

## *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**

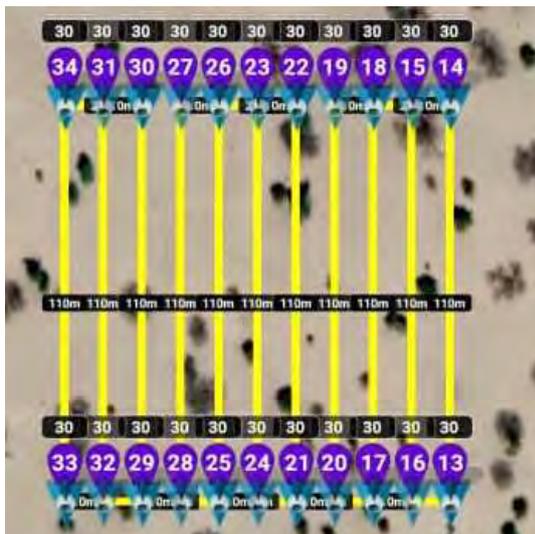
Plusieurs plans de vols ont été aussi testés en avant-projet afin de choisir le plus approprié. Pour cela, différents plans de vol (croisés et simples) ont été effectués à différentes altitudes : 80, 70, 60, 50, 30 et 20 m (Taugourdeau *et al.*, 2019). La conclusion de ces essais est qu'il est nécessaire 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 1m<sup>2</sup>, 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)



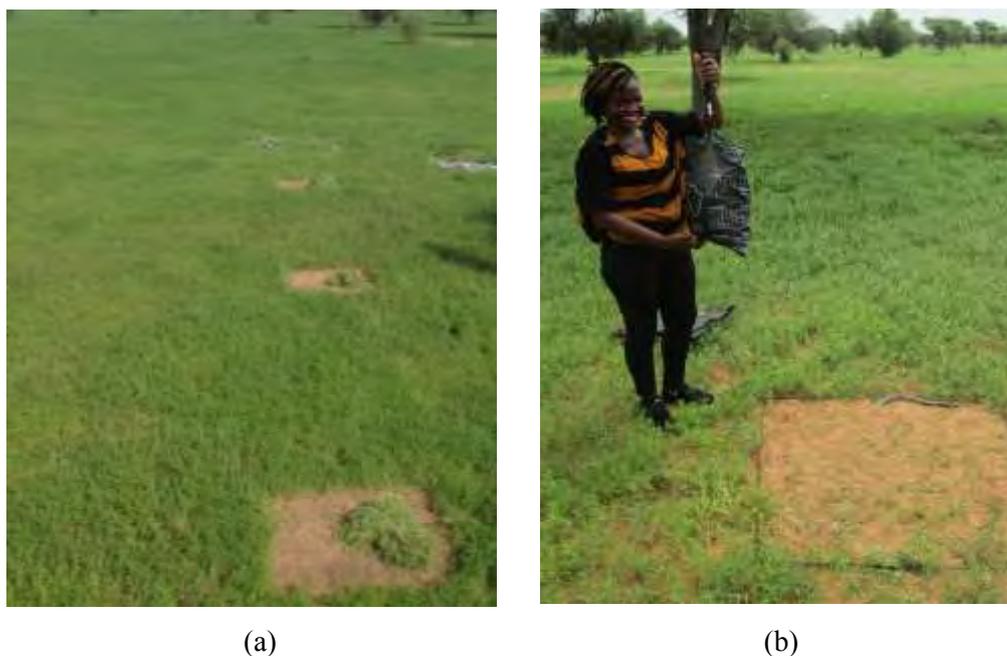
(b)

**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 1m<sup>2</sup> 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 décamètre, 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,  $\alpha$  : angle de visée haute et  $\beta$  : 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

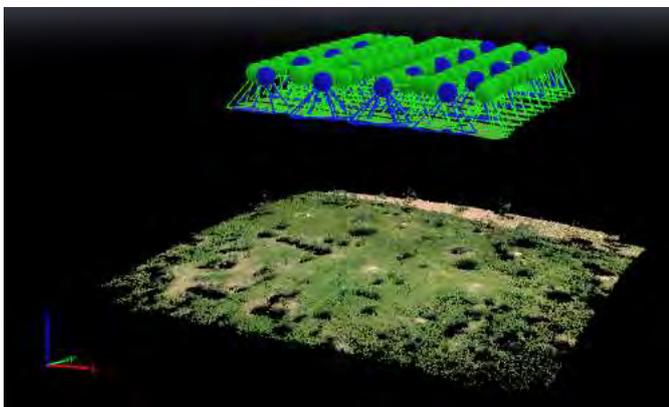
#### 1. Création des modèles 3D : Cartographie 3D

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)

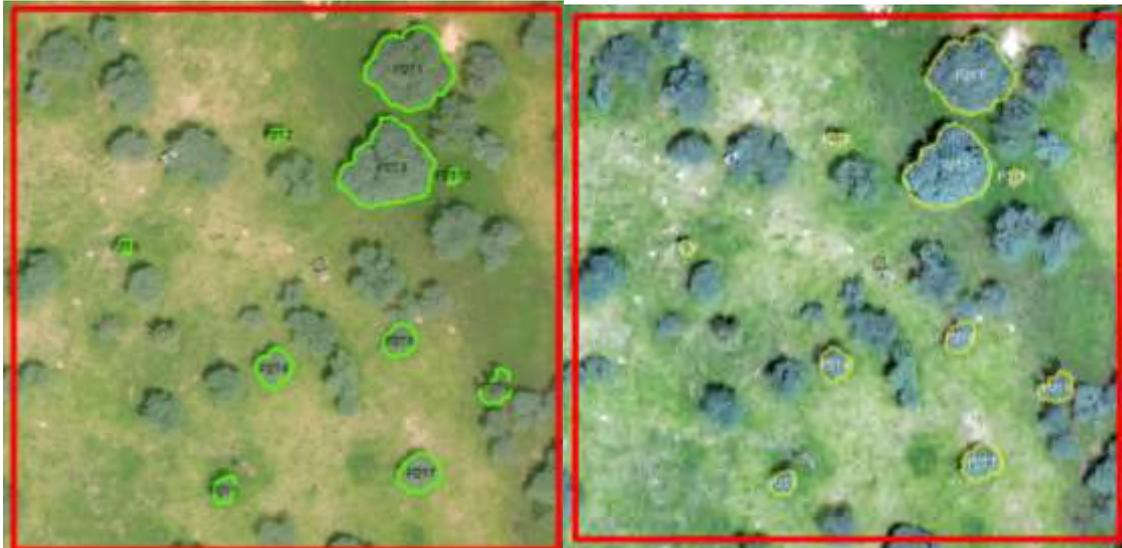
**Photo 10:** Phase de densification des points d'une parcelle (a) et modèle 3D d'un quadra de 1 m<sup>2</sup> (b)



**Photo 11:** Orthophotographie d'un quadra de 1m<sup>2</sup>

## ***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 m<sup>2</sup>) 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  $\text{CHM}^2$  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.

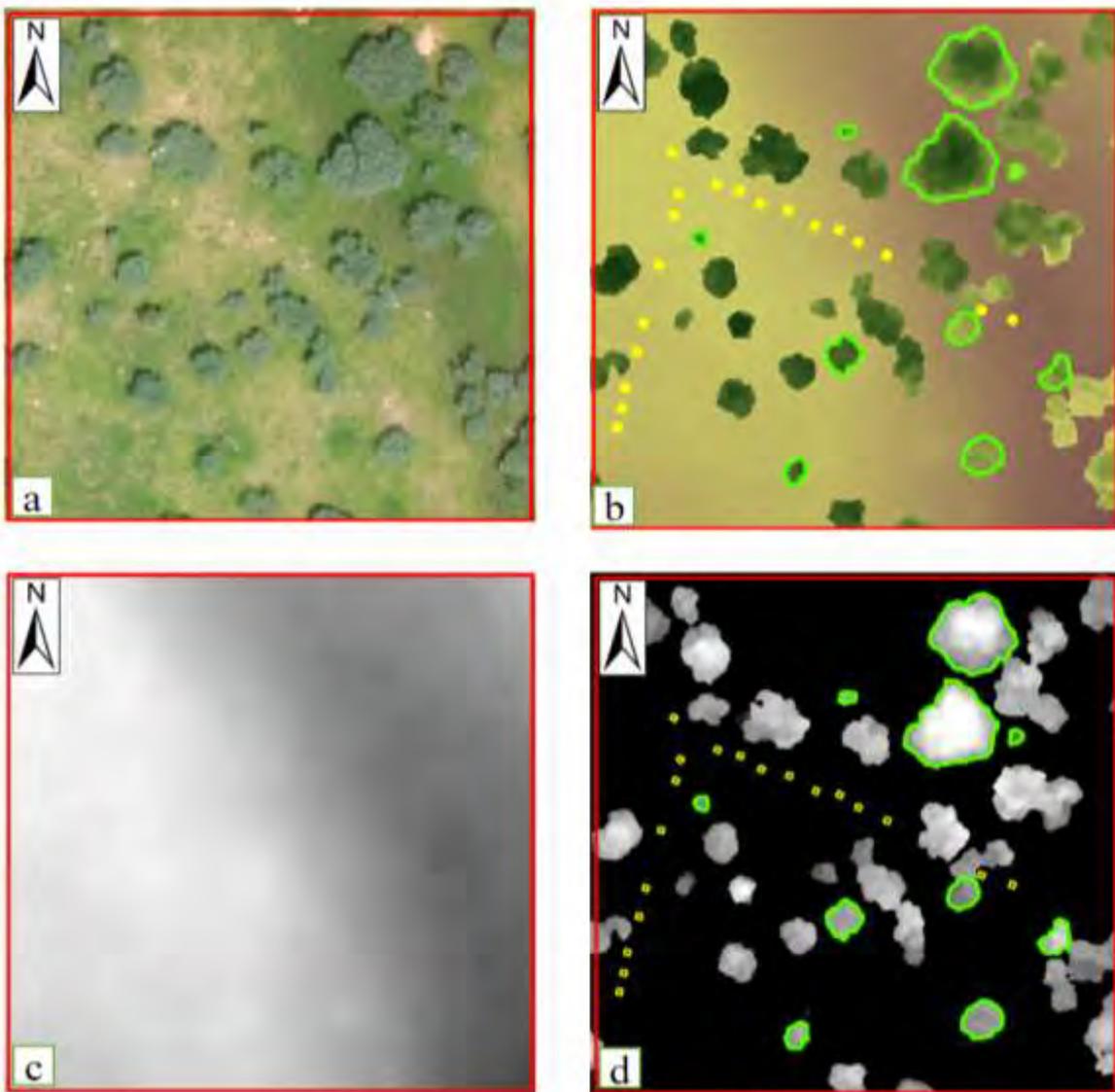
Pour les herbacées, ce sont les volumes de biomasse fraîche et sèche qui ont été comparés à 30 m et 1m.

## 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 m<sup>2</sup>) et les délimités en vert représentent les couronnes d'arbres suivis.