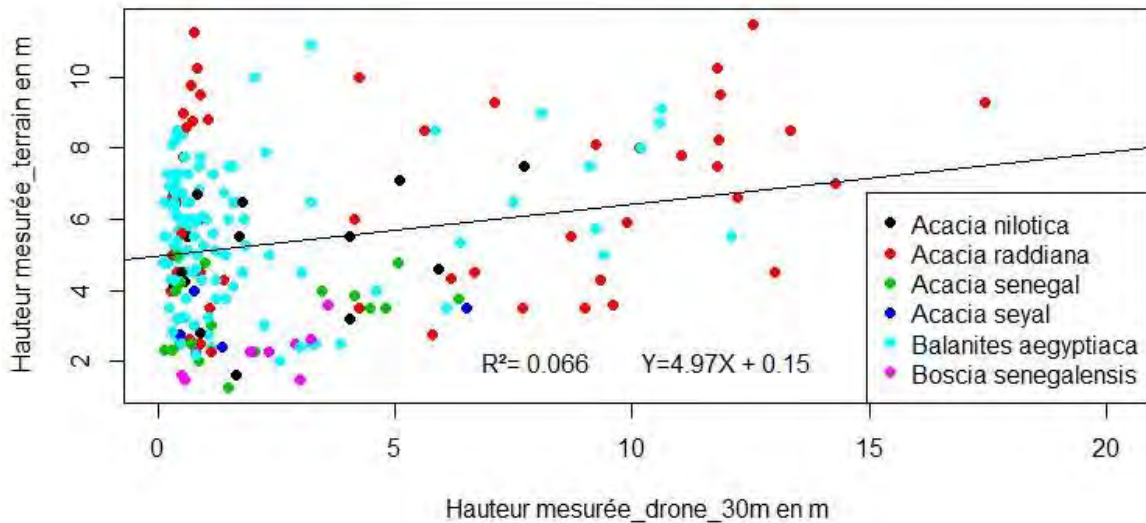


Figure 8 : Régression linéaire sur les mesures de hauteurs à 30 m

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 ($7,82 \text{ m}^2$).

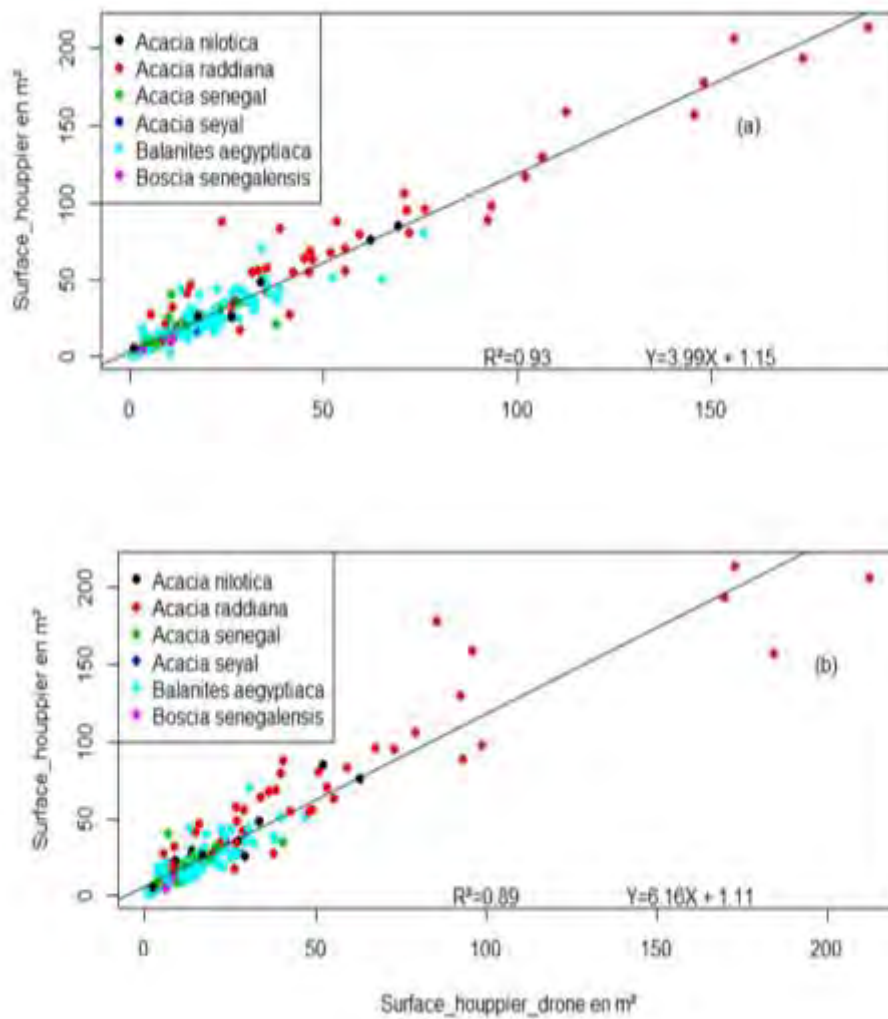


Figure 9 : Régression linéaire sur les mesures de surface de houppier à 80 m d'altitude (a) et à 30 m d'altitude (b).

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).

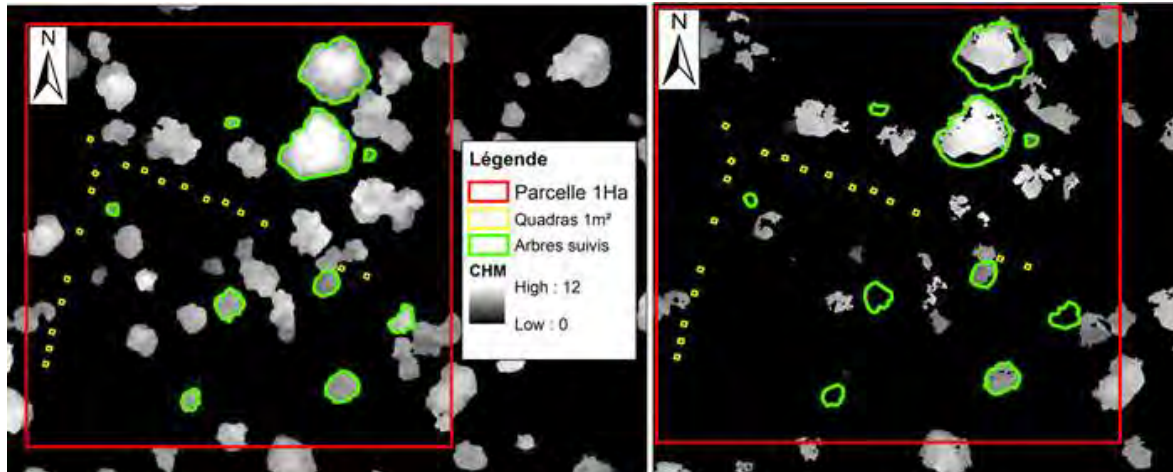


Figure 10 : Comparaison entre les CHM à 80 m (à gauche) et 30 m (à droite)

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.

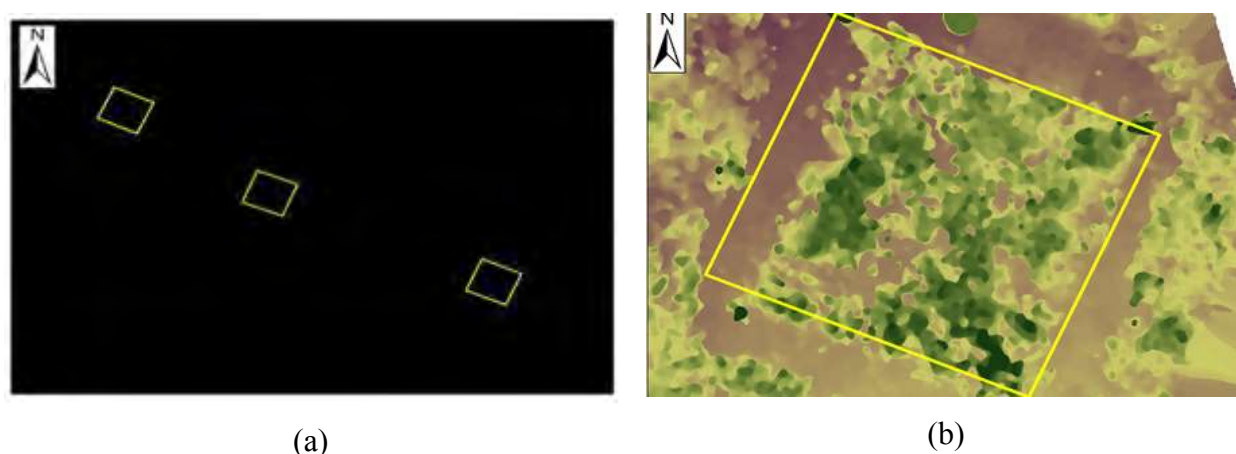


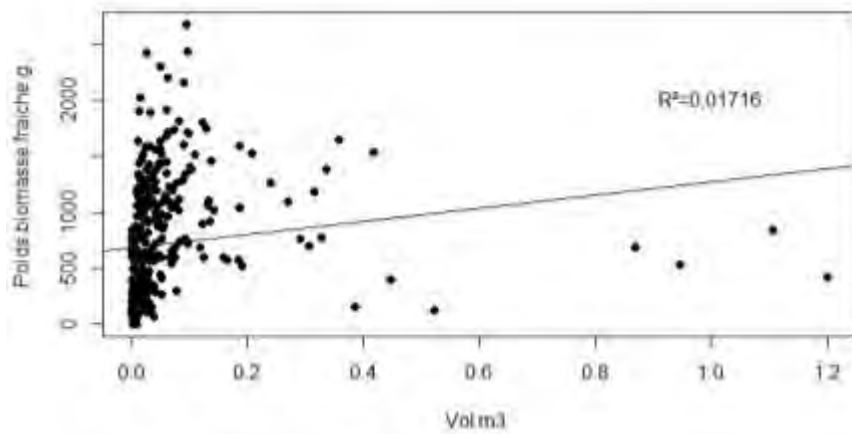
Figure 11 : Comparaison des CHM à 30 m (a) et CHM à 1m avec vidéo (b)

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)

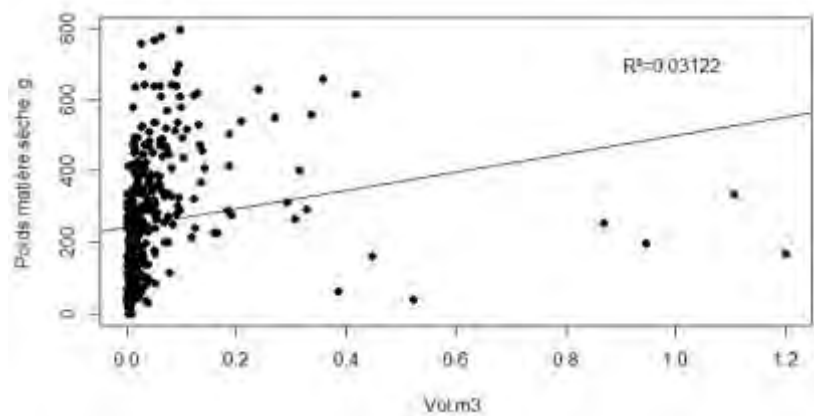
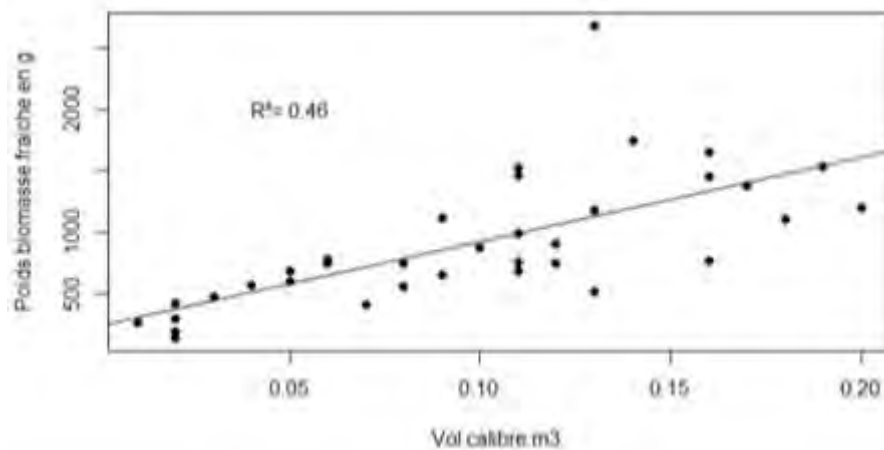


Figure 12: Prédiction du volume de biomasse avec drone ; à partir du poids de biomasse fraîche (a) et (b) : à partir du poids de biomasse sèche.

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)

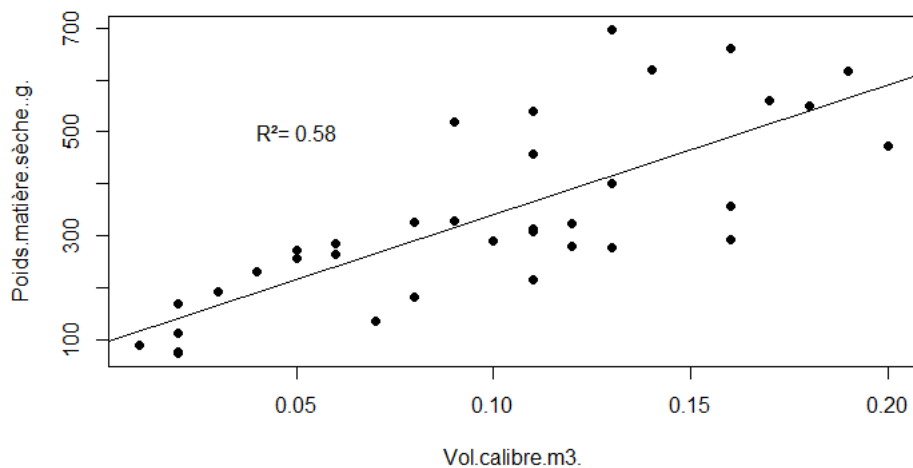


Figure 13 : Prédiction du volume de biomasse avec appareil photographique ; à partir du poids de biomasse fraîche (a) et (b) : à partir du poids de biomasse sèche.

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.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de montrer la faisabilité de l'utilisation des nouvelles technologies (drone et appareil photographique) pour l'étude d'une végétation naturelle en milieu sahélien. Ainsi, le drone peut être aussi utilisé comme outil d'étude pour déterminer les paramètres (hauteur totale, surface du houppier) des ligneux dans cette zone du Sahel. Par ailleurs, la détermination des paramètres (masses sèche et fraîche) des herbacées par drone, n'a pas été concluante. En revanche, ces paramètres ont pu être déterminés par photogrammétrie avec appareil photo. Il faudrait donc réduire l'altitude de vol avec drone.

Compte tenu de ces conclusions, il serait souhaitable d'améliorer le protocole en tenant compte des points suivants :

- Utiliser un drone plus performant avec des capteurs thermiques multispectrales pour améliorer les résultats sur les herbacées ;
- Voler au moins à 80m pour l'étude des ligneux ;
- Réduire l'altitude de vol pour les études sur les herbacées ;
- Développer des équations allométriques basées sur la hauteur des arbres et ou le diamètre de houppier pour l'évaluation de la biomasse de l'arbre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achotte N., Delamare J., Cugat O. (2005) – Conception, optimisation et dimensionnement d'un micromoteur planaires à aimants permanent pour drones miniatures en vol stationnaire. Doctorat Thesis. JOSEPH FOURIER, Grenoble.
- Arles A., Busdraghi F., Heckes J., Guyot J. (2011) – (PDF) La photogrammétrie appliquée à l'archéologie minière : premiers essais. *ResearchGate*, 25.
- Assouma M.H. (2016) – Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage. Doctorat Thesis. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France.
- Audet F.-A. (2017) – Comparaison des nuages de points photogrammétriques et lidar pour la cartographie par arbre individuel de la structure et la composition des forêts boréales. Mémoire de maîtrise Thesis. Université du Québec, Montréal.
- Bakhoun A., Sarr O., Ngom D., Diatta S., Ickowicz A. (2020) – Usages des fourrages ligneux et pratiques pastorales dans la communauté rurale de Téssékéré, Ferlo, Nord Sénégal. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, **73**.
- Béral C., Moreau J.-C., Andueza D., Pottier E. (2018) – *Production fourragère herbacée en agroforesterie*. Institut de l'élevage, France.
- Beye G. (2015) – *Actualisation du découpage et de la caractérisation des zones écogéographiques du Sénégal*. Ministère de l'environnement et du développement durable, Sénégal.
- Delley N., Chatelain C. (2013) – R-Pod, essais en forêt dense ivoirienne avec un drone. *Suisse E-periodica*, **111**, 5.
- Deplancke M. (2014) – Etude de précision de la photogrammétrie terrestre appliquée aux levés topographiques. mémoire Thesis. Haute école de la province de liège, Liège.

- Dji spark: guide de l'utilisateur (2017) –
- Fall C.A. (2008) – *Deuxième rapport sur l'état des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde*. ISRA, FAO, Sénégal.
- France C. (2019) – Canon IXUS 180 -Caractéristiques - Canon Appareils Photo Numériques Compacts.
- Fritsch D., Cramer N. (2013) – UAV im Einsatz für die Datenerfassung beim LGL BW Abschlussbericht Stuttgart. pdf - Recherche Google. *cahier de recherche*,.
- Garba I. (2017) – Modélisation spatiale de la production fourragère en zone pastorale nigérienne. Doctorat Thesis. Université de Liège, Belgique.
- Grussenmeyer P. (2016) – Photogrammétrie : bilan et perspectives de 150 années d'histoires. In:, p. 59. Grenoble.
- Hiernaux P., Houérou H.N.L. (2006) – Les parcours du Sahel. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, **17**, 51–71.
- Jenet A., Buono N., Di Lello S., Gomarasca M., Heine C., Mason S., Nori M., Saavedra R., Van Troos K. (2016) – *Pour des pâturages encore plus verts Pastoralisme : l'épine dorsale des zones arides dans le monde*. Paul Mundy.
- Koch B., Dees M., Van Brusselen J., Eriksson L., Fransson J., Gallaun H., Leblon B., McRoberts R.E., Nilsson M., Schardt M. (2008) – Forestry applications. *Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 439–465.
- Koehl A. (2012) – Modélisation, Observation et Commande d'un Drone Miniature à Birotor Coaxial. Thèse de doctorat Thesis. Université de Lorraine, Lorraine.
- Kraus K., Waldhäusl P. (1998) – *Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux*. Hermès - Lavoisier, Bonn.
- Lanzi L., Margot P. (2009) – La photogrammétrie numérique combinée avec la modélisation 3D : applications aux sciences forensiques. Doctorat Thesis. Lausanne, Suisse.

- Leberl, F., Irschara, A., Pock T., Meixner P., Gruber M., Holz S., Wiechert A. (2010) – Point Clouds: Lidar versus 3D Vision. , **76**, 12.
- Lisein J. (2016) – Application des techniques de photogrammétrie par drone à la caractérisation des ressources forestières. Doctorat Thesis. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech et Université Paris- Est,.
- Matese A., Toscano P., Di Gennaro S.F., Genesio L., Vaccari F.P., Primicerio J., Belli C., Zaldei A., Bianconi R., Gioli B. (2015) – Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*, **7**, 2971–2990.
- Mecili N., Chriette A. (2012) – Drones autonomes : Définition et Classification. , 31.
- Murtiyoso A., Freville T., Koehl M., Grussenmeyer P. (2016) – Protocole d'acquisition et de traitement des données par drone: Modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie. mémoire de diplôme d'ingénieur Thesis. Institut national des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg.
- Ndiaye O. (2015) – Déterminants de la dynamique de la végétation d'un milieu pâture en région sahélienne du Sénégal. Doctorat Thesis. Cheikh Anta Diop, Sénégal.
- Ngabinzeke J.S., Linchant J., Quevauvillers S., Muhongya J.-M.K., Lejeune P., Vermeulen C. (2017) – Cartographie de la dynamique de terroirs villageois à l'aide d'un drone dans les aires protégées de la République démocratique du Congo. *Bois et forêts des tropiques*, **4**, 69–83.
- Noël J.-C. (2013) – Occuper sans envahir : drones aériens et stratégie. *Politique étrangère*, **Automne**, 105.
- Pauwels D., Thibaut A., Lejeune P., Rondeux J. (1999) – Elaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix*

- kaempferi (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale. *Annals of forest science*, **56**, 27–34.
- Pflimlin J.-M., Souères P., Hamel T. (2006) – Commande d'un minidrone à hélice carénée: de la stabilisation dans le vent à la navigation autonome. Thèse de doctorat Thesis. Ecole Doctorale Systèmes, Toulouse.
- Picard N., Magnussen S., Ngok Banak L., Namkossereena S., Yalibanda Y. (2010) – Permanent sample plots for natural tropical forests: A rationale with special emphasis on Central Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, **164**, 279–295.
- Pierrot-Deseilligny M., Clery I. (2011) – Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, **12**, 51–66.
- Remondino F. (2011) – Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, **3**, 1104–1138.
- Remondino F., Spera M.G., Nocerino E., Menna F., Nex F. (2014) – State of the Art in High Density Image Matching. , **29**, 144–166.
- Rida M.M., Cherki B. (2015) – Observation et commande de drones miniatures à voilures tournantes. Thèse de doctorat Thesis. Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Algérie.
- Rondeux J. (1999) – *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*.
- Sarr O., Diatta S., Gueye M., Ndiaye P.M., Guisse A., Akpo L.E. (2013) – Importance des ligneux fourragers dans un système agropastoral au Sénégal (Afrique de l'ouest). *Revue Méd. Vét.*, **9**.
- Sarron J., Malézieux E., Sané C.A.B., Faye E. (2018) – Mango Yield Mapping at the Orchard Scale Based on Tree Structure and Land Cover Assessed by UAV. *remote sensing*, **1900**, 21.

- Taugourdeau S., Ndiaye O., Diatta O., Bossoukpe M., N'Goran A., Djagoun J. (2019) – *Test de protocole pour l'utilisation de la photogrammétrie pour l'étude de la végétation de savanes sahéliennes à partir d'appareil photographique compact et de drones lowcost.*
- Thiombiano A., Glèlè Kakaï R., Bayen P., Mahamane A., Boussim J.I. (2016) – Méthodes et dispositifs d'inventaire forestiers en Afrique de l'Ouest: Etat des lieux et propositions pour une harmonisation. *Annales des sciences agronomiques -spécial Projet Undesert-UE*, **20**, 34.
- Tournadre V. (2015) – Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère :application au suivi d'évolution de digues. Doctorat Thesis. UNIVERSITÉ PARIS EST, France.
- Tu Y.-H., Johansen K., Phinn S., Robson A. (2019) – Measuring Canopy Structure and Condition Using Multi-Spectral UAS Imagery in a Horticultural Environment. *remote sensing*, **11**, 19.

ANNEXES

Annexe 1 : Outline ArcGIS

Préparation du projet et Import des data.

1. Ouvrir ArcMap → New Maps → Blank Map
2. Onglet Catalog, Dans fichier Parcelle « X » → Clic droit new folder → Nommer « Old », puis idem nommer « Rasters, puis idem nommer « Tables »
3. Glisser/déposer les rasters (mosaic/dsm/dtm) pour video et 30 m dans « Old » et rasters 80 m dans « Raters ».
4. Glisser/déposer « Old » dans « Rasters »
5. Depuis « Marina drone PPZS » → « Templates », Copier/coller le fichier « Templates », contenant « Parcelle_X.shp », « QP_X.shp », « TP_X_30m.shp » et « TP_X_80m.shp » dans Parcelle X, puis le renommer pour « Shapefiles »
6. Dans « Parcelle X » → « Shapefiles », renommer les quatre shapefiles avec le bon numéro de parcelle (changer X pour numéro de parcelle).
7. Clic droit sur « Parcelle X » → Refresh
8. Importer Mosaic 80 m dans Arcmap (Glisser/déposer fenêtre principale)
9. Create pyramids → Yes
10. Idem 8. et 9. pour dsm et dtm 80m.
11. Dans Layers (fenêtre à gauche), ordonner les 3 rasters 80 m (1-mosaic, 2-dsm, 3 dtm) et grouper, puis renommer le groupe en «80 m PX »
12. Enregistrer projet ArcMAP dans « Parcelle X » (attention de bien être dans le bon dossier de Parcelle!) et nommer le projet « Parcelle_X.mxd »
13. Dans L'onglet Catalog, à partir de maintenant travailler dans Home (en haut)

Import des Rasters « 30m » et « videos »

14. Depuis « Old », importer Mosaic 30 m dans Arcmap (Glisser/déposer fenêtre principale)
15. Create pyramids → Yes
16. Idem 15. et 16. pour dsm et dtm 30m.
17. Idem 15. et 17. pour rasters« video » et « OK » quand « Unkown Spatial Reference »
18. Dans Layers (fenêtre à gauche), ordonner les 3 rasters 30 m et les 3 rasters vidéos (1- mosaic, 2-dsm, 3 dtm) et grouper, puis renommer les 2 groupes en «30 m PX » et « video PX »
19. Ordonner les groupes dans l'ordre 1- « Video PX », 2- « 30m PX » et 3- « 80m PX »
20. Si besoin, enlever les bordures noires des 3 Mosaics, Clic droit → « Properties » → Onglet « Symbology » → Cocher « Display Background value ».
21. Enregistrer le projet.

Recalage des Rasters 30m sur 80m

22. Dans le groupe « 30m PX », activer uniquement les 3 mosaics, désactiver les DSM et DTM
23. Dans « Géoreferencing », en bas, sélectionner le raster «30m parcelle X mosaic », puis cliquer sur « Autoregistration »
24. Sur « Georeferencing » → « Transformation », choisir la transformation qui convient le mieux (souvent la 2nd Order Polynomial).
25. Vérifier que le calage de « 30 m mosaic » est bon en comparant la 30m avec la 80 m avec des repères fixes. Se déplacer sur toute l'Image.
26. Si le calage n'est pas satisfaisant, réaliser un calage manuel avec l'option « Géoreferencing » → « Add control point », puis réaliser un calage manuel. Au moins 6 points pour changer de transformation.

27. Une fois le calage effectué, enregistrer le tableau de points de calage : cliquer sur « View Link Table dans l'onglet « Géoreferencing ». Enregistrer la Table dans « Parcelle X » → « Tables » en faisant attention de bien être dans le bon fichier de parcelle! Nommer le fichier « Calage_PX_30sur80.txt »
28. Enregistrer le Raster « 30 m mosaic » georeferencer : « Géoreferencing » → « Rectify », vérifier Output location pour être dans « Parcelle X » → « Rasters ». Attention de bien se trouver dans le bon numero de parcelle! Nommer le fichier « 3D vol 30m parcelle X transparent mosaic_geo.tif » puis « Save »
29. Dans « Layers » à gauche, Supprimer le fichier « 30 m mosaic » et le remplacer par le nouveau à importer depuis « Parcelle X » → « Raster » → « 3D vol 30m parcelle X transparent mosaic_geo.tif ». « Refresh » de « Rasters » pour afficher les nouveaux rasters calés.
30. Le mettre à la bonne place dans le bon groupe.
31. Enregistrer le projet.
32. Calage de « 30m DSM » et de « 30 m DTM ». Dans « Layers » activer les couches « 30m DSM » et de « 30 m DTM ».
33. Dans « Géoreferencing », en bas, sélectionner le raster «30m DSM », puis cliquer sur « View Link Table » → « Load » → Aller chercher le fichier « Calage_PX_30sur80.txt ». Attention de bien être dans le bon fichier de parcelle X.
34. Sur « Georeferencing » → « Transformation », choisir la même transformation que pour la mosaic.
35. Enregistrer le Raster « 30 m DSM » georeferencer : « Géoreferencing » → « Rectify », vérifier Output location pour être dans « Parcelle X » → « Rasters ». Attention de bien se trouver dans le bon numéro de parcelle! Nommer le fichier « 3D vol 30m parcelle X dsm_geo.tif » puis « Save »
36. Dans « Layers » à gauche, Supprimer le fichier « 30 m dsm » et le remplacer par le nouveau à importer depuis « Parcelle X » → « Raster » → « 3D vol 30m parcelle X dsm_geo.tif ». « Refresh » de « Rasters » pour afficher les nouveaux rasters calés.
37. Le mettre à la bonne place dans le bon groupe.

38. Enregistrer le projet.

39. Idem 34. à 40. pour « 30m DTM ».

40. Idem 24 à 40 pour **calage des rasters video sur 30m**. Attention le calage de « video mosaic » est ici manuel avec **3 control points au minimum**. Utiliser Clic droit sur la couche « Zoom to layer » pour trouver les couches.

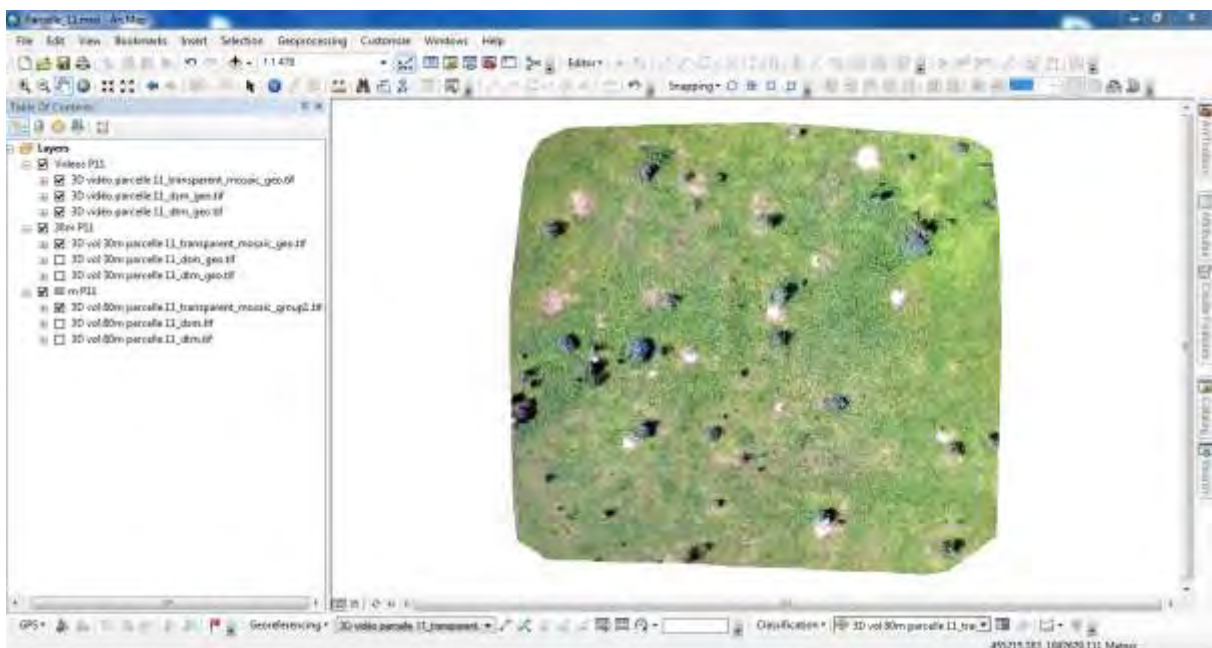
41. Enregistrer le projet.

42. A ce stade, tu dois avoir dans « Layers » 3 groupes contenant chacun 3 rasters (Cf. Fig. ci-dessous):

1- « Video PX » avec mosaic_geo, dsm_geo, dtm_geo

2- « 30 m PX » avec mosaic_geo, dsm_geo, dtm_geo

3- « 80 m PX » avec mosaic, dsm, dtm



Shapefiles Parcelle et Quadrats.

43. Dans le catalog, « Parcelle X » → « Shapefiles », Glisser/déposer les shapefiles « QP_PX » et « Parcelle_PX »
44. Ces fichiers sont des copies du projet Parcelle 5, il faut donc déplacer ces quadrats sur la parcelle sur laquelle tu travailles actuellement. Cliques sur « Full extent » (la planète à côté de la main en haut à gauche). Là, tu vois ton projet, avec la parcelle et les quadrats du projet Parcelle 5. Il faut prendre la parcelle et les quadrats pour les positionner sur ton raster « 30 m mosaic_geo ».
45. « Editor » → « Start editing » → sélectionne les couches en dessinant un carré autour de la parcelle. Cela devient bleu = tu viens de sélectionner la parcelle d'1Ha et les 20 quadrats qui sont dedans. Maintenant tu les déplace pour les positionner sur ton projet parcelle X (là où tu vois le raster « 30 m Mosaic_geo »).
46. « Editor » → « Stop editing » → Enregistrer les modifications.
47. Changer l'apparence de ces deux shapefiles dans la fenetre « Layers » en cliquant sur le symbole. Parcelle_X en Fill color = no color, Outline width 2,00, et outline color en rouge. QP_X en Fill color = no color, Outline width 1,00, et outline color en rouge.
48. Afficher les labels de la couche « QP_X ». Dans « Layers », clic droit sur la couche « QP_X » → « Properties » → Onglet « Labels » → cocher en haut « Label features in this layer », choisir Label Field : « Name » en Arial 8 bold. → « OK »
49. Renommer les Noms de quadrats dans la table attributaire: clic droit dans « Layers » sur « QP_X » → « Open attribute table », tu changes le numéro de parcelle dans la colonne « Name » pour tous les quadrats : clic droit sur Name dans le tableau → « Field Calculator » → « Yes » → dans le carré blanc dans la fenêtre, taper à l'identique le code suivant (tu peux faire un copier/coller depuis word) : `replace([Name], "X", "X")`. Le X doit être le numéro de parcelle du projet actuel. → « OK ». Vérifier que les Noms de quadrats ont bien changés.
50. Il faut maintenant positionner chacun des 20 quadrats au bon endroit : en premier, décocher la couche « Parcelle_X » dans « Layers » puis dans « Editor » → « Start editing » → positionner chaque quadrat au bon endroit (bon numéro avec herbe ou sol

nu) en le déplaçant et Rotation. N'oublie d'enregistrer régulièrement pdt l'édition : « Editor » → « Save edits ».

51. Ensuite, décocher la couche « QP_X » et sélectionner « Parcelle_X » dans « Layers ». Avec le curseur de l'éditeur, déplacer le carré d'1Ha pour qu'il englobe tous les quadrats et qu'il y ait le plus d'arbres entiers dans le carré. Puis « Editor » → « Save edits » → « Stop editing ».

52. Enregistrer le projet.

Shapefiles Trees TP_X_30m et TP_X_80m

53. Dans le catalogue, « Parcelle X » → « Shapefiles », Glisser/déposer les shapefiles « TP_X_30m » et « TP_X_80m ». Il faut maintenant digitaliser 10 arbres contenu dans la parcelle d'1Ha.

54. Changer l'apparence de ces deux shapefiles dans la fenêtre « Layers » en cliquant sur le symbole. « TP_X_30m » en Fill color = yellow, Outline width 1,00, et outline color en noir. « TP_X_80m » en Fill color = vert, Outline width 1,00, et outline color en rouge. Pour les deux couches mettre 40% de transparence dans les propriétés de la couche, onglet « Display ».

55. Éditer 10 arbres dans la couche « TP_X_30m » sur le raster « 30m parcelle X mosaïc_geo ». Choisir des grands et des petits. « Editor » → « Start editing » → onglet « Create Feature » sur la droite, sélectionner le bon shapefile, puis Polygons dans Construction tools en dessous. Une fois les 10 arbres digitalisés, « Editor » → « Save edits ».

56. Renseigner la table attributaire pour ces 10 arbres. Clic droit dans « Layers » sur « TP_X_30m » → « Open attribute table », tu changes le numéro de hauteur de vol dans la colonne « Flight » : clic droit sur Flight dans le tableau → « Field Calculator » → « Yes » → dans le carré blanc dans la fenêtre, taper à l'identique le code suivant (tu peux faire un copier/coller depuis word) : "30".

57. Dans la colonne Name, il faut que tu rentres à la main les noms des arbres comme suit : PXT1, PXT2, PXT3... Jusqu'à PXT10. Puis « Editor » → « Save Edits ».

58. Digitaliser les même 10 arbres sur le raster « 80m parcelle X mosaic_geo » dans TP_X_80m. Dans « Layers », désélectionner le raster « 30m parcelle X mosaic_geo ».
59. Puis idem 59. à 61. Avec la couche « TP_X_80m » après avoir désélectionner les couches «TP_X_30m » et « 30m parcelle X mosaic_geo ». ATTENTION, digitaliser les arbres « TP_X_80m » dans le même ordre que pour « TP_X_30m ». Tu peux vérifier l'ordre en labellisant la couche « TP_X_30m » et en l'affichant.
60. Renseigner la table attributaire pour ces 10 arbres. Clic droit dans « Layers » sur « TP_X_80m » → « Open attribute table », tu changes le numéro de hauteur de vol dans la colonne « Flight » : clic droit sur Flight dans le tableau → »Field Calculator » → « Yes » → dans le carré blanc dans la fenêtre, taper à l'identique le code suivant (tu peux faire un copier/coller depuis word) : "80".
61. Dans la colonne Name, il faut que tu rentres à la main les noms des arbres comme suit : PXT1, PXT2, PXT3... Jusqu'à PXT10. En vérifiant que se soient les mêmes que pour la couche «TP_X_30m » : labellisent les deux couches et vérifie les noms affichés sur la carte.
62. Puis « Editor » → « Save Edits » → « Stop Editing ». Enregistrer le projet.

Calcul des Canopy Height Models (CHM)

63. Il faut calculer les $CHM = DSM - DTM$ pour chaque groupe de couches. Dans l'onglet « ArcToolbox » à droite en rouge, « Spatial Analyst Tools » → « Maths » → « Minus ».
64. Pour chaque groupe, Input Raster 1: le DSM, Input Raster 2: le DTM, Output raster : dans le fichier « Parcelle X » → « Rasters », nommer le fichier par exemple: « 3d vol 30m parcelle 11_chm_geo.tif en cliquant sur le nom d'un fichier du groupe 30m et modifiant dtm en chm.
65. Glisser déposer le nouveau raster créer dans le groupe correspondant en dessous de la Mosaic.
66. Idem de 68. à 70. pour les 3 groupes.
67. Enregistrer le projet.

Annexe 2 : Mesures sur les ligneux

Code	Nom scientifique	Surface houppier estimée par (drone)(m ²)	Surface Houppier sur le terrain (m ²)	Hauteur estimée par drone(m)	Hauteur totale sur le terrain (m)
P1T1	<i>Acacia raddiana</i> (Savi) Brenan.	15.5883	21.2264	5.65508	4.5
P1T2	<i>Acacia raddiana</i>	15.9535	27.697626	7.34246	5
P1T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	28.9469	42.9866	7.44664	6.75
P1T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	24.3723	34.7146625	8.22391	7.25
P1T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	26.3905	38.465	10.4561	10
P1T6	<i>Acacia raddiana</i>	35.2898	42.69664063	7.78169	6.5
P1T7	<i>Acacia raddiana</i>	10.956	32.1536	4.68719	4
P1T8	<i>Acacia raddiana</i>	112.578	158.2874	12.3711	11.25
P1T9	<i>Acacia raddiana</i>	11.7441	20.8201625	4.65897	3.5
P1T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.3005	23.3164625	6.57806	5.75
P2T1	<i>Acacia raddiana</i>	173.729	193.49465	7.83253	8
P2T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.42903	9.61625	5.34253	5.25
P2T3	<i>Acacia raddiana</i>	190.481	213.71625	9.10012	10.25
P2T4	<i>Acacia raddiana</i>	33.8372	48.99185	5.43942	6.6
P2T5	<i>Acacia raddiana</i>	15.4672	47.1490625	5.22674	6.75
P2T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.56198	9.61625	4.20331	4.5
P2T7	<i>Acacia raddiana</i>	41.2385	27.32585	5.06419	4.5
P2T8	<i>Acacia raddiana</i>	26.8792	34.7146625	4.7924	4.35
P2T9	<i>Acacia raddiana</i>	23.5997	87.95314663	6.86319	8.5
P2T10	<i>Acacia raddiana</i>	5.20744	27.7909625	3.21331	3.5
P3T1	<i>Acacia raddiana</i>	145.478	157.1746625	10.0956	9.3
P3T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4.99851	4.15265	2.85131	2.7
P3T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.80351	5.3066	3.33407	2.4
P3T4	<i>Acacia raddiana</i>	18.4945	20.41785	4.40796	3.5
P3T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.52099	2.83385	2.98782	2.5
P3T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	28.1438	24.6176	9.6587	7.25

P3T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.7106	19.625	6.81575	5.5
P3T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.5588	23.3164625	7.2127	6
P3T9	<i>Acacia raddiana</i>	17.9512	21.84311563	5.2906	4.3
P3T10	<i>Acacia raddiana</i>	93.1027	97.5931625	8.06832	7
P4T1	<i>Acacia raddiana</i>	53.248	88.0362585	8.5293	11.5
P4T2	<i>Acacia raddiana</i>	33.0947	55.98464963	7.56366	8.25
P4T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3.33643	7.54385	3.37601	3.5
P4T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	12.5369	19.625	5.48571	5.5
P4T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	12.4021	21.2264	7.14259	6.5
P4T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	9.65541	15.1976	4.2381	4.3
P4T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	9.67227	19.625	5.53774	4.75
P4T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	8.29051	14.51465	4.64407	4.5
P4T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	15.4183	31.4540865	7.58673	7.5
P4T10	<i>Acacia raddiana</i>	14.0703	25.0591625	7.86023	7.75
P5T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	34.5831	51.50385	10.2883	10.9
P5T2	<i>Acacia raddiana</i>	9.33254	16.6106	3.80764	3.6
P5T3	<i>Acacia raddiana</i>	38.6096	83.28065	7.55311	6.5
P5T4	<i>Acacia raddiana</i>	2.23906	5.5126625	2.06427	2.75
P5T5	<i>Acacia raddiana</i>	26.1349	28.26	6.09754	5.5
P5T6	<i>Acacia raddiana</i>	3.12339	6.8314625	1.55035	2.25
P5T7	<i>Acacia raddiana</i>	22.8045	30.1754	5.80186	6
P5T8	<i>Acacia raddiana</i>	14.6385	41.375466	5.32805	4.5
P5T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	33.8681	70.84625	9.52146	6.85
P5T10	<i>Acacia raddiana</i>	8.84334	21.2264	4.52175	4.5
P6T1	<i>Acacia raddiana</i>	70.7037	105.6296	8.29364	8.75
P6T2	<i>Acacia raddiana</i>	44.7088	64.2934625	8.10514	10
P6T3	<i>Acacia nilotica</i> (L.) Willd.	9.67564	14.51465	4.68253	4.5
P6T4	<i>Acacia nilotica</i>	12.8236	20.41785	4.94797	5.5
P6T5	<i>Acacia nilotica</i>	14.5617	23.3164625	4.27056	4.25
P6T6	<i>Acacia nilotica</i>	22.6344	29.6906625	4.8285	5.5
P6T7	<i>Acacia raddiana</i>	106.162	129.6211625	9.3895	9.75
P6T8	<i>Acacia raddiana</i>	148.186	177.8044625	9.07378	8.5

P6T9	<i>Acacia raddiana</i>	59.174	79.2869625	8.34282	9
P6T10	<i>Acacia raddiana</i>	13.0167	20.8201625	5.82232	5.5
P8T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	32.0619	30.1754	6.45893	5.75
P8T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	11.5018	20.8201625	7.40824	7.5
P8T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.99132	18.4651625	5.26499	4.75
P8T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	35.2849	47.7594	8.89166	8.1
P8T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.842625	1.1304	1.86401	2
P8T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.24287	2.6866625	2.487	2.5
P8T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.126394	1.8859625	1.05111	2.5
P8T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	18.3271	20.61851563	6.83311	6.4
P8T9	<i>Acacia nilotica</i>	7.81534	13.5196625	4.8702	4.1
P8T10	<i>Acacia nilotica</i>	3.07558	4.15265	1.63894	1.6
P9T1	<i>Acacia raddiana</i>	55.3304	70.1024625	6.00554	5.9
P9T2	<i>Acacia raddiana</i>	72.0146	80.8726625	8.50947	8.1
P9T3	<i>Acacia nilotica</i>	69.2448	85.31429063	7.12828	6.7
P9T4	<i>Acacia raddiana</i>	41.9176	54.7321625	7.33125	7.5
P9T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	8.11309	11.3354	5.10119	5
P9T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	23.3142	23.74625	5.78945	5.5
P9T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.3764	25.9540625	5.70906	6.9
P9T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.7399	17.7115625	4.94659	4.9
P9T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	17.4475	15.89625	6.81154	6.1
P9T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	9.5307	11.6356625	5.43448	6
P10T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.1834	44.45111563	6.33514	6
P10T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.036	16.180106	5.95363	5
P10T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.6814	25.9540625	7.56781	5.7
P10T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	38.7711	44.45111563	8.30729	6
P10T5	<i>Acacia raddiana</i>	29.568	35.7665625	6.72355	5.6
P10T6	<i>Acacia raddiana</i>	76.0049	95.8504625	7.31522	6
P10T7	<i>Acacia raddiana</i>	156.074	206.0154	8.99016	6
P10T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.5442	16.43054063	7.54887	6.5
P10T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.6916	22.42668463	7.4285	6.5
P10T10	<i>Acacia raddiana</i>	5.64403	6.60185	3.19707	2.6
P11T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.65087	3.6286625	2.41534	3

P11T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	37.8718	36.8341625	8.80649	8.5
P11T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	11.4382	18.4651625	8.06503	7.25
P11T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	9.1191	15.89625	6.07396	5.5
P11T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	26.5712	40.1311625	6.93254	6.5
P11T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.10984	8.7047865	3.44061	3.5
P11T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.1422	4.3351625	3.54628	3.75
P11T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.2451	28.26	7.9327	7.75
P11T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	20.0856	23.3164625	9.41717	8.1
P11T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.864742	2.1371625	2.28879	2.75
P12T1	<i>Acacia raddiana</i>	92.154	89.0366625	9.62513	7.8
P12T2	<i>Acacia raddiana</i>	55.4062	56.0509625	8.7361	6.6
P12T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	30.7812	39.0164625	6.93182	4.9
P12T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.1252	21.6365625	10.5124	8.4
P12T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.1918	18.0864	7.06865	5.1
P12T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.1161	25.0591625	6.99715	5
P12T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.3269	18.4651625	7.82133	6.75
P12T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	8.39105	8.54865	8.21109	6.75
P12T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	10.415	12.56	8.0214	6.3
P12T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	11.6378	13.8474	5.7907	4.6
P13T1	<i>Acacia raddiana</i>	28.2433	17.34065	5.45042	5
P13T2	<i>Acacia raddiana</i>	47.1745	62.8804625	9.03129	10.25
P13T3	<i>Acacia raddiana</i>	46.4228	68.6266625	8.66463	8.6
P13T4	<i>Acacia raddiana</i>	51.7002	67.89465	7.88507	7.5
P13T5	<i>Acacia raddiana</i>	35.2696	58.0586	8.20676	8.8
P13T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.6663	23.18829163	5.62352	5
P13T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	8.77522	16.43054063	6.44374	6
P13T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.59957	8.54865	3.95701	5.1
P13T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.093	23.61690163	9.22361	7.75
P13T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.5533	22.05065	6.01764	6.75
P14T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	75.706	80.8726625	10.3998	10.9
P14T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	26.9959	44.15625	12.2375	9.9
P14T3	<i>Acacia nilotica</i>	5.66747	8.8096625	2.74108	2.65
P14T4	<i>Acacia raddiana</i>	31.54	54.7321625	6.69553	6.05

P14T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4.74525	10.1736	3.0616	3.55
P14T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	29.4775	40.6944	9.49601	7.9
P14T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.72707	3.14	2.17552	2.65
P14T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.21333	2.9849625	2.10413	2.1
P14T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.7662	15.89625	6.70383	5.6
P14T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.2804	4.5216	2.9653	2.5
P15T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	6.40689	6.8314625	4.39154	3.5
P15T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	35.8128	41.2615625	9.02676	7.25
P15T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4.49714	5.9365625	2.62905	2.9
P15T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.56686	3.46185	3.28998	2.9
P15T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	18.4403	23.3164625	7.91123	7.5
P15T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.60172	2.4040625	1.93795	1.9
P15T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.19723	3.747766625	3.19447	3.2
P15T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.1485	15.89625	6.63093	5.3
P15T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	65.2393	50.8699625	13.2053	11.8
P15T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.62226	2.098481625	2.19536	1.6
P17T1	<i>Acacia senegal</i> (L.) Willd.	10.708	14.68391563	2.36311	3.75
P17T2	<i>Acacia senegal</i>	3.54808	13.19585	1.38837	3
P17T3	<i>Acacia senegal</i>	9.94312	15.89625	1.44771	2.5
P17T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.488657	2.4040625	0.942947	3
P17T5	<i>Acacia senegal</i>	2.37955	4.7119625	1.38437	2.3
P17T6	<i>Acacia senegal</i>	7.09616	12.56	1.86115	2.3
P17T8	<i>Acacia senegal</i>	1.25351	3.9740625	0.357185	1.25
P17T9	<i>Acacia senegal</i>	6.31006	9.8929625	1.15823	2
P17T10	<i>Boscia senegalensis</i> (Pers.) Lam.	2.27332	4.15265	1.11421	1.5
P18T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.6086	17.15666563	7.48128	6.5
P18T2	<i>Acacia nilotica</i>	33.4861	48.68226563	7.70734	7.5
P18T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	37.8075	38.465	10.6019	9.1
P18T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	27.1878	26.8646625	10.1882	8
P18T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	29.0948	36.2984	10.5721	8.7
P18T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3.7615	15.09415663	4.62199	4

P18T7	<i>Acacia nilotica</i>	5.42356	10.1736	4.03835	3.2
P18T8	<i>Acacia nilotica</i>	27.2753	35.7665625	5.90738	4.6
P18T9	<i>Acacia raddiana</i>	26.5929	35.23865	11.8715	9.5
P18T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	10.8296	19.82174063	6.37932	5.35
P25T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	18.6082	27.7909625	8.12787	6.1
P25T2	<i>Boscia senegalensis</i>	1.94115	2.4040625	1.71037	1.5
P25T3	<i>Boscia senegalensis</i>	1.25505	2.83385	2.12476	1.6
P25T4	<i>Boscia senegalensis</i>	4.11657	8.54865	3.05635	2.5
P25T5	<i>Boscia senegalensis</i>	6.96135	10.1736	3.16631	2.5
P25T6	<i>Boscia senegalensis</i>	6.57647	10.1736	3.24355	2.5
P25T7	<i>Boscia senegalensis</i>	6.87768	9.3434625	3.25394	2.25
P25T8	<i>Boscia senegalensis</i>	11.8979	17.7115625	4.56606	3.6
P25T9	<i>Boscia senegalensis</i>	5.53896	8.54865	2.95546	2.6
P25T10	<i>Boscia senegalensis</i>	5.45529	9.0746	2.76501	2.25
P33T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.29039	5.9365625	3.49119	3.25
P33T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.396	11.3354	4.29476	4.25
P33T3	<i>Acacia seyal</i> Del.	4.69724	10.1736	2.65038	2.75
P33T4	<i>Acacia senegal</i>	6.87116	13.68304063	4.04509	4
P33T5	<i>Acacia senegal</i>	27.6593	34.7146625	5.45857	5
P33T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	6.32768	9.8929625	6.27321	5.1
P33T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.58933	11.6356625	4.63973	4.5
P33T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4.48372	11.0390625	5.24022	6
P33T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.95813	13.5196625	6.36611	6.5
P33T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3.92083	7.7891625	3.99832	2.5
P34T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	22.4421	43.97980163	6.48955	7.5
P34T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.4283	26.63554063	5.15361	5.25
P34T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	15.4234	25.0591625	7.22312	7.9
P34T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.3474	30.6640625	4.65888	5.9
P34T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	2.50541	4.225184	2.83015	3.75
P34T6	<i>Acacia senegal</i>	10.5903	40.86413663	3.92584	4.2
P34T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.37409	11.0390625	3.15795	4.1
P34T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.923982	4.3351625	1.5404	2.2
P34T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	17.8222	40.18730963	5.43919	6.5

P34T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.888444	2.5434	1.91031	3.25
P35T1	<i>Acacia raddiana</i>	71.2699	95.1577785	9.51971	9.3
P35T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.94813	12.8759625	6.04153	5.4
P35T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.1646	20.8201625	5.73012	6
P35T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.921522	5.617165625	1.80931	3.2
P35T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.4114	18.84785	6.13547	6.5
P35T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	10.2848	15.1976	5.93084	5.1
P35T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	32.2697	36.8341625	8.52005	7.5
P35T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	9.67599	10.1736	3.51014	3.75
P35T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	11.1405	17.97353663	6.696	6
P35T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3.58736	3.730634	2.96004	2.85
P36T1	<i>Acacia raddiana</i>	11.9471	19.625	4.49995	4.3
P36T2	<i>Acacia raddiana</i>	3.11338	5.1044625	1.82343	2.5
P36T3	<i>Acacia seyal</i>	5.62659	8.8096625	2.45973	2.4
P36T4	<i>Acacia seyal</i>	16.6922	18.0864	3.75484	3.5
P36T5	<i>Acacia raddiana</i>	10.4279	10.4581625	3.89437	3.5
P36T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	12.3035	16.6106	4.87021	4.5
P36T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	6.7144	10.1736	5.88536	5.25
P36T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	1.44416	2.26865	1.84795	2.4
P36T9	<i>Acacia seyal</i>	6.97697	8.8096625	4.91321	4
P36T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	18.8303	19.625	6.00079	4.3
P37T1	<i>Acacia senegal</i>	13.7985	20.8201625	4.30665	4.75
P37T2	<i>Acacia senegal</i>	9.9646	25.9540625	4.50744	4.75
P37T3	<i>Acacia senegal</i>	22.6677	32.6579625	3.29332	3.5
P37T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	4.57594	6.488515625	2.73608	3.25
P37T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	31.0069	34.7146625	7.89219	8.5
P37T6	<i>Acacia senegal</i>	17.5794	24.6176	3.05941	3.5
P37T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	5.0883	6.762166625	3.86298	4.3
P37T8	<i>Acacia senegal</i>	14.1518	20.29792163	3.53995	3.85
P37T9	<i>Acacia senegal</i>	3.67489	7.471021625	2.01929	2.5
P37T10	<i>Acacia senegal</i>	4.78795	9.61625	2.0708	2.25
P39T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	10.9567	12.4972785	6.09132	6
P39T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	12.8289	17.34065	5.61595	7

P39T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.25482	10.4581625	5.2429	5.6
P39T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.8712	21.719066	5.80987	6.75
P39T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.23355	12.2479625	6.47049	7.25
P39T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	21.8283	31.15665	7.52596	8.25
P39T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	24.1473	24.6176	6.55741	7.25
P39T8	<i>Balanites aegyptiaca</i>	16.0415	19.625	6.00947	7.25
P39T9	<i>Balanites aegyptiaca</i>	52.3794	51.50385	7.57147	9
P39T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.6165	9.61625	3.63626	5
P41T1	<i>Balanites aegyptiaca</i>	8.77372	13.5196625	4.52562	4.6
P41T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.13861	11.3354	4.79531	4.85
P41T3	<i>Balanites aegyptiaca</i>	10.1097	3.46185	0.864664	2.5
P41T4	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.8954	12.56	3.34378	5.4
P41T5	<i>Balanites aegyptiaca</i>	14.0978	14.51465	5.56249	5.75
P41T6	<i>Acacia raddiana</i>	8.01599	10.4581625	3.15295	3.25
P41T7	<i>Balanites aegyptiaca</i>	7.11867	14.8541625	5.6617	5.9
P41T8	<i>Acacia raddiana</i>	102.074	116.8394	11.8248	16
P41T9	<i>Acacia senegal</i>	37.7868	21.6365625	5.12652	4.25
P41T10	<i>Balanites aegyptiaca</i>	3.03092	5.1044625	2.74351	3.5
P56T1	<i>Boscia senegalensis</i>	3.11646	4.731214625	2.27932	2.25
P56T2	<i>Balanites aegyptiaca</i>	0.529594	3.2989625	3.28044	4.3
P56T3	<i>Acacia nilotica</i>	61.881	75.8536865	7.11948	7.1
P56T4	<i>Acacia raddiana</i>	46.2376	55.3896	8.90185	9.5
P56T5	<i>Acacia nilotica</i>	1.01845	5.5126625	2.52035	2.8
P56T6	<i>Balanites aegyptiaca</i>	13.8713	13.5196625	5.98889	5
P56T7	<i>Acacia nilotica</i>	17.2729	26.8646625	6.14623	5.5
P56T8	<i>Boscia senegalensis</i>	10.877	11.3354	4.0675	2.25
P56T9	<i>Acacia nilotica</i>	26.0112	25.9540625	6.58582	6.5
P56T10	<i>Acacia senegal</i>	6.64029	9.0746	3.50816	4

Annexe 3 : Mesure sur les herbacées (vol à 30 m)

Code quadra	Vol(m3) _drone	Poids matière fraîche(g)	Pourcentage MS (%)	Poids matière sèche (g)
P1Q1	0.081656116	1120	29.33333333	328.5333333
P1Q2	0.021107152	220	29.33333333	64.53333333
P1Q3	0.00619251	770	29.33333333	225.8666667
P1Q4	0.002536047	230	29.33333333	67.46666667
P1Q5	0.003112644	355	29.33333333	104.1333333
P1Q6	0.004256835	305	29.33333333	89.46666667
P1Q7	0.003055466	500	29.33333333	146.6666667
P1Q8	0.051971865	980	29.33333333	287.4666667
P1Q9	0.022494737	640	29.33333333	187.7333333
P1Q10	0.008510124	300	29.33333333	88
P2Q1	0.010209731	780	34	265.2
P2Q2	0.003990513	560	34	190.4
P2Q3	0.003116069	600	34	204
P2Q4	0.013006121	820	34	278.8
P2Q6	0.009010594	965	34	328.1
P2Q7	0.040222031	1080	34	367.2
P2Q8	0.001606361	400	34	136
P2Q9	0.01223499	785	34	266.9
P2Q10	0.004326085	640	34	217.6
P3Q1	0.000524355	680	40	272
P3Q2	0.000152866	280	40	112
P3Q3	0.000355432	400	40	160
P3Q4	0.000324479	640	40	256
P3Q5	-6.12925E-05	840	40	336
P3Q6	1.10729911	840	40	336
P3Q7	0.001274817	780	40	312
P3Q8	5.38267E-05	675	40	270

P3Q9	0.000992308	740	40	296
P3Q10	0.000820635	600	40	240
P4Q1	0.129368413	1750	35.33333333	618.3333333
P4Q2	0.014537346	1340	35.33333333	473.4666667
P4Q3	0.012015627	765	35.33333333	270.3
P4Q4	0.016202062	625	35.33333333	220.8333333
P4Q5	0.01046168	1640	35.33333333	579.4666667
P4Q6	0.012652076	1320	35.33333333	466.4
P4Q7	0.009389536	1180	35.33333333	416.9333333
P4Q8	0.016319148	1300	35.33333333	459.3333333
P4Q9	0.01062198	1340	35.33333333	473.4666667
P4Q10	0.010863479	1145	35.33333333	404.5666667
P5Q1	0.207531214	1525	35.33333333	538.8333333
P5Q2	0.082615604	1820	35.33333333	643.0666667
P5Q3	0.063471226	2200	35.33333333	777.3333333
P5Q4	0.078090103	1265	35.33333333	446.9666667
P5Q5	0.101828833	1400	35.33333333	494.6666667
P5Q6	0.050330248	900	35.33333333	318
P5Q7	0.063067992	1720	35.33333333	607.7333333
P5Q8	0.055124482	1100	35.33333333	388.6666667
P5Q9	0.050962185	1520	35.33333333	537.0666667
P5Q10	0.096137398	1720	35.33333333	607.7333333
P6Q1	0.008920115	750	38	285
P6Q2	0.031960599	1110	38	421.8
P6Q3	0.007002595	870	38	330.6
P6Q4	0.02275637	1020	38	387.6
P6Q5	0.019825114	1300	38	494
P6Q6	0.029442614	1180	38	448.4
P6Q7	0.060407211	1680	38	638.4
P6Q8	0.033902422	1115	38	423.7

P6Q9	0.025442816	1380	38	524.4
P6Q10	0.040505565	1270	38	482.6
P7Q1	0.095801003	2680	26	696.8
P7Q2	0.010315083	1220	26	317.2
P7Q3	0.009540604	1065	26	276.9
P7Q4	0.014977115	1100	26	286
P7Q5	0.013244183	1900	26	494
P7Q6	0.010478902	1340	26	348.4
P7Q7	0.008222967	640	26	166.4
P7Q8	0.020344877	1300	26	338
P7Q9	0.020450854	940	26	244.4
P7Q10	0.005339733	680	26	176.8
P8Q1	0.051187892	985	31.33333333	308.6333333
P8Q2	0.028069431	910	31.33333333	285.1333333
P8Q3	0.005374281	620	31.33333333	194.2666667
P8Q4	0.011217175	640	31.33333333	200.5333333
P8Q5	0.035213085	625	31.33333333	195.8333333
P8Q6	0.05294384	860	31.33333333	269.4666667
P8Q7	0.041263236	1200	31.33333333	376
P8Q8	0.011674154	965	31.33333333	302.3666667
P8Q9	0.013298791	800	31.33333333	250.6666667
P8Q10	0.054405381	850	31.33333333	266.3333333
P9Q1	0.137891534	1460	31.33333333	457.4666667
P9Q2	0.02736197	2420	31.33333333	758.2666667
P9Q3	0.091541492	2160	31.33333333	676.8
P9Q4	0.01343242	1440	31.33333333	451.2
P9Q5	0.018255696	400	31.33333333	125.3333333
P9Q6	0.040931956	1000	31.33333333	313.3333333
P9Q7	0.016333863	2025	31.33333333	634.5
P9Q8	0.033618837	1060	31.33333333	332.1333333

P9Q9	0.024660384	725	31.33333333	227.1666667
P9Q10	0.03104533	1425	31.33333333	446.5
P10Q1	0.118143334	680	31.66666667	215.3333333
P10Q2	0.06931198	1040	31.66666667	329.3333333
P10Q3	0.0562373	890	31.66666667	281.8333333
P10Q4	0.076165818	1060	31.66666667	335.6666667
P10Q5	0.074021512	1070	31.66666667	338.8333333
P10Q6	0.048508679	1420	31.66666667	449.6666667
P10Q7	0.103370564	1380	31.66666667	437
P10Q8	0.058003338	1150	31.66666667	364.1666667
P10Q9	0.187071751	1590	31.66666667	503.5
P11Q1	0.045408023	870	33.33333333	290
P11Q2	0.022344941	800	33.33333333	266.6666667
P11Q3	0.033046619	1220	33.33333333	406.6666667
P11Q4	0.029209603	1580	33.33333333	526.6666667
P11Q5	0.015986411	1020	33.33333333	340
P11Q6	0.015785255	1170	33.33333333	390
P11Q7	0.020530165	1110	33.33333333	370
P11Q8	0.049027675	2300	33.33333333	766.6666667
P11Q9	0.014828302	860	33.33333333	286.6666667
P11Q10	0.021858809	1230	33.33333333	410
P12Q1	0.1221565	900	41.33333333	324
P12Q2	0.060445373	1350	41.33333333	486
P12Q3	0.033318226	1320	41.33333333	475.2
P12Q4	0.031457324	1130	41.33333333	406.8
P12Q5	0.044603952	950	41.33333333	342
P12Q6	0.011042607	790	41.33333333	284.4
P12Q7	0.062653255	960	41.33333333	345.6
P12Q8	0.006394329	510	41.33333333	183.6
P12Q9	0.022132144	610	41.33333333	219.6

P12Q10	0.028713525	930	41.33333333	334.8
P13Q1	0.314727884	1180	80	401.2
P13Q2	0.018608905	320	80	108.8
P13Q3	0.098476002	1700	80	578
P13Q4	0.032502289	1890	80	642.6
P13Q5	0.083786953	740	80	251.6
P13Q6	0.042090762	1370	80	465.8
P13Q7	0.037942139	680	80	231.2
P13Q8	0.020626179	400	80	136
P13Q9	0.110647369	1520	80	516.8
P13Q10	0.123414008	1800	80	612
P16Q1	0.004925992	270	43.33333333	90
P16Q2	0.001774664	230	43.33333333	76.66666667
P16Q3	0.002191022	310	43.33333333	103.3333333
P16Q4	0.0516368	260	43.33333333	86.66666667
P16Q5	0.0373999	310	43.33333333	103.3333333
P16Q6	0.021362143	250	43.33333333	83.33333333
P16Q7	0.001293395	210	43.33333333	70
P16Q8	0.001296553	110	43.33333333	36.66666667
P16Q9	0.007536069	250	43.33333333	83.33333333
P16Q10	0.000857993	130	43.33333333	43.33333333
P17Q1	0.003579875	300	40.66666667	112
P17Q2	0.017368657	430	40.66666667	160.5333333
P17Q3	0.002527807	290	40.66666667	108.2666667
P17Q4	0.005303419	300	40.66666667	112
P17Q5	0.010538208	230	40.66666667	85.86666667
P17Q6	0.001416213	100	40.66666667	37.33333333
P17Q7	0.001799001	110	40.66666667	41.06666667
P17Q8	0.001503818	100	40.66666667	37.33333333
P17Q9	0.004199511	140	40.66666667	52.26666667

P17Q10	0.001376409	100	40.66666667	37.33333333
P18Q1	0.067511262	600	40.66666667	256
P18Q2	0.004269169	100	40.66666667	42.66666667
P18Q3	0.028904333	820	40.66666667	349.8666667
P18Q4	0.016929742	365	40.66666667	155.7333333
P18Q5	0.030382166	380	40.66666667	162.1333333
P18Q6	0.015921367	265	40.66666667	113.0666667
P18Q7	0.017062624	320	40.66666667	136.5333333
P18Q8	0.017550304	320	40.66666667	136.5333333
P18Q9	0.133657574	1110	40.66666667	473.6
P18Q10	0.014220505	420	40.66666667	179.2
P19Q1	0.356991136	1650	38	660
P19Q2	0.064634645	1225	38	490
P19Q3	0.052092597	600	38	240
P19Q4	0.081897236	1020	38	408
P19Q5	0.004432408	120	38	48
P19Q6	0.018959133	550	38	220
P19Q7	0.051178612	765	38	306
P19Q8	0.096241952	720	38	288
P19Q9	0.093140753	1340	38	536
P19Q10	0.186935546	1040	38	416
P21Q1	0.003970078	190	40.66666667	77.26666667
P21Q3	0.017573254	500	40.66666667	203.3333333
P21Q4	0.011692767	220	40.66666667	89.46666667
P21Q5	0.002166279	50	40.66666667	20.33333333
P21Q6	0.001725648	80	40.66666667	32.53333333
P21Q7	0.001488106	110	40.66666667	44.73333333
P21Q8	0.010351634	260	40.66666667	105.7333333
P21Q9	0.013448323	230	40.66666667	93.53333333
P21Q10	0.050910035	1570	40.66666667	638.4666667

P24Q1	0.019646048	410	33.33333333	136.6666667
P24Q2	0.004401326	210	33.33333333	70
P24Q3	0.003918782	200	33.33333333	66.66666667
P24Q4	0.005061933	200	33.33333333	66.66666667
P24Q5	0.523017717	120	33.33333333	40
P24Q6	0.007817286	190	33.33333333	63.33333333
P24Q7	0.040527157	290	33.33333333	96.66666667
P24Q8	0.076371161	600	33.33333333	200
P24Q9	0.003379373	210	33.33333333	70
P24Q10	0.000905805	200	33.33333333	66.66666667
P25Q1	0.039765942	565	40.66666667	229.7666667
P25Q2	0.003728752	100	40.66666667	40.66666667
P25Q3	0.003821393	125	40.66666667	50.83333333
P25Q4	0.004657933	160	40.66666667	65.06666667
P25Q5	0.029386386	640	40.66666667	260.2666667
P25Q6	0.008391032	200	40.66666667	81.33333333
P25Q7	0.44692651	400	40.66666667	162.6666667
P25Q8	0.009597069	480	40.66666667	195.2
P25Q9	0.049925229	440	40.66666667	178.9333333
P25Q10	0.007684359	220	40.66666667	89.46666667
P30Q1	0.292077318	760	41.33333333	314.1333333
P30Q2	0.009846575	170	41.33333333	70.26666667
P30Q3	0.385429244	150	41.33333333	62
P30Q5	0.003978399	30	41.33333333	12.4
P30Q6	0.026025371	270	41.33333333	111.6
P30Q7	0.022521764	120	41.33333333	49.6
P30Q8	0.01092783	170	41.33333333	70.26666667
P30Q9	0.005051501	90	41.33333333	37.2
P31Q1	0.090933489	750	37.33333333	280
P31Q2	0.868688785	680	37.33333333	253.8666667

P31Q3	0.068561891	540	37.33333333	201.6
P31Q4	0.02766939	440	37.33333333	164.2666667
P31Q5	0.016160497	170	37.33333333	63.46666667
P31Q6	0.008714482	150	37.33333333	56
P31Q7	0.003495761	300	37.33333333	112
P31Q8	0.945700281	530	37.33333333	197.8666667
P31Q9	0.004450804	150	37.33333333	56
P31Q10	0.034100486	100	37.33333333	37.33333333
P33Q1	0.190797767	520	53.33333333	277.3333333
P33Q2	0.028848844	1300	53.33333333	693.3333333
P33Q3	0.020443657	800	53.33333333	426.6666667
P33Q4	0.003141692	780	53.33333333	416
P33Q5	0.007101063	300	53.33333333	160
P33Q6	0.042315174	720	53.33333333	384
P33Q7	0.016120335	400	53.33333333	213.3333333
P33Q8	0.013943258	200	53.33333333	106.6666667
P33Q9	0.027805383	570	53.33333333	304
P33Q10	0.035889138	570	53.33333333	304
P34Q1	0.418212824	1540	40	616
P34Q2	0.004621934	300	40	120
P34Q3	0.006831455	360	40	144
P34Q4	0.075307543	680	40	272
P34Q5	0.038470957	600	40	240
P34Q6	0.06054989	960	40	384
P34Q7	0.064936539	1100	40	440
P34Q8	0.089228464	1280	40	512
P34Q9	0.091413533	1600	40	640
P34Q10	0.093169796	760	40	304
P35Q1	1.200359078	420	40	168
P35Q2	0.013090105	160	40	64

P35Q3	0.008204113	240	40	96
P35Q4	0.018629652	260	40	104
P35Q5	0.01376902	240	40	96
P35Q6	0.125355278	600	40	240
P35Q7	0.141324083	1020	40	408
P35Q8	0.135157434	920	40	368
P35Q9	0.032659364	349	40	139.6
P35Q10	0.1644507	570	40	228
P36Q1	0.269581081	1100	50	550
P36Q2	0.016580485	400	50	200
P36Q3	0.13045339	1060	50	530
P36Q4	0.011283036	320	50	160
P36Q5	0.007939548	300	50	150
P36Q6	0.040745375	580	50	290
P36Q7	0.183871874	580	50	290
P36Q8	0.240442919	1260	50	630
P36Q9	0.048091871	620	50	310
P36Q10	0.028325826	340	50	170
P37Q1	0.008066257	560	32.66666667	182.9333333
P37Q2	0.021684232	1060	32.66666667	346.2666667
P37Q3	0.046014923	1060	32.66666667	346.2666667
P37Q4	0.031149079	1080	32.66666667	352.8
P37Q5	0.038424568	940	32.66666667	307.0666667
P37Q6	0.042602224	1200	32.66666667	392
P37Q7	0.09707067	2440	32.66666667	797.0666667
P37Q8	0.074085911	1740	32.66666667	568.4
P37Q9	0.042271565	1560	32.66666667	509.6
P37Q10	0.04911843	1640	32.66666667	535.7333333
P38Q1	0.061358204	1450	24.66666667	357.6666667
P38Q2	0.060683403	1910	24.66666667	471.1333333

P38Q3	0.017211792	1470	24.66666667	362.6
P38Q4	0.016257555	1220	24.66666667	300.9333333
P38Q5	0.04814422	1435	24.66666667	353.9666667
P38Q6	0.023863355	1580	24.66666667	389.7333333
P38Q7	0.029584214	1590	24.66666667	392.2
P38Q8	0.036028948	1310	24.66666667	323.1333333
P38Q9	0.020295489	990	24.66666667	244.2
P38Q10	0.020813724	1515	24.66666667	373.7
P39Q1	0.070616231	1200	39.33333333	472
P39Q2	0.007734721	770	39.33333333	302.8666667
P39Q3	0.00470522	310	39.33333333	121.9333333
P39Q4	0.006791823	610	39.33333333	239.9333333
P39Q5	0.009210754	600	39.33333333	236
P39Q6	0.068764621	650	39.33333333	255.6666667
P39Q7	0.009394498	270	39.33333333	106.2
P39Q8	0.005161863	470	39.33333333	184.8666667
P39Q9	0.006295266	390	39.33333333	153.4
P39Q10	0.010496902	390	39.33333333	153.4
P40Q1	0.018269635	140	53	74.2
P40Q2	0.025954361	130	53	68.9
P40Q3	0.029623288	190	53	100.7
P40Q4	0.009384481	240	53	127.2
P40Q5	0.01306904	360	53	190.8
P40Q6	0.014381349	120	53	63.6
P40Q7	0.015955157	200	53	106
P40Q8	0.01853066	190	53	100.7
P40Q9	0.027225476	110	53	58.3
P40Q10	0.034898765	150	53	79.5
P42Q1	0.071006897	650	80	520
P42Q2	0.005957786	110	80	88

P42Q3	0.009133374	165	80	132
P42Q4	0.013413326	175	80	140
P42Q5	0.008951227	0	80	0
P42Q6	0.003511422	0	80	0
P42Q7	0.025163858	320	80	256
P42Q8	0.028605417	135	80	108
P42Q9	0.005354073	0	80	0
P42Q10	0.004261603	175	80	140
P43Q1	0.094330214	750	43.33333333	325
P43Q2	0.002397672	130	43.33333333	56.33333333
P43Q3	0.012387351	80	43.33333333	34.66666667
P43Q4	0.008957766	180	43.33333333	78
P43Q5	0.029707079	560	43.33333333	242.6666667
P43Q6	0.009165937	340	43.33333333	147.3333333
P43Q7	0.006497984	240	43.33333333	104
P43Q8	0.005442725	100	43.33333333	43.33333333
P43Q9	0.074298287	1060	43.33333333	459.3333333
P43Q10	0.013539241	440	43.33333333	190.6666667
P54Q1	0.031494251	470	40.66666667	191.1333333
P54Q2	0.007111497	120	40.66666667	48.8
P54Q3	0.012057679	220	40.66666667	89.46666667
P54Q4	0.010623863	240	40.66666667	97.6
P54Q5	0.005198301	200	40.66666667	81.33333333
P54Q6	0.039303607	340	40.66666667	138.2666667
P54Q7	0.006163583	150	40.66666667	61
P54Q8	0.005423112	40	40.66666667	16.26666667
P54Q9	0.006117036	40	40.66666667	16.26666667
P54Q10	0.040180336	70	40.66666667	28.46666667
P55Q1	0.336996232	1380	40.66666667	561.2
P55Q2	0.026195966	450	40.66666667	183

P55Q3	0.004032967	70	40.66666667	28.46666667
P55Q4	0.05293668	410	40.66666667	166.7333333
P55Q5	0.004339546	70	40.66666667	28.46666667
P55Q6	0.00226723	380	40.66666667	154.5333333
P55Q7	0.011816107	370	40.66666667	150.4666667
P55Q8	0.030132523	360	40.66666667	146.4
P55Q9	0.00249901	180	40.66666667	73.2
P55Q10	0.003239993	70	40.66666667	28.46666667
P56Q1	0.327646259	770	38	292.6
P56Q2	0.307653113	700	38	266
P56Q3	0.003579453	40	38	15.2
P56Q4	0.004361259	40	38	15.2
P56Q5	0.02157727	120	38	45.6
P56Q6	0.004214446	20	38	7.6
P56Q7	0.003584832	130	38	49.4
P56Q8	0.159221696	600	38	228
P56Q9	0.028224225	200	38	76
P56Q10	0.078162501	300	38	114

Annexe 4 : Mesures sur les herbacées (vidéo à 1m)

Code (quadra)	Poids biomasse fraiche(g)	Pourcentage MS	Poids matière sèche(g)	Volume (m3) _drone
P1Q1	1120.00	29.33333333	328.5333333	0.18
P2Q1	780.00	34	265.2	0.12
P3Q1	680.00	40	272	0.08
P4Q1	1750.00	35.33333333	618.3333333	0.37
P5Q1	1525.00	35.33333333	538.8333333	0.21
P6Q1	750.00	38	285	0.09
P7Q1	2680.00	26	696.8	0.25
P8Q1	985.00	31.33333333	308.6333333	0.20
P9Q1	1460.00	31.33333333	457.4666667	0.23
P10Q1	680.00	31.66666667	215.3333333	0.22
P11Q1	870.00	33.33333333	290	0.18
P12Q1	900.00	36	324	0.18
P13Q1	1180.00	34	401.2	0.29
P16Q1	270.00	33.33333333	90	0.02
P17Q4	300.00	37.33333333	112	0.04
P18Q1	600.00	42.66666667	256	0.08
P19Q1	1650.00	40	660	0.23
P21Q1	190.00	40.66666667	77.26666667	0.05
P24Q1	410.00	33.33333333	136.6666667	0.11
P25Q1	565.00	40.66666667	229.7666667	0.08
P30Q1	760.00	41.33333333	314.1333333	0.25
P31Q1	750.00	37.33333333	280	0.25
P33Q1	520.00	53.33333333	277.3333333	0.27
P34Q1	1540.00	40	616	0.36
P35Q1	420.00	40	168	0.04
P36Q1	1100.00	50	550	0.27
P37Q1	560.00	32.66666667	182.9333333	0.14
P38Q1	1450.00	24.66666667	357.6666667	0.27

P39Q1	1200.00	39.33333333	472	0.31
P40Q1	140.00	53	74.2	0.06
P42Q1	650.00	80	520	0.17
P43Q1	750.00	43.33333333	325	0.13
P54Q1	470.00	40.66666667	191.1333333	0.05
P55Q1	1380.00	40.66666667	561.2	0.23
P56Q1	770.00	38	292.6	0.29

Annexe 5 : Publications et communications réalisés et à réaliser à partir de ce travail

Article à publier

- ✚ **Bossoukpe F.O.M.**, Ndiaye O., Diatta O., Diatta S., Dendoncker M., Diouf AA, Assouma M.H., Faye E., Taugourdeau S. Low cost UAV can measure Sahelian savanna trees characteristics using photogrammetry (en preparation, Journal or Arid Environment).
- ✚ **Bossoukpe F.O.M.**, Ndiaye O., Diatta O., Diatta S., Diouf AA., Assouma M.H., Faye E., Taugourdeau S. Intérêt du drone pour l'évaluation de la végétation herbacée et arborées en zones pastorales (en préparation Cahiers de l'agriculture).

Poster et Communication à des conférences scientifiques

- ✚ Taugourdeau, S., **M. Bossoukpe**, O. Ndiaye, J. Cesaro, I. Touré, J. Bourgoïn, G. Dorégo, A. Diouf, and E. Faye. 2019a. Utilisation des drones dans la recherche sur le pastoralisme. Page Avril 2019 AgrinumA, Dakar.
- ✚ **Bossoukpe F.O.M.**, Ndiaye O., Diatta O., Diatta S., Diouf AA., Assouma M.H., Faye E., Taugourdeau S. Use of photogrammetry from camera for the measurement on herbaceous biomass of Sahelian rangeland. (Soumis à EGF 2020 à Helsinki).

Presentations

- ✚ **Bossoukpe F.O.M.**, Faye E., Taugourdeau S., 2019. Utilisation des drones et de la photogrammétrie pour l'étude de la végétation sahélienne. Conseil scientifique et Administratif du Pole Pastorale Zone Sèche (PPZS), Dakar, Sénégal, 11-12 février.

- **Bossoukpe M** Animation scientifique au CRZ de Dahra.
- **Taugourdeau S** Animation scientifique au LNERV de ISRA

Rapport et fiches techniques

- ✚ Taugourdeau, S., O. Ndiaye, O. Diatta, M. Bossoukpe, A. N'Goran, and J. Djagoun. 2019b. Test de protocole pour l'utilisation de la photogrammétrie pour l'étude de la végétation de savanes sahéliennes à partir d'appareil photographique compact et de drones lowcost. Document technique et de recherche, CIRAD, Montpellier, France.