

## 2. Matériel et Méthodes

### 2.1. Présentation du milieu d'étude

L'étude a été réalisée dans le parc agroforestier de Niakhar/Sob, une localité sère du bassin arachidier du Sénégal, située dans le département de Fatick (Fig. 1). Le climat de la région est soudanien avec deux saisons distinctes et une précipitation annuelle de 600 mm (Faye *et al.*, 2018). Les températures ont de faibles amplitudes annuelles. Il pleut surtout au cours des mois de juillet, août et septembre. On constate dans la région, une grande variabilité d'une année à l'autre, de la quantité d'eau de pluie, mais aussi de la répartition dans le temps et dans l'espace des précipitations (Delaunay, 2017). Le sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sur sable appelé sol Dior (étendue de sable en Ouolof), est le type de sol dominant. Toutefois, on rencontre dans les bas-fonds de la zone, les sols Deck-Dior (une transition entre les sols Dior et les sols ferrugineux tropicaux non lessivés appelés Deck) et Tann (sols salés et acidifiés) (Khouma, 1998; Faye *et al.*, 2018). L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités de la population. Le couvert végétal permanent est principalement constitué du *Faidherbia albida*, présent avec des densités variables dans toute la zone.

Le site « Faidherbia-Flux », a été lancé au début de l'année 2018, pendant la saison sèche (<https://lped.info/wikiObsSN/?Faidherbia-Flux>) (Roupsard *et al.*, 2020). C'est un site très instrumenté, installé dans les champs de brousse agro-sylvo-pastoraux actifs des agriculteurs, qui sont dominés par le *Faidherbia albida*. La sous-culture est une mosaïque de cultures, y compris le mil, l'arachide, la pastèque, le niébé, la jachère... Faidherbia-Flux est situé aux coordonnées, N :14°29'44.916" ; O :16°27'22212.851". Pour répondre aux besoins de recherche des équipes multidisciplinaires, il dispose d'instruments et d'installations pour surveiller la micro-météorologie ; les flux de chaleur sensible ; la chaleur latente ; le CO<sub>2</sub> ; l'eau du sol ; les températures du sol ; le NDVI (Normalized difference vegetation index) ; la respiration du sol ; les flux de sève ; le LAI (Leaf area index) ; la croissance des arbres ; la croissance des racines fines ; la productivité des cultures et le rendement.

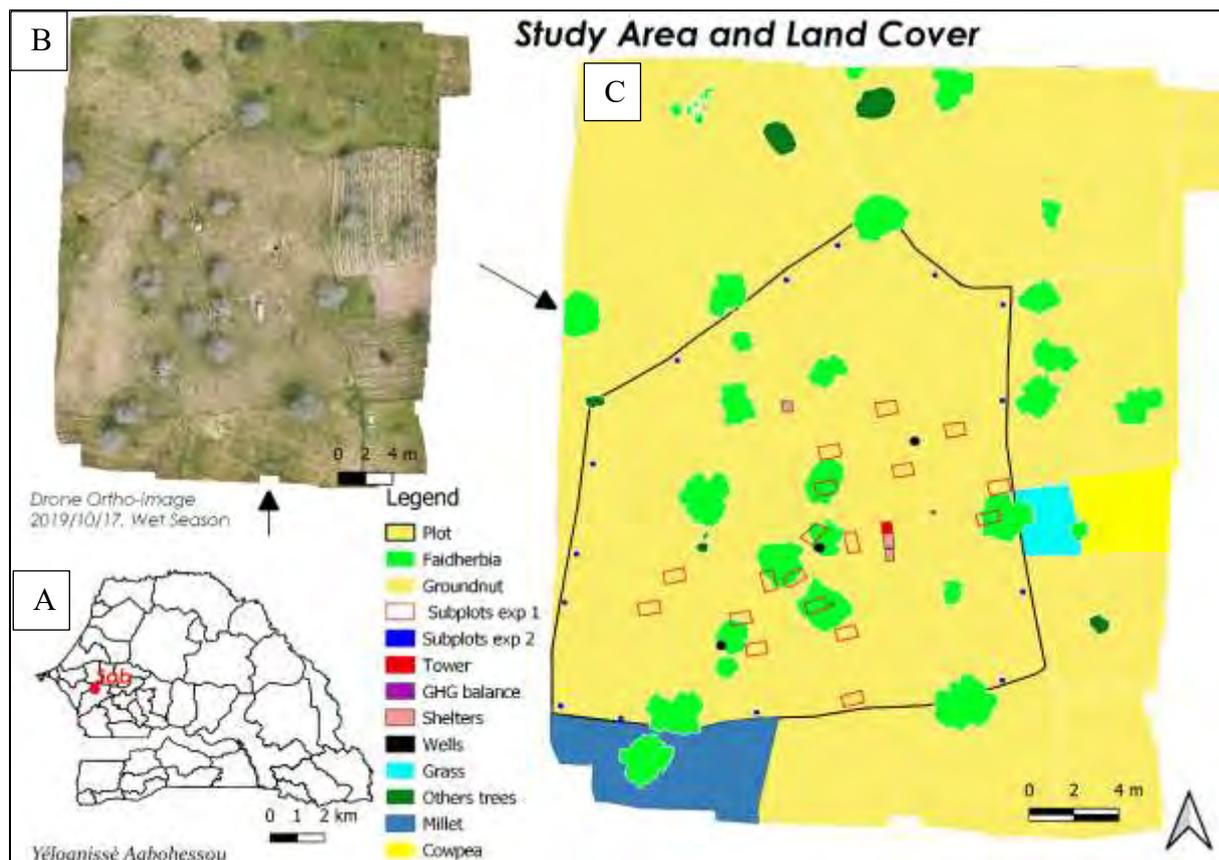


Figure 1: Milieu d'étude, couverture du sol et dispositif expérimental.

## 2.2. Dispositif expérimental, gestion de la parcelle et analyses de laboratoire

Dans le cadre de cette étude, plusieurs expériences ont été réalisées :

### 2.2.1. Suivi destructif périodique de la biomasse par organes d'arachide (expérience n°1)

Pour cette étude nous avons utilisé la variété Fourrée correspondant à la 55-437. Une variété d'arachide de type spanish à cycle court (90 jours). Nous avons fait des mesures destructives, deux fois par semaine depuis la date de levée, pendant tout le cycle de l'arachide à partir de la levée des plantes d'arachide. Pour chaque passage, trois placettes de 1 m<sup>2</sup> chacune, prises aléatoirement en bordure de la parcelle (pour ne pas perturber le reste des mesures), ont été récoltées. Les organes des plantes de chaque placette ont été divisés en cinq parties (gousse, feuille, tige, racine et fleur). Après récolte, les organes emballés dans des enveloppes kraft ont été placés à l'étuve (65°C, 72h). Les poids secs ont ensuite été pris pour les organes de chaque placette.

2.2.2. Suivi à 3 distances de l'arbre du nombre de feuilles, de la hauteur de l'arachide et de l'effet de l'arbre sur la culture (expérience n°2)

#### 2.2.2.1. Composante arbre

L'étude a été réalisée sur une parcelle de 1,16 ha du site « Faidherbia-Flux », où les arbres sont distribués de façon aléatoire avec une densité de 6,8 arbres/ha. La parcelle étant très instrumentée, six arbres ont été sélectionnés en privilégiant ceux qui sont équipés d'instruments. Trois des arbres sélectionnés sont équipés d'un ou de plusieurs instruments de mesure (ex : puits, tube diviner, chambre de respiration du sol, mini-rhizotrons et scanner). La hauteur, le diamètre du houppier ainsi que la circonférence des arbres sélectionnés ont été mesurés.

#### 2.2.2.2. Dispositif expérimental et calendrier agricole

Juste après le semis de l'arachide, un réseau de 18 placettes de 5 m x 3 m chacune a été installé à différentes distances de 6 arbres (Fig. 2). Nous avons installé pour chacun des 6 arbres sélectionnés : une placette « S » Sous la canopée de l'arbre (non visible par le drone), une placette « B » juste aux Bords de la canopée de l'arbre (visible par le drone) et une troisième placette « H » loin, Hors canopée (> à 25 mètres du tronc) de l'arbre (visible par le drone) (Fig. 2). La placette B a été choisie à cette distance pour deux raisons : d'une part pour donner une valeur en périphérie de couronne et d'autre part pour tester si B est ou non un bon estimateur de S : la raison en est que dans la suite, nous ne pourrons pas faire de mesures de NDVI sur S.

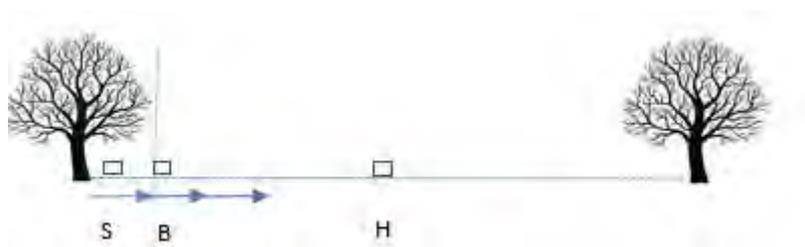


Figure 2 : Echantillonnage des placettes disposées à trois distances d'un arbre de *F. albida*

Tableau 2 : Calendrier agricole arachide : Campagne de l'année 2019 sur le site instrumenté de Niakhar « Faidherbia-Flux »

Activités	Période (année 2019)				
	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
Semis	27	-	-	-	-
Germination	30	-	-	-	-
Floraison	-	17	-	-	-
Sarclage	-	-	05	-	-

1 <sup>er</sup> Vol de drone	-	-	05	-	-
2 <sup>ème</sup> Vol de drone	-	-	-	17	-
3 <sup>ème</sup> Vol de drone	-	-	-	29	-
Récolte placettes	-	-	-	-	04-07
Récolte parcelle	-	-	-	-	05-09

### 2.2.2.3. Suivi de l'essai et mesure des paramètres

- a. Suivi à 3 distances de l'arbre : nombre de feuilles / hauteur de l'arachide (expérience n°2a)

Afin d'éviter les perturbations et de garantir la représentativité des résultats, toutes les pratiques agricoles ont été réalisées par l'agriculteur lui-même, selon ses préférences, ses habitudes et son calendrier. Nous-mêmes avons fait un suivi hebdomadaire de la croissance des cultures tout au long de l'hivernage. Au niveau de chaque placette, le nombre de feuilles par plante a été compté et la hauteur des plantes a été mesurée.

- b. Suivi à trois distances de l'arbre : effet de l'arbre sur le rendement de l'arachide (expérience n°2b)

Onze jours avant la récolte (24/10/2019), nous avons collecté sur des plants d'arachide (deux plants formant un échantillon par placette), au bord extérieur de chaque placette, des échantillons de feuilles fraîches d'arachide (18 échantillons au total). Ces échantillons de feuilles ont été scannés frais (HP scan), étuvés (65°C, 72h) et pesés. La surface foliaire de chaque échantillon de feuille par placette a été déterminée avec le logiciel Mesurim. La surface foliaire spécifique (SLA, en  $m^2_{\text{feuille}} \text{ kg}^{-1}_{\text{feuille}}$ ) de chaque échantillon a été déterminé en faisant le rapport, surface foliaire sur poids sec des échantillons de feuille récoltés. Nous avons déterminé la surface foliaire moyenne des plantes d'arachide par placette en multipliant le SLA par placette à la masse sèche moyenne de feuille obtenue dans chaque placette à la récolte. Nous avons ensuite appliqué le rapport, surface foliaire de l'arachide par placette sur la superficie de chaque placette pour déterminer l'indice de surface foliaire (LAI) par placette.

A la fin de la saison, nous avons récolté toutes les placettes. Pour 12 placettes (3 « sous arbre », 6 « bord arbre » et 3 « hors arbres »), nous avons récolté en premier, toutes les gousses d'arachide, divisé la biomasse végétative en deux parties (feuilles et tige) et mesuré les poids frais sur le terrain avec une balance précise au gramme. Pour chacune des 6 placettes restantes, nous avons détaillé la partie racinaire également : (3 « sous arbre » et 3 « hors arbre »), nous avons installé une sous placette de  $1m^2$ , récolté les différents organes dans la placette et dans la sous-placette, mesuré les poids frais par organe et ensuite fait une excavation (de  $1m^2$  au sol x 0,5 m de profondeur) au niveau de la sous-placette pour collecter

les racines oubliées dans le sol lors de la récolte des gousses. Nous avons fait des excavations de 0,5 m de profondeur pour des raisons pratiques. Si non, pour s'assurer de vraiment récolter toutes les racines profondes de l'arachide, des excavations de 1 m de profondeur seraient optimales (mais difficile à réaliser sur le terrain) vu qu'ayant bien la possibilité d'aller de 1,5 m jusqu'à 2 m plus profond, les racines d'arachide vont très rarement à plus de 1 m de profondeur dans le sol (Singh, 2003). Nous avons collecté les racines dans les horizons 0-20 cm et 20-50 cm, séparément. Pour déterminer la biomasse racinaire totale de l'arachide dans chaque placette (grandes placettes), nous avons (i) fait des ratios de biomasses racinaires récoltées à différents horizons (0-20 cm et 20-50 cm) sur la somme des biomasses des autres organes des plantes récoltées (feuilles + tige + gousse) dans les sous placettes (1 m<sup>2</sup>) ; ensuite (ii) multiplié ces ratios aux sommes des biomasses des autres organes des plantes récoltées (feuilles + tige + gousse), cette fois-ci dans les grandes placettes. La biomasse racinaire calculée par horizons pour chaque placette était donc la somme des biomasses racinaires estimées pour les autres plantes de la grande placette plus la biomasse des racines récoltées dans les sous placettes de 1 m<sup>2</sup>. La biomasse racinaire totale par placette était la somme des biomasses racinaires par horizons.

Nous avons également pris et pesé une aliquote des adventices au niveau de chaque placette sur le terrain. Après la récolte, tous les échantillons ont été amenés au labo pour séchage à l'étuve (65°C, 72h) et pesée. A partir du rapport entre les poids frais et secs, nous avons calculé les taux d'humidité et déduit les poids secs des adventices de chaque placette. Pour passer de la biomasse des gousses à celle des graines de l'arachide, nous avons pris et pesé une aliquote de gousse sèche pour chaque placette, séparé la graine des coques de l'arachide et pesé les deux séparément. Nous avons ensuite appliqué le ratio de la biomasse des graines sur la biomasse des gousses des aliquotes, à la biomasse totale de gousses par placette pour déterminer la biomasse des graines au niveau de chaque placette. La biomasse aérienne totale (arachide + adventice) était la somme des biomasses des fanes (feuilles non corrigées + tiges) et des adventices.

#### 2.2.2.4. Correction de la biomasse foliaire obtenue à la récolte

Une chute du nombre de feuilles et de la biomasse foliaire de l'arachide a été observée sur le terrain lors des suivis de la dynamique du nombre de feuilles par plante et de la biomasse foliaire (à environ quatre semaines avant la récolte). Nous avons décidé d'utiliser les résultats du suivi de la dynamique du nombre de feuille par plante pour corriger la biomasse foliaire obtenue à la récolte (vu que ce suivi a été réalisé sur les mêmes plantes, se situant dans nos

placettes). Vu que le SLA de l'arachide ne variait pas significativement par type de placette (voir Tab 2 dans Résultats) on a supposé que le nombre de feuilles par plante serait plus ou moins proportionnel à la biomasse foliaire par plante. Nous avons calculé pour chaque type de placette le taux de feuilles perdues entre la date où on a enregistré le plus grand nombre de feuilles par plante (03/10/2019) et la date de la récolte (04/11/2019) (éq. n°1). Nous avons utilisé le taux de feuilles perdues dans l'équation 2 pour corriger la biomasse foliaire obtenue à la récolte (estimer la biomasse foliaire maximum : la biomasse foliaire qu'on aurait dû avoir à la récolte s'il n'y avait pas eu cette chute de feuilles de l'arachide lors de la saison.).

$$\text{Taux de feuilles perdues} = 1 - \left[ \frac{\text{Nombre de feuille à la récolte}}{\text{Nombre de feuille maximum}} \right] \quad (\text{eq. 1})$$

$$\text{Biomasse foliaire Corrigée} = \frac{\text{Biomasse foliaire récoltée}}{(1 - \text{Taux de feuilles perdues})} \quad (\text{eq. 2})$$

La biomasse aérienne totale corrigée (arachide + adventice) était la somme des biomasses des fanes corrigées (feuilles corrigées + tiges) et des adventices.

### 2.2.3. Récolte de la parcelle entière (expérience 3)

Nous avons mesuré le rendement de toute la parcelle. Après la récolte des 18 placettes de l'expérience n°2, toutes les autres plantes d'arachide de la parcelle entière ont été récoltées par l'agriculteur et sa famille. Les plantes ont été regroupées en de petits tas avant d'être transportées au village. Nous avons compté et pesé chaque tas, puis appliqué le rapport du poids frais des organes (feuilles + tiges + gousses + racines) au poids sec des gousses obtenues au laboratoire sur les échantillons de placettes pour déterminer le rendement en gousse sèche de la parcelle.

### 2.3. Estimation de la productivité des cultures par drone

Nous avons fait des vols de drone à trois dates. Le premier vol à mi-saison (05/09/2019), le deuxième à trois semaines de la récolte (17/10/2019) et le dernier, une semaine avant la récolte de l'arachide (29/10/2019). Les différents vols ont été réalisés en multispectral, dans le visible (RGB), l'infrarouge thermique et certaines autres bandes infra-rouges.

Pour les images multispectrales, le système d'UAV était un FeHexaCopterV2 hexaCopter (Flying Eye Ltd., [www.flyingeye.fr](http://www.flyingeye.fr)), avec deux caméras embarquées, fixées sur un cardan à deux axes qui les pointe verticalement vers le bas. La première caméra était une caméra numérique RGB ILCE-6000 (Sony Corporation, New York, NY, USA) avec un capteur de 6000 x 4000 pixel, doté d'une longueur focale de 60 mm. Pour minimiser l'effet de flou et du

bruit dans les images, l'appareil photo a été mis sur la priorité vitesse (1/1250 sec) et le mode ISO Auto. La deuxième caméra était une caméra multispectrale AIRPHEN ([www.hiphen-plant.com](http://www.hiphen-plant.com), Avignon, France), équipée d'un capteur de 1280 x 960 pixels doté d'une longueur focale de 8 mm. Le AIRPHEN est composé de six caméras individuelles munies de filtres centrés sur 450, 530, 560, 675, 730 et 850 nm, avec une résolution spectrale de 10 nm. Le plan de vol a été conçu avec des outils Kopter (<http://wiki.mikrokopter.de/fr/MikroKopterTool>) pour couvrir toute la région et assurer un chevauchement frontal et latéral de 80 % le long de la piste. L'UAV a volé à 4,5 m s<sup>-1</sup> et à 50 m a.g.l. (above ground level) avec les deux caméras prenant des photos simultanément à une seconde d'intervalles. Dans cette configuration, nous avons obtenu une distance d'échantillonnage au sol (résolution spatiale des images) de 0,6 et 2,7 cm pour le RGB et les caméras AIRPHEN multispectrales, respectivement. Il a été jugé trop risqué pour le drone de voler sous le houppier des arbres, donc les placettes sous arbre n'étaient pas couvertes, mais un proxy était prévu via les placettes de bordure.

Nous avons utilisé comme cible d'étalonnage radiométrique, un panneau en tapis de 2,5 m<sup>2</sup> placé horizontalement sur sol à une distance 1,5 fois la hauteur de l'arbre le plus proche afin de limiter les effets de contiguïté, comme recommandé par Jay et al (2019). En plus, six disques rouges de 50 cm de diamètre ont été placés aux coins du champ pour être utilisés comme points de contrôle géométrique au sol (Kääb *et al.*, 2014). La position exacte de ces points a été définie avec un GPS-GNSS d'une précision de 2 cm. Chaque vol a été effectué autour de midi solaire et a duré environ 15 minutes, durant lesquelles les radiations solaires étaient supposées être stables.

Un pipeline de traitement automatique d'image a été conçu et utilisé par A. Ndour (ISRA-CERAAS) pour générer des orthoimages multibandes, calibrées radiométriquement et corrigées géométriquement à l'aide du logiciel de photogrammétrie numérique Agisoft Photoscan (PhotoScan Professional 1.4, Agisoft LLC, Russie). L'étalonnage radiométrique comprenait la correction automatique des effets de vignettage. Les réflectances réelles ont été calculées en utilisant la cible de référence. La correction géométrique a impliqué, d'abord, le co-enregistrement multibande pour modifier et ajuster le système de coordonnées des images pour réduire les distorsions géométriques et faire coïncider les pixels des différentes images avec les points de grille de carte correspondants. Le processus de co-enregistrement était fondé sur le GPS interne à partir de métadonnées d'images brutes. L'orthorectification a

ensuite été réalisée à l'aide des points d'appui au sol GCPs (*ground control points*) pour améliorer la précision des orthoimages générées.

Les orthoimages RGB ont été utilisées pour segmenter l'arachide en sous-culture et enlever le sol et les arbres. Pour cela, nous avons converti les orthoimages RGB à l'espace de couleur HSV, ensuite réalisé des opérations de seuillage sur les cultures vertes pour créer un masque arachide. Des réflectances étalonnées dans les bandes NIR, rouge et verte ont été extraites depuis le masque et utilisée pour obtenir le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse *et al.*, 1974), selon l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (\text{eq. 3})$$

Bien que plusieurs indices aient été à notre disposition (NDVI, GNDVI, CTVI et MSAVI), nous avons surtout utilisé le NDVI parce que c'est l'indice le plus utilisé pour surveiller et estimer la physiologie des cultures et la biomasse verte.

#### 2.4. Géomatique : chaîne de processus

La géomatique a été effectuée à l'aide de QGIS (QGIS\_Development\_Team, 2019) et R (R\_Core\_Team, 2017). Afin de permettre une intersection des différentes couches géospatiales utilisées dans notre cadre méthodologique, toutes les couches ont été projetées sous le référentiel du système de coordonnées WGS 84/UTM zone 28N EPSG : 32628. L'orthoimage UAV multibande TIF a été convertie en monocouche NDVI à l'aide des bibliothèques *rgdal* (Bivand *et al.*, 2014) et *raster* (Hijmans, 2015) dans R.

Nous avons créé des shapefiles dans QGIS pour les éléments suivants : la parcelle entière ; les zones non cultivées (abris et tour) ; la zone cultivée ; les cimes des arbres de *F. albida* ; et la périphérie de ces couronnes. Nous avons également créé des shapefiles pour 12 des 18 placettes récoltées (c'est-à-dire uniquement pour celles au bord des houppiers et loin des arbres). Aucun shapefile n'a été créé pour les six placettes qui sont sous les houppiers des arbres. En effet, nous avons remarqué que le drone ne pouvait pas détecter au travers des houppiers du *F. albida*, malgré l'état de défoliation des arbres. Nous avons donc utilisé un proxy pour ces placettes c'est-à-dire, des shapefiles juste à la périphérie des six houppiers des arbres cibles, en supposant que les conditions de rendement étaient représentatives des placettes sous houppier. Ensuite, nous avons calculé la position des centroïdes du *F. albida*. Compte tenu de la très haute résolution (quelques cm<sup>2</sup>) de l'orthoimage UAV, nous avons créé une grille ayant des cellules de 4 m<sup>2</sup> pour l'image de la parcelle entière. La moyenne NDVI ±

SD et des autres indices de végétation (GNDVI, CTVI et MSAVI2) ont été calculées pour chaque cellule des grilles et ses coordonnées enregistrées. Une matrice de distance a été calculée entre chaque cellule de la grille et les centroïdes du *F. albida*. Nous n'avons utilisé que l'arbre proximal ( $k = 1$ ), et avons également pris en compte les arbres en dehors des limites de l'ensemble de la parcelle.

Nous avons utilisé le fichier résultant, qui combinait les indices de végétation (NDVI, GNDVI, CTVI et MSAVI) et la distance à l'arbre proximal, pour effectuer des géostatistiques à l'échelle de la parcelle entière. Le fichier des indices de végétation moyen par placette récoltée et de la périphérie des arbres a été utilisé pour établir une corrélation avec la productivité des cultures et la litière.

## 2.5. Méthode d'estimation du NDVI de l'arachide à partir du NDVI total « arachide + adventices ».

Les adventices représentaient un bruit assez important dans l'image NDVI du dernier vol. Seul le signal NDVI de l'arachide nous sera utile dans la suite pour la détermination de la distance d'influence et l'estimation des rendements de l'arachide, nous avons donc décidé de le séparer du signal NDVI des adventices. Notons que pour cet exercice d'estimation du NDVI de l'arachide, nous avons travaillé uniquement avec les biomasses non corrigées (pesées sur le terrain à la récolte). Vu que le NDVI est sensible à la teneur en chlorophylle des plantes (Gitelson & Merzlyak, 1997) et que ses valeurs élevées (proche de 1) sont associées à des densités de feuilles vertes les plus élevées possible (Weier & Herring, 2000), nous avons supposé que le signal NDVI total « arachide + adventices » était proportionnel à la biomasse aérienne totale (arachide + adventices), pareil pour le NDVI de l'arachide et la biomasse fane de l'arachide. Nous avons donc appliqué le ratio de la biomasse fane sur la biomasse aérienne totale (arachide + adventices) au NDVI total « arachide + adventices » pour déterminer le NDVI de l'arachide dans chaque placette (eq. 4). Pour la parcelle entière, nous avons utilisé le ratio moyen comme dans l'équation 5.

$$NDVI_{arachide/placette} = NDVI_{total \text{ « arachide + adventices »}} \times \left( \frac{Biomasse \ fane}{Biomasse \ aérienne \ totale} \right) \quad (eq. 4)$$

$$NDVI_{arachide \ de \ la \ parcelle \ entière} = NDVI_{total \text{ « arachide + adventices »}} \times \left( \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^k \left[ \frac{Biomasse \ fane_i}{Biomasse \ aérienne \ totale_i} \right] \right) \quad (eq. 5)$$

## 2.6. Estimation du rendement des cultures et du ratio équivalent de terre partiel de la culture (LERcp) par drone

Pour un système à deux cultures, Mead et Willey (1980) calculent le LER comme

$$LER = LER_A + LER_B = \frac{Y_{iA}}{Y_{sA}} + \frac{Y_{iB}}{Y_{sB}} \quad (\text{eq. 2})$$

où les indices A et B désignent les deux cultures (ou l'arbre et la culture dans le cas de l'agroforesterie);  $Y_i$  est le rendement en association (ou en agroforesterie) et  $Y_s$  est le rendement en monoculture.

Un LER supérieur à 1 indique que la culture en association ou en agroforesterie utilise les terres de manière plus productive que la culture unique. Bien que cette équation donne une valeur de LER unique pour le système, chaque terme sur le côté droit est, en fait, le LER partiel pour chacune des deux espèces de l'association. Ce LER partiel de la culture (LER<sub>cp</sub>) reste utile à calculer lorsqu'un seul partenaire de culture est disponible ou présente un intérêt direct. Il peut être calculé même lorsqu'aucune donnée n'est facilement disponible pour l'autre partenaire. C'est souvent le cas en agroforesterie : il existe de nombreux exemples où l'espèce d'arbre est rentable, mais peu de données sont disponibles pour évaluer sa productivité et son LER. Dans le cas présent, l'espèce d'intérêt est la culture d'arachide, et nous n'avons pas encore de données de productivité pour le *F. albida* (absence de contrôle pur des arbres dans le parc). Par conséquent, nous avons ici calculé le LER<sub>cp</sub> pour la culture d'arachide seule. Nous avons démontré à l'aide de la géostatistique (voir partie Résultats) que les traitements H étaient situés au-delà de la distance d'influence des arbres. A cause de la faible représentativité spatiale des placettes H et de notre désir de développer une méthode de calcul du LER<sub>cp</sub> indépendamment de la récolte, nous avons décidé de ne pas utiliser les valeurs obtenues dans ces placettes (H) à la récolte, comme estimation du rendement de l'arachide en monoculture ( $Y_s$ ).

Après avoir déterminé la distance à laquelle les arbres influencent l'indice de végétation (NDVI) tel identifié à partir du « Range » dans le semi-variogramme (voir partie Résultats), nous avons utilisé le rendement estimé par zone (depuis le vol de drone, combiné avec la géostatistique) pour calculer le LER<sub>cp</sub>. Le rendement estimé était cartographié en utilisant la corrélation entre NDVI et rendement gousse (Fig.11). Nous avons divisé la carte en trois zones dans la parcelle entière : (i) en dessous de la cime de l'arbre (non détecté par le drone, mais nous avons utilisé des données des shapefiles créés autour de la cime des arbres), (ii) entre le bord de la cime de l'arbre et la limite de la plage « Range », et (iii) au-delà de la limite du "Range". Pour calculer  $Y_s$ , nous avons utilisé la zone se trouvant au-delà du Range. Le rendement de la parcelle entière estimée,  $Y_i$  était alors la somme de la moyenne des rendements estimés dans chaque zone, pondérée par surface de chaque zone. Nous avons

calculé le rendement estimé pour les pixels se trouvant en deçà de la valeur du Range seul, comme une autre mesure pour  $Y_i$ . Finalement nous avons comparé les deux valeurs du LERcp, en fonction des deux options pour  $Y_i$ .

## 2.7. Analyses statistiques

Cette tâche a été effectuée à l'aide du logiciel R (R\_Core\_Team, 2017). Des ANOVA unifactorielles ont été réalisées lorsque les variables répondaient aux critères (i) d'homogénéité des variances selon le test de Bartlett, et (ii) de normalité de la distribution des observations et des résidus, selon le test de Shapiro-Wilk et Q-Q plot. Autrement, nous avons réalisé un test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Un test des étendues de Tukey a ensuite été effectué entre les niveaux à l'intérieur de chaque facteur.

L'effet de la distance à l'arbre, correspondant au paramètre « Range », a été analysé par géostatistique dans R, à partir de la table d'attributs fourni à la fin de la chaîne géomatique, en utilisant les bibliothèques gstat (Pebesma, 2004) et sp (Bivand *et al.*, 2008). Nous avons tracé des semi-variogrammes des NDVI des cellules de la grille en fonction de la distance au centroïde de la couronne de l'arbre proximal, jusqu'à une distance maximale de 60 m et en suivant quatre azimuts (N, S, E, O). L'idée fondamentale derrière le semi-variogramme est que deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées. Nous avons ensuite utilisé la bibliothèque automap et la fonction autofitVariogram pour sélectionner le meilleur modèle.