

Modélisation de la distribution des principales espèces ligneuses dans deux parcs agroforestiers du bassin arachidier sénégalais.

Document rédigé par :

Aboubacar HEMA

Élève Ingénieur des Travaux Statistiques, ITS4.

Sous l'encadrement de :

ok

ok

Avertissement

ok

AVANT-PROPOS

ok

« Ressentir de la gratitude et ne pas l'exprimer, c'est comme emballer un cadeau et ne pas le donner. »

William Arthur Ward

Sommaire

I CADRE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE	2
1 Présentation de la zone d'étude, de la source des données	3
I Zone d'étude	3
II Sources des données	7
2 Revue de la littérature	10
I Modèles de distribution des espèces	10
II Caractéristiques générales des espèces étudiées.	10
III Les variables à haute résolution spatiale	10
IV Changements climatiques au Sénégal	10
3 Approche méthodologique et outils d'analyse	11
II Analyse spatiale et modélisation de la distribution des espèces	12
4 Analyse spatiale descriptive	13
I Analyse spatiale descriptive dans la zone d'étude	13
II Analyse spatiale descriptive des espèces étudiées	15
5 Autocorrélation spatiale	41
I Autocorrélation spatiale des espèces dans la zone d'étude	43
II Autocorrélation spatiale dans chaque zone d'étude	44
6 Modélisation de la distribution des principales espèces ligneuses	48
I Modélisation de la distribution des espèces à partir des variables bioclimatiques	48
II Modélisation de la distribution des espèces par ajout des variables à haute résolution	48
III Discussion	51
A Lois de probabilité usuelle	ii

B Définitions	iii
C Notations	iv
D Tests statistiques	v
E Analyse spatiale descriptive	vi
F Quelques démonstrations	vii

Table des figures

1.1	Présentation de la zone d'étude	4
1.2	Etapes de cartographie du gradient d'hétérogénéité du paysage	4
1.3	Segmentation de la zone d'étude en unités de paysage agricole (Représentation sur fond d'image Pléiades THRS)	5
1.4	Carte du gradient d'hétérogénéité du paysage (Zone d'étude)	6
1.5	Répartition des sites d'échantillonnage sur le terrain	7
1.6	Carte d'occupation/utilisation du sol de la zone d'étude	9
4.1	Les types de sol dans la zone d'étude	13
4.2	Les types de sol suivant les zones	14
4.3	Pourcentage d'espèces ligneuses par zones	15
4.4	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> dans les différentes zones	16
4.5	Distribution de <i>Faidherbia albida</i> suivant la zone 1	17
4.6	Distribution de <i>Faidherbia albida</i> suivant la zone 2	17
4.7	Distribution de <i>Faidherbia albida</i> suivant la zone 3	18
4.8	Distribution de <i>Faidherbia albida</i> suivant la zone 4	18
4.9	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> suivant productivité végétale(regroupé en 3 classes)	19
4.10	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> suivant la dynamique de la productivité végétale entre 2000 et 2015(regroupé en 3 classes)	20
4.11	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> suivant la couverture ligneuse(regroupé en 3 classes)	20
4.12	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> suivant l'évapotranspiration réelle(regroupé en 3 classes)	21
4.13	Probabilité de présence de <i>Faidherbia albida</i> suivant le type de sol	21
4.14	Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> dans les différentes zones	22
4.15	Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant l'indice de végétation(regroupé en 3 classes)	22
4.16	Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le Slope(regroupé en 3 classes)	23
4.17	Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le Woody(regroupé en 3 classes)	23

4.18 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le AET(regroupé en 3 classes)	24
4.19 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le type de sol	24
4.20 Distribution de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant la zone 1	25
4.21 Distribution de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant la zone 2	25
4.22 Distribution de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant la zone 3	26
4.23 Distribution de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant la zone 4	26
4.24 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> dans les différentes zones	27
4.25 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant l'indice de végétation(regroupé en 3 classes)	27
4.26 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant le Slope(regroupé en 3 classes)	27
4.27 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant le Woody(regroupé en 3 classes)	28
4.28 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant le AET(regroupé en 3 classes)	28
4.29 Probabilité de présence de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant le type de sol	29
4.30 Distribution de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant la zone 1	29
4.31 Distribution de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant la zone 2	30
4.32 Distribution de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant la zone 3	30
4.33 Distribution de <i>Anogeissus leiocarpus</i> suivant la zone 4	31
4.34 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> dans les différentes zones	31
4.35 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant l'indice de végétation(regroupé en 3 classes)	32
4.36 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le Slope(regroupé en 3 classes)	32
4.37 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le Woody(regroupé en 3 classes)	33
4.38 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le AET(regroupé en 3 classes)	33
4.39 Probabilité de présence de <i>Balanites aegyptiaca</i> suivant le type de sol	34
4.40 Distribution de <i>Adansonia digitata</i> suivant la zone 1	34
4.41 Distribution de <i>Adansonia digitata</i> suivant la zone 2	35
4.42 Distribution de <i>Adansonia digitata</i> suivant la zone 3	35
4.43 Distribution de <i>Adansonia digitata</i> suivant la zone 4	36
4.44 Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> dans les différentes zones	37
4.45 Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> suivant l'indice de végétation(regroupé en 3 classes)	37
4.46 Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> suivant le Slope(regroupé en 3 classes)	38

4.47	Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> suivant le Woody(regroupé en 3 classes)	38
4.48	Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> suivant le AET(regroupé en 3 classes)	39
4.49	Probabilité de présence de <i>Acacia nilotica</i> suivant le type de sol	39
4.50	Distribution de <i>Acacia nilotica</i> suivant la zone 1	39
4.51	Distribution de <i>Acacia nilotica</i> suivant la zone 2	39
4.52	Distribution de <i>Acacia nilotica</i> suivant la zone 3	40
4.53	Distribution de <i>Acacia nilotica</i> suivant la zone 4	40
F.1	ok	vii
F.2	ok	viii

Liste des tableaux

5.1	<i>Joincount de Faidherbia albida dans la zone 1</i>	44
5.2	<i>Joincount de Faidherbia albida dans la zone 2</i>	44
5.3	<i>Joincount de Faidherbia albida dans la zone 3</i>	44
5.4	<i>Joincount de Faidherbia albida dans la zone 4</i>	44
6.1	Add caption	50

Liste des sigles

ok

RÉSUMÉ

ok

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ok

Première partie

CADRE D'ÉTUDE ET

MÉTHODOLOGIE

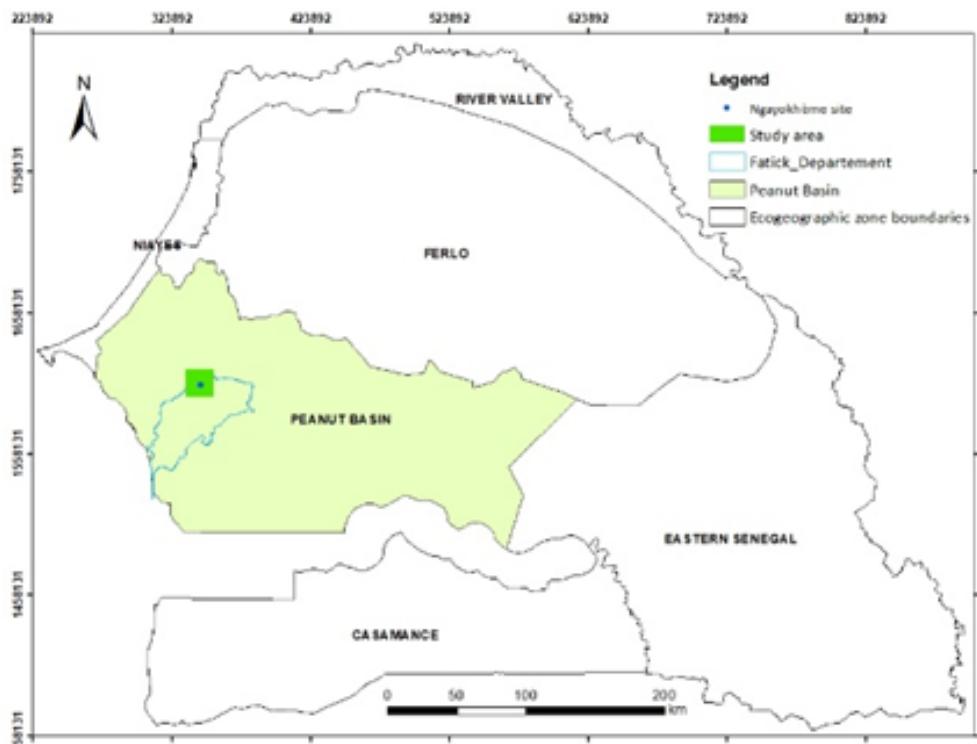
Présentation de la zone d'étude, de la source des données

ok

I ZONE D'ÉTUDE

L'étude est menée dans le bassin arachidier du Sénégal, sur une superficie de 20x20km centrée sur la commune de Ngayokhème (Département de Fatick). La zone est caractérisée par un système agricole à base d'arbres dominé par *Faidherbia albida*. En effet, le Bassin arachidier du Sénégal couvre le centre ouest du pays et est dominé par des sols ferrugineux tropicaux, permettant une production agricole composée essentiellement de céréales sèches (mil) et de légumineuses (arachide, niébé). Toutefois, avec près de 60% de la population rurale, la zone fait face à une forte pression démographique, la réduction du temps de jachère et l'insuffisance voire l'absence de la fertilisation des terres, conduisant à la destruction du couvert végétal et l'érosion de la biodiversité.

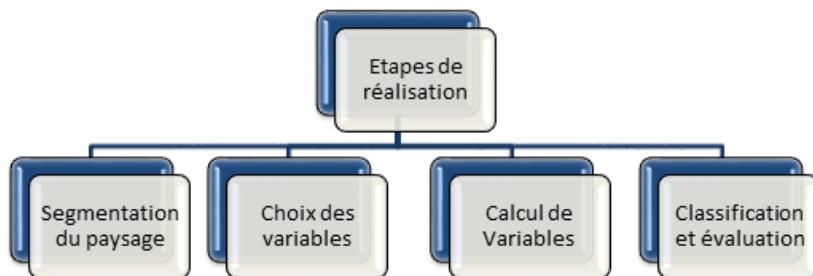
FIGURE 1.1 – Présentation de la zone d'étude



I.1 Cartographie du gradient d'hétérogénéité du paysage

Dans un premier temps, nous avons procédé à la représentation spatialisée du gradient d'hétérogénéité du paysage. Il s'agissait de stratifier la zone d'étude en classes de paysage agroécologiques homogènes (en interne) mais différentes entre elles de par leurs caractéristiques agricoles et écologiques.

FIGURE 1.2 – Etapes de cartographie du gradient d'hétérogénéité du paysage

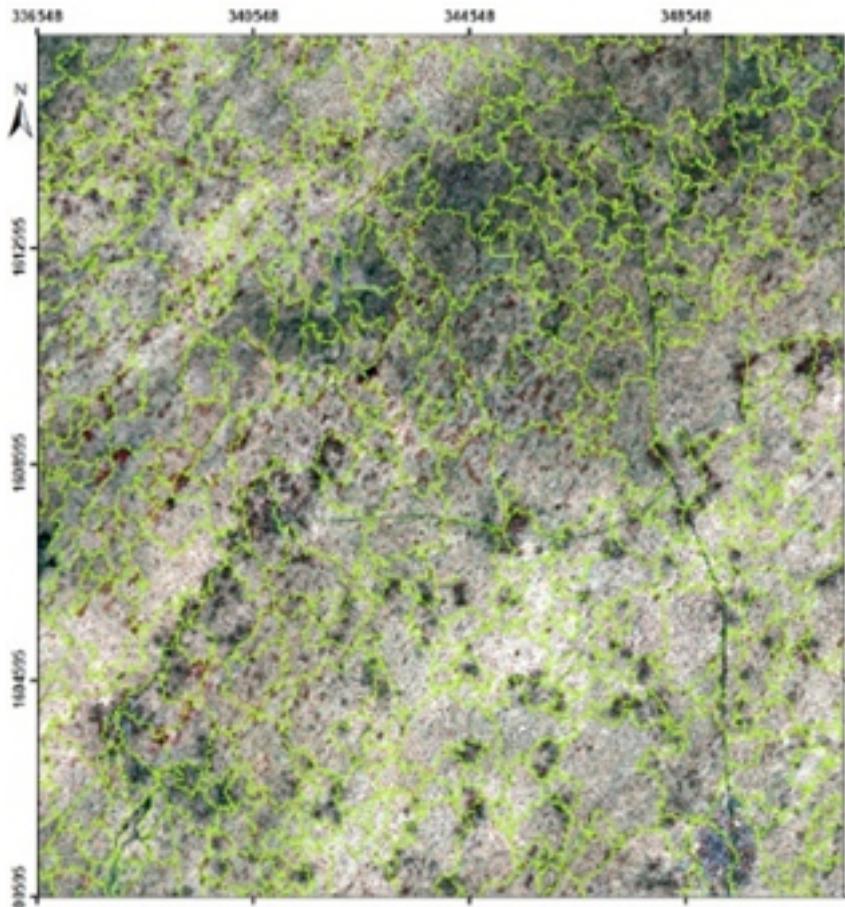


I.1.1 Segmentation du paysage

Une série temporelle de 13 images Sentinel-2, de janvier à octobre 2017, couvrant la saison sèche et la saison humide a été utilisée. Une segmentation multirésolution est effectuée sur la série temporelle de NDVI dérivée des images Sentinel pour identifier et délimiter des unités homogènes en termes de fonctionnement de la végétation (y compris les cultures). La zone

d'étude a été ainsi segmentée en 668 unités de paysage agricole avec des superficies allant de 10,61 ha (plus petite unité) à 489,68 ha (plus grande unité).

FIGURE 1.3 – Segmentation de la zone d'étude en unités de paysage agricole (Représentation sur fond d'image Pléiades THRS)



I.1.2 Choix des variables de stratification

En supposant que les paysages agricoles sont structurés par leurs conditions environnementales notamment les facteurs éco-climatiques, nous avons identifié 5 variables caractéristiques et structurantes pour la biodiversité et la productivité végétale. Il s'agit de :

- deux variables écophysiologiques, la productivité de la végétation et sa dynamique durant la période 2000-2015 ;
- une variable agroclimatologique, l'évapotranspiration réelle ;
- une variable pédologique, le type de sol ;
- une variable écologique, la couverture ligneuse.

Les valeurs de ces variables ont été dérivées de différentes sources de données géospatiales.

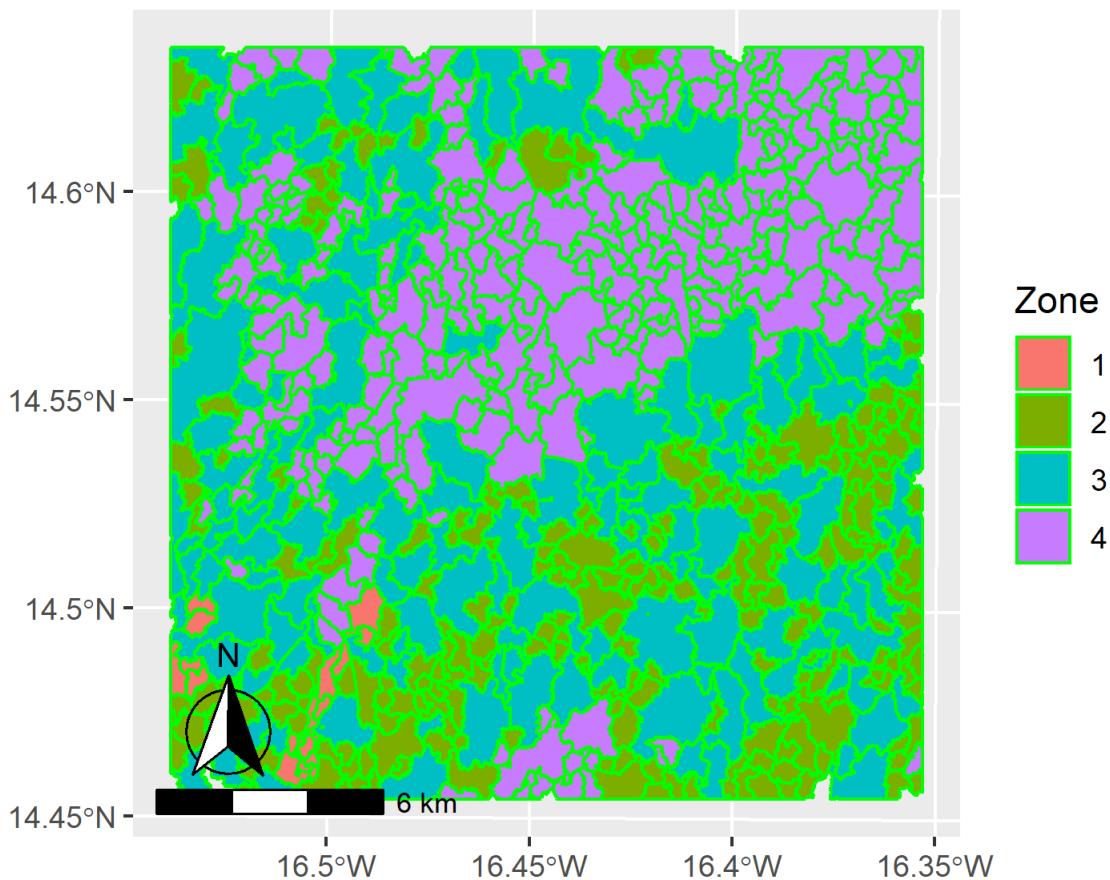
I.1.3 Calcul des variables de stratification

Pour chacune des unités paysagères issues de la segmentation la moyenne et l'écart type des variables biophysiques retenues, caractéristiques de la diversité et de la structure du paysage agricole sont calculées. La valeur moyenne a été choisie comme mesure de la tendance centrale tandis que les valeurs d'écart-type ont été considérées comme un indicateur d'homogénéité spatiale à l'intérieur de chaque unité de paysage, ce qui signifie une homogénéité en termes de configuration et de composition du paysage.

I.1.4 Classification

Les unités de paysage ont été classées en fonction des 5 variables de stratification. Une méthode de classification ascendante hiérarchique sur composantes principales (HCPC : Hierarchical Clustering on Principal Components) a été utilisée à cet effet. Le résultat est un gradient d'hétérogénéité du paysage divisé en 4 classes représentatives des grandes formes et configurations du paysage.

FIGURE 1.4 – Carte du gradient d'hétérogénéité du paysage (Zone d'étude)



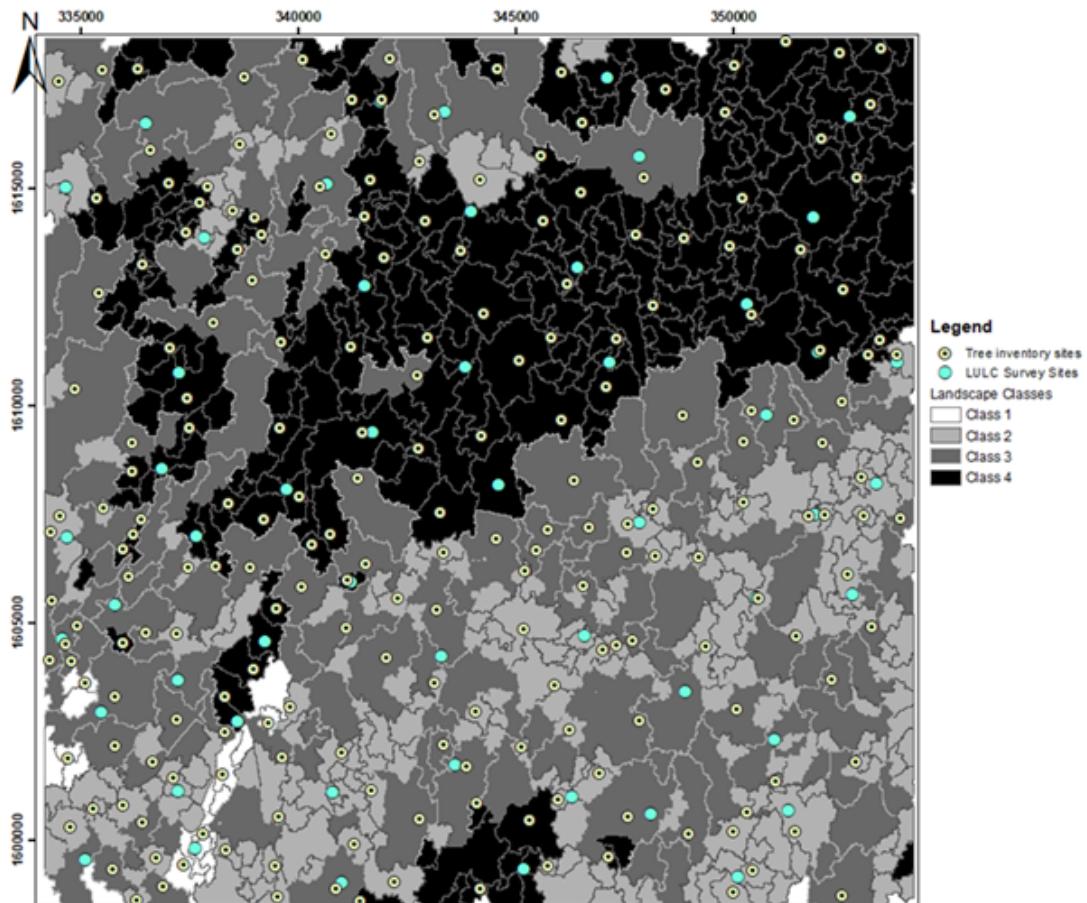
II SOURCES DES DONNÉES

II.1 Données environnementales

Deux campagnes de terrain pour collecter des données géoréférencées sur le paysage ont été réalisées. La première pour l'inventaire des espèces arborées s'est déroulée du 22 juin au 02 juillet 2018 et la seconde pour la collecte de données sur l'occupation du sol et les cultures en particulier est effectuée du 05 au 10 septembre 2018.

Sur la base de la carte du gradient d'hétérogénéité du paysage déjà élaborée, un protocole d'échantillonnage spatial optimisé a été produit pour couvrir régulièrement toutes la diversité spatiale de la zone d'étude. C'est un plan d'échantillonnage stratifié pondéré en fonction du gradient d'hétérogénéité du paysage. Ainsi, 213 sites d'observation ont été définis pour la première campagne et 45 sites pour la seconde.

FIGURE 1.5 – Répartition des sites d'échantillonnage sur le terrain



A l'issue de la première campagne 9258 arbres répartis en 63 espèces ont été identifiés et géoréférencés.

La seconde campagne a permis de digitaliser 734 polygones d'occupation/utilisation du sol.

Cartographie du système agroforestier

— Acquisition d'images satellites haute et très haute résolution spatiale

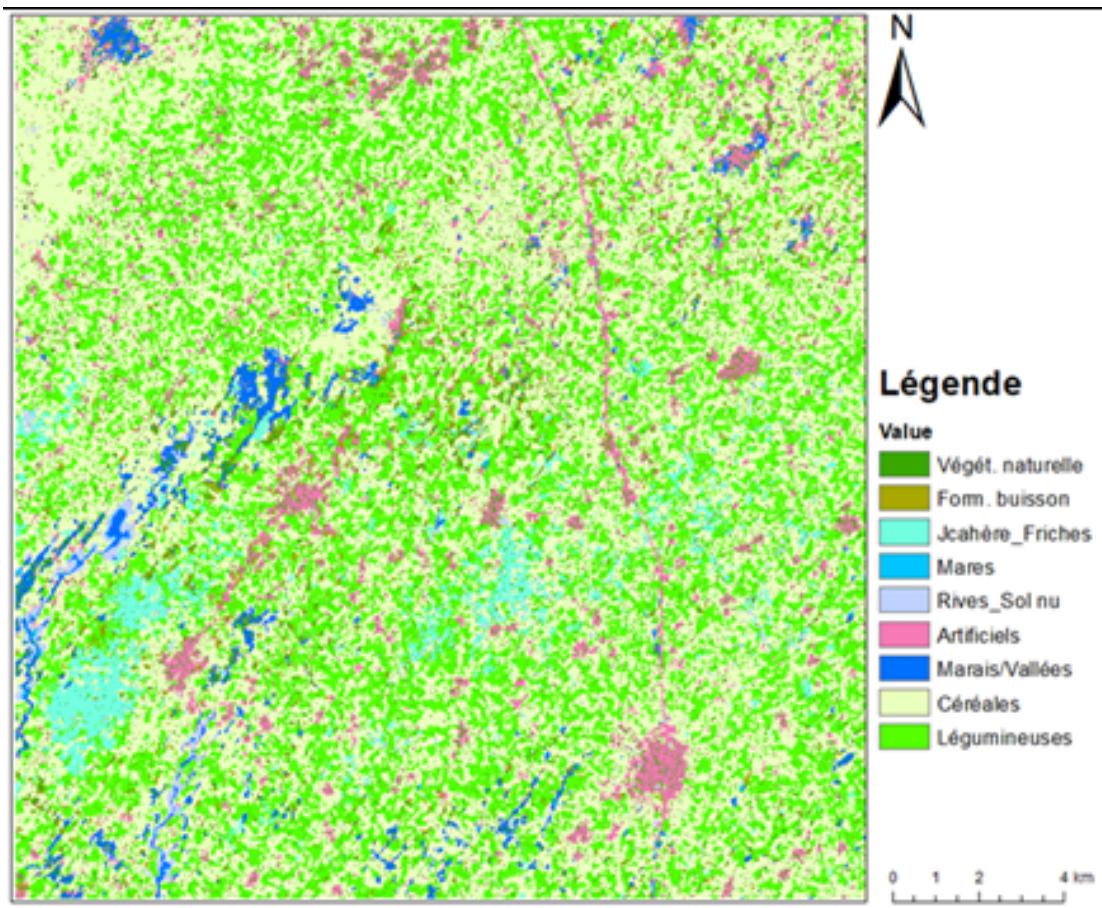
Trois images satellitaires Pléiades (très haute résolution spatiale) ont été commandées : en fin de saison sèche (mai), en saison des cultures (octobre) et en début de saison sèche (décembre). Les images de mai et de décembre ont été reçue mais celle d'octobre n'a pas été acquise du fait d'une couverture nuageuse trop défavorable. Une série temporelle d'images PlanetScope (très haute résolution spatiale) et une série temporelle d'images Sentinel 2 ont été téléchargées durant la période juin-novembre 2018 (couvrant la saison culturelle).

— Traitement des données et cartographie de l'occupation/utilisation du sol

La chaîne de traitement d'images satellites MORINGA a été utilisée pour réaliser la cartographie de l'occupation/utilisation du sol. MORINGA est une chaîne de traitement d'images satellitaires développée par des chercheurs du Cirad. Elle fait appel à des fonctions de l'Orfeo Tool Box (OTB) et permet de produire une carte d'occupation du sol, à partir d'une image THRS, d'une série temporelle d'images, et d'une base de données d'apprentissage (polygones dont l'occupation du sol est connue).

Le résultat est une carte d'occupation/utilisation du sol avec 9 classes.

FIGURE 1.6 – Carte d’occupation/utilisation du sol de la zone d’étude



II.2 Données bioclimatiques : WorldClim - Données climatiques mondiales

WorldClim est un ensemble de couches climatiques mondiales (données climatiques maillées) avec une résolution spatiale d'environ 1 km^2 . Ces données peuvent être utilisées pour la cartographie et la modélisation spatiale.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé la version 2.0 pour télécharger les données bioclimatiques.

Les variables bioclimatiques dérivent des valeurs mensuelles de la température et des précipitations pour générer des variables plus significatives sur le plan biologique. Utilisées dans la modélisation de la répartition des espèces et les techniques de modélisation écologique, les variables bioclimatiques représentent les tendances annuelles (la température annuelle moyenne, les précipitations annuelles, ...), la saisonnalité (par exemple, la plage annuelle de température et de précipitations) et les facteurs environnementaux extrêmes ou limitants (par exemple, la température du mois le plus froid et le plus chaud, et les précipitations des quartiers secs).

Révue de la littérature

I MODÈLES DE DISTRIBUTION DES ESPÈCES

II CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES ESPÈCES ÉTUDIÉES.

II.1 *Faidherbia albida*

II.2 *Balanites aegyptiaca*

II.3 *Anogeissus leiocarpus*

II.4 *Adansonia digitata*

II.5 *Acacia nilotica*

III LES VARIABLES À HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE

IV CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU SÉNÉGAL

Approche méthodologique et outils d'analyse

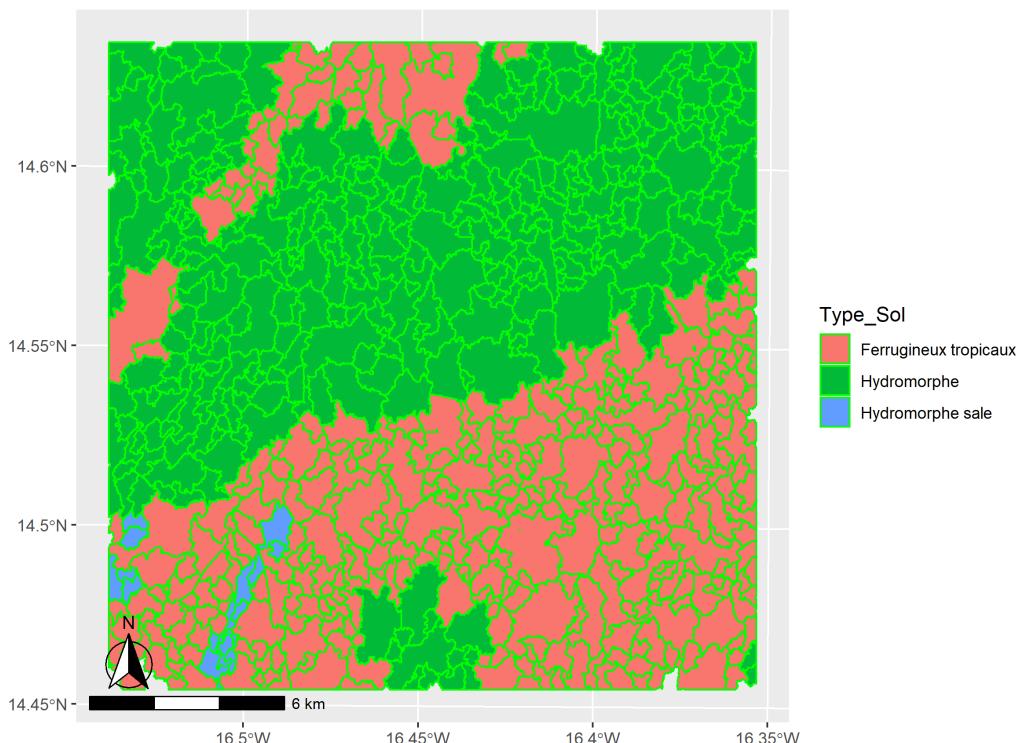
Deuxième partie

Analyse spatiale et modélisation de la distribution des espèces

Analyse spatiale descriptive

I ANALYSE SPATIALE DESCRIPTIVE DANS LA ZONE D'ÉTUDE

FIGURE 4.1 – Les types de sol dans la zone d'étude

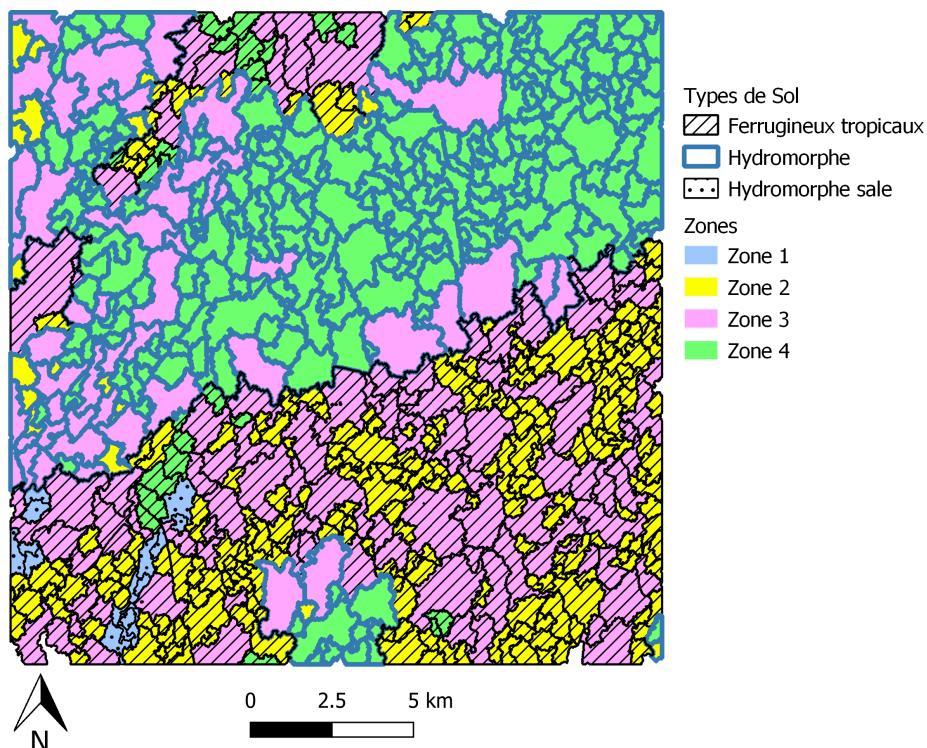


La zone d'étude est caractérisée par trois types de sols :

- ferrugineux tropicaux, dont les caractéristiques sont les suivantes :
 - profondeur de sol variable (en tout cas moins de 3 m);
 - une nette horizonation des profils pédologiques;
 - horizon de surface riche en matière organique : 1,5 pour cent dans la partie supérieure, moins de 1 pour cent dans sa partie inférieure;
 - présence, parfois, d'un horizon de transition lessivé (30-40 cm) et d'un horizon d'accumulation en argile et en fer avec ou sans concrétions et nodules;
 - le rapport limon fin sur argile est toujours supérieur à 0,20 et celui SiO₂ / Al₂O₃ à 2;
 - le drainage interne généralement bon est parfois mauvais;

- présence d'horizon induré (surtout dans les bas-versants).
- hydromorphes, qui montre des marques physiques de saturation régulière en eau ;
- hydromorphe salé

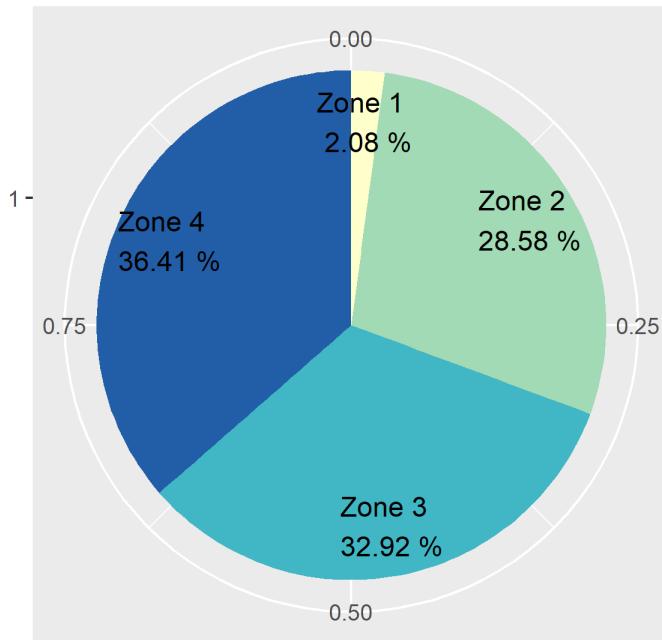
FIGURE 4.2 – Les types de sol suivant les zones



L'analyse montre que :

- la zone 1 correspond aux unités paysagères caractérisées par une couverture homogène et une faible densité et diversité des arbres, avec des sols hydromorphes salés ;
- la zone 2 est principalement caractérisée par un important changement positif de la végétation au cours des 15 dernières années, avec des sols généralement ferrugineux tropicaux et rarement hydromorphes ;
- la zone 3 diffère de la seconde par une plus grande variabilité spatiale signifiant une plus grande hétérogénéité du faciès de la végétation et également par une plus grande fréquence de sols hydromorphes ;
- la quatrième présente une productivité végétale et une densité de couverture ligneuse plus élevées, mais aussi une plus faible variabilité spatiale. Les sols y sont en général hydromorphes.

FIGURE 4.3 – Pourcentage d'espèces ligneuses par zones



II ANALYSE SPATIALE DESCRIPTIVE DES ESPÈCES ÉTU-DIÉES

II.1 Faidherbia albida

Les deux derniers graphiques ont la même source de données, montrant la distribution de la présence(1)/absence(0) de l'espèce **Faidherbia albida** en termes de zone. Celui de gauche montre en pourcentage, tandis que celui de droite montre en valeur absolue.

La zone semble être un **bon prédicteur**, car la probabilité de présence/absence de l'espèce **Faidherbia albida** est différente compte tenu des zones. Elle donne un ordre aux données .

De la première parcelle(%), la **probabilité** de présence de **Faidherbia albida** pour la **zone 3** est de **45.1%**, tandis que pour les zones 1, 2 et 4 ,respectivement elle est de 23.3%, 42.2% et 39.6%.

La probabilité de présence de **Faidherbia albida** dans la **zone 3** est plus élevée que dans les autres zones(45.1% contre 23.3%, 42.2%, 39.6%, respectivement). De la deuxième parcelle(nombre) :

- Il y a un total de 193 arbres dans la zone 1 :
 - 45 d'entre eux représentent **Faidherbia albida**($45/193=23.3\%$);
 - les 148 représentent les autres arbres.
- Il y a un total de 2646 arbres dans la zone 2 :
 - 1117 d'entre eux représentent **Faidherbia albida**($1117/2646=42.2\%$);
 - les 1529 représentent les autres arbres.

- Il y a un total de 3048 arbres dans la zone 3 :
 - 1375 d'entre eux représentent **Faidherbia albida**($1375/3048=45.1\%$);
 - les 1673 représentent les autres arbres.
- Il y a un total de 3371 arbres dans la zone 4 :
 - 1335 d'entre eux représentent **Faidherbia albida**($1335/3371=39.6\%$);
 - les 2036 représentent les arbres.

FIGURE 4.4 – Probabilité de présence de Faidherbia albida dans les différentes zones

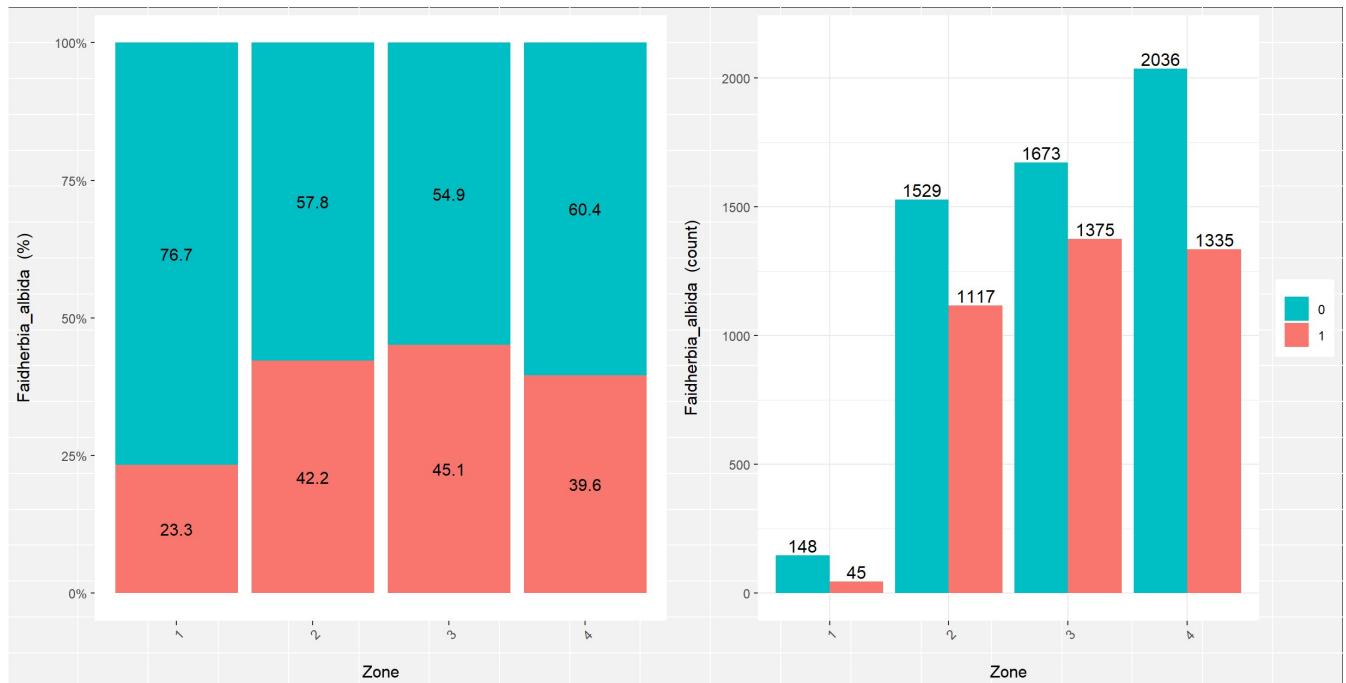


FIGURE 4.5 – Distribution de *Faidherbia albida* suivant la zone 1

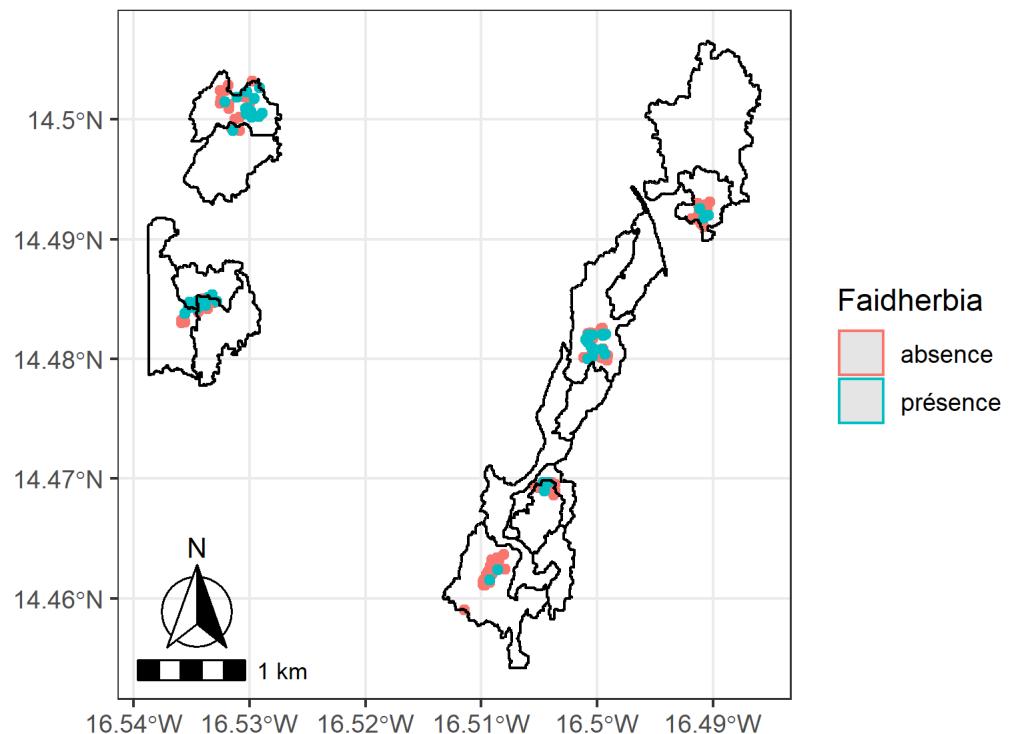


FIGURE 4.6 – Distribution de *Faidherbia albida* suivant la zone 2

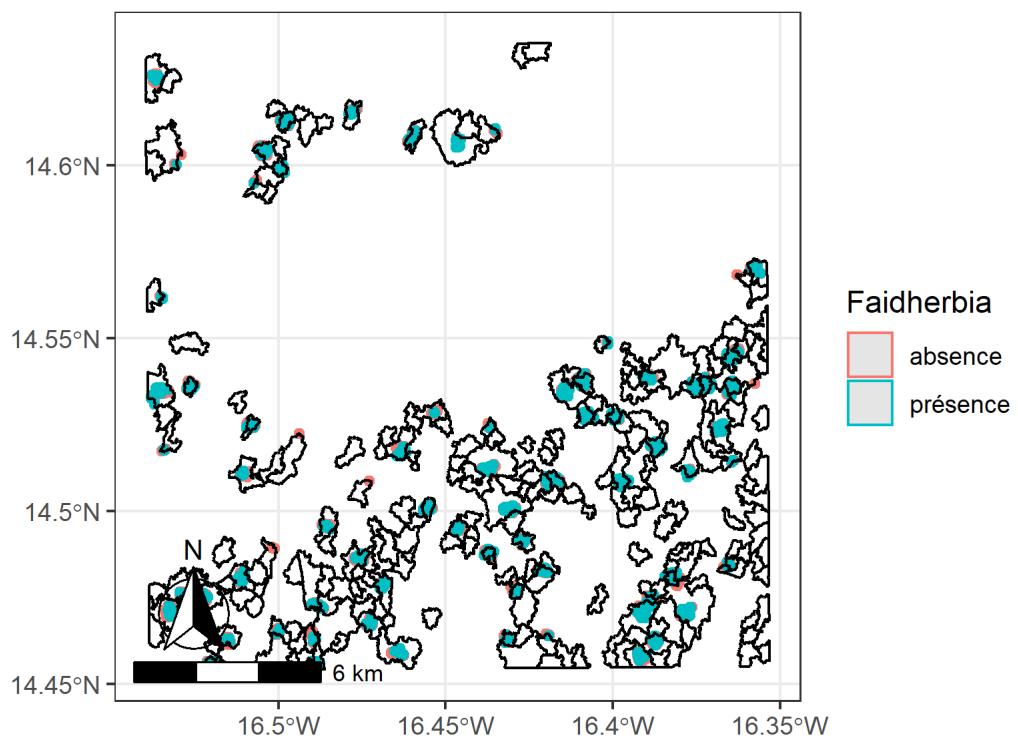


FIGURE 4.7 – Distribution de *Faidherbia albida* suivant la zone 3

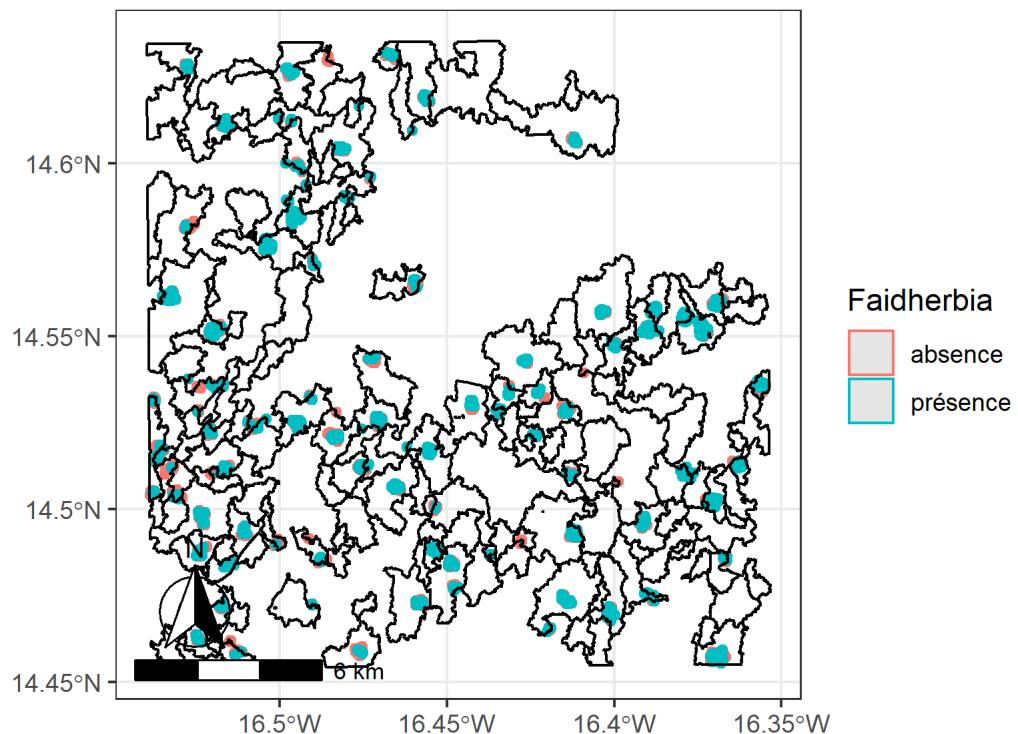


FIGURE 4.8 – Distribution de *Faidherbia albida* suivant la zone 4

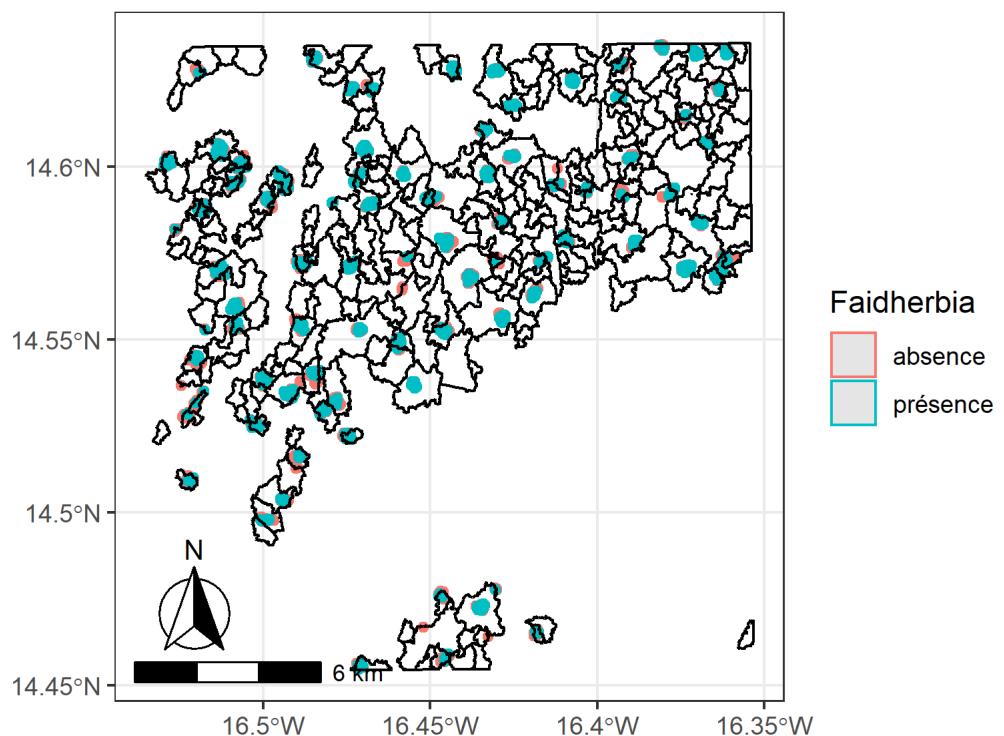
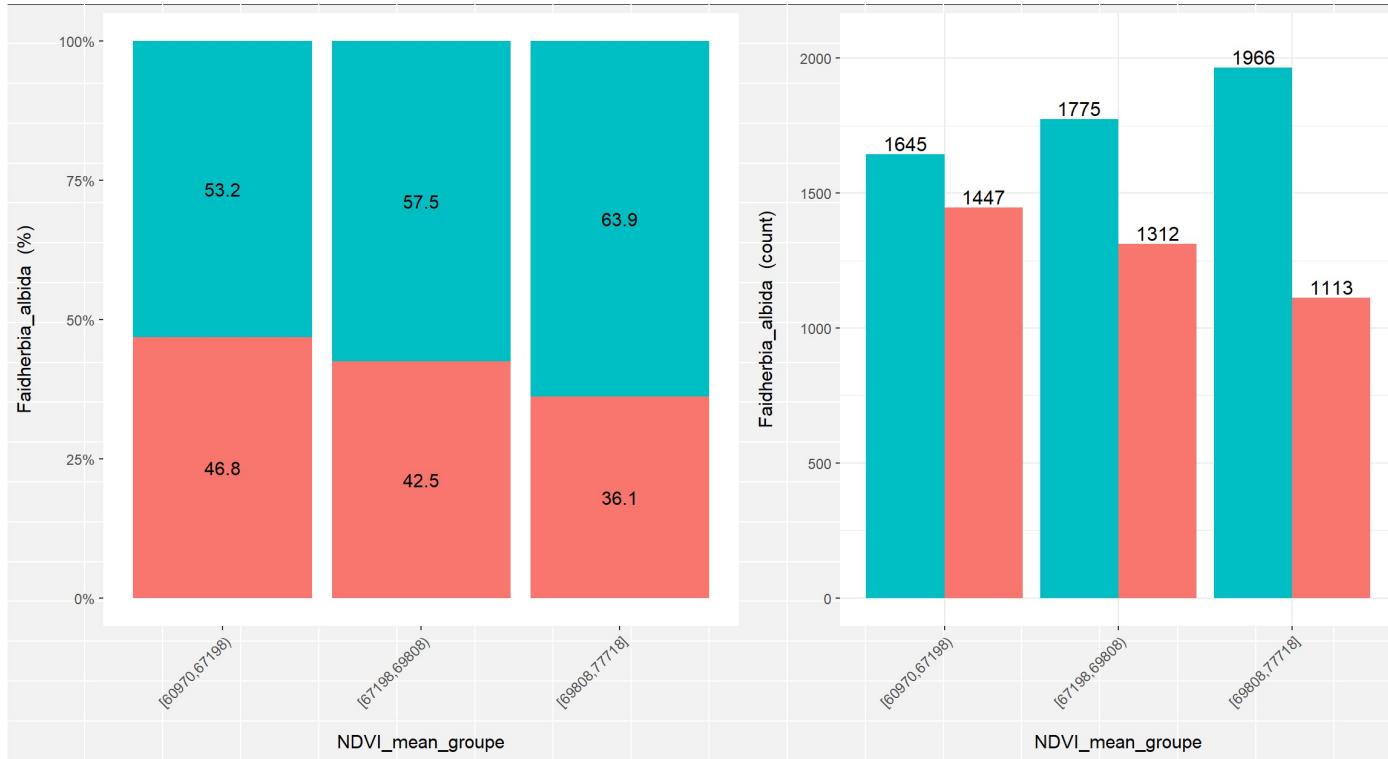


FIGURE 4.9 – Probabilité de présence de *Faidherbia albida* suivant productivité végétale (regroupé en 3 classes)



Ce nouveau graphique basé sur le regroupement en trois classes de l'indice de végétation montre clairement comment la probabilité de présence de ***Ferdherbia albida*** diminue à mesure que l'indice de végétation augmente. Encore une fois, l'indice de végétation donne un ordre aux données.

FIGURE 4.10 – Probabilité de présence de Faidherbia albida suivant la dynamique de la productivité végétale entre 2000 et 2015 (regroupé en 3 classes)

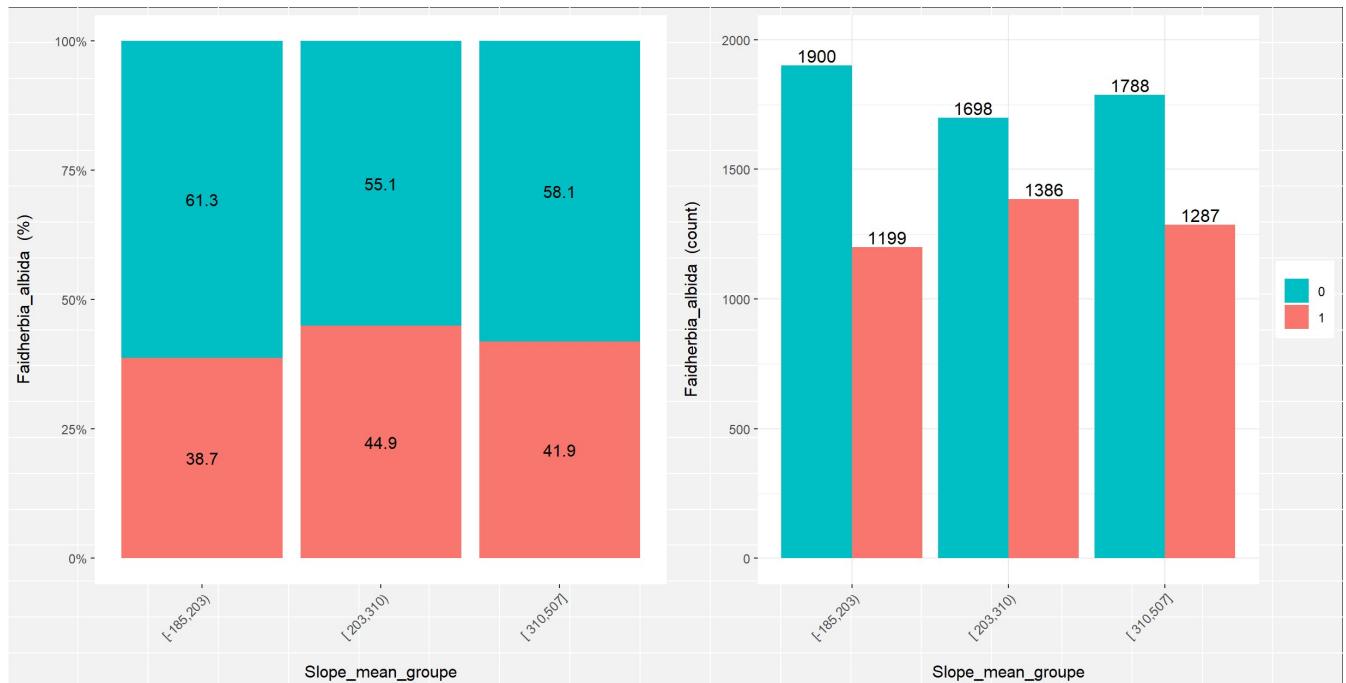


FIGURE 4.11 – Probabilité de présence de Faidherbia albida suivant la couverture ligneuse (regroupé en 3 classes)

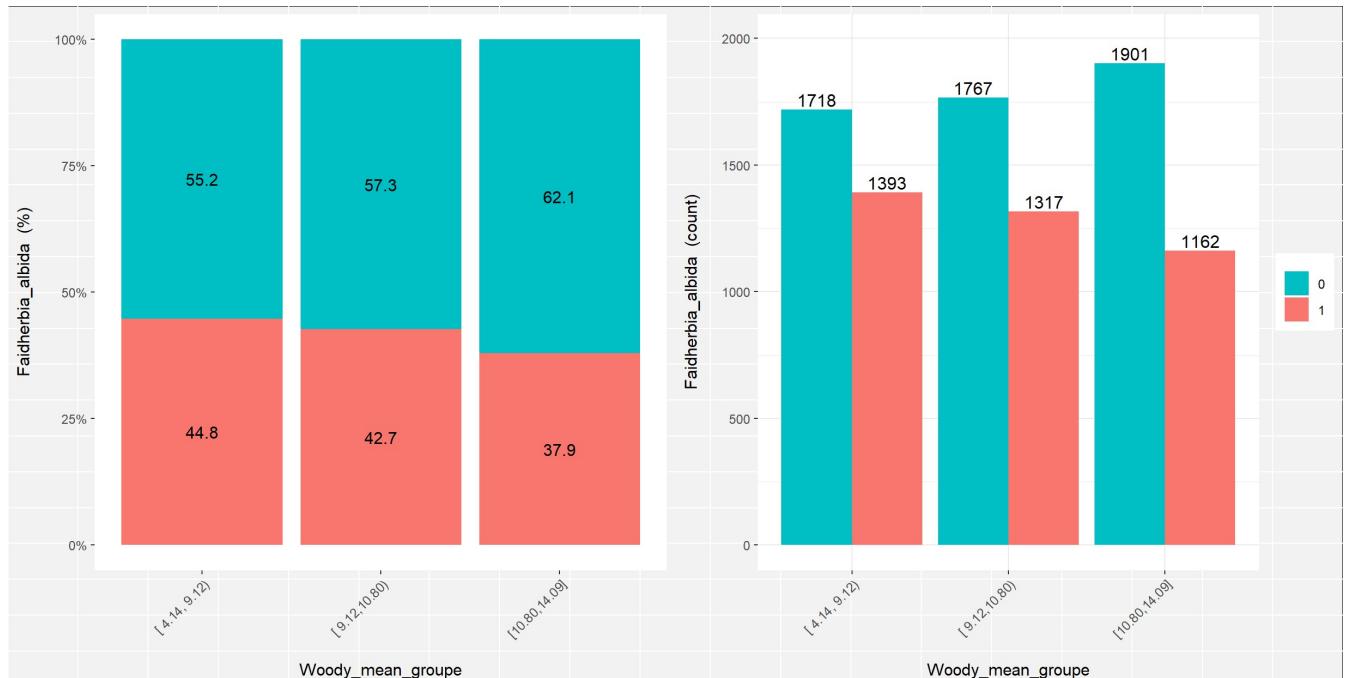


FIGURE 4.12 – Probabilité de présence de *Faidherbia albida* suivant l'évapotranspiration réelle (regroupé en 3 classes)

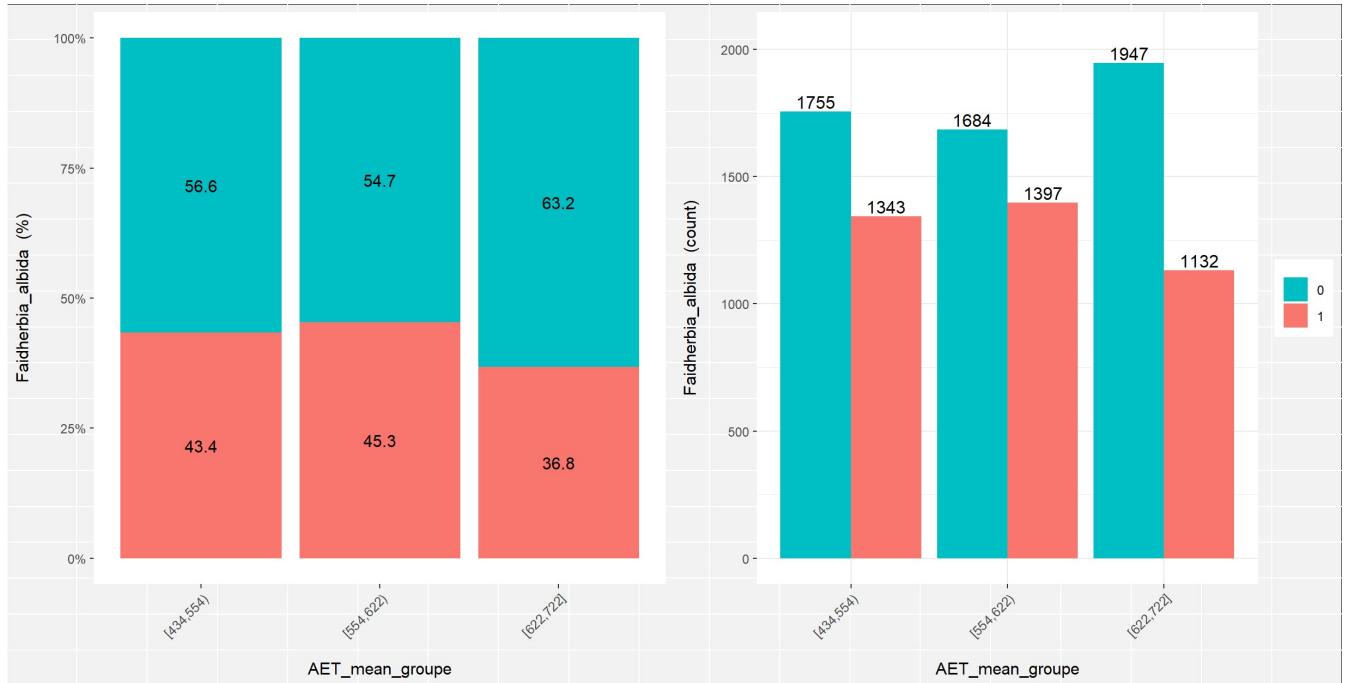
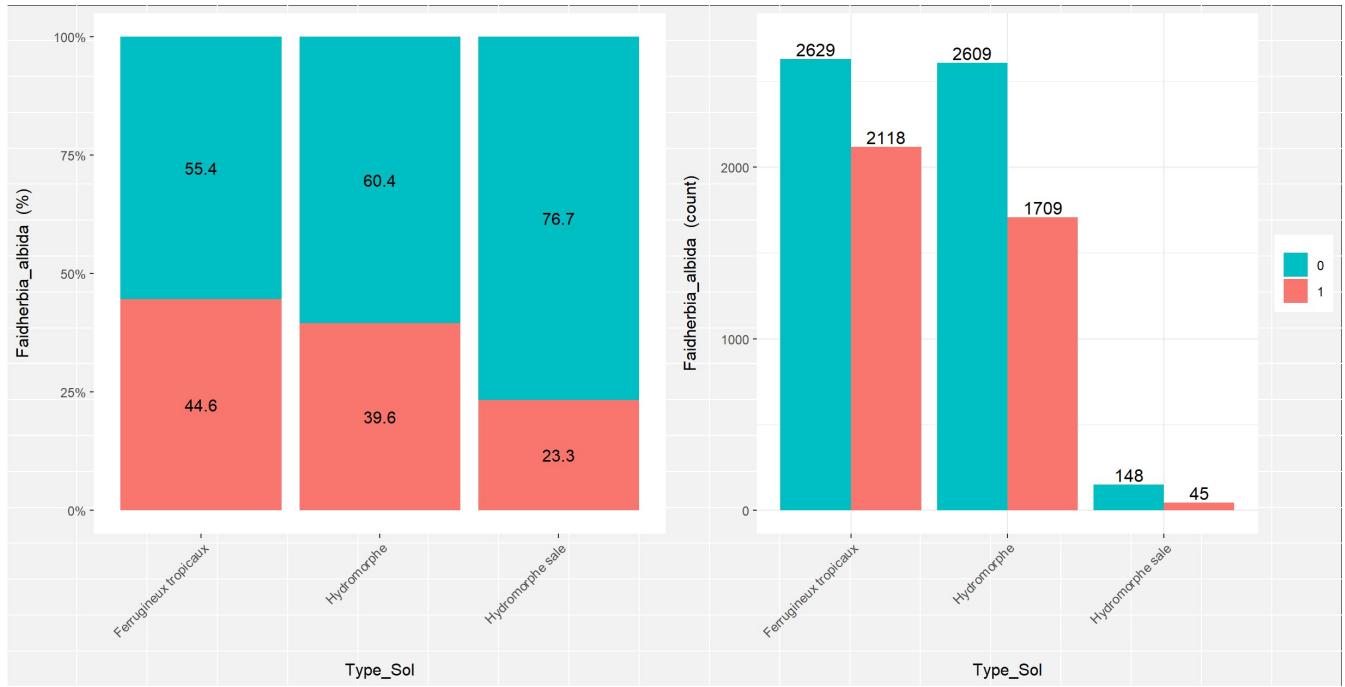


FIGURE 4.13 – Probabilité de présence de *Faidherbia albida* suivant le type de sol



II.2 Balanites aegyptiaca

FIGURE 4.14 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* dans les différentes zones

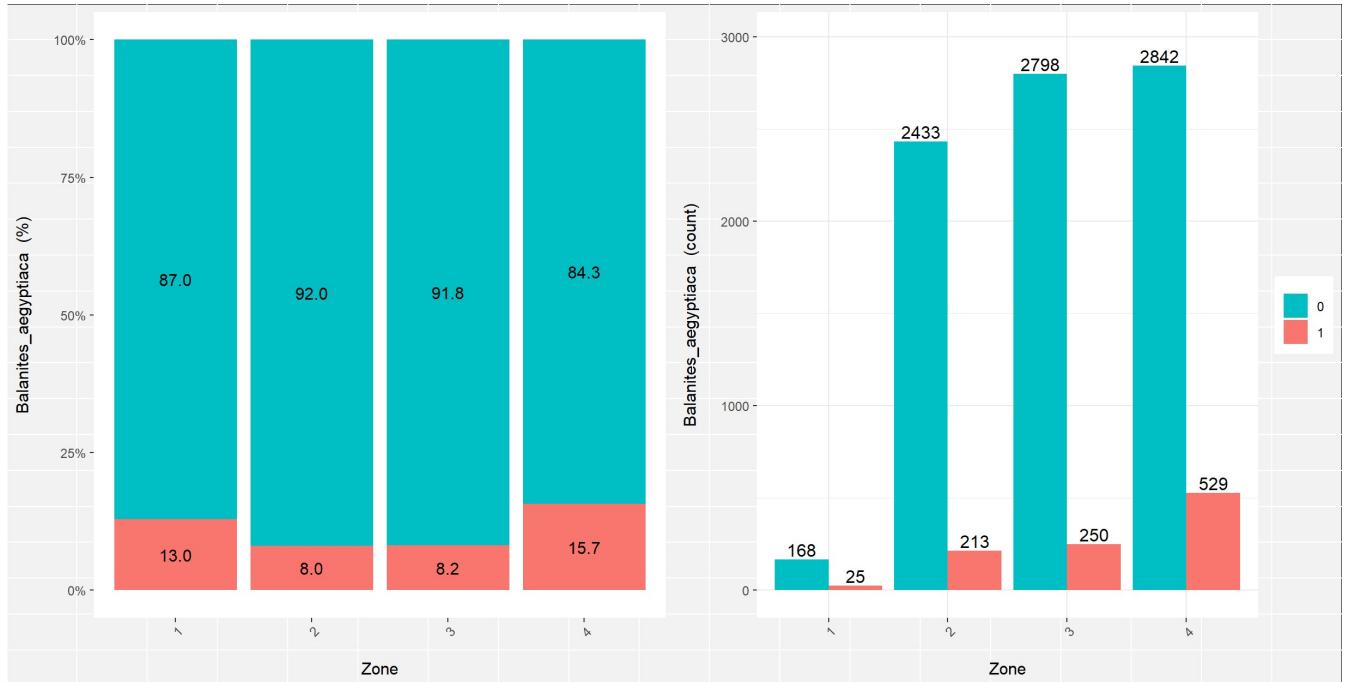


FIGURE 4.15 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant l'indice de végétation (regroupé en 3 classes)

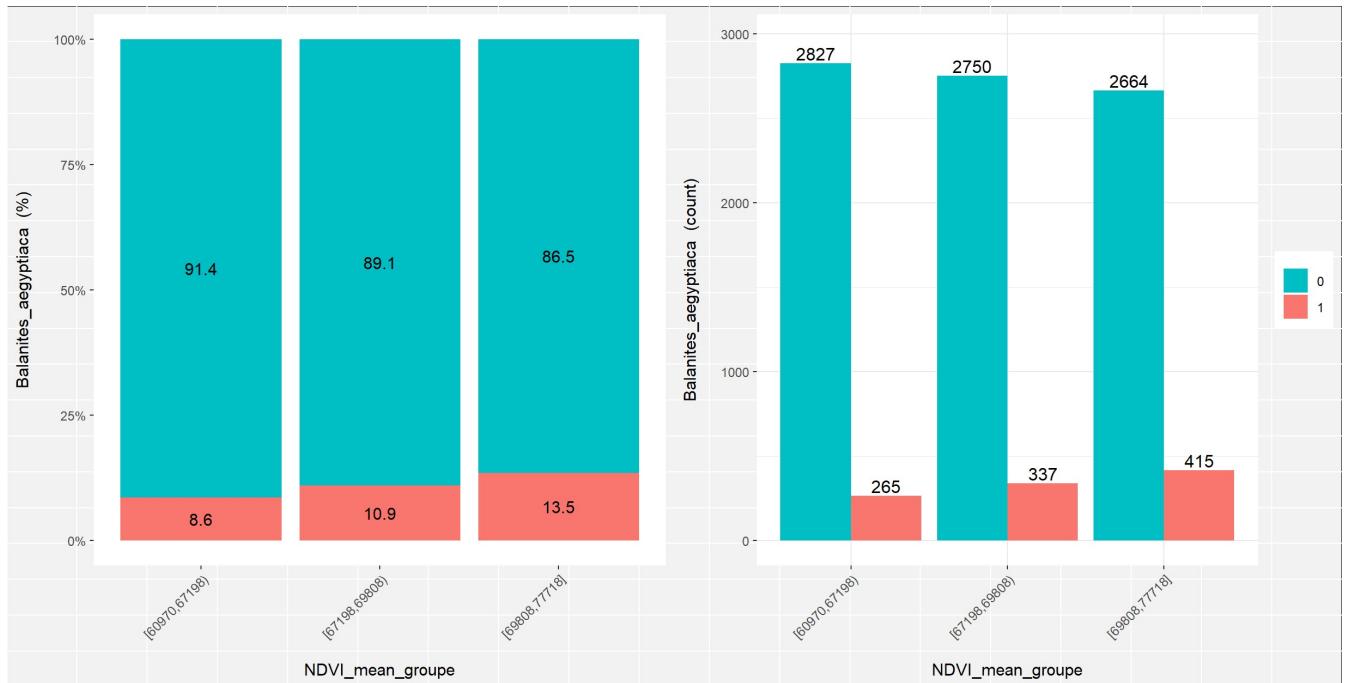


FIGURE 4.16 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le Slope (regroupé en 3 classes)

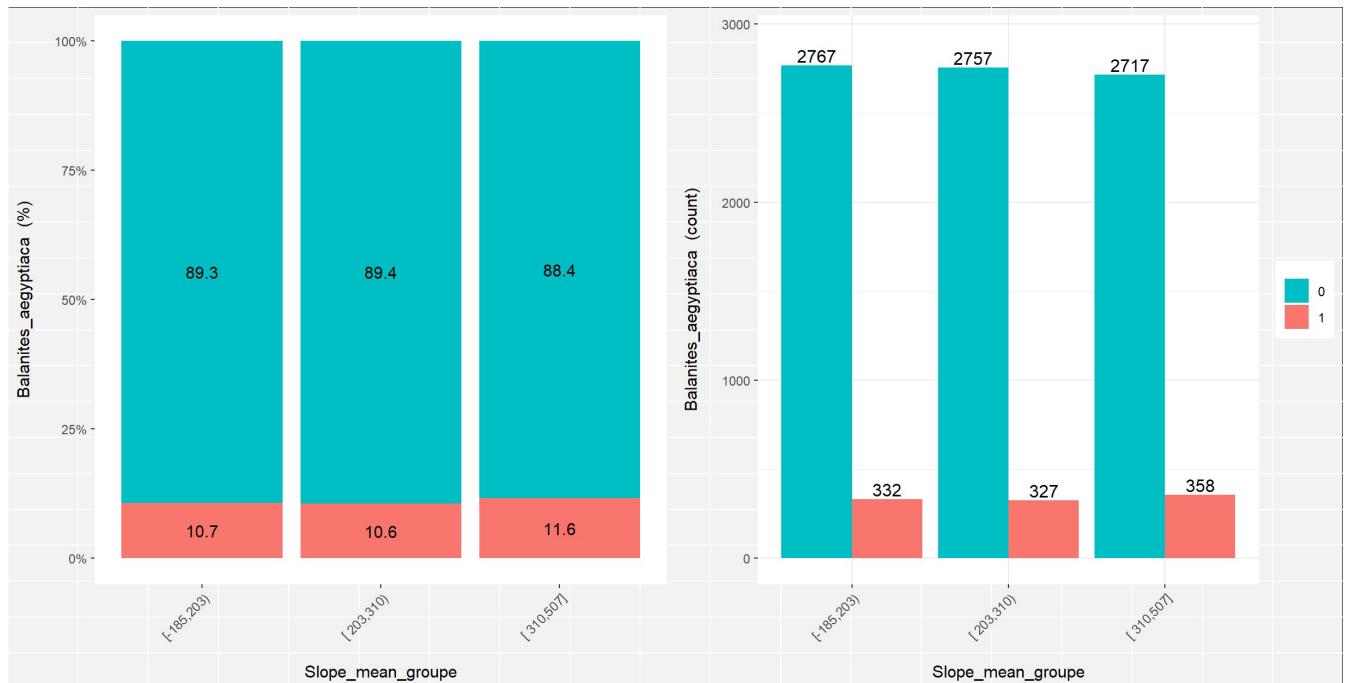


FIGURE 4.17 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le Woody (regroupé en 3 classes)

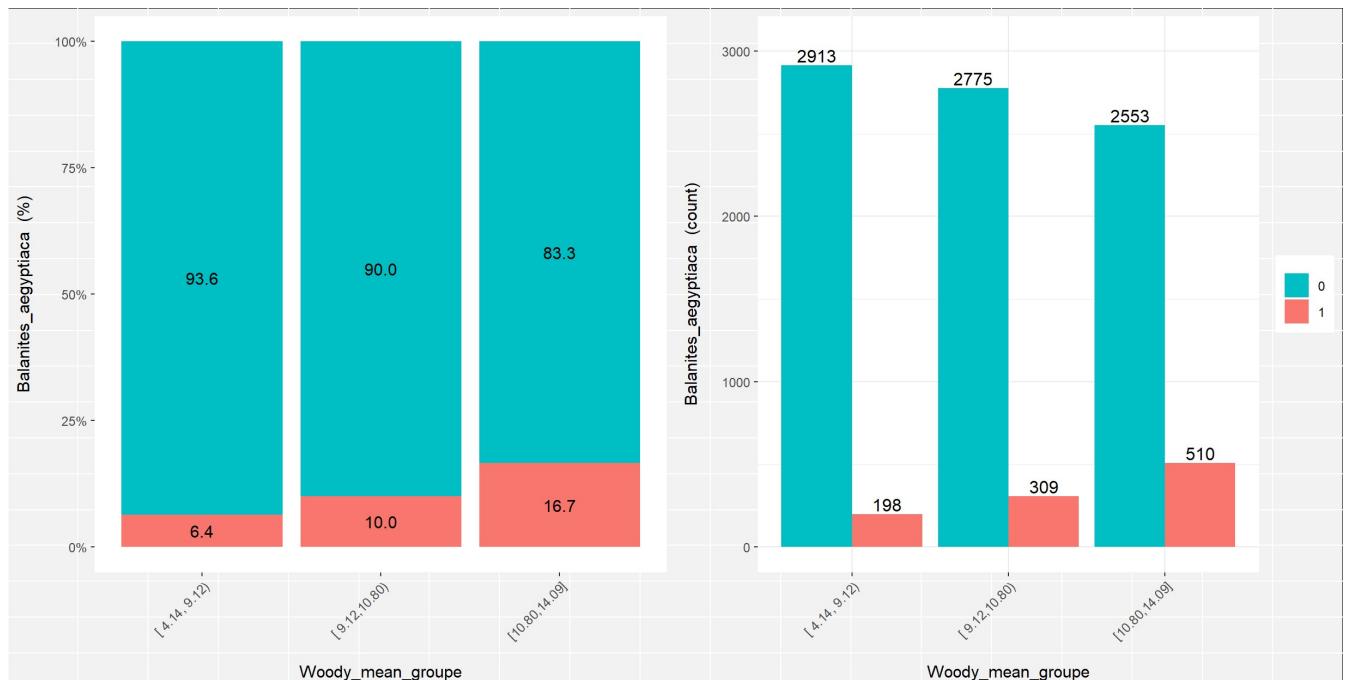


FIGURE 4.18 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le AET (regroupé en 3 classes)

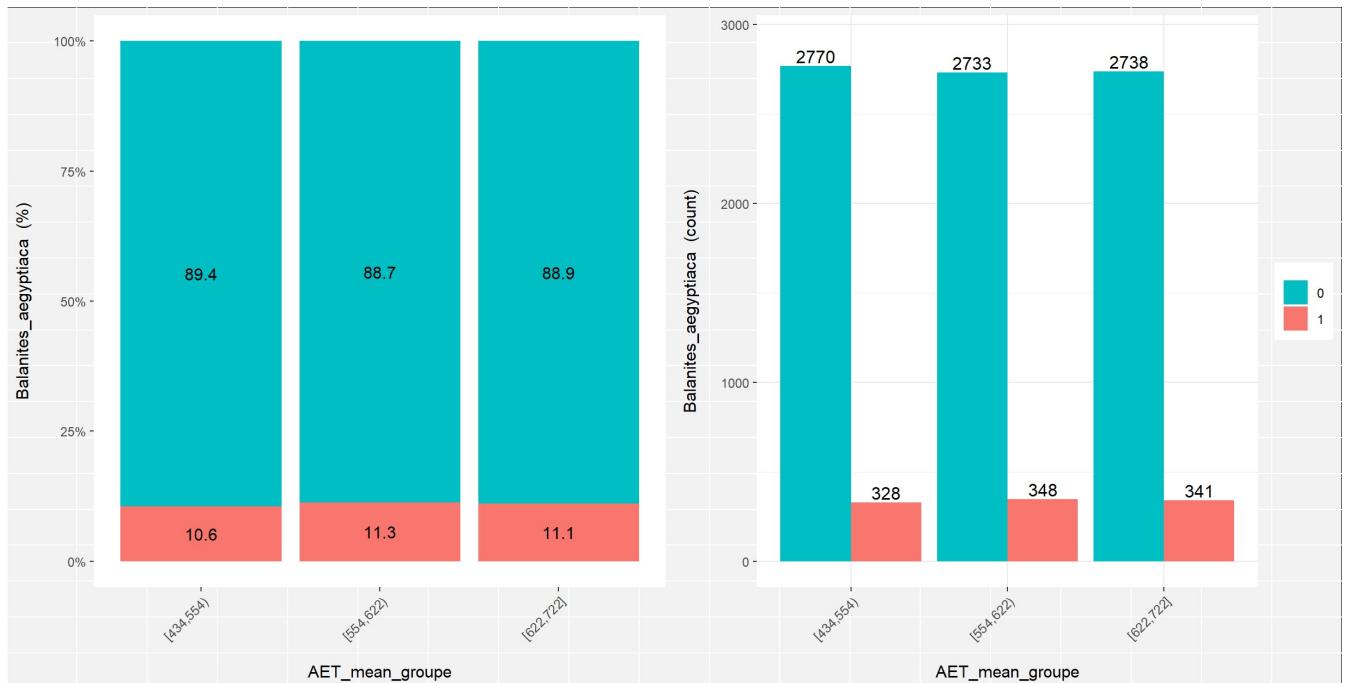


FIGURE 4.19 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le type de sol

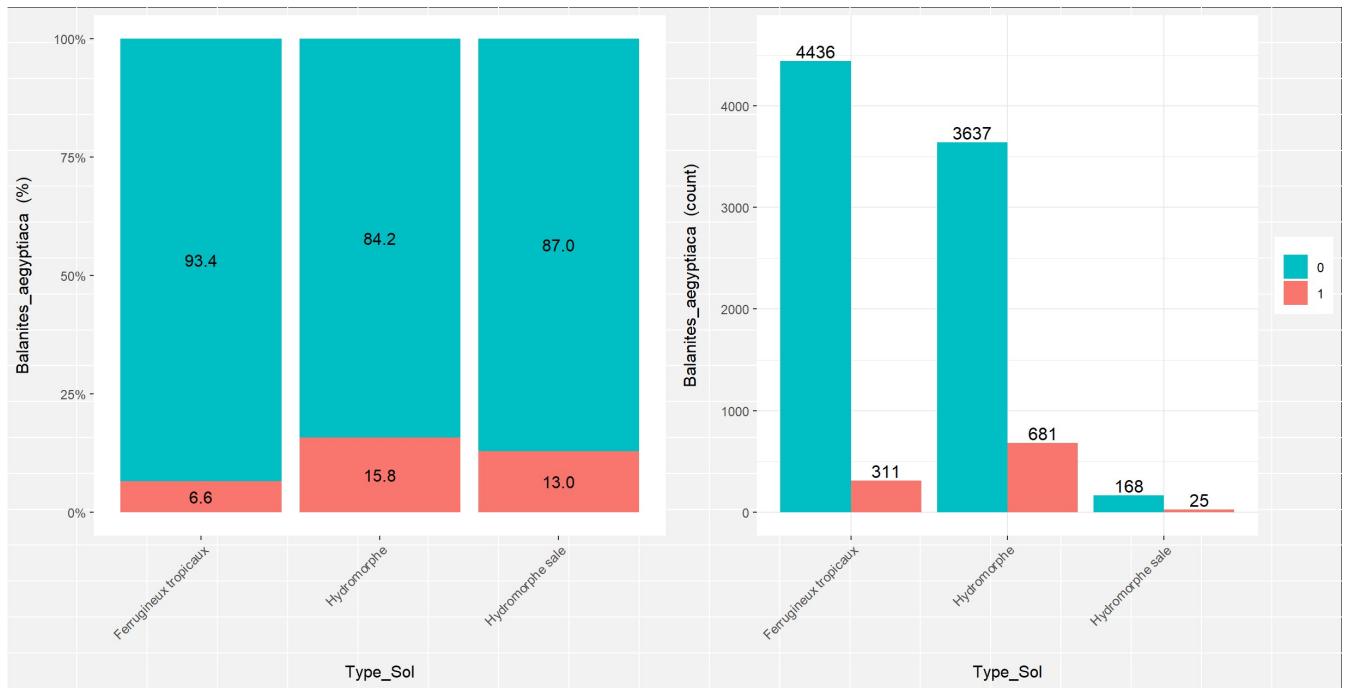


FIGURE 4.20 – Distribution de *Balanites aegyptiaca* suivant la zone 1

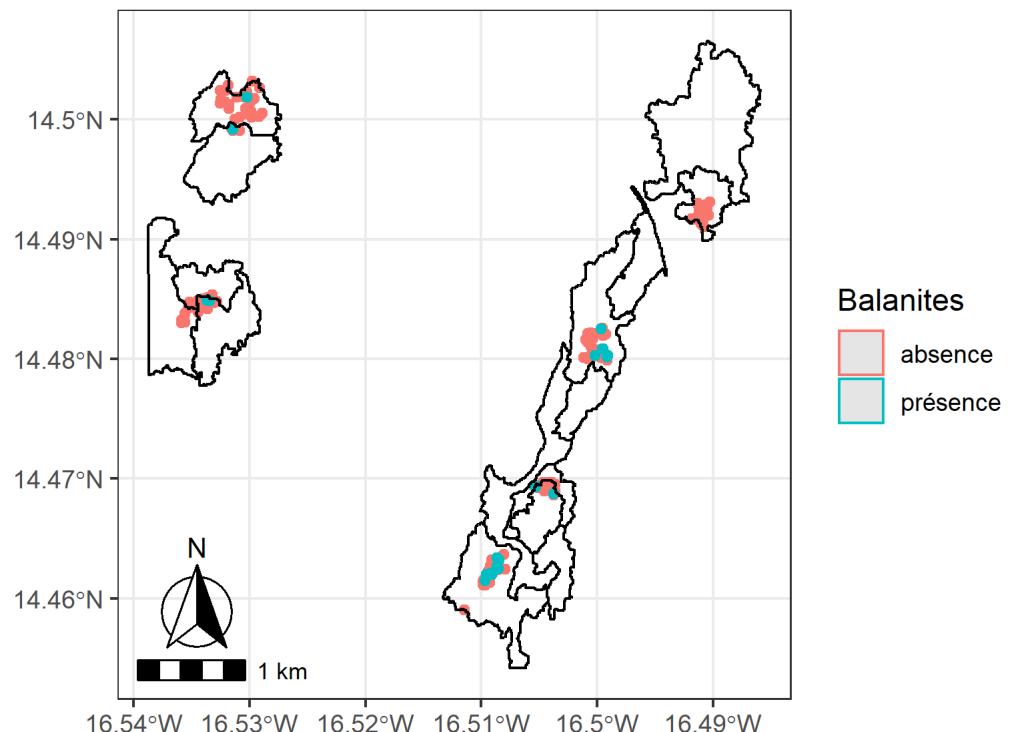


FIGURE 4.21 – Distribution de *Balanites aegyptiaca* suivant la zone 2

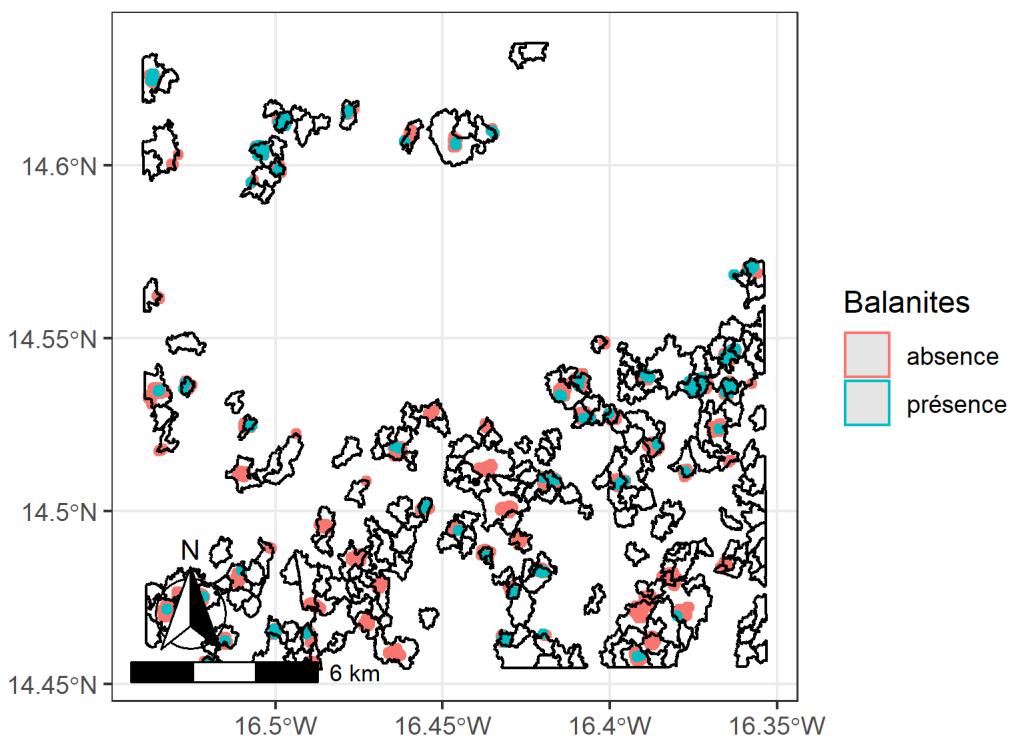


FIGURE 4.22 – Distribution de *Balanites aegyptiaca* suivant la zone 3

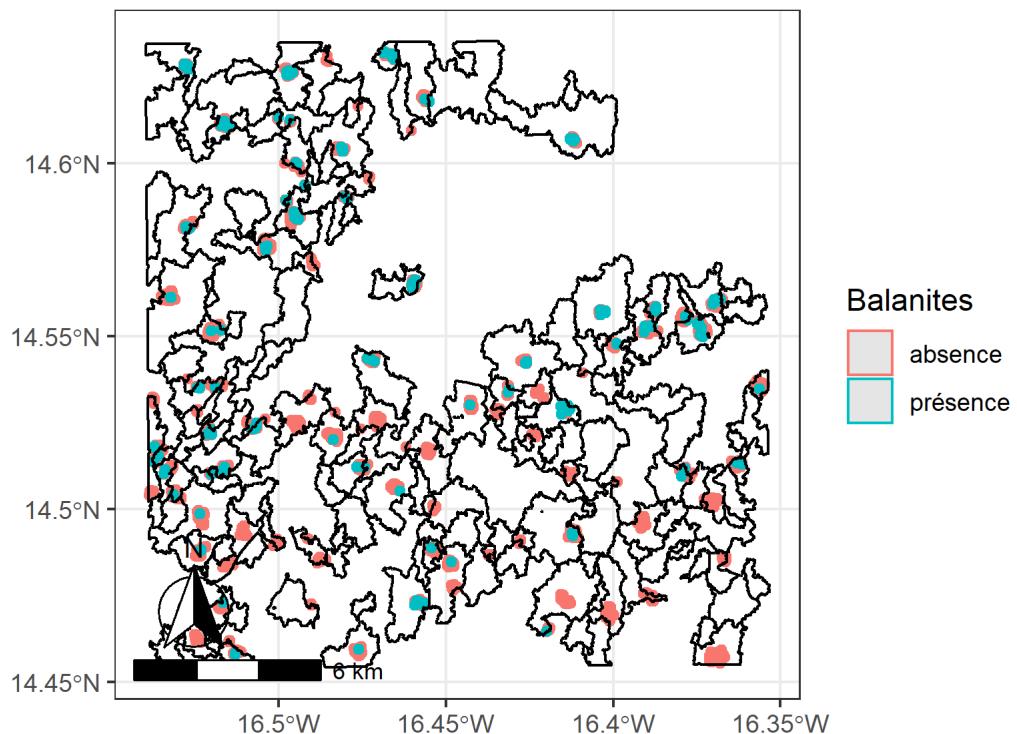
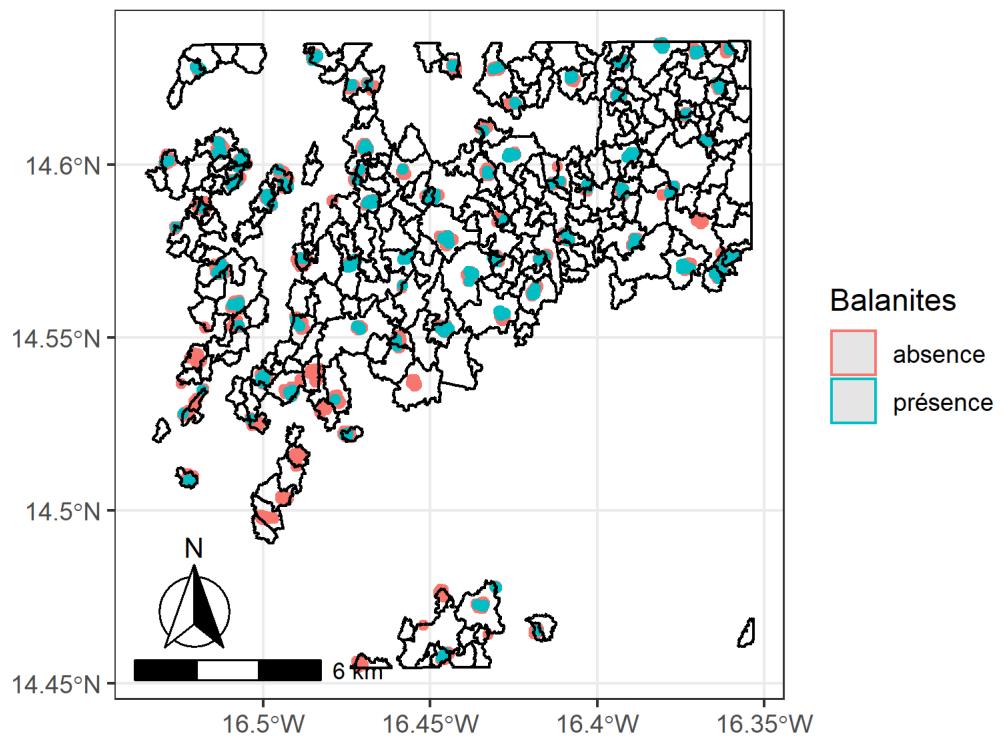


FIGURE 4.23 – Distribution de *Balanites aegyptiaca* suivant la zone 4



II.3 Anogeissus leiocarpus

FIGURE 4.24 – Probabilité de présence de Anogeissus leiocarpus dans les différentes zones

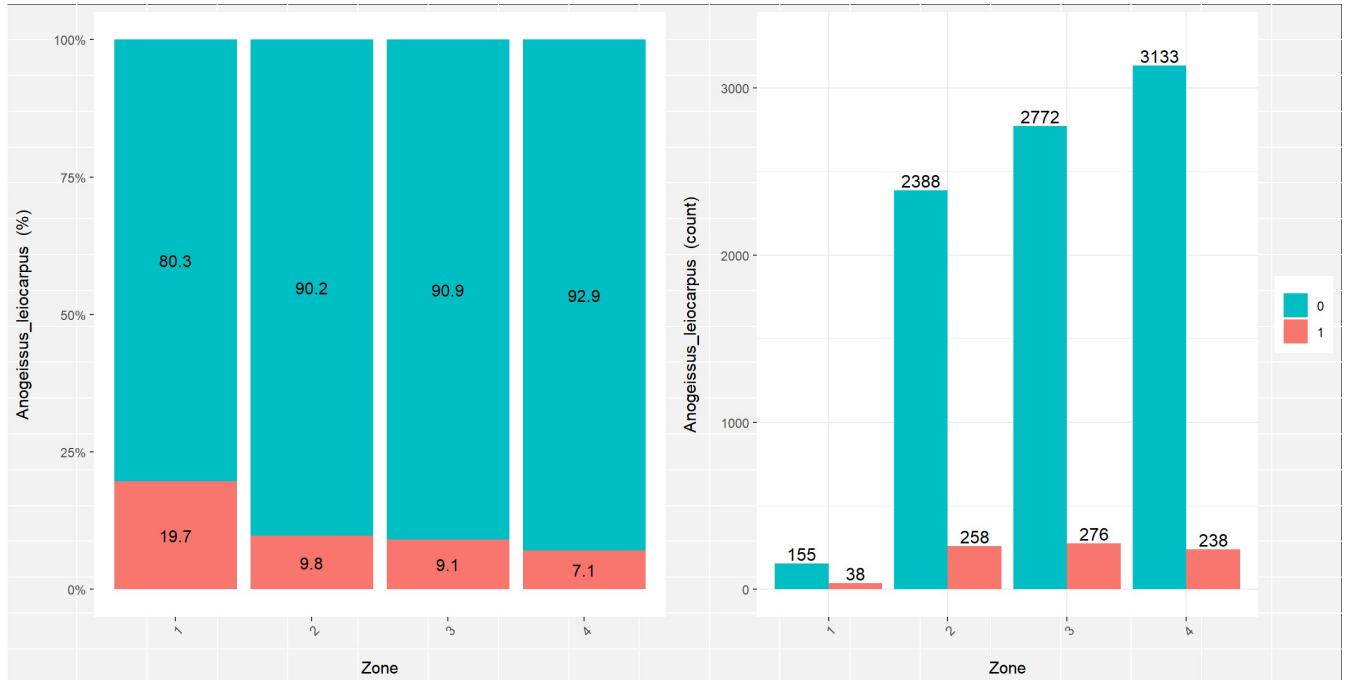


FIGURE 4.25 – Probabilité de présence de Anogeissus leiocarpus suivant l'indice de végétation(regroupé en 3 classes)

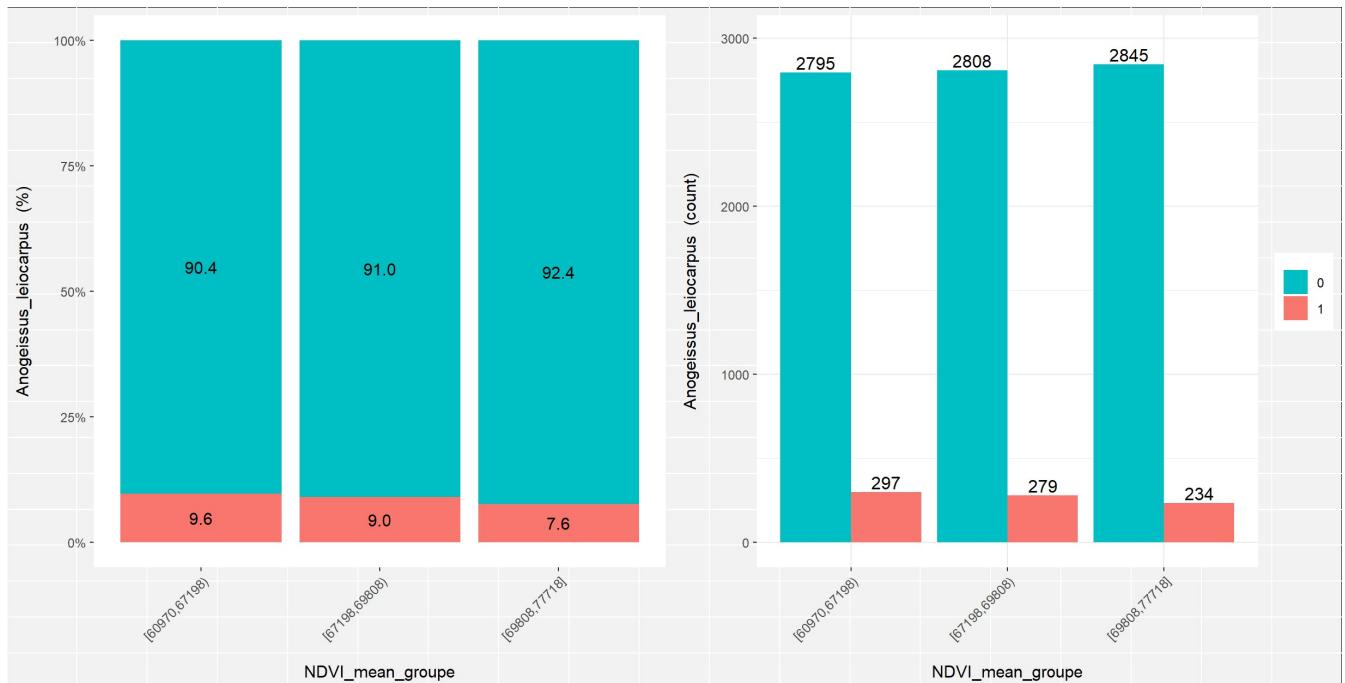


FIGURE 4.26 – Probabilité de présence de Anogeissus leiocarpus suivant le Slope(regroupé en 3 classes)

FIGURE 4.27 – Probabilité de présence de *Anogeissus leiocarpus* suivant le Woody (regroupé en 3 classes)

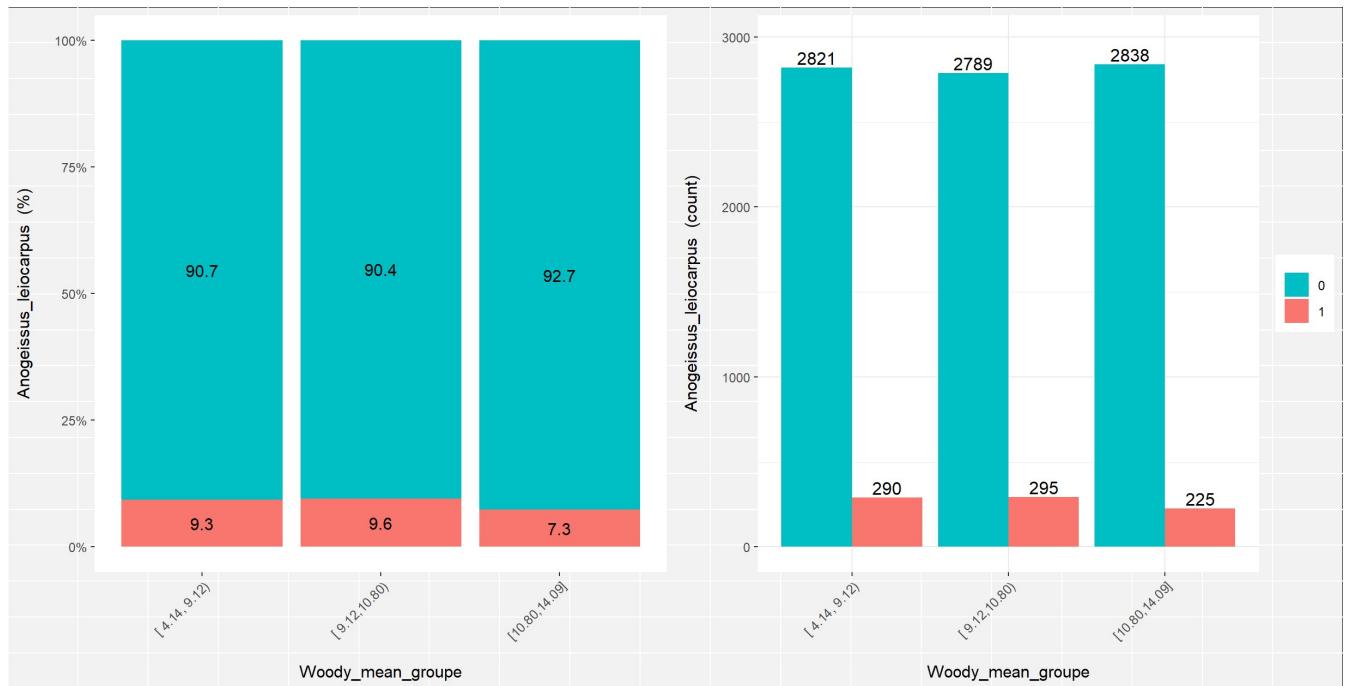


FIGURE 4.28 – Probabilité de présence de *Anogeissus leiocarpus* suivant le AET (regroupé en 3 classes)

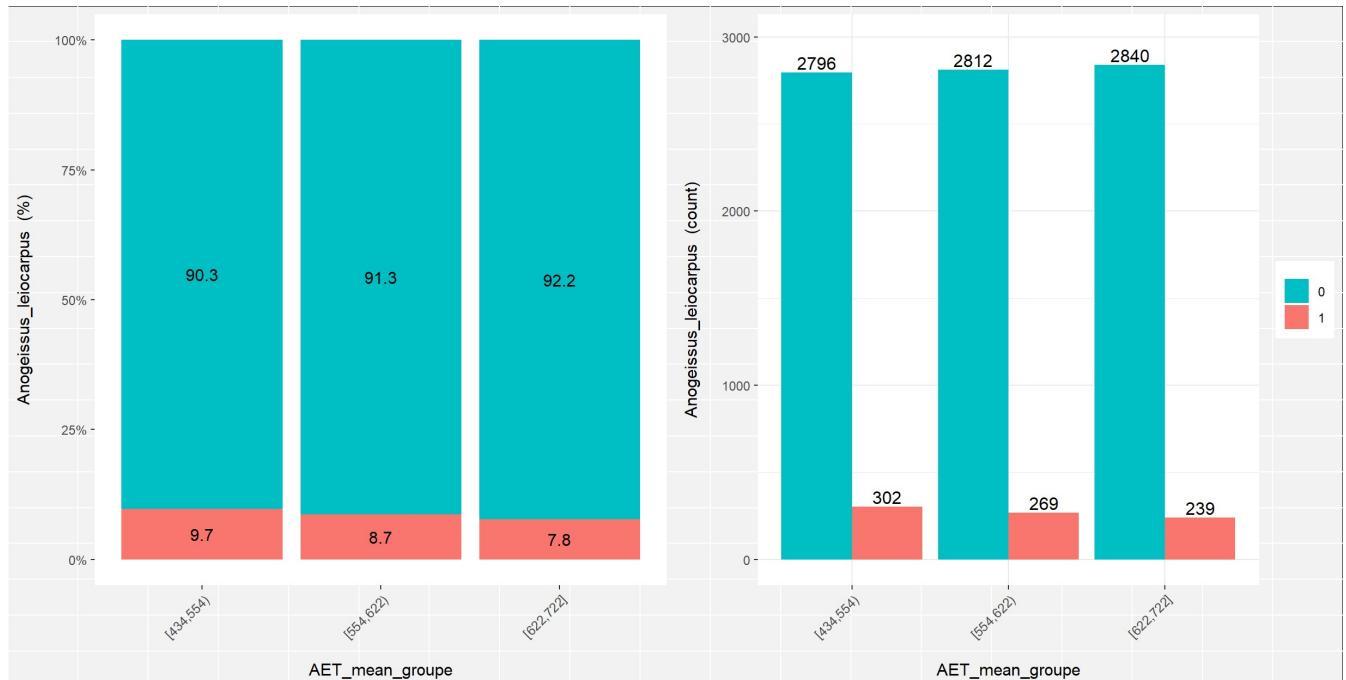


FIGURE 4.29 – Probabilité de présence de *Anogeissus leiocarpus* suivant le type de sol

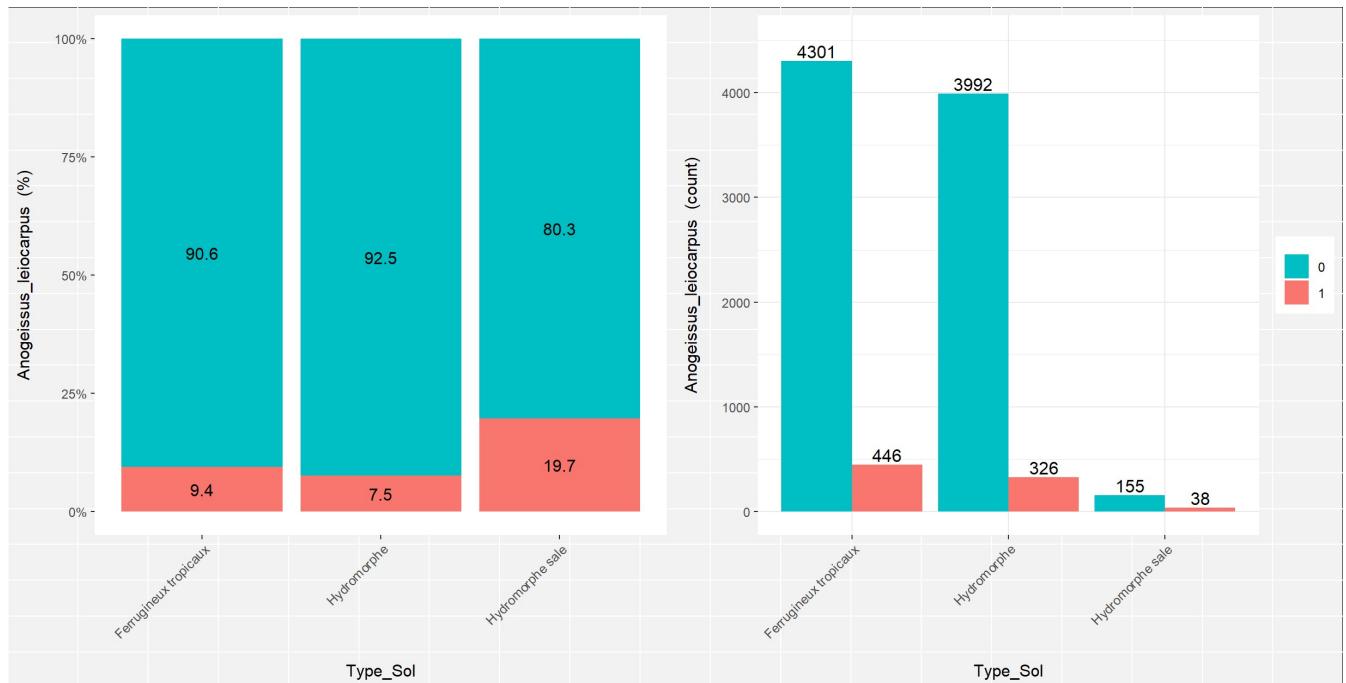


FIGURE 4.30 – Distribution de *Anogeissus leiocarpus* suivant la zone 1

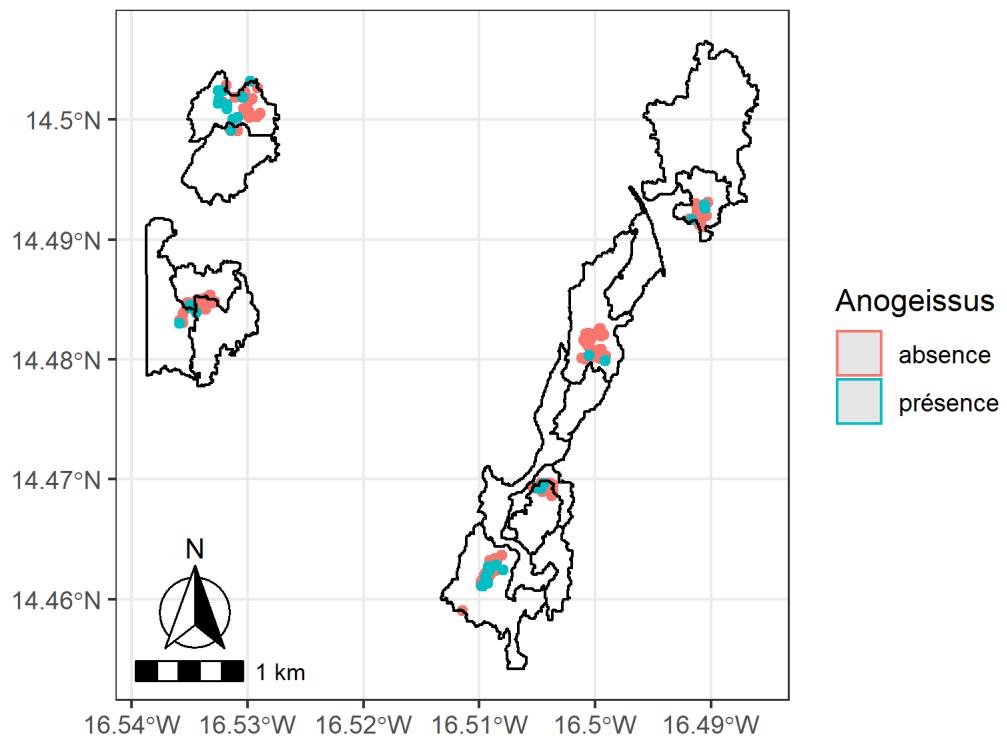


FIGURE 4.31 – Distribution de *Anogeissus leiocarpus* suivant la zone 2

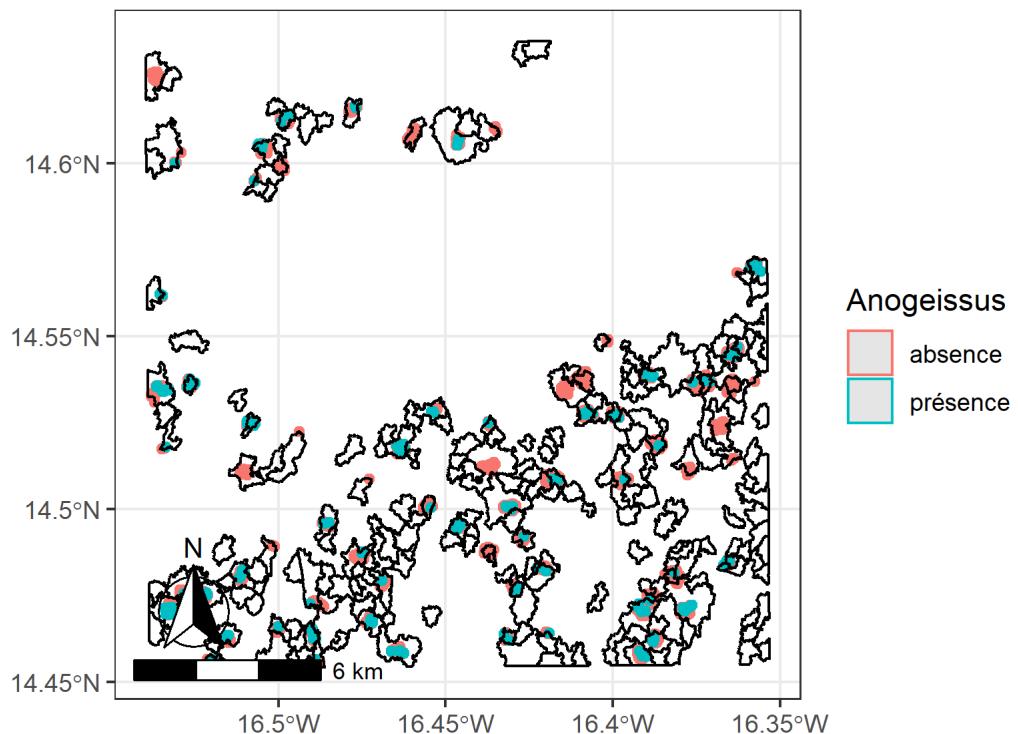


FIGURE 4.32 – Distribution de *Anogeissus leiocarpus* suivant la zone 3

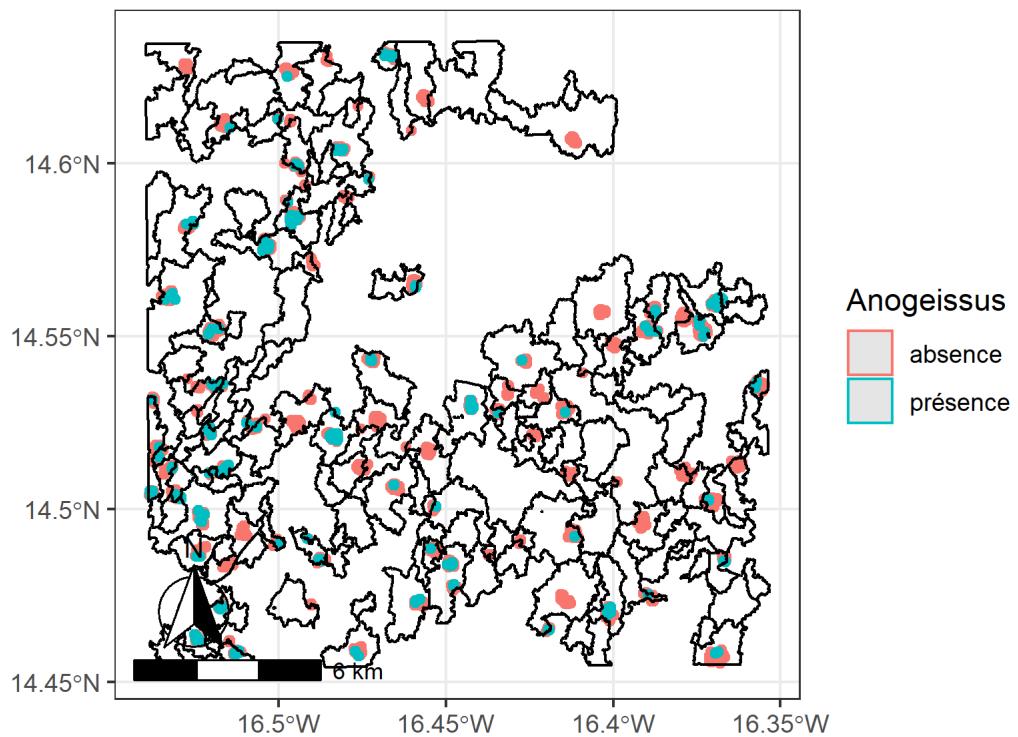
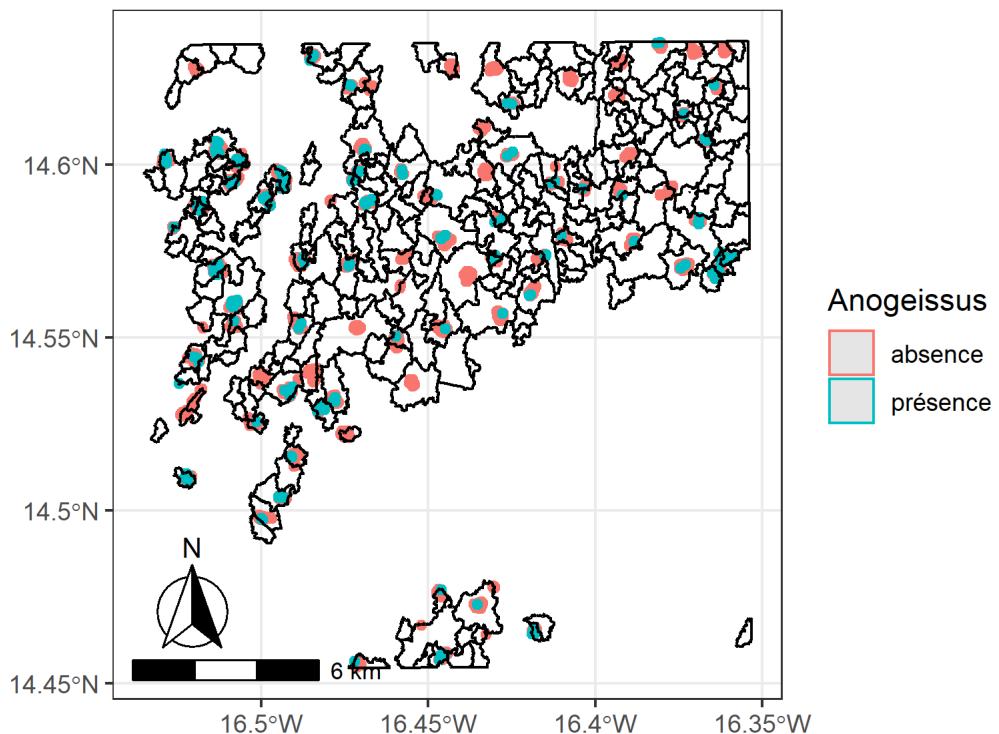


FIGURE 4.33 – Distribution de *Anogeissus leiocarpus* suivant la zone 4



II.4 *Adansonia digitata*

FIGURE 4.34 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* dans les différentes zones

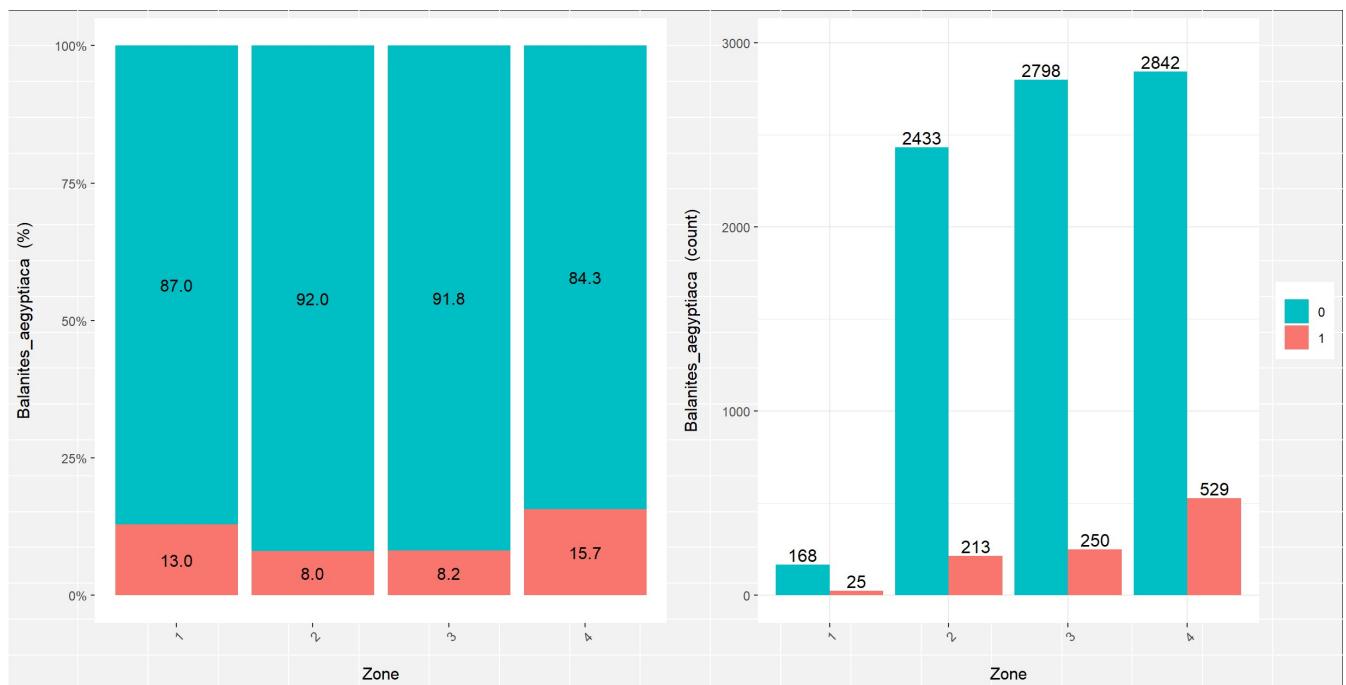


FIGURE 4.35 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant l'indice de végétation (regroupé en 3 classes)

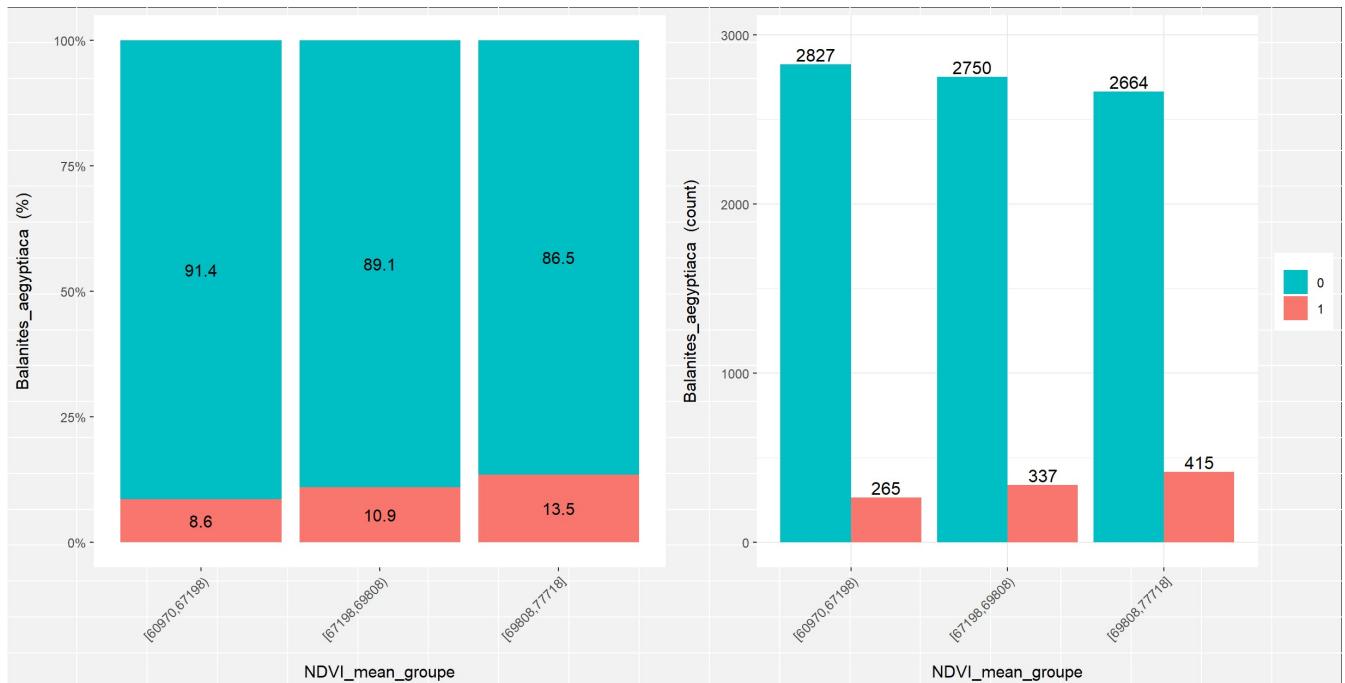


FIGURE 4.36 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le Slope (regroupé en 3 classes)

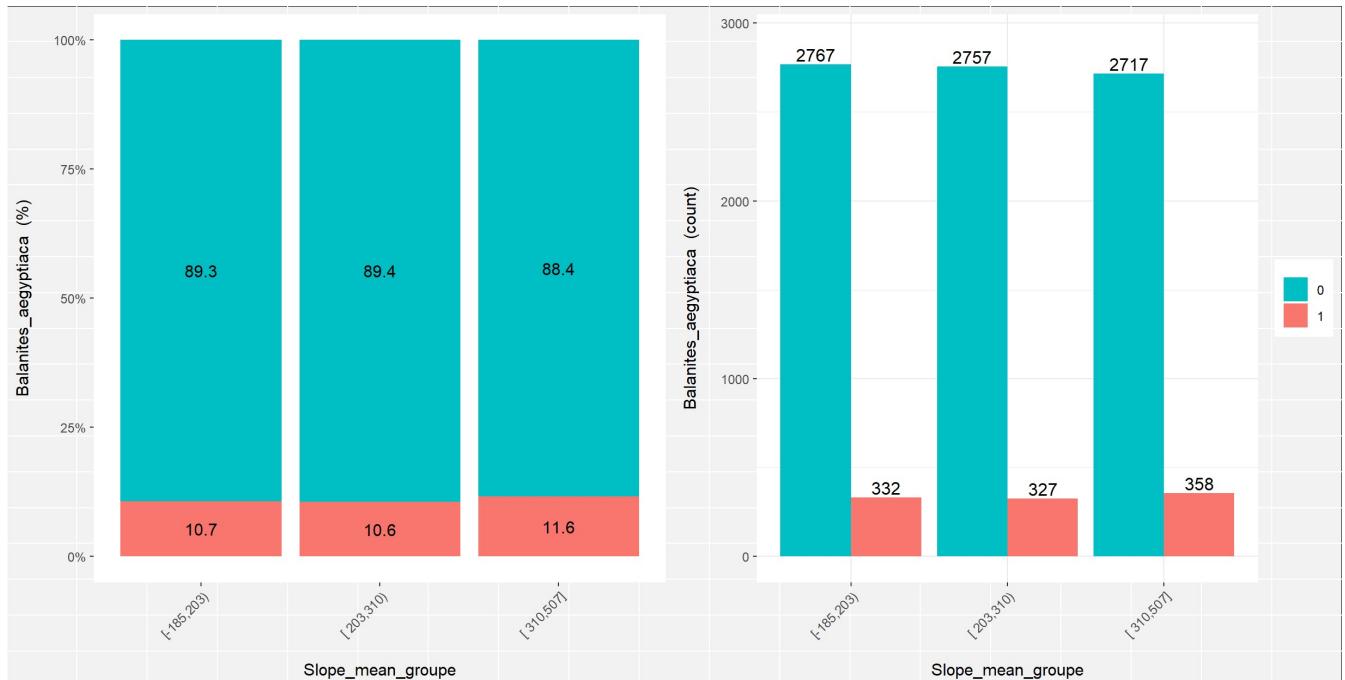


FIGURE 4.37 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le Woody (regroupé en 3 classes)

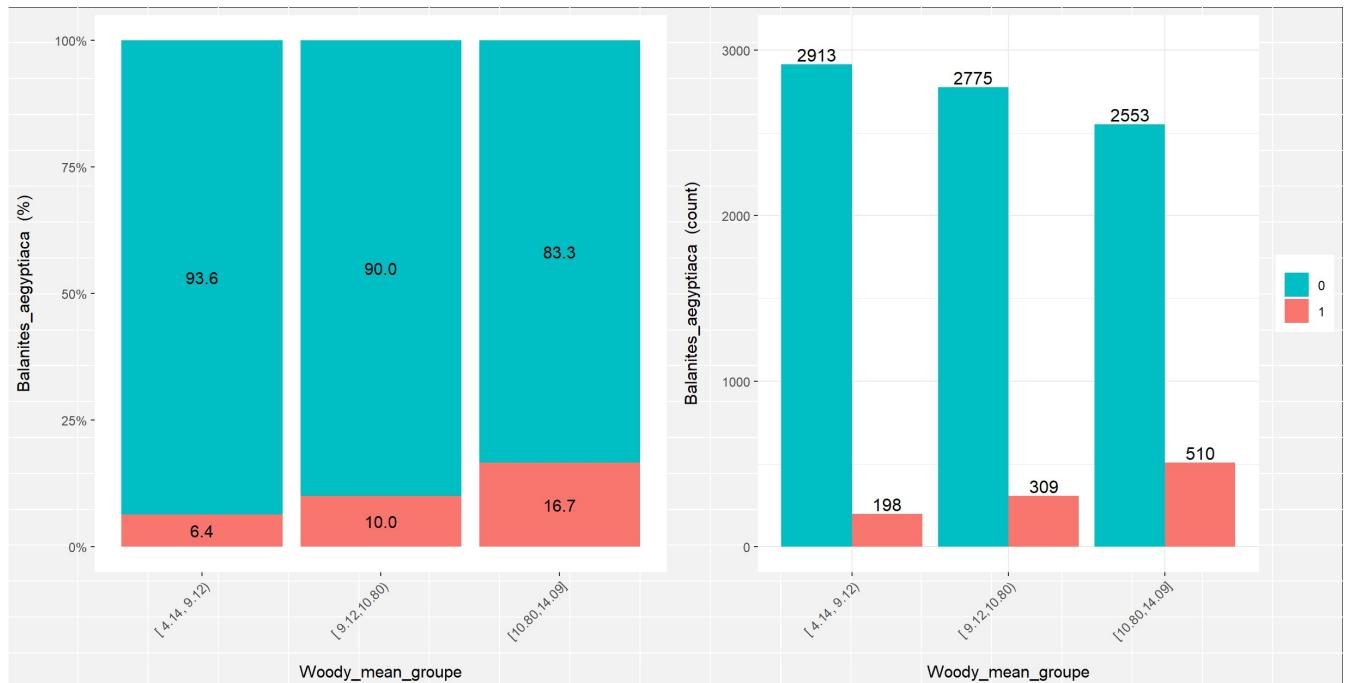


FIGURE 4.38 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le AET (regroupé en 3 classes)

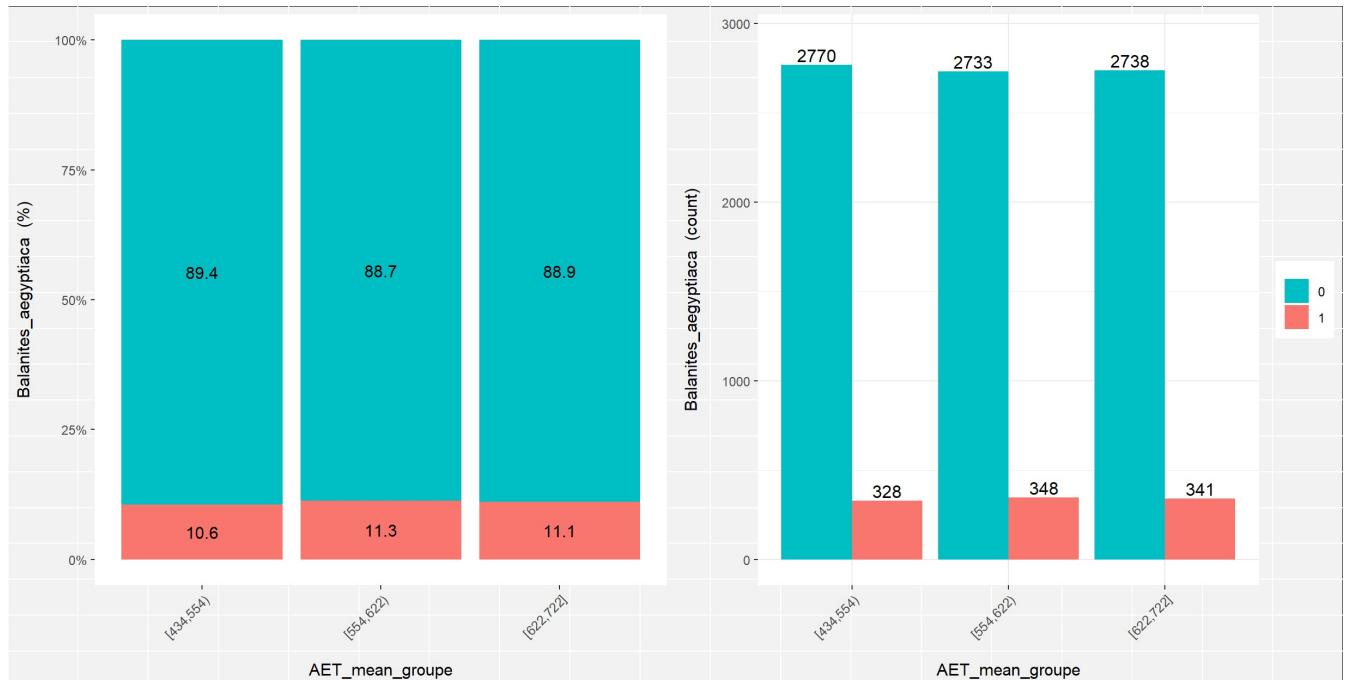


FIGURE 4.39 – Probabilité de présence de *Balanites aegyptiaca* suivant le type de sol

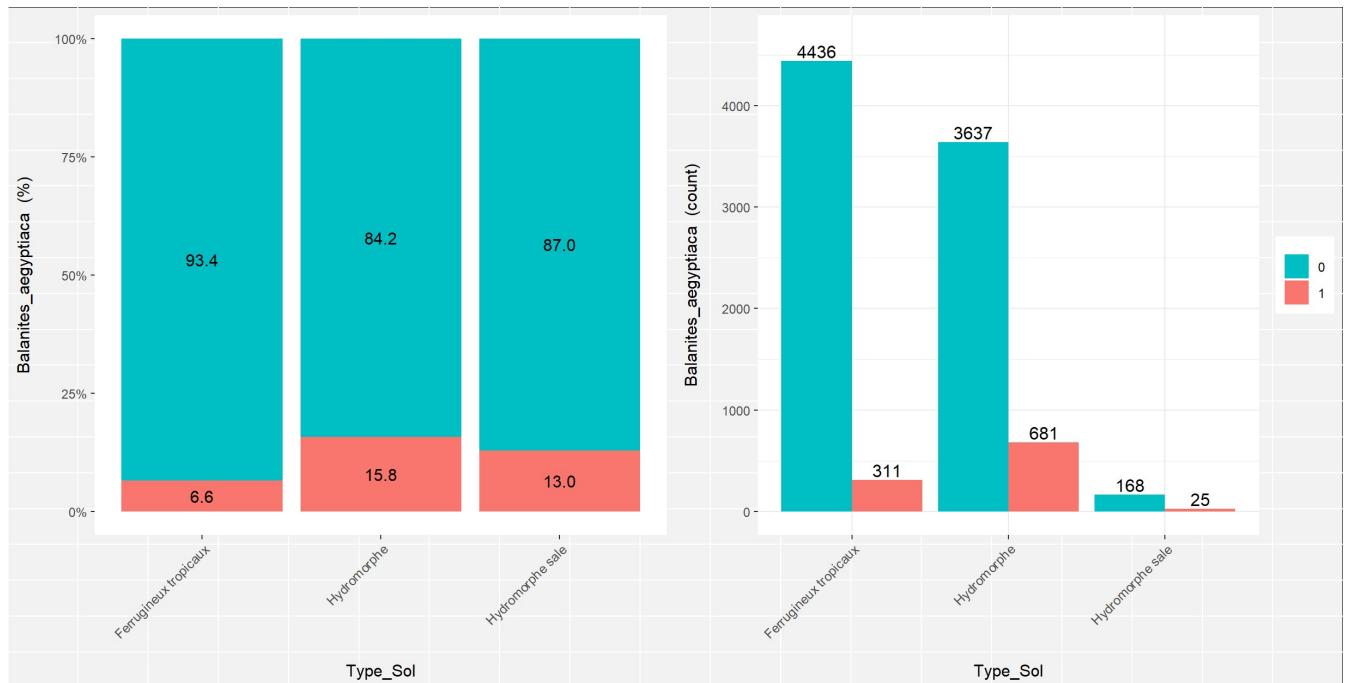


FIGURE 4.40 – Distribution de *Adansonia digitata* suivant la zone 1

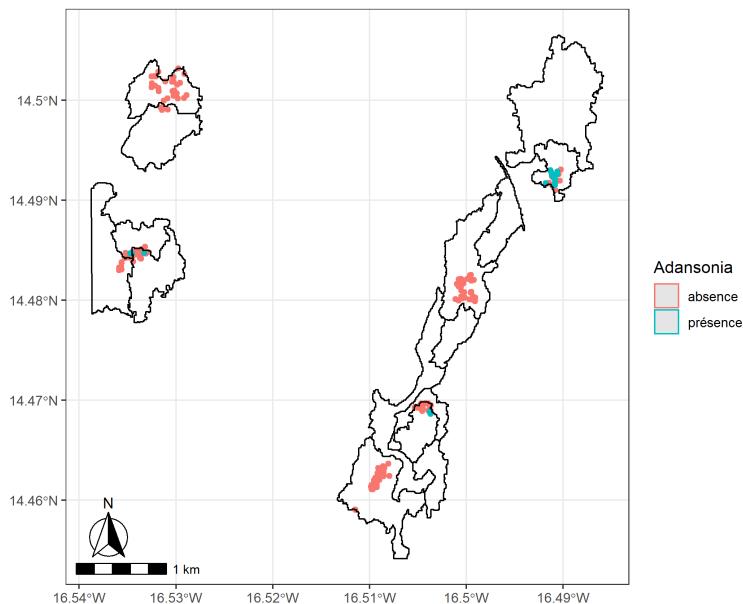


FIGURE 4.41 – Distribution de *Adansonia digitata* suivant la zone 2

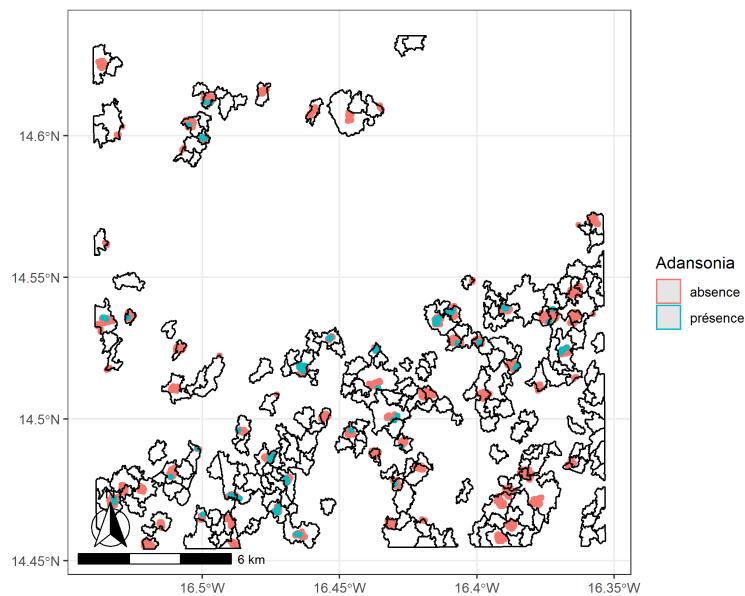


FIGURE 4.42 – Distribution de *Adansonia digitata* suivant la zone 3

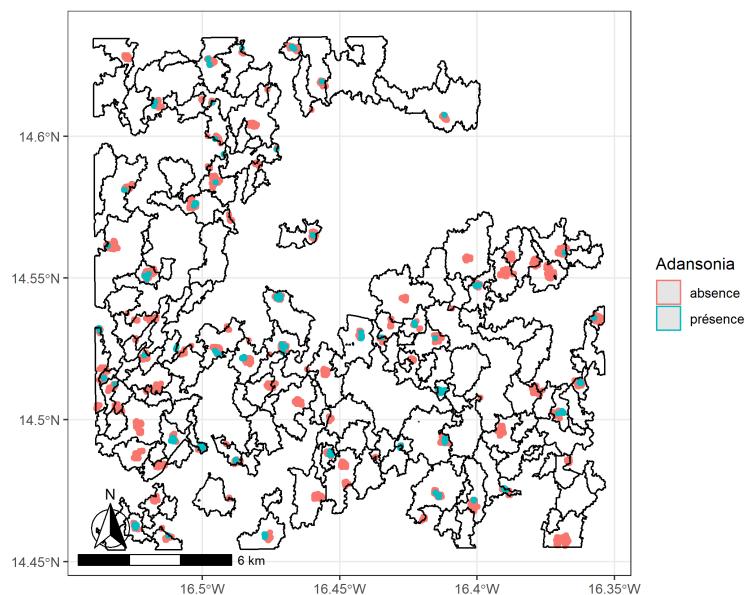
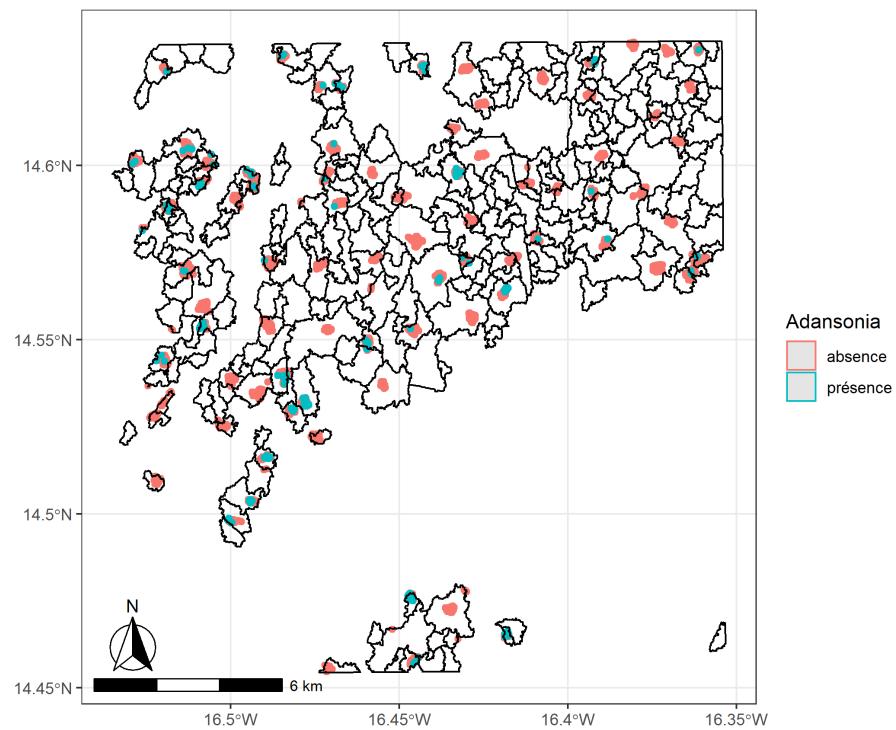


FIGURE 4.43 – Distribution de *Adansonia digitata* suivant la zone 4



II.5 Acacia nilotica

FIGURE 4.44 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* dans les différentes zones

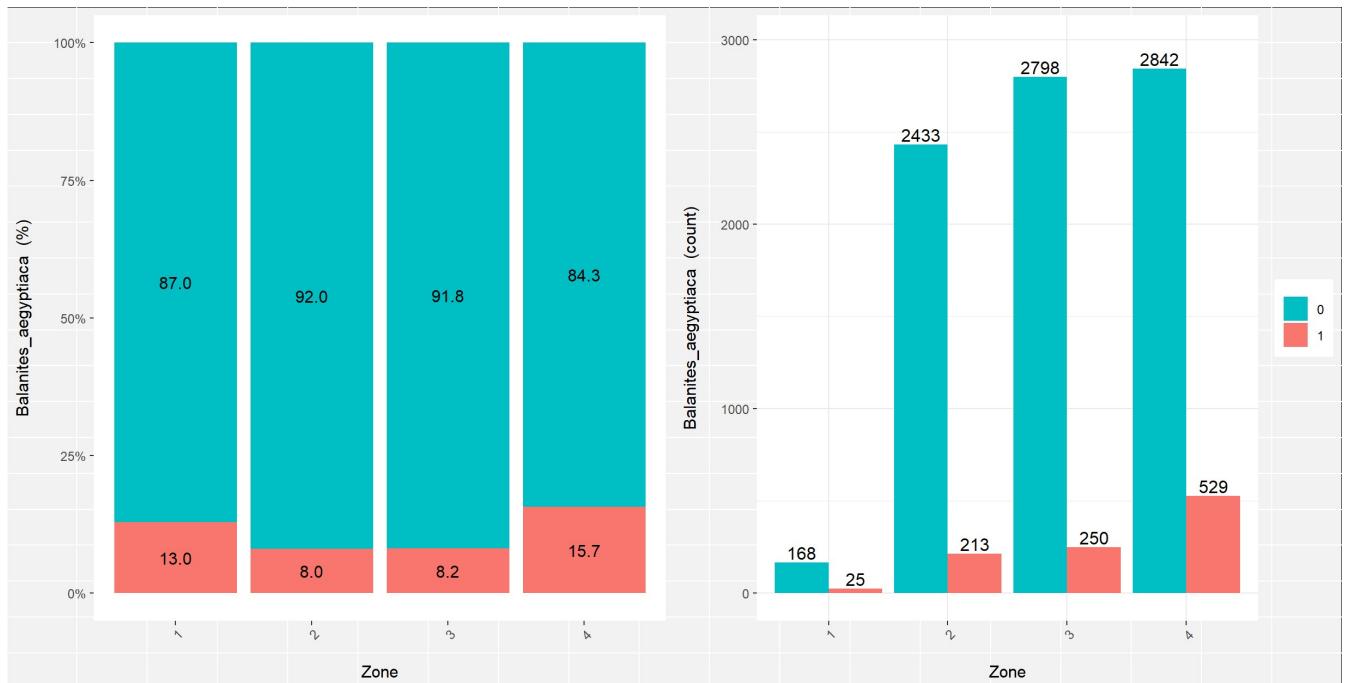


FIGURE 4.45 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* suivant l'indice de végétation (regroupé en 3 classes)

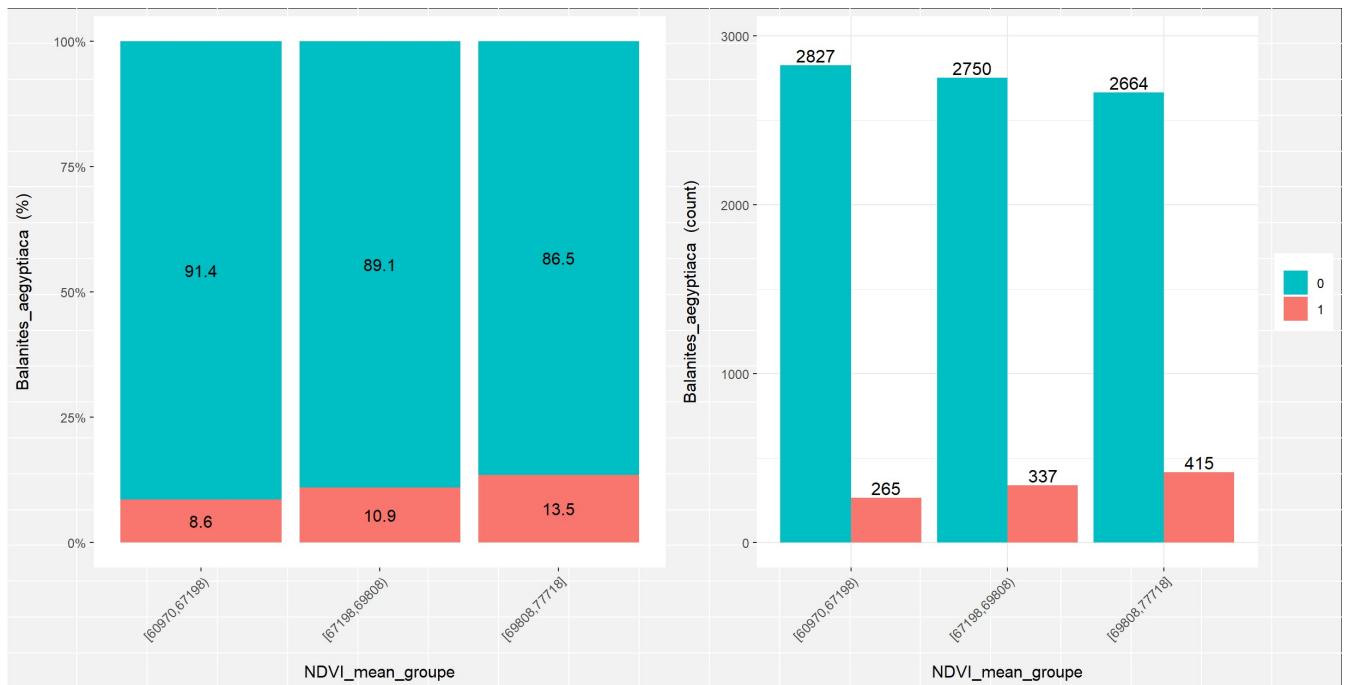


FIGURE 4.46 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* suivant le Slope (regroupé en 3 classes)

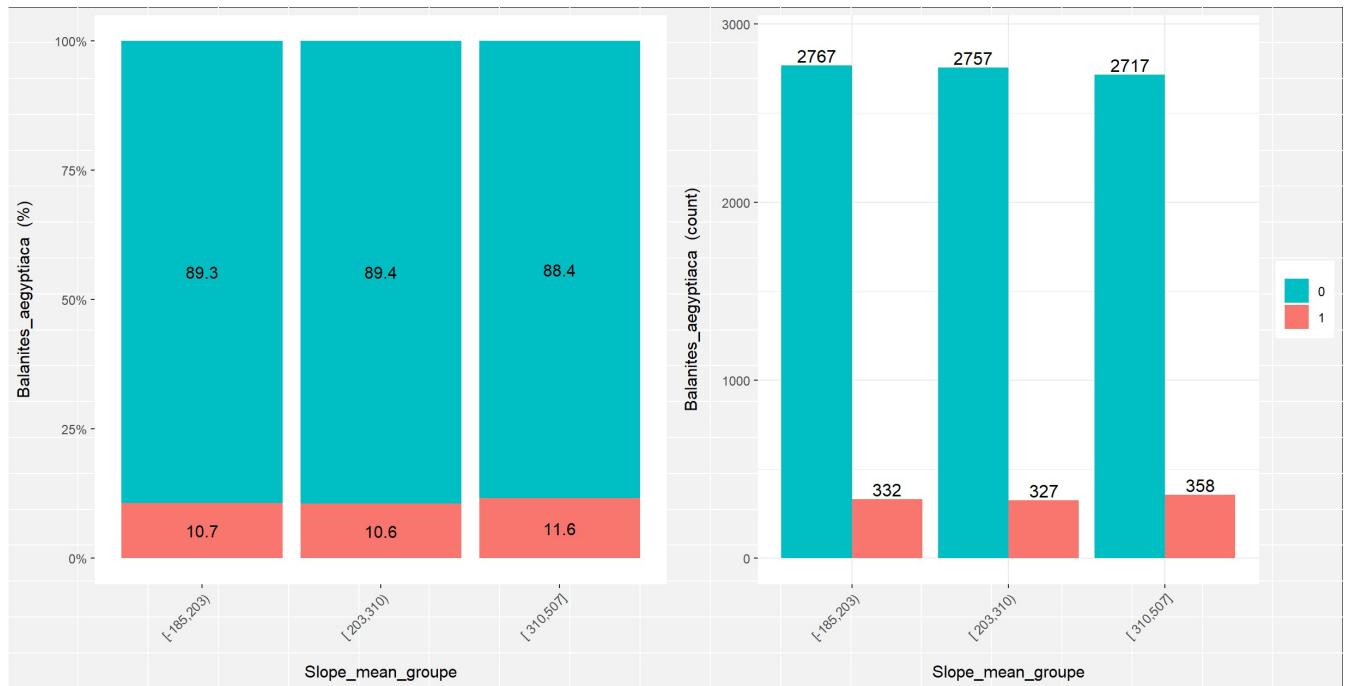


FIGURE 4.47 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* suivant le Woody (regroupé en 3 classes)

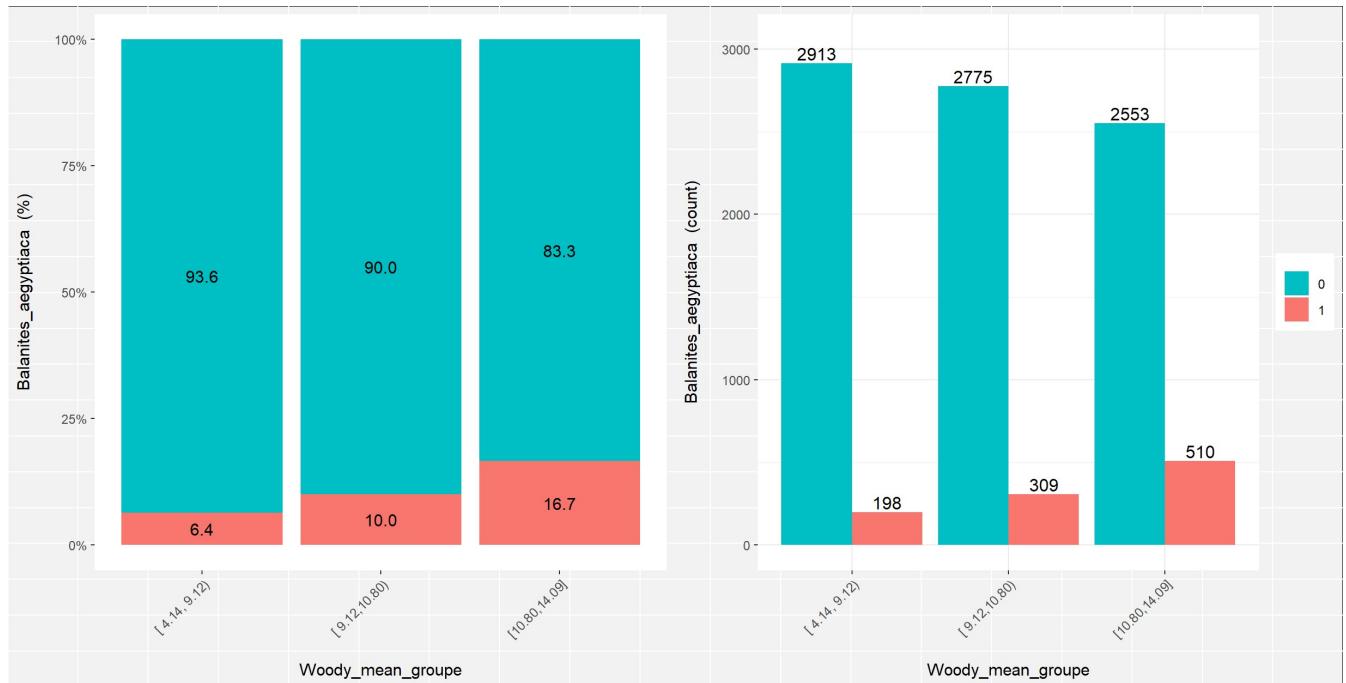


FIGURE 4.48 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* suivant le AET (regroupé en 3 classes)

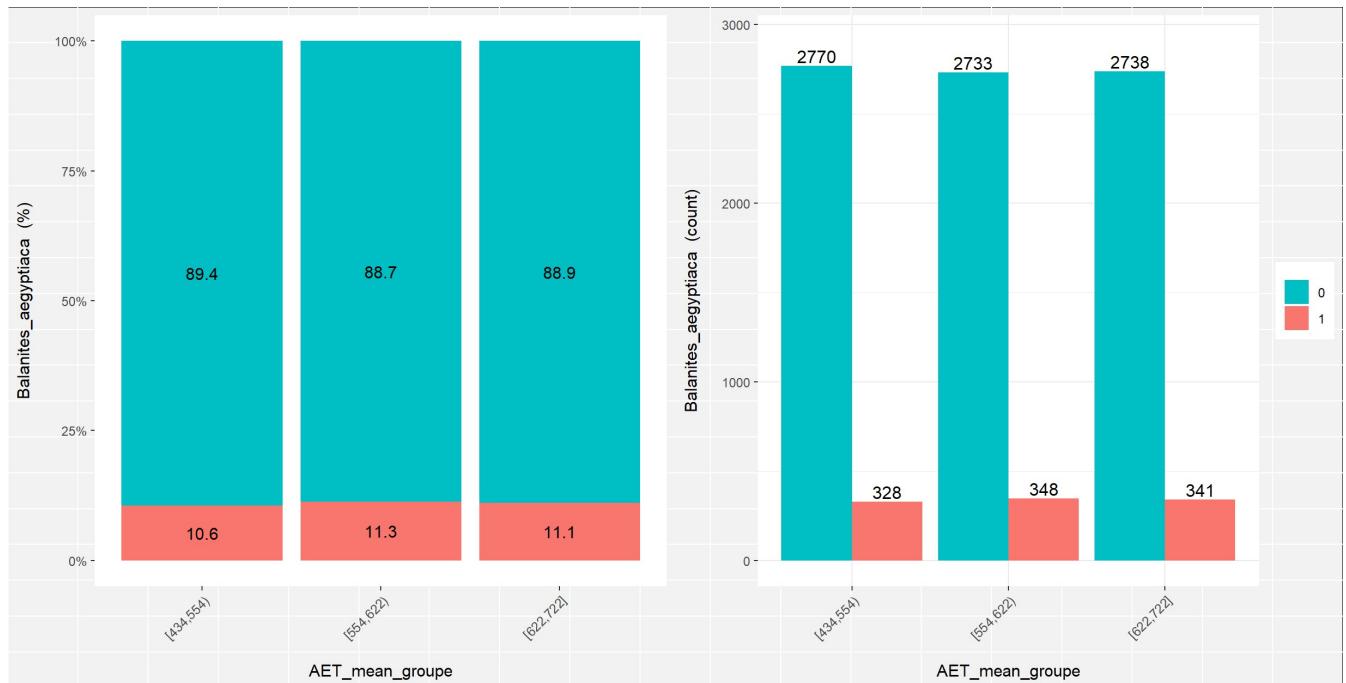


FIGURE 4.49 – Probabilité de présence de *Acacia nilotica* suivant le type de sol

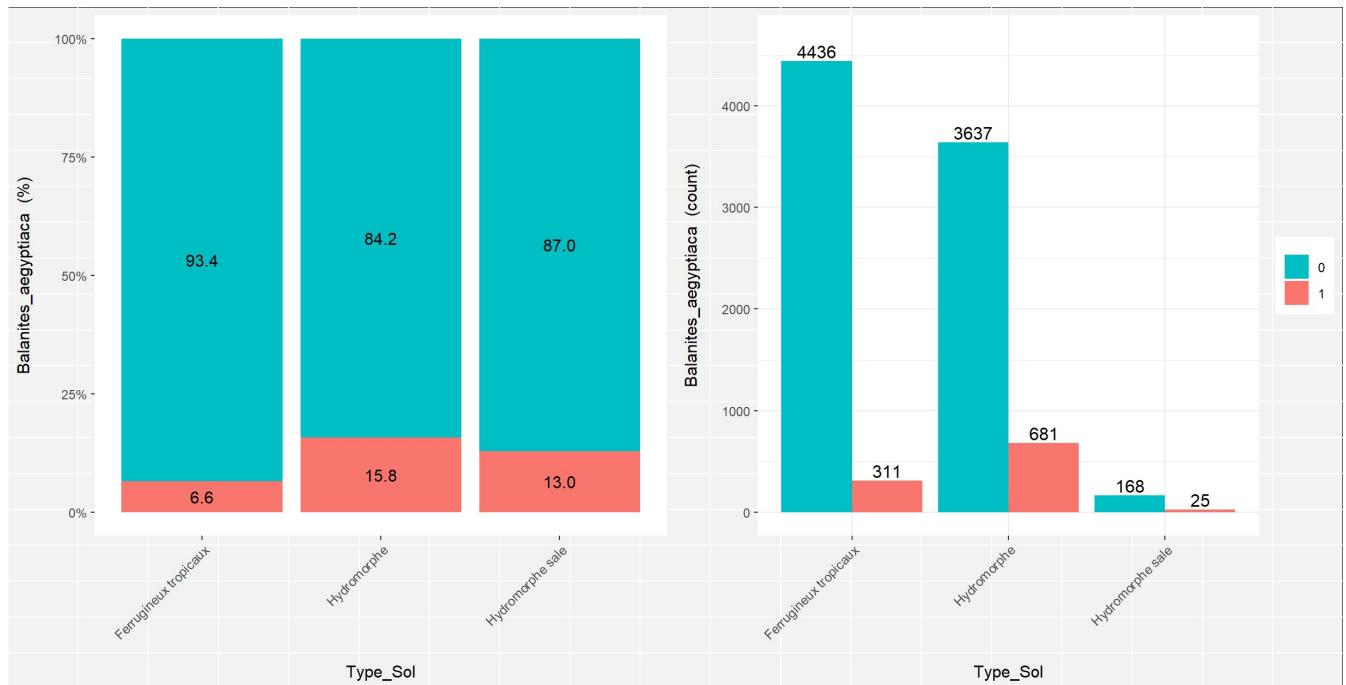


FIGURE 4.50 – Distribution de *Acacia nilotica* suivant la zone 1

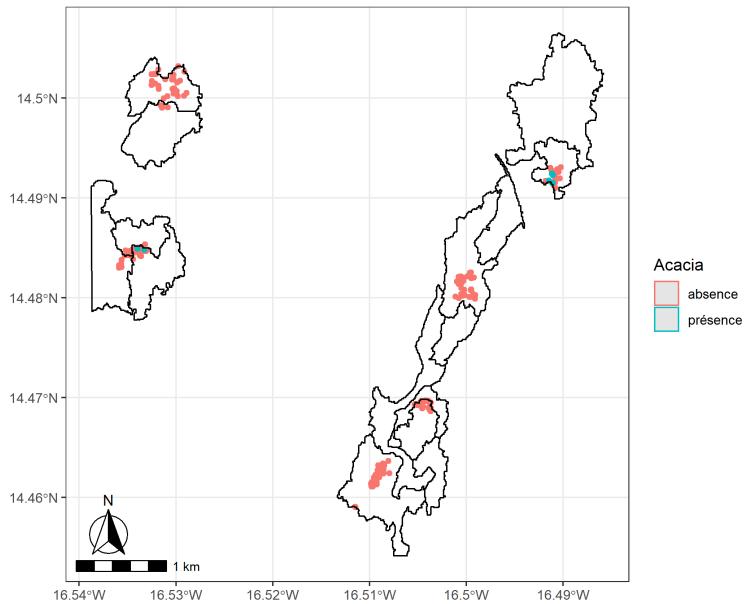


FIGURE 4.51 – Distribution de *Acacia nilotica* suivant la zone 2

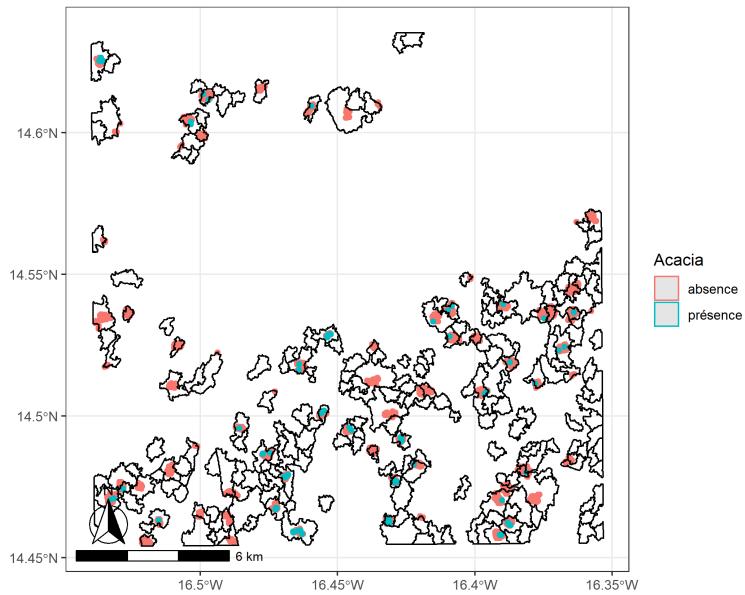


FIGURE 4.52 – Distribution de *Acacia nilotica* suivant la zone 3

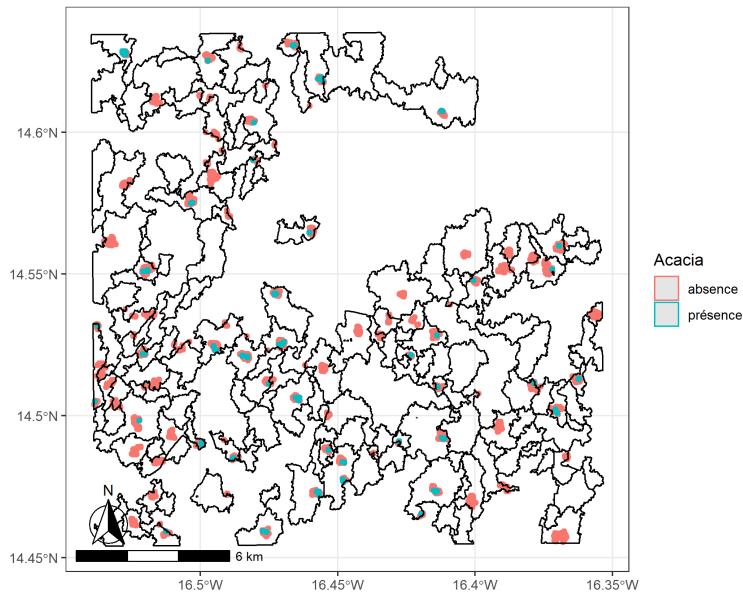
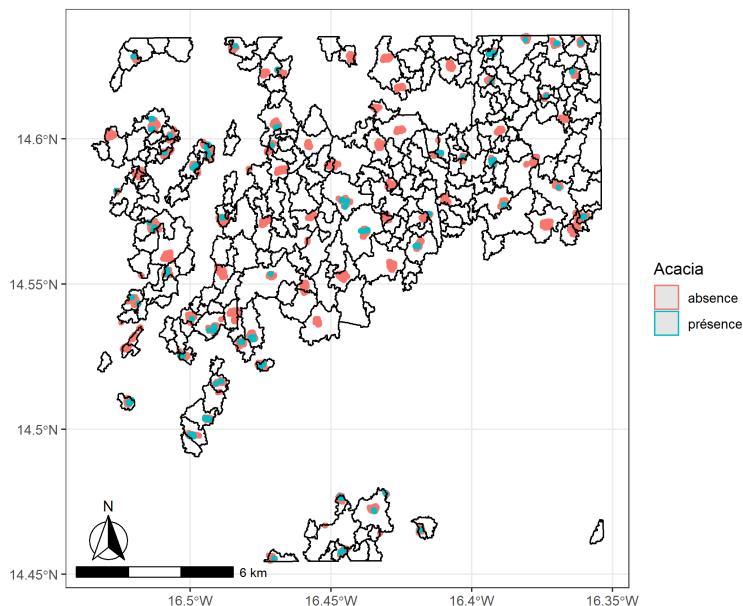


FIGURE 4.53 – Distribution de *Acacia nilotica* suivant la zone 4



Autocorrélation spatiale

L'autocorrélation mesure la corrélation d'une variable avec elle-même, lorsque les observations sont considérées avec un décalage dans le temps (autocorrélation temporelle) ou dans l'espace (autocorrélation spatiale). On définit l'autocorrélation spatiale comme la corrélation, positive ou négative, d'une variable avec elle-même du fait de la localisation spatiale des observations.

D'un point de vue statistique, de nombreuses analyses (analyse des corrélations, régressions linéaires, etc.) reposent sur l'hypothèse d'indépendance des variables. Lorsqu'une variable est spatialement autocorrélée, l'hypothèse d'indépendance n'est plus respectée, remettant ainsi en cause la validité des hypothèses sur la base desquelles ces analyses sont menées. D'autre part, l'analyse de l'autocorrélation spatiale permet une analyse quantifiée de la structure spatiale du phénomène étudié(présence/absence d'une espèce dans notre étude). En présence d'autocorrélation spatiale, on observe que la valeur d'une variable pour une observation est liée aux valeurs de cette même variable pour les observations voisines.

- l'autocorrélation spatiale est positive lorsque des valeurs similaires de la variable à étudier se regroupent géographiquement ;
- l'autocorrélation spatiale est négative lorsque des valeurs dissemblables de la variable à étudier se regroupent géographiquement : des lieux proches sont plus différents que des lieux éloignés ;
- en l'absence d'autocorrélation spatiale, on peut considérer que la répartition spatiale des observations est aléatoire.

Lorsque la variable d'intérêt n'est pas continue, mais catégorielle(Présence(P ou 1) ou Absence(A ou 0)), on mesure le degré d'association locale grâce à une analyse des statistiques des join count (ZHUKOV 2010).

On observe :

- une autocorrélation spatiale positive si le nombre de liaisons Présence-Absence est significativement inférieur à ce que l'on aurait obtenu à partir d'une répartition spatiale aléatoire ;
- une autocorrélation spatiale négative si le nombre de liaisons Présence-Absence est significativement supérieur à ce que l'on aurait obtenu à partir d'une répartition spatiale aléatoire ;
- aucune autocorrélation spatiale si le nombre de liaisons Présence-Absence est approximativement identique à ce que l'on aurait obtenu à partir d'une répartition spatiale aléa-

toire.

S'il y a n observations, n_p observations de présence et $n_a = n - n_p$ observations d'absence, la probabilité de présence de l'espèce est : $P_p = \frac{n_p}{n}$ et sa probabilité d'absence est : $P_a = 1 - P_p$. En l'absence d'autocorrélation spatiale, les probabilités de présence et d'absence dans deux polygones voisins sont $P_{pp} = P_p P_p = P_p^2$ et $P_{aa} = (1 - P_a)(1 - P_a) = (1 - P_p)^2$.

La probabilité que l'espèce soit présente ou absente dans l'un des deux polygones est $P_{pa} = P_p(1 - P_p) + P_p(1 - P_p) = 2P_p(1 - P_p)$.

Sous l'hypothèse d'une répartition spatiale aléatoire des observations, $\frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij}$ mesure le nombre de liaisons existantes, on peut écrire :

$$E[pp] = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} P_p^2 \quad (5.1)$$

$$E[aa] = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} (1 - P_p)^2 \quad (5.2)$$

$$E[pa] = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} 2P_p(1 - P_p) \quad (5.3)$$

Si l'on désigne par $y_i = 1$ lorsque l'espèce est présente et par $y_i = 0$ dans le cas contraire , les contre-parties empiriques (valeurs observées) de ces espérances mathématiques peuvent s'écrire :

$$pp = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} y_i y_j \quad (5.4)$$

$$aa = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} (1 - y_i)(1 - y_j) \quad (5.5)$$

$$pa = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j w_{ij} (y_i - y_j)^2 \quad (5.6)$$

Dans ce cas, la statistique de test permettant d'évaluer la significativité de l'autocorrélation spatiale repose sur l'hypothèse qu'en l'absence d'autocorrélation spatiale, les statistiques de join count (pp , aa et pa) suivent une loi normale. Nous écrivons alors :

$$\frac{pa - E[pa]}{\sqrt{var(pa)}} \text{ suit } N(0, 1) \quad (5.7)$$

$$\frac{pp - E[pp]}{\sqrt{var(pp)}} \text{ suit } N(0, 1) \quad (5.8)$$

$$\frac{aa - E[aa]}{\sqrt{var(aa)}} \text{ suit } N(0, 1) \quad (5.9)$$

I AUTOCORRÉLATION SPATIALE DES ESPÈCES DANS LA ZONE D'ÉTUDE

I.1 *Faidherbia albida*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1914.80	1566.58	79.87	38.96
1 :1	1121.90	809.58	64.65	38.84
1 :0	1592.30	2252.85	195.97	-47.19
Jtot	1592.30	2252.85	195.97	-47.19

I.2 *Balanites aegyptiaca*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	3777.00	3667.81	37.44	17.84
1 :1	180.40	55.81	8.26	43.36
1 :0	671.60	905.38	54.01	-31.81
Jtot	671.60	905.38	54.01	-31.81

I.3 *Anogeissus leiocarpus*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	3926.00	3854.39	30.63	12.94
1 :1	110.00	35.39	5.44	32.00
1 :0	593.00	739.21	41.60	-22.67
Jtot	593.00	739.21	41.60	-22.67

I.4 *Adansonia digitata*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	4146.30	4073.70	22.30	15.37
1 :1	95.50	17.70	2.84	46.20
1 :0	387.20	537.59	28.06	-28.39
Jtot	387.20	537.59	28.06	-28.39

I.5 *Acacia nilotica*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	4290.30	4278.86	14.23	3.03
1 :1	29.10	6.86	1.14	20.81
1 :0	309.60	343.27	16.56	-8.27
Jtot	309.60	343.27	16.56	-8.27

II AUTOCORRÉLATION SPATIALE DANS CHAQUE ZONE D'ÉTUDE

II.1 Faidherbia albida

TABLE 5.1 – *Joincount de Faidherbia albida dans la zone 1*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	61.90	56.66	1.57	4.18
1 :1	7.60	5.16	0.62	3.10
1 :0	27.00	34.69	2.63	-4.74

Source : Projets SERENA et LYSA(2017-2019), Calcul de l'auteur

TABLE 5.2 – *Joincount de Faidherbia albida dans la zone 2*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	526.60	441.65	23.05	17.70
1 :1	314.90	235.65	18.76	18.30
1 :0	481.50	645.71	56.11	-21.92

Source : Projets SERENA et LYSA(2017-2019), Calcul de l'auteur

TABLE 5.3 – *Joincount de Faidherbia albida dans la zone 3*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	584.30	459.02	26.31	24.43
1 :1	422.10	310.02	23.10	23.32
1 :0	517.60	754.96	66.01	-29.22

Source : Projets SERENA et LYSA(2017-2019), Calcul de l'auteur

TABLE 5.4 – *Joincount de Faidherbia albida dans la zone 4*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
Absence :Absence	739.30	614.73	29.15	23.07
Présence :Présence	379.70	264.23	22.21	24.50
Présence :Absence	566.50	806.55	69.39	-28.82

Source : Projets SERENA et LYSA(2017-2019), Calcul de l'auteur

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	74.40	73.06	1.06	1.30
1 :1	3.60	1.56	0.22	4.30
1 :0	18.50	21.88	1.45	-2.80
Jtot	18.50	21.88	1.45	-2.80

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1137.00	1118.54	8.33	6.40
1 :1	30.80	8.54	1.33	19.34
1 :0	155.20	195.93	10.97	-12.30
Jtot	155.20	195.93	10.97	-12.30

II.2 *Balanites aegyptiaca*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1256.30	1197.94	18.30	13.64
1 :1	110.80	41.44	5.64	29.19
1 :0	318.40	446.12	29.46	-23.53
Jtot	318.40	446.12	29.46	-23.53

II.3 *Anogeissus leiocarpus*

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	64.90	62.16	1.43	2.29
1 :1	6.60	3.66	0.47	4.28
1 :0	25.00	30.68	2.24	-3.80
Jtot	25.00	30.68	2.24	-3.80

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1094.90	1077.53	9.89	5.52
1 :1	34.70	12.53	1.89	16.11
1 :0	193.40	232.93	13.64	-10.71
Jtot	193.40	232.93	13.64	-10.71

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1291.80	1260.45	10.84	9.52
1 :1	43.30	12.45	1.90	22.37
1 :0	188.90	251.09	14.57	-16.29
Jtot	188.90	251.09	14.57	-16.29

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1308.50	1284.21	9.93	7.71
1 :1	35.50	10.21	1.58	20.11
1 :0	180.00	229.57	13.04	-13.73
Jtot	180.00	229.57	13.04	-13.73

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1473.10	1455.87	9.18	5.69
1 :1	24.00	8.37	1.32	13.61
1 :0	188.40	221.26	11.85	-9.55
Jtot	188.40	221.26	11.85	-9.55

II.4 Adansonia digitata

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	81.40	80.21	0.77	1.36
1 :1	2.90	0.71	0.11	6.65
1 :0	12.20	15.58	0.96	-3.45
Jtot	12.20	15.58	0.96	-3.45

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1198.90	1180.06	5.92	7.74
1 :1	24.60	4.06	0.66	25.37
1 :0	99.50	138.89	7.23	-14.64
Jtot	99.50	138.89	7.23	-14.64

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1353.40	1327.73	8.21	8.96
1 :1	36.30	6.73	1.07	28.62
1 :0	134.30	189.54	10.32	-17.20
Jtot	134.30	189.54	10.32	-17.20

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1513.30	1485.77	8.03	9.72
1 :1	31.70	6.27	1.00	25.39
1 :0	140.50	193.47	10.06	-16.70
Jtot	140.50	193.47	10.06	-16.70

II.5 Acacia nilotica

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	89.40	89.61	0.34	-0.36
1 :1	0.70	0.11	0.02	4.39
1 :0	6.40	6.78	0.37	-0.62
Jtot	6.40	6.78	0.37	-0.62

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1225.00	1222.95	4.18	1.00
1 :1	10.50	1.95	0.32	15.04
1 :0	87.50	98.11	4.83	-4.82
Jtot	87.50	98.11	4.83	-4.82

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1429.30	1425.62	4.20	1.79
1 :1	8.40	1.62	0.27	13.00
1 :0	86.30	96.75	4.74	-4.80
Jtot	86.30	96.75	4.74	-4.80

	Joincount	Expected	Variance	z-value
0 :0	1546.10	1540.73	5.87	2.22
1 :1	9.80	3.23	0.53	9.02
1 :0	129.60	141.54	6.95	-4.53
Jtot	129.60	141.54	6.95	-4.53

Modélisation de la distribution des principales espèces ligneuses

I MODÉLISATION DE LA DISTRIBUTION DES ESPÈCES À PARTIR DES VARIABLES BIOCLIMATIQUES

I.1 Les modèles

I.2 Réponse écologique des espèces étudiées

I.2.1 Réponse écologique de *Faidherbia albida*

I.2.2 Réponse écologique de *Balanites aegyptiaca*

I.2.3 Réponse écologique d'*Anogeissus leiocarpus*

I.2.4 Réponse écologique d'*Adansonia digitata*

I.2.5 Réponse écologique d'*Acacia nilotica*

II MODÉLISATION DE LA DISTRIBUTION DES ESPÈCES PAR AJOUT DES VARIABLES À HAUTE RÉSOLUTION

II.1 Les modèles

II.2 Réponse écologique des espèces étudiées

II.2.1 Réponse écologique de *Faidherbia albida*

II.2.2 Réponse écologique de *Balanites aegyptiaca*

II.2.3 Réponse écologique d'*Anogeissus leiocarpus*

II.2.4 Réponse écologique d'*Adansonia digitata*

II.2.5 Réponse écologique d'*Acacia nilotica*

II.3 Distributions futures des espèces

II.3.1 Distribution de *Faidherbia albida*

II.3.2 Distribution de *Balanites aegyptiaca*

II.3.3 Distribution d'*Anogeissus leiocarpus*

II.3.4 Distribution d'*Adansonia digitata*

II.3.5 Distribution d'*Acacia nilotica*

Le graphique donne une vue d'ensemble des variables environnementales c'est-à-dire la quantité de zéros, de valeurs manquantes(NA), de valeurs uniques, ainsi que le type de données. Ces informations sur les données peuvent conduire à un bon ou mauvais modèle.

- **q_zeros** : le nombre de zéros (**p_zeros** : en pourcentage) ;
- **q_na** : le nombre de valeurs manquantes (**p_na** : en pourcentage) ;
- **type** : facteur ou numérique ;
- **unique** : quantité de valeurs uniques.

Ces mesures sont importantes pour plusieurs raisons :

- **Zéros** : les variables avec beaucoup de zéros peuvent ne pas être utiles pour la modélisation, et dans certains cas, elles peuvent biaiser considérablement le modèle ;
- **NA** : plusieurs modèles excluent automatiquement les lignes avec NA (forêt aléatoire , par exemple). Par conséquent, le modèle final peut être biaisé en raison de plusieurs lignes manquantes en raison d'une seule variable. Par exemple, si les données ne contiennent qu'une variable sur 100 avec 90% des NA, le modèle s'entraînera avec seulement 10% des lignes originales ;
- **Type** : Certaines variables sont codées sous forme de nombres, mais ce sont des codes ou des catégories, et les modèles ne les gèrent pas de la même manière ;
- **Unique** : les variables factorielles / catégorielles avec un nombre élevé de valeurs différentes (30) ont tendance à sur-ajuster si les catégories sont peu représentatives (arbre de décision , par exemple).

TABLE 6.1 – Add caption

Code	Variables	Unité
BIO1	température moyenne annuelle	°C
BIO2	plage diurne moyenne (moyenne mensuelle (temp max - temp min))	°C
BIO3	isotherme (BIO2 / BIO7) (* 100)	
BIO4	saisonalité de la température (écart-type * 100)	°C
BIO5	température max du plus chaud Mois	°C
BIO6	Température minimale du mois le plus froid	°C
BIO7	Plage annuelle de température (BIO5-BIO6)	°C
BIO8	Température moyenne du trimestre le plus humide	°C
BIO9	Température moyenne du trimestre le plus sec	°C
BIO10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	°C
BIO11	Température moyenne du trimestre le plus froid	°C
BIO12	Précipitations annuelles	mm
BIO13	Précipitation du mois le plus humide	mm
BIO14	Précipitation du mois le plus sec	mm
BIO15	Saisonalité des précipitations (coefficient de variation)	
BIO16	Précipitation du trimestre le plus humide	mm
BIO17	Précipitation du trimestre le plus sec	mm
BIO18	Précipitation du trimestre le plus chaud	mm
BIO19	Précipitation du trimestre le plus froid	mm

Troisième partie

Discussion

Bibliographie

Lois de probabilité usuelle

Cette annexe donne la fonction de densité, l'espérance mathématique, la variance, le coefficient d'asymétrie, le coefficient d'aplatissement normalisé et l'utilisation la plus répandue des distributions utilisées dans notre travail.

Plusieurs caractéristiques de la loi de distribution sont d'intérêt, nous nous attarderons sur quatre d'entre eux :

- l'espérance mathématiques $E[X]$, qui représente la moyenne pondérée des valeurs de X ;
- la variance σ^2 , qui symbolise la mesure de dispersion de X ;
- le coefficient d'asymétrie (ou skewness ou β_1 de Pearson) de formule $\gamma_1 = \frac{E[(X-E[X])^3]}{\sigma^3}$ qui correspond à la qualité de symétrie de la distribution de X ;
- le coefficient d'aplatissement normalisé (ou kurtosis ou β_2 de Pearson) de formule $\gamma_2 = \gamma'_2 - 3 = \frac{E[(X-E[X])^4]}{\sigma^4} - 3$ qui mesure le comportement des « queues » de la distribution de X .

Dans le cas continue, en définissant f la densité de X , nous avons les formules générales suivantes :

$$P_X(I) = \int_I f(x)dx$$

$$E[X] = \int_I x \cdot f(x)dx$$

$$var(X) = E[X^2] - (E[X])^2 = \int_I (x - E[X])^2 f(x)dx$$

Définitions

Notations

Tests statistiques

OK

OK

Analyse spatiale descriptive

Quelques démonstrations

FIGURE F.1 – ok

variable	q_zeros	p_zeros	q_na	p_na ¹	q_inf	p_inf	type	unique
Comment_1	0	0.00	9236	99.76	0	0	factor	12
Comment_	0	0.00	8750	94.51	0	0	factor	157
Soil	0	0.00	2957	31.94	0	0	factor	17
ID_GPS	601	6.49	0	0.00	0	0	numeric	3415
Species	0	0.00	0	0.00	0	0	factor	63
Author	0	0.00	0	0.00	0	0	factor	3
FX_AREA	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	293
NDVI_mean	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	299
NDVI_std	425	4.59	0	0.00	0	0	numeric	286
AET_mean	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	288
AET_std	351	3.79	0	0.00	0	0	numeric	283
Woody_mean	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	291
Slope_mean	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	299
Slope_std	168	1.81	0	0.00	0	0	numeric	293
Placette	0	0.00	0	0.00	0	0	factor	299
Type_Sol	0	0.00	0	0.00	0	0	factor	3
Zone	0	0.00	0	0.00	0	0	numeric	4

¹en %, du vert(pas de valeur manquante) au rouge(trop de valeurs manquantes)

Source : Projets SERENA et LYSA(2017-2019), Calcul de l'auteur

FIGURE F.2 – ok

Species	Effectif	Pourcentage ⁷
<i>Faidherbia albida</i>	3872	41.82
<i>Balanites aegyptiaca</i>	1017	10.99
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	810	8.75
<i>Adansonia digitata</i>	573	6.19
<i>Acacia nilotica</i>	357	3.86
<i>Azadirachta indica</i>	272	2.94
<i>Diospiros mespiliformis</i>	272	2.94
<i>Borassus aethiopum</i>	248	2.68
<i>Piliostigma reticulatum</i>	225	2.43
<i>Bauhinia rufescens</i>	215	2.32
<i>Ziziphus mauritiana</i>	215	2.32
<i>Sclerocarya birrea</i>	153	1.65
<i>Tamarindus indica</i>	152	1.64
<i>Celtis integrifolia</i>	148	1.60
<i>Acacia seyal</i>	107	1.16
<i>Prosopis juliflora</i>	107	1.16
<i>Acacia raddiana</i>	77	0.83
<i>Cordyla pinnata</i>	57	0.62
<i>Mitragyna inermis</i>	50	0.54
<i>Gardenia ternifolia</i>	40	0.43
<i>Anacardium occidentale</i>	33	0.36
<i>Combretum glutinosum</i>	31	0.33
<i>Guiera senegalensis</i>	27	0.29
<i>Eucalyptus sp</i>	24	0.26
<i>Mangifera indica</i>	14	0.15
<i>Acacia macrostachya</i>	12	0.13
<i>Acacia sieberiana</i>	11	0.12
<i>Combretum micranthum</i>	11	0.12
<i>Jatropha curcas</i>	10	0.11
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	10	0.11
<i>Securidaca longipedunculata</i>	9	0.10
<i>Ziziphus micronata</i>	8	0.09
<i>Dichrostachys glomerata</i>	7	0.08
<i>Ceiba pentandra</i>	6	0.06
<i>Ficus platyphylla</i>	6	0.06
<i>Parkinsonia aculeata</i>	6	0.06
<i>Ficus vogelii</i>	5	0.05
<i>Parkia biglobosa</i>	5	0.05
<i>Aphania senegalensis</i>	4	0.04
<i>Detarium senegalensis</i>	4	0.04
<i>Ficus gnaphalocarpa</i>	4	0.04
<i>Hyphaene thebaica</i>	4	0.04
<i>Morus mesozygia</i>	4	0.04
<i>Prosopis africana</i>	4	0.04
<i>Acacia senegal</i>	3	0.03
<i>Citrus limon</i>	3	0.03
<i>Commiphora africana</i>	3	0.03
<i>Ficus thonningii</i>	3	0.03
<i>Adenium obesum</i>	2	0.02
<i>Elaeis guineensis</i>	2	0.02
<i>Sterculia setigera</i>	2	0.02
<i>Stereospermum kunthianum</i>	2	0.02
<i>Terminalia macroptera</i>	2	0.02
<i>Cassia siamea</i>	1	0.01
<i>Cassia sieberiana</i>	1	0.01
<i>Detarium microcarpum</i>	1	0.01
<i>Dichrostachys cinerea</i>	1	0.01
<i>Entada africana</i>	1	0.01
<i>Erythrina senegalensis</i>	1	0.01
<i>Ficus iteophylla</i>	1	0.01
<i>Lawsonia inermis</i>	1	0.01
<i>Moringa oleifera</i>	1	0.01
<i>Neocarya macrophylla</i>	1	0.01
Total	9258	100.00

⁷ en %, du rouge(très faible) au vert(élévé)

Source : Calcul de l'auteur

Table des matières

I CADRE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE	2
1 Présentation de la zone d'étude, de la source des données	3
I Zone d'étude	3
I.1 Cartographie du gradient d'hétérogénéité du paysage	4
II Sources des données	7
II.1 Données environnementales	7
II.2 Données bioclimatiques : WorldClim - Données climatiques mondiales	9
2 Revue de la littérature	10
I Modèles de distribution des espèces	10
II Caractéristiques générales des espèces étudiées.	10
II.1 Faidherbia albida	10
II.2 Balanites aegyptiaca	10
II.3 Anogeissus leiocarpus	10
II.4 Adansonia digitata	10
II.5 Acacia nilotica	10
III Les variables à haute résolution spatiale	10
IV Changements climatiques au Sénégal	10
3 Approche méthodologique et outils d'analyse	11
II Analyse spatiale et modélisation de la distribution des espèces	12
4 Analyse spatiale descriptive	13
I Analyse spatiale descriptive dans la zone d'étude	13
II Analyse spatiale descriptive des espèces étudiées	15
II.1 Faidherbia albida	15
II.2 Balanites aegyptiaca	22
II.3 Anogeissus leiocarpus	27
II.4 Adansonia digitata	31
II.5 Acacia nilotica	37

5 Autocorrélation spatiale	41
I Autocorrélation spatiale des espèces dans la zone d'étude	43
I.1 Faidherbia albida	43
I.2 Balanites aegyptiaca	43
I.3 Anogeissus leiocarpus	43
I.4 Adansonia digitata	43
I.5 Acacia nilotica	43
II Autocorrélation spatiale dans chaque zone d'étude	44
II.1 Faidherbia albida	44
II.2 Balanites aegyptiaca	45
II.3 Anogeissus leiocarpus	45
II.4 Adansonia digitata	46
II.5 Acacia nilotica	47
6 Modélisation de la distribution des principales espèces ligneuses	48
I Modélisation de la distribution des espèces à partir des variables bioclimatiques	48
I.1 Les modèles	48
I.2 Réponse écologique des espèces étudiées	48
II Modélisation de la distribution des espèces par ajout des variables à haute résolution	48
II.1 Les modèles	48
II.2 Réponse écologique des espèces étudiées	48
II.3 Distributions futures des espèces	49
III Discussion	51
A Lois de probabilité usuelle	ii
B Définitions	iii
C Notations	iv
D Tests statistiques	v
E Analyse spatiale descriptive	vi
F Quelques démonstrations	vii