



UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER



AgroParisTech  
Talents d'une planète soutenable



Formation de master – Université de Montpellier et AgroParisTech

Master Biodiversité Ecologie Evolution  
**Parcours Biodiversité végétale et Gestion des Ecosystèmes Tropicaux**

---

Stage de première année de Master

THEME

**Diversité des ligneux dans les dépressions topographiques dans  
le nord Sénégal.**

Effectué du 01 avril au 30 juin 2021

**CIRAD Chem. de Baillarguet, 34980 Montferrier-sur-Lez/ Pôle Pastoralisme  
et Zones Sèches (ISRA-LNERV) Dakar (Sénégal)**

Réalisé par **MADINGOU Mady Parfait Noé**

Dirigé par : **TAUGOURDEAU Simon** (CIRAD – UMR Selmet, Dakar) ;

**DENDONCKER Morgane** (Université catholique de Louvain, Belgique) ;

**BAZAN Samantha** (CIRAD – UMR Selmet, Montpellier).

## TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	1
2. MATERIEL ET METHODE .....	3
2.1. Présentation de la zone d'étude.....	3
2.2. Echantillonnage et collecte de données.....	4
2.2.1. Cartographie des dépressions .....	4
2.2.2. Typologie des dépressions .....	4
2.2.3. Echantillonnage .....	5
2.2.4. Collecte de données : inventaires de terrain.....	6
2.3. Analyse de données.....	9
2.3.1. La fréquence de présence des espèces .....	9
2.3.2. Abondance relative des espèces.....	9
2.3.3. La richesse spécifique.....	10
2.3.4. Mesures de la diversité alpha .....	10
2.3.5. Caractéristique des peuplements : densité réelle ou densité observée .....	11
2.4. Traitements statistiques de données .....	11
3. RESULTATS.....	13
3.1. Composition floristique des dépressions .....	13
3.2. Fréquence de présence des espèces .....	13
3.3. Variabilité de la composition spécifique des dépressions .....	16
3.4. Abondance des espèces dans les catégories de dépressions .....	18
3.5. Richesse spécifique, diversité et densité des individus adultes .....	22
3.6. Influence des facteurs du milieu sur la richesse spécifique, la diversité et la densité ....	25
4. DISCUSSION .....	27
4.1. Composition spécifique et fréquence de présence des espèces .....	27
4.2. Abondance des espèces et mesures de diversité.....	27
4.3. Influence des facteurs environnementaux sur les caractéristiques de la végétation ligneuse.....	28
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	30
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	31
ANNEXES .....	33

## 1. INTRODUCTION

La région bioclimatique du Sahel s'étend, sur près de 6000 km, des côtes Atlantiques de la Mauritanie et du Sénégal, à l'Ouest, à celles de la Mer Rouge au Soudan à l'Est et sur une largeur de 400 à 600 km des confins sud du Sahara aux savanes, forêts claires et parcs agraires de la zone soudanienne (Le Houerou, 1989). L'économie de cette région est basée sur l'activité pastorale qui se fait sur des parcours de grandes superficies et utilise le fourrage naturel comme aliment de bétail. Dans ce système d'élevage, la végétation ligneuse joue un rôle important. Cela du fait que la strate herbacée est annuelle (présente en saison pluvieuse et absente en saison sèche), tandis que la strate ligneuse est pérenne et les espèces ligneuses sont utilisées comme fourrage pour le bétail (Bakhoum 2013). Les ressources ligneuses rendent également de multiples services (bois énergie, bois de constructions, pharmacopée, nourriture etc.) aux populations humaines environnantes (Ndong et al. 2015).

Au cours des années 1970 et 1980, le Sahel a été vigoureusement touché par une série de sécheresses les plus violentes du vingtième siècle, avec une diminution de près de 50% de la moyenne des précipitations (Nicholson 2001; 2013). Ces sécheresses ont suscité des inquiétudes quant à la survie et à l'avenir des pâturages sahéliens. Depuis lors, de nombreuses études se sont intéressées à la dynamique à long terme de la végétation du Sahel. A ce sujet, la revue la littérature documente une controverse entre la thèse d'un Sahel souffrant d'une désertification généralisée (Ndiaye et al. 2014; Vincke, Diédhiou, et Grouzis 2010) et celle d'un Sahel reverdissant (Dardel et al. 2014; Stefanie M. Herrmann, Anyamba, et Tucker 2005).

Au Ferlo (la zone sylvo-pastorale sahélienne du Sénégal), des études récentes ont documenté d'une part la réduction de la densité des plantes ligneuses entre 1965 et 2008, avec une légère reprise ces dernières années (2008-2018) et d'autre part un changement de la composition spécifique et de la structure des peuplements (réduction du nombre d'arbres au profit des arbustes) entre les années pré et post sécheresses (Dendoncker et al. 2020). Par ailleurs ces auteurs ont également mis en évidence les effets significatifs des éléments topographiques (sommets, pentes et dépressions) sur la résilience de ces écosystèmes (Dendoncker et Vincke 2020). En effet, le relief du Ferlo est formé d'une alternance de dunes de sable éolien, mesurant 10-30 m de haut et 0,5-5 km de large. Ces dunes sont séparées par des plaines longitudinales de 1-5 km de large (Le Houerou, 1989). De plus de petites dépressions sont présentes aussi bien dans les plaines (interdunes) que dans les dunes, mais elles sont plus fréquentes et plus grandes dans les plaines, où elles forment des mares temporaires durant la saison des pluies. (Dendoncker et al. 2020; Dendoncker et Vincke 2020). Cette topographie locale influence fortement le bilan hydrique du sol et donc le développement de la végétation (Vincke, Diédhiou, et Grouzis 2010). La régénération, la densité

d'arbres et la richesse spécifique sont plus importantes dans les zones de dépressions que sur les pentes et sommets de dunes (Dendoncker et Vincke 2020).

Cette étude vise à caractériser la végétation ligneuse dans les dépressions topographiques d'une zone du Ferlo en termes de composition spécifique et de densité. Pour cela, deux objectifs spécifiques sont à distinguer. Dans un premier temps, il s'agira d'identifier et de cartographier les zones dépressions du Ferlo sur base d'images satellites à haute résolution. Cette cartographie permettra l'établissement d'une typologie de dépressions en fonction de leur superficie et de leur localisation sur dunes ou en plaines. Le second objectif est d'identifier les différences en termes de composition spécifique, diversité et de densité entre les différentes catégories de dépressions déterminées lors de la première étape à l'aide d'inventaires de terrain. Nous supposons que ces caractéristiques de la végétation sont différentes d'un type de dépression à un autre.

Le tableau ci-dessous présente le déroulement de nos activités.

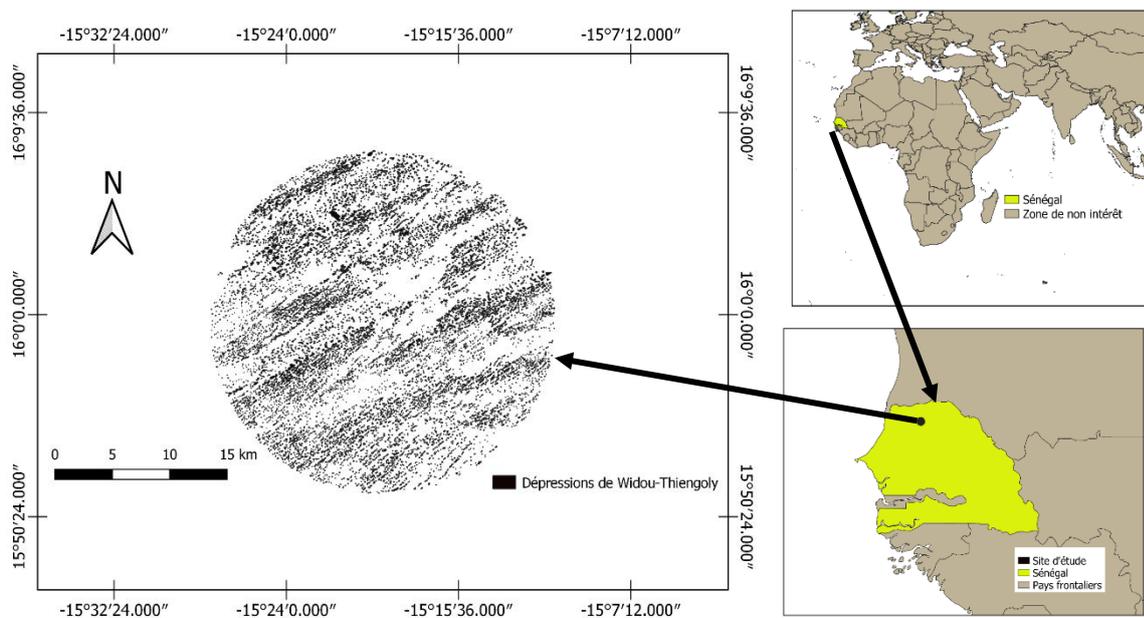
**Tableau 1** : chronogramme d'activités

Activités	Période					Lieux
	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	
Recherche bibliographique						Montpellier
Cartographie de dépressions						Montpellier
Collecte et traitements de données						Widou Thiengoly, Dakar (Sénégal)
Rédaction						Montpellier
Soutenance					26 ou 27	Montpellier

## 2. MATERIEL ET METHODE

### 2.1. Présentation de la zone d'étude

Notre étude a été réalisée dans la région du Ferlo, zone sylvo-pastorale du Sénégal, située dans la partie nord du pays. Le Ferlo est limité au Nord et à l'Est par le fleuve Senegal, à l'Ouest par le lac de Giers et au Sud par la vallée fossile du même nom. Plus précisément, nous avons travaillé dans la zone d'influence du forage de Widou Thiengoly (15,99° N, 15,32° W) au Ferlo (**figure 1**). Le climat est de type continental sahélien avec un régime de précipitations unimodal (les pluies surviennent entre juillet et septembre) caractérisé par une grande variabilité spatiale et temporelle (Nicholson 2013). Cette région a souffert, comme le reste du Sahel, d'une succession d'années très sèches entre 1970 et 1984, période souvent appelée « la grande sécheresse »: Entre 1940 et 2015, la zone d'étude a reçu une pluviométrie annuelle moyenne de 297,6 ( $\pm 87,5$ ) mm avec un minimum de 105 mm pendant la sécheresse de 1983 (Dendoncker et Vincke 2020).



**Figure 1:** Carte de la zone d'étude

Le relief majeur du Ferlo est composé d'une alternance entre les dunes de sable éolien et de grandes plaines de 1 à 5 km (Le Houérou 1989). De petites dépressions sont présentes aussi bien dans les plaines que dans les dunes, mais elles sont plus fréquentes et plus grandes dans les plaines, où elles forment des mares temporaires à la fin de la saison des pluies (Le Houérou 1989). Ces conditions édaphiques influencent fortement le bilan hydrique du sol et donc le développement de la végétation. La végétation prédominante est constituée de steppes arbustives et de prairies ouvertes (Bille et Poupon, 1972 ; Valenza et Diallo, 1972 cités par Vincke, Diédhiou, et Grouzis 2010) également appelées maquis épineux à Mimosaceae (Le Houérou 1989).

Nous avons focalisé notre échantillonnage dans une zone de 15 km de rayon. D'après [Dendoncker et Vincke 2020](#), la majorité du peuplement est occupée par trois espèces : *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. et *Calotropis procera* (Ait.) Ait. f. Loin derrière se trouvent les espèces secondaires comme *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. et *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* (Savi) Brenan sur les sommets, alors que dans les dépressions, on trouve souvent *Grewia bicolor* Juss. et *Acacia seyal* Del. La végétation est principalement utilisée à des fins pastorales. L'impact humain se limite aux effets du pâturage et de l'abrutissement, ainsi qu'à la collecte de bois de chauffe, principalement pour des usages locaux.

## **2.2. Echantillonnage et collecte de données**

Notre méthodologie a consisté en quatre étapes comme décrites ci-dessous :

### **2.2.1. Cartographie des dépressions**

Les buts de cette étape, était de cartographier les dépressions de la zone d'étude afin de déterminer leur position et leur surface (voir point 3. échantillonnage). Initialement, nous devions utiliser une méthode de segmentation automatique sur base des images SPOT-6 à haute résolution (1,30 m). Malheureusement les contraintes liées au temps (initiation à la méthode) nous ont conduits à opter pour une numérisation manuelle à partir des images Google Satellite hybrid de la zone. Ces images nous permettaient de bien distinguer les dépressions à d'autres occupations du sol. Nous avons considéré comme étant des dépressions, les zones de forte agrégation de la végétation ligneuse ([Vincke, Diédhiou, et Grouzis 2010](#); [Dendoncker et al. 2020](#); [Dendoncker et Vincke 2020](#)) où la canopée est plus ou moins continue. Deux agrégats séparés de plus 50 m ont été considérés comme étant deux dépressions différentes. La numérisation s'est faite avec le logiciel QGIS v 3.14 et a porté sur une zone circulaire de 15 km de rayon autour du forage de Widou Thiengoly, quadrillée avec des mailles de 1 km de côté afin de faciliter le travail de cartographie. L'ensemble des dépressions à l'intérieur de chaque maille ont été digitalisées sous la forme de polygones. Au total plus de 10000 polygones ont été numérisés et labellisés.

### **2.2.2. Typologie des dépressions**

Notre objectif étant de vérifier si certaines caractéristiques de ces dépressions (superficie, localisation au sein des éléments de relief) pouvaient influencer la diversité et/ou la densité de la végétation ligneuse dans les dépressions, nous avons donc utilisé ces facteurs écologiques pour catégoriser les dépressions.

En effet après la numérisation, la superficie de chaque polygone a été calculée depuis la table d'attributs. Les polygones de moins 0,1 ha de surface ont été écartés car ces surfaces ont été considérées comme trop petites pour être des dépressions.

Nous avons défini trois catégories de dépressions en fonction de la surface :

- Les petites dépressions (P), surface comprise [0,1 ha ; 1 ha [
- Les moyennes dépressions (M), surface comprise [1 ha ; 3,3 ha]
- Les grandes dépressions (G), surface < 3,3 ha.

Par ailleurs nous avons superposé sur le shapefile des polygones délimités, un shapefile de la zone renseignant sur le relief (dunes et plaines/interdunes). Cette information nous a permis de distinguer les dépressions situées sur les dunes (D) et celles situées sur les interdunes (ID). Ainsi nous avons fait d'autres catégories en combinant l'information sur le relief et la surface de dépressions. A savoir :

- Petites dépressions situées sur les dunes : P\_D ;
- Petites dépressions situées sur les interdunes : P\_ID ;
- Moyennes dépressions situées sur les dunes : M\_D ;
- Moyennes dépressions situées sur les interdunes : M\_ID ;
- Grandes dépressions situées sur les interdunes : G\_ID.
- La catégorie « grandes dépressions sur dunes » n'existe pas car toutes les grandes dépressions sont localisées dans les plaines.

Enfin la revue de la littérature ([Le Houérou 1989](#)) rapporte qu'en saison de pluies dans certaines dépressions (celles des interdunes), se forment des mares temporaires qui persistent jusqu'au début de la saison sèche. Cette information a également été utilisée pour discriminer les dépressions avec mares (plus profondes) et les dépressions sans mares (moins profondes). Sur le terrain la distinction était faite à partir l'observation des empreintes laissées par les eaux stagnantes. Signalons que la typologie des dépressions selon la présence de mare a été faite post-terrain et que l'échantillonnage n'a pas été basé sur ce critère.

### 2.2.3. Echantillonnage

Un tirage aléatoire de 75 dépressions (16 grandes, 27 moyennes et 32 petites) a été effectué pour être échantillonnées. Faute de temps, les mesures ont été faites sur 63 dépressions. Le **tableau 2** présente le nombre de dépressions échantillonnées dans chaque catégorie. Les coordonnées du centre de chaque dépression ainsi que le projet QGIS (les polygones) ont été respectivement

importés dans des GPS et dans un smartphone (via l'application QField) afin de faciliter la navigation sur le terrain.

**Tableau 2:** Typologie de dépressions

Catégories	Facteurs écologiques						
	Surface			Profondeur		Relief	
	Grande	Moyenne	Petite	Avec mare	Sans mare	Interdune	Dune
Nombre	7	24	32	13	50	44	19

#### 2.2.4. Collecte de données : inventaires de terrain

##### ❖ Composition spécifique de dépressions et abondance des espèces

Dans chacune des dépressions inventoriées, un transect virtuel passant par le centre et joignant les deux extrémités les plus éloignées a été tracé (à l'aide de l'application QField installée dans un smartphone). Puis nous avons parcouru la dépression deux fois (aller-retour) le long du transect. La première observation (aller) a permis d'identifier les espèces présentes dans la dépression. Le retour était ensuite dédié à affecter un coefficient d'abondance de Braun-Blanquet à chaque espèce enregistrée.

Concernant l'identification botanique des espèces, nous avons préparé une liste des espèces potentiellement présentes dans la zone, en nous basant sur les travaux de (Dendoncker et Vincke 2020). Cette liste comprenant les noms scientifiques et les noms vernaculaires « *poular* » a été importée dans un formulaire KoBocollect. KoBocollect est une application utilisée dans les campagnes d'inventaire botanique pour préparer les fiches d'inventaire, enregistrer les données de



**Figure 2:** Préparation de l'herbier.

terrain, en ligne ou hors ligne, et sauvegarder les données. Les données ainsi sauvegardés peuvent être récupérer et partager avec plus chercheurs.

Pour les espèces connues mais ne figurant pas sur cette liste, un protocole strict a été suivi. En effet nous prenions des photos de l'espèce (feuilles, tige, fleurs, fruit ou graine si possible) et récoltions trois échantillons d'herbier (**figure 2**) pour une vérification ultérieure à Dakar ou à Montpellier (livre et herbier). L'identification des plantes sur le terrain s'est faite avec l'aide d'un éleveur de la zone ([Ahmadou Sow](#)) qui maîtrise la flore locale. Pour l'écriture des noms scientifiques des espèces, nous avons choisi la nomenclature de la Flore du Sénégal de Berhaut, (1967) et Arbonnier, (2019).

La quantification des espèces a été évaluée selon l'échelle d'abondance-dominance de Braun Blanquet 1952 c'est-à-dire basé sur le pourcentage de recouvrement de l'espèce (proportion de la surface occupée par l'espèce) ([Westhoff et Van Der Maarel 1978](#)). L'échelle des coefficients d'abondance est la suivante :

- 5 : pour les espèces occupant plus de 75 % de la surface totale de la dépression
- 4 : pour les espèces occupant entre 50 et 75 % de la surface totale de la dépression
- 3 : pour les espèces occupant entre 25 et 50 % de la surface totale de la dépression
- 2 : pour les espèces occupant entre 5 et 25 % de la surface totale de la dépression
- 1: pour les espèces abondantes mais dont le degré d'occupation est inférieur à 5 % de la surface totale de la dépression
- + : pour les espèces simplement présentes (un seul individu).

#### ❖ **Mesure de densité**

L'approche la plus précise pour déterminer cette caractéristique du milieu consiste à un dénombrement exhaustif de tous les arbres présents dans le peuplement. Cependant, il est rare de trouver dans la nature une communauté végétale qui se prête à un comptage total sans une dépense d'énergie et de ressources peu pratique. Des approches classiques, regroupées sous l'appellation méthodes directes pour estimer la densité des ligneux, consistent à installer des placettes représentatives du peuplement puis à dénombrer tous les arbres au sein de chaque placette. Connaissant leur surface, on déduit le nombre de tiges par unité de surface. Et une moyenne est calculée pour l'ensemble du peuplement. Bien que ces méthodes fournissent des estimations de densité généralement précises, elles peuvent dans certains cas s'avérer très onéreuses et fastidieuses (peuplement très dense, vaste surface à échantillonner, inexactitudes causées par les décisions relatives aux limites) ([Beasom et Haucke 1975](#)) ou aboutir à des estimations erronées (sous-estimation) lorsque le peuplement est moins dense ([Sparks 2002](#)). Pour pallier au problème

d'efficacité des techniques d'échantillonnages avec placettes, nombreuses méthodes (Pcq, Ppi, K<sup>ème</sup> individu le plus proche) basées sur l'écartement moyen entre les arbres ont été mis au point. Ces méthodes largement documentées sont citées ici à titre indicatif. Dans le cadre de ce travail nous avons retenu la méthode des placettes circulaires de taille fixe.

Les mesures de densité ont été faites dans des placettes circulaires de taille uniforme (14 m de rayon, ce qui correspond à 1/16 d'ha). Ces placettes ont été délimitées à l'aide d'un Vertex IV. Selon la catégorie de superficie de la dépression, de 1 à 3 placettes ont été inventoriées : 3 zones de comptage ont été choisies dans les grandes dépressions ; 2 dans les dépressions de superficie moyenne et une dans les petites dépressions. Dans le cas où une seule placette était réalisée, elle était positionnée de façon à représenter la moyenne de la densité des ligneux présents. Dans le cas où 2-3 placettes étaient réalisées, leur localisation devait représenter la variabilité des densités présentes au sein de la dépression (exemple : 1 placette dans un endroit à densité faible et 1 placette dans un endroit à densité forte).

Le choix d'une zone de comptage dans les petites dépressions a été fait en supposant une répartition régulière à cause de la restriction spatiale. Et ce point était systématiquement placé au centre de la dépression lorsque l'occupation spatiale de la végétation le permettait. Au cas contraire (centre de la dépression vide ou occupé par une mare temporaire) ce point a été déplacé au début ou à la fin de la dépression.

Ensuite, nous avons procédé à la délimitation de la placette. Pour ce faire, nous avons calibré le vertex (minimum deux fois dans la journée et à la température ambiante) à une distance de 10 m en utilisant un ruban métrique. Cela afin d'obtenir une mesure exacte du rayon de la placette avec la méthode de l'ultrason. Puis nous avons placé le transpondeur T3 au centre de la zone de comptage (point de comptage).

Enfin, tous les individus adultes (ligneux de plus de 1,30 m d'hauteur) situés à un rayon de 14 m du point de comptage ont été dénombrés en distinguant buissons, arbustes et arbres. Afin d'éviter les erreurs de comptage, une craie forestière a été utilisée pour marquer les individus déjà comptabilisés (**figure 3**). A la fin du comptage les coordonnées du centre de la placette ont été enregistrées. Au total 113 placettes ont été échantillonnées dans les trois types de dépressions.



**Figure 3:** comptage et marquage des individus

### 2.3. Analyse de données

Pour vérifier notre hypothèse de départ, les caractéristiques de la végétation (composition, diversité et densité) sont différentes d'un type de dépression à un autre, nous nous sommes intéressés à certain paramètres permettant de caractériser les peuplements ligneux. La description et l'intérêt du choix de ces paramètres sont donnés ci-dessous.

#### 2.3.1. La fréquence de présence des espèces

Correspond à la proportion de dépressions (en %) dans lesquelles une espèce a été enregistrée. Elle renseigne sur la distribution de l'espèce et est donnée par la formule suivante :

$$F = \frac{Ndep_i}{Ndep} * 100$$

F = fréquence de présence exprimée en pourcentage (%); Ndep<sub>i</sub> = nombre dépressions où l'on retrouve l'espèce i et Ndep = nombre total de dépressions.

#### 2.3.2. Abondance relative des espèces

Quantité relative au nombre d'individus d'une espèce donnée, par rapport au nombre total d'individus de toutes espèces confondues.

$$Ab.r_i = \frac{C.I.recov_i}{\sum_{i=1}^S C.I.recov_i} * 100$$

Avec : Ab.r<sub>i</sub> = abondance relative de l'espèce i ; C.I.recov<sub>i</sub> = Centre de l'intervalle de recouvrement du coefficient de Braun Blanquet de l'espèce i ; S = nombre d'espèces présentes dans la dépression.

### 2.3.3. La richesse spécifique

Correspond au nombre d'espèces présentes dans une dépression (Mille et Louppe 2015).

### 2.3.4. Mesures de la diversité alpha

Bien qu'étant un élément essentiel de la description d'un peuplement, la richesse spécifique ne suffit pas à la caractériser de façon suffisante. En effet, la diversité spécifique (d'une communauté ou d'un ensemble de communautés) résulte de la combinaison de trois aspects: la richesse spécifique, l'équitabilité et la composition. Ainsi, l'étude quantitative de la diversité spécifique peut être réalisée par diverses approches fondées sur l'usage d'indices de diversité, qui résument en un seul nombre la diversité du relevé (Mille et Louppe 2015). Deux indices ont été utilisés pour l'évaluer dans les différentes dépressions :

#### ❖ L'indice d'équitabilité de Pielou

Il renseigne sur la distribution d'abondance des espèces dans le peuplement. L'équitabilité varie entre 0 et 1. Elle tend vers 0 lorsque la quasi-totalité des effectifs correspond à une seule espèce du peuplement et tend vers 1 lorsque chacune des espèces est représentée par un nombre semblable d'individus (Ramade 2012).

$$E = \frac{H'}{\log_2 S}$$

Avec :  $H'$  = indice de Shannon ;  $S$  = richesse spécifique.

#### ❖ L'indice de Shannon-Wiener

Il évalue simultanément la richesse spécifique et l'équitabilité des espèces (régularité de la distribution des fréquences des espèces) (Mille et Louppe 2015). Cet indice convient bien à l'étude comparative des peuplements parce qu'il est relativement indépendant de la taille de l'échantillon (Ramade 2012). Il varie généralement entre 0 et 4,5. Cet indice est minimal si tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce, il est maximal quand tous les individus sont répartis d'une façon égale sur toutes les espèces.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i * \log_2 p_i$$

Avec :  $p_i = (n_i / N)$  ;  $n_i$  = nombre d'individus d'espèce  $i$  ;  $N$  = nombre total d'individus recensés dans la dépression ;  $S$  = nombre total d'espèces recensées dans la dépression.

### 2.3.5. Caractéristique des peuplements : densité réelle ou densité observée

La densité correspond au nombre d'individus d'un certain âge (taille) par unité de surface. Elle est donnée par la formule suivante :

$$D = \frac{N}{S}$$

Avec D = densité observée (individus/ha) ; N = nombre d'individus dénombré dans la placette et S = la surface de la placette soit 0,061544 ha (placette circulaire de 14 m de rayon).

## 2.4. Traitements statistiques de données

Nous avons effectué une description complète du cortège floristique de chaque dépression. La fréquence de présence de chaque espèce a été calculée par catégorie de dépression et pour l'ensemble de l'échantillon. Cela pour apprécier la distribution des espèces.

Sur la base de données d'abondance relative des espèces présentes dans chaque dépression, nous avons calculé la valeur moyenne pour chaque espèce par catégorie de dépression puis pour l'ensemble de l'échantillon. Les tests d'ANOVA non paramétriques (Kruskal-Wallis) ont été réalisés pour observer les variations d'abondance entre les espèces. Toutes les différences significatives signalées se rapportent à une p-valeur < 0,05.

Pour étudier l'influence des facteurs écologiques (superficie, relief et présence de mare) sur la composition spécifique, nous avons représenté la distribution des espèces des 63 dépressions dans un espace multidimensionnel grâce à une analyse factorielle de correspondances (AFC). Cette analyse permet d'individualiser de façon plus objective et statistiquement fiable les groupements végétaux (Ramade 2012). L'objectif étant de résumer et de visualiser, avec le minimum de perte d'informations, dans un espace à deux dimensions un ensemble de points appartenant à un espace à N dimensions (Husson et Cornillon 2018). A cet effet, nous avons conçu une matrice de présence-absence avec en ligne les dépressions (codes identifiants) et en colonne les codes des noms latins des espèces (deux premières lettre du genre et la première lettre de l'espèce). Cette matrice donne, au croisement des lignes et des colonnes, la présence (codée en 1) ou l'absence (codée en 0) de l'espèce. Une Metric Multidimensional Scaling (MDS), avec la même matrice de présence-absence, a été faite en complément de l'AFC afin de mieux visualiser les ressemblances floristiques au sein de chaque catégorie à partir de la superficie. Pour cela nous avons récupéré les coordonnées des dépressions sur chaque composante de la MDS puis nous les avons projetées séparément en fonction de la superficie réelle de chaque dépression. L'AFC et le MDS ont été respectivement réalisées avec la fonction `dudi.coa` du package `ade4` et la fonction `metaMDS` du package `vegan` du logiciel R.

Enfin nous avons réalisé une analyse en composantes principale (ACP) avec les données de richesse spécifique, des indices de diversité (Shannon et Pielou), la densité, le nombre d'individus par espèce et la surface. L'intérêt étant de caractériser les dépressions ou catégories de dépressions par ces variables et d'illustrer les liaisons entre variables. Pour ce faire nous avons créé un tableau croisant les dépressions (lignes) et toutes les variables quantitatives citées en amont (en colonnes). Les variables ont été centrées et réduites (ACP normée) pour accorder la même importance à chacune d'elles (Husson et Cornillon 2018). Cette analyse a été réalisée avec la fonction PCA du package FactoMineR du logiciel R.

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Composition floristique des dépressions

Au total 63 dépressions ont été inventoriées. Cet inventaire a permis de recenser 24 espèces ligneuses appartenant à 19 genres et à 15 familles botaniques. A l'échelle des catégories selon la surface des dépressions, ce cortège floristique se répartit comme suit : 20 espèces ligneuses appartenant à 16 genres et à 16 familles botaniques dans les grandes dépressions (surface < 3,3ha); 23 espèces ligneuses appartenant à 18 genres et à 14 familles botaniques dans les dépressions de surface moyenne ( $1\text{ha} \leq \text{surface} \leq 3,3\text{ha}$ ) et enfin 19 espèces ligneuses appartenant à 14 genres et à 14 familles botaniques dans les petites dépressions (surface < 1ha).

#### 3.2. Fréquence de présence des espèces

Le **tableau 1** présente les fréquences de présence des espèces (c'est-à-dire la proportion de dépressions dans lesquelles l'espèce était présente). En considérant l'ensemble de l'échantillon (63 dépressions), les espèces les plus fréquentes sont : *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir., *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. et *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* (Savi) Brenan. Ces 4 espèces ont été rencontrées dans plus de la moitié des dépressions inventoriées. Les espèces secondaires (présentes dans 25 à 50% des dépressions) sont : *Acacia senegal* (L.) Will., *Adansonia digitata* L., *Acacia seyal* Del., *Feretia apodanthera* Del., *Grewia bicolor* Juss., *Ziziphus mauritiana* Lam. Les espèces présentes dans une dépression sont : *Adenium obesum* (Forssk.) Roem. & Schult., *Gymnosporia senegalensis* (Lam.) Loes. et *Sterculia setigera* Del.

A l'échelle de catégories on constate : pour les catégories selon la superficie, les espèces les plus fréquentes (présentes dans plus de 50% des dépressions) sont *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Acacia tortilis*, *Feretia apodanthera*, *Sclerocarya birrea*, *Acacia seyal*, *Adansonia digitata* et *Ziziphus mauritiana* dans les grandes dépressions (au nombre de 7) ; *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Acacia tortilis* et *Sclerocarya birrea* dans les dépressions de surface moyenne (au nombre de 24) et *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* et *Sclerocarya birrea* dans les petites dépressions (au nombre de 32). Les espèces secondaires sont (présentes dans 25 à 50% des dépressions) : *Acacia senegal*, *Anogeissus leiocarpa* (DC.) Guil. & Perr., *Calotropis procera* (Ait.) Ait. f., *Combretum aculeatum* Vent., *Combretum glutinosum* Perr. ex DC. *Dalbergia melanoxylon* Guill. & Perr., *Loeseneriella africana* (Willd.) Wilczek, *Mitragyna inermis* (Willd.) Kuntze, *Stereospermum kunthianum* Cham. dans les grandes dépressions ; *Acacia senegal*, *Adansonia digitata*, *Acacia seyal*, *Grewia bicolor*, *Feretia apodanthera* et *Ziziphus mauritiana* dans les dépressions de surface moyenne ; *Acacia tortilis*, *Acacia seyal*, *Feretia apodanthera*, *Grewia bicolor* dans les petites dépressions. Par ailleurs on constate également que pour une même espèce, la fréquence

de présence est généralement plus importante dans les grandes dépressions que dans les petites. Autrement dit plus la surface de la dépression diminue plus la fréquence ou la présence des espèces diminue. Par exemple *Boscia senegalensis* est présent dans toutes les grandes dépressions par contre il n'est présent que dans la moitié de petites dépressions.

Pour les catégories selon la présence de mare temporaire, les espèces les plus fréquentes sont *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* et *Acacia tortilis* dans les dépressions où il y a formation de mares (au nombre de 13) et *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Acacia tortilis* et *Sclerocarya birrea* dans les dépressions où il ne se forme pas de mares temporaires (au nombre de 50). Les espèces secondaires sont : *Adansonia digitata*, *Feretia apodanthera*, *Sclerocarya birrea*, et *Ziziphus mauritiana* dans les dépressions avec mare ; *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Feretia apodanthera*, *Grewia bicolor* et *Ziziphus mauritiana*.

Pour les catégories selon le relief (dunes vs interdunes ou plaines), les espèces les plus fréquentes sont *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Acacia tortilis* et *Sclerocarya birrea* dans les dépressions situées dans les interdunes (au nombre de 19) ; *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* et *Sclerocarya birrea* dans les dépressions situées sur les dunes (au nombre de 44 dépressions). Les espèces secondaires sont : *Acacia senegal*, *Adansonia digitata*, *Acacia seyal*, *Feretia apodanthera*, *Grewia bicolor*, *Ziziphus mauritiana* dans les interdunes et *Acacia senegal*, *Adansonia digitata*, *Acacia tortilis*, *Adansonia digitata*, *Ziziphus mauritiana*. Par ailleurs, les seuls individus d'*Adenium obesum*, *Anogeissus leiocarpa*, *Dalbergia melanoxylon*, *Loeseneriella africana*, *Maytenus senegalensis*, *Mitragyna inermis*, et *Sterculia setigera* ont été rencontrés dans des dépressions interdunaires.

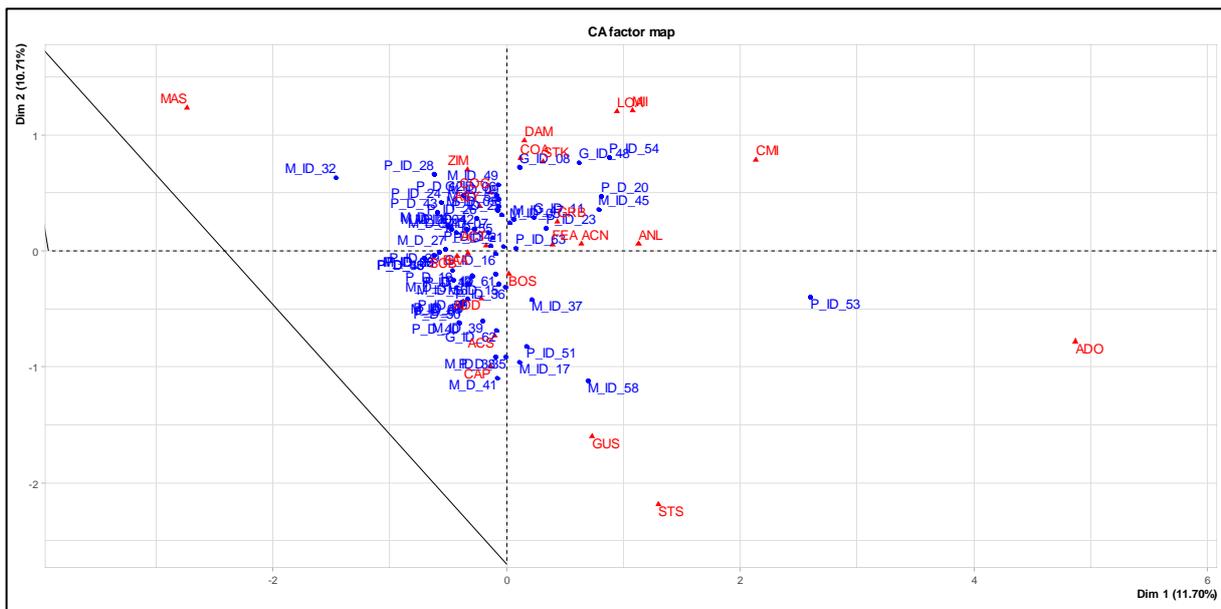
**Tableau 1:** fréquence de présence (%) des espèces par catégorie de dépressions et pour l'ensemble de l'échantillonnage. Les espèces sont présentées en acronyme.

Code espèces	Catégories de dépressions selon les facteurs environnementaux							Ensemble de dépressions
	surface			présence de mare		relief		
	Grande (≤3,3ha)	Moyenne (1ha≤ ≤3,3ha)	Petite (≤ 0,1ha)	Avec mare	Sans mare	Plaines	Dunes	
ACN	-	3,33	11,54	-	8	6,82	5,26	6,35
ACS	42,86	33,33	23,08	23,08	32	29,55	31,58	30,16
ACT	85,71	73,33	30,77	76,92	52	63,64	42,11	57,14
ADD	57,14	36,67	7,69	30,77	26	27,27	26,32	26,98
ADO	-	-	3,85	-	2	2,27	-	1,59
ANL	28,57	16,67	7,69	23,08	12	20,45	-	14,29
ASY	71,43	26,67	26,92	23,08	34	40,91	10,53	31,75
BAA	100	96,67	96,15	100	96	97,73	94,74	96,83
BOS	100	76,67	57,69	84,62	68	75	63,16	71,43
CAP	42,86	20	15,38	15,38	22	20,45	21,05	20,63
CMI	14,29	6,67	7,69	7,69	8	9,09	5,26	7,94
COA	28,57	13,33	7,69	23,08	10	15,91	15,79	12,7
COG	42,86	20	3,85	23,08	14	15,91	15,79	15,87
DAM	28,57	6,67	-	7,69	6	9,09	-	6,35
FEA	85,71	30	26,92	46,15	32	47,73	5,26	34,92
GRB	71,43	30	34,62	15,38	42	43,18	21,05	36,51
GUS	14,29	16,67	11,54	23,08	12	15,91	10,53	14,29
LOA	28,57	3,33	-	7,69	4	6,82	-	4,76
GYS	-	3,33	-	-	2	2,27	-	1,59
MII	28,57	3,33	-	7,69	4	6,82	-	4,76
SCB	85,71	56,67	57,69	46,15	64	56,82	68,42	60,32
STK	42,86	6,67	3,85	7,69	10	9,09	10,53	9,52
STS	-	3,33	-	7,69	-	2,27	-	1,59
ZIM	71,43	33,33	15,38	30,77	30	31,82	26,32	30,16

**ACN**= *Acacia nilotica* (L.) Willd.ex Delile; **ACS**= *Acacia senegal* (L.) Will.; **ACT**= *Acacia tortilis* f. *raddiana* (Savi) Brenan; **ADD**= *Adansonia digitata* L.; **ADO**= *Adenium obesum* (Forssk) Roem. & Schult; **ANL**= *Anogeissus leiocarpa* (DC.) Guill. & Perr.; **ASY**= *Acacia seyal* Delile; **BAA**= *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile; **BOS**= *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. Ex Poir.; **CAP**= *Calotropis procera* (Aiton) W.T. Aiton; **CMI**= *Combretum micranthum* G. Don; **COA**= *Combretum aculeatum* Vent.; **COG**= *Combretum glutinosum* Perr. Ex DC.; **DAM**= *Dalbergia melanoxylon* Guill. & Perr.; **FEA**= *Feretia apodanthera* Delile; **GRB**= *Grewia bicolor* Juss.; **GUS**= *Guiera senegalensis* J.F. Gmel.; **LOA**= *Loeseneriella africana* (Willd.) N.Hallé; **MAS**= *Maytenus senegalensis* (Lam.) Loes.; **MII**= *Mitragyna inermis* (Willd.) K.Schum.; **SCB**= *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst; **STK**= *Stereospermum kunthianum* Cham.; **STS**= *Sterculia setigera* Delile; **ZIM**= *Zizyphus mauritiana* Lam.

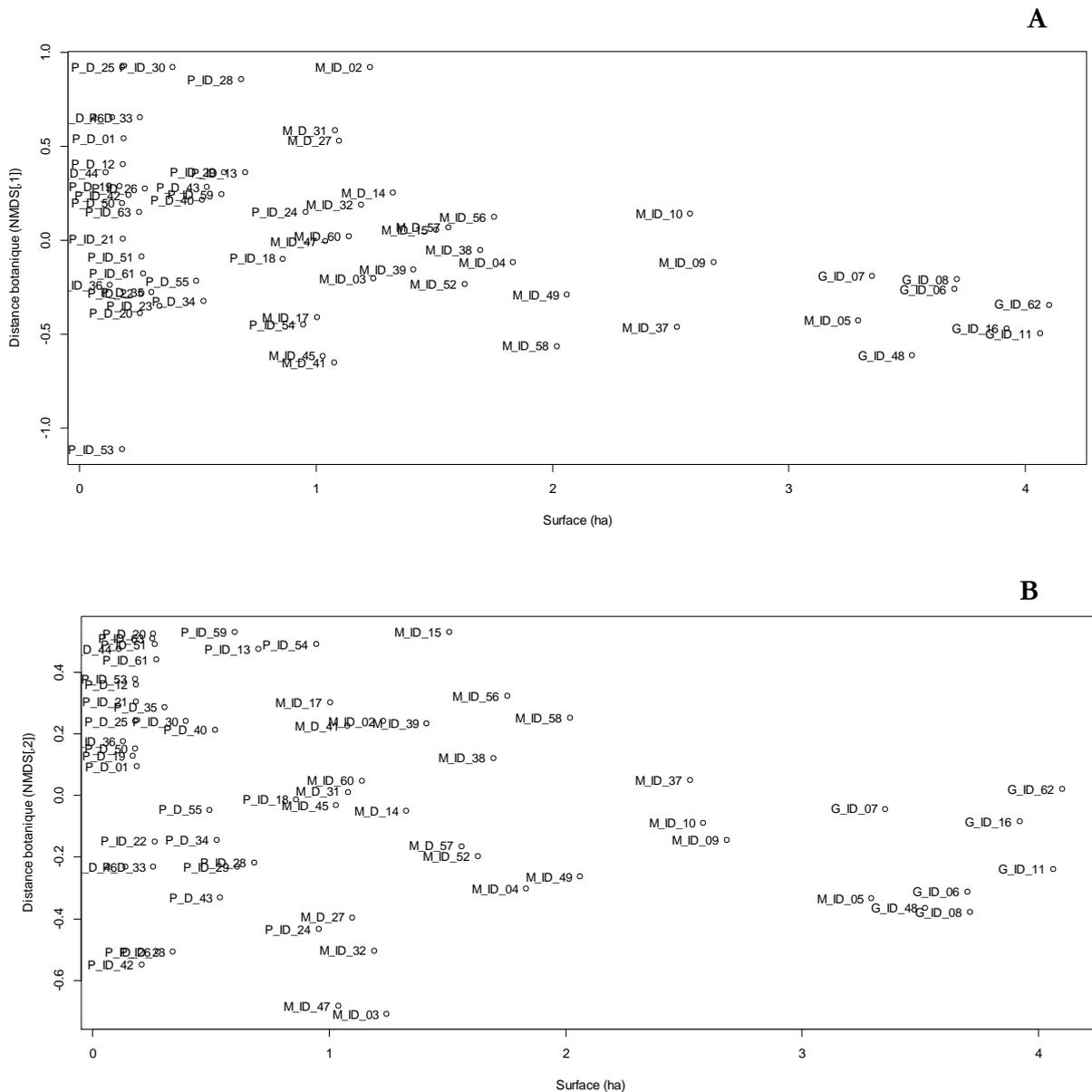
### 3.3. Variabilité de la composition spécifique des dépressions

Les deux premiers axes de l'analyse factorielle des correspondances basée sur la matrice présence-absence expriment 22,41% de la variabilité totale (**figure 4**). Ces deux axes ont été considérés pour l'ordination des échantillons. Une partie substantielle de dépressions se concentre à l'origine des axes. Ces dépressions sont caractérisées par la présence des espèces communes (les plus fréquentes) à la quasi-totalité d'entre elles. Par exemple *Balanites aegyptiaca* (BAA), *Boscia senegalensis* (BOS), *Grewia bicolor* (GRB), *Acacia tortilis* (ACT) etc. Ce phénomène de groupement de la plupart des dépressions vers l'origine des deux axes principaux de l'AFC traduit une similarité élevée de la composition spécifique entre ces dépressions, et cela indépendamment des catégories de dépressions. Par ailleurs, certaines dépressions (P\_ID\_53, M\_ID\_32 et M\_ID\_58) se distinguent nettement du premier groupe. Ces dépressions sont caractérisées par la présence des espèces peu fréquentes telles qu'*Adenium obesum*, uniquement présente dans P\_ID\_53 ; *Maytenus senegalensis*, uniquement présente dans M\_ID\_32 ; et *Sterculia setigera*, uniquement présente dans M\_ID\_58.



**Figure 4:** Analyse factorielle des correspondances réalisée sur la matrice de présence-absence des espèces recensées. En rouge les espèces (présentées en acronyme) et en bleu les dépressions

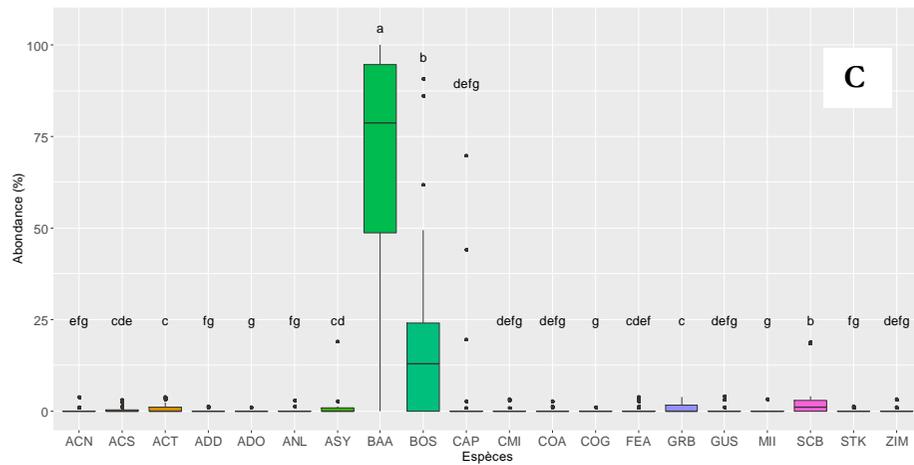
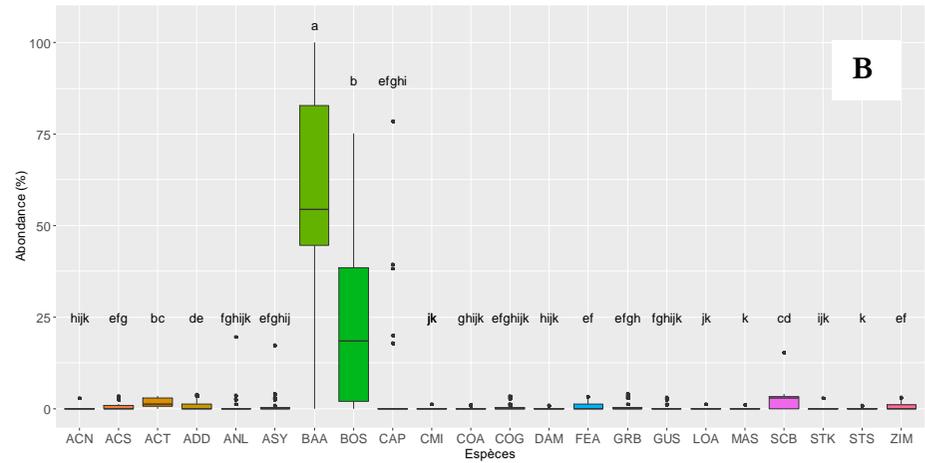
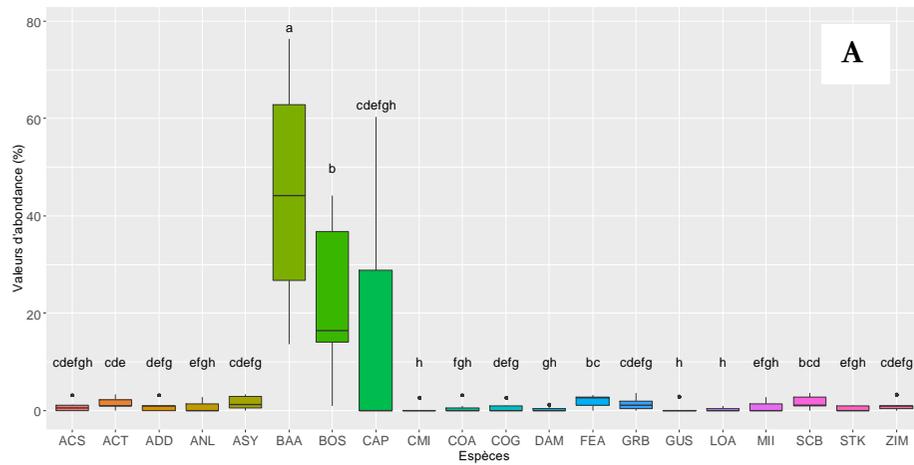
La **figure 5** présente les résultats d'une analyse détaillée de la variabilité de la composition spécifique des dépressions (projection des coordonnées du positionnement multidimensionnel non métrique). Cette analyse a été faite avec la matrice de présence-absence en fonction des surfaces réelles des dépressions, et montre un effet positif de la surface sur la similarité au sein des catégories de dépressions. Plus les surfaces des dépressions sont grandes (< 3ha) plus elles partagent les mêmes espèces. Contrairement aux petites dépressions où l'on observe une forte variabilité de la composition spécifique.



**Figure 5:** Position des dépressions (coordonnées du MDS) en fonction de leurs surfaces réelles.  
**A :** Projection des coordonnées de l'axe 1 du MDS en fonction des surfaces réelles  
**B :** Projection des coordonnées de l'axe 2 du MDS en fonction des surfaces réelles



moyennes par catégorie de *C. procera* ne présentent pas de différences significatives avec d'autres espèces très peu abondante mais très fréquente (exemple *A. tortilis*). En moyenne *C. procera* est plus abondante dans les grandes dépressions ( $16,86 \pm 28,45\%$ ) et moyennes ( $8,08 \pm 19,03\%$ ) où elle est plus fréquente (respectivement 43% et 20%).

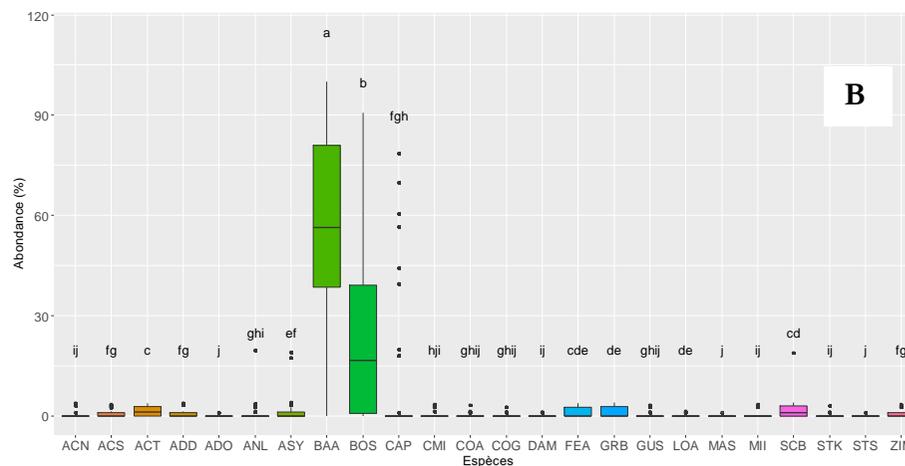
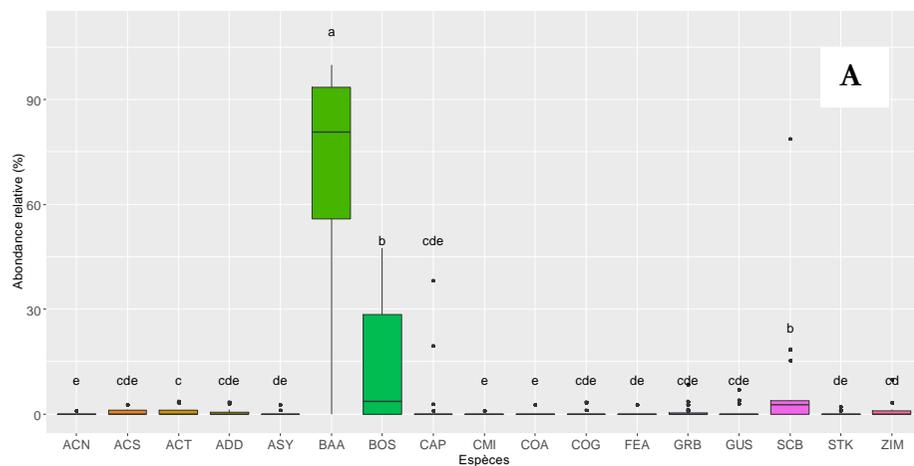


**Figure 7:** Boîtes à moustaches des abondances relatives par espèce. Les abondances d'espèces présentant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence significative (d'après le test de comparaison de moyennes)

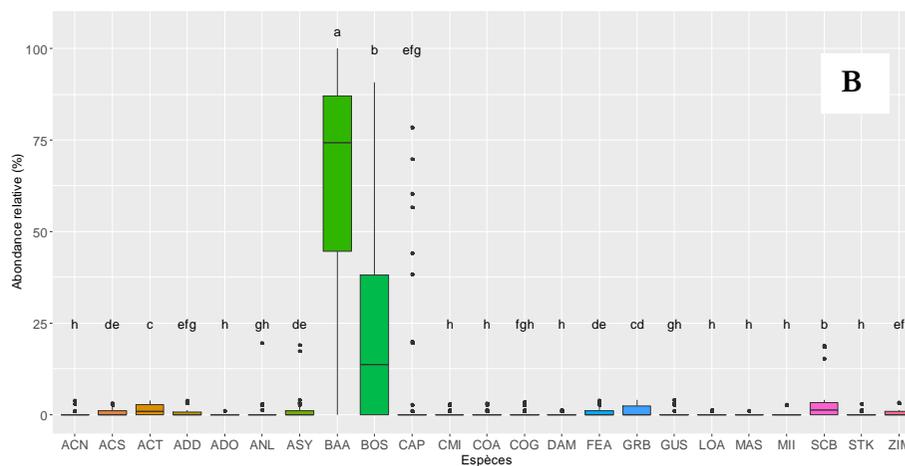
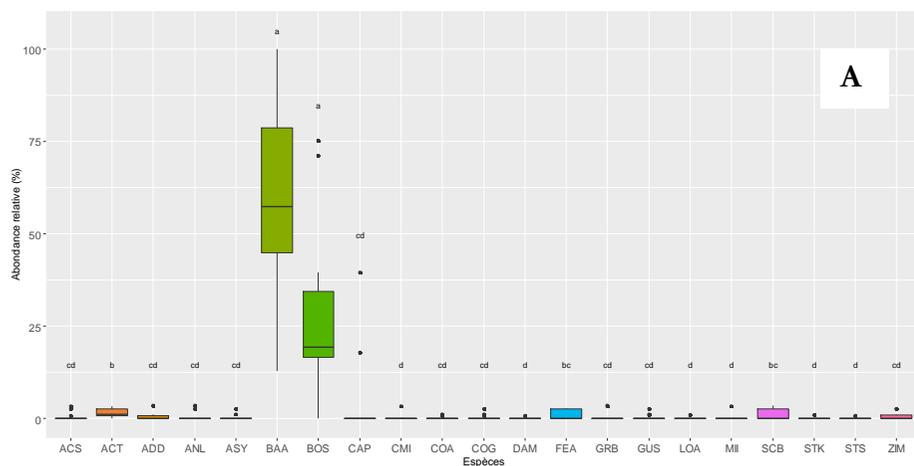
**A=** grandes dépressions.

**B=** dépressions de taille moyenne.

**C=** petites dépressions



**Figure 8:** Boîtes à moustaches des abondances relatives par espèce. Les espèces ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence statistiquement significative. A= dépressions sur dunes (collines). B= dépressions sur les interdunes.



**Figure 9:** Boîtes à moustaches des abondances relatives par espèce. Les espèces ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence statistiquement significative. A= dépressions avec mares. B= dépressions sans mares.

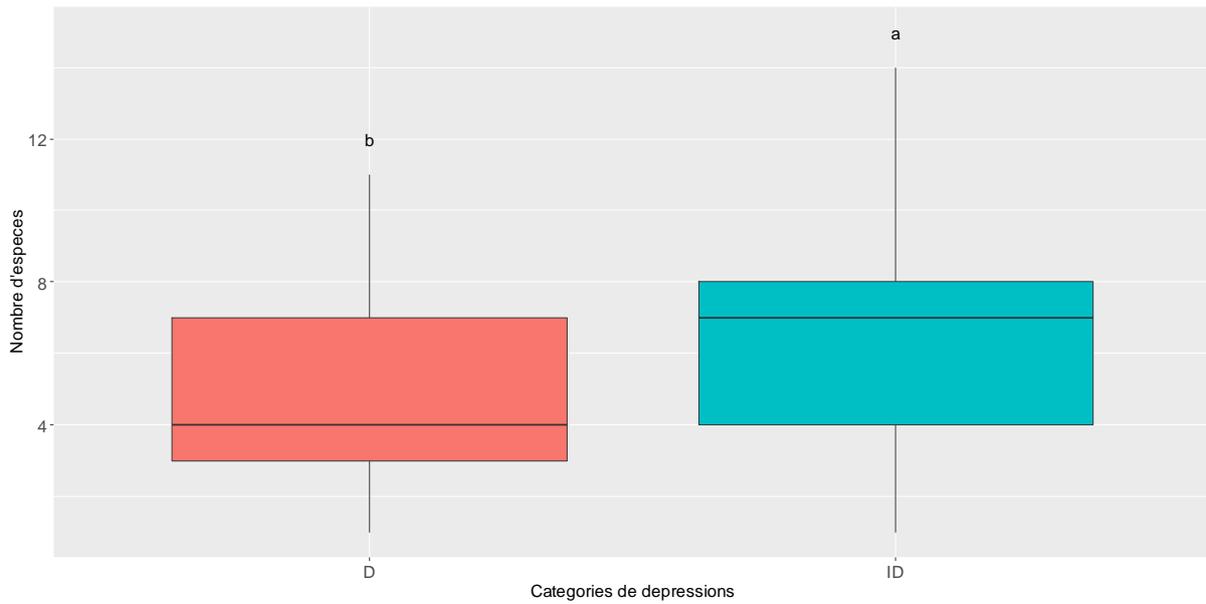
### 3.5. Richesse spécifique, diversité et densité des individus adultes

L'étude de l'influence des facteurs environnementaux (relief, surface et présence de mare) sur la richesse spécifique, la diversité et la densité montre des situations variées selon le facteur environnemental étudié. L'appartenance des dépressions à un type de relief (**figure 10 : dunes Vs plaines**) a une influence significative sur la richesse spécifique ( $p$ -value  $< 0.05$ ). Dans les dépressions localisées sur les dunes ( $n=19$ ), nous avons inventorié au total 17 espèces, tandis que dans les dépressions localisées dans les plaines ( $n=44$ ), 24 espèces ont été recensées. On compte en moyenne  $5 \pm 2$  espèces/dépression sur les dunes tandis que dans les plaines on en compte  $7 \pm 3$ .

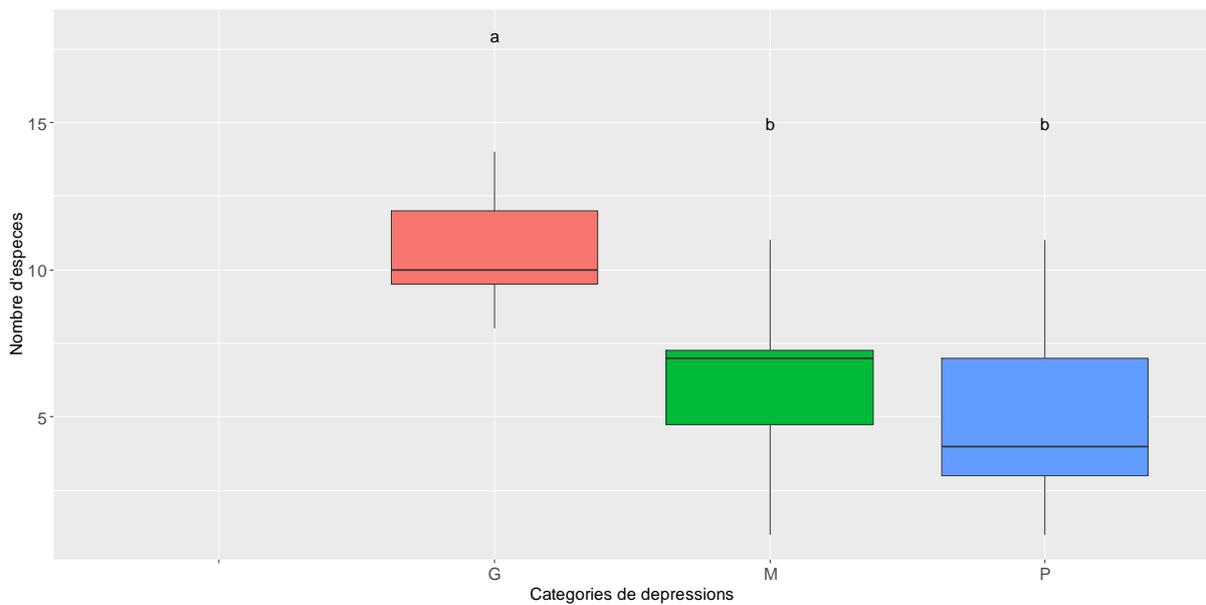
La surface a permis de distinguer ( $p < 0,001$ ) les grandes dépressions des moyennes et des petites (**figure 11**). Les grandes dépressions sont plus diversifiées ( $11 \pm 2$  espèces/dépression ;  $n = 7$  situées toutes dans les plateaux) que les moyennes ( $6 \pm 2$  espèces/dépression ;  $n = 24$ ) et les petites ( $5 \pm 2$  espèces/dépression ;  $n = 32$ ). Cependant il n'existe pas de différence significative entre les deux dernières catégories. Les grandes dépressions se distinguent également des autres ( $p < 0,001$ ) lorsque nous faisons des catégories en combinant la surface et relief (**figure 12**). En effet, les G\_ID sont plus riches que les M\_ID, M\_D, P\_ID ou P\_D.

La **figure 13** montre que le facteur présence de mare temporaire ne se c'est pas révélé distinctif en terme de diversité ( $p$ -value = 0.669). Les dépressions avec mare sont aussi riches ( $6,31 \pm 2,81$  espèces/dépression ;  $n = 13$ , soit une grande, deux petites et 10 moyennes) que celles sans mare ( $5,9 \pm 3,1$  espèces/dépression ;  $n = 50$ , soit 6 grandes, 15 moyennes et 29 petites).

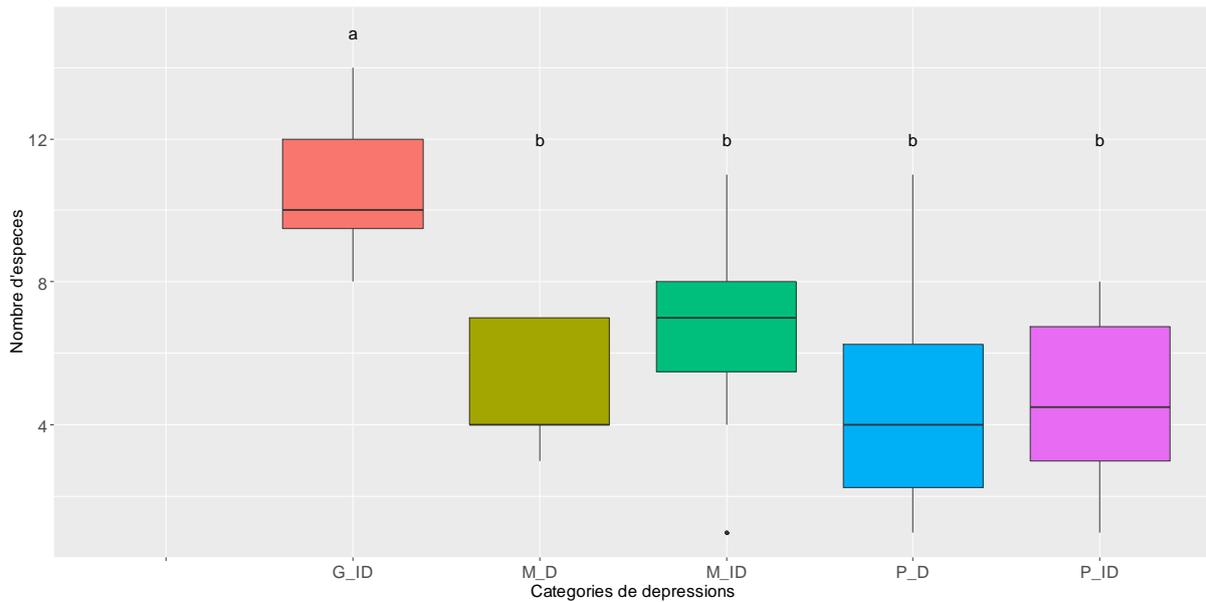
L'indice de diversité de Shannon et de l'indice d'équitabilité de Pielou ont respectivement donnée 0,8 et 0,33 comme valeurs moyennes de l'ensemble de l'échantillonnage. Ces valeurs traduisent une faible biodiversité et des peuplements dominés par quelques espèces. De plus les tests de comparaison des moyennes par catégories de dépressions n'ont montré aucune différence indicative  $p$ -value  $> 0.05$  (confer annexe 6).



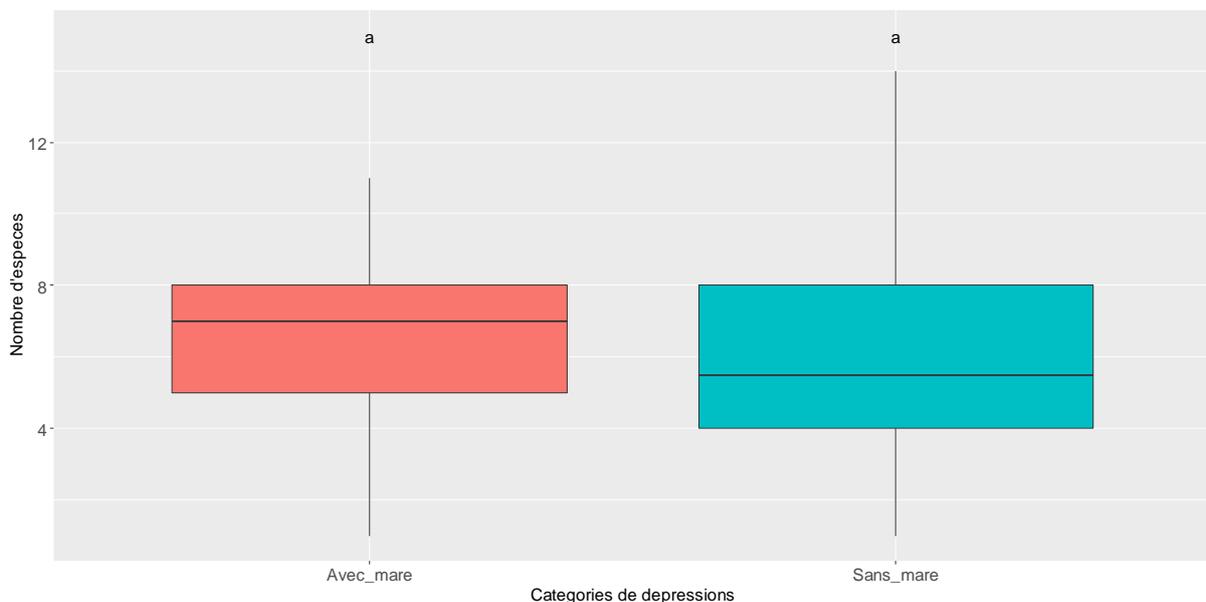
**Figure 11:** Boîtes à moustaches des richesses spécifiques moyennes par catégorie de dépression (selon le relief. D= dune ; ID= interdune). Les catégories ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence statistiquement significative



**Figure 10:** Boîtes à moustaches des richesses spécifiques moyennes par catégorie de dépression (selon la taille. G = grande ; M = moyenne ; P = petite). Les catégories ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence statistique



**Figure 13:** Boîtes à moustaches des richesses spécifiques moyennes par catégorie de dépression (combinaison taille et relief. G\_ID = grande sur interdune ; M\_ID = moyenne sur interdune ; M\_D = moyenne sur dune ; P\_ID = petite sur interdune ; P\_D = petite sur dune. Les catégories ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence significative entre elles.



**Figure 12:** Boîtes à moustaches des richesses spécifiques moyennes par catégorie de dépression (selon la formation ou non d'une mare temporaire). Les catégories ayant au moins une lettre en commun (sur le boxplot) ne présentent pas de différence significative entre elles

Concernant la densité (**tableau 2**), de tous les critères de regroupement, seul le relief a révèle une différence significative ( $p\text{-value} < 0,05$ ). Avec la valeur significativement grande dans les dépressions situées dans les interdunes et la valeur significativement petite sur les dunes.

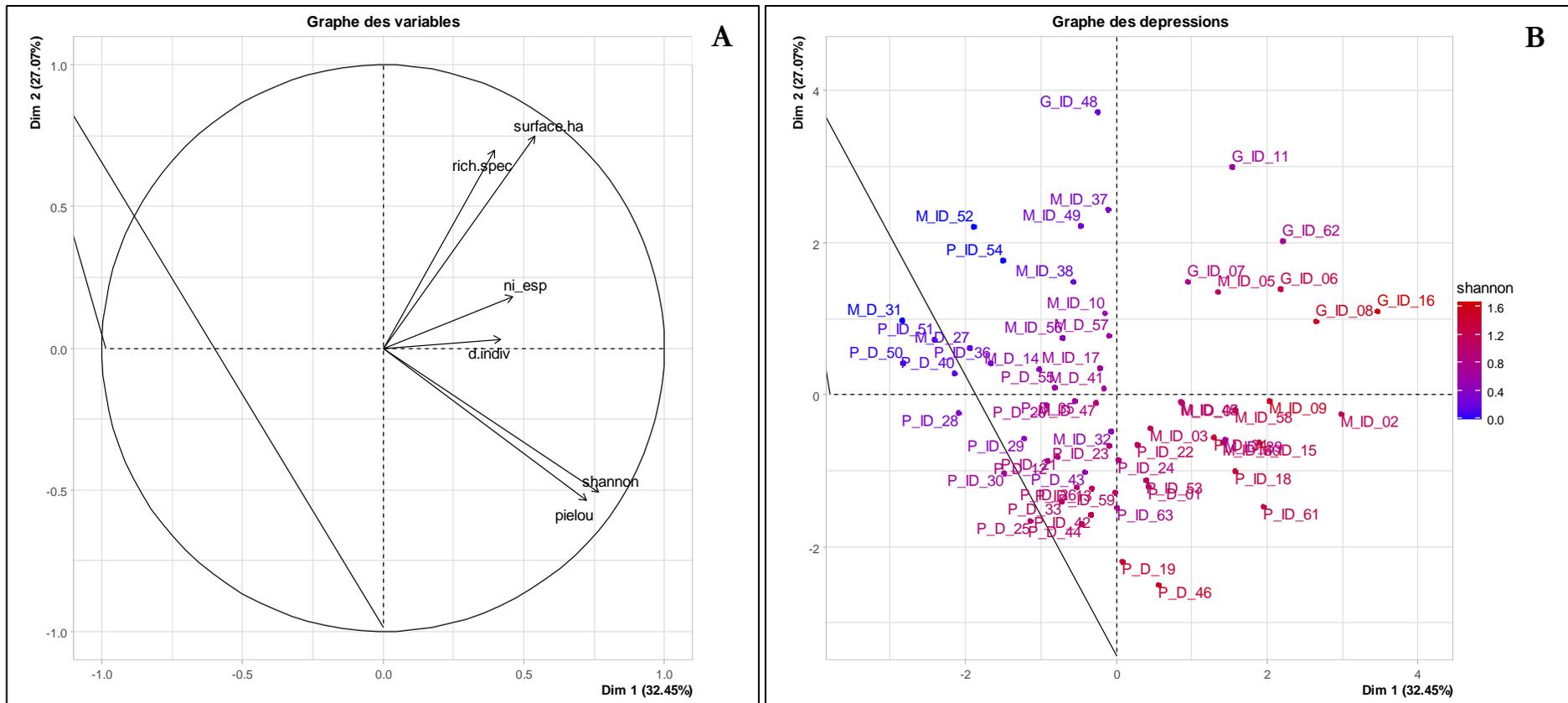
**Tableau 2:** Comparaisons des moyennes de densité d'individus adultes (nombre d'individus/ha) par catégorie de dépression.

Catégories	Facteurs environnementaux						
	Surface		Présence de mare			Relief	
	Grande	Moyenne	Petite	Avec mare	Sans mare	Interdune	Dunes
<b>moyenne</b>	380,68 <sup>a</sup>	389,96 <sup>a</sup>	349,85 <sup>a</sup>	473,7 <sup>a</sup>	341,22 <sup>a</sup>	396,61 <sup>a</sup>	303,59 <sup>b</sup>
<b>écart-type</b>	96,97	182,32	253,97	226,59	204,37	220,05	189,57
<b>p-value</b>	0,1988		0,05684			0,04373	

### 3.6. Influence des facteurs du milieu sur la richesse spécifique, la diversité et la densité

Les deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) expriment 59,52 % de l'inertie totale de données. Le cercle des corrélations montre d'une part que l'indice de diversité de Shannon et l'indice d'équitabilité de Pielou contribuent à la construction de la première composante principale et sont positivement corrélés. Ceci indique que dans une dépression lorsque la diversité de Shannon est relativement importante les espèces qui s'y trouvent existent plus ou moins dans les mêmes proportions d'abondance. D'autre part le cercle des corrélations montre que la surface et la richesse spécifique contribuent à la construction de la deuxième composante principale et sont positivement corrélées. Par conséquent plus une dépression est grande, plus le nombre d'espèces est important. Par ailleurs, il n'y a pas de corrélation entre le premier groupe de variable (indice de Shannon et de Pielou) et le second groupe (surface et richesse spécifique).

La représentation des dépressions dégage deux profils de dépressions: Premièrement les dépressions situées dans le quadrant supérieur gauche. Elles sont caractérisées par une grande superficie et une richesse spécifique importante (G\_ID\_11, G\_ID\_62, G\_ID\_07, G\_ID\_05, G\_ID\_06, G\_ID\_08, G\_ID\_16 et M\_ID\_05). A l'opposé on trouve des petites dépressions avec généralement des richesses spécifiques faibles. Le second profil est celui des dépressions situées dans le deuxième quadrant inférieur gauche, caractérisées par les dépressions ayant un indice de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou relativement élevés quoique respectivement inférieur à 2 et 0.6 en général. Par ailleurs l'analyse de l'échelle des couleurs de l'indice de diversité de Shannon montre que les petites, bien que moins riches (nombre d'espèces en comparaison avec les grandes), se retrouvent dans la même gamme de couleur (rouge plus diversifiée) que les moyennes et les grandes dépressions. Ce qui signifie qu'elles sont aussi diversifiées (nombre d'espèces + équitabilité) que les grandes.



**Figure 14:** Analyse en composantes principales réalisée à partir d'un facteur du milieu (la superficie) et les caractéristiques métriques de la végétation (richesse spécifique, indices de diversité (Shannon et Pielou), densité d'individus (d.indiv) et le nombre d'individus/espèce (ni\_esp). A= représentation cercle des corrélations ; B= représentation des dépressions.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Composition spécifique et fréquence de présence des espèces

Il ressort des résultats de l'inventaire que la végétation ligneuse des 63 dépressions topographiques inventoriées dans la zone de Widou Thiengoly est riche de 24 espèces. Cette richesse floristique varie peu en fonction des catégories de dépressions. Ce résultat corrobore ceux de [Dendoncker et Vincke \(2020\)](#), [\(Ndiaye et al. 2013\)](#), [\(Ndong et al. 2015\)](#) et [\(Niang et al. 2014\)](#) qui ont respectivement enregistré 24, 25, 23 et 20 espèces dans la même zone.

L'analyse des fréquences de présence des espèces a révélé que *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Sclerocarya birrea* et *Acacia tortilis* sont les espèces les mieux distribuées dans la zone d'étude. Elles ont été retrouvées dans plus de 50 % de dépressions. La distribution de ces espèces pourrait s'expliquer par deux raisons. Premièrement par leur adaptation aux conditions climatiques et édaphiques du Sahel ([Ndour 1998 cité par Ndiaye et al. 2013 ; Bakhoum 2013](#)). Deuxièmement elles les plus appréciées par le bétail ([Ndong et al. 2015](#)) ce qui contribue énormément à leur dissémination.

### 4.2. Abondance des espèces et mesures de diversité

L'indice de diversité de Shannon et l'indice d'équitabilité de Pielou sont dans l'ensemble respectivement inférieurs à 1 et 0,5. La comparaison des valeurs moyennes par catégorie de dépression (superficie, relief, présence de mare) n'a révélé aucune différence statistiquement significative. Ceci indique que les dépressions sont peu diversifiées c'est à dire la répartition des individus par espèce n'est pas équitable. Au même moment l'étude des abondances relatives des espèces a mis évidence la dominance des espèces *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis* sur l'ensemble du peuplement, y compris dans les différentes catégories. Cette tendance n'est pas nouvelle dans la zone. Des récents inventaires soulignent la prédominance de ces espèces ([Niang et al. 2014](#); [Ndong et al. 2015](#); [Ndiaye et al. 2013](#); [2014](#)) en rapport avec le processus de sahelisation qui se vit actuellement dans la zone sylvopastorale du Ferlo ([Vincke, Diédhiou, et Grouzis 2010](#); [Dendoncker et al. 2020](#)). En effet, ces auteurs ont constaté une régression d'espèces comme *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum*, *Acacia senegal*, etc., au profit des espèces caractéristiques du Sahel (résistantes à la sécheresse) *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis* et *Calotropis procera*. Outre la raison climatique, la germination est également un phénomène important qui pourrait expliquer la dominance de ces espèces. [Dendoncker et Vincke \(2020\)](#) citant [Poupon \(1980\)](#) rapportent que *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis* sont des espèces à explosion démographique et dont le taux de germination est élevé chaque année. Contrairement aux espèces à explosion démographique mais pas chaque année (*Commiphora*, *Acacia senegal*) ou aux espèces à très faible taux

de germination (*Grewia bicolor*). Les mécanismes de régénération (semis véritables, taillis, drageons, ...) agissent également sur la distribution spatiale et l'abondance des semis par conséquent des individus adultes. En ce qui concerne l'espèce *Balanites aegyptiaca*, Dendoncker et Vincke (2020) citant Argaw et al. (1999) mentionnent qu'elle utilise le semis direct, le taillis et les drageons. A titre de rappel, les drageons ont accès à plus de ressources qu'une jeune plante issue de graines. Cette capacité à se régénérer par de multiples mécanismes lui confère un avantage compétitif, notamment en cas de perturbations (Dendoncker et Vincke 2020).

L'analyse de l'abondance a par ailleurs montre des valeurs considérables pour l'espèce *Calotropis procera* dans certaines dépressions (particulièrement dans les grandes et moyennes). Celle-ci étant une espèce colonisatrice des zones humides sur des sols dégradés par des activités humaines (Arbonnier 2019), ces fortes valeurs d'abondance pourraient indiquer un pâturage intense de ces catégories de dépressions. Autre espèce présentant des valeurs d'abondance non négligeable (particulièrement dans les dépressions situées sur les dunes) est *Sclerocarya birrea*. Cette espèce étant typique des savanes sahélo-soudanaises à soudanaises, principalement sur sol sableux (Arbonnier 2019), sa concentration sur les dépressions dunaires confirment le rôle de refuge de biodiversité des dépressions topographiques du Ferlo.

Enfin un autre constat important sur l'analyse des valeurs abondantes relatives concerne la diminution drastique (moyenne d'abondance < 2 % toutes catégories) des espèces telles que *G. senegalensis*, *A. senegal*, *C. glutinosum*, *A. nilotica*, *Sclerocarya birrea* etc., autres fois considérées comme des composantes importantes de la végétation ligneuse du centre Ferlo (S.M. Herrmann et Tappan 2013). Cela indique un changement dans la composition (glissement vers des espèces sahéliennes plus tolérantes aux conditions arides), par conséquent dans structure peuplement, survenue après les épisodes secs des années 1972-1973 et 1983-1984 comme documenté par bon nombre des auteurs (Dendoncker, Ngom, et Vincke 2015; Mische et al. 2010; Dendoncker et al. 2020; S.M. Herrmann et Tappan 2013). Selon Gonzalez et al. (2012) les facteurs dominants les changements observés dans la végétation sont climatiques, tout en reconnaissant une influence de l'activité humaine sur la densité et la richesse des espèces à une échelle plus locale.

### **4.3. Influence des facteurs environnementaux sur les caractéristiques de la végétation ligneuse**

L'analyse factorielle de correspondances ne révèle pas d'effet significatif des facteurs environnementaux (superficie, relief, présence de mare) sur la composition spécifique. La majorité des espèces se retrouve dans la plupart des dépressions, cela indépendamment des catégories. Par

ailleurs, le MDS a mis en évidence que les grandes dépressions sont plus similaires entre elles, comparées aux moyennes et aux petites. Cette tendance pourrait s'expliquer par le fait que dans la catégorie "grandes dépressions" en raison de la disponibilité de l'espace, la majorité des espèces de la zone est présente. Par conséquent elles se ressemblent plus entre elles d'un point de vue de composition spécifique. Par contre dans la catégorie "moyenne dépression" et "petites dépressions" la contrainte spatiale limite la présence de certaines espèces, ce qui conduit à des compositions spécifiques très variées au sein de ces deux catégories. Eu égard à ces résultats, notre hypothèse de recherche qui supposait que la composition spécifique varie selon les catégories de dépressions est infirmée.

Notre seconde hypothèse qui supposait que la richesse spécifique, la diversité (indice de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou) et la densité varieraient selon les catégories de dépressions est partiellement confirmée. L'analyse de l'ACP et les tests de comparaison des moyennes ont révélé que la seule caractéristique de la végétation significativement affectée par les variables du milieu (la superficie précisément) est la richesse spécifique, qui présente une tendance à augmenter lorsque la superficie augmente. La tendance observée ici pourrait simplement être le résultat d'un effort d'échantillonnage différentiel entre les catégories de dépressions et non le résultat des conditions biologiques particulières dans les grandes dépressions. En effet, la relation aire-espèce (SAR) stipule qu'à mesure que la zone d'étude s'étend, le nombre d'espèces rencontrées augmente (Lomolino 2001; Diamond 1975; McCain 2009). La diversité des micro-habitats et les liens étroits entre des espèces particulières et ces micro-habitats pourraient expliquer la présence de plus des espèces dans les grandes dépressions McCain (2009) citant Rosenzweig (1995).

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Par cette étude nous avons tenté (i) de catégoriser (selon la superficie, le relief et la formation de mare temporaire) les dépressions topographiques d'une zone du Ferlo. Puis, aux moyens des inventaires de terrain, (ii) de dégager les différences floristiques (composition spécifique, abondance des espèces, richesse spécifique, diversité et densité des individus) entre les peuplements ligneux des catégories de dépressions définies. Nous avons défini : 3 catégories de dépressions selon la superficie (petite dépression, moyennes dépression et grande dépression); 2 catégories de dépressions selon le relief (dépression situées sur les dunes et dépressions situées dans les interdunes) ; 2 catégories de dépressions selon les mares (dépressions avec mare et dépressions sans mare) et 5 catégories de dépressions en combinant les critères superficie et relief. 24 espèces ligneuses ont été recensées dans l'ensemble des dépressions. Excepté la richesse spécifique, qui est plus importante dans les grandes dépressions, les analyses des données d'inventaires de terrain n'ont montré aucune différence, pour toutes les caractéristiques de la végétation étudiées, entre les catégories de dépressions définies. Les peuplements sont essentiellement composés de *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis*. Dans certaines dépressions (particulièrement dans les grandes et moyennes) on observe une forte concentration de *Calotropis procera* indiquant une dégradation de ces espaces. Les autres espèces sont présentes en faible abondance c'est-à-dire quelques individus isolés. Notre étude documente une modification dans la composition spécifique des peuplements, caractérisée par une diminution drastique des espèces des zones humides au profit des espèces xérophiiles.

Compte tenu de l'état actuel de la diversité (composition spécifique et abondance) de la végétation ligneuse dans les dépressions topographiques inventoriées, on peut s'interroger sur le rôle de « refuge de biodiversité » de ces espaces sur le long-terme. La réduction drastique de la diversité dans les dépressions compromet la capacité de l'écosystème à fournir les services ce qui compromet en retour la capacité des populations rurales locales à s'adapter dans contexte déjà difficile. Ceci nécessite un suivi permanent de l'évolution de la diversité ligneuse dans ces « pseudo-îlots de diversité » et une vigilance quant à l'utilisation des ressources ligneuses. Pour améliorer notre état connaissance sur le sujet, les recherches futures devraient intégrer le type de sol, la profondeur ou l'impact anthropique dans la typologie des dépressions et élargir la zone couverte par l'étude ; définir en amont les types de dépressions et échantillonner le même nombre de dépressions par catégorie et intégrer les mesures dendrométriques dans les paramètres à observer.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arbonnier, Michel. 2019. *Arbres, arbustes et lianes d'Afrique de l'Ouest*. 4<sup>e</sup> éd. France. <https://www.cultura.com/arbres-arbustes-et-lianes-d-afrique-de-l-ouest-tea-9782759225484.html>.
- Bakhoun, Amy. 2013. « DYNAMIQUE DES RESSOURCES FOURRAGERES : INDICATEUR DE RESILIENCE DES PARCOURS COMMUNAUTAIRES DE TESSEKERE AU FERLO, (NORD-SENEGAL) ». Senegal: UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR.
- Beasom, Samuel L., et Harry H. Haucke. 1975. « A Comparison of Four Distance Sampling Techniques in South Texas Live Oak Mottes ». *Journal of Range Management* 28 (2): 142. <https://doi.org/10.2307/3897447>.
- Dardel, C., L. Kergoat, P. Hiernaux, E. Mougin, M. Grippa, et C.J. Tucker. 2014. « Re-Greening Sahel: 30years of Remote Sensing Data and Field Observations (Mali, Niger) ». *Remote Sensing of Environment* 140 (janvier): 350-64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>.
- Dendoncker, Morgane, Martin Brandt, Kjeld Rasmussen, Simon Taugourdeau, Rasmus Fensholt, Compton J. Tucker, et Caroline Vincke. 2020. « 50 Years of Woody Vegetation Changes in the Ferlo (Senegal) Assessed by High-Resolution Imagery and Field Surveys ». *Regional Environmental Change* 20 (4): 137. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01724-4>.
- Dendoncker, Morgane, Daouda Ngom, et Caroline Vincke. 2015. « TREE DYNAMICS (1955-2012) AND THEIR USES IN SENEGAL'S FERLO REGION: INSIGHTS FROM A HISTORICAL VEGETATION DATABASE, LOCAL KNOWLEDGE AND FIELD INVENTORIES ». *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 326 (326): 25. <https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31281>.
- Dendoncker, Morgane, et Caroline Vincke. 2020a. « Low Topographic Positions Enhance Woody Vegetation Stability in the Ferlo (Senegalese Sahel) ». *Journal of Arid Environments* 175 (avril): 104087. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104087>.
- . 2020b. « Low Topographic Positions Enhance Woody Vegetation Stability in the Ferlo (Senegalese Sahel) ». *Journal of Arid Environments* 175 (avril): 104087. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104087>.
- Diamond, Jared M. 1975. « The Island Dilemma: Lessons of Modern Biogeographic Studies for the Design of Natural Reserves ». *Biological Conservation* 7 (2): 129-46. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(75\)90052-X](https://doi.org/10.1016/0006-3207(75)90052-X).
- Herrmann, S.M., et G.G. Tappan. 2013. « Vegetation Impoverishment despite Greening: A Case Study from Central Senegal ». *Journal of Arid Environments* 90 (mars): 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.020>.
- Herrmann, Stefanie M., Assaf Anyamba, et Compton J. Tucker. 2005. « Recent Trends in Vegetation Dynamics in the African Sahel and Their Relationship to Climate ». *Global Environmental Change* 15 (4): 394-404. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004>.
- Husson, François, et Pierre-André Cornillon. 2018. *R pour la statistique et la science des données*.
- Le Houérou, Henri-Noël. 1989. *The Grazing Land Ecosystems of the African Sahel*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74457-0>.
- Lomolino, Mark. V. 2001. « Elevation Gradients of Species-Density: Historical and Prospective Views: *Elevation Gradients of Species-Density* ». *Global Ecology and Biogeography* 10 (1): 3-13. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2001.00229.x>.

- McCain, Christy M. 2007. « AREA AND MAMMALIAN ELEVATIONAL DIVERSITY ». *Ecology* 88 (1): 76-86. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2007\)88\[76:AAMED\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2007)88[76:AAMED]2.0.CO;2).
- . 2009. « Global Analysis of Bird Elevational Diversity ». *Global Ecology and Biogeography* 18 (3): 346-60. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2008.00443.x>.
- Miehe, Sabine, Jürgen Kluge, Henrik Von Wehrden, et Vroni Retzer. 2010. « Long-Term Degradation of Sahelian Rangeland Detected by 27 Years of Field Study in Senegal: Long-Term Rangeland Monitoring in the Sahel ». *Journal of Applied Ecology* 47 (3): 692-700. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01815.x>.
- Mille, Gilles, et D Louppe. 2015. *Mémento du forestier tropical*.
- Ndiaye, Ousmane, Aly Diallo, Moustapha Bassimbé Sagna, et Aliou Guissé. 2013. « Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal ». *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 13 Numéro 3 (décembre). <https://doi.org/10.4000/vertigo.14352>.
- Ndiaye, Ousmane, Aly Diallo, Stephen A. Wood, et Aliou Guisse. 2014. « Structural Diversity of Woody Species in the Senegalese Semi-Arid Zone—Ferlo ». *American Journal of Plant Sciences* 05 (03): 416-26. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.53055>.
- Ndong, Aissatou Thiam, Ousmane Ndiaye, Madiara Ngom Faye, Didier Galop, et Aliou Guissé. 2015. « Espèces ligneuses du Ferlo-Nord, Sénégal : état actuel et usage ». *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, n° 271 (juillet): 401-22. <https://doi.org/10.4000/com.7557>.
- Niang, K, O Ndiaye, A Diallo, et A Guisse. 2014. « Flore et structure de la végétation ligneuse le long de la Grande Muraille Verte au Ferlo, nord Sénégal. » *Journal of Applied Biosciences* 79 (1): 6938. <https://doi.org/10.4314/jab.v79i1.15>.
- Nicholson, Sharon E. 2001. « Climatic and Environmental Change in Africa during the Last Two Centuries ». *Climate Research* 17: 123-44. <https://doi.org/10.3354/cr017123>.
- . 2013. « The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability ». *ISRN Meteorology* 2013 (février): 1-32. <https://doi.org/10.1155/2013/453521>.
- Ramade, François. 2012. *Eléments d'écologie: écologie fondamentale*. Paris: Dunod.
- Sparks, J C. 2002. « Comparative Evaluation of Accuracy and Efficiency of Six Forest Sampling Methods », 8.
- Vincke, C., I. Diédhiou, et M. Grouzis. 2010. « Long Term Dynamics and Structure of Woody Vegetation in the Ferlo (Senegal) ». *Journal of Arid Environments* 74 (2): 268-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.006>.
- Westhoff, Victor, et Eddy Van Der Maarel. 1978. « The Braun-Blanquet Approach ». In *Classification of Plant Communities*, édité par Robert H. Whittaker, 287-399. Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5_9).

## ANNEXES

### Annexe 1 : formulaire de collecte de données de terrain : formulaire Placette

Formulaire placette sta... ↑	Formulaire placette sta... ↑
Informations placette	Données de densité
* Numéro du site 2200	Nombre de buissons
Coordonnées de la placette 15.9839091 -15.3372373 41.89928876199215 3.9	Nombre d'arbustes
Code de la placette B	Nombre d'arbres
	Nombre total d'individus 61

### Annexe 2 : formulaire de collecte de données de terrain : formulaire site (dépression)

Formula... + 📄 ↩ ⋮	Formulaire site stage P... ↑
Espèce/abondance > 1	Données du site
Nom de l'espèce	Numéro site 2160
Sélectionnez la Réponse ▼	Coordonnées GPS au début du transect 15.9832502 -15.3103608 39.709245715981666 4.766
Abondance	Coordonnées GPS à la fin du transect 15.9831586 -15.3098361 41.95009980258562 4.9
<input type="radio"/> 5 : occupant plus de 75 %	Formation d'une mare temporaire dans la dépression Non
<input type="radio"/> 4 : occupant entre 50 et 75 %	Nombre de strates présentes dans la dépression 3
<input type="radio"/> 3 : occupant entre 25 et 50 %	Type de strate Buisson, Arbuste, Arbre
<input type="radio"/> 2 : occupant entre 5 et 25 %	Nombre de placettes réalisées 1
<input type="radio"/> 1 : occupation inférieure à 5 %	Observations sur le site Rien
<input type="radio"/> + : simplement présente	
< RETOUR	SUIVANT >

**Annexe 3 : liste des espèces ligneuse inventoriées dans les dépressions**

<b>Noms scientifiques</b>	<b>Genres</b>	<b>Familles</b>
<i>Acacia nilotica</i> (L.) Willd.ex Delile	Acacia	Fabaceae [Mimosaceae]
<i>Acacia senegal</i> (L.) Will.	Acacia	Fabaceae [Mimosaceae]
<i>Acacia tortilis</i> f. <i>raddiana</i> (Savi) Brenan	Acacia	Fabaceae [Mimosaceae]
<i>Adansonia digitata</i> L.	Adansonia	Malvaceae [Bombacaceae]
<i>Adenium obesum</i> (Forssk) Roem. & Schult	Adenium	Apocynaceae
<i>Anogeissus leiocarpa</i> (DC.) Guil. & Perr.	Anogeissus	Combretaceae
<i>Acacia seyal</i> Delile	Acacia	Fabaceae [Mimosaceae]
<i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Delile	Balanites	Zygophyllaceae [Balanitaceae]
<i>Boscia senegalensis</i> (Pers.) Lam. Ex Poir.	Boscia	Capparaceae
<i>Calotropis procera</i> (Aiton) W.T. Aiton	Calotropis	Apocynaceae [Asclepiadaceae]
<i>Combretum micranthum</i> G. Don	Combretum	Combretaceae
<i>Combretum aculeatum</i> Vent.	Combretum	Combretaceae
<i>Combretum glutinosum</i> Perr. Ex DC.	Combretum	Combretaceae
<i>Dalbergia melanoxylon</i> Guill. & Perr.	Dalbergia	Fabaceae
<i>Feretia apodanthera</i> Delile	Feretia	Rubiaceae
<i>Grewia bicolor</i> Juss.	Grewia	Malvaceae [Tiliaceae]
<i>Guiera senegalensis</i> J.F. Gmel.	Guiera	Combretaceae
<i>Loeseneriella africana</i> (Willd.) N.Hallé	Loeseneriella	Celastraceae [Hippocrateaceae]
<i>Gymnosporia senegalensis</i> (Lam.) Loes.	Gymnosporia	Celastraceae
<i>Mitragyna inermis</i> (Willd.) K.Schum.	Mitragyna	Rubiaceae
<i>Sclerocarya birrea</i> (A. Rich.) Hochst	Sclerocarya	Anacardiaceae
<i>Stereospermum kunthianum</i> Cham.	Stereospermum	Bignoniaceae
<i>Sterculia setigera</i> Delile	Sterculia	Malvaceae [Sterculiaceae]
<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam.	Ziziphus	Rhamnaceae





**Annexe 6** : comparaison de moyenne de indices de diversité par catégorie de dépression selon les facteurs du environnementaux

Catégories	Facteurs environnementaux						
	Surface		Présence de mare		Relief		
	Grande	Moyenne	Petite	Avec mare	Sans mare	Interdune	Dunes
<b>Shannon</b>	0,97 <sup>a</sup>	0,72 <sup>a</sup>	0,81 <sup>a</sup>	0,98 <sup>a</sup>	0,75 <sup>a</sup>	0,83 <sup>a</sup>	0,72 <sup>a</sup>
<b>Pielou</b>	0,35 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>	0,33 <sup>a</sup>	0,35 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>	0,34 <sup>a</sup>	0,30 <sup>a</sup>
<b>p-value</b>	<b>&gt; 0,05</b>						

## Résumé

Au Ferlo, principale zone sylvopastorale du Sénégal, la topographie est connue pour influencer le développement de la végétation ligneuse. En effet, relief du Ferlo est fait d'une alternance des dunes de sable et de plaines de tailles variées. De petites dépressions sont présentes aussi bien dans les plaines que sur les dunes et forment dans certains endroits des mares temporaires à la fin de la saison des pluies. Ces conditions édaphiques influencent le bilan hydrique du sol. La régénération, la densité d'arbres et la composition en espèces sont plus importantes dans les zones de dépressions que sur les pentes et sommets de dunes. Dans cette étude nous avons catégorisé les dépressions selon la superficie, le relief et la présence de mares, puis au moyen des inventaires de terrain, nous avons tenté de dégager les différences en terme composition spécifique, abondance des espèces, richesse spécifique et densité entre la catégorie de dépressions définies. 24 espèces ligneuses ont été recensées dans l'ensemble des dépressions. Excepté la richesse spécifique, qui est plus importante dans les grandes dépressions, les analyses des données d'inventaires de terrain n'ont montré aucune différence, pour toutes les caractéristiques de la végétation étudiées, entre les catégories de dépressions. Les peuplements sont essentiellement composés de *Balanites aegyptiaca* et *Boscia senegalensis*. Dans certaines dépressions (particulièrement dans les grandes et moyennes) on observe une forte concentration de *Calotropis procera* indiquant une dégradation de ces espaces. Les autres espèces sont présentes en très faible abondance c'est-à-dire quelques individus isolés. Notre étude est en accord avec toutes les précédentes études dans la zone qui documentent une modification dans la composition spécifique des peuplements, caractérisée par une diminution drastique des espèces des zones humides au profit des espèces xérophiles.

**Mots clés :** Diversité, végétation ligneuse, dépression topographique, Ferlo, Sénégal

## **Abstract**

In the Ferlo, the main sylvopastoral area of Senegal, the topography is known to influence the development of woody vegetation. Indeed, the relief of the Ferlo is made up of alternating sand dunes and plains of various sizes. Small depressions are present both in the plains and on the dunes and in some places form temporary pools at the end of the rainy season. These edaphic conditions influence the water balance of the soil. Regeneration, tree density and species composition are more important in the depression areas than on the slopes and tops of the dunes. In this study we categorised the depressions according to area, relief and the presence of pools, and then by means of field inventories we tried to identify differences in species composition, species abundance, species richness and density between the defined category of depressions. 24 woody species were recorded in all depressions. Except for species richness, which is higher in the larger depressions, the analyses of the field survey data showed no differences in any of the vegetation characteristics studied between the depression categories. The stands are mainly composed of *Balanites aegyptiaca* and *Boscia senegalensis*. In some depressions (particularly in the large and medium ones) there is a high concentration of *Calotropis procera* indicating a degradation of these areas. The other species are present in very low abundance, i.e. a few isolated individuals. Our study is in agreement with all previous studies in the area that document a modification in the specific composition of the stands, characterised by a drastic decrease of wetland species in favour of xerophilous species.

**Key words :** Diversity, woody vegetation, topographic depression, Ferlo, Senegal.