

LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES FIGURES	15
RESUME	17

INTRODUCTION : POUR UNE MEILLEURE COMPREHENSION DES GROUPEMENTS VEGETAUX CONTRACTES DES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES.....20

1 - Principaux groupements végétaux contractés et leur distribution dans le monde	20
2 - Contraction de la végétation : atout écologique ou dégradation du système?	23
3 - Différentes hypothèses	24
4 - Connaissances fonctionnelles déjà acquises et postulats de base	25
5 - Conceptualisation de la problématique	28

CHAPITRE I : CONNAISSANCES GENERALES DU MILIEU.....30

1 - Caractéristiques géographiques	31
1.1. Contexte géographique de l'Ouest nigérien.....	31
1.2. Coupe représentative de la région et toposéquence	31
2 - Principales données climatiques	33
2.1. Régime pluviométrique.....	33
2.2. Humidité relative.....	35
2.3. Température de l'air.....	36
2.4. Vents et évaporation.....	37
2.5. Synthèse bioclimatique relative au secteur d'étude.....	37
2.6. Evolutions climatiques anciennes (depuis 40 000 ans).....	38
2.7. Evolutions climatiques récentes (1905 à 1995).....	39
3 - Milieu édaphique	40
3.1. Substrat géologique.....	40
3.2. Evolution géomorphologique.....	40
3.3. Couverture pédologique.....	42
3.4. Typologie des unités morphopédologiques.....	44
4 - Environnement biologique	45
4.1. Végétation climatique zonale.....	46
4.2. Formations végétales spécialisées.....	46
5 - Activités socio-économiques	46
5.1. Utilisation des terres.....	46
5.2. Stratégie énergie domestique et économie forestière.....	48

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES.....49

1- Dispositifs emboîtés (échelles locales et régionales)	50
1.1. Préalables définis.....	50
1.2. Dispositifs et plans d'expériences.....	52
1.3. Hiérarchisation des échelles d'échantillonnage.....	53
1.3.1. Echantillons de niveau 1 : éléments de station écologique.....	53
1.3.2. Echantillons de niveau 2 : stations écologiques.....	53
1.3.3. Echantillons de niveau 3 : éléments de secteur écologique.....	53
1.3.4. Echantillon de niveau 4 : secteur écologique.....	54
2 - Description des sites caractérisant les principaux modes d'organisation de la végétation contractée	54
2.1. Sites lourds (études fines de deux stations).....	54
2.2. Sites de transfert d'échelles (variabilités écologiques : latitudinale et pluviométrique).....	55
2.3. Unités témoins de sondage.....	56
2.4. Sites de validation de l'étude.....	56
2.4.1. Coordonnées géographiques des sites de validation.....	57
2.4.2. Hypothèses sur les paramètres écologiques.....	57

3 - Méthodes préliminaires de traitement des données cartographiques et télédélectées relatives au secteur étudié	58
3.1. Typologies proposées par Ambouta, d'Herbès <i>et al.</i>	58
3.2. Traitements cartographique et informatique des données spatiales	59
3.3. Vérité terrain et mesures complémentaires	60
3.4. Résultats préliminaires des traitements cartographiques	60
3.4.1. Estimation des surfaces et calcul du recouvrement végétal global	61
3.4.2. Calcul des étendues de la variabilité des structures végétales	61
3.5. Discussion des résultats préliminaires	62
4 - Méthodes de récolte des données de terrain	62
4.1. Mesures du cadre physique et des structures de la végétation	62
4.1.1. Méthodes de récolte des données mésologiques	62
4.1.1.1. Mesure des pentes longitudinales et latérales	62
4.1.1.2. Inventaire des types de croûtes et cartographie du modelé	62
4.1.2. Mesure des structures de la végétation au sol	66
4.2. Mesures et méthodes d'inventaire de la végétation ligneuse	66
4.2.1. Inventaire forestier classique	66
4.2.2. Cartographie du mode d'agrégation de la strate ligneuse	67
4.2.3. Etude de la distribution des principaux ligneux par dendrochronologie	67
4.3. Mesures et méthodes d'inventaire de la végétation herbacée	69
4.3.1. Relevé phytosociologique de la strate herbacée	69
4.3.2. Etude de la distribution des espèces herbacées dans les zones végétalisées	69
4.3.3. Mesure de la dynamique saisonnière de la strate herbacée	69
4.4. Méthodes de quantification de la production épigée ligneuse	70
4.4.1. Cubage et quantification de la phytomasse épigée globale	70
4.4.2. Elaboration de tarifs de cubage des peuplements	70
4.4.3. Méthodes d'étude directe de la productivité et des accroissements ligneux	71
4.4.4. Méthodes d'étude indirecte de la productivité et des accroissements ligneux	71
4.5. Méthodes expérimentales d'étude du fonctionnement hydrologique et biologique	72
4.5.1. Méthode d'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau de ruissellement	72
4.5.1.1. Effet de l'arrêt mécanique du ruissellement (Dispositif type "Seghieri")	72
4.5.1.2. Effet du piégeage des eaux de ruissellement (Dispositif type "Ichaou")	73
4.5.2. Etude de la dynamique des peuplements et des espèces ligneuses	73
4.5.2.1. Méthode d'étude de l'impact des prélèvements (coupes)	73
4.5.2.2. Méthode d'étude de l'intensité de l'activité biologique après paillage	73
4.5.3. Méthode d'étude des changements temporels par migration des zones boisées	74
4.5.4. Méthode d'étude de l'évolution des phénomènes de sénescence et de mortalité	75
4.5.5. Méthode d'étude des formes de régénération par excavation	75
5 - Démarche conceptuelle d'analyse des facteurs écologiques et des interactions	
5.1. Démarche hypothético-déductive adoptée	75
5.2. Discussions méthodologique et analytique	76
6 - Conclusion	76

CHAPITRE III : COMPENSATION ECOLOGIQUE : LE ROLE DU CADRE PHYSIQUE DANS LA REDISTRIBUTION DU FLUX HYDRIQUE DE SURFACE

1 - Structure spatiale du cadre physique	78
1.1. Données physiques	78
1.1.1. Données topographiques	78
1.1.2. Surfaces occupées par les types de croûtes d'érosion	79
1.1.3. Agencement des types de croûtes selon la pente	84
1.2. Discussion des résultats	89

2 - Efficacité du contrôle du flux hydrique de surface	91
2.1. Etude du mode de captage de l'eau de ruissellement.....	91
2.1.1. Efficacité théorique du système de récolte des eaux de ruissellement.....	91
2.1.2. Pluviométrie théorique des sites étudiés.....	91
2.2. Hétérogénéité des profils de sols en fonction de l'efficacité du système de récolte des eaux de ruissellement.....	94
2.3. Discussion des résultats.....	96
3 - Conclusion	96

CHAPITRE IV : CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES VEGETAUX DANS LES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES.....98

1 - Structure organisationnelle des trois modèles de distribution de la végétation des plateaux latéritiques	99
1.1. Etude et analyse des trois "patterns" au sol et sur image aérienne.....	99
1.1.1. Dénombrement, analyse des surfaces et des formes de bosquets à travers une fenêtre d'images aériennes de chacun des trois faciès.....	99
1.1.2. Reconnaissance au sol des structures organisationnelles à l'aide d'une méthode simplifiée.....	101
1.2. Résultats sur l'organisation des trois types de structures.....	102
1.2.1. Rapports caractéristiques définissant les niveaux de perception écologique et d'organisation spatiale (aux échelles des séquences et des unités fonctionnelles).....	102
1.2.2. Indice de diversité de Simpson (variabilité zonale des patterns).....	104
1.3. Discussion des résultats.....	105
2 - Structures démographique et agrégative des peuplements ligneux et herbacés ..	106
2.1. Résultats relatifs à la démographie et aux modes d'agrégation des ligneux.....	106
2.1.1. Densité ligneuse par unités de surface.....	106
2.1.2. Recouvrement des espèces et des peuplements ligneux.....	109
2.1.3. Niveaux d'intégration et modes d'agrégation par la structure verticale des ligneux.....	110
2.1.4. Structure horizontale : définition dendrochronologique de trois zones homogènes de répartition des principaux ligneux.....	11
2.1.5. Tendances des processus directionnels décrits par l'âge des ligneux.....	113
2.2. Résultats relatifs à la démographie et aux modes de distribution des espèces herbacées.....	117
2.2.1. Mise en évidence de trois zones homogènes définies par les herbacées.....	117
2.2.2. Groupes fonctionnels herbacés des zones homogènes.....	118
2.3. Résultats de l'étude de la composition taxonomique de la flore.....	121
2.3.1. Importance des taxons en présence.....	121
2.3.2. Diversité floristique comparée entre les faciès.....	121
2.3.3. Spectres biologiques des phytocénoses.....	123
2.3.4. Origine des flores et mode de répartition des groupes taxonomiques.....	124
2.4. Discussion des résultats.....	125
3 – Conclusion	127

CHAPITRE V : CONSEQUENCES SUR LE FONCTIONNEMENT, LA DYNAMIQUE ET LA PRODUCTIVITE DES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES.....130

1 - Répercussions dynamiques directes du fonctionnement hydrologique de surface	130
1.1. Résultats sur les effets de la dynamique du contrôle du flux hydrique de surface.....	130
1.1.1. Indice d'efficacité pluviale (IEP) relatif aux trois systèmes.....	130
1.1.2. Croissance comparée des ligneux.....	131
1.1.3. Surface colonisée par les herbacées en amont des dispositifs.....	131
1.1.4. Observations phénologiques comparées entre les trois dispositifs.....	132
1.2. Discussion des résultats.....	135

2 - Capacité de régulation et de régénération des systèmes en rapport avec le fonctionnement hydrologique et la biologie des espèces.....	136
2.1. Résultats relatifs à la dynamique des peuplements et des espèces ligneuses.....	136
2.1.1. Réponses des systèmes en rapport avec leur fonctionnement biologique....	136
2.1.1.1. Régénération ligneuse après coupe rase et exploitation par furetage.....	136
2.1.1.1.1. Croissance des souches après exploitation.....	136
2.1.1.1.2. Relation entre la hauteur de coupe et la croissance des rejets de souches.....	139
2.1.1.2. Vitalité ligneuse sans exploitation.....	142
2.1.1.3. Résultats relatifs à la vitesse de cicatrisation (5 ans après la coupe rase).....	143
2.1.2. Résultats relatifs à la réactivation du processus biologique par paillage.....	144
2.2. Résultats sur la dynamique saisonnière de la strate herbacée.....	144
2.2.1. Evolution démographique des individus.....	144
2.2.2. Reconstitution théorique de l'utilisation du milieu par la strate herbacée.....	146
2.3. Discussion des résultats.....	148
3 - Production biologique des trois systèmes écologiques.....	150
3.1. Production ligneuse.....	150
3.1.1. Résultats relatifs à la production épigée des ligneux découlant de l'efficacité hydrique et trophique des trois structures.....	150
3.1.1.1. Phytomasse épigée globale.....	150
3.1.1.2. Comparaison entre les volumes.....	152
3.1.1.3. Validité et limites de détermination de volume.....	154
3.1.1.3.1. Comparaison entre les volumes par hectare végétalisé.....	154
3.1.1.3.2. Imperfections et limites des tarifs proposés.....	155
3.1.2. Processus et mécanismes de croissance et de développement des ligneux.....	156
3.1.2.1. Productivité ligneuse brute estimée (en terme de bois-énergie).....	157
3.1.2.2. Productivité ligneuse résultant du suivi des paramètres dendrométriques les moins influencés.....	158
3.1.2.2.1. Accroissements courants du peuplement ligneux dans les parcelles témoins non exploitées.....	159
3.1.2.2.2. Accroissements moyens du peuplement ligneux après coupe rase.....	159
3.1.2.2.3. Accroissements moyens du peuplement ligneux après exploitation par furetage (coupe sélective).....	160
3.1.2.3. Productivité réelle en bois-énergie.....	161
3.2. Production herbacée.....	162
3.2.1 Résultats relatifs à la production des herbacées.....	162
3.2.1.1. Productions globale et spécifique par zones homogènes.....	162
3.2.1.2. Répartition taxinomique de la production par zones homogènes.....	162
3.2.1.3. Fraction consommable de la production herbacée par système.....	163
3.3. Discussion des résultats.....	164
4 - Dynamique des systèmes écologiques.....	166
4.1. Etude des mécanismes de succession végétale spatio-temporelle.....	166
4.1.1. Migration de la végétation et rôle dynamique de certaines espèces ligneuses	
4.1.1.1. Résultats des mesures de la migration des zones boisées.....	166
4.1.1.2 Résultats des mesures de la migration des espèces ligneuses.....	167
4.1.2. Mécanismes d'adaptation et de régulation de la population ligneuse.....	169
4.1.2.1. Résultats sur le rythme de la régénération, de la mortalité et de la sénescence.....	169
4.1.2.2. Liaison "mortalité - diamètre des tiges".....	169
4.1.2.3. Liaison "mortalité - espèces".....	170
4.1.2.4. Comptage des semis, des drageons, des marcottes et des rejets de souches après excavation.....	171
4.2. Discussion des résultats.....	172

5 - Changements temporels dus à l'impact des activités humaines influençant les systèmes écologiques	173
5.1. Tendances de variation des coefficients de survie des ligneux dans les 3 systèmes	173
5.2. Prélèvements humains déterminés par l'enquête " filière"	175
5.3. Discussion des résultats	176
6 - Conclusion	177
CHAPITRE VI : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET DISCUSSION GENERALE	184
1 - Intégration des paramètres de synthèse déterminant les modèles de structures du niveau de la station à celui de la région	183
1.1. Trois systèmes écologiques prédéterminent trois logiques de fonctionnement	183
1.2. Validation des paramètres écologiques vitaux et mise en évidence des relations entre structure, fonctionnement et dynamique à travers leurs réponses à différentes échelles	185
1.2.1. Réponse des attributs vitaux à l'échelle d'une station et d'un sous-secteur écologiques	187
1.2.2. Réponse des attributs vitaux à l'échelle du secteur écologique latitudinal et pluviométrique	187
1.2.3. Compensation des facteurs écologiques	187
2 - Confirmation d'hypothèses, réponses à certaines questions et perspectives d'applications utiles à l'aménagement forestier	189
2.1. Hypothèses construites et/ou validées	189
2.1.1. Hypothèse sur le fonctionnement biologique et hydrologique	189
2.1.2. Vérification de l'hypothèse de Noy-Meir (1973) relative à la productivité des systèmes contractés	189
2.1.3. Hypothèse de la migration des zones boisées	189
2.1.4. Hypothèse d'une conservation de la diversité	190
2.1.5. Hypothèse d'une résilience acceptable des systèmes face aux caractères climatiques hostiles	191
2.2. Applications déduites utiles à la gestion sylvo-pastorale	191
2.2.1. Régime forestier sans changement de la composition initiale des peuplements	191
2.2.2. Régime forestier avec adoption d'une nouvelle composition des peuplements	192
2.2.3. Durée de rotation et quota d'exploitation forestière	192
2.2.4. Utilisation des paramètres vitaux et simplification des inventaires forestiers classiques	193
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	194
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	200
BIBLIOGRAPHIE	209
ANNEXES	217
Annexe 1. Démarches conceptuelle et méthodologique utilisées dans les analyses, la mise en relation et la comparaison des résultats obtenus	218
Annexe 2. Liste des trente neuf espèces herbacées dominantes dans les quadrats	226
Annexe 3. Flore herbacée inventoriée dans les trois faciès	227
Annexe 4. Flore ligneuse inventoriée dans les trois faciès	230

- Tab.42 (a)** : Migration moyenne annuelle du peuplement dans les trois faciès (en m)
- Tab.42 (b)** : Migration du peuplement par zone homogène du faciès linéaire (en m)
- Tab.43 (a)** : Migration des espèces comparée dans les trois faciès (en m)
- Tab.43 (b)** : Migration des espèces par zone homogène du mode d'organisation linéaire (en m)
- Tab.44** : Répartition en pourcentage de la totalité des tiges mortes dans les trois faciès
- Tab.45** : Pourcentages de tiges mortes par espèce, par rapport à la mortalité totale.
- Tab.46** : Répartition des arbustes en fonction des deux modes de multiplication
- Tab.47** : Valeurs des niveaux de la courbe d'évolution des coefficients de survie par faciès
- Tab.48** : Appréciation des degrés de caractérisation des faciès par les critères et attributs vitaux
- Tab.50** : Hypothèses testées par les analyses, les comparaisons et les mises en relation des résultats

LISTE DES FIGURES

- Fig.1** : Répartition mondiale des zones à végétation contractée (d'après Valentin *et al.* 1999)
- Fig.2** : Estimation du coefficient d'infiltration (K_i) le long d'un transect à travers la brousse tigrée
- Fig.3** : Ensemble des profils d'humidité du sol mesuré dans le système sol nu-végétation
- Fig.4** : Localisation de la zone couverte par l'étude
- Fig.5** : Valeur moyenne comparée de l'humidité relative des stations de Tillabery, Niamey et Gaya (de 1951 à 1987)
- Fig.6** : Diagrammes ombrothermiques de quelques stations météorologiques
- Fig.7** : Régions naturelles du Niger occidental
- Fig.8** : Coupe géologique schématisée Ouest-Est du Niger occidental
- Fig.9** : Dispositifs emboîtés d'échantillonnage aléatoire stratifié
- Fig.10** : Tendances décrites par les coefficients de variation des structures par type de faciès
- Fig.11** : Tendances décrites par les indices de diversité zonale de la structure des trois faciès
- Fig.12** : Identification et cartographie des types de croûtes d'érosion d'un transect
- Fig.13** : Cartographie des ligneux dans les parcelles et les layons secondaires
- Fig.14** : Dispositif expérimental Type Seghieri (Site pilote de Banizoumbou)
- Fig.15** : Dispositif expérimental du type Ichaou (di)
- Fig.16** : Zone de sénescence d'une brousse tigrée typique (Site de Banizoumbou)
- Fig.17** : Pentes générales des sept plateaux pilotes
- Fig.18 (a)** : Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F1
- Fig.18 (b)** : Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F2
- Fig.18 (c)** : Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F3
- Fig.19 (a)** : Dispersion des pentes longitudinales des structures
- Fig.19 (b)** : Dispersion des pentes latérales des structures
- Fig.20 (a)** : Surface occupée par les croûtes en F1
- Fig.20 (b)** : Surface occupée par les croûtes en F2
- Fig.20 (c)** : Surface occupée par les croûtes en F3
- Fig.21 (a)** : Organisation des croûtes selon le modèle 1 (dans une structure linéaire à bandes larges)
- Fig.21 (b)** : Organisation des croûtes selon le modèle 2 (dans une structure linéaire typique)
- Fig.21 (c)** : Organisation des croûtes selon le modèle 3 (structure mixte de la végétation)
- Fig.21 (d)** : Organisation des croûtes selon le modèle 4 (cas d'une végétation diffuse)
- Fig.21 (e)** : Organisation des croûtes selon le modèle 5 (cas d'une brousse diffuse)
- Fig.22 (a,b et c)** : Etats de surface mettant en évidence le fonctionnement biologique et hydrologique des 3 faciès
- Fig.23 (a)** : Identification d'un faciès linéaire
- Fig.23 (b)** : Identification d'un faciès mixte
- Fig.23 (c)** : Identification d'une organisation diffuse

- Fig.24** : Concordance entre l'indice de Simpson et les modèles de correspondances des pentes
- Fig.25** : Fréquence des arbustes dans les Faciès
- Fig.26** : Fréquence des individus dans les Faciès
- Fig.27 (a)** : Distribution verticale des individus de F1
- Fig.27 (b)** : Distribution verticale des individus de F2
- Fig.27 (c)** : Distribution verticale des individus de F3
- Fig.28 (a)** : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation linéaire de la végétation
- Fig.28 (b)** : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation mixte de la végétation
- Fig.28 (c)** : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation diffuse de la végétation
- Fig.29 (a, b et c)** : Variation de la structure des âges des trois espèces : structure linéaire
- Fig.30 (a, b et c)** : Variation de la structure des âges des trois espèces : structure mixte (F2)
- Fig.31 (a, b et c)** : Variation de la structure des âges des trois espèces : structure "diffuse" (F3)
- Fig.32** : Similitude de la distribution des individus d'une zone homogène à une autre dans les 3 faciès
(A.F.C. sur les herbacées : projection des zones homogènes par faciès : Plan F1, F2)
- Fig.33** : Suivi de l'accroissement courant cumulé en six ans
- Fig.34 (a)** : Evolution de l'état physiologique des ligneux dans les témoins
- Fig.34 (b)** : Evolution de l'état physiologique des ligneux sous l'influence du dispositif type Seghieri
- Fig.34 (c)** : Evolution de l'état physiologique des ligneux sous l'influence du dispositif type Ichaou
- Fig.35 (a)** : Croissance en hauteur des rejets (six ans après l'exploitation par furetage)
- Fig.35 (b)** : Croissance en hauteur des rejets (six ans après coupe rase)
- Fig.35 (c)** : Effets coupe rase et exploitation par furetage sur la croissance en hauteur des rejets
- Fig.36 (a)** : Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F1)
- Fig.36 (b)** : Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F2)
- Fig.36 (c)** : Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F3)
- Fig.37 (a)** : Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F1)
- Fig.37 (b)** : Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F2)
- Fig.37 (c)** : Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F3)
- Fig.38** : Evolution de l'accroissement annuel de la surface terrière en 6 ans (parcelles non exploitées)
- Fig.39** : Accroissement cumulé en hauteur au cours des 6 ans (parcelles non exploitées)
- Fig.40 (a)** : Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F1
- Fig.40 (b)** : Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F2
- Fig.40 (c)** : Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F3
- Fig.41 (a)** : Progression annuelle des trois espèces dans les faciès (m)
- Fig.41 (b)** : Migration annuelle spécifique par zone homogène du faciès linéaire (F1)
- Fig.42** : Courbes d'évolution des coefficients de survie de peuplements des trois faciès
- Fig.43** : Critères et attributs vitaux définis dans l'optique de la caractérisation
ou la classification des faciès de brousses contractées.

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur la dynamique des structures forestières contractées des plateaux cuirassés de la partie occidentale du Niger. Ces structures sont typiquement constituées par une alternance de bandes de sol nu et de bandes de végétation. Dénommées "Brousses tigrées" en Afrique de l'ouest, elles sont également présentes en Afrique de l'est, au Mexique ou en Australie.

L'étude repose sur l'analyse de stations écologiques réparties sur un transect de 300 km, correspondant à un gradient pluviométrique compris entre 300 et 800 mm. Sur ce transect, les structures contractées, typiquement linéaires au nord, se modifient progressivement pour former des systèmes plus diffus au sud, où la structuration en bandes disparaît.

L'hypothèse, que les structures typiques en bandes assurent une correction du facteur pluviométrique permettant à la végétation de se développer dans des conditions écologiques *a priori* défavorables, est avancée. Cette hypothèse est testée par l'étude du cadre physique à travers le rôle qu'il joue dans la redistribution du flux hydrique en surface et par-là même, sur la végétation et son organisation, sur la flore et enfin sur la productivité sylvo-pastorale.

Les résultats d'expérimentations, de mesures effectuées sur des ligneux (phytomasse, productivité, croissance) et la prise en compte de la flore herbacée (associations, exigences écologiques) permettent de conclure que les systèmes contractés typiques des zones climatiquement défavorables (300 à 400 mm de précipitations), récrément par leur structure des conditions écologiques similaires à celles trouvées dans des zones plus favorables où il pleut environ 800 mm.

Il en résulte, des niveaux de productivité relativement élevés, ainsi qu'une stabilité de ces formations végétales particulières des zones semi-arides, ce qui remet en question la vision qu'on en avait en les assimilant à une dégradation du milieu. La stabilité serait d'autant plus grande que les trois espèces ligneuses dominantes semblent se multiplier principalement de manière végétative (rejets de souche, marcottes, drageons) et très peu générativement (semis naturels).

MOTS CLÉS : Niger ; Sahel ; plateaux cuirassés ; structures végétales contractées ; brousses tigrées ; fonctionnement ; dynamique ; productivité ; *Guiera senegalensis* ; *Combretum micranthum*; *Combretum nigricans*.

SUMMARY

This work puts emphasis on the "Tiger Bush" in the western regions of Niger. These structures are localised in the plateaux, and are typically comprised of densely vegetated bands regularly alternating with bare areas. Known as "Tiger Bush" in West Africa they are also found in East Africa, Mexico, and Australia. The study is focused upon the analysis of ecological stations located along a transect of 300 km which is characterized by a rainfall gradient between 300 and 800 mm. In this area, the "contracted" structures are typically linear on the north, then they gradually change to form the more diffused systems in the south where the band structures finally disappear.

The hypothesis according to which the alternante band structures is a water harvesting system is now postulated. The central point is that the natural "water harvesting" systems allow the existence of species and regulate the vegetation to develop under unfavourable ecological conditions. This hypothesis has been tested by the study of the topographic and edaphic features where it controls rainfall flux on surface. Hence its role on the distribution of vegetation, on the flora, and finally on the productivity was defined.

The results of the experiments and measures of its effectiveness on the growth, and by taking into account the flora (associations and ecological needs) lead us to the conclusion that the defavourable climatic systems (300 to 400 mm of precipitation) recreated by their structures ecological conditions similar to those found in more favourable zones, where it rains on average 800 mm. As a direct consequence, there is an increasing relative level of productivity, and hence the previous data that the alternate structure represents ecological damages become controversial. The stability of the vegetations was reflected by the vegetative growth of the 3 major species, while sexual reproduction was decreasing.

Key words : Niger , Sahel, plateaux, banded vegetation patterning, tiger bush, functioning, dynamic, productivity, *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*.

INTRODUCTION

*Toutes les choses sont possibles à celui
qui croit, encore plus à celui qui espère,
encore plus à celui qui aime...*

Théodore Monod (Terre et Ciel, 1977)

INTRODUCTION : POUR UNE MEILLEURE COMPREHENSION DES GROUPEMENTS VEGETAUX CONTRACTES DES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

"Tout voyageur arrivant en temps de bonne visibilité par avion à Niamey sera frappé par l'aspect singulier du terrain survolé. La brousse, vue du ciel, forme des bandes alternativement nues et couvertes, à peu près parallèles entre elles, mais pouvant être autant droites que courbes, aspect singulier du paysage, visible aussi sur les photographies aériennes et évoquant le pelage d'un tigre" (Ambouta, 1984).

Il s'agit de brousses tigrées, écosystèmes contractés typiques dont l'originalité résulte de la succession de zones nues jouant un rôle d'impluvium et de zones végétalisées immédiatement situées en aval. Cette situation découle de certains processus et constitue un cadre de relations écologiques spatio-temporelles étonnantes que le monde scientifique a cherché durant ces dernières décennies à mieux comprendre et expliquer. Des recherches sur des domaines et sur des systèmes contractés différents se poursuivent afin de reconstituer leur genèse et de mieux appréhender leur fonctionnement et leur dynamique.

Le concept des trois faciès (linéaire, mixte et diffus) jouant un rôle important dans ce travail, il convient d'être annoncé de façon très explicite dès cette étape. Selon Godron (1995), le concept de faciès de végétation combine celui de formation végétale et d'espèces dominantes. La formation végétale traduit l'aboutissement des effets du climat et des influences de l'homme sur la végétation. Les espèces dominantes sont les espèces les plus importantes, qui marquent l'ensemble de la station et qui caractérisent le paysage végétal, par leur taille, leur nombre, leur forme, la durée de vie des individus et les actions qu'elles exercent.

Quelques synonymes de termes les plus utilisés dans ce document, sont proposés afin de faciliter la lecture :

1 - Faciès : mode d'organisation de la végétation ; système écologique ; structure de la végétation ; type de contraction végétale ;

2 - Brousses Tigrées : désignent d'une façon générale les formations végétales contractées de plateaux ;

3 - Systèmes structurés (faciès 1 ou F1) : tous les faciès ayant un mode d'organisation végétale linéaire, en arc (Brousse tigrée typique, brousse tigrée à bandes larges) ou en rosace ;

4 - Systèmes diffus (faciès 3 ou F3) : faciès sans mode d'organisation particulière de la végétation. La brousse est tachetée ou diffuse avec des bosquets anastomosés. Les structures correspondantes sont ponctuées, mouchetées (Ambouta, 1984) ;

5 - Systèmes mixtes (faciès 2 ou F2) : faciès ayant un mode d'organisation végétale intermédiaire entre les systèmes structurés et diffus. Les unités de végétation sont des mélanges de bosquets plus ou circulaires et des arcs de végétation.

1 - Principaux groupements végétaux contractés et leur distribution dans le monde

Des efforts de plus en plus soutenus sont entrepris depuis plus de deux décennies (Le Floc'h *et al.* 1992) pour améliorer les connaissances relatives aux systèmes des zones arides et semi-arides du monde et pour permettre d'envisager leur gestion durable. De ces formations végétales, celles dites "contractées", ont été particulièrement étudiées par de nombreux auteurs, depuis les mosaïques

à deux phases, mais sans un niveau répétitif d'organisation, jusqu'aux faciès très structurés en bandes où alternent des zones nues et des zones couvertes de végétation.

Le modèle de configuration de la végétation en bandes qui semblent parallèles aux courbes de niveaux, est dénommé "brousse tigrée" (Clos-Arceuduc, 1956) en Afrique de l'Ouest, "vegetation arcs" ou "stripes" (Mac Fayden, 1950 et Worral, 1960) en Afrique de l'Est et au Mexique, "grove-intergrove pattern" (Greene, 1992) en Australie. Cette forme de configuration tout à fait singulière par sa physionomie (Saadou, 1997), appelée pour la première fois "brousse tigrée" par Clos-Arceuduc (1956), a été caractérisée par de nombreux auteurs. Pour l'Afrique, citons Mac Fayden (1950) en Somalie ; Worral (1960) au Soudan ; Audry et Rossetti (1962) en Mauritanie ; Boaler et Hodges (1964) en Somalie ; Boudet (1972) au Mali ; Leprun (1992) au Mali et au Burkina Faso ; pour l'Australie, Tongway et Ludwig (1994), Greene (1992) ; pour le Moyen-Orient, White (1969) en Jordanie, enfin pour le Mexique, Cornet *et al.* (1992), Mauchamp *et al.* (1994).

Au Niger, Clos-Arceuduc (1956), puis White (1970, 1971) ont été les premiers à mener des travaux sur ces structures, précédant les travaux pédologiques d'Ambouta (1984). Ces structures, identifiées principalement sur les plateaux latéritiques, ont également été étudiées ces dernières années par Saadou (1993), Galle *et al.* (1997), Thiery *et al.* (1995), Ichaou et d'Herbès (1997). Des hypothèses ont été émises sur les possibilités de transition entre les différentes formes (Leprun, 1979 ; Serpenté *et al.* , 1992, Ambouta, 1984) et sur des variations qui seraient liées à la latitude et aux conditions topographiques.

A l'échelle mondiale et en fonction de l'importance relative des ligneux (arbres et arbustes) et des herbacées constituant les arcs ou taches de végétation, d'Herbès et Ambouta (1996) distinguent trois grands types de structures contractées que Valentin *et al.* (1999) localisent précisément (**fig.1**) dans certaines zones (**tab.1**) :

- **structure mixte** : les strates arbustives et herbacées sont distribuées dans l'ensemble de la bande de végétation (exemple des brousses tigrées du Mexique) ;
- **structures arbustives et arborées** : les arbres et arbustes sont la composante la plus importante du couvert. C'est le cas des brousses tigrées sahéliennes et australiennes dont les arbustes sont d'ailleurs souvent précédés d'une frange herbacée d'annuelles pour les premières et de pérennes pour les secondes ;
- **structure herbacée** : les arbustes et arbres sont disséminés dans une dense couverture d'herbacées annuelles ou pérennes (exemple des arcs de végétation en Somalie), voire inexistants (exemple du paysage d'arcs herbacés du Butana au Soudan).

Enfin, il faut signaler qu'en dehors de ces formes très courantes de contraction de la végétation, d'autres types existent, notamment les formations contractées à dynamique éolienne, localisées sur des sols dunaires en zone sahélienne et dans certaines parties du continent américain (contraction très particulière causée par l'action des grands vents).

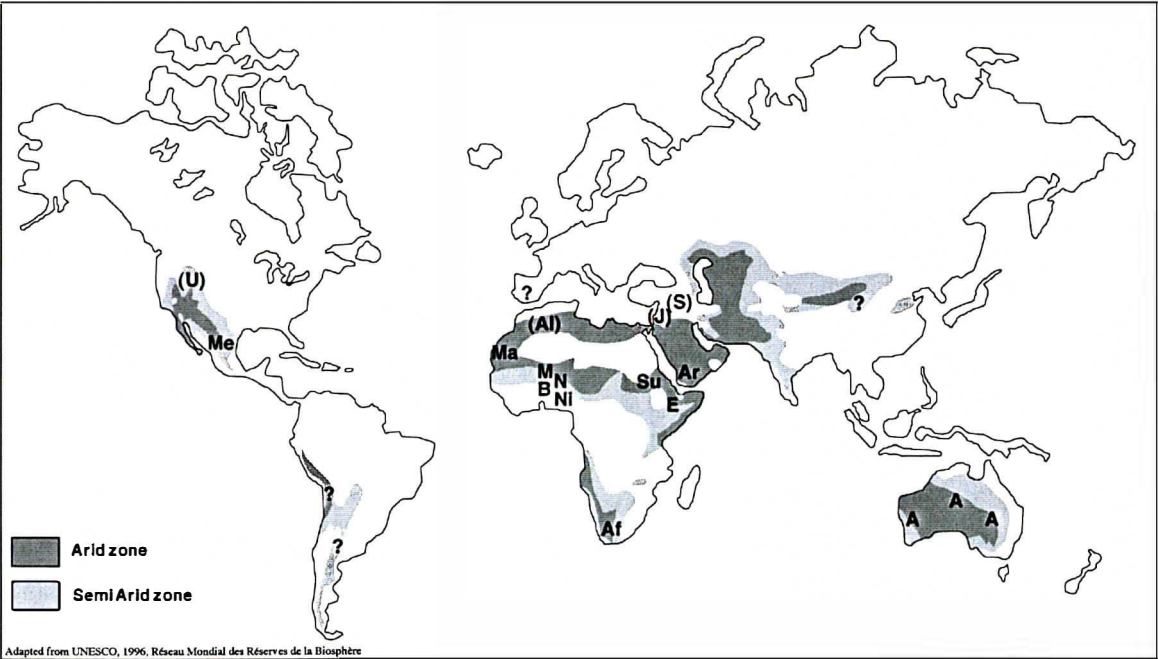


Fig.1 : Répartition mondiale des zones à végétation contractée (d'après Valentin *et al.* 1999)

Tab.1 : Systèmes contractés dans le monde. Caractères climatiques et édaphologiques (modifié et complété d'après Valentin *et al.* 1999)

Région	Zone	Climat	Pente (%)	Sol
Afrique de l'Ouest	Niger -Nord Nigéria	250 à 750 mm Pluie estivale unimodale	<1%	Peu épais, graveleux, instable, encroûté
	Mauritanie	200 à 300 mm Pluie estivale unimodale	0,3	Peu épais, graveleux, massif, accumulations sableuses dans les bandes
	Burkina Faso	600 mm Pluie unimodale	1 à 3	Sol peu épais à cuirasse peu profonde, ou sol épais, argileux, instable, encroûté
	Mali	200 à 500 mm Pluie estivale unimodale	1 à 2	Peu épais
	Sénégal (Ferlo)	200 à 400 mm Pluie estivale unimodale	?	Sols hydromorphes Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés. Sols bruns subarides
Afrique de l'Est	Somalie	125 à 300 mm Pluie estivale unimodale	0,2 à 1	Texture fine, croûte en surface, horizon A friable et B compact
	Soudan	100 à 500 mm Pluie estivale unimodale	0,2 à 1	Texture variée, croûte en surface
Australie	Ouest, Centre, Est	200 à 250 mm Pluie estivale unimodale	0,2 à 2	Structure massive, Texture grossière à moyenne devenant plus fine en profondeur, surface encroûtée
Amérique du Nord	Mexique	280 mm Pluie estivale unimodale	<1	Texture limoneuse à argilo - limoneuse, surface encroûtée

N.B. : des faciès similaires sont aussi signalés dans les déserts en Jordanie, Syrie, Arabie Saoudite, Algérie, Maroc, U.S.A. *etc.*

2 - Contraction de la végétation : atout écologique ou dégradation du système ?

Un faciès de brousse contractée est une mosaïque constituée de zones couvertes de végétation et d'autres nues. Pour certains auteurs, ce mode d'organisation de la végétation serait intimement lié aux conditions d'aridité, de sécheresse et de désertification. Ces dernières années l'unanimité semble être faite pour admettre que cette forme d'organisation végétale résulterait plutôt d'un jeu d'équilibre entre le climat, le sol, la végétation et l'homme.

La complexité et l'ampleur des questions relatives à la contraction de la végétation obligent à ne pas se contenter d'explications trop rapides, dont on n'a pas mesuré l'étendue. Le problème d'aridité touchant près de la moitié des pays du monde, les systèmes arides et semi-arides devraient être scientifiquement mieux connus. Ceci permettrait de mieux apprécier le degré de fragilité de ces systèmes et les répercussions négatives sur le potentiel de production.

L'analyse et la critique de quelques références marquantes dégagent des mécanismes explicatifs que Le Houérou (1992) résume bien : il n'existe pas de climat stable dans l'absolu, seulement par référence à une échelle de temps bien déterminée. Les zones arides actuelles n'ont pas toujours été arides, notamment au cours des derniers millions d'années où elles ont connu de nombreuses alternances de climats hyper-arides, arides, semi-arides et même sub-humides. Cet auteur indique par ailleurs que jusqu'à présent aucune indication d'évolution climatique n'a été observée depuis 2 500 ans. Seules quelques périodes de sécheresse prolongée sont notées dont la plus longue et la mieux connue est celle du Sahel de 1970 à 1985. Les variations de la température ne semblent pas aussi systématiques et irréversibles car les fluctuations accusées sont aléatoires et ne traduisent pas une tendance irréversible et multiséculaire.

Si la sécheresse ne semble pas être le facteur unique dans la genèse de la dégradation des écosystèmes arides et semi-arides, il convient de rechercher d'autres indicateurs qui renseigneraient mieux sur d'éventuelles tendances de l'évolution de ces systèmes.

C'est pourquoi, quoique la contraction des formations végétales dans les zones arides et semi-arides soit souvent assimilée à une dégradation du milieu, notre investigation s'inspire de constats et conclusions de certains auteurs, pour contribuer à la réflexion en proposant des éléments de réponse :

- Leprun (1992), Saadou (1997) et de nombreux auteurs, tant en Afrique, Mac Fadyen (1950), Boaler and Hodges (1964), White (1971) et Ambouta (1984), que sur d'autres continents, Tongway et Ludwig (1994) pour l'Australie, Cornet *et al.* (1992) pour le Mexique, pensent que la contraction de la végétation constitue un atout dont s'est dotée la nature pour son maintien. En effet, la présence de deux zones traduit un fonctionnement hydrologique permettant à la zone nue de jouer un rôle d'impluvium indispensable à la zone de végétation. Cette disposition permet à la végétation de bénéficier de ressources en eau bien supérieures à celles apportées par la pluie. En conséquence, certaines espèces abritées par ces milieux prospèrent dans des zones climatiques qui semblent *a priori* inaccessibles ;

- Noy-Meir (1973) admet aussi que la contraction de la végétation en zone aride est non seulement une nécessité, mais peut également créer les conditions d'une production supérieure à celle d'une formation végétale uniformément répartie. Cette hypothèse a été vérifiée par Ichaou de 1995 à 1997 à l'échelle de stations des plateaux du Sahel nigérien (Ichaou et d'Herbès, 1997);

- selon Le Houérou (1974, 1976a, 1979 et 1987) ; Boudet (1977) et Leprun (1978), les sols à cuirasse ferrugineuse des tropiques arides sont susceptibles d'assurer rapidement un équilibre biologique lorsque la pression anthropique est annulée ou réduite, et ceci même sous des pluviométries annuelles de 50 à 100 mm, aussi bien sous les tropiques qu'en zone désertique méditerranéenne ;

- l'opinion unanime de plusieurs spécialistes (géographes, écologues, agronomes, climatologues, hydrologues et sociologues) qui ont étudié le phénomène de sécheresse sur le terrain (*in* Le Houérou, 1987) porte à croire que la sécheresse (donc l'aridité) ne constitue pas l'essentiel des facteurs de dégradation des potentiels biologiques et de la désertification, car en l'absence de pression anthropique, les écosystèmes des zones arides sont doués de la résilience nécessaire pour surmonter les crises climatiques. Ces systèmes se sont maintenus pendant des siècles, voire des millénaires, et se sont adaptés ;

- certains auteurs comme Floret et Pontanier (1984) montrent que l'aridité climatique à l'échelon régional peut être accentuée ou atténuée par le facteur sol. On définit alors une aridité d'origine édaphique qui à moyenne échelle prend en compte la redistribution de l'eau de pluie par les facteurs édaphiques. C'est aussi l'avis de Claude (1992), qui pense que le constat d'une tendance générale à l'aridification due à la diminution de la pluviométrie doit être nuancé et accompagné d'une bonne connaissance des conditions locales.

Ces quelques constats et conclusions plaident en faveur d'études plus détaillées sur ces types de formations végétales qui vraisemblablement sont le résultat d'un équilibre délicat entre les quatre facteurs nommés ci-dessus qui sont : le climat, le sol, la végétation et l'homme.

3 - Différentes hypothèses

Il existe deux principales hypothèses concernant la formation de ces brousses :

- la transformation (ou la dégradation) d'une brousse initiale diffuse sous l'influence de facteurs climatiques et anthropiques. Les formations contractées dériveraient alors d'une savane arbustive non contractée, ceci sous l'effet d'une aridification progressive des conditions climatiques ;

- l'hypothèse inverse voudrait que sur une longue période leurs formations remontent à la dernière phase désertique du quaternaire récent qui a affecté le Sahel actuel. La contraction de la zone désertique s'est alors étendue vers le Nord, lors du passage du climat saharien au climat sahélien.

Face à ces deux hypothèses, si plusieurs tentatives d'explication de cette genèse ont été données, insistons sur celle qui a le plus évolué pour tendre vers l'hypothèse la plus généralement admise. Clos-Arceuduc (1956), Boaler et Hodges (1962), Hemmings (1965), White (1969), Boudet (1971), Dulieu *et al.* (1977), Le Houérou (1976a et 1981), Floret *et al.* (1977) rapportent que dans les zones arides et semi-arides, les sols présentent généralement une texture de l'horizon de surface qui est moyenne ou fine, d'où leur glaçage superficiel conduisant à une pellicule de battance. Une fois que cette dernière est formée, les argiles et limons fins libérés par le choc des gouttes de pluie, viennent obstruer les pores de l'horizon sous-jacent rendant le sol lisse, imperméable et stérile. Les plantes, en particulier les arbres, arbustes et arbrisseaux y meurent massivement. C'est un des principaux mécanismes de la formation des brousses tigrées, des steppes tigrées et de la dénudation des vastes territoires dans toutes les zones arides du monde. Ces brousses et steppes tigrées sont un

cas particulier de ce phénomène où se combinent les effets de l'érosion régressive en nappe sur les glacis d'érosion avec le dépôt local de sédiments en courbe de niveau avec ou sans intervention éolienne.

Les apports de Boulet (1971) et de White (1986) indiquent que le faciès de brousse tigrée, tout en étant issu de la désertification du Sahel et de certaines zones du monde, est conditionné par certains paramètres qui concourent pour justifier son origine : surfaces limoneuses, peu perméables et une faible pente (<1%). La discontinuité du couvert et la mise en place des bandes boisées, une fois en place, permettent à ces dernières de se déplacer alors lentement en remontant la pente générale grâce à un phénomène de colonisation de la bande nue par un front pionnier (Hemming, 1965, White, 1970, Ambouta, 1984, Montana, 1992).

A l'heure actuelle, l'hypothèse la plus admise est celle de Raunet (1985) et de Thiery *et al.* (1995) qui considèrent que l'écoulement unidirectionnel serait le seul facteur déterminant le fonctionnement de ces formations contractées et de là leur genèse. Un modèle mis au point par Thiery *et al.* (1997) pour simuler l'origine des bandes de végétation, met en évidence après reconstitution toutes les phases de cette genèse en les reliant à un mode de fonctionnement fondé uniquement sur l'écoulement unidirectionnel de l'eau en surface.

4 - Connaissances fonctionnelles déjà acquises et postulats de base

De nombreux auteurs se sont penchés un peu partout sur l'étude du fonctionnement des écosystèmes contractés. Parmi ceux-ci citons en Australie, Dunkerley *et al.* (1995) ; au Burkina, Serpantié *et al.* (1992), Couteron *et al.* (1996) et Ouédraogo (1997) ; pour le Mexique, Cornet (1992) , Cornet *et al.* (1992), Mauchamp (1992), Mauchamp *et al.* (1993 et 1994) ; au Niger, White (1971), Von Bern (1979), Raunet (1985), Courault *et al.* (1991), Thiéry *et al.* (1995), Galle *et al.* (1993 à 1997), d'Herbès *et al.* (1997), Ehrmann (1994 et 1999), Ambouta (1996), Ichaou (1996), Saadou (1997), Valentin , d'Herbès et Poesen (1999), Valentin et d'Herbès (1999) et Malam Issa *et al.*, (1999) ; au Soudan, Worral (1960) ; en Somalie, Boaler et Hodge (1964).

Dans la plupart de ces études, les hypothèses ont principalement trait au fonctionnement hydrologique. De très rares hypothèses d'un fonctionnement biologique et/ou pédologique ont été émises. A l'heure actuelle, il est admis que la pente et la pluviométrie à travers les modalités de ruissellement et d'infiltration de l'eau sont les principaux facteurs qui déterminent le fonctionnement et la genèse de ces systèmes.

Le bilan hydrique du mode d'organisation linéaire de la végétation contractée a été bien étudié. Mauchamp (1992), Delhoume (1995) Cornet *et al.* (1992), Cornet *et al.* (1981 et 1992), Galle *et al.* (1999) ont mis en évidence tant au Niger qu'au Mexique des variations de la disponibilité en eau, selon que l'on se trouve en zone nue ou couverte de végétation (**Fig. 2 et 3**). Ils constatent tous que dans la bande nue, l'infiltration de l'eau est fortement réduite par l'encroûtement de la surface du sol. La faible pente produit un ruissellement en nappe. Le bilan hydrique déficitaire empêche la végétation de s'installer. Dans la bande boisée, cette infiltration est plus importante, mais elle n'est cependant pas homogène. Elle augmente progressivement de la limite amont (zone pionnière ou front pionnier) pour être maximale dans le centre (cœur du fourré ou sous-bois où la micro-faune du sol favorise le développement d'une macro-porosité) et devenir presque nulle en aval (zone sénescence).

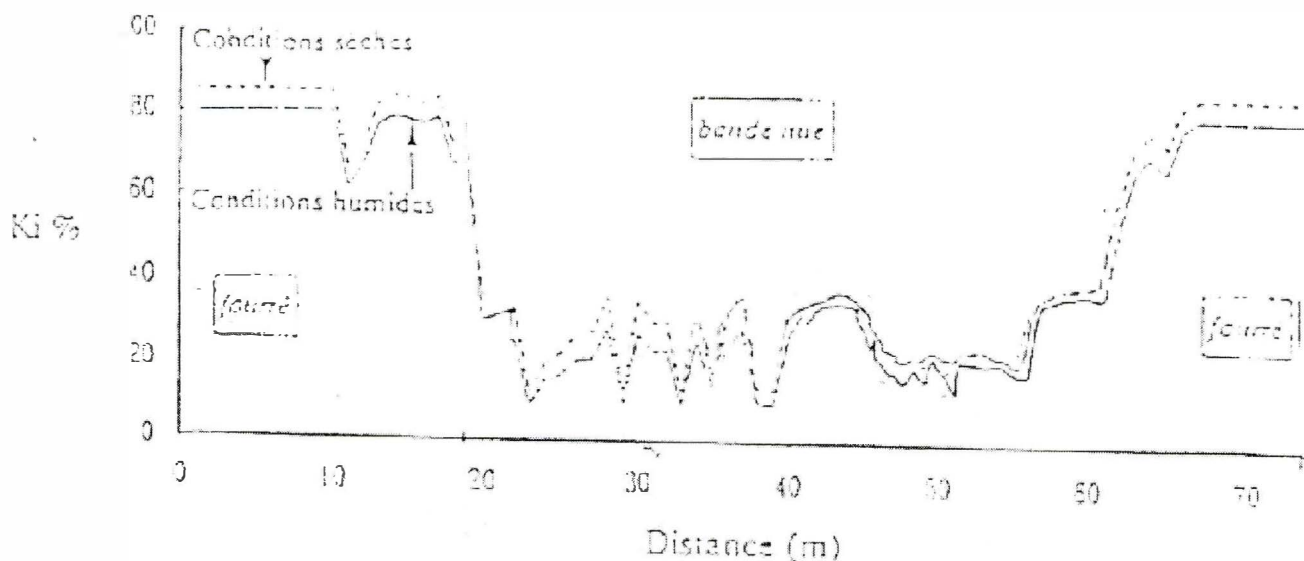


Fig.2 : Estimation du coefficient d'infiltration (K_i) le long d'un transect à travers la brousse tigrée (à l'aide de la typologie de Casenave et Valentin, 1989, in Courault *et al.* 1990)

Ces travaux s'accordent avec ceux de nombreux auteurs qui pensent qu'en zone aride et semi-aride, les variations de la disponibilité en eau du sol sont une des principales causes de l'hétérogénéité spatiale des communautés végétales. Il en est de même dans le modèle de simulation de la genèse des bandes de végétation contractée tigrée de Thiéry *et al.* (1995), à travers lequel les caractéristiques d'alternance de bandes nues et de bandes boisées de la brousse tigrée nigérienne ont été perçues comme une série de processus hydrologiques bien définis.

Aussi, l'état des connaissances actuelles permet d'une part de penser qu'il n'existe pas d'évolution pédologique sensible, sauf par la végétation elle-même et que d'autre part le ruissellement se voit attribuer un rôle prépondérant dans le fonctionnement de ces systèmes. Dès qu'il y a accumulation de sable ou une pente ne permettant pas un écoulement unidirectionnel, il n'y aurait plus de contraction. Malheureusement si le fonctionnement de la brousse à structure linéaire est bien documenté au Niger, aucune étude du fonctionnement en particulier hydrologique des organisations moins ou non structurées n'a été à notre connaissance faite. Les modes de contraction de la végétation s'échelonnent en général sur un gradient latitudinal, moins marqué par exemple dans le Gourma malien (Leprun, 1979) et le Yatenga burkinabé (Serpantié *et al.*, 1992) ou le Kordofan soudanien. Dans la partie occidentale du Niger (Ambouta, 1984), ce gradient semble plus marqué. La contraction qui commence au sud du 13^{ème} parallèle nord, où la couverture végétale est une formation claire du type savane homogène (près de 750 mm de pluie), disparaît au nord du 15^{ème} parallèle quand les précipitations insuffisantes (moins de 300 mm) et aléatoires ne permettent plus le développement de ligneux sur les plateaux.

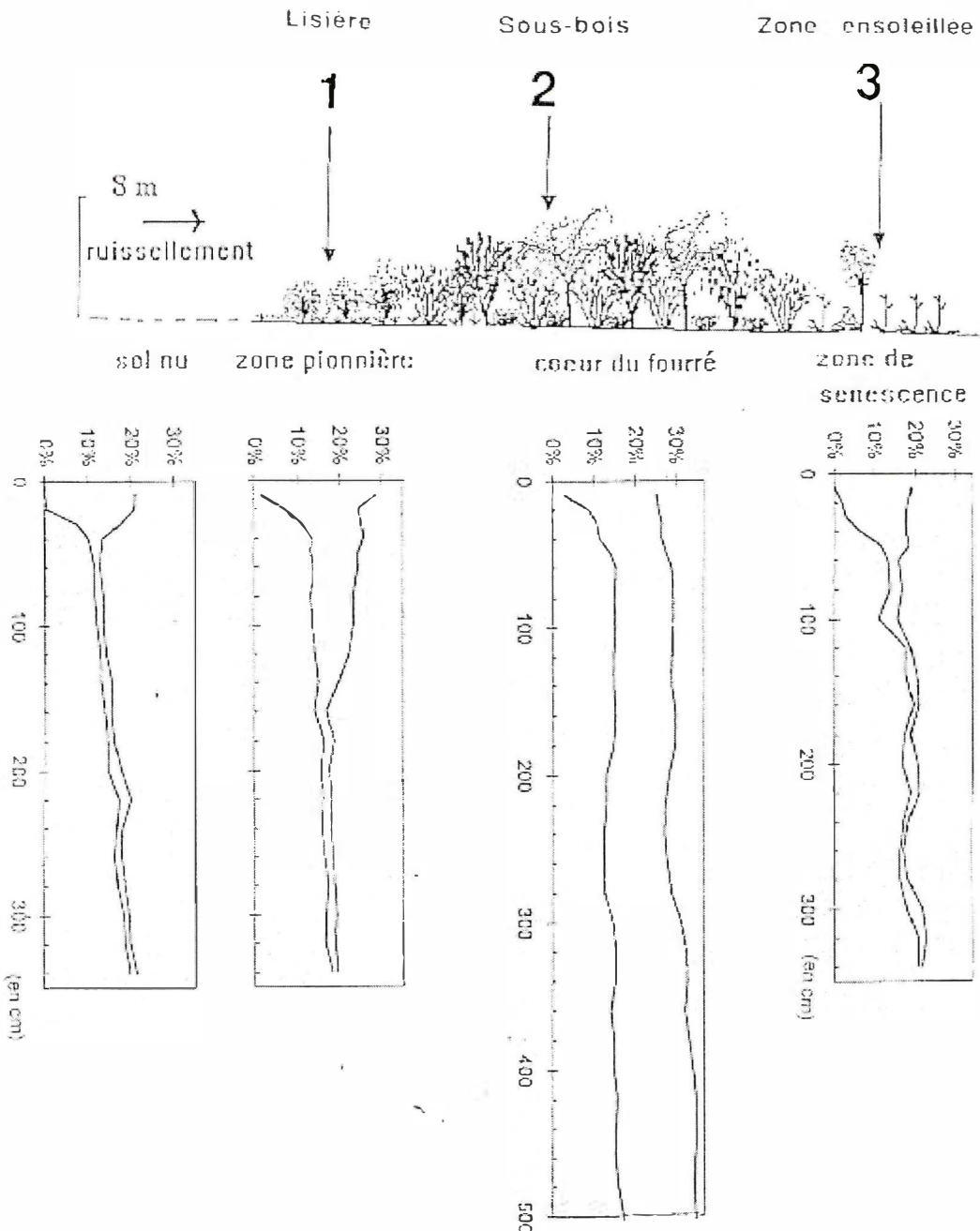


Fig.3 : Ensemble des profils d'humidité du sol mesuré dans le système sol nu-végétation (d'après Galle *et al.* 1997). Les emplacements des quadrats pour l'inventaire des espèces herbacées sont numérotés de 1 à 3.

Cette raison justifie l'objet de cette étude qui vise à mieux comprendre le fonctionnement sous les effets combinés topographique, hydrologique et biologique de ces structures linéaires et, par analogie expliquer celui des structures moins organisées. A cet effet, la cartographie et le suivi de l'évolution des états de surface (croûtes d'érosion notamment), les relevés de pente, ainsi que l'étude détaillée des données biologiques, donneraient des indications précieuses. Des résultats obtenus par Albergel *et al.* (1992) sous pluies simulées, ont montré que la capacité d'infiltration dans la zone sahéenne paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique, croûtes superficielles) qu'à la nature des couches internes de la couverture pédologique.

Il est supposé que la structure de la végétation, sa dynamique et sa productivité sont des réponses à l'infiltration différentielle dans l'espace de l'eau d'écoulement en nappe, dont la conséquence directe est un fonctionnement biologique particulier pour chacun des systèmes

5 - Conceptualisation de la problématique

La problématique de ce travail se fonde sur trois concepts d'écologie définis par Forman et Godron (1986) pour caractériser les trois composantes d'un paysage :

* **la structure** : elle représente l'ensemble des relations spatiales existant entre différents écosystèmes. C'est aussi la distribution d'énergie, de matières, d'organismes selon les formes, les tailles, le nombre, la nature et la configuration des composants ;

* **le fonctionnement** : c'est l'ensemble des interactions entre les éléments de l'espace. Il se traduit par des flux d'énergie, de matières, d'organismes entre les systèmes écologiques ;

* **la dynamique** : c'est la résultante des modifications dans le temps de la structure et du fonctionnement de la mosaïque écologique. Des seuils critiques définissent les niveaux au delà desquels les processus écologiques subissent des changements quantitatifs et qualitatifs déterminants.

Ce travail se propose donc d'approfondir les connaissances concernant les structures contractées sahéliennes de plateaux de l'ouest nigérien. Pour y parvenir, la problématique scientifique est relative aux trois principaux modes d'organisation végétale de plateaux et leur logique de fonctionnement biologique et hydrologique supposée aussi différente. Pour dégager les répercussions fonctionnelles qui traduisent la dynamique, l'étude s'appuie sur les trois composantes définies, afin de répondre :

- **à une question centrale** : sur les plateaux de l'ouest du Niger y a-t-il une configuration donnée de facteurs écologiques pour qu'une structure de contraction de la végétation soit plus favorable que d'autres ?

- **à quatre questions de deuxième ordre**, qui permettraient d'appréhender les processus biologiques des trois systèmes (diversité, résilience, production, stabilité) :

- la contraction de la végétation, constitue-t-elle une dégradation du milieu ? un atout écologique ? ou une nécessité pour se maintenir ?

- existe-t-il une corrélation directe entre un mode d'organisation de la végétation, son mode de fonctionnement et sa dynamique ?

- jusqu'à quelle échelle d'espace, les trois structures de la végétation et leurs niveaux d'organisation se hiérarchisent-ils ? et à quelle vitesse de fonctionnement les "patterns" se forment et se maintiennent ?

- quels effets anthropiques ou impacts peuvent moduler le fonctionnement de ces structures ?

Cette conceptualisation de la problématique définit au préalable des axes de recherche sur lesquels s'articulent les hypothèses opérationnelles à tester et détermine différentes échelles de perception écologique à étudier : élément de station écologique, station écologique, sous-secteur écologique et secteur écologique.

La démarche méthodologique considère la dynamique et la productivité dans le sens large des concepts, la productivité étant une fonction de la dynamique. Après cette considération, le choix judicieux des variables quantitatives prises en compte et se rapportant à telle ou telle composante du

paysage, pour analyser l'un ou l'autre des modes d'organisation de la végétation, devrait rendre compte autant que possible des modifications dans le temps de la structure et du fonctionnement des trois systèmes. A cet effet, l'emploi combiné de dispositifs forestiers et écologiques, a permis de constituer un cadre approprié de travail. C'est pourquoi le choix d'indicateurs les plus sensibles et les plus faciles à quantifier a été fait. Ce choix d'indicateurs porte sur la couverture végétale et le modelé. De leurs relations réciproques apparaîtront les changements du recouvrement végétal, de la composition floristique (dynamisme et succession), de la distribution spatiale des groupements, de l'évolution de la biomasse et de la productivité (en fonction de l'indice d'efficacité pluviale), ainsi que les changements dans la phénologie des espèces.

Une forte hiérarchisation adoptée des échelles d'échantillonnage et d'analyse a permis de dégager comment se comportent les facteurs du milieu en fonction des variables essentielles qui constituent la typologie de base. La compréhension des interactions est envisagée depuis le niveau élément de la station écologique jusqu'à celui de l'échelle régionale. Les agrégations successives des informations recueillies par niveau d'échantillonnage permettent la généralisation des conclusions de nos analyses dans un domaine de validité acceptable. C'est pourquoi, les outils d'analyse, de synthèse et les méthodes d'interprétation ont été minutieusement choisis pour mettre en évidence les interactions.

Cette procédure explique en partie la mouture de la thèse en étapes successives. Partant de l'état des connaissances permettant d'améliorer la compréhension des formes de contraction de la végétation dans les zones arides et semi-arides, il est procédé à une confrontation des considérations générales de ces systèmes aux nécessités d'étude dans cette thématique. Ceci a permis de poser la problématique et de formuler les hypothèses de travail sur la base des connaissances générales du milieu (chapitre I). Le chapitre II présente les méthodes d'étude des dispositifs définis selon les échelles hiérarchisées d'échantillonnage et qui ont permis de procéder à des analyses et des synthèses à chacun des niveaux de perception. Le chapitre III met en évidence l'existence d'une compensation écologique dans ces milieux, à travers le rôle du cadre physique dans la redistribution du flux hydrique de surface. De cette compensation écologique résultent des conséquences de la distribution des végétaux dans les trois faciès (chapitre IV), sur le fonctionnement, la dynamique et la productivité des trois systèmes écologiques (chapitre V). Enfin, une synthèse des résultats sous forme d'une discussion générale est présentée au chapitre VI. Dans la conclusion générale, il est fait des propositions de gestion rationnelle de ces milieux économiquement et écologiquement importants pour le Niger. Des perspectives scientifiques sont également formulées dans le but de poursuivre cette étude, de valider les résultats, et de proposer d'autres pistes de recherche en fonction des hypothèses et de nouvelles questions qui se poseront.

CHAPITRE I

CONNAISSANCES GENERALES SUR LE MILIEU

Les premières méthodes d'investigation scientifique, qui à l'origine permirent d'appréhender l'essence et la nature réelle des objets, avaient utilisé des connaissances générales pour expliquer certains phénomènes particuliers... (Famanta, 1992)

CHAPITRE I : CONNAISSANCES GENERALES DU MILIEU

1 - Caractéristiques géographiques

1.1. Contexte géographique de l'Ouest nigérien

En dehors de sa mince bande sud du secteur Nord soudanien, la partie occidentale du Niger (Ouest nigérien) se situe principalement dans le Sahel, entre les longitudes 0° et 4° Est et les latitudes 12° et 15° Nord. Située de part et d'autre du fleuve Niger (**Fig.4**), elle représente un immense bassin qui englobe approximativement les régions de Tillabery, de Dosso ainsi que la communauté urbaine de Niamey. Cette zone est couverte par la carte pédologique de reconnaissance de la République du Niger (Echelle : 1/500 000), élaborée par Gavaud et Boulet (1967). A l'instar de tout le pays, les altitudes de cette partie croissent insensiblement du sud-ouest vers le nord-est. Les plateaux constituent l'essentiel du paysage. Le socle n'étant jamais très profond au Niger (Charre, 1974), il affleure notamment dans les plateaux à l'ouest de la zone étudiée. Le cadre physique est formé par ces plateaux latéritiques qui sont disséqués, et dont les sols, pour la plupart acides (pH<5,0) sont formés de 25 à 85 cm d'altérites sur cuirasse. Dans cette partie qui s'intègre aussi dans le bassin des "lullemenden"¹ et ses marges, les plateaux ont une altitude comprise entre 200 et 500 mètres. Ils sont cependant monotones dans la partie ouest, particulièrement dans la région du Liptako. Dans l'ensemble, la rigidité des plateaux est accentuée par la présence fréquente d'une cuirasse ferrugineuse.

1.2. Coupe représentative de la région et toposéquence

L'agencement des composantes représentées par la coupe de la région serait en rapport direct avec la genèse du relief. Selon Francoual (1994), l'origine de l'organisation de ce paysage serait due à une dislocation selon un schéma alvéolaire du socle cristallin sous-jacent, suite à des pressions anciennes de type métamorphique. Le paysage résultant présente alors une structure d'ensemble composée d'une succession de plateaux de taille variée entourés par des glacis sableux plus ou moins étendus. Des bas-fonds reliés par des cheminements de koris² plus ou moins apparents cernent ces ensembles plateaux - glacis. Le tout donne l'image d'un agrégat de cellules plateaux - glacis, de tailles comparables, incluses dans un maillage constitué de bas-fonds.

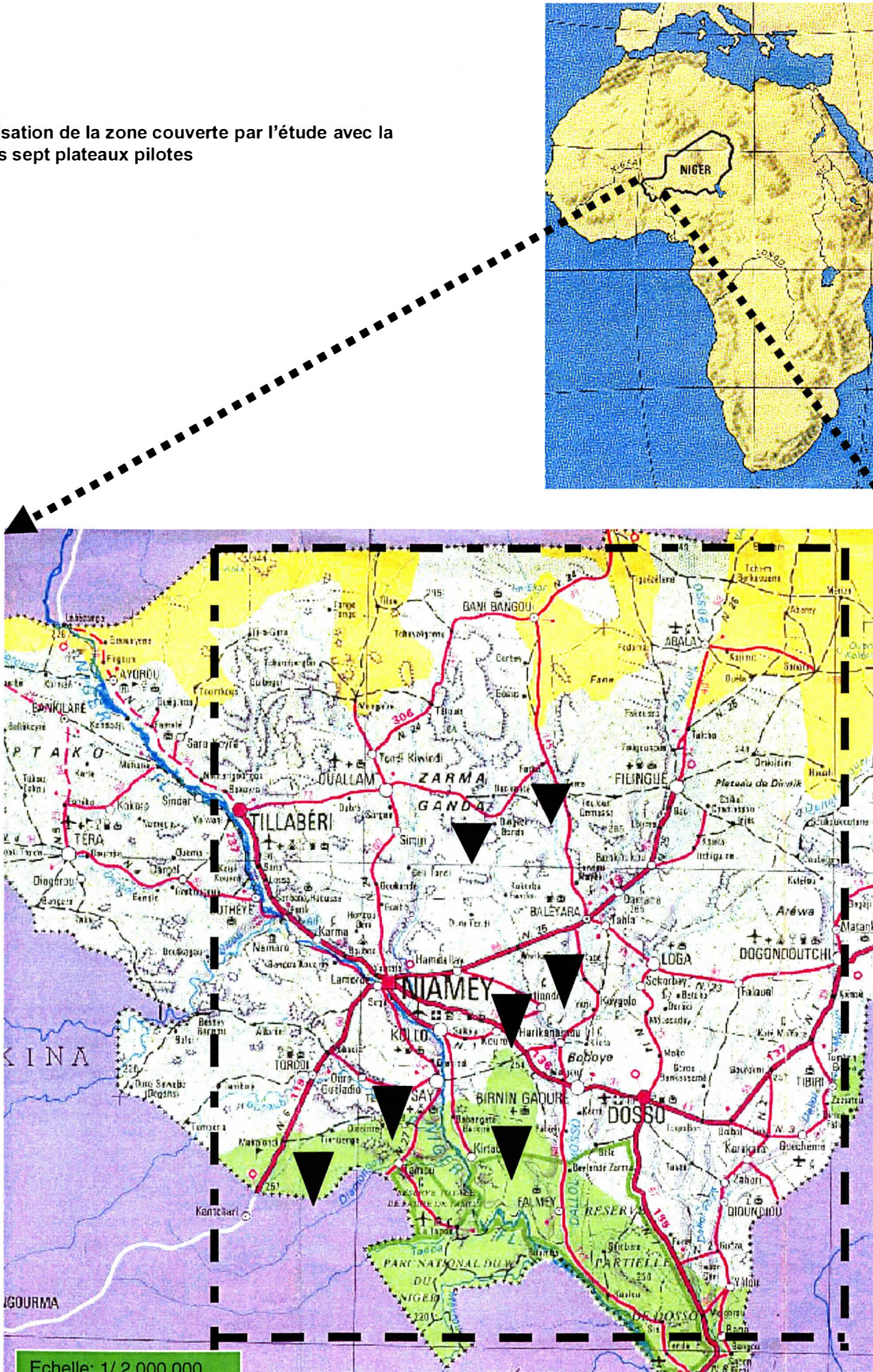
La circulation verticale des eaux par infiltration provoque des phénomènes de dislocation et crée des dépressions comparables à des dolines qui se joignent, pour s'agrandir et s'anastomoser en formant un thalweg que suivent les eaux de ruissellement. La forme de découpage des plateaux, celle de certaines dépressions situées au cœur des plateaux et la forme de certains bas-fonds semblent expliquer la formation des thalwegs.

Résultant de cette genèse, le paysage actuel se compose donc d'une juxtaposition de trois principales unités géomorphologiques : le plateau cuirassé, le glacis sableux ou "jupe sableuse", et le bas-fond. Selon Courault *et al.* (1990), ces composantes dont la description suit, forment la toposéquence de la zone :

¹ nom d'une tribu touareg

² zone basse ayant la physionomie d'un lit asséché de rivière en saison sèche et témoin de forts écoulements des eaux de ruissellement après la pluie

Fig.4 Localisation de la zone couverte par l'étude avec la position des sept plateaux pilotes



- **les plateaux cuirassés** : ils sont constitués de zones cuirassées très pierreuses et, par endroits, de zones ensablées souvent défrichées. Un talus escarpé (pente de 35% environ) marque la limite du plateau, excepté aux endroits où l'ensablement de surface rend la limite plus floue. Ces plateaux de grès constituent le sommet (datant du Continental Terminal) de la couverture sédimentaire régionale et sont recouverts d'une cuirasse ferrugineuse datant du Pliocène, matériau particulièrement dur, qui, lorsqu'il est proche de la surface du sol, rend impossible toute culture. Les zones ensablées sont généralement cultivées et le reste du plateau, où le sol est moins épais, est caractérisé par la présence de la végétation contractée étudiée.

- **le glacis sableux** : il débute au pied du talus limitant le plateau. C'est une zone dont la pente est douce et qui va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du plateau. Des matériaux fins sont apportés par l'harmattan. Le haut du glacis est caractérisé par un sol rouge ou brun rougeâtre sableux, constitué d'éléments colluviaux et éoliens. On y observe de nombreuses ravines et un encroûtement de la surface dû à l'érosion essentiellement hydrique. Le ruissellement des eaux de pluie peut y être important, mais limité à de courtes distances. Des champs et jachères sont présents dans les zones les moins dégradées.

- **les bas-fonds** : ils se différencient du reste par leur très faible pente et le changement de couleur des sables qui y sont plus clairs. D'importants résidus organiques accumulés dans ces zones basses où l'eau peut saturer le sol ont pu créer des conditions réductrices permettant la mobilisation et le drainage du fer. Ce processus laisse en place un sable clair et riche en quartz. Ces bas fonds comprennent le kori (lit mineur) ainsi que la zone de pente et la zone de bombements qui le bordent. La zone de pente (d'environ 5%) qui longe le kori est fortement dégradée. La zone de bombements est cultivée. Le lit du kori est plus ou moins large.

2 - Principales données climatiques

Le Niger se situant dans la zone intertropicale, le secteur écologique étudié se trouve sur le plan climatique dans le domaine sahélien, un domaine de transition entre la zone soudanienne, tropicale humide et la zone saharienne, subtropicale aride. De ce fait, les différents paramètres climatiques sont fluctuants dans la zone et s'expliquent exclusivement par le mécanisme des pluies.

2.1. Régime pluviométrique

Les pluies dans cette région, constituent d'une part le facteur dominant du climat, et sont d'autre part liées directement aux mécanismes météorologiques généraux qui affectent la zone intertropicale du continent africain. Des hautes pressions provenant des tropiques, soufflent vers les basses pressions équatoriales des vents appelés "alizés" qui sont déviés par la force de rotation de la terre sur leur gauche dans l'hémisphère sud (alizé austral appelé "mousson", orienté du SO vers le NE) et sur leur droite dans l'hémisphère nord (alizé boréal appelé "harmattan" qui va du NE vers le SO). La zone de contact entre ces deux alizés est appelée "zone de convergence intertropicale". Elle suit le mouvement apparent du soleil et se déplace d'un hémisphère à l'autre en fonction de la plus grande vigueur de l'alizé issu des hautes pressions de l'hémisphère en saison froide.

Comme l'alizé boréal déborde dans l'hémisphère nord de juin à septembre, le Niger est envahi par une masse équatoriale d'air humide, très instable et affectée de mouvements ascendants qui déclenchent des pluies dites de "convection". Quand l'air humide est surchauffé, il s'élève, puis se refroidit et se sature en vapeur d'eau. Ces ascendances sont dues à des phénomènes thermiques,

mais aussi à des mouvements dynamiques qui affectent ce flux de Sud-Ouest. C'est ce qu'on appelle des "grains" ou "tornades" caractérisés par la baisse brutale de température, un fort coup de vent d'est chargé de sable et des pluies localisées, brèves et violentes.

Ces tornades étant provoquées par des perturbations circulant le long du front de mousson, la masse d'air intéressant le Niger n'est pas toujours assez épaisse pour que les ascendances thermiques puissent y provoquer des précipitations importantes. Pour cette raison, le total des précipitations est globalement faible et assez souvent inégal pour deux stations proches ou d'une année à l'autre.

Charre (1974) indique que le territoire nigérien en général et la partie occidentale en particulier sont caractérisés par une tendance globale d'homogénéité du climat. Il n'existe que quelques différenciations essentiellement dues à des gradients, caractérisant tous les paramètres climatiques : gradient latitudinal (le plus important à cause de la répartition zonale des masses d'air), gradient longitudinal (perceptible malgré la continentalité) et enfin gradient altitudinal (légèrement perceptible).

Ces différents gradients pourraient ainsi avoir une influence sur la distribution des structures végétales et sur leur fonctionnement. Sous cette condition, des critères climatiques comme la durée de la saison humide, la répartition annuelle des pluies dans le temps et dans l'espace, ainsi que leurs variations à moyen terme joueraient un certain rôle dans l'évolution de la végétation.

Malheureusement les données pluviométriques disponibles pour la région sahélienne sont très fragmentaires et ne donnent pas suffisamment de recul. D'après Charre (1974), la plupart des stations météorologiques importantes au Niger n'ont été mises en service qu'après 1900. Nonobstant cette situation, les investigations faites au service de la météorologie nationale du Niger dénotent que la couverture en postes de relevés de l'ouest nigérien est malgré tout la plus dense de toutes les régions du pays. Ceci dit, on peut alors considérer que les données complètes existantes (**tab.2**), dans un intervalle de temps variant de cinquante années à un peu moins d'un siècle, permettent de mener des sondages relativement fiables qui ont globalement mis en évidence :

- l'existence d'un gradient pluviométrique (perceptible dans la zone étudiée), bien marqué du 15^{ème} au 12^{ème} degré de latitude Nord. Après l'étude des variations globales de pluies tombées pendant une trentaine d'années, Charre (1974) a estimé la décroissance de la pluviométrie du sud vers le nord à environ 1 mm tous les kilomètres. Cette diminution du volume des pluies s'observe aussi de l'ouest vers l'est, car la masse d'air humide dans laquelle les pluies se déclenchent vient du sud-ouest ;

- une variabilité relative de la pluviométrie dans le temps ;
- une variabilité stationnelle de la pluviométrie mensuelle et du nombre de jours de pluie ;
- une variabilité entre la pluviométrie annuelle et le nombre total de jours de pluie dans l'année.

Tab.2 : Données pluviométriques mensuelles et annuelles des stations

Station	Période*	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle en mm	Nombre de jours de pluies
Filingué	1931-1999	0	0	0	1	14	31	97	129	30	5	0	0	307	30
Ouallam	1943-1999	0	0	1	4	12	29	103	113	57	9	0	0	328	30
Tillabery	1923-1999	0	2	3	3	13	50	123	173	75	12	1	0	455	42
Tera	1943-1999	0	0	2	7	19	61	127	154	92	11	0	0	473	34
Dogondoutchi	1923-1999	0	0	1	4	23	60	153	202	90	11	0	0	544	37
Niamey (ville)	1905-1999	0	0	2	6	22	73	141	193	89	34	1	0	561	50
Say	1925-1999	0	0	9	15	29	80	155	210	104	21	0	0	623	41
Dosso	1935-1999	0	0	1	10	44	85	141	206	109	15	0	0	611	44
Gaya	1931-1999	0	2	2	12	65	110	200	241	167	23	1	0	821	49

* Tirage aléatoire des données relatives à 50 années dans les périodes considérées

L'examen des données du tableau 2 permet de constater que les mois d'août et juillet sont les plus pluvieux. Ces stations étant classées dans l'ordre décroissant latitudinal, la tendance du gradient pluviométrique se confirme. En outre, les données brutes de ce tableau permettent de calculer le rapport de l'année la plus humide sur l'année la plus sèche, qui est assez révélateur dans chaque station : Filingué : 4,1 ; Ouallam : 4,2 ; Tillabery : 3,30 ; Tera : 2,8 ; Dogondoutchi : 2,7 ; Niamey : 2,7 ; Say : 1,82 ; Dosso : 1,76 ; Gaya : 0,8. Ces rapports tendant à régresser dans le sens inverse de la pluviométrie ne sont cependant pas significativement différents entre les stations localisées à l'échelle d'un même degré carré (100 km x 100 km). Les classes de ces rapports décriraient donc des plages homogènes, correspondant vraisemblablement à des zonages climatiques. Ceci pourrait confirmer l'hypothèse émise d'une tendance d'homogénéité pluviométrique aux échelles des stations et à celles des zones bioclimatiques.

La confirmation de cette hypothèse serait en concordance avec les conclusions de Charre (1974) qui pense que si habituellement les pluies annuelles des régions arides sont qualifiées de très variables, il faut cependant distinguer la variation relative de la variation absolue. Les deux évoluent de façon inverse : les caractéristiques de dispersion absolue croissent avec la moyenne, tandis que celles de dispersion relative décroissent. Or dans ces zones, seule la variabilité relative (variabilité absolue rapportée à une valeur centrale) est forte, la variabilité absolue (qui ne tient compte que des observations) étant très faible.

Quoiqu'il en soit, les données pluviométriques annuelles ont en conséquence un intérêt particulier pour cette étude, du fait de l'hypothèse des zonages pluviométriques. La régularité des régimes mensuels et cette relative homogénéité zonale sont à prendre en compte. Aussi, comme il est établi que les précipitations annuelles sont globalement peu variables (une année sèche l'est pour toute une position zonale ou latitudinale donnée), l'expansion de ce phénomène se répercute d'une position zonale à une autre, pour couvrir toute la région étudiée. De ce fait, l'homogénéité climatique zonale et celle des stations écologiques autoriseraient des analyses et des comparaisons sur la dynamique de la végétation à différentes échelles du gradient latitudinal et pluviométrique de l'Ouest nigérien.

2.2. Humidité relative

L'humidité relative étant conditionnée par l'alternance des masses d'air sec et d'air humide, la position géographique de la zone étudiée fait qu'elle se classe parmi les premières zones atteintes par le flux de mousson et des dernières zones à être balayées par le front intertropical dans sa course

retour. De ce fait, l'humidité relative est forte en août (91%), (**Fig.5**), tandis que ses valeurs minimales s'observent en février-mars (12%). Les amplitudes les plus fortes se produisent pendant la saison pluvieuse, période qui correspond par contre aux plus faibles amplitudes thermiques diurnes. Le régime de l'humidité relative n'est pas calqué sur celui des précipitations (Saadou, 1990). Ce facteur varie aussi bien au cours de l'année en fonction des saisons qu'au cours de la journée. Selon Courel (1984) *in* Garba (1998), la variabilité inter-annuelle de l'humidité relative est faible par comparaison à celle des précipitations, ce qui permet aussi une extrapolation plus étendue des conditions stationnelles ou locales. A cet effet, ce facteur climatique est d'une grande importance pour l'étude de la végétation. En effet, pour beaucoup d'espèces la floraison et l'éclosion des bourgeons végétatifs et floraux ont lieu juste avant l'installation de la saison humide et coïncideraient avec l'arrivée des premiers flux de mousson.

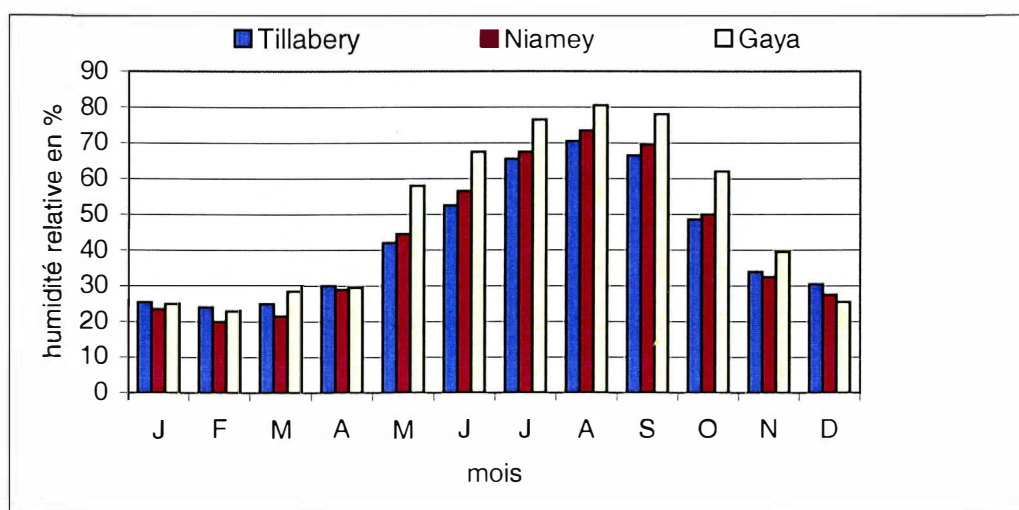


Fig.5 : Valeur moyenne comparée de l'humidité relative des stations de Tillabery, Niamey et Gaya (de 1951 à 1987)

2.3. Température de l'air

Pays continental, le Niger se retrouve dans une des régions les plus chaudes du globe : l'équateur thermique balaie son territoire d'avril à août. Cette situation et la limpidité de l'atmosphère occasionnent des températures très élevées. Pour une durée d'ensoleillement moyen annuel de 8,7 heures par jour, le régime thermique est caractérisé par deux maxima qui correspondent au passage du soleil au zénith. Ambouta (1984) indique que dans l'année, on observe successivement une période relativement fraîche en décembre et janvier, des rigueurs thermiques d'avril à mai, et une légère fraîcheur jusqu'au mois d'août, rapidement effacée par la chaleur qu'on ressent en octobre et début novembre.

En tenant compte de la latitude, les variations des températures moyennes sont très faibles, malgré une légère décroissance de la moyenne du nord au sud. Selon Mainguet (1977) et de Miranda (1980) *in* Ambouta (1984), le régime thermique ne constitue pas pour la région étudiée un facteur important ayant des incidences sur la végétation.

Ces dix dernières années, la température moyenne annuelle enregistrée à Niamey oscille autour de 30°C, pour des moyennes minimales annuelles se situant autour de 22,1°. Les écarts sont

toujours importants entre le jour et la nuit, et de même qu'entre le mois le plus chaud et le mois le plus frais. Ces amplitudes augmentent aussi avec la continentalité. A Niamey, l'amplitude journalière est de 18°1 en février, 9° en août, pour une moyenne annuelle estimée à 11°.

2.4. Vents et évaporation

Le Niger en général, et la région étudiée en particulier, sont principalement soumis aux influences des alizés. Deux principaux vents soufflent en alternance selon les périodes de l'année. L'harmattan, alizé continental de direction nord-est à est, surtout ressenti d'octobre à février, est un vent régulier très sec qui, selon Monnier *in* Saadou (1990), est une masse d'air sec issu du Sahara, porté par un flux d'est, souvent chargé d'aérosols minéraux et organiques. Il a pour principal effet de faire chuter l'hygrométrie surtout durant la journée et d'entraîner de fortes variations thermiques entre le jour et la nuit. La mousson est le vent qui apporte la pluie. Elle vient de l'hémisphère sud par le Golfe de Guinée. Prenant la direction SO, ce vent a pour origine l'anticyclone de Saint-Hélène. Toujours chargé d'humidité, il atteint la partie sud du Niger le plus souvent aux mois de mars - avril.

Ainsi, l'alternance de ces deux vents est à l'origine de la montée des valeurs moyennes maximales de l'évaporation en mars – avril, lors de la période la plus chaude de l'année. Quant aux valeurs moyennes minimales, elles sont enregistrées en août et septembre, c'est à dire pendant la période où l'humidité relative est la plus forte.

2.5. Synthèse bioclimatique relative au secteur d'étude

Vouloir rapporter exclusivement un fait biologique à l'un ou à l'autre des quatre paramètres climatiques présentés ci-dessus serait difficile. C'est probablement par la combinaison de ces facteurs que leurs actions simultanées peuvent être déduites. Une synthèse bioclimatique constitue alors un des meilleurs outils permettant de différencier et de comparer les variations climatiques qui conditionnent les systèmes étudiés. L'approche s'inspire de certains auteurs qui ont réalisé des synthèses écologiques en combinant la température et la pluviométrie pour dégager l'effet simultané résultant. Si plusieurs types de modèles existent, il semble que le modèle de représentation graphique de Bagnouls et Gaussen (diagrammes ombrothermiques) soit approprié pour mettre en évidence les mois secs éventuels. D'utilisation simple, ce modèle utilise des données (pluviométrie et température) généralement disponibles. S'établissant par station, la construction repose sur un postulat de base qui admet qu'il y a sécheresse quand les précipitations mensuelles (en mm, calculées sur une période minimale de 30 ans) sont inférieures ou égales au double de la température du mois (en °C et sur une période minimale de 5 à 10 ans, *in* le Houérou 1992).

Les données disponibles permettent la construction des diagrammes ombrothermiques (**fig.6**) des stations de Filingué (14°23 et 03°18), de Tillabery (14°13 et 01°27), de Niamey (13°30 et 02°08) et de Gaya (11°53, 03°27) représentatives des différentes zonations bioclimatiques de la région étudiée. Ces diagrammes permettent d'estimer respectivement à 10, 9, 8 et 7 mois secs dans l'année pour les stations indiquées.

Enfin, les différents paramètres décrits ci-dessus et la synthèse bioclimatique établie représentent des indicateurs intéressants sur le plan écologique. En raison de leurs effets directs sur la nature et le mode de distribution spatiale des phytocénoses, ils constitueraient des modes d'expression permettant de proposer des zonages (**tab.3**).

Cette revue des paramètres climatiques permet donc de confirmer le caractère "tropical sec" (Ambouta, 1984) du climat de l'Ouest nigérien. La durée assez longue de la saison sèche et l'humidité atmosphérique faible pendant la majeure partie de l'année semblent prédéterminer l'installation d'une végétation ligneuse très adaptée à des conditions climatiques rigoureuses.

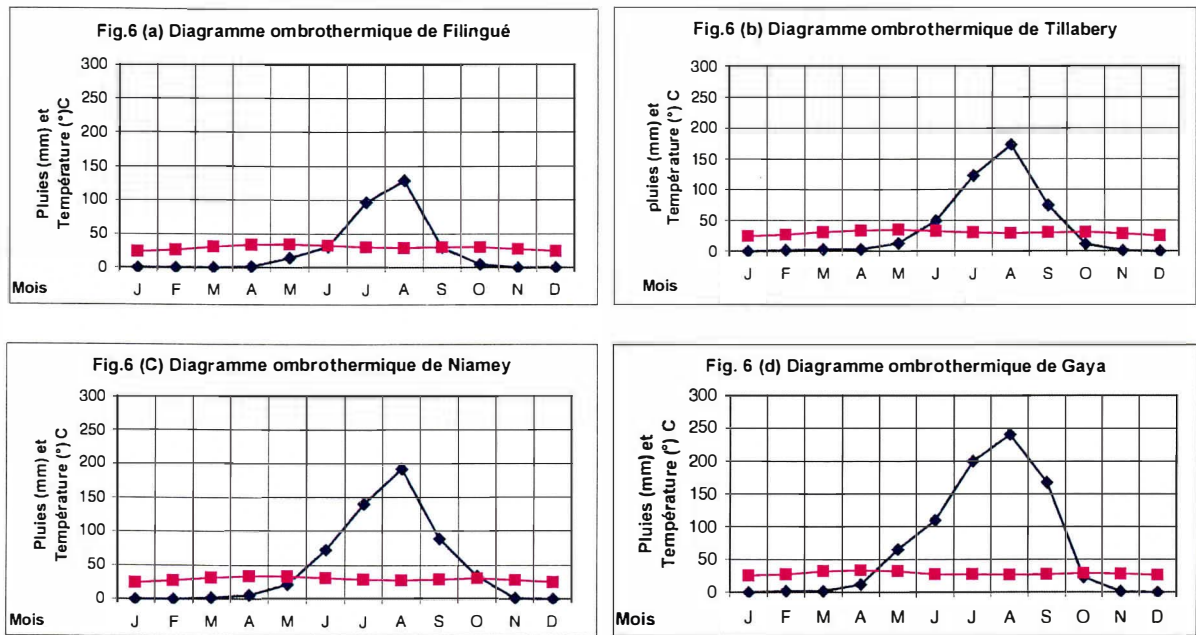


Fig.6 : Diagrammes ombrothermiques de quelques stations météorologiques

L'analyse de la figure 8 met en exergue le gradient pluviométrique et latitudinal de l'Ouest nigérien.

Tab.3 : Synthèse des paramètres climatiques de la zone d'étude

Stations météorologiques	Nombre de mois secs	Nombre de mois pluvieux	Distribution des précipitations	Zonation bioclimatique
Filingué	10 (JFMAMJ ; SOND)	2 (juillet et août)	unimodale	Aride
Tillabery	9 (JFMAMJ ; OND)	3 (juillet, août et septembre)	unimodale	Semi-aride
Niamey	8 (JFMAM ; OND)	4 (juin, juillet, août et septembre)	unimodale	Semi-aride
Gaya	7(JFMA ; OND)	5 (mai, juin, juillet, août et septembre)	unimodale	Sub-humide (sec)

Classification inspirée de Le Houérou (1992),

2.6. Evolutions climatiques anciennes (depuis 40 000 ans)

La chronologie des événements climatiques survenus depuis la période antérieure à 40 000 ans B.P., est très peu documentée (Ambouta, 1984). Cependant, les dernières séries d'études nigériennes, dont celle de Bernus *et al.* (1999), apportent des connaissances nouvelles sur la base de techniques fiables. Il est maintenant mis en évidence que la genèse du cadre physique (formation des sols) et l'évolution de la végétation (contraction notamment) ne procèdent pas uniquement des conditions climatiques actuelles. Elles ont été soumises à des conditions paléoclimatiques très anciennes qui diffèrent de celles d'aujourd'hui. Dans le Bassin des Iullemenden comprenant la zone étudiée, l'utilisation des datations au ¹⁴C a permis de reconstituer l'histoire détaillée des variations climatiques pour les 40 derniers millénaires. Des indices laissent penser que cette région a enregistré

des alternances de phases sèches et humides. Une succession de variations climatiques dans la région nigéro-tchadienne a été mise évidence, après une phase aride antérieure à 40 000 ans B.P (limite des datations au ^{14}C) qui est la cause de la mise en place d'un erg jusqu'à la latitude de Sokoto (au Nigeria). Trois principales périodes se sont succédé : une période humide (le Ghazalien) ; une période Kanémienne (Ogolien de Mauritanie) assez aride et qui a marqué l'Afrique (cette période allant de 17 000 à 16 000 ans B.P a été particulièrement sévère, car au Niger et au Tchad, des vastes étendues d'ergs représentés par de longs cordons dunaires se sont étalées jusqu'au 14° de latitude Nord). Enfin une période nigéro-tchadienne (Holocène des régions tempérées) est la plus déterminante. Au cours de cette dernière période, grâce à des études de sédiments, il a été déterminé que vers 12 000 ans B.P., les lacs du bassin tchadien ont connu de grandes oscillations qui correspondent à des alternances de crues et de périodes d'assèchement partiel ou total. C'est à partir de 7 000 ans B.P. que s'installe le mécanisme climatique d'où résulte le climat tropical contrasté actuel .

Ambouta (1984) indique que dans la zone d'étude, seules les couvertures sableuses liées aux ergs ont enregistré dans les sols qui les entourent des conditions climatiques postérieures à leur établissement. En effet, ces sols présentent des différences morphologiques en fonction de leur âge. Il indique aussi, que pour les sols des hautes surfaces gréseuses (plateaux étudiés), la cuirasse aurait été démantelée pendant la période aride contemporaine de la formation de l'erg ancien. Ces sols des plateaux semblent avoir peu évolué depuis lors, et ne sont, selon le degré de dégradation de la couverture végétale, affectés que par des remaniements superficiels.

Ce panorama de l'évolution climatique nous oriente donc vers l'exploration d'hypothèses cherchant à vérifier les variations du modelé³. L'étude de l'hétérogénéité spatiale des modelés, permettrait de mieux comprendre l'implication des profils de sols dans le fonctionnement des systèmes écologiques contractés.

2.7. Evolutions climatiques récentes (1905 à 1999)

Sur la base des données pluviométriques recueillies depuis la mise en place du réseau primaire des stations météorologiques de l'Ouest nigérien, des essais en vue de retracer l'évolution des pluies depuis 1905 ont été faits. Tout en admettant qu'il existe des difficultés pour hiérarchiser et vérifier certaines séries de données, cet exercice permet de conclure que les précipitations annuelles représentent une variable aléatoire. L'analyse des données effectuée rejoint par ses conclusions celle de Charre (1974) et ne confirme pas l'existence d'une tendance. Aussi, au cours de la même période, il n'apparaît pas de modifications perceptibles des totaux pluviométriques, à l'exclusion de la station de Ouallam qui se situe entre le 15° et le 14° de latitude nord. Cette analyse ne permet pas non plus de se prononcer sur un éventuel accroissement des conditions d'aridité au cours de ce siècle.

Aussi, s'il existe des suites d'années relativement sèches ou humides, elles ne permettent pas de mettre en évidence l'existence de cycles (oscillations suivant une périodicité). Il ne serait donc pas absurde de conclure que dans cette région, les pluies annuelles ont un caractère plutôt zonal avec une variabilité absolue faible.

³ couches superficielles du sol

Cette conclusion tend à vérifier l'hypothèse émise plus haut, qui considère le total annuel de pluies comme le caractère climatique fondamental à l'échelle régionale. Par ailleurs, nous avons exploré d'autres hypothèses formulées sur le cadre physique (caractères de la surface du sol et son évolution : modelé et états de surface), et le rôle qu'il joue dans la redistribution des eaux de pluies à la surface du sol. L'utilisation efficace de cette eau soumise en grande partie au ruissellement et à l'évaporation pourrait favoriser l'évolution des systèmes contractés en garantissant une dynamique appréciable de productivité et une bonne résilience.

3 - Milieu édaphique

3.1. Substrat géologique

La partie occidentale du Niger (**Fig.7**) s'étend sur deux régions géologiques :

- le bloc **Gourma - Liptako** qui se situe à l'ouest du fleuve Niger et s'étale d'une part sur le territoire malien (Gourma), et d'autre part sur le Burkina Faso (Liptako). Il est caractérisé par un affleurement des terrains précambriens. L'histoire géologique de ce bloc indique que :

le Gourma est un bassin infracambrien formé depuis 400 millions d'années par des roches mères métamorphiques. Dans quelques endroits apparaissent des couches de sédiments. Les formes de relief qu'on rencontre sont, au nord les dunes sablonneuses non orientées, au sud les petites collines et les plateaux découpés. Le fleuve Niger traverse ainsi le Gourma nigérien qui est coupé de la région du Liptako par la rivière Gournel ;

le Liptako est caractérisé par des roches métamorphiques et ignées de la période précambrienne. Des portions des zones administratives de Tera, Tillabery et Say sont concernées. Au nord des plaines sablonneuses, existent des dunes longitudinales et quelques buttes latéritiques (petites collines). A l'ouest, se rencontrent les parties les plus élevées, ainsi que des buttes qui sont formées par des roches métamorphiques plissées et ignées. Les dunes et nappes de sable diminuent d'étendue.

- **le Bassin des Iullemenden** proprement dit est constitué d'un immense bassin sédimentaire, dont les derniers terrains de remblaiement généralisé sont attribués au Continental Terminal. La partie de ce bassin correspondant au Niger occidental occupe en partie la région de Tillabery où se rencontrent des dunes qui s'étendent au nord et une série de plaines d'accumulation, de cuirasses latéritiques et des systèmes de plateaux au sud.

3.2. Evolution géomorphologique

Ambouta (1984) indique que les formes de relief du paysage actuel (**Fig.8**) ont pris naissance après diverses étapes d'évolution géologique. Les formations suivantes se rencontrent d'est à l'ouest :

- les dépôts alluviaux du Dallol Bosso qui sont d'origine éolienne ou hydrique et se composent de sable, d'argile ou de sable argileux ;
- les formations du Continental Terminal qui regroupent des sédiments d'origine continentale post-éocène et anté-quaternaire et représentent la principale composante au centre. Ce sont de puissants épandages détritiques, généralement des grès ferrugineux à argileux, riches en oxydes de fer, quartz et kaolinite ;

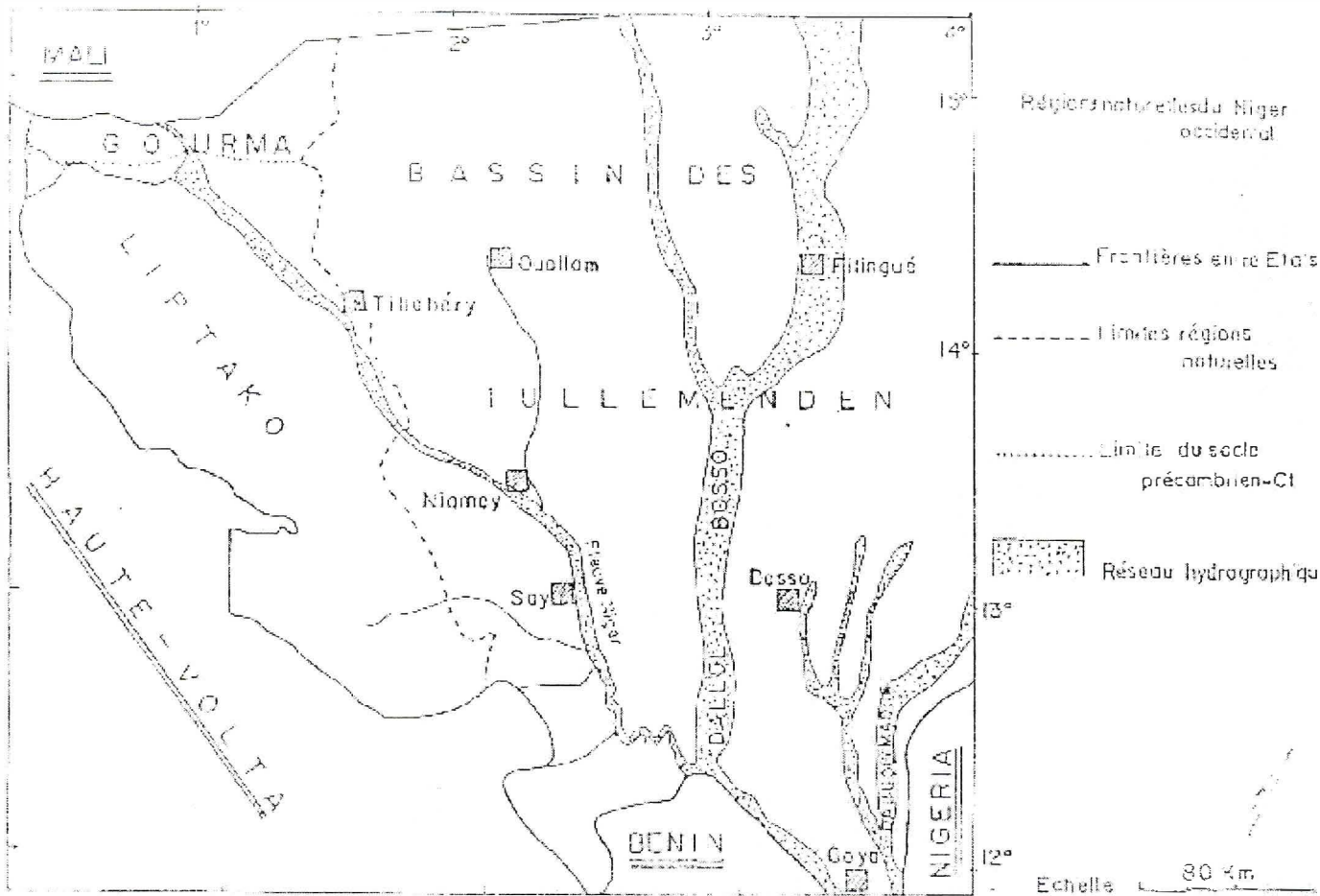


Fig.7 : Régions naturelles du Niger occidental

- à l'ouest enfin le socle affleure dans le bloc Liptako-Gourma. C'est une vaste pénéplaine de 200 à 300 m d'altitude, dominée par quelques collines tabulaires. Ce socle se compose de formations granitiques et de roches métamorphiques. Il est aussi recouvert par des produits d'altération (la lithomarge de 30 à 40 m) qui ont la même constitution minéralogique que le Continental Terminal. Caractérisé par un pendage de direction E-NE de 3 à 6%, ce socle aurait selon Ichaou (1997) des conséquences sur la formation du modelé dans cette partie.

Finalement le modelé actuel s'est formé à l'origine au Néocène Supérieur par un aplanissement des sommets de la lithomarge et des formations du Continental Terminal. Ces surfaces d'aplanissement ont été ensuite disséquées au quaternaire par les cours d'eau. En contrebas, Ambouta, (1984) pense que les thalwegs se sont ensuite progressivement enfoncés avec le recul des versants, parallèlement à eux-mêmes. Ce même auteur distingue par ailleurs dans le paysage actuel deux ensembles : la haute surface à sommet plat et aux contours sinueux, très découpés, appelée plateau et les vallées larges piégées par les sables éoliens lors des phases sèches du quaternaire. Ces sables éoliens sont fixés aujourd'hui. Cette description est en concordance avec les hypothèses émises par Francoual (1994) sur l'origine de l'organisation de ce paysage.

pauvres et sont très faciles à travailler grâce à leur texture sableuse. Relativement fragiles, ils ont parfois leurs horizons supérieurs érodés par le ruissellement ou le vent. Dans beaucoup de cas, ils sont lessivés et présentent des concrétions, l'argile kaolinique et les oxydes de fer s'accumulant alors en profondeur dans l'horizon B. Ces sols sont parfois associés à des sols gravillonnaires peu évolués.

Ambouta (1984) a sur la base de l'étude pédologique de 22 profils de sol des zones nues et boisées de plateau retenu les caractéristiques essentielles suivantes :

- l'épaisseur des sols est toujours médiocre, ne dépassant pas 60 cm. Le sol le plus profond se situe dans la zone centrale boisée (ou cœur de fourré) ;
- les horizons différenciés varient peu. En profondeur, l'horizon BC, épais de 10 à 40 cm, est riche en argile et en graviers anguleux, mêlés à des débris de grès friables ayant pour origine le substratum. L'horizon A unique en zone boisée et dans la frange à chicots (zone de sénescence), est ailleurs subdivisé en des horizons A_{11} et A_{12} . Les horizons A_{11} sont toujours caractérisés par une texture sableuse et une faible teneur en graviers (ce qui les rapproche des horizons A_1 des zones sous couvert ligneux), alors que les horizons A_{12} sont à la fois plus riches en argile et en graviers. Ces graviers ne ressemblent pas à ceux des horizons BC : ils sont hétéromorphes et surtout très émoussés, ce qui révèle l'origine allochtone du matériau ;
- la couleur des sols ne varie qu'au niveau des horizons de surface : elle est plus marquée dans les zones recouvertes de végétation ;
- les variations morphologiques et granulométriques des sols d'une séquence de végétation contractée structurée portent en définitive sur les horizons de surface A, l'horizon BC de profondeur étant relativement invariant ;
- le passage des bandes couvertes aux bandes nues s'accompagne de l'amenuisement de l'horizon sableux de surface au profit d'un horizon A_{12} plus argileux et graveleux et de l'apparition d'une structure litée en surface.

Si les profils de sol sont plus ou moins invariants dans les horizons B et C, il convient d'analyser les horizons de surface et le modelé qui a fini par résulter suite à l'action combinée de l'altération progressive et des formes d'érosion.

Pour que l'analyse du modelé permette de mieux comprendre son rôle du cadre dans le fonctionnement des systèmes étudiés, nous revenons très synthétiquement sur les quelques pistes et hypothèses émises au cours de l'analyse des facteurs climatiques. Parmi ces hypothèses, celles qui concourent à renforcer les bases de l'analyse sont :

- la genèse du cadre physique semble indiquer que la formation de sols de ces plateaux, ainsi que l'évolution de la végétation (contraction notamment) ne procèdent pas uniquement des conditions climatiques actuelles ;
- les sols des plateaux paraissent n'avoir que peu évolué depuis très longtemps et n'avoir été affectés que par des remaniements superficiels selon le degré de dégradation de la couverture végétale ;
- après les investigations qui ont permis de reconstituer le panorama de la genèse climatique ancienne, l'étude a pris en compte d'autres hypothèses afin de vérifier s'il existe des variations liées aux couches superficielles ou modelés ;

- la compréhension de l'hétérogénéité spatiale des modelés permettrait de mieux déceler l'implication des profils de sols dans le fonctionnement des systèmes écologiques contractés ;
- l'hypothèse qui considère la pluviométrie comme le caractère climatique fondamental ;
- et l'exploration des hypothèses relatives au cadre physique (caractères de la surface du sol et son évolution : modelé et états de surface) et au rôle qu'il joue dans la redistribution des eaux de pluies en surface et ses effets sur les profils des sols.

En nous référant aux travaux pédologiques d'Ambouta (1984) sur le degré carré de Niamey, deux grands types de modelé se distinguent dans la zone d'étude, dont un seul (celui des plateaux) nous intéresse :

- **le modelé des vallées** : ce sont des couvertures sableuses d'origine éolienne (30 000 km²). Si le réseau hydrographique actuel qui découpe les plateaux et les formations du Continental Terminal est principalement tributaire du fleuve Niger, il n'en demeure pas moins qu'il a parfois une origine lointaine dans les contreforts de l'Aïr. De ce fait, les formes des vallées les mieux établies sont les vestiges d'un passé holocène, plus humide que l'actuel. Aujourd'hui, aucune des vallées fossiles ou "dallols" ne présentent d'écoulement permanent. Généralement, le fond des vallées est sec, comblé par des sables alluviaux plus ou moins colmatés par des sables éoliens. Au nord du 14° de latitude N par exemple, Ambouta (1984) indique que le dallol Maouri serait complètement barré par un système de dunes longitudinales. En hivernage, ne subsistent que quelques écoulements temporaires, qui à l'arrêt des pluies, laissent apparaître un chapelet de mares plus ou moins éloignées. Les formations dunaires et les sables éoliens affectent donc ce modelé des vallées.

- **le modelé des plateaux** (28 000 km² sur un total de 58 000 km²) : si l'on considère l'ensemble de la région, un double système de pente semble exister de part et d'autre de la vallée du dallol Maouri. A petite échelle, Chaperon (1970) in Ambouta (1984), fait correspondre au Bassin des lullemeden, un axe synclinal placé non loin de cette vallée quaternaire. Sur le terrain, ces pentes ne sont pas perceptibles *a priori*. En revanche, la surface des plateaux la plus large est affectée localement d'affaissements circulaires, tout à fait à la manière des dolines des pays karstiques. Quand les plateaux se réduisent à d'étroits dos de terrain, une coupe topographique établie perpendiculairement aux escarpements bordiers montre un profil convexe, avec, au centre, une croupe surbaissée à sommet très plat. Des pentes faibles apparaissent de part et d'autre et tendent à croître au voisinage des bordures. La variabilité du modelé des plateaux qui serait due au système des pentes, constitue une base d'analyse à approfondir.

3.4. Typologie des unités morphopédologiques

Les unités morphopédologiques (UM, 22 au total) rencontrées dans le cadre étudié, sont clairement définies par les études "P4AS" de l'Agrymet. Ces UM correspondent à des unités de paysages définies à l'intérieur d'une toposéquence. Elles se caractérisent par un modèle et un type de sol (ou association de sols) qui induisent une occupation du sol (couvert végétal, système cultural) en fonction des contraintes et aptitudes du milieu considéré. Ces UM correspondent à cinq ensembles principaux :

- **les plaines alluviales** : cet ensemble correspond à la plaine du Niger et à ses affluents dans leurs parties en aval. Caractérisé par un modèle de plaine alluviale, un régime d'inondation temporaire

fluvial et pluvial, il repose sur un matériau fluviatile de texture variable. Il comprend quatre UM : plaines inondables, terrasses inférieures, terrasses supérieures, bourrelets et glacis de berges ;

- **les vallées fossiles (dallo)** : cet ensemble correspond aux grandes vallées sèches s'écoulant du nord au sud, généralement comblées par des matériaux d'origine éolienne. Le dallo comprend quatre UM : plaines et vallées humides, dépressions et chenaux, terrasses sableuses, hautes terrasses et bordures ;

- **les glacis** : c'est un ensemble occupant de vastes zones pénéplainées résultant de l'érosion des anciennes surfaces d'aplanissement (plateaux) sur matériau meuble généralement sableux et profond. Parfois remanié par le colluvionnement, l'épandage et l'alluvionnement, cet ensemble est très souvent affecté par d'anciens processus d'éolisation. Les glacis correspondent généralement à un ensemble de formations définies sous le vocable de formations sableuses du Moyen Niger. Ici cinq UM ont été définies : les dépressions humiques, les vallées secondaires, les glacis sableux réguliers, les glacis limono-sableux, les glacis intermédiaires ;

- **les plateaux et formations indurées** : cet ensemble comprend les plateaux proprement dits et leurs bordures (piémonts et/ou surfaces d'érosion inférieures). Ils correspondent à différentes surfaces d'érosion sur roche indurée (grès du Continental, grès infracambriens ou roches magmatiques du Précambrien), anciennes surfaces structurales liées à des niveaux oolithiques ferrugineux, (Rognon, 1976, *in* P4AS-ECR Agrymet, 1992) ou sur cuirasse et horizon d'altération plus ou moins induré (carapace). Six UM (où nos dispositifs sont implantés) composent cet ensemble : les plateaux supérieurs, les plateaux moyens, les plateaux sableux, les buttes et plateaux démantelés, le piémont des plateaux, les surfaces d'érosion inférieures ;

- **les formations éoliennes** : cet ensemble correspond aux zones affectées par une intensité d'accumulation éolienne au cours des phases successives du Quaternaire récent ou plus ancien. On distingue trois unités morphopédologiques. Ce sont les cordons dunaires récents, les ergs anciens, les glacis éolisés.

Les variations des unités morphopédologiques des plateaux et celles dues au système des micro-pentes, déterminent de façon prépondérante la nature du modelé, qui elle-même orienterait les flux hydriques en surface et la structuration de la végétation. De ce fait, l'étude des pentes et celle des états de surface des plateaux constitueront en définitive les principaux axes d'analyse des structures végétales et des processus fonctionnels pour dégager la dynamique de productivité.

4 - Environnement biologique

Ambouta (1984) indique que la végétation de la partie occidentale du Niger exprime tant dans sa physionomie que dans sa composition floristique, deux grands types de variations. Il existe des variations zonales dues au climat et celles qui sont causées par les conditions écologiques stationnelles. C'est ainsi que du sud vers le nord, ces variations zonales sont aisément perceptibles. Différents compartiments phytogéographiques seraient la résultante des changements progressifs du climat à cette échelle. On définit alors sur cette base les différents types de végétation climatique zonale. Si on raisonne à l'échelle des stations écologiques, on observe des variations locales. Ces dernières découleraient de facteurs écologiques et/ou mésologiques propres au site, et permettront de définir des formations végétales spécialisées.

Les systèmes forestiers contractés de plateaux latéritiques se situent en gros dans la zone biogéographique Ouest africaine sèche. La famille des Combretacées y est fortement représentée : 80 à 85% des espèces ligneuses selon Ichaou (1995). La structure arbustive est à dominance de *Guiera senegalensis*, *Combretum micranthum* et *Combretum nigricans*.

Pour caractériser et situer précisément ces systèmes de plateaux, nous nous sommes inspirés de la subdivision phytogéographique du Niger, proposée par Saadou (1990). Cette dernière tenant compte de la trilogie (climat, flore et végétation) recommandée par Trochain (1970), a été améliorée et complétée. Trois paramètres sont importants à l'échelle régionale : les diagrammes ombrothermiques des stations climatologiques primaires et secondaires réparties sur l'étendue du cadre d'étude, les pluviométries mensuelles et annuelles des stations primaires et les données bioclimatiques traitées et synthétisées. Un quatrième paramètre pris en compte permet de déterminer les variations perceptibles à l'échelle des sites de plateaux et des stations écologiques. Il s'agit du cadre géomorphologique (variation du modelé, états de surface et unités morphopédologiques). En tenant compte de toutes ces considérations, la végétation de la partie occidentale du Niger correspond à trois compartiments phytogéographiques (**tab.4**).

4.1. Végétation climatique zonale

La contraction de la végétation sur les plateaux constitue la règle générale dans ce paysage. Même en dehors des plateaux, il est rare de rencontrer des couvertures végétales continues et homogènes. Cette végétation s'adapte et se maintient dans ces milieux en se répartissant du sud vers le nord dans la zone.

4.2. Formations végétales spécialisées

En plus des variations de la composition ou de la physionomie qu'on constate à l'échelle du transect pluviométrique, d'autres types de variations peuvent être dues aux conditions locales des stations écologiques et des sites de plateaux latéritiques. En effet, ces plateaux, même s'ils présentent une apparente uniformité, sont hétérogènes. La nature du substrat, les états de surface du sol, la quantité de pluie tombée et celle résultant du ruissellement (flux hydrique en surface), les systèmes de pentes longitudinales et latérales, le recouvrement végétal global, sont autant de facteurs qui ont été largement combinés et analysés par cette étude afin de déterminer les formations spécialisées ou groupes fonctionnels caractéristiques des milieux ayant une relative homogénéité. Comme nous le verrons, ces groupes fonctionnels une fois constitués représentent une réponse stable de combinaison des facteurs agissant à des échelles spatiales données.

5 - Activités socio-économiques

5.1. Utilisation des terres

Le Niger occidental, correspondant globalement à deux régions administratives du pays (Dosso : 31 000 km², Tillabery : 90 072 km²), compte environ 2 600 000 habitants (recensement de la population 1988). Il représente l'une des zones les plus peuplées du Niger, avec 17,5 habitants au km² par exemple pour la région de Tillabéri. Du fait des conditions climatiques qui y sont les plus favorables du Niger, cette zone offre des perspectives importantes d'activités socio-économiques. Zone à vocation agro-sylvo-pastorale, elle est parcourue par le fleuve Niger (et ses affluents), ce qui représente un atout important pour l'agriculture irriguée. Si au sud, l'agriculture reste fondamentalement l'occupation essentielle (culture céréalière de mil, sorgho et riz), au nord se

pratique un élevage dans sa forme extensive. Enfin, il faut noter que les plateaux constituent les bassins d'approvisionnement en bois-énergie des principales villes, pour environ 86% des besoins totaux.

Tab.4 Compartiments phytogéographiques de l'Ouest nigérien (d'après Saadou, 1993, modifié) :

Compartiments	Substrat	Végétation	Flore
1. Compartiment soudanien	- socle en surface, - sédiments du continental sur les plateaux	- forêt sèche basse sur les plateaux - forêts galeries dans les cours d'eau - forêt claire sur les terrasses argileuses et dans les vallées - savane dans les vallées sèches et sur les dunes fixées	Plateaux latéritiques : <i>Combretum micranthum</i> , <i>Combretum nigricans</i> , <i>Combretum collinum</i> , <i>Crossopteryx febrifuga</i> , <i>Afrormosia laxiflora</i> , <i>Securidaca longepedunculata</i> , <i>Ostryoderris stühlmannii</i> ; galeries : <i>Nauclea latifolia</i> , <i>Daniellia olivieri</i> , <i>Kigelia africana</i> , <i>Albizia chevalieri</i> ; vallées sèches : <i>Butyrospermum paradoxum</i> , <i>Neocarya macrophylla</i> , <i>Borassus aethiopum</i> , <i>Andropogon gayanus</i> ; dunes fixées : <i>Vitex doniana</i> , <i>Sterculia setigera</i> , <i>Parkia biglobosa</i> , <i>Cymbopogon giganteus</i>
11. Nord-soudanien occidental (600 à 800 mm) (1)	- sables quaternaires au fond des vallées sèches		
2. Compartiment sahélo-soudanien	- unités morphologiques = plateaux démantelés avec un système instable de faibles pentes et de contre-pentes.	- fourrés à <i>Combretum</i> sur les plateaux latéritiques - steppes sur les terrasses sableuses, dans les vallées sèches et sur les dunes fixées.	Plateaux latéritiques : <i>Guiera senegalensis</i> , <i>Commiphora africana</i> , <i>Combretum micranthum</i> , <i>Acacia macrostachya</i> , <i>Lannea acida</i> , <i>Croton zambezicus</i> , <i>Acacia ataxacantha</i> , <i>Combretum nigricans</i> , <i>Boscia senegalensis</i> , <i>Boscia angustifolia</i> ; vallées sèches : <i>Hyphaene thebaica</i> , <i>Bauhinia rufescens</i> , <i>Annona senegalensis</i> , <i>Combretum glutinosum</i> , <i>Acacia albida</i>
21. sahélo-soudanien occidental (550 à 600 mm) (2)			
3. Compartiment sahélien	- sédiments du continental terminal sur les plateaux latéritiques	- fourrés moins denses à <i>Combretum</i> sur les plateaux latéritiques ; - formations de galeries sur les berges des dallols et les cours d'eau ; - steppes arborées sur les terrasses sableuses et sur les dunes fixées	Plateaux latéritiques : <i>Guiera senegalensis</i> , <i>Commiphora africana</i> , <i>Combretum micranthum</i> , <i>Acacia macrostachya</i> , <i>Acacia ataxacantha</i> , <i>Combretum nigricans</i> , <i>Boscia senegalensis</i> , <i>Boscia angustifolia</i> , vallées sèches et dans les dallols : <i>Hyphaene thebaica</i> , <i>Bauhinia rufescens</i> , <i>Annona senegalensis</i> , <i>Combretum glutinosum</i> , <i>Acacia albida</i> ,
31. sud sahélien occidental (350 à 550 mm) (3)	- sables dans les cordons dunaires, sur les terrasses sableuses et dans les fonds des dallols et vallées sèches.		
32. nord sahélien occidental (250 à 350 mm) (4)	- sédiments du continental terminal sur les plateaux latéritiques, - rares affleurements du socle dans les zones basses et dunes fixées.	- fourrés à <i>Combretum</i> sur les plateaux latéritiques, - steppes arbustives dans les zones basses et sur les substrats sableux	Dunes : <i>Acacia senegal</i> , <i>Leptadenia pyrotechnica</i> , <i>Aristida mutabilis</i> , <i>Tephrosia nubica</i> , <i>Cenchrus biflorus</i> ; Zones basses : <i>Acacia seyal</i> , <i>Schoenefeldia gracilis</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Cordia sinensis</i>

(1) Les systèmes contractés de plateaux dans ce compartiment sont des brousses diffuses (F3)

(2) Transition entre les compartiments soudanien et sahélien, la partie Sud de ce compartiment repose sur la partie du Continental Terminal où le socle affleure en surface. Cette transition semble être à l'origine d'une différenciation de la physionomie végétale : à la texture fine du substrat au Nord, correspond une contraction marquée de la végétation, par contre, dans la partie sud où le socle affleure, cette texture devient plus grossière et engendre une végétation à organisation mixte et/ou

diffuse. Les systèmes contractés de plateaux ont alors une organisation hybride (F2) entre les formes végétales diffuses (F3) au sud et les organisations végétales bien structurées (F1) au nord.

(3) Les faciès de végétation contractée étudiés sont principalement des brousses structurées tigrées, typiques, en rosace ou en bandes larges. Sur quelques zones et en bordures des plateaux, le système de micro-pentes ou les dépôts éoliens peuvent occasionner des formes d'organisation mixte de la végétation.

(4) La végétation contractée très bien structurée sur les plateaux se caractérise par une réduction sensible de son recouvrement global. Les brousses structurées tigrées typiques, en rosace ou en bandes larges (F1) constituent la composante essentielle des plateaux.

5.2. Stratégie énergie domestique et économie forestière

L'Ouest nigérien est la zone où l'essentiel des ressources forestières du Niger sont localisées. Il englobe un peu moins des 2/3 des surfaces forestières utiles au niveau national (Ichaou, 1996), dont le 1/3 représente les formations forestières contractées de plateaux. Cette zone est malheureusement celle où sévit un grand problème environnemental. La déforestation occasionnée par la mise en culture d'une part, et l'exploitation du bois-énergie d'autre part, réduisent sensiblement le potentiel forestier existant.

Dans le cadre de la mise en application de la stratégie énergie domestique, un vaste programme de gestion durable a heureusement vu le jour depuis 11 ans. Il a permis l'implantation d'environ deux cents structures opérationnelles de marchés ruraux, qui participent à l'aménagement simplifié et à la gestion forestière. Dans ce cadre, environ 150 000 hectares de formations forestières contractées de plateaux sont sous aménagement forestier simplifié.

La filière bois-énergie dans cette zone est la principale source financière de l'économie forestière nationale. De part sa contribution au produit intérieur brut, elle représente des enjeux socio-économiques et écologiques fondamentaux.

CHAPITRE II MATERIEL ET METHODES

Sachez qu'une méthode - c'est l'enseignement de la réflexion scientifique des dernières décennies - n'est valable que par rapport aux coordonnées et à l'échelle d'observation pour lesquelles elle a été définie. (J. Hamburger, 1979)

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

1- Dispositifs emboîtés (échelles locales et régionales)

1.1. Préalables définis

L'étude de tout système écologique nécessite une capacité de réduire au maximum sa complexité, afin de pouvoir comprendre certaines relations qui permettront de construire des modèles relativement simples, qui, sans restituer l'intégralité des processus, rendent au moins compte des phénomènes essentiels, tels le fonctionnement et la dynamique actuelle. En théorie, cette prétention à caractériser les formations végétales contractées, assez typiques en leur genre, suppose que soient disponibles des données à différents niveaux de perception : depuis l'échelle des éléments de la station écologique composant les unités fonctionnelles, jusqu'au niveau du secteur écologique étudié en passant par toutes les échelles intermédiaires.

Pour que les conclusions soient assorties de résultats valables à l'échelle de la région, les dispositifs sont hiérarchisés pour permettre un échantillonnage emboîté. Une vision d'ensemble a pu alors se dégager par agrégations successives des données recueillies à chaque niveau.

Au préalable, l'étude bibliographique de quelques références a permis de déterminer les principaux axes du travail, les méthodes et outils d'analyse à appliquer :

- **les échelles spatiales d'échantillonnage** : quatre références ont été utilisées, Long (1974), Lamotte (1985), Burel (1991) et Burel et *al.* (1992) dans l'optique des changements d'échelles. Ensuite, Blondel (1979 et 1995) ont servi à préciser les échelles d'observation ;

- **les mesures des structures de la végétation** s'inspirent des méthodes "ligne transect " et "points quadrats" mises au point par Godron (1976), méthodes qui ont été adaptées aux particularités et à l'anisotropie des faciès étudiés. D'autres références comme Duvigneaud (1980), Forman et Godron (1986), Grouzis (1987) ont aidé à mieux préciser la conceptualisation ;

- **l'approche physionomique et les relevés phytosociologiques** pour déterminer les types de végétation (ou formations végétales définies par Trochain, 1957) et les groupes fonctionnels, s'inspirent des références suivantes : Duvigneaud (1980), Godron, Emberger, Daget, Long, Le Floc'h, Poissonet, Sauvage et Wacquant (1968), Daget et Poissonet (1971), Daget et Godron (1979 et 1995), Guinko (1984) ;

- **l'identification des espèces, la définition des types biologiques et de leurs affinités** sont basées sur des classifications qui ont intégré les modifications apportées par de nombreux travaux de botanique tropicale : Saadou (1984 et 1990), Ake Assi (1984), Guinko (1984). Les espèces ont été identifiées à partir des flores suivantes : Flore du Sénégal (J. Berhaut, 1967) ; Flore illustrée du Sénégal (J. Berhaut, 1971, 1974, 1975, 1976, 1979 : tomes I, II, III, IV, V, VI) ; Flore of West Tropical Africa (J. Hutchinson et J.M. Dalziel : 1954, 1958, 1963, 1968, 1972) 2^{ème} édition ;

- **la dynamique des flux de surface et la cartographie des états de surface** s'inspirent de plusieurs travaux, dont nous ne citons que les plus marquants : Collinet et Valentin (1979a), Valentin (1981), Escadafal (1981), Albergel, Ribstein, Valentin (1986), Collinet (1986), Casenave et Valentin (1989, 1992), Le Floc'h, Grouzis, Cornet et Bille (1992) ;

- **les mesures de production de phytomasse et de la productivité biologique** se réfèrent et intègrent d'une part les termes utilisés dans les travaux de Lamotte et Bourlière (1967), Bille (1977,

1980) et d'autre part s'appuient sur l'abondante littérature scientifique publiée par Lossaint et Rapp. Nos travaux ont aussi bénéficié des apports récents de Ledant (1985), Fournier (1987 et 1991), Catinot (1994), et Peyre de Fabregues (1996) ;

- **la détermination des paramètres synthétiques essentiels** caractérisant chacun des faciès de végétation contractée de plateau, s'inspire des travaux d' Aronson and *al.*, (1993, 1995 et 1996). Ces paramètres ou attributs vitaux constituent des critères essentiels de prise de décision.

Ces préalables définis ont permis d'analyser de multiples séries de variables jusqu'à déterminer celles qui sont invariantes à toutes les différentes échelles d'échantillonnage. Partant de l'analyse de ces dernières, s'est dégagée ensuite la distinction entre les modèles d'organisation de la végétation et des tendances homogènes mettant en évidence les relations entre un type de structure et son fonctionnement. Cette approche a été appliquée à l'étude quantitative des différentes unités d'étude pour comprendre les mécanismes qui expliquent les résultats obtenus.

1.2. Dispositifs et plans d'expériences

Les dispositifs d'échantillonnage sont définis et mis en œuvre dans le souci de garantir une bonne représentativité et en tenant compte d'une relative hétérogénéité spatiale des trois organisations végétales étudiées (linéaire, mixte et diffuse). Ces dispositifs, ainsi que les plans d'expérience qui leur ont été associés, répondent aux normes d'un sondage stratifié et aléatoire. Ces dispositifs tiennent enfin compte de la préoccupation de Godron (1976) pour leur validation en phytoécologie : "tout échantillon, qui n'est pas aléatoire ne permet pas d'inférer de la station écologique à la région écologique". L'existence préalable de la typologie qu'a proposée Ichaou (1996), relative aux principaux systèmes contractés, permet de répondre à cette préoccupation lors de l'échantillonnage. Le souci de garantir un caractère aléatoire a été respecté en prenant trois précautions, à savoir : les strates sont déterminées en fonction des critères physiologiques observés sur photos aériennes (vérifiés sur le terrain) et en fonction des étendues de chacune des trois principales structures forestières des plateaux (**cf 3.4.3 ci-après**) ; le tirage aléatoire des zones de localisation des unités d'échantillonnage à l'intérieur des strates qui est aussi réalisé à partir de photos aériennes (mission de 1992 au 1/60 000, couvrant les sites de plateau) ; la répartition des relevés dans les strates est basée sur un échantillon optimum fondé sur l'étendue des strates, l'écart type des variables caractéristiques de chaque strate.

Toutes les mesures phytosociologiques, celles des structures, ainsi que les diverses observations nécessaires, sont effectuées dans ces dispositifs qui sont emboîtés à l'échelle de la région étudiée. Le premier (**fig.9**), à une échelle régionale, correspond à un secteur écologique (transect pluviométrique et latitudinal de 300 km de longueur et qui s'étend du 15° N (avec un peu moins de 300 mm de pluie par an), aux environs du 12°30' N (750 mm de pluie). Le second est à une échelle intermédiaire (éléments du secteur écologique) et correspond à sept sites pilotes sondés en parcourant des transects secondaires (stations écologiques à une échelle locale d'une longueur de 600 à 800 m chacune) caractérisant des conditions homogènes de chacun des trois principaux modes d'organisation de la végétation. A leur tour ces sept sites comptent à l'échelle fine locale 48 parcelles permanentes de 50 x 20 m chacune (éléments de stations).

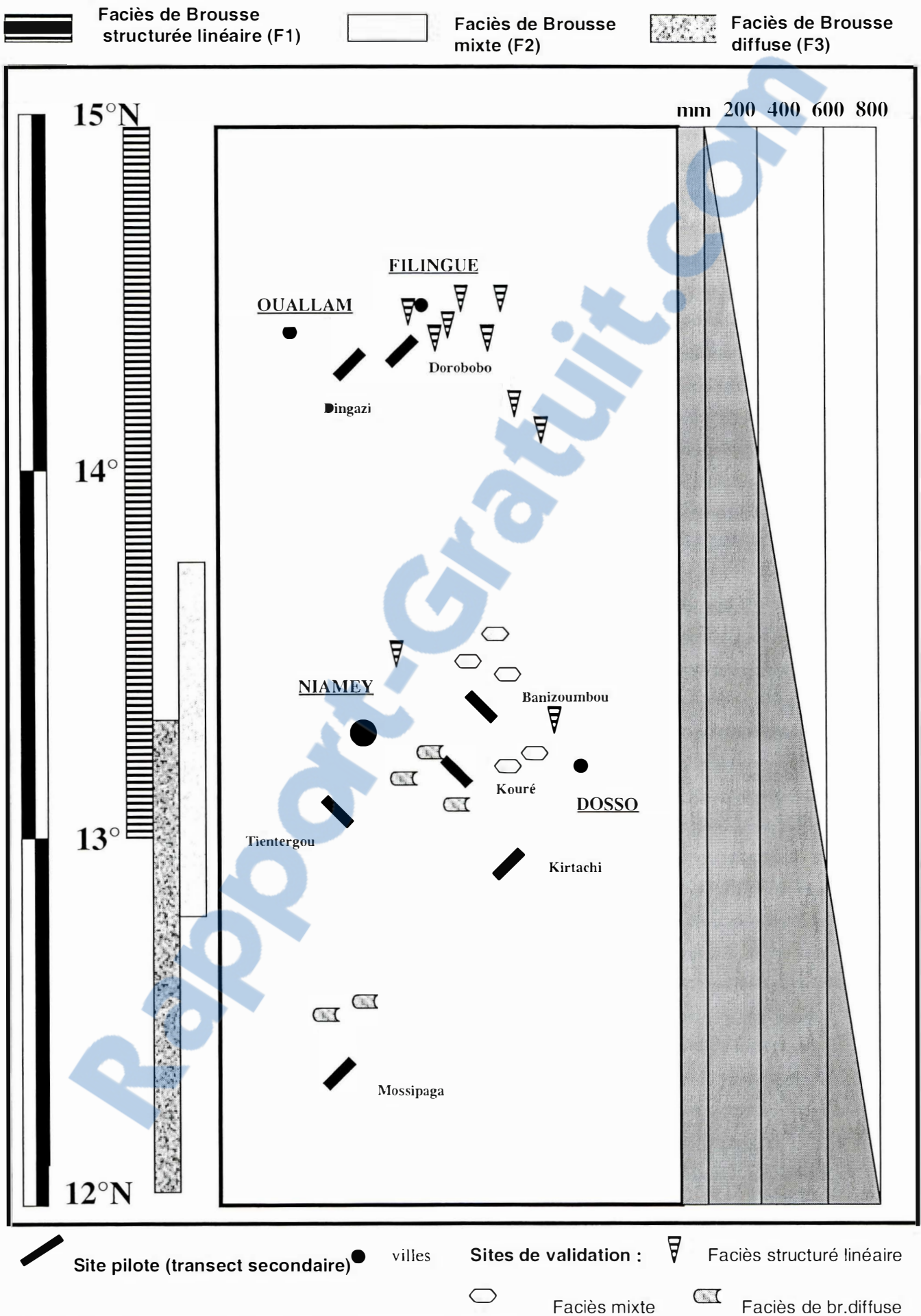


Fig.9 Dispositifs emboîtés d'échantillonnage aléatoire stratifié

Tous ces ensembles permettent de sonder trois formes de contraction de la végétation de plateaux, soit sept sites pilotes (avec 18 parcelles dans trois sites d'étude à structure linéaire, 14 parcelles dans deux sites relatifs aux structures mixtes et enfin 16 parcelles qui sont réparties dans deux sites d'étude de la végétation diffuse). Les sites de validation sont au nombre de vingt et se répartissent dans toute la région.

1.3. Hiérarchisation des échelles d'échantillonnage

Si les dispositifs ont été conçus de manière à ce qu'ils soient emboîtés, l'objectif primordial est d'assurer une forte hiérarchisation de l'échantillonnage qui couvre toutes les échelles considérées. Ces différents niveaux d'échantillonnage correspondent aux échelles où l'analyse, la synthèse, la mise en relation et la comparaison des résultats paraissent pertinentes :

1.3.1. Echantillons de niveau 1 : éléments de station écologique

Ils correspondent à des unités structurales dont le sondage se fait au moyen de parcelles de 50 x 20 m (comprenant chacune une partie de zone nue et une frange boisée). Ils représentent aussi une "période" (zone nue + zone boisée) ou unité élémentaire de fonctionnement dont la mise en évidence n'est possible que sur la base de quatre à six périodes plus ou moins homogènes qui se juxtaposent. Il faut préciser pour ce premier niveau d'échantillonnage que l'implantation d'un dispositif simple (parcelle) vise simplement la couverture des mesures et observations intensives et généralisables à une unité fonctionnelle caractérisant le mode d'organisation du faciès.

1.3.2. Echantillons de niveau 2 : stations écologiques

Quand quatre à six unités élémentaires de paysage présentant une relative uniformité physiologique et structurale se regroupent, elles forment une station écologique, dont les sondages sont effectués selon un dispositif simple (transect secondaire d'environ 400 à 600 mètres). Ce dernier permet d'effectuer des mesures et des observations pour valider l'homogénéité et la représentativité des éléments de la mosaïque paysagère du faciès considéré au niveau local. Ainsi dans le cas d'un site de plateau, ne sont sondées que les stations présentant une très forte homogénéité pour bien traduire les caractéristiques structurales et fonctionnelles des différents types de faciès de végétation existants. La station écologique est donc un cadre fonctionnel de base que définit un type de faciès de la végétation. Le concept de station est perçu ici dans le sens de la terminologie des écologues et correspond à une surface où les conditions écologiques sont homogènes et où la végétation est relativement uniforme. L'homogénéité de la station ou de la végétation, comme l'indique Long (1974), est un problème qui préoccupe les écologues qui lui ont consacré de nombreuses études fondamentales (Godron, 1972). En effet, une station est homogène lorsque chaque espèce peut y trouver des conditions de vie équivalentes d'une extrémité à l'autre et dans toute son étendue. C'est à ce niveau que l'essentiel des mesures relatives à la végétation, à son organisation, à sa production et à son fonctionnement ont été menées.

1.3.3. Echantillons de niveau 3 : éléments de secteur écologique

Les plateaux s'étendent généralement sur quelques centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres. Quand cette étendue est suffisamment grande, elle peut être à l'origine de variations des facteurs écologiques et mésologiques qui déterminent localement des faciès différents et justifier l'existence d'une filiation entre eux. Dans ce cadre, des mesures de variation de la structure de la

végétation dans la région ont permis au préalable à Ichaou (1996) de déterminer globalement à l'échelle de la zone étudiée, trois éléments de secteur écologique où chacun des trois faciès de végétation domine.

Le dispositif à ce niveau est complexe, car constitué d'un grand nombre de stations écologiques (dans chacun des faciès existants). Les mesures et observations sont effectuées en fonction des gradients de variabilité des principaux facteurs discriminants affectant le même paysage écologique (étage bioclimatique où se situe le plateau). L'étude des éléments du secteur écologique a permis de déterminer les organisations dominantes de la végétation sur les plateaux de l'Ouest nigérien.

1.3.4. Echantillon de niveau 4 : secteur écologique

Les trois principaux modes d'organisation de la végétation s'agencent en formant des zones de transition, pour constituer le grand transect latitudinal et pluviométrique ou secteur écologique considéré dans le sens de Long (1974). Ce dernier indique qu'à cette échelle, la perception des critères de végétation et de milieu se précise assez aisément.

A ce niveau de perception, le dispositif est complexe aussi et combine les premiers dispositifs précités. Il est composé d'un très grand nombre de stations écologiques pour permettre une analyse comparative des unités fonctionnelles distinctes de chacun des faciès.

2 - Description des sites caractérisant les principaux modes d'organisation de la végétation contractée

La description des sites qui va suivre a pour but de renforcer la compréhension des liens étroits existants entre les échelles d'échantillonnage. A cet effet, deux sites "lourds" de plateaux ont été retenus à savoir Banizoumbou et Tientergou. Ils ont permis de mener les mesures et observations des niveaux 1 et 2 (ou échelles fines) qui permettent de comprendre en détail le fonctionnement des trois systèmes écologiques et certains de leurs processus écologiques.

Des sites de "transfert" d'échelle ont été tirés au hasard pour couvrir les mesures de l'échelle 3 ou échelle intermédiaire. Ils ont fourni les éléments d'analyse permettant de comprendre l'existence d'un faciès donné ou la coexistence entre différents faciès sur un même plateau. Ces sites ont permis de définir les paramètres synthétiques essentiels ou attributs vitaux qui caractérisent l'ensemble des trois modes d'organisation de la végétation sur ces plateaux.

Enfin des sites de "validation" ont nécessité une troisième série de mesures pour vérifier les résultats obtenus dans les premiers sites et pour confirmer les hypothèses déjà testées aux trois premières échelles. La validation de ces résultats et leur extrapolation à l'échelle 4 (niveau régional) ont conditionné la hiérarchie de l'échantillonnage. L'étude de ces derniers sites a aussi permis d'analyser le fonctionnement des trois modes d'organisation de la végétation selon leurs positions latitudinale et pluviométrique et de tester les hypothèses sur l'existence d'une compensation de facteurs écologiques.

2.1. Sites lourds : études fines de deux stations

Le premier site "lourd" est le plateau de Banizoumbou (situé entre 2°39' et 2°48' de longitude est et 13°31' et 13°40' de latitude nord), à 70 km à l'est de Niamey. Ce site expérimental est l'un des plus documentés actuellement au Niger. De nombreux chercheurs de l'IRD y ont travaillé pendant

quelques années dans le cadre de projets et de programmes internationaux de recherche : dynamique des paysages sahéliens ; Savanes à Long Terme ; Programme International Géosphère Biosphère, Hapex-Sahel (Hydrologic and Atmospheric Pilot Experiment), etc. Les études entreprises par l'IRD ont mis un accent particulier sur la problématique des seuls systèmes contractés structurés linéaires et se sont déroulées essentiellement aux échelles de la bande et du plateau.

Ce plateau d'une superficie de 750 hectares porte essentiellement une végétation contractée qui varie des structures tigrées typiques, à celles en rosace. Après la mise en évidence d'une succession nette des états de surface dans les zones boisées et les zones nues, les efforts ont porté sur le transfert hydrique en surface par des études fines fonctionnelles de ce mode d'organisation linéaire de la végétation.

Le second site expérimental a déjà servi pour des essais d'aménagement forestier simplifié, mis en œuvre par le CIRAD-Forêt et la Direction de l'Environnement. Situé à environ 60 km au sud de Niamey, ce vaste plateau de Tientergou couvre d'un seul tenant 31 000 hectares et se trouve à 15 km à l'ouest de Say (2°10' E et 13°4' N). A l'exception de ses bordures, aucune structuration en bandes de végétation n'apparaît sur les prises de vues aériennes. La succession spatiale répétitive des zones nues et boisées ne s'observe pas ici, ces dernières étant distribuées de façon aléatoire sur le plateau. On ne voit qu'un réseau de plages anastomosées de végétation et de sol nu, dans lequel les signes de transfert hydrique en surface sont moins marqués, traduisant un fonctionnement hydrologique et une dynamique qui sont différents. Ce site, caractéristique des structures végétales ponctuées ou mouchetées (regroupées sous le vocable de brousses diffuses), a accueilli les études fines fonctionnelles détaillées sur les modes d'organisation diffuse de la végétation.

2.2. Sites de transfert d'échelles (variations latitudinales et pluviométriques)

Un tirage aléatoire sans remise, visant à une judicieuse représentativité des types d'unités géomorphologiques (qui influencent les modelés en place et la dynamique des flux en surface), a permis de retenir sept sites de plateaux (**tab.5 a, b, c**) qui se répartissent tout au long de la région étudiée selon les regroupements suivants : deux sites situés entre le 14° et le 15° de latitude N ; trois sites positionnés entre 13° et 14° N ; et enfin deux sites localisés entre 12° et 13° N. Dans chacun des sites, quatre à six transects (de 400 à 600 mètres) qui traversent perpendiculairement six unités structurales, ont été implantés et suivis selon une périodicité qui est fonction de la nature des résultats recherchés. Il faut enfin préciser que tous les types de faciès de végétation ont été largement sondés dans le but d'étudier les facteurs déterminant chacun des faciès, de déterminer et d'expliquer la subdivision d'occupation spatiale correspondant aux particularités zonales qui permettent à chacun des faciès d'être bien inféodés dans seulement une partie du plateau, et enfin de comprendre et d'expliquer le fonctionnement et la dynamique de productivité.

Tab.5 a : Description des sites d'étude des systèmes à organisation linéaire de la végétation

Eléments de description	Dingazi	Dorobobo	Banizoumbou (Sofiabangou)
Coordonnées géographiques	14°11' N et 02°30' E	14°08'N et 02°43' E	13°33' et 02°42'E
Altitude	282 m	286 m	262 m
Subdivision climatique	Climat sahélien	Climat sahélien	Climat sahélien
Compartiment phytogéographique	Nord sahélien occidental	Nord sahélien occidental	Sud sahélien occidental
Unité géomorphologique et sols	Plateau supérieur constitué de sédiments du Continental Terminal	Plateau supérieur constitué de sédiments du Continental Terminal	Plateau supérieur constitué de sédiments du Continental Terminal
Station météorologique la plus proche	Dingazi	Filingué	Banizoumbou

Tab.5 b : Description des sites d'étude des systèmes à organisation mixte de la végétation

Eléments de description	Kouré	Kirtachi
Coordonnées géographiques	13°20'N et 2°32'E	12°59'N et 2°25'E
Altitude	251 m	237 m
Subdivision climatique	Climat sahélo-soudanien	Climat soudanien
Compartiment phytogéographique	Sahélo-soudanien occidental	Nord soudanien occidental
Unité géomorphologique et sols	Plateau démantelé ; avec des sols ferrugineux lessivés ou des mélanges de sables éoliens et de grès argileux	Plateau moyen démantelé ; avec une association de sols reliques et sols ferrugineux ou bien un placage sablo-argileux sur dalle
Station météorologique la plus proche	Kouré	Kollo

Tab.5 c : Description des sites d'étude des systèmes à organisation diffuse de la végétation

Eléments de description	Tientergou	Mossipaga
Coordonnées géographiques	13°02'N et 02°11' E	12°43' N et 01°39' E
Altitude	216 m	257 m
Subdivision climatique	Climat sahélo-soudanien	Climat soudanien
Compartiment phytogéographique	Sahélo-soudanien occidental	Nord soudanien occidental
Unité géomorphologique et sols	Bas plateau, avec des sols peu évolués à faciès ferrugineux ; affleurement du socle ça et là	Bas plateau ensablé, avec des sols peu évolués ou des placages sur dalle localement ferruginisée ; affleurement du socle sur une bonne partie du plateau
Station météorologique la plus proche	Say	Makalondi

2.3. Unités témoins de sondage

Les unités témoins de sondage sont des parcelles (unité structurale) ou des transects secondaires (unités fonctionnelles) qui sont délimités dans les deux sites lourds et non loin des unités de mesures intensives. Ces témoins constituent le "dispositif B" et sont aussi mesurés pour permettre de vérifier ou d'apprécier les écarts de résultats pouvant exister, ou de permettre une comparaison des résultats obtenus entre différents traitements.

2.4. Sites de validation de l'étude

Les observations recueillies dans les deux sites lourds dont l'analyse donne des informations utiles pour l'explication d'un processus donné, orientent le choix des variables invariantes qui constituent la typologie de base. Ces dernières sont ensuite vérifiées dans les stations de transfert d'échelle. Une fois que cette vérification donne des tendances satisfaisantes de confirmation, les

variables prises en compte constituent "des attributs synthétiques vitaux", qui répondent de la même façon quelque soit l'échelle d'analyse. Les sites de validation ont eu justement pour but la mesure des seuls attributs vitaux qui permettent de vérifier ou de prédire un type de structure, un mode de fonctionnement ou une productivité en fonction seulement de leur réponse donnée après l'analyse. Les tirages et les positionnements de ces derniers sites respectent les mêmes règles de sondage aléatoire qui ont été utilisées pour les autres sites, à partir des photos aériennes en fonction de la stratification de la végétation. Le **tableau 6** donne des détails sur les coordonnées de chacun des sites, ainsi que les types de structures étudiées.

2.4.1. Coordonnées géographiques des sites de validation

Tab.6 : Coordonnées géographiques des sites de validation

Réf.	Noms du sites	Cordonnées géographiques		Structure n°1 traversée	structure n°2 traversée	Nombre d'unités fonctionnelles
		Latitudes	Longitudes			
1	Golo Koukou Tondi	14°04'	2°56'	tigrée typique	-	10
2	Yalouna	13°26'	2°31'	tigrée typique	-	6
3	Gombéwa	13°07'	2°32'	diffuse	-	3
4	Arèy	14°37'	2°19'	tigrée bandes larges	-	15
5	Lafiko 2	14°22'	2°25'	tigrée bandes larges	tigrée typique	13
6	Yandi	14°29'	2°51'	tigrée typique	-	14
7	Tourey	13°36'	1°24'	mixte	-	7
8	Boyanga 1	13°20'	2°05'	mixte	-	5
9	Boyanga 2	13°20'	2°05'	mixte	-	5
10	So bangou	14°43'	2°27'	tigrée typique	-	17
11	Fayra	12°50'	1°38'	diffuse	-	2
12	Wérésouldou 1	12°47'	1°53'	diffuse	-	1
13	Zebane Fiti	13°44'	1°58'	mixte	-	8
14	Niamsa	14°54'	2°24'	tigrée typique	-	19
15	Faranwili	14°47'	2°58'	tigrée bandes larges	-	18
16	Wérésouldou 2	12°47'	1°53'	diffuse	-	1
17	Bouzougey	14°14'	2°42'	mixte	-	11
18	Lafiko 1	14°22'	2°25'	tigrée bandes larges	tigrée typique	13
19	Geladio Kounari	13°08'	2°07'	diffuse	-	4
20	Gamba	14°16'	2°29'	tigrée bandes larges	-	12

2.4.2. Hypothèse sur les paramètres écologiques

Trois grandes hypothèses ont été construites, dont les deux premières sont de portée scientifique générale et visent la compréhension d'ensemble des processus biologiques de ces contractions végétales. Par contre, la troisième hypothèse est d'ordre opérationnel et permet d'apprécier les changements quantitatifs et qualitatifs engendrés, qui sont déterminants à différents niveaux d'échelles.

Hypothèses de portée scientifique générale

1. Il existe trois grands types de contraction de la végétation de plateaux, avec les considérations suivantes à vérifier :

- *les structures s'organisent sur des étendues bien déterminées ;
- *les filiations et coexistences entre structures sont possibles, mais dans des zones de transition bien déterminées.

2. Les logiques de fonctionnement biologique et hydrologique sont supposées différentes d'un type de faciès à un autre. Dans cette hypothèse, il faudra vérifier si :

*les unités fonctionnelles ont une influence différente sur l'organisation de la végétation avec pour conséquence la formation des trois faciès de végétation contractée ;

*l'organisation et l'évolution des états de surface seraient-elles la conséquence du rôle joué par les sols nus qui engendrent un fonctionnement hydrique particulier ? Si c'est le cas, ces impluviums seront considérés comme des "ressources" dont l'incidence sera être testée pour voir sa contribution dans le maintien de l'équilibre ou de la stabilité de ces systèmes contractés ;

*il faut aussi vérifier s'il existe un jeu de compensation des principaux facteurs écologiques à l'échelle régionale du paysage.

Hypothèses opérationnelles : après avoir vérifié les deux premières hypothèses, l'étude a enfin procédé à des investigations qui ont permis d'analyser l'hypothèse opérationnelle suivante :

3. la dynamique (donc les changements quantitatifs et qualitatifs engendrés dans le temps et dans l'espace) devrait aussi être différente entre les trois systèmes. Dans cette hypothèse les axes vérifiés sont :

*la dynamique de progression des zones boisées est-elle fondée ? ;

*l'hypothèse d'une productivité au moins égale sinon supérieure des systèmes fortement contractés face aux systèmes ayant une végétation uniformément répartie sur les plateaux pourrait-elle se confirmer même à une échelle régionale ?

*cette dynamique longtemps supposée très fragile a-t-elle des incidences négatives sur la diversité biologique ?

Les analyses et les comparaisons (permettant de vérifier ces hypothèses) ont donné l'occasion d'approfondir des axes de réflexions sur les optiques finales visées par cette étude :

- asseoir des bases fiables d'un suivi écologique durable des écosystèmes contractés de la zone ;

- déterminer des paramètres écologiques synthétiques ou "attributs vitaux" dont la connaissance permet directement de caractériser les types de systèmes (ce qui pourrait permettre de modifier et de simplifier les approches des inventaires forestiers au sol et certaines études d'impact) ;

- mesurer les accroissements et la productivité sylvo-pastorale de ces systèmes écologiques contractés et estimer les quantités de bois-énergie exploitables dans la région.

3 - Méthodes préliminaires de traitement des données cartographiques et télédélectées relatives au secteur étudié

3.1. Typologies proposées par Ambouta, d'Herbès *et al.*

C'est à Ambouta (1984) que nous devons la première proposition d'une typologie des structures contractées des plateaux de l'Ouest nigérien. Cependant, si cette étude constitue une contribution scientifique notable, elle ne situe que globalement ces structures végétales dans la partie occidentale du territoire nigérien et ses marges (la zone orientale du Burkina Faso et la région de Nampala dans le Gourma malien). Dénommant l'ensemble de ces modes d'organisation végétale sous le vocable de "brousses tigrées", à l'exemple de Clos-Arceuduc (1956), elle a d'autres mérites notamment :

- de proposer une terminologie qui distingue les différents faciès : structures linéaires bien organisées en bandes (faciès de brousses tigrées typiques, faciès de brousses tigrées en bandes larges et faciès de brousses tigrées en rosaces) ; structures à organisation mixte (faciès de brousses mixtes) ; et enfin structures diffuses de la végétation (faciès de brousses ponctuées, mouchetées, léopardées, tachetées) ;

- et de poser l'hypothèse de la différenciation des types de faciès en fonction principalement de la latitude et de la topographie.

Une autre typologie est proposée à la suite des travaux de d'Herbès et Mougenot (1996) et de ceux de Mougenot *et al.* (1996). Ces derniers par l'étude d'un transect latitudinal et pluviométrique, ont proposé un essai de reconnaissance et de classification automatique des différentes structures contractées à partir d'images aériennes et satellitaires (SPOT panchromatiques avec 10 m de résolution au sol et SPOT multispectral avec 20 m de résolution au sol). Leur contribution a permis d'améliorer la compréhension de l'évolution spatiale des structures en fonction du gradient climatique et d'émettre des hypothèses sur les possibilités de transition entre ces structures.

Si les travaux ci-dessus servent de référence pour les uns et les autres, il faut cependant reconnaître leur limite du fait de leur portée générale, de l'échelle spatiale limitée d'observation, de la précision et des ordres de grandeur des paramètres écologiques considérés et enfin de l'absence d'une validation par des mesures intensives de terrain.

Dans la perspective de répondre aux différentes attentes du réseau d'observations environnementales à l'échelle régionale, la mise en place des parcelles permanentes dans l'Ouest nigérien a donné l'occasion d'élaborer une typologie qui soit aussi valable dans certains pays voisins (Mali, Burkina Faso, Nigéria et Bénin). Cette ambition a imposé de prendre en compte le changement d'échelle de la compréhension fine (échelles de l'unité structurale et/ou de l'unité fonctionnelle) à celle de l'échelle de quelques images SPOT, d'où nécessité du couplage des travaux détaillés au sol à une analyse de données de télédétection satellitaire et aérienne.

3.2. Traitements cartographique et informatique des données spatiales

Pour obtenir le maximum de rigueur, la procédure de tirage aléatoire (entre 1995 et 1996) des sites étudiés a bénéficié d'une part de l'appui de l'antenne télédétection IRD de Niamey, d'autre part de celui de la cellule cartographie-télédétection de l'unité technique d'appui (Direction de l'Environnement) et de la cellule cartographie du Projet Energie II (Volet Offre). Ces appuis ont essentiellement porté sur des aspects méthodologiques de détermination des emplacements des unités de mesure et d'observation pour la réalisation de la typologie fine.

La première étape a commencé par l'inventaire et l'acquisition des documents topographiques et des données satellitaires couvrant la région : cartes topographiques IGN (éditions 1975 et 1995) au 1 : 50 000 utilisées pour la prospection et les tirages définitifs des sites ; photos aériennes (missions 1992 et 1975) au 1 : 60 000 utilisées pour le positionnement exact des unités sondées, les corrections géométriques et le calcul des taux de recouvrement. Les photos aériennes ont aussi permis de procéder à une interprétation pour déterminer les étendues globales des trois principaux groupes de faciès. Des images "satellite" ont servi à dresser une mosaïque d'ensemble des plateaux du transect pluviométrique et latitudinal et à faire les regroupements sommaires des principaux groupes de faciès.

La seconde et la troisième étape portent sur des travaux de bureau :

*réalisation d'une mosaïque d'images SPOT (donnant la vue d'ensemble des plateaux de la zone) ;

*montage d'une mosaïque de photos aériennes (permettant de localiser les superficies importantes présentant un recouvrement ligneux sur les plateaux) ;

*positionnement des unités et des dispositifs de sondage.

Cette dernière phase est essentielle, car elle détermine la fiabilité du relevé des différents paramètres à toutes les échelles. La finesse des travaux menés a exigé des sondages conséquents aléatoires afin d'obtenir une bonne précision : utilisation de tables de nombres au hasard, matérialisation des layons sur des photos et sur les mosaïques en fonction des trois grandes strates, relevés au GPS (Global Positioning System) des points "d'amers" sur chaque photo aérienne (vérifiés au sol) pour la correction géométrique des images.

Le principe de cette démarche de positionnement et de matérialisation des unités de sondage est fondé sur une utilisation de la télédétection en toile de fonds, pour bien asseoir la méthodologie d'échantillonnage qui tient compte de l'étendue de la zone et de la précision recherchée. Il est supposé que l'emploi de la télédétection donnerait des garanties essentielles suivantes :

- forte représentativité des unités structurales et des unités fonctionnelles des sites pilotes, par rapport à celles du groupe de faciès considéré, pour disposer d'un nombre juste d'unités de sondage ;

- tirage aléatoire à partir de couvertures récentes de photos aériennes (missions 1991 et 1992) des zones de localisation des transects dans chaque site, de façon à traverser des séquences représentatives du faciès et refléter la dynamique actuelle ;

- obtention des résultats comparables d'une part entre les trois groupes de faciès et d'autre part extrapolables à l'échelle de l'Ouest nigérien dans son ensemble.

- l'atteinte d'une forte probabilité pour que les sites d'implantation des unités pilotes génèrent au maximum les caractéristiques du type de faciès étudié.

3.3. Vérité terrain et mesures complémentaires

Des séries de mesures et de comptages au sol ont permis d'apprécier la variabilité des unités structurales, celle des effectifs ligneux par hectare, des classes de diamètre de tiges ligneuses exploitables, et de la diversité structurale. Trente sites différents de plateaux (tirés systématiquement à un pas régulier d'un maillage de toute la région) ont été couverts (en raison de trois transects par site) par des mesures permettant d'estimer la variation des types de structure.

Si ces formations végétales contractées sont bien différenciées sur les vues aériennes, elles le sont bien moins au sol (Mougenot *et al.*, 1997). C'est pourquoi cette étude s'inspire d'une méthode d'exploration rapide proposée pour opérer facilement cette distinction sur le terrain.

3.4. Résultats préliminaires des traitements cartographiques

Ces résultats (Ichaou, 1995, 1996) ont été obtenus dans le cadre des travaux antérieurs et préalables à la mise en place du réseau de parcelles permanentes de suivi environnemental à long terme des systèmes écologiques contractés de plateaux de l'Ouest nigérien. Trois de ces résultats (DEA Ichaou) méritent d'être succinctement présentés dans cette partie méthodologique, car ils ont

permis de formuler les hypothèses du présent travail dont les données traitées et analysées ont été récoltées pendant cinq à six ans dans ce réseau.

3.4.1. Estimation des surfaces et calcul du recouvrement végétal global

Après la sélection définitive des sites pilotes, le traitement des données correspondantes a été effectué selon les étapes rappelées ci-après :

- numérisation de ces données par passage du format analogique au format analytique, qui s'obtient par la "scannérisation" des photos aériennes et la digitalisation des cartes topographiques ;
- amélioration de la qualité visuelle des images : c'est l'ensemble des opérations qui améliorent les contrastes de chaque image et permettent de corriger les anomalies géométriques (liées aux conditions d'altitude de l'avion lors de la prise de vue), qui ne permettent pas une localisation exacte d'une surface ou des mesures fiables de distance ;
- détermination des recouvrements globaux (**tab.7**) de chaque strate (ou groupe de faciès) par calcul automatique des indices de présence et d'absence de la végétation, avec un taux d'erreur compris entre 6 à 10 % (erreurs relatives à la photo aérienne, à la technique de scannage et celle du seuillage). La surface totale couverte par des plateaux dans l'ouest nigérien est estimée à environ 30% (Ambouta, 1984). Par faciès le recouvrement global moyen représente : $40,5\% \pm 3,5$ pour le faciès "brousse tigrée structurée" (dont brousse tigrée à bandes larges de 37 à 41% et brousse tigrée typique de 41 à 44%) ; $46,5\% \pm 5,5$ pour le faciès à organisation mixte ; $70\% \pm 12$ pour le faciès de brousse diffuse.

Tab. 7 : Recouvrement moyen par layons et par unités typologiques des stations pilotes

Sites	Recouvrement en % du premier layon mesuré	Recouvrement en % du deuxième layon mesuré	Recouvrement global moyen de l'unité (%)
Dingazi Banda	40	38	39
Dorobobo	43	-	36
Banizoumbou	42	43	43
Kouré	42	-	41
Kirtachi	51	-	46
Tientergou	52	-	51
Mossipaga	83	82	88

3.4.2. Calcul des étendues de la variabilité des structures végétales

L'existence de trois structures et la variabilité des étendues spatiales qu'elles occupent ont été mises en évidence sur la base d'une tendance décrite par deux indices relatifs aux mesures de structures. La mesure de trois transects secondaires dans chacun des trente sites de plateaux (tirés au hasard dans toute la zone) a permis de calculer les indices qui sont : les coefficients de variation des effectifs ligneux et l'indice de diversité zonale (IDZ) de la structure de chacun des faciès de brousse contractée :

- le coefficient de variation des effectifs ligneux (**fig.10**), sensiblement identique entre les structures végétales linéaires (brousses tigrées à bandes larges : 39% ; brousses tigrées typiques : 40%) caractérise une meilleure homogénéité de la structure démographique dans ces faciès, comparativement aux faciès de brousses à organisation mixte (62%) et de brousses diffuses ($85\% \pm 11$) ;

- l'indice de diversité zonale (**fig.11**) des trois structures décrit les mêmes tendances ci-dessus. La structure zonale très homogène dans les faciès à organisation linéaire (IDZ des brousses tigrées à bandes larges = 1 ; et celui des brousses tigrées typiques = 1) devient fortement hétérogène dans les autres faciès (IDZ des brousses mixtes = 1,6 contre 2,08 pour les brousses diffuses).

Ces deux indices traduisent par ailleurs que les structures linéaires tigrées typiques et à bandes larges forment un même groupe d'une part et que d'autre part les trois faciès de brousse (à organisation linéaire, à organisation mixte et à organisation diffuse) se distinguent nettement en fonction des coefficients de variation de la démographie ligneuse et des indices de diversité zonale de la structure de végétation.

3.5. Discussion des résultats préliminaires

Ces résultats préliminaires semblent corroborer l'existence des trois grands groupes de structures sur lesquels notre postulat de base est formulé à l'échelle régionale de l'Ouest nigérien. Que ce soit en fonction des recouvrements globaux ou des coefficients de variation des effectifs ligneux, ou même des indices de diversité zonale, l'existence des trois systèmes est nettement mise en évidence.

4 - Méthodes de récolte des données de terrain

4.1. Mesures du cadre physique et des structures de la végétation

4.1.1. Méthodes de récolte des données mésologiques

4.1.1.1. Mesure des pentes longitudinales et latérales

L'objectif est de relever des séries de pentes pour mettre en évidence les variations géomorphologiques du plateau. Ces mesures ont concerné tant les sites pilotes que les sites de validation. Afin de bien rendre compte des variations de la pente et les mettre en relation avec l'existence des structures, deux types de transects sont parcourus.

Les mesures se font à l'aide d'un niveau Wild et d'une mire parlante, selon la méthode dite de double stationnement (A et B) de la mire par rapport au niveau. La pente est calculée selon la formule :

$$\text{Pente (\%)} = [\text{Visée avant (en m)} - \text{Visée arrière (en m)} \times 100] / \text{Distance entre les 2 points (en m)}$$

Les transects principaux ou longitudinaux sont orientés perpendiculairement aux bandes de végétation afin de mesurer la plus grande pente. Les transects latéraux (de longueur plus réduite) sont perpendiculaires aux transects longitudinaux pour apprécier la variation topographique latérale. Ils sont positionnés sur l'axe des zones nues rencontrées le long du transect longitudinal.

4.1.1.2. Inventaire des types de croûtes et cartographie du modelé

L'identification des types de croûtes d'érosion a eu lieu dans les transects secondaires des sites pilotes en fin de saison de pluies et durant trois années. Dans les sites de validation, elle n'a lieu qu'une seule année. Les modes de répartition des croûtes et la juxtaposition des surfaces élémentaires qu'elles forment, ont été cartographiés pour permettre de comprendre l'organisation du modelé et d'analyser le mode de redistribution des flux hydriques en surface. Cette cartographie de croûtes (**fig.12**) a été réalisée en fonction de leurs caractéristiques définies par Casenave et Valentin (1989).

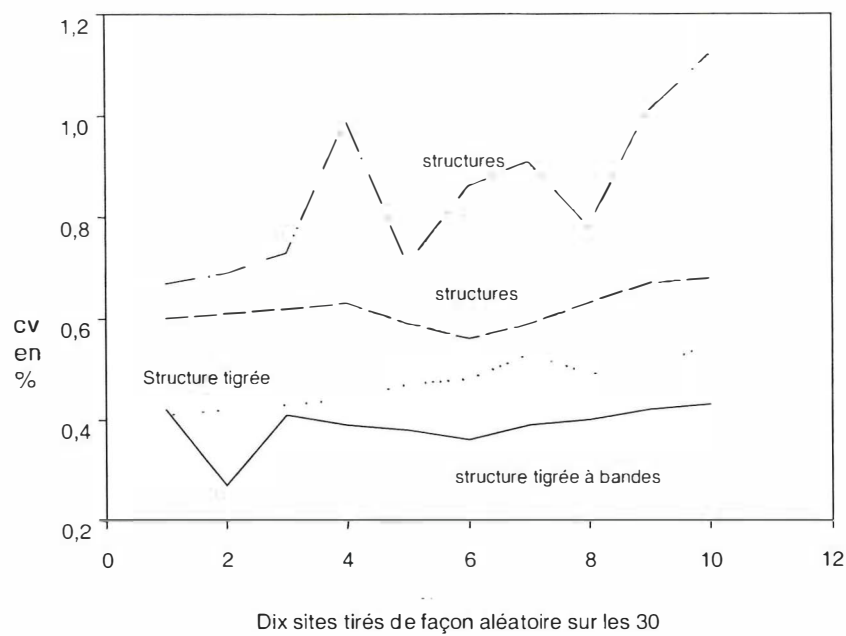


Fig. 10 Tendance décrite par les coefficients de variation des effectifs ligneux par faciès.

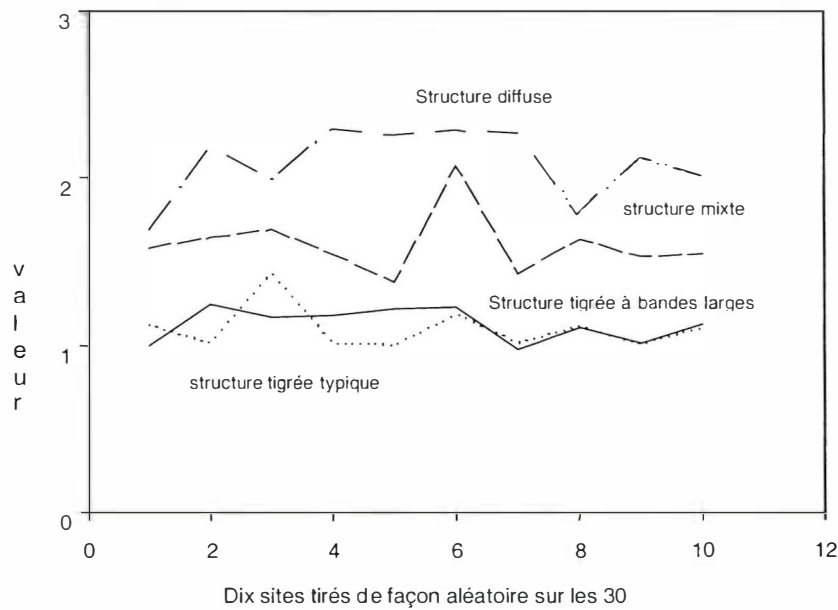


Fig.11 Tendance décrite par les indices de diversité zonale des trois faciès

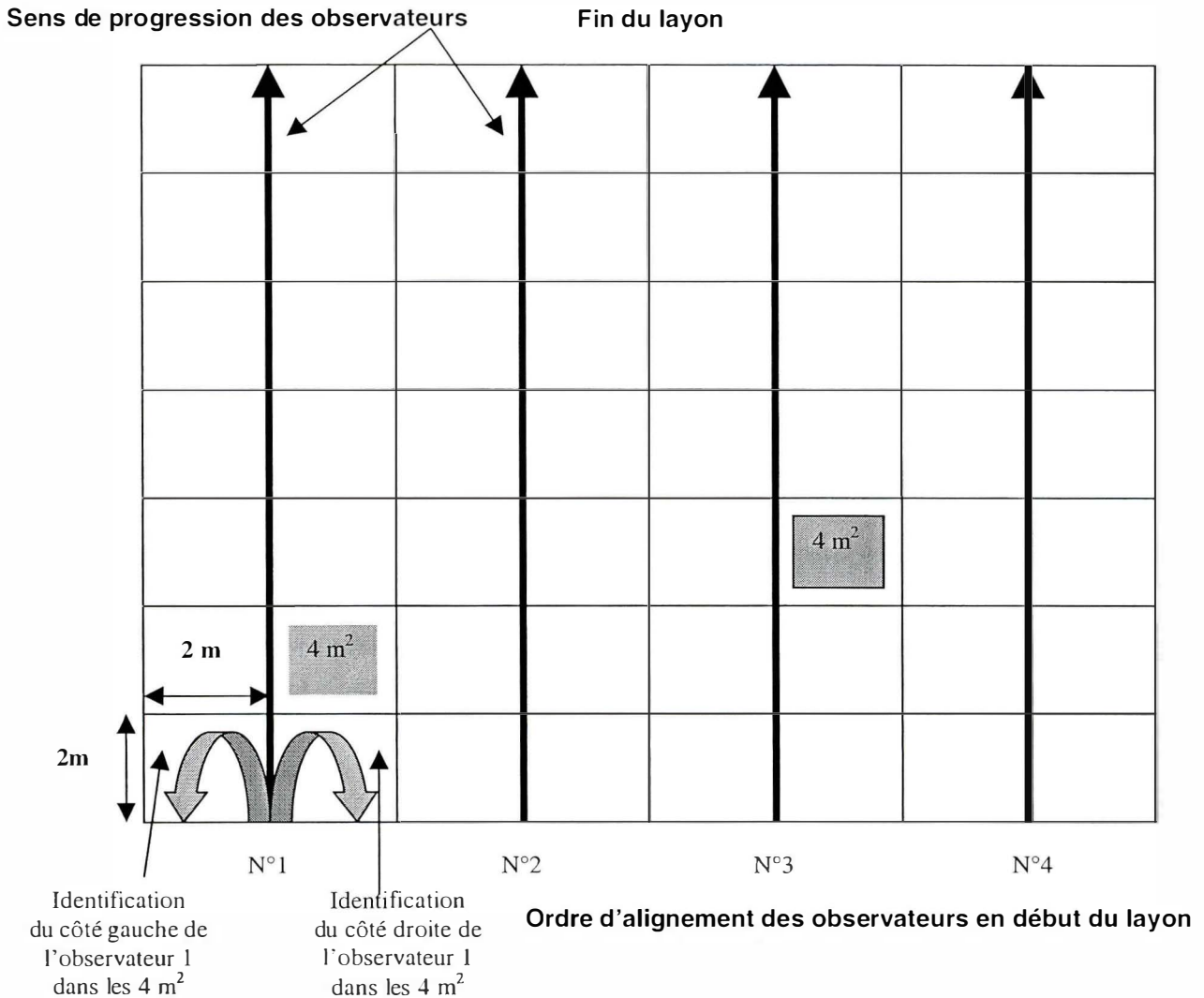


Fig.12 : Identification et cartographie des types de croûtes d'érosion d'un transect

Chaque observateur décrit le transect en identifiant le type de croûte sur 4 m² à sa gauche et sur 4 m² à sa droite. Ces identifications sont notées par un secrétaire sur une fiche. Les codes numériques des croûtes identifiées par faciès constituent une matrice dont le lissage des surfaces de tendance des surfaces élémentaires par le logiciel Systat donne directement la cartographie en "mosaïque" ou en "contour" des traces laissées par la redistribution des flux hydriques en surface. Sept types de croûtes d'érosion ont été identifiés

- croûtes structurales (**ST3**, code 1) : Avec trois microhorizons, ces croûtes sont constituées de sable peu trié, souvent pris en masse et continu. Le premier microhorizon couvre une pellicule plasmique peu épaisse. Dans les deux derniers, la porosité vésiculaire reste discrète ;

- croûtes d'érosion (**ERO**, code 2) : Elles présentent un microrelief mamelonné d'environ 1 cm d'amplitude. Elles correspondent aux croûtes d'érosion de l'horizon B du fait de la forte teneur en argile du sol ;

- croûtes de ruissellement (**RUI**, code **3**) : Cette catégorie de croûtes forme des nappes planes ou se localise dans des chenaux de ruissellement très peu marqués. Elles sont souvent constituées de fragments de cuirasses pouvant dépasser 2 mm ;

- croûtes gravillonnaires (**GRA**, code **4**) : Appelées aussi croûtes grossières, elles sont constituées de fragments de cuirasse inclus à la surface du sol et forment généralement des buttes d'environ un mètre pouvant atteindre 15 cm de hauteur ;

- croûtes de décantation (**DEC**, code **5**) : C'est le microhorizon superficiel qui permet d'identifier aisément les croûtes de décantation par les fentes de dilatation. Elles sont parfois recouvertes de cryptogames (algues, mousses et hépatiques) et présentent alors des plaques rebroussées de plus de cinq centimètres de diamètre ;

- croûtes biologiques (**BIO**, code **6**) : Assimilables morphologiquement aux croûtes structurales, ces croûtes sont marquées par une forte activité de la flore et de la faune. Recouvertes de cryptogames, elles présentent des fentes de retrait d'environ 2 mm de largeur qui dessinent des polygones (> 5 cm de diamètre). Elles présentent par ailleurs une forte macroporosité d'origine biologique ;

- croûtes de dessiccation (**DES**, code **7**) : Elles se caractérisent par l'affleurement d'un microhorizon sableux, unique, légèrement pris en masse, très fragile, pouvant atteindre plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur.

Pour comprendre l'organisation intra-croûtes (croûtes du même type) et les relations inter-croûtes (juxtaposition des surfaces élémentaires) deux analyses sont effectuées. Une recherche de relation de causalité entre les croûtes dans le sens latéral d'une part et d'autre part entre les surfaces élémentaires dans le sens longitudinal de l'impluvium, est faite par calcul de régression. Les variables à expliquer sont les types de croûtes et les variables explicatives leurs positions (en m) sur la largeur et la longueur du transect cartographié. Ensuite des analyses en composantes principales ont permis de voir la position les groupes de croûtes semblables ou au contraire celles qui s'opposent par rapport aux axes factoriels déterminés. Par ces deux méthodes nous avons pu comprendre que les surfaces élémentaires se répartissent différemment entre les trois systèmes et déterminent les modèles d'agencement des croûtes nettement distincts.

Pour pouvoir tirer les conséquences des captages du supplément d'eau de ruissellement, l'hypothèse de la variation de l'infiltration dans les trois faciès est faite. Celle ci bien entendu, s'appuyant sur la nature des organisations pelliculaires de surface. En effet selon Casenave et Valentin (1989), à chaque type de surface élémentaire correspond un comportement hydrodynamique particulier. Ce comportement peut être quantifié en fonction des caractéristiques du ruissellement et de l'infiltration. A cet effet, les surfaces des croûtes cartographiées, ont été regroupées en fonction du rôle fonctionnel des croûtes en :

- des surfaces productrices du ruissellement (SPR) ;
- des surfaces de stockage de l'eau et d'infiltration (SSI) ;
- et des surfaces bénéficiant du supplément d'eau apporté par le ruissellement (SBS).

Ceci a permis d'énoncer une fonction sur leur liaison qui permet de déterminer le supplément théorique d'eau de ruissellement utile à la zone boisée. Le pourcentage du supplément d'eau de ruissellement (PSR) a été calculé sur la base de la fonction et de la formule suivantes proposées :

$$(PSR) = f(SCR,SSI,SBS) \implies PSR = \frac{SCR-SSI}{SBS} \times 100$$

Cette étude du rôle du modelé de surface et de son impact sur la redistribution de l'eau en surface se fonde sur des études pédologique (Ambouta, 1984) et hydrologique (Albergel et al., 1992) qui indiquent, qu'en zone sahélienne, la capacité d'infiltration paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique, croûtes superficielles) qu'à la nature des organisations internes de la couverture pédologique. En effet, ces mêmes études indiquent que :

- dans des zones végétalisées, le pourcentage de couverture végétale (à laquelle est liée l'activité de la mésofaune) est la donnée prédominante pour expliquer l'infiltration ;
- sur les sols nus, les variations de l'infiltration peuvent s'expliquer par la nature des organisations pelliculaires de surface et par la couverture gravillonnaire. Dans tous les cas, l'infiltration reste faible pour ce type d'occupation de sol, et l'impluvium draine cette eau de ruissellement par un transfert principalement vertical au profit des zones boisées immédiatement en aval.

4.1.2. Mesure des structures de la végétation au sol

Les mesures de la structure de la végétation portent sur le relevé des caractéristiques des unités structurales. Ces mesures concernent tous les transects secondaires (de longueur variant de 400 à 800 m) échantillonnant chacun des faciès dans les sites pilotes et les sites de validation. En parcourant ces transects, la largeur des bandes nues et des bandes végétalisées est mesurée en mètre pour permettre de calculer des paramètres relatifs à l'organisation spatiale de la végétation : la largeur des périodes, les distances cumulées à un niveau donné, le rapport de la largeur de l'interbande sur la largeur de la bande, ainsi que l'indice de diversité zonale. Les données recueillies sur les sites pilotes ont été ensuite comparées à celles relatives aux sites de transfert d'échelles et/ou de validation.

4.2. Mesures et méthodes d'inventaire de la végétation ligneuse

4.2.1. Inventaire forestier classique

Les mesures effectuées visent la détermination de la taille des peuplements des trois espèces ligneuses dominantes : *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans* et *Guiera senegalensis*. L'inventaire a procédé par sondage aléatoire stratifié à un degré avec des placettes de taille constante de 0,1 ha. Comme les différentes strates de végétation se présentent généralement sous forme de tâches imbriquées, leur détermination n'est pas aisée. Pour résoudre ce problème et améliorer la précision des estimations à l'échelle de chaque faciès et pour l'ensemble de la zone étudiée, une stratification s'est avérée indispensable. Nous avons alors de façon intuitive constitué des peuplements homogènes à partir des mosaïques de photographies aériennes datant de 1992. Le point de départ des transects étant toujours positionné de façon aléatoire dans les strates.

Sur la base de la superficie des plateaux pilotes et des surfaces occupées par les trois faciès, les taux de sondage suivants sont calculés par strate : 0,41% pour le faciès de brousse structurée linéaire, 0,77% pour le faciès de brousse structurée partiellement ou mixte et 0,51% pour le faciès de brousse diffuse. Ce sondage correspond à un nombre total de 48 parcelles de 1000 m² chacune. Ce

nombre de parcelles est le minimum qui puisse se justifier sur la base d'un coefficient de variation moyen des effectifs ligneux de 40%, d'un pourcentage d'erreur sur la moyenne de 11,5%.

Les paramètres suivants relatifs à chaque arbuste sont notés sur les fiches d'inventaire : nom scientifique de l'espèce, nombre de tiges totales, n° de chaque tige (brin), hauteur (en m) de chaque tige, diamètres de chaque tige (en cm) à 20 cm du sol et à hauteur d'homme, envergure de l'arbuste (le plus petit et le plus grand diamètre du houppier) pour l'estimation du recouvrement.

4.2.2. Cartographie du mode d'agrégation de la strate ligneuse

Le dispositif d'inventaire forestier a aussi été utilisé pour la cartographie de la strate ligneuse. Toutes les tiges des trois espèces ligneuses sont repérées sur la parcelle autour d'un axe central divisant la parcelle en deux dans le sens de la longueur (50 mètres), les emplacements des arbustes (à gauche ou à droite de l'axe) sont mesurés perpendiculairement à cet axe. La placette (**fig.13**) est ainsi divisée en 10 carrés (de 100 m² chacun) numérotés en chiffres impairs pour les carrés de gauche, et pairs pour les carrés de droite.

Cette cartographie permet de traduire la distribution horizontale des trois espèces ligneuses en relation avec leur recouvrement dans chacun des faciès.

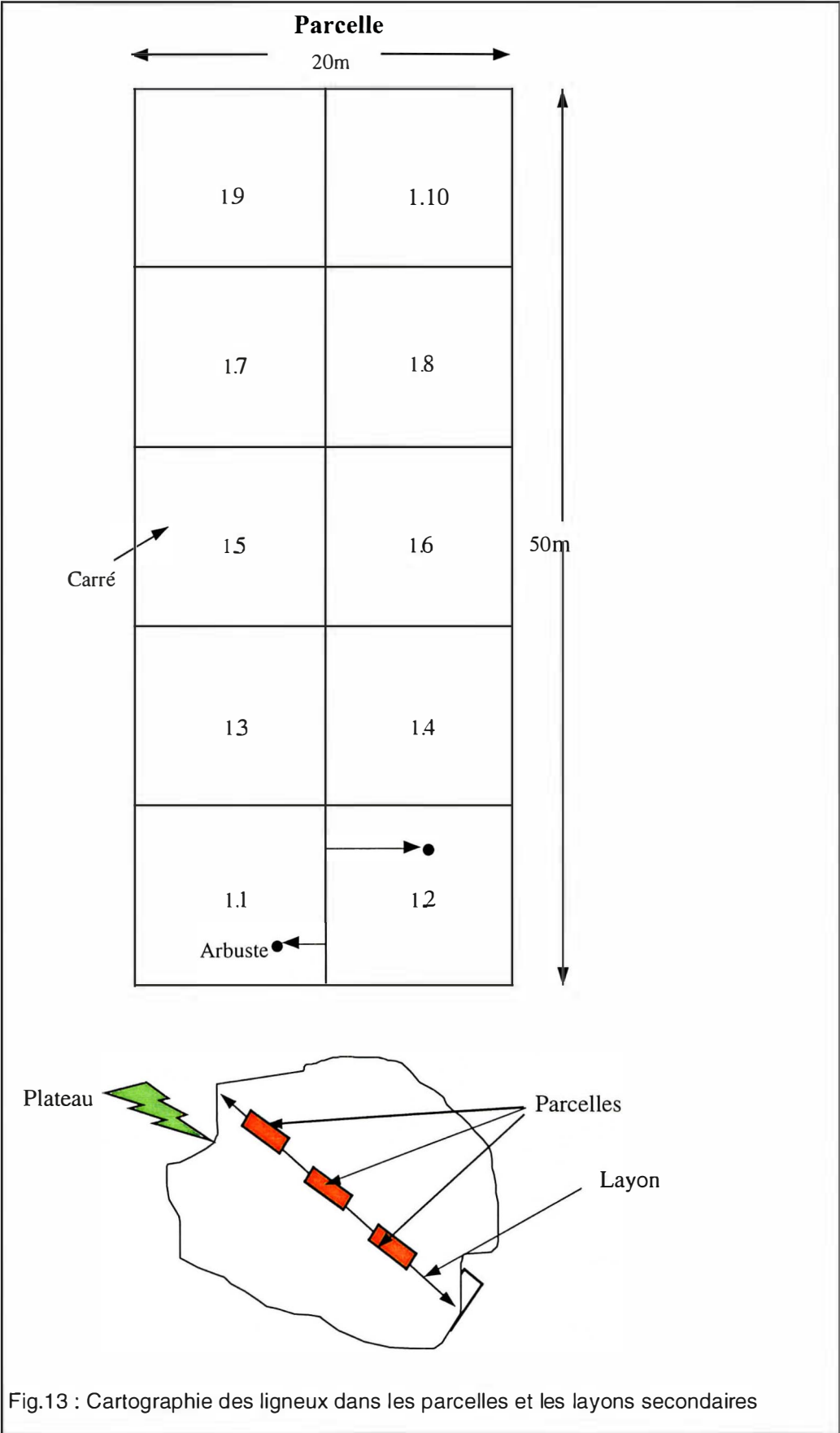
4.2.3. Etude de la distribution des principaux ligneux par dendrochronologie

Si la cartographie des arbustes donne une idée globale de la structure agrégative ou en amas des trois espèces ligneuses, connaître comment se fait cette distribution en fonction du fonctionnement hydrologique est très important. A cet effet, les données de cartographie des arbustes dans 24 parcelles (soit la moitié des parcelles permanentes) ont été complétées par des mesures de distance de chaque arbuste par rapport à la limite des croûtes de décantation immédiatement en amont de la zone végétalisée, et par une datation par dendrochronologie de l'âge de toutes les tiges ligneuses ayant un diamètre à la base ≥ 6 cm (exploitées pour le cubage, **voir 4.4.1 ci-dessous**). La datation par la lecture de cernes annuels d'accroissement s'inspire de Ichaou (1995) qui a mis au point une méthode dont les résultats de datation ne sont pas significativement différents de ceux de la datation par des techniques microscopiques modernes (Mariaux, 1964, 1966 et 1979) *in* Ichaou (1995). La différence entre les deux techniques de datation varie de 1,3 an. Les étapes suivies sont :

- séchage à l'air de deux échantillons de la section du gros bout de chaque tige à dater,
- préparation de la surface de section à examiner par un double ponçage qui commence avec une toile à poncer ayant de gros grains et qui se termine par une toile ayant des grains très fins (calibrage de 320 à 400),
- passage de la section à une loupe classique (qui grossit au moins six fois),
- et datation par deux lectures différentes des deux échantillons avant de faire une moyenne.

La connaissance de l'âge des tiges ligneuses et la mesure de la distance qui les sépare de la limite des croûtes de décantation, permettent de mettre en évidence la distribution des ligneux en relation avec le fonctionnement hydrique dans les trois faciès, par les traitements suivants :

- calcul d'une régression de l'âge des tiges en fonction de la limite de la zone de décantation de l'eau, pour relier le gradient des âges de tiges et le mode du captage du surplus d'eau de ruissellement ;



- utilisation des fonctions du logiciel Splus pour calculer des variogrammes qui déterminent avec plus de précision les processus directionnels que décrivent les âges et les zones homogènes définies ;

- lissage des surfaces de tendance des âges pour avoir les graphiques correspondant aux trois "patterns" et les limites des zones homogènes décrites par les ligneux par faciès.

4.3. Mesures et méthodes d'inventaire de la végétation herbacée

4.3.1. Relevé phytosociologique de la strate herbacée

La méthode d'inventaire et de quantification de la strate herbacée a été appliquée pendant trois ans, à l'échelle de neuf plateaux (sept sites pilotes et deux sites complémentaires pour harmoniser à trois le nombre de sites par faciès). Elle se décompose en deux étapes :

- la première étape dite exploratoire vise l'inventaire le plus exhaustif de la flore herbacée. Le faciès est parcouru selon un itinéraire de quatre transects secondaires où tous les échantillons des espèces herbacées rencontrées sont prélevés et identifiés. Cette étape intervient à deux stades phénologiques, début août = phase de croissance végétative et fin août = phase de sexualisation de la majorité des espèces. Le passage à deux dates permet d'augmenter le nombre d'espèces rigoureusement identifiées, car si au premier passage le stade juvénile de l'espèce ne permet pas avec certitude son identification, cette dernière sera formelle lors de sa phase de floraison.

- la deuxième étape porte sur les neuf sites et vise à relever la fréquence des espèces et à quantifier le matériel herbacé épigé par la récolte intégrale. Compte tenu de la forte anisotropie de ces types de milieu, cette méthode consiste à placer de façon aléatoire un cadre de 1m² (pour deux répétitions) à trois points de relevé qui sont la lisière : Li (zone pionnière ou frange herbacée), le sous-bois : Sb (cœur du fourré) et la zone ensoleillée : Ze (de faible couverture).

Dans chaque unité de 1 m², le matériel herbacé est identifié et noté. Les individus par espèce sont comptés, récoltés et pesés à l'état vert. Mise en sachet, la phytomasse épigée verte est directement passée à l'étuve (à 85°) jusqu'à atteindre un poids constant, pour déterminer le taux de matière sèche (MS).

4.3.2. Etude de la distribution des herbacées dans les zones végétalisées

La préoccupation de cette étude étant de comprendre les relations entre phénomènes simultanés, l'analyse de la composante herbacée permet aussi un autre type de caractérisation de ces systèmes. Les données d'inventaire sur trois ans de cette strate sont triées pour retenir les espèces dominantes, dont le nombre d'individus est >10 dans tous les quadrats. Un effectif de trente neuf espèces est ainsi retenu. Une analyse factorielle de correspondance permet l'étude des effectifs d'individus par espèce et par zone de relevé, en déterminant les espèces qui s'associent ou s'opposent pour déterminer des groupes fonctionnels par faciès. Les zones de localisation de ces groupes fonctionnels représentent les zones homogènes que définissent les herbacées dans les faciès.

Une analyse factorielle des correspondances des effectifs de la population des espèces a permis de mettre en évidence les types d'utilisation du milieu par les groupes fonctionnels.

4.3.3. Mesure de la dynamique saisonnière de la strate herbacée

La dynamique saisonnière de cette strate est analysée par analyse factorielle des correspondances multiples. Les variables sont les effectifs d'individus recensés par faciès dans les quadrats pendant trois ans en fonction des modalités des facteurs : sol (argilo-sableux, latéritique,

limono-sableux et sableux), exigence des espèces en lumière (espèces héliophiles, indifférentes et sciaphiles), et exigence en humidité (espèces indifférentes ; ombrophiles ; et exigeantes en sols bien drainés ou inondables).

L'analyse de la fréquence des individus de la totalité des espèces herbacées identifiées chaque année, dans les trois faciès a permis de mettre en évidence la présence de chaque espèce dans une zone homogène. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite mis en relation à la quantité de pluie tombée au cours de chaque année.

La deuxième analyse n'a porté que sur la fréquence des espèces dominantes et de celles qui sont très rares. Elle a procédé par simple tri en fonction de leurs affinités écologiques théoriques (bibliographie des auteurs localisant les espèces), pour avoir des indications sur leur évolution ou leur comportement selon que les quantités de pluies tombées soient abondantes ou pas.

4.4. Méthodes de quantification de la production épicée ligneuse

4.4.1. Cubage et quantification de la phytomasse épicée globale

Deux méthodes ont permis de quantifier la phytomasse épicée ligneuse. Une coupe rase systématique de 18 parcelles de 1000 m² chacune (6 parcelles par faciès) intervenue en pleine saison végétative a permis d'estimer la production épicée ligneuse globale. Toute la biomasse est pesée à l'état vert et après un séchage à l'air libre.

Les volumes de bois-énergie sur pied dans chaque faciès ont été évalués par l'exploitation sélective (coupe par furetage) des trois espèces ligneuses dominantes et le cubage. Cette coupe par furetage concerne les tiges de diamètre ≥ 6 cm à hauteur d'homme et porte sur 48 placettes (de 1000 m² chacune) réparties dans les sept sites pilotes. La technique de coupe à une hauteur d'environ 20 cm de la surface du sol est celle traditionnellement appliquée par les bûcherons travaillant dans le cadre des structures de marchés ruraux de vente de bois-énergie.

Dans ce dernier cas, directement après la coupe, les produits ont été façonnés. Les tiges et les branches de diamètre ≥ 6 cm à hauteur d'homme sont coupées en bûches de 1m de longueur, avant d'être classées et mises en stères par catégories de diamètres. A la suite du cubage, sont déterminés :

- la masse des différentes classes de diamètre, ainsi que celle des produits ligneux résiduels ;
- les coefficients d'empilage (volume plein contenu dans un stère de bois) selon les catégories de diamètres ;
- les volumes d'encombrement en stère.

4.4.2. Elaboration de tarifs de cubage des peuplements

Les tarifs de peuplement sont les modèles de régression calculée sur la base des caractéristiques dendrométriques mesurées en pratique sur les placettes d'inventaire et qui servent à déterminer la quantité de bois sur pied dans ce type de peuplement sans passer nécessairement par des mesures individuelles sur des arbustes.

Pratiquement, la construction des tarifs commence par un tâtonnement habile dans le choix des mesures et comptages faits sur les arbustes, de manière à ce qu'ils soient faciles à faire et suffisamment corrélés aux volumes recherchés. Les entrées qui sont retenues sont : effectif de tiges de diamètre à hauteur d'homme ≥ 6 cm et l'effectif de ces tiges ayant une hauteur ≥ 4 m par hectare de plateau.

Il s'est imposé de ce fait, deux considérations prises en compte pour évaluer la fiabilité des résultats escomptés : la qualité des modèles de régression et la validation des résultats qu'ils permettent d'obtenir en les comparant avec ceux obtenus par cubage direct.

Ainsi, en établissant les tarifs de peuplements relatifs à chaque faciès, l'option de retenir l'équation qui constituera le tarif tient compte :

- du meilleur ajustement de la régression, après avoir exclus du modèle toutes les observations aberrantes ;
- de l'obtention de la meilleure corrélation entre les observations finalement retenues pour le calcul de la régression,
- du nombre le plus réduit des entrées combinées dans le calcul pour que le tarif soit simple et facile à appliquer pour l'évaluation des volumes sur le terrain.

La validation des tarifs en fonction des estimations qu'ils permettent, se base sur :

- la comparaison des volumes estimés grâce au tarif avec ceux du cubage dans les sites pilotes ;
- la comparaison des estimations du tarif relatives aux sites pilotes avec celles des sites de validation (qui sont obtenues par conversion des variables dendrométriques). Une analyse des variances par le test de Bartlett de ces deux résultats a aussi été prise en compte dans cette validation.

Pour chacune des trois structures végétales et les formations forestières contractées de plateaux de l'ouest nigérien dans leur ensemble, deux modèles de régression multiple ont été calculés (un permettant d'estimer le volume et l'autre donnant accès la masse de bois-énergie).

4.4.3. Méthodes d'étude directe de la productivité et des accroissements ligneux

La méthode directe d'étude de la productivité et des accroissements ligneux a porté sur trois dispositifs différents. Les mesures ont duré de cinq à dix ans et sont répétées à un pas de temps de un à deux ans. Dix huit parcelles de coupe rase ont permis d'estimer un accroissement moyen du peuplement des trois espèces ligneuses. Quarante huit parcelles de coupe par furetage ont servi à l'estimation de l'accroissement moyen du peuplement des tiges ligneuses suivies après la coupe sélective des tiges de diamètre 6 cm à hauteur d'homme. Enfin, le dispositif B (**voir paragraphe 2 : 2.3. ci-dessus**) a permis la mesure de l'accroissement courant des trois espèces ligneuses, dans 18 parcelles témoins (dont six par faciès).

4.4.4. Méthodes d'étude indirecte de la productivité et des accroissements ligneux

Les deux méthodes appliquées pour l'estimation indirecte de l'accroissement ligneux et de la productivité se fondent sur la connaissance de l'âge des tiges ligneuses et des peuplements, estimé par datation avec la méthode de dendrochronologie.

La première méthode permet de calculer la surface terrière théorique produite annuellement par les peuplements par unité de surface. Elle utilise la formule suivante :

Surface terrière annuelle en m^2 (ou $G_{1,30}$) = [(diamètre à 1,30 m en m) 2 / âge de la tige]* 1/4 .

Cette surface terrière est ensuite multipliée par la hauteur de la tige et par un coefficient de forme (F^1) pour estimer directement le volume individuel des tiges. La somme de ces volumes individuels par unité de surface donne l'accroissement annuel.

La deuxième méthode procède par calcul d'une régression de l'âge des tiges en fonction de leur diamètre respectif à hauteur d'homme. Ainsi, la vitesse de croissance annuelle (en m^2) est directement déduite de l'équation. Une fois cet accroissement annuel obtenu, le calcul de la productivité annuelle par unité de surface se fait de manière usuelle.

4.5. Méthodes expérimentales d'étude du fonctionnement hydrologique et biologique

4.5.1. Méthode d'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau de ruissellement

4.5.1.1. Effet de l'arrêt mécanique du ruissellement (Dispositif type "Seghieri")

L'impact réel du supplément d'eau de ruissellement sur les zones boisées a été mesuré par un suivi des accroissements de surface terrière et de la phénologie de 50 arbustes situés en aval de l'ouvrage dans chaque faciès.

Le dispositif expérimental type "Seghieri" (ds) date de 1992 et procède par la suppression totale du bénéfice du supplément d'eau de ruissellement en installant dans la zone nue un mur dans la limite des croûtes de décantation et immédiatement en amont de la bande de la végétation. Ce mur (**fig.14**), construit perpendiculairement au sens des écoulements (ou de la pente) a une double fonction. Par sa fondation, il supprime tout transfert hydrique vertical entre l'impluvium et la bande boisée, en surface, il empêche tout transfert hydrique horizontal entre la zone nue et la zone de végétation. Ce suivi a duré six ans et les mesures et comptages sont intervenues à un pas de temps fixe d'un ou deux ans selon le cas.

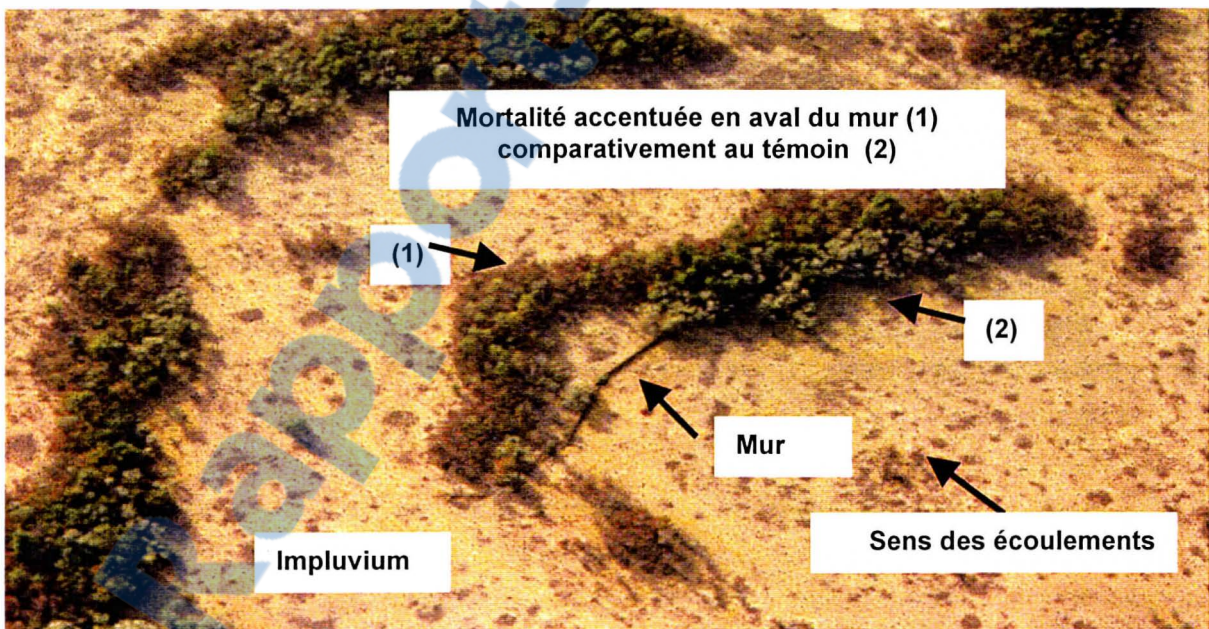


Fig.14 : Dispositif expérimental Type Seghieri (Site pilote de Banizoumbou)

¹ Coefficient de forme = F s'applique pour ajuster le volume des tiges qui ne sont pas des cylindres parfaits. Il se détermine sur un échantillon de tiges abattues. C'est le rapport entre le volume d'un cylindre de section médiane et celui d'un cylindre de section prise à 1,30 m du sol. Sa formule est : $F = \frac{(\text{diamètre médian des tiges})^2}{(\text{diamètre à 1,30 m de ces mêmes tiges})^2}$

4.5.1.2. Effet du piégeage des eaux de ruissellement (Dispositif type "Ichaou")

Le dispositif expérimental du type Ichaou (di) date de 1993 et supprime partiellement le bénéfice du supplément d'eau de ruissellement par la bande végétalisée. Le type de suivi des accroissements de la surface terrière et de la phénologie des 50 arbustes en aval des ouvrages (dans chaque faciès) est identique à celui du dispositif type Seghieri. La mise en place de ce dispositif (**fig.15**) se fait selon les étapes suivantes :

- détermination des écoulements principaux dans la zone nue à aménager ;
- matérialisation des courbes de niveau perpendiculaires à ces écoulements dans l'ensemble de l'impluvium à aménager ;
- creusement des ouvrages de piégeage des eaux de ruissellement le long des courbes de niveau. Ces ouvrages ont un diamètre de deux mètres et sont matérialisés selon une disposition en quinconce et espacés de deux mètres sur les lignes, pour une profondeur de décapage de 30 cm environ. Le déblai est disposé en aval et tout le long de chaque ouvrage pour constituer un renfort.

4.5.2. Etude de la dynamique des peuplements et des espèces ligneuses

4.5.2.1. Méthode d'étude de l'impact des prélèvements (coupes)

Les prélèvements en bois-énergie ont été estimés par enquête. Celle-ci a duré six semaines par an pendant trois ans (soit trois semaines par an pendant la période froide de forte consommation de bois pour le chauffage et trois autres semaines par an pour la période de consommation normale de bois). Trois terroirs qui s'approvisionnent en bois dans trois plateaux (Tientergou F3, Kouré F2 et Dorobobo F1) dont l'accessibilité aux professionnels de la filière bois-énergie est sensiblement la même, ont fait l'objet de sondage sur 10% des ménages. Les informations recherchées étaient :

- la quantité de bois-énergie (en kg) pour la consommation journalière des ménages et par personne,
- la quantité de bois-énergie (en kg) destinée à la vente aux professionnels de la filière bois-énergie,
- la provenance du bois selon les périodes de l'année (plateau ou terroirs cultivés),
- les diamètres les plus couramment exploités et les espèces préférées.

4.5.2.2. Méthode d'étude de l'intensité de l'activité biologique après paillage

L'intensité de l'activité biologique a été appréciée par la réactivation du processus biologique par paillage. Cette expérimentation a duré cinq ans et porte sur deux parcelles de 1000 m² chacune installées dans les plateaux de Banizoumbou (en front pionnier dégradé) et de Tientergou (en lisière de bosquet).

Le procédé consiste à épandre des brindilles, des branchages et des feuilles de ligneux sur une zone nue. Une fois en place cet obstacle retient les colluvions et les alluvions et réduit la force du ruissellement. Il s'ensuit une forte activité des termites qui décomposent les branchages déposés et créent de nombreux macropores dans le sol. Ces derniers permettent à l'eau de s'infiltrer pour approvisionner les horizons supérieurs du sol. Commence alors une série progressive de colonisation herbacée et de pousse de ligneux qui sont comptés et mesurés chaque année.

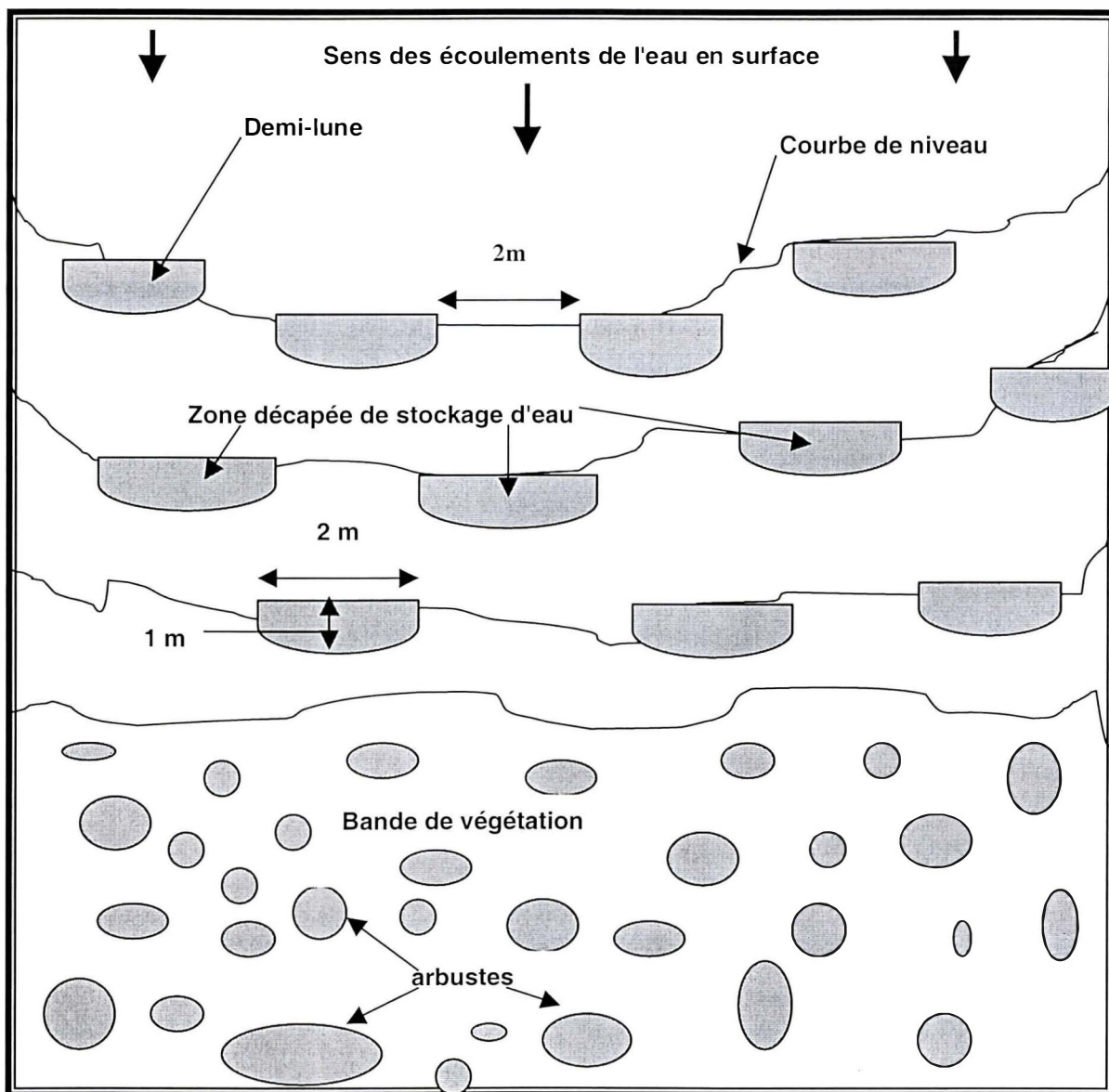


Fig. 15 Dispositif expérimental du type Ichaou (di)

4.5.3. Méthode d'étude des changements temporels par migration des zones boisées

L'étude des changements temporels par la migration des zones boisées constitue un volet permettant de mieux comprendre le fonctionnement des formations végétales contractées. La mise en évidence du phénomène de dynamique spatio-temporelle s'appuie sur la datation par la dendrochronologie des tiges des principaux ligneux (**voir 4.2.3 ci-dessus**).

Elle a commencé par l'examen de la distribution spatiale des ligneux par classes d'âge, par espèces et par zones homogènes, afin de voir s'il y a un gradient d'âge de l'amont vers l'aval ou selon les directions privilégiées que prend le ruissellement. Ensuite, l'estimation de l'avancée annuelle des bandes et/ou taches de végétation et des espèces a été faite par calcul d'une régression entre l'âge des tiges et leur position par rapport à la limite des croûtes de décantation immédiatement située en amont de la bande de végétation.

4.5.4. Méthode d'étude de l'évolution des phénomènes de sénescence et de mortalité

L'importance de la mortalité des trois espèces ligneuses a été estimée dans un premier temps grâce aux données d'inventaire forestier des peuplements à l'échelle de la région. Ensuite le suivi du dispositif B qui porte sur les témoins a permis de voir en six ans quelle est la tendance d'évolution de la mortalité (par comptage) et du phénomène de sénescence des tiges (**fig. 16**). par comparaison de la cartographie initiale des arbustes à celle faite après six ans.

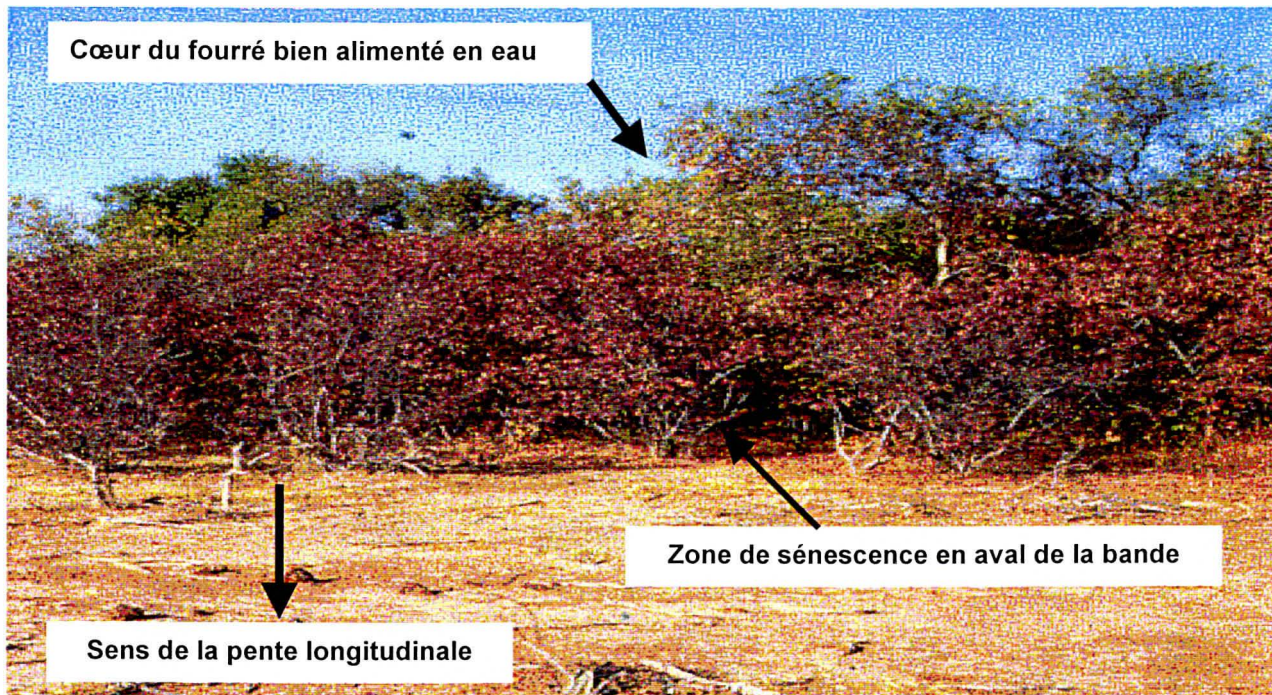


Fig. 16 : Zone de sénescence d'une brousse tigrée typique (Site de Banizoumbou)

4.5.5. Méthode d'étude des formes de régénération par excavation

Le creusement de trois excavations de 2 m de long sur 2 m de large et 1,5 m de profondeur chacune, dans une zone de sous-bois d'une brousse tigrée a permis de mener des observations sur l'origine et les liaisons souterraines entre les trois espèces dominantes. L'observation des réseaux racinaires de 47 arbustes (*Guiera* s., *Combretum* m. et *Combretum* n.) permet de soulever quelques hypothèses sur le mode de multiplication végétative ou sexuée dominant de chaque espèce.

5 - Démarche conceptuelle d'analyse des facteurs écologiques et des interactions

5.1. Démarche hypothético-déductive adoptée

La démarche conceptuelle (**annexe 1**) pour analyser les effets des facteurs écologiques et de leurs interactions s'inspire de Blondel (1995). Nos investigations étant basées sur des approches expérimentales localisées mais hiérarchisées à des échelles emboîtées de la zone étudiée, la démarche hypothético-déductive pourrait donner de bons résultats. La primauté de cette approche sur la démarche inductive n'est pas nouvelle en écologie puisque les écologues se sont accordés il y a plus d'un siècle : quand on veut trouver la vérité, on ne peut asseoir solidement ses idées qu'en cherchant à détruire ses propres conclusions par des expériences. Cette approche offre enfin la possibilité d'identifier les paramètres synthétiques les plus pertinents qui permettent de caractériser les systèmes étudiés.

5.2. Discussions méthodologique et analytique

Cette démarche est pour la première fois testée sur cette thématique dans la zone d'étude. Elle permet sur la base de réponses possibles aux questions posées d'approfondir la problématique environnementale. Elle offre par ailleurs la possibilité de savoir à quels niveaux de précision et de perception il est possible de caractériser telle ou telle variable, telle ou telle modalité de liaison entre variables et systèmes écologiques. Elle a permis de déterminer des critères et des attributs vitaux synthétiques de caractérisation des principaux systèmes forestiers sur ces plateaux. Elle ouvre des perspectives d'une classification automatique des systèmes, de leur production, ce qui permettrait une meilleure gestion à long terme.

Par ailleurs elle soulève de nouvelles hypothèses et pose des questions partiellement traitées, ce qui suppose la nécessité d'élaborer, toujours à partir d'une base expérimentale, un schéma général d'évolution de ces systèmes sylvo-pastoraux sous l'action des processus majeurs qui s'y développent.

6 - Conclusion

Ce chapitre sur le matériel et les méthodes a essayé d'exposer au mieux la démarche de l'étude, ainsi que les méthodes et outils mis en œuvre. Sur la base de la production scientifique antérieure, il permet :

- de comprendre comment sont identifiées les questions fondamentales auxquelles on s'est proposé de répondre ;
- de démontrer la capacité à répondre à ces questions ;
- de mieux apprécier la pertinence de ces questions en les replaçant dans le contexte de la forte hiérarchisation de l'échantillonnage qui permet de tester la démarche hypothético-déductive à cette échelle de l'ouest nigérien.

CHAPITRE III

COMPENSATION ECOLOGIQUE : LE ROLE DU CADRE PHYSIQUE DANS LA REDISTRIBUTION DU FLUX HYDRIQUE DE SURFACE

*Les systèmes végétaux naturels des régions arides
sont d'abord des systèmes fortement contraints et
ensuite dépendants pour la production biologique
des facteurs physiques, propres à ces zones. (Long, 1985)*

CHAPITRE III : COMPENSATION ECOLOGIQUE : LE ROLE DU CADRE PHYSIQUE
DANS LA REDISTRIBUTION DU FLUX HYDRIQUE DE SURFACE

1 - Structure spatiale du cadre physique

1.1. Données physiques

1.1.1. Données topographiques

L'objectif est de mesurer les pentes afin de déterminer leur action sur la redistribution de l'eau en surface. Les pentes mesurées se rapportent d'une part à deux séries de transects perpendiculaires (longitudinaux et latéraux dans les sept plateaux pilotes) et d'autre part à la micro-topographie dans les séquences fonctionnelles des structures. Les résultats obtenus, consignés dans le **tab.8 (a)** montrent que sur l'étendue du plateau :

- en général, les pentes longitudinales sont plus fortes que les pentes latérales ;
- on constate par ailleurs que les pentes longitudinales et latérales sont relativement faibles (autour de 1%), elles tendent (**fig. 17**) à caractériser deux catégories de sites. Dans les trois sites caractérisant F1 (à pente longitudinale très faible et régulière) on ne note qu'une pente latérale quasiment égale à 0 et homogène (CV<31%). En revanche dans les quatre derniers sites, les deux pentes sont relativement fortes et ne diffèrent pas significativement dans chaque plateau (P= 0,935) ;
- les coefficients de variation des pentes longitudinales (jouant un rôle central) traduisent leur forte dispersion dans les deux derniers sites (à organisation diffuse de la végétation).

Tab. 8 (a) : Résultats sur les pentes générales des sept plateaux pilotes

Sites de plateaux	Organisa- tion de la végétation	distance (m)		pente longitudinale (%)			pente latérale (%)		
		Layon longitudinal	Layon latéral	Moyenne	écart type	CV (%)	Moyenne	écart type	CV (%)
Dingazi	Linéaire (F1)	600	300	0,289	0,080	29	0,016	0,018	114
Dorobobo	Linéaire (F1)	700	400	0,225	0,047	21	0,008	0,009	115
Banizoumbou	Linéaire (F1)	560	350	0,292	0,090	31	0,019	0,023	118
Kouré	Mixte (F2)	800	250	0,626	0,170	27	0,380	0,180	49
Kirtachi	Mixte (F2)	470	230	0,458	0,150	33	0,441	0,128	29
Tientergou	Diffuse (F3)	820	210	0,482	0,42	88	0,348	0,323	99
Mossipaga	Diffuse (F3)	350	60	0,715	0,63	88	0,448	0,41	92

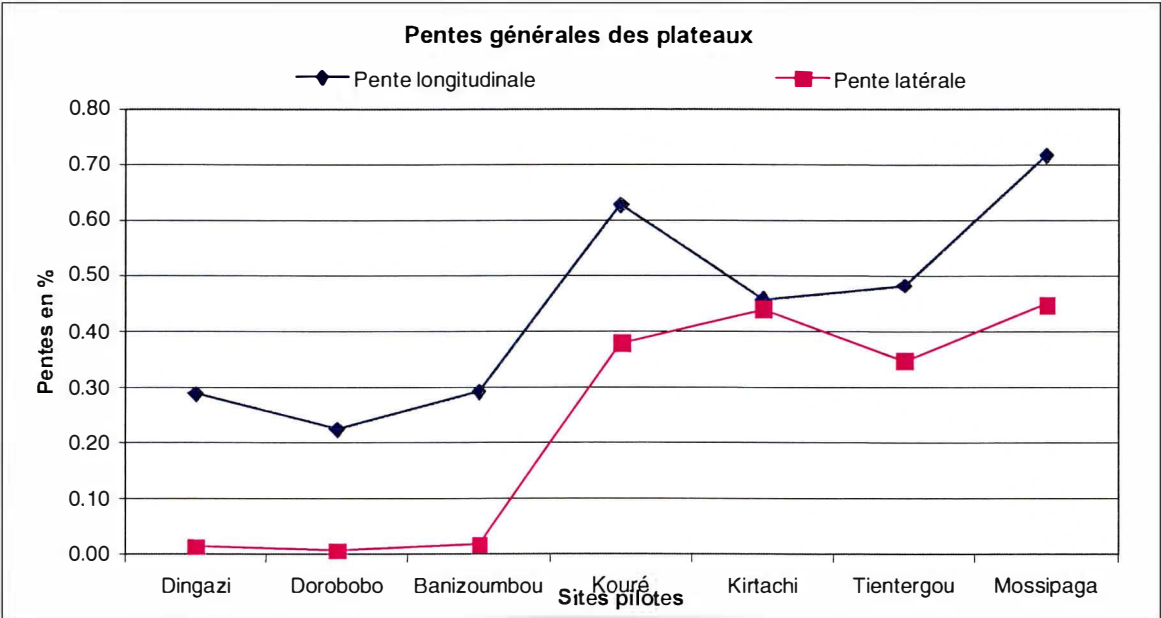


Fig. 17 Pentes générales des sept plateaux pilotes

Les données relatives aux pentes des unités structurales qui sont consignées dans le **tab.8 (b)** permettent de dégager quelques constats que les **fig. 18 (a, b et c)** mettent en relief :

- l'écart type calculé de 0,0083 indique que les structures végétales linéaires (F1) sont soumises à des conditions de pentes longitudinales très régulières quelque soit le site de plateau (Moyenne = 0,269 ± 0,0166, CV = 31%). A l'opposé la pente latérale varie très fortement dans les unités structurales linéaires (CV = 127%). Les écarts types calculés dénotent par ailleurs que ces unités structurales linéaires sont dotées d'un système de combinaison uniforme de pentes longitudinales faibles et régulières et de pentes latérales très faibles, ce qui orienterait les écoulements principalement dans le sens longitudinal ;

- les structures mixtes (F2) sont conditionnées par un système avec deux pentes marquées. La pente longitudinale, relativement plus importante que celle des structures linéaires (moyenne = 0,524 ± 0,056) est couplée à une pente latérale plus faible (moyenne = 0,406 ± 0,061), ce qui aura une conséquence prévisible sur l'irrégularité de la distribution du ruissellement dans ces unités géomorphologiques du type démantelé (même à une faible échelle) ;

- les structures végétales diffuses (F3) constituent deux types de modèles de combinaison de pentes dont : un modèle où les deux pentes sont sensiblement égales (celles-ci étant presque nulles ou sont proches de 1%) et un autre modèle où il n'existe qu'une seule pente longitudinale très proche de 1% qui oriente principalement les écoulements de surface. Que le système soit à double pente (égale) ou qu'il soit doté d'une seule pente longitudinale relativement appréciable (autour de 1%), cela engendre une redistribution du flux en surface. Cette dernière peut être trop faible ou trop soutenue, ce qui ordonne une orientation non prévisible et multidirectionnelle des écoulements en surface.

L'analyse statistique des pentes relevées traduit aussi clairement que d'une part il existe une différence significative entre les pentes longitudinales de certaines structures : (F1≠F2 : P<0,001) ; (F1≠F3 : P=0,008) et que d'autre part ce type de pente ne diffère pas entre F2 et F3 (75% des pentes longitudinales de F3 sont proches de 1%). Les pourcentages des pentes latérales analysés traduisent eux aussi que F1≠F2 (P<0,001) ; F1≠F3 (P<0,001) et F2=F3, (P=0,510). Enfin, l'ensemble des pourcentages des pentes mesurées s'organisent (**fig.19, a et b**) en des groupes bien localisés qui correspondent aux étalements spatiaux des trois structures végétales.

1.1.2. Surfaces occupées par les types de croûtes d'érosion

La cartographie des surfaces occupées par les types de croûtes d'érosion (particules argilo-limoneuses arrachées aux agrégats du sol par l'impact des gouttes de pluies et qui se réorganisent à la surface du sol) permet de décrire les modes de distribution en surface des stocks hydriques drainés par le ruissellement et d'en déduire leur influence théorique sur la dynamique de la végétation en relation avec les pentes du système. Les mesures (répétées sur trois années successives) de toutes les surfaces élémentaires des transects secondaires (dont les pentes des structures sont déjà mesurées), tiennent donc compte des variations temporelles pour donner des tendances probables du comportement hydrodynamique en surface. Dans les états de surface, type de sol, micro relief, taux d'humidité, couverture végétale et croûtes superficielles, ces dernières représentent l'un des indicateurs les plus favorables pour mettre en évidence les unités hydrologiques. Les **fig. 20 (a, b et c)** indiquent que les surfaces élémentaires occupées par les types de croûtes dans les trois structures

Tab. 8 (b) Résultats sur les pentes des unités structurales des 3 faciès

Unités Fonction nelles	Nature de la pente moyenne	Pente moyenne (%)						
		Structure linéaire de la végétation (F1)			Structure mixte de la végétation (F2)		Structure diffuse de la végétation (F3)	
		Dingazi	Dorobobo	Banizoumbou	Kouré	Kirtachi	Tientergou	Mossipaga
1	longitudinale (PL)	0,410	0,210	0,270	1,120	0,610	0,900	0,110
	Latérale (pl)	0,001	0,001	0,001	0,570	0,340	0,350	0,260
2	Longitudinale (PL)	0,390	0,220	0,170	0,640	0,620	0,800	1,140
	Latérale (pl)	0,001	0,002	0,001	0,590	0,310	0,710	0,480
3	Longitudinale (PL)	0,410	0,230	0,280	0,450	0,180	0,700	0,050
	Latérale (pl)	0,002	0,001	0,010	0,540	0,250	0,690	0,030
4	Longitudinale (PL)	0,410	0,200	0,310	0,520	0,220	0,280	0,050
	Latérale (pl)	0,001	0,010	0,010	0,040	0,340	0,010	0,040
5	Longitudinale (PL)	0,230	0,260	0,360	0,480	0,230	0,520	1,560
	Latérale (pl)	0,070	0,020	0,020	0,050	0,430	0,310	0,810
6	Longitudinale (PL)	0,200	0,310	0,520	0,520	0,350	0,760	1,840
	Latérale (pl)	0,010	0,030	0,090	0,350	0,700	0,690	0,030
7	Longitudinale (PL)	0,210	0,220	0,320	0,670	0,670	0,900	0,900
	Latérale (pl)	0,010	0,001	0,020	0,460	0,510	0,350	0,700
8	Longitudinale (PL)	0,220	0,190	0,320	0,900	0,530	1,200	1,120
	Latérale (pl)	0,020	0,002	0,020	0,650	0,340	0,900	1,000
9	Longitudinale (PL)	0,240	0,260	0,340	0,490	0,540	1,200	1,360
	Latérale (pl)	0,020	0,001	0,030	0,060	0,360	1,100	1,110
10	Longitudinale (PL)	0,250	0,110	0,190	0,640	0,450	0,001	0,900
	Latérale (pl)	0,020	0,001	0,001	0,340	0,450	0,001	0,800
11	Longitudinale (PL)	0,200	0,230	0,210	0,650	0,550	0,002	0,960
	Latérale (pl)	0,010	0,020	0,010	0,330	0,430	0,003	0,880
12	Longitudinale (PL)	0,300	0,270	0,220	0,720	0,560	0,001	1,340
	Latérale (pl)	0,030	0,010	0,020	0,520	0,460	0,001	0,930
13	Longitudinale (PL)	-	-	-	0,540	0,600	0,080	0,020
	Latérale (pl)	-	-	-	0,520	0,710	0,090	0,020
14	Longitudinale (PL)	-	-	-	0,430	0,340	0,110	0,040
	Latérale (pl)	-	-	-	0,420	0,410	0,120	0,030
15	Longitudinale (PL)	-	-	-	0,600	0,370	0,140	0,040
	Latérale (pl)	-	-	-	0,320	0,420	0,050	0,050
16	Longitudinale (PL)	-	-	-	0,650	0,520	0,130	0,010
	Latérale (pl)	-	-	-	0,330	0,610	0,200	0,010

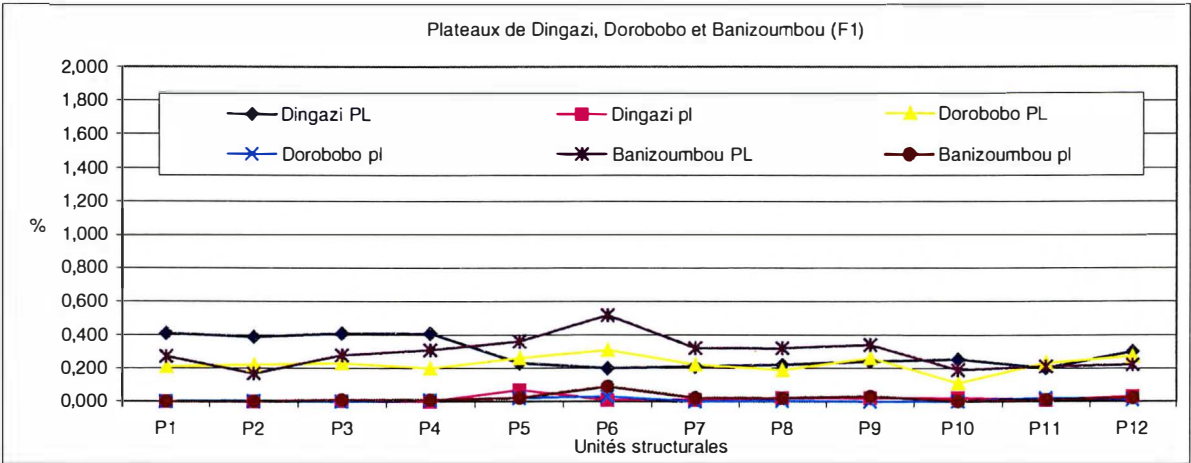


Fig. 18 (a) Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F1

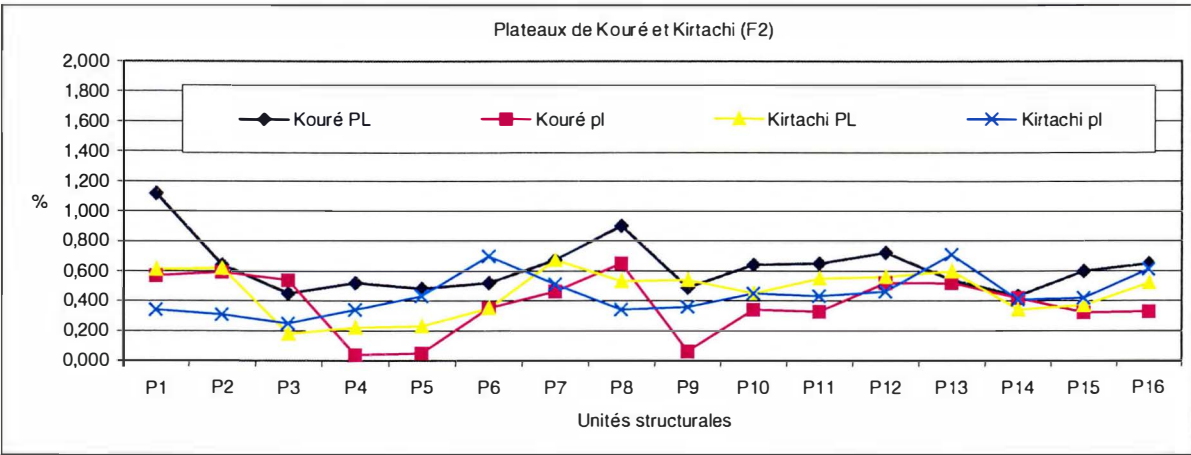


Fig. 18 (b) Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F2

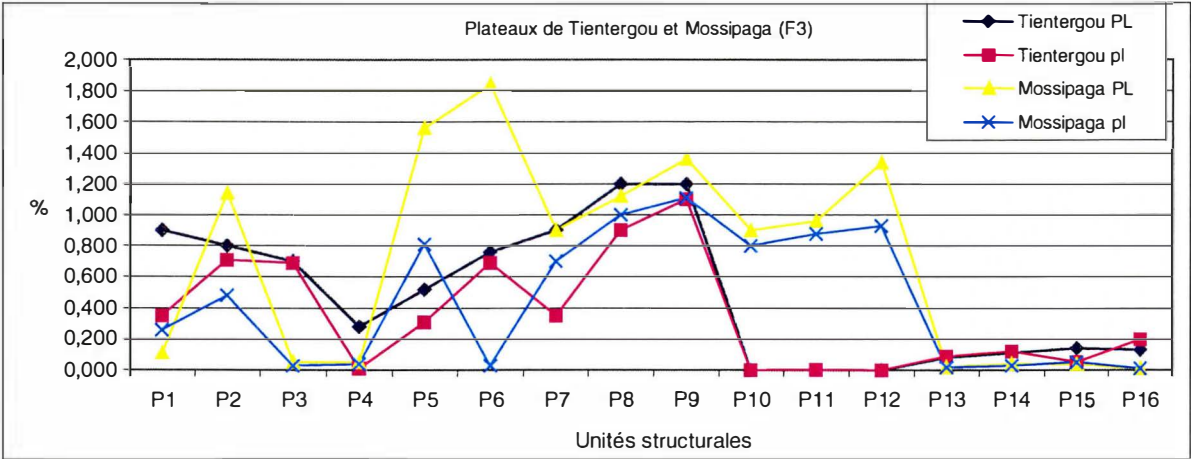


Fig. 18 (c) Variation des pentes moyennes longitudinales et latérales des unités structurales du Faciès F3

N.B : PL = pente longitudinale et pl = pente latérale

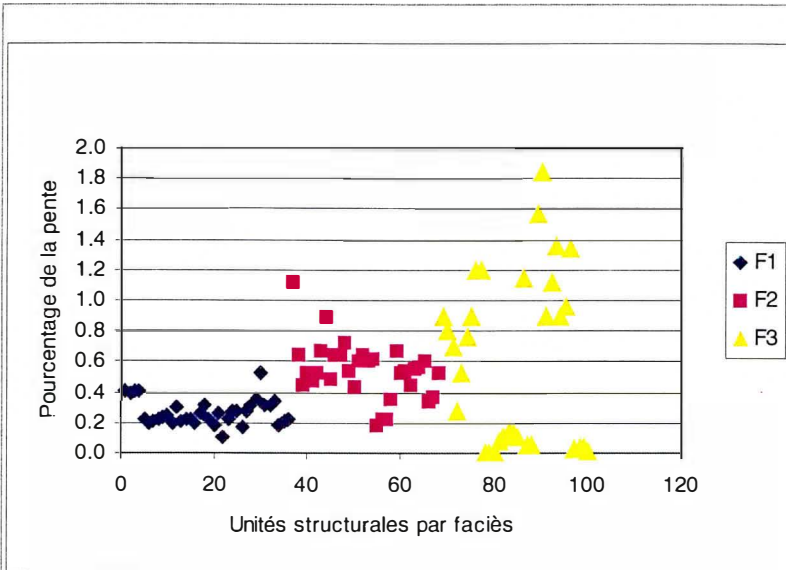


Fig. 19 (a) Dispersion des pentes longitudinales des structures

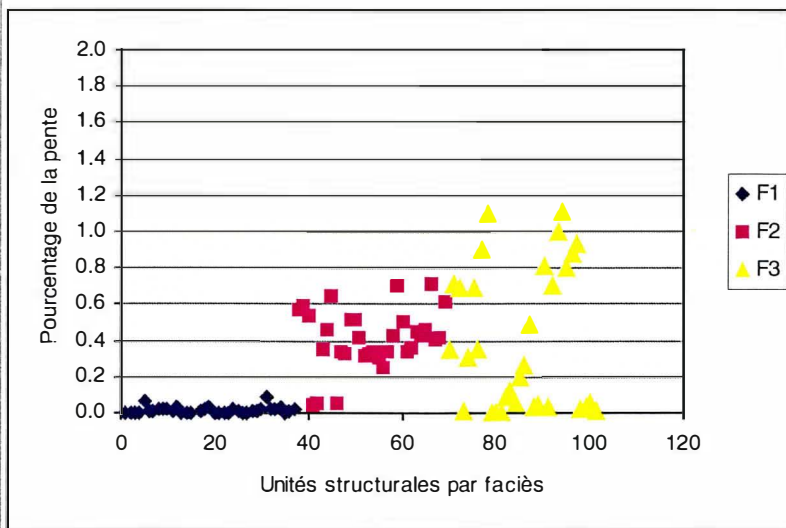


Fig.19 (b) Dispersion des pentes latérales des structures

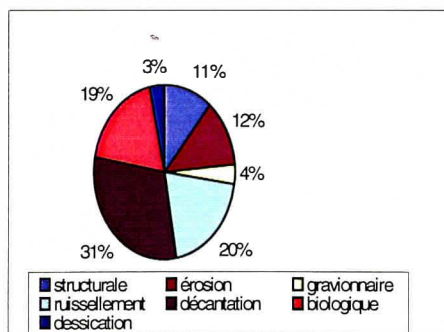


Fig. 17 (a) Surface occupée par les croûtes en F1

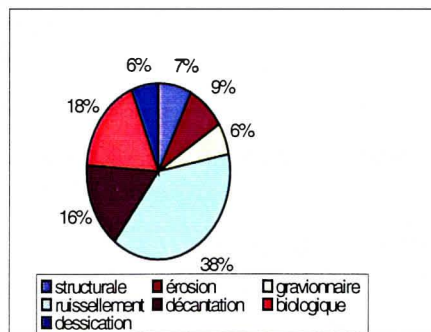


Fig.17 (b) Surface occupée par les croûtes en F2

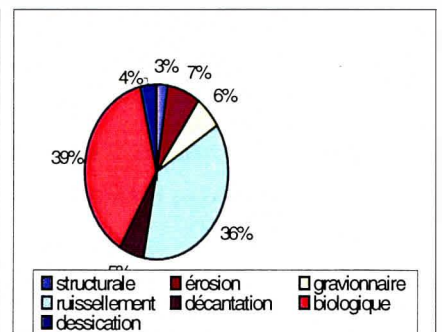


Fig. 17 (c) Surface occupée par les croûtes en F3

ne sont pas distribuées au hasard et qu'elles sont révélatrices d'un certain nombre de constats confirmés d'ailleurs par les analyses statistiques. La première analyse (qui porte sur les pourcentages moyens de la surface couverte par chaque type de croûte pris isolément dans les trois faciès) fait observer :

- une différence significative des surfaces portant les croûtes caractérisant les zones végétalisées (biologiques : BIO et dessiccation : DEC) avec 22% pour F1, 24% pour F2 contre 43% en F3 ($P < 0,003$) entre les trois faciès ;

- les surfaces des croûtes de décantation (DEC) qui diffèrent significativement entre les trois faciès ($P < 0,001$) ont respectivement 31% en F1, 16% en F2 et 5% en F3. La surface de cette unité hydrologique "zone de décantation" représente un potentiel très favorable en F1 qui pourrait avoir une certaine incidence favorable sur la dynamique de la végétation ;

- les croûtes de ruissellement (RUI) occupent des étendues différentes ($P = 0,004$) entre les milieux avec des pourcentages moyens respectifs de 20%, 38% et 36%. Ceci justifierait une plus grande circulation de l'eau de ruissellement dans les faciès 2 et 3 contrairement à F1 qui dispose pourtant de plus d'espace nu ;

- les surfaces occupées par les croûtes gravillonnaires (GRA) ne diffèrent pas significativement entre F1 et F2. En revanche en F3, ce type de croûte occupe plus d'espace comparativement aux deux premiers faciès. Cette situation serait liée à la variation du substrat dont le socle affleure fréquemment en surface dans cette partie de la zone étudiée ;

- l'organisation d'ensemble des croûtes traduit aussi un certain nombre de relations entre elles à l'échelle des sept sites pilotes. En effet, l'analyse des couples de données sur l'identification des croûtes, met en évidence un certain nombre de corrélations : négative entre RUI et DEC ($r = - 0,859$) ; négative entre DEC et BIO ($r = - 0,864$) ; positive entre RUI et GRA ($r = 0,994$) et enfin négative entre DEC et GRA ($r = - 0,906$).

Ces corrélations sont davantage confirmées par une deuxième analyse effectuée sur des combinaisons de pourcentage des surfaces occupées par certaines des croûtes pour constituer quatre regroupements de croûtes selon leur rôle fonctionnel :

- le premier groupe est constitué des croûtes contribuant dans la constitution d'une **surface productrice du ruissellement (SPR)** : il se compose des croûtes structurales (ST3), d'érosion (ERO) et gravillonnaires (GRA), dont le cumul des surfaces est de 27% en F1 ; 22% en F2 et 16 % en F3 ;

- le second groupe : rassemble les croûtes participant dans la formation d'une **surface de circulation et de transfert du flux hydrologique en surface (SCT)** : ce sont les croûtes du type RUI. Les pourcentages totaux moyens varient de 20% en F1 pour passer respectivement à 39% en F2, et à 36% en F3. Ils permettent de déduire qu'en F1 où pourtant la zone nue favorise un ruissellement beaucoup plus important que dans les deux autres faciès, le flux hydrique est bien orienté, ce qui laisse supposer un plus grand contrôle du ruissellement dans ce système ;

- le troisième groupe constitue la **surface de stockage de l'eau et d'infiltration : SSI** (représentée par les croûtes DEC). Ce groupe nous intéresse à plus d'un titre en raison de sa contribution dans le bilan hydrique. Les pourcentages de surface de décantation de l'eau de

ruissellement sont significativement différents entre les trois milieux : $F1=31\%$, $F2=16\%$ et 5% pour $F3$ ($P<0,003$).

- le quatrième groupe correspond à la **surface bénéficiant du supplément d'eau apportée par le ruissellement : SBS** (somme des croûtes BIO et de dessiccation : DES). Les croûtes de ce groupe couvrent de grandes surfaces en $F3$ (42%) où la végétation est uniformément répartie. Ces surfaces se stabilisent à 24% en $F2$ et 22% en $F1$ où le recouvrement végétal est plus faible.

L'analyse des données relatives à ces quatre groupes permet d'établir d'autres corrélations supplémentaires qui renforcent les précédentes pour mieux contribuer à expliquer certains processus écologiques :

- entre **SPR** et **SCT** la corrélation est faible ($r = 0,016$), en raison des correspondances de pentes très irrégulières en $F2$ et $F3$. En $F1$ où les pentes sont régulières et stables, la corrélation devient plus forte ($r = 0,71$). Ceci permet de considérer la pente comme un des facteurs déterminants pour la production du ruissellement et surtout de son contrôle ;

- la corrélation entre **SPR** et **SSI**, négative ($r = -0,56$), justifie davantage l'influence des deux pentes sur les tendances théoriques d'efficacité du contrôle de ce ruissellement (cas de $F1$) ;

- la corrélation positive ($r = 0,90$) existant entre **SPR** et **SBS** traduit l'expression du rapport bande nue sur la bande boisée. Plus ce rapport est fort, plus le système est potentiellement apte à produire sous certaines correspondances de pentes, un ruissellement dont la nature (en nappe) et l'orientation (unidirectionnelle) déterminent son efficacité d'utilisation ;

- enfin, existe une corrélation négative entre **SSI** et **SBS** ($r = -0,86$). Autrement dit, ces deux surfaces sont inversement proportionnelles : plus le recouvrement végétal est faible, plus le stockage et l'infiltration de l'eau sont grands (ou inversement) quand les correspondances de pentes le permettent. Cette corrélation est importante pour justifier une dynamique différente de la végétation, et pour valider les hypothèses et postulats de base à ce travail.

1.1.3. Agencement des types de croûtes selon la pente

Les résultats obtenus à ce niveau permettent de voir que les croûtes se distribuent selon des modèles dont les tendances se relient aux différentes combinaisons entre pente longitudinale et pente latérale. Ces combinaisons étant au nombre de quatre traduisent chacune un mode d'agencement particulier de croûtes.

Premier modèle d'agencement (fig. 21, a) : quand une pente longitudinale régulière de $0,2$ à $0,3\%$ est couplée à une pente latérale très faible de l'ordre de $0,001\%$, les deux prédéterminent un agencement intra (même type de croûte) et inter (entre les différents types) croûtes, régulier et répétitif dans le sens longitudinal uniquement ($P<0,0001$; R^2 intra et inter croûtes = 83 et 90%). Dans cette condition l'écoulement unidirectionnel de l'eau sur les zones nues, très lent et en nappe, se poursuit sur une grande distance ou décrit dans les zones de rupture de charge (même dénivelée) une sorte de rosace avant de se stocker. Ce premier modèle d'agencement des croûtes engendre des bandes et inter bandes très larges (ou dans certains cas circulaires). Il est relatif aux brousses tigrées à bandes larges et en rosace.

Identification des croûtes : 1 = ST3 ; 2 = ERO ; 3=RUI ; 4= GRA ; 5=DEC ; 6=BIO ; 7=DES

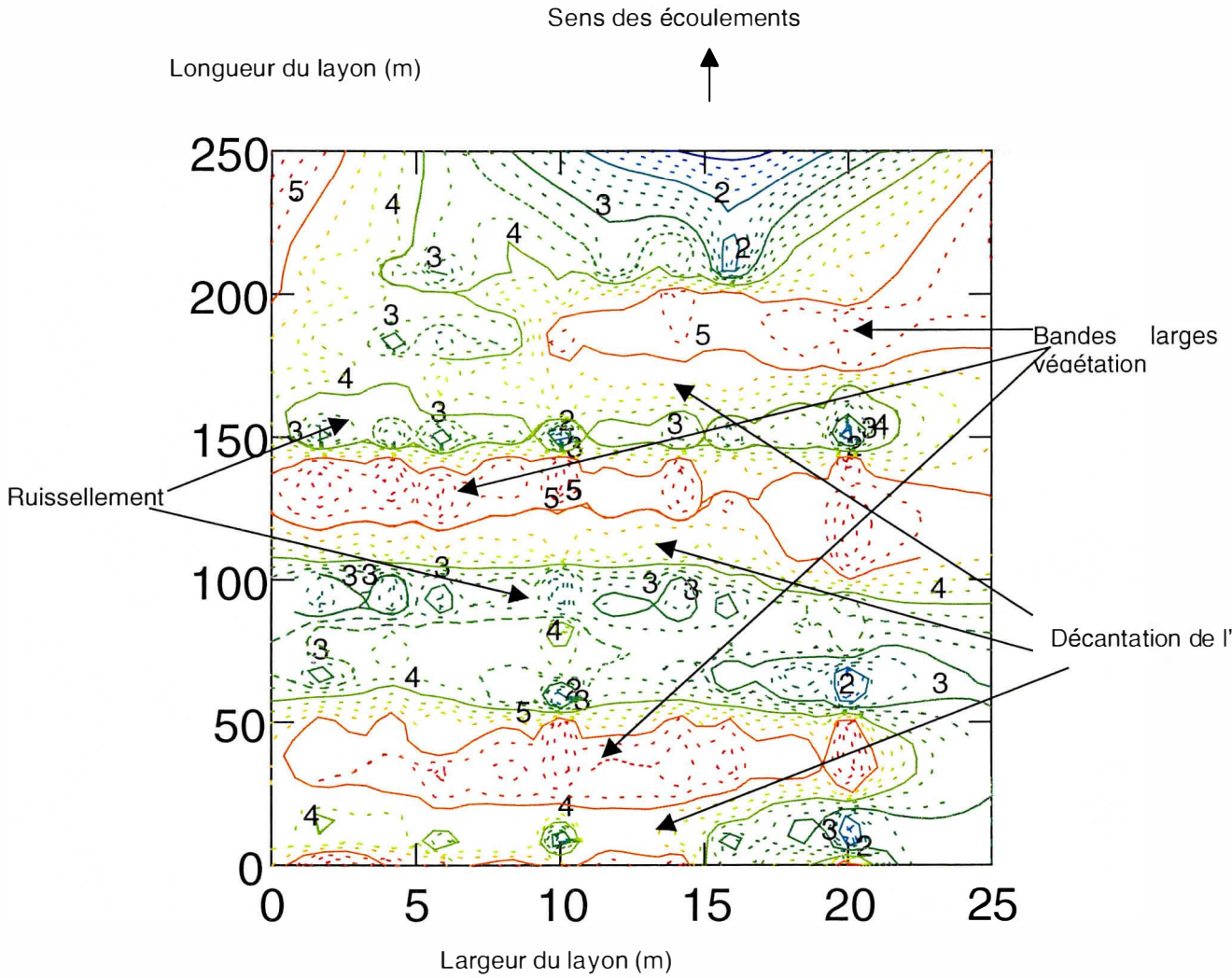


Fig.21 (a) Organisation des croûtes selon le modèle 1. (dans une structure linéaire à bandes larges)

Second modèle (fig. 21, b) : quand la pente longitudinale régulière de 0,2 à 0,4 % est couplée à une pente latérale faible de 0,01 à 0,02%, elles correspondent à un autre agencement intra et inter croûtes dans le sens longitudinal ($P < 0,0001$; R^2 intra et inter croûtes = 80 et 83%), suivi par un agencement moins évident latéral ($P = 0,77$; R^2 intra et inter croûtes = 6% et 12%). Ici l'écoulement encore unidirectionnel favorisé par la légère augmentation de la pente longitudinale atteint la zone de perte de charge très vite, ce qui aboutit à des bandes et inter bandes plus rapprochées, caractéristiques des brousses tigrées typiques.

Identification des croûtes : 1=ST3 ; 2=ERO ; 3=RUI ; 4=GRA ; 5=DEC ; 6=BIO ; 7=DES

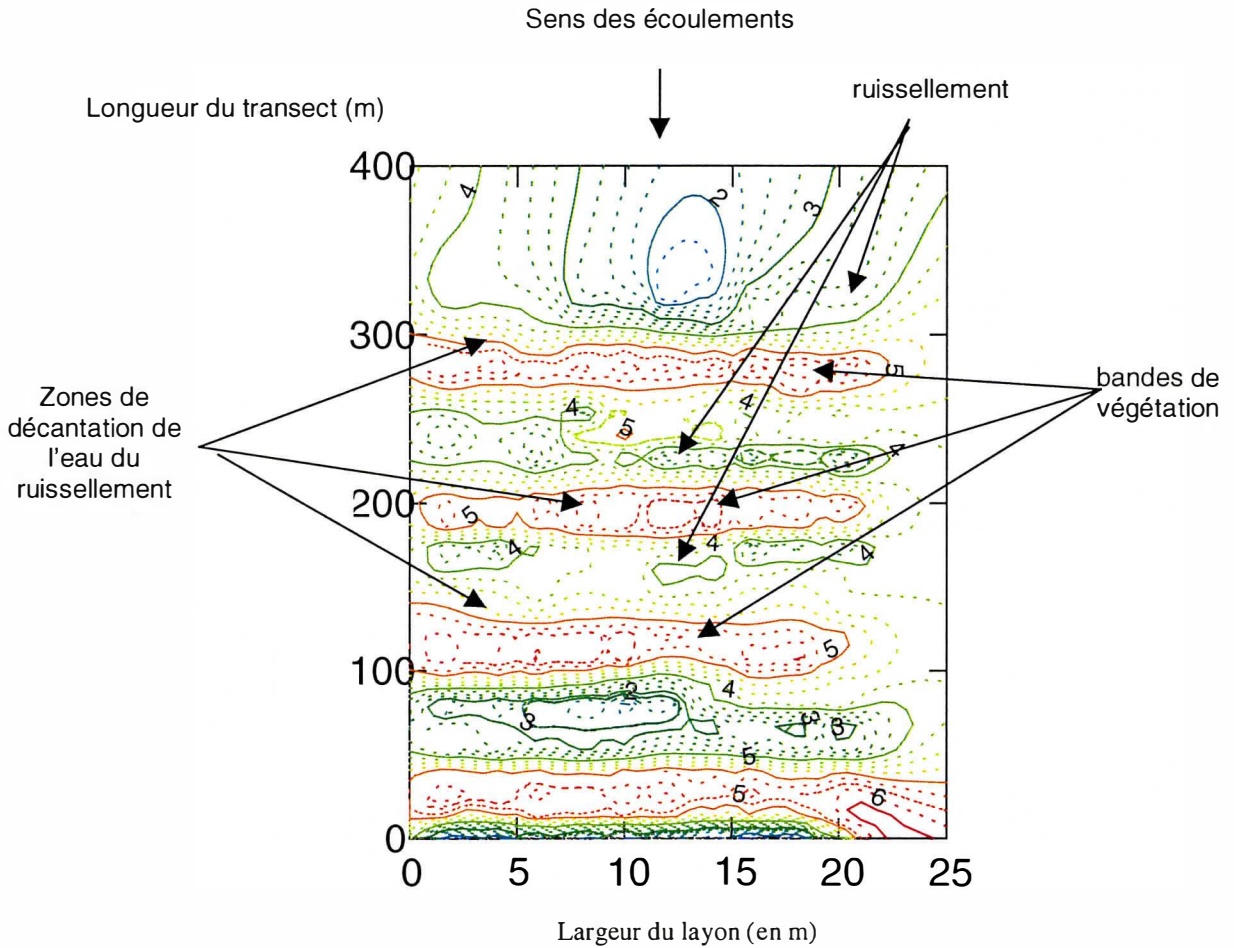


Fig. 21 (b) Organisation des croûtes selon le modèle 2 (dans une structure linéaire typique)

Dans ces deux premiers modèles qui se ressemblent, les croûtes s'organisent de façon standard et homogène, présentent une succession de plages formées de croûtes structurales (ST3), des croûtes d'érosion (ERO), celles de ruissellement (RUI), de décantation (DEC), suivies des croûtes biologiques (BIO) et de dessiccation (DES). Cette succession se fait de façon à ce que la décantation vienne se faire toujours et régulièrement en amont de la zone de végétation où l'activité biologique et la micro faune du sol créent une importante macro porosité. Ces deux modèles d'agencement des croûtes semblent bien adaptés pour capter le supplément d'eau de ruissellement en amont immédiat d'une zone de production végétale. Une autre caractéristique commune de ces deux modèles est que les quatre premières plages de croûtes sont parsemées çà et là de croûtes gravillonnaires (GRA), signe d'un affleurement de la roche mère en surface qui amorce ou soutient la vitesse ou l'importance du ruissellement.

Troisième modèle (fig. 21, c) quand les pentes longitudinales et latérales sont sensiblement égales et irrégulières, l'agencement des croûtes se fait tantôt uniformément tantôt de façon aléatoire dans le sens longitudinal ou latéral définissant des unités structurales linéaires et/ou circulaires caractéristiques du mode d'organisation mixte de la végétation. L'agencement intra et inter croûtes ne se fait que sur des étendues limitées. L'organisation des croûtes suit dans ce cas un mode de distribution aléatoire, se rapprochant du quatrième et/ou du cinquième modèle qui vont suivre. Pour peu qu'il se crée des successions homogènes de plages de croûtes sur une étendue suffisante, il tend vers les deux premiers modèles.

Identification des croûtes : 1=ST3 ; 2=ERO ; 3=RUI ; 4=GRA ; 5=DEC ; 6=BIO ; 7=DES

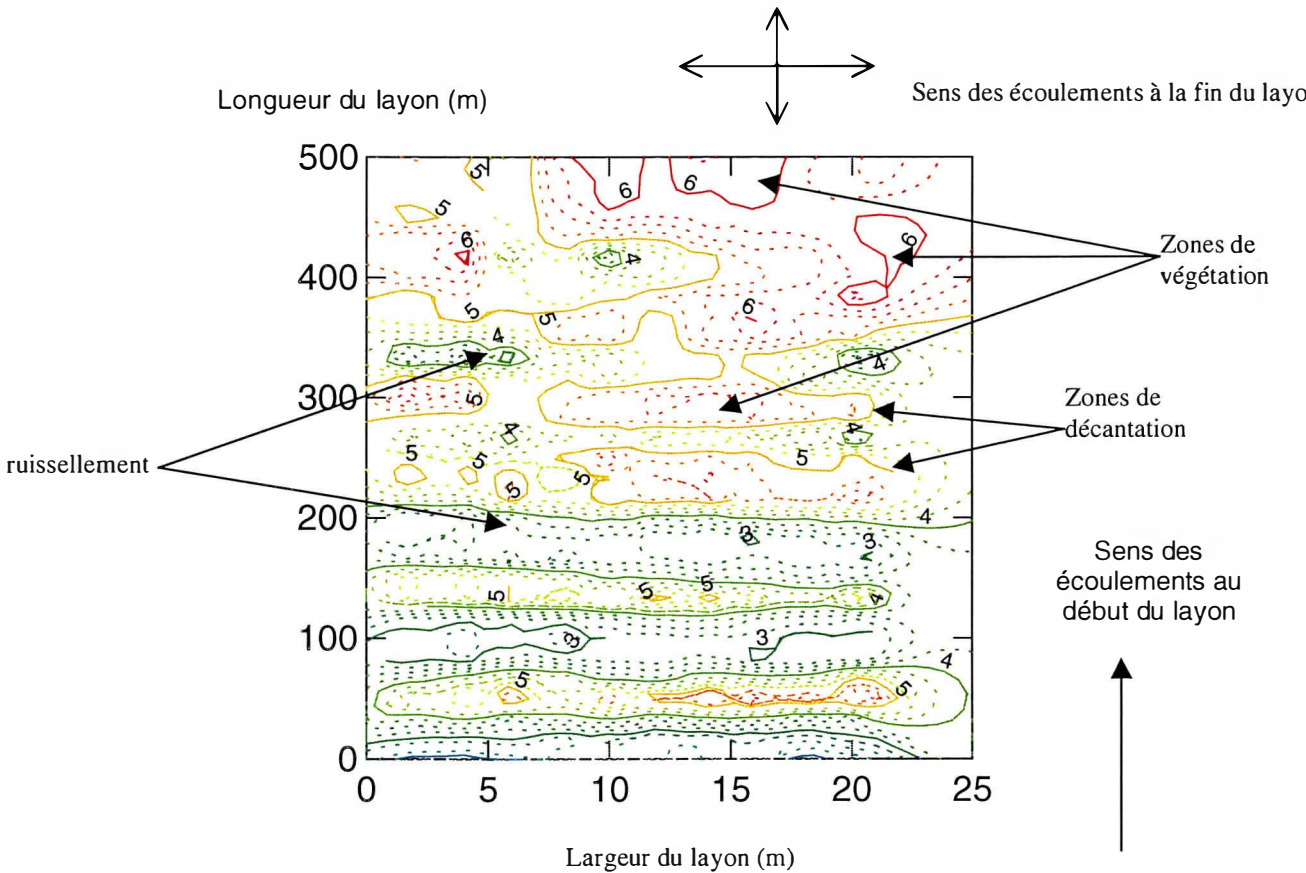
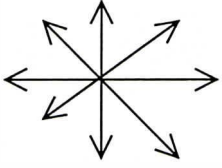


Fig. 21 (c) Organisation des croûtes selon le modèle 3 (structure mixte de la végétation)

Quatrième modèle (fig. 21, d) quand la pente longitudinale et la pente latérale sont égales (pentes nulles ou égales à 1%), l'écoulement est faible et multidirectionnel, ce qui favorise une distribution complètement aléatoire et imprévisible des croûtes. Ce modèle d'agencement de croûtes se rapporte aux modes d'organisation diffuse de la végétation.

Identification des croûtes : 1=ST3 ; 2=ERO ; 3=RUI ; 4=GRA ; 5=DEC ; 6=BIO ; 7=DES

Sens des écoulements



Longueur du layon (m)

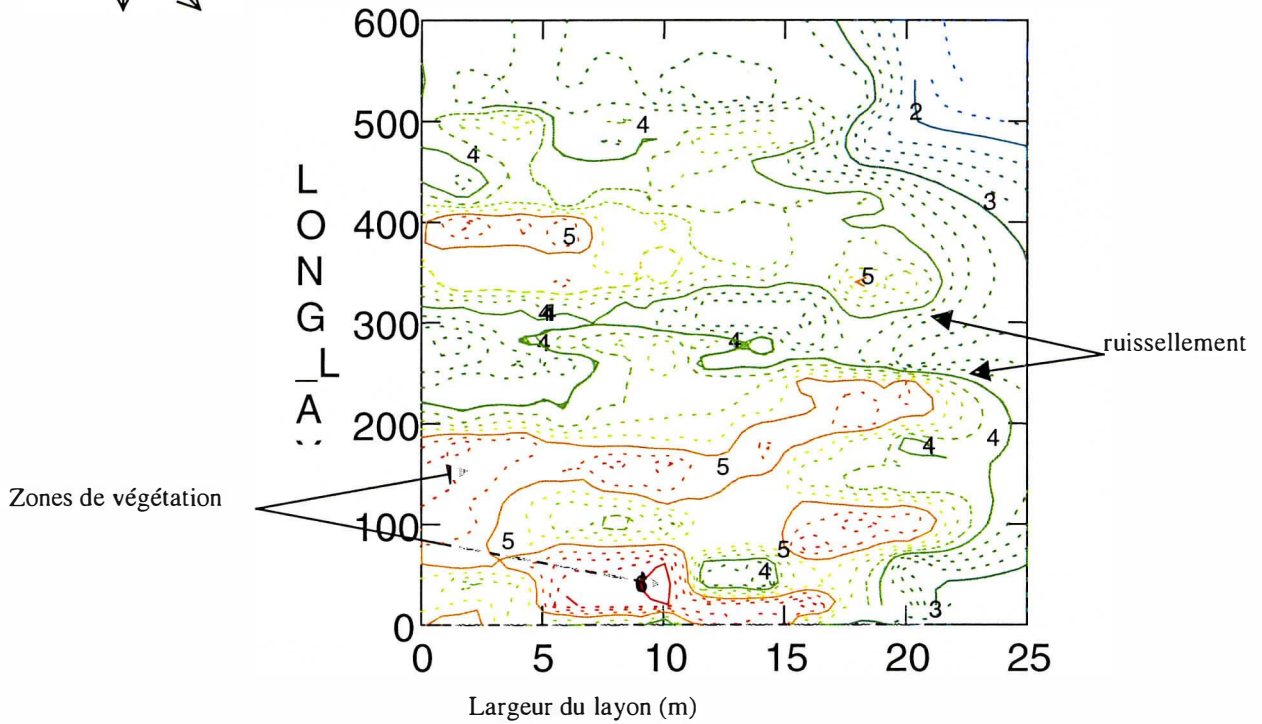


Fig. 21 (d) Organisation des croûtes selon le modèle 4 (cas d' une végétation diffuse)

Cinquième modèle (fig. 21, e) enfin, quand une seule pente longitudinale forte ($\pm 1\%$) domine, l'écoulement est unidirectionnel mais suffisamment soutenu pour drainer l'eau selon une orientation fixe. Après une certaine distance parcourue, l'écoulement devient multidimensionnel, en traçant des itinéraires concaves ou convexes, ce qui donne lieu par exemple, et assez souvent à des champs de décantation de l'eau en pleine zone nue, l'eau ne pouvant pas s'infiltrer se perd certainement par évaporation. Des deux derniers modèles d'agencement des croûtes correspondent à l'organisation diffuse de la végétation qui ne bénéficie en conséquence que de très faibles suppléments d'eau de ruissellement.

Identification des croûtes : 1=ST3 ; 2=ERO ; 3=RUI ; 4=GRA ; 5=DEC ; 6=BIO ; 7=DES

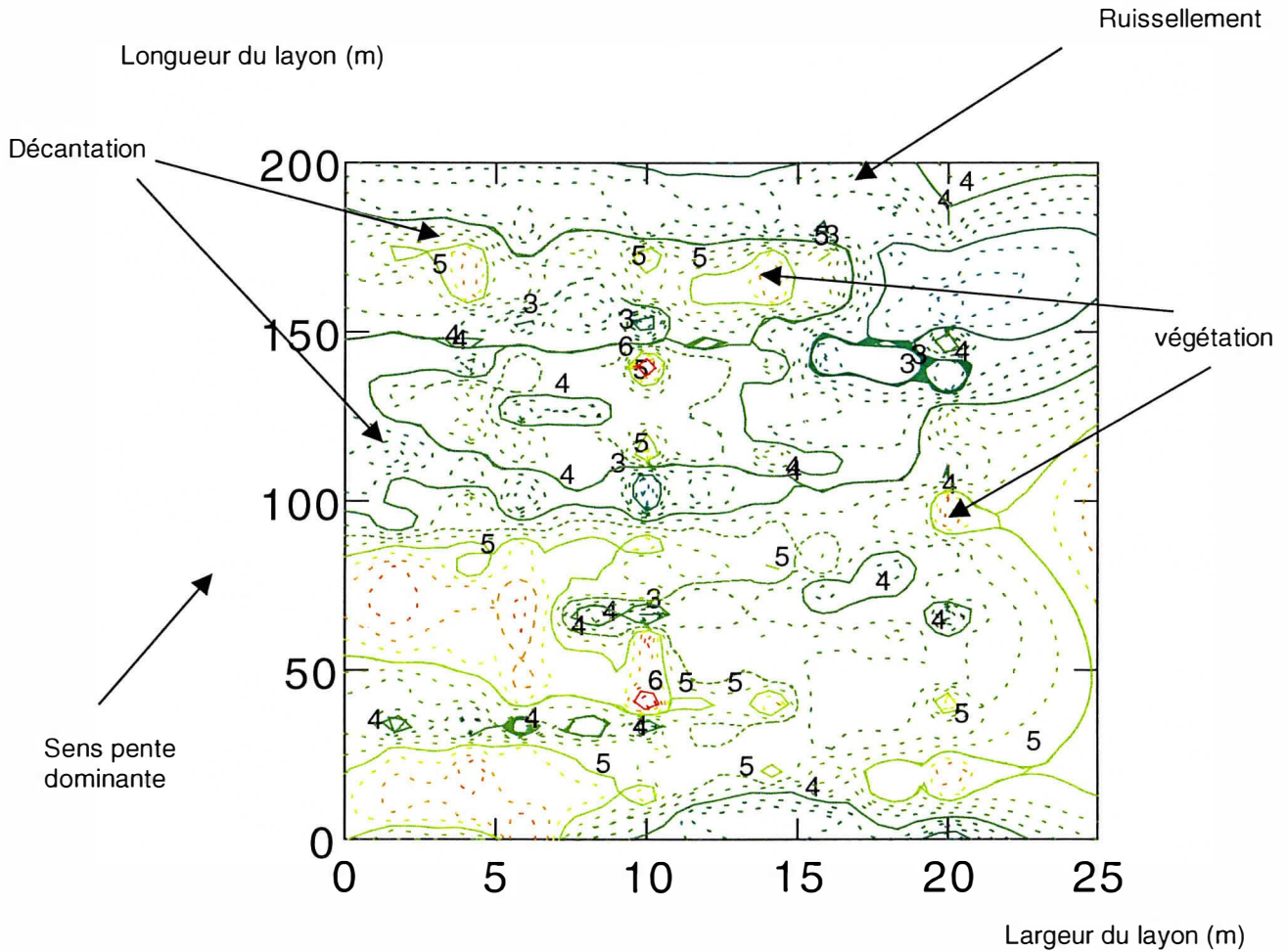


Fig.21 (e) Organisation des croûtes selon le modèle 5 (cas d'une brousse diffuse)

1.2. Discussion des résultats

Cette nouvelle approche pour étudier les données physiques, a permis de comprendre (à travers l'étude des pentes, l'organisation des flux hydriques en surface) la structure superficielle des unités géomorphologiques. Cette dernière, intégrée dans l'étude et l'analyse des systèmes écologiques pourrait davantage améliorer la compréhension d'ensemble des processus.

A cet effet, l'étude des pentes longitudinale et latérale, l'inventaire et la cartographie des croûtes d'érosion, permettent d'apprécier la structure spatiale du modelé des plateaux et les conséquences favorables qu'elle pourrait engendrer.

Les tendances décrites par les pentes à l'échelle globale des sept sites de plateaux pilotes et celles relatives aux pentes des unités structurales caractéristiques des trois modes d'organisation de la végétation, apportent des fondements dans un premier temps aux hypothèses émises et confirment les postulats de base définis pour ce travail. Les processus qu'elles décrivent, traduisent une structure

spatiale d'un cadre physique (plateau) qui représente un réseau de relations directes et indirectes résultant de la variabilité du modelé et qui pourrait de ce fait disposer d'une aptitude de compensation écologique.

A l'étendue globale du plateau, les deux types de pentes mesurées partagent nettement les plateaux en deux groupes : un groupe dont les pentes correspondent à des unités géomorphologiques "plateaux supérieurs" où les unités structurales linéaires tendent à dominer et un deuxième groupe avec des pentes qui caractérisent soit des unités géomorphologiques "plateaux démantelés" où les unités structurales sont mixtes (linéaires et diffuses), soit des bas plateaux où la géomorphologie conditionne essentiellement l'existence des unités structurales diffuses.

L'étude des pentes à l'échelle des unités structurales des trois faciès fournit plus de détails intéressants : l'agencement des pentes longitudinale et latérale (selon le faciès), valide l'hypothèse émise par Delbaere (1994) :

- en F1, la pente longitudinale est très régulière et varie relativement peu, ce qui génère dans tous les cas une orientation prévisible des écoulements (axe longitudinal). En suivant le sens de la pente principale, on rencontre ainsi dans un ordre régulier un impluvium occupé par une zone de dégradation, une zone de transfert du flux, une zone de sédimentation, une zone de décantation et une zone boisée (dont la zone pionnière et le cœur du fourré portent des croûtes biologiques et une zone sénescence couverte de croûtes de dessiccation). Une variation même très faible de la pente longitudinale engendre une transition vers d'autres structures linéaires, ce qui confirme les filiations entre elles ;

- en F2, il existe un système d'inclinaison à deux pentes conduisant à une irrégularité de l'orientation des écoulements en surface, alors qu'en F3 il existe 2 modèles voisins de combinaison de pentes qui génèrent tous un écoulement dont l'orientation n'est pas prévisible car multidirectionnelle.

Cette correspondance des pentes tend surtout à démontrer que la pente est un facteur déterminant, qui conditionnerait la production du ruissellement, son contrôle à travers l'étendue des faciès. Il en résulte un modèle d'agencement des croûtes d'érosion qui sont les indices témoins des flux hydrologiques en surface. Cela est vérifié par une première analyse des surfaces occupées par les croûtes d'érosion. Prises individuellement ces surfaces mettent en évidence une forte occupation (31%) par les croûtes de décantation en F1, qui baisse à 16% en F2 et enfin se réduit sensiblement en F3 (5% seulement). Aussi ce faciès F1 disposant d'une proportion importante de sol nu (+ de 50%), semble en revanche mieux assurer un contrôle du ruissellement (dont la surface occupée est réduite à 20%) comparativement aux deux autres systèmes (39% en F2 et 36% en F3). Cette même analyse indique que les croûtes gravillonnaires sont plus importantes en F3, mettant ainsi en évidence la variation du substrat dans ces latitudes ouest de la zone étudiée. Aussi, elle permet de dégager des degrés de relation à travers un certain nombre de corrélations importantes qui lient ces paramètres "croûtes d'érosion" : opposition négative entre RUI et DEC (les faciès F2 et F3 avec une plus grande surface soumise au ruissellement, présentent de faibles surfaces de décantation), entre DEC et BIO (F2 et F3 à fort recouvrement végétal semblent aussi décanter très peu de cette eau de ruissellement) et enfin une forte concordance positive entre RUI et GRA (ce qui est normal, les croûtes gravillonnaires formant une légère butte amorcent et soutiennent la circulation de l'eau).

Dans une seconde étape d'analyse des variables construites à partir de l'inventaire des croûtes, on observe d'autres liaisons importantes au vu des coefficients de corrélation calculés :

- en considérant globalement les trois faciès, il n'existe pratiquement pas de corrélation entre la SPR et la SCT ($r = 0,016$). En revanche, la corrélation devient positive en F1 ($r = 0,71$) et confirme que le contrôle du ruissellement est plus satisfaisant que dans les deux autres systèmes ;
- une autre corrélation positive ($r = 0,90$) existe entre la SPR et la SBS. En conséquence plus le rapport zone nue et zone boisée est fort, mieux le système semble apte à produire un ruissellement contrôlé ;
- l'opposition entre la SSI et la SBS ($r = -0,87$), parce qu'à un recouvrement global fort, correspond une capacité de stockage et d'infiltration de l'eau du ruissellement plus réduite ;
- enfin la corrélation entre la SPR et la SSI ($r = 0,56$) indiquerait qu'un modèle de combinaison de pentes détermine une production du ruissellement utile qui soit proportionnelle à son captage et à son infiltration par le système.

Toutes les tendances et les corrélations entre ces paramètres traduisent que les modèles de combinaison de pentes prédéterminent les modèles d'agencement et de distribution des croûtes. Les systèmes structurés linéaires (modèle 1 et 2) semblent plus aptes à produire le ruissellement et à capter un supplément d'eau. Viennent ensuite par ordre décroissant, F2 (modèle 3) et F3 (modèle 4 et 5). Dans le faciès F3, il semble malheureusement que les ressources hydriques provenant des pluies soient les seules à faire subsister le système, le captage d'un supplément d'eau de ruissellement étant très faible.

En corroborant l'étude d'Albergel *et al.* (1992), qui indique qu'en zone sahélienne la capacité d'infiltration paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique et croûtes superficielles) qu'à la nature même des organisations internes de la couverture pédologique, cette approche constitue une innovation qui valide le rôle prépondérant du cadre physique (à travers les états de surface) dans la correction des conditions écologiques.

Compte tenu des taux d'échantillonnage aux échelles des plateaux pilotes et à celles des unités structurales des trois faciès de brousses contactées, il serait possible de s'appuyer exclusivement sur les états de surface pour déduire la dynamique des milieux. Enfin la nouvelle approche proposée complète les travaux de Delbaere (1994) et de Valentin et d'Herbès (1999) dans l'ouest nigérien et mérite une validation dans d'autres systèmes contractés du monde.

2 - Efficacité du contrôle du flux hydrique de surface

2.1. Etude du mode de captage de l'eau de ruissellement

L'utilisation du surplus d'eau de ruissellement à l'interface sol-atmosphère d'un système semble avoir pour origine les différentes modalités d'agencement des pentes. Ce fonctionnement hydrologique intervient entre deux types de milieux récepteurs : les sols nus qui ont un "comportement ruisselant" et la zone de végétation qui a un "comportement infiltrant". Comment chacun des trois faciès arrive à contrôler le ruissellement et à capter un supplément d'eau ?

2.1.1. Efficacité théorique du système de récolte des eaux de ruissellement

En fonction de l'organisation spatiale longitudinale et latérale :

- des surfaces productrices du ruissellement (SPR),
- des surfaces de stockage (SSI) de l'eau et d'infiltration

spatiale d'un cadre physique (plateau) qui représente un réseau de relations directes et indirectes résultant de la variabilité du modelé et qui pourrait de ce fait disposer d'une aptitude de compensation écologique.

A l'étendue globale du plateau, les deux types de pentes mesurées partagent nettement les plateaux en deux groupes : un groupe dont les pentes correspondent à des unités géomorphologiques "plateaux supérieurs" où les unités structurales linéaires tendent à dominer et un deuxième groupe avec des pentes qui caractérisent soit des unités géomorphologiques "plateaux démantelés" où les unités structurales sont mixtes (linéaires et diffuses), soit des bas plateaux où la géomorphologie conditionne essentiellement l'existence des unités structurales diffuses.

L'étude des pentes à l'échelle des unités structurales des trois faciès fournit plus de détails intéressants : l'agencement des pentes longitudinale et latérale (selon le faciès), valide l'hypothèse émise par Delbaere (1994) :

- en F1, la pente longitudinale est très régulière et varie relativement peu, ce qui génère dans tous les cas une orientation prévisible des écoulements (axe longitudinal). En suivant le sens de la pente principale, on rencontre ainsi dans un ordre régulier un impluvium occupé par une zone de dégradation, une zone de transfert du flux, une zone de sédimentation, une zone de décantation et une zone boisée (dont la zone pionnière et le cœur du fourré portent des croûtes biologiques et une zone sénescence couverte de croûtes de dessiccation). Une variation même très faible de la pente longitudinale engendre une transition vers d'autres structures linéaires, ce qui confirme les filiations entre elles ;

- en F2, il existe un système d'inclinaison à deux pentes conduisant à une irrégularité de l'orientation des écoulements en surface, alors qu'en F3 il existe 2 modèles voisins de combinaison de pentes qui génèrent tous un écoulement dont l'orientation n'est pas prévisible car multidirectionnelle.

Cette correspondance des pentes tend surtout à démontrer que la pente est un facteur déterminant, qui conditionnerait la production du ruissellement, son contrôle à travers l'étendue des faciès. Il en résulte un modèle d'agencement des croûtes d'érosion qui sont les indices témoins des flux hydrologiques en surface. Cela est vérifié par une première analyse des surfaces occupées par les croûtes d'érosion. Prises individuellement ces surfaces mettent en évidence une forte occupation (31%) par les croûtes de décantation en F1, qui baisse à 16% en F2 et enfin se réduit sensiblement en F3 (5% seulement). Aussi ce faciès F1 disposant d'une proportion importante de sol nu (+ de 50%), semble en revanche mieux assurer un contrôle du ruissellement (dont la surface occupée est réduite à 20%) comparativement aux deux autres systèmes (39% en F2 et 36% en F3). Cette même analyse indique que les croûtes gravillonnaires sont plus importantes en F3, mettant ainsi en évidence la variation du substrat dans ces latitudes ouest de la zone étudiée. Aussi, elle permet de dégager des degrés de relation à travers un certain nombre de corrélations importantes qui lient ces paramètres "croûtes d'érosion" : opposition négative entre RUI et DEC (les faciès F2 et F3 avec une plus grande surface soumise au ruissellement, présentent de faibles surfaces de décantation), entre DEC et BIO (F2 et F3 à fort recouvrement végétal semblent aussi décanter très peu de cette eau de ruissellement) et enfin une forte concordance positive entre RUI et GRA (ce qui est normal, les croûtes gravillonnaires formant une légère butte amorcent et soutiennent la circulation de l'eau).

Dans une seconde étape d'analyse des variables construites à partir de l'inventaire des croûtes, on observe d'autres liaisons importantes au vu des coefficients de corrélation calculés :

- en considérant globalement les trois faciès, il n'existe pratiquement pas de corrélation entre la SPR et la SCT ($r = 0,016$). En revanche, la corrélation devient positive en F1 ($r = 0,71$) et confirme que le contrôle du ruissellement est plus satisfaisant que dans les deux autres systèmes ;
- une autre corrélation positive ($r = 0,90$) existe entre la SPR et la SBS. En conséquence plus le rapport zone nue et zone boisée est fort, mieux le système semble apte à produire un ruissellement contrôlé ;
- l'opposition entre la SSI et la SBS ($r = -0,87$), parce qu'à un recouvrement global fort, correspond une capacité de stockage et d'infiltration de l'eau du ruissellement plus réduite ;
- enfin la corrélation entre la SPR et la SSI ($r = 0,56$) indiquerait qu'un modèle de combinaison de pentes détermine une production du ruissellement utile qui soit proportionnelle à son captage et à son infiltration par le système.

Toutes les tendances et les corrélations entre ces paramètres traduisent que les modèles de combinaison de pentes prédéterminent les modèles d'agencement et de distribution des croûtes. Les systèmes structurés linéaires (modèle 1 et 2) semblent plus aptes à produire le ruissellement et à capter un supplément d'eau. Viennent ensuite par ordre décroissant, F2 (modèle 3) et F3 (modèle 4 et 5). Dans le faciès F3, il semble malheureusement que les ressources hydriques provenant des pluies soient les seules à faire subsister le système, le captage d'un supplément d'eau de ruissellement étant très faible.

En corroborant l'étude d'Albergel *et al.* (1992), qui indique qu'en zone sahélienne la capacité d'infiltration paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique et croûtes superficielles) qu'à la nature même des organisations internes de la couverture pédologique, cette approche constitue une innovation qui valide le rôle prépondérant du cadre physique (à travers les états de surface) dans la correction des conditions écologiques.

Compte tenu des taux d'échantillonnage aux échelles des plateaux pilotes et à celles des unités structurales des trois faciès de brousses contactées, il serait possible de s'appuyer exclusivement sur les états de surface pour déduire la dynamique des milieux. Enfin la nouvelle approche proposée complète les travaux de Delbaere (1994) et de Valentin et d'Herbès (1999) dans l'ouest nigérien et mérite une validation dans d'autres systèmes contractés du monde.

2 - Efficacité du contrôle du flux hydrique de surface

2.1. Etude du mode de captage de l'eau de ruissellement

L'utilisation du surplus d'eau de ruissellement à l'interface sol-atmosphère d'un système semble avoir pour origine les différentes modalités d'agencement des pentes. Ce fonctionnement hydrologique intervient entre deux types de milieux récepteurs : les sols nus qui ont un "comportement ruisselant" et la zone de végétation qui a un "comportement infiltrant". Comment chacun des trois faciès arrive à contrôler le ruissellement et à capter un supplément d'eau ?

2.1.1. Efficacité théorique du système de récolte des eaux de ruissellement

En fonction de l'organisation spatiale longitudinale et latérale :

- des surfaces productrices du ruissellement (SPR),
- des surfaces de stockage (SSI) de l'eau et d'infiltration

- et des surfaces bénéficiant du supplément d'eau apporté par le ruissellement (SBS),

il serait possible d'énoncer la fonction suivante proposée qui les lie et qui permet de déterminer le supplément théorique d'eau apporté par ruissellement à la zone boisée : **pourcentage du supplément d'eau de ruissellement (PSR) = f(SPR,SSI,SBS)** qui est calculée par la formule :

$$\text{PSR} = \text{SPR} - \text{SSI} / \text{SBS} * 100$$

En effet, l'implication de ces trois paramètres se justifie par leur impact respectif dans l'aboutissement du processus :

- SPR : il faut qu'il ait une intensité de ruissellement en accord avec la surface de l'impluvium,

- SSI : il faut que le système soit doté d'une capacité d'infiltration à l'interface des deux milieux récepteurs,

- SBS : il faut enfin que le sol ait une aptitude et une capacité d'absorption suffisamment grande (porosité et perméabilité favorisées par une forte activité biologique et de la micro-faune).

Les résultats obtenus à la suite de la cartographie des deux milieux récepteurs dans les trois faciès (**fig.22 ,a, b et c**) et les calculs effectués sur la base des données consignées dans le **tab. 9 (a, b et c)** permettent de retenir le pourcentage annuel moyen de captage du supplément d'eau de ruissellement (**PSR**) égal à **59%** du cumul de pluies tombées dans l'année **en F1, 39% en F2** et enfin **9% en F3**.

Tab. 9 (a) : Données récapitulatives des surfaces (m²) relatives aux trois paramètres pendant trois ans
(F1: faciès de brousses structurées linéaires)

Paramètres considérés	Site de Dingazi			Site de Dorobobo			Site de Banizoumbou		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
SPR	2256	2400	2320	5160	5180	5588	4604	2436	4880
SSI	3996	3960	4008	4032	4060	4068	3200	3552	3248
SBS	3260	2940	3352	1960	1960	1476	2156	2784	2928
% capté par an	53	53	50	58	57	103	65	40	56
% moyen annuel capté par le site	52%			73%			54%		
% moyen annuel capté par le faciès	59%								

Tab. 9 (b) : Données récapitulatives des surfaces (m²) relatives aux trois paramètres pendant trois ans
(F2: faciès de brousses à organisation mixte)

Paramètres considérés	Site de Kouré			Site de Kirtachi		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
SPR	3328	3988	3816	1308	1316	1388
SSI	1648	1688	1800	2000	1880	1912
SBS	4596	5104	4984	1692	1904	1300
% capté par an	37	45	40	41	30	40
% moyen annuel capté par le site	41%			37%		
% moyen annuel capté par le faciès	39%					

Tab. 9 (c) : Données récapitulatives des surfaces (m²) relatives aux trois paramètres pendant trois ans
(F3 : faciès de brousses diffuses)

Paramètres considérés	Site de Tientergou			Site de Mossipaga		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
SPR	2556	2624	2736	1040	1408	992
SSI	1040	2168	2400	972	972	956
SBS	6256	6376	6008	3200	3200	3196
% capté par an	24	7	6	2	14	1
% moyen annuel capté par le site	12%			6%		
% moyen annuel capté par le faciès	9%					

Etats de surface des stations pilotes (distribution des croûtes d'érosion témoin des flux hydriques en surface)

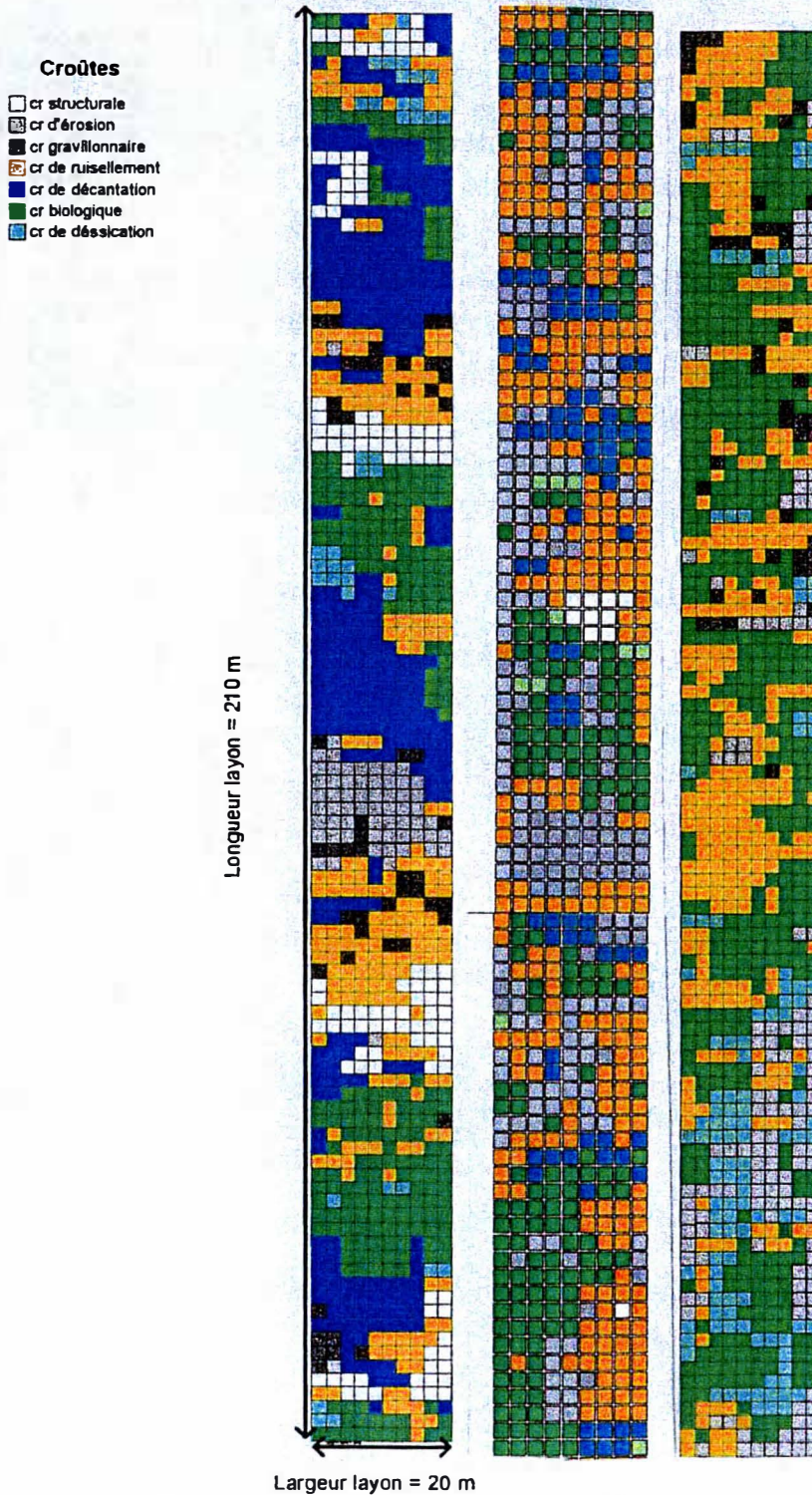


Fig.22 (a, b et c) Etats de surface mettant en évidence le fonctionnement biologique et hydrologique des 3 faciès

On constate un net avantage en faveur des systèmes structurés linéaires dont le pourcentage moyen du supplément d'eau de ruissellement capté (59%) approche un peu moins du double du pourcentage des faciès à organisation mixte (39%), qui eux-mêmes captent quatre fois plus que les systèmes à organisation diffuse de la végétation (9%). Cette gestion des ressources hydriques tombant dans les zones nues, par la nature du cadre géomorphologique aura des conséquences écologiques favorables car la quantité de pluies disponible pour les plantes serait différente de celle que le climat offre aux milieux.

2.1.2. Pluviométrie théorique des sites étudiés

L'existence des sols nus dans les formations végétales contractées représente donc une réponse d'adaptation des systèmes aux conditions austères de la nature qui effectue des "corrections écologiques" favorables. Elle crée ainsi des conditions qui compensent le caractère d'aridité climatique, ce qui positionne les sites étudiés dans des conditions pluviométriques nettement supérieures. Les pourcentages annuels moyens des suppléments d'eau captés par chacun des systèmes permettent de calculer la quantité moyenne théorique annuelle de pluie (abstraction faite des pertes par évaporation) des sept sites (tab.10)

Tab.10 Pluviométrie théorique des sites étudiés

Type	Plateau	Pluviométrie normale (mm)	PSR moyen annuel capté (%)	Surplus capté (mm)	Cumul théorique annuel (mm)
F1	Dingazi	328	59	194	522
F1	Dorobobo	307	59	181	488
F1	Banizoumbou	500	59	295	795
F2	Kouré	517	39	202	719
F2	Kirtachi	560	39	218	778
F3	Tientergou	623	9	56	679
F3	Mossipaga	750	9	68	818

On constate que les sites portant des systèmes structurés linéaires (F1) et mixtes (F2) disposent d'un supplément d'eau significativement différent de celui des systèmes non organisés (F3 ou brousse diffuse). Ils atteignent par conséquent un cumul théorique annuel suffisamment net pour avoir des incidences favorables plus grandes sur le fonctionnement et la dynamique de ces systèmes.

2.2. Hétérogénéité des profils de sols en fonction de l'efficacité du système de récolte des eaux de ruissellement

Les résultats présentés à ce niveau sont déduits par analogie avec les travaux pédologiques (Ambouta, 1984), et hydrologiques (Raunet, 1985 ; Casenave et Valentin, 1989 ; Galle *et al.*, 1999 ; et Delhoume, 1995), portant sur les systèmes structurés linéaires.

Cette étude ayant présenté des résultats qui valident les travaux des auteurs ci-dessus, il serait alors possible (sur la base des connaissances des structures linéaires et par analogie) de formuler des hypothèses sur les systèmes peu ou pas structurés, dont la vérification serait en partie faite dans la suite du développement. Trois préalables de base permettent de construire de bonnes hypothèses :

- sur le plan pédologique, Ambouta (1984) indique après l'étude des structures linéaires que :
 - + l'épaisseur des sols est toujours médiocre, ne dépasserait pas 60 cm ;
 - + le sol le plus profond se situe dans la zone du cœur de fourré (sous-bois) ;

+ la couleur des sols ne varie qu'au niveau des horizons de surface ; elle est plus marquée dans les zones recouvertes de végétation ;

+ le passage des bandes couvertes aux bandes nues s'accompagne de l'amenuisement de l'horizon sableux de surface au profit d'un horizon A_{12} plus argileux et graveleux et d'une apparition d'une structure litée en surface ;

+ les variations morphologiques et granulométriques des sols d'une séquence de formation contractée structurée portent en définitive sur les horizons de surface A, l'horizon BC de profondeur étant relativement invariant.

- **sur le plan hydrologique**, l'étude de ces mêmes structures linéaires renforce le premier point par les arguments supplémentaires suivants :

+ le fonctionnement hydrique détermine une différenciation pédologique. Aux zones nues sont associés des sols non ou peu différenciés et aux plages boisées correspondent les sols les plus différenciés (Raunet, 1985) ;

+ les coefficients d'infiltration dans le cœur des fourrés des systèmes structurés sont de l'ordre de 80 à 83%, alors qu'ils ne représentent que 5 à 10% dans les bandes nues (Casenave et Valentin, 1989) ;

+ les plages nues sont des zones de transit superficiel pour l'eau (impluvium) avec une dynamique hydrique essentiellement horizontale. La faible quantité d'eau qui s'infiltre dans ces zones reste très proche de la surface et est reprise très rapidement par l'évaporation (Delhoume, 1995) ;

+ le ruissellement provenant des zones nues est intercepté par les zones boisées où l'infiltration est importante, d'où une dynamique verticale hydrique marquée qui permet un stockage de l'eau (Delhoume, 1995)

- **sur la base de l'approche biologique proposée et de nos principaux résultats obtenus :**

- dans la description des cinq modèles de correspondance des pentes qui engendrent la distribution spatiale des croûtes d'érosion et de la végétation, les deux premiers s'adaptent parfaitement aux préalables cités ci-dessus ;

+ la mise en évidence des trois principales structures végétales, avec une structuration horizontale et verticale distincte définie par les ligneux et les herbacées (**cf prochain chapitre**)

+ la caractérisation des trois zones homogènes mises en évidence par la flore dans chacun des systèmes (**cf prochain chapitre**) ; les profils d'humidité et les coefficients d'infiltration des structures linéaires validant tous nos résultats, il est possible d'émettre des hypothèses.

Ainsi, par analogie aux profils de sol des zones nues et boisées et à leur mode de fonctionnement hydrologique et biologique (bien connu pour les structures végétales linéaires), les hypothèses formulées pour les systèmes peu ou pas structurés sont :

- **sur le plan hydrologique :**

+ dans les organisations diffuses (F3), la dynamique hydrologique verticale des noyaux de bosquets qui bénéficient principalement des quantités de pluies directement tombées, serait analogue à celle du cœur de fourré des systèmes linéaires dont le fonctionnement dépend du cumul de la pluie tombée et du supplément d'eau de ruissellement capté ;

+ toujours dans les systèmes à organisation diffuse (F3), la lisière et les zones concentriques, conditionnées par les pluies tombées plus un faible supplément d'eau de ruissellement capté, auraient un comportement hydrologique qui ressemblerait respectivement à celui de la zone pionnière et de la zone de sénescence des brousses structurées linéaires ;

- sur le plan pédologique :

+ le régime hydrique, supposé différentiel dans les zones homogènes des brousses diffuses, aurait à chacun des niveaux des coefficients d'infiltration et des profils d'humidité dont l'importance diminue des noyaux de bosquets aux zones de lisière. Ceci aurait des conséquences directes sur la pédogenèse des couches superficielles des sols (les exigences écologiques des herbacées inféodées dans les trois zones homogènes tendent à vérifier cette hypothèse) ;

Les hypothèses que nous venons de formuler seront confirmées par les résultats présentés dans le prochain chapitre. Cependant, elles méritent d'être vérifiées en rapport avec des hydrologues et des pédologues à travers un suivi complémentaire des unités structurales de la brousse diffuse.

2.3. Discussion des résultats

Il semble donc qu'en fonction de l'efficacité ou de l'absence du système de récolte des eaux du ruissellement, se mette en place une certaine hétérogénéité des profils de sols qui caractérise chaque structure. Cette hétérogénéité engendre par conséquent des flux hydriques verticaux plus importants dans le cœur du fourré en F1, donc croissants de la zone pionnière au cœur du fourré pour décroître sensiblement dans la zone de sénescence. En F3, les flux hydriques verticaux devraient être décroissants des noyaux de bosquets jusqu'à la zone de lisière.

Cette analogie dégagée à la suite de cette approche développée qui permet de formuler des hypothèses hydrologiques et pédologiques intéressantes, semble cohérente. Elle permettrait de comprendre et d'interpréter les résultats des prochains chapitres, et justifierait selon les systèmes contractés structurés les conditions écologiques plus favorables qu'elles ne le paraissent.

Ces résultats mettent en évidence une correction écologique à travers une bonne gestion du ruissellement des eaux de pluies et son utilisation potentielle. Ils valident enfin les thèses de Floret et Pontanier (1984), qui ont démontré que l'aridité climatique de l'échelon régional peut être accentuée ou atténuée par le facteur sol. L'aridité d'origine édaphique qui à moyenne échelle prend en compte la redistribution de l'eau de pluie par les facteurs édaphiques (topographie et couches superficielles du sol) pour dégager un gain dans les bilans hydriques, vient d'être discutée.

3 - Conclusion

Ce troisième chapitre a présenté la toile de fond que constitue le cadre physique dont le rôle dans la redistribution du flux hydrique de surface permet de mieux comprendre et d'interpréter les mécanismes fonctionnels qui résultent dans des trois systèmes écologiques.

L'approche utilisée part de la connaissance des données mésologiques qui décrivent la configuration des plateaux (pentes et types de croûtes superficielles d'érosion), pour déterminer une efficacité théorique du système de récolte d'eau de ruissellement qui a des répercussions directes sur les quantités d'eau à prendre en compte dans les bilans hydriques et sur l'hétérogénéité des profils de sol. Ainsi, de la variabilité du modelé résulte un réseau de relations directes et indirectes qui permettent une compensation écologique dans ces milieux semi-arides. Pour une même condition pluviométrique à l'échelle latitudinale locale, c'est le cadre physique (géomorphologie, modelé,

pente..) qui est le facteur déterminant pour ces structures forestières contractées. Par contre à l'échelle régionale, c'est la pluviométrie qui ordonne l'existence de ces structures. Les modèles de combinaison de pentes prédéterminant les modèles d'agencement et de distribution des croûtes agissent en fonction de l'une ou de l'autre situation.

En effet, la pente conditionne la production d'un ruissellement, assure son contrôle à travers l'étendue des systèmes et engendre des modèles d'agencement des croûtes d'érosion qui sont les indices témoins des flux hydrologiques en surface. Cela se vérifie par une simple analyse statistique des surfaces occupées par les croûtes regroupées selon leur rôle fonctionnel ou prises individuellement. Par exemple les croûtes prises individuellement mettent en évidence une grande surface des croûtes de décantation en F1 (31% de la surface totale), qui baisse à 16% en F2 et enfin se réduit sensiblement en F3 (5%). Même si le faciès F1 dispose d'une proportion importante de sol nu (+ de 50%), il semble en revanche plus apte pour contrôler le ruissellement (réduit à 20% de la surface totale) comparativement aux deux autres systèmes où il représente 39% en F2 et 36% en F3.

Toutes les tendances décrites par les combinaisons de pentes et les modèles d'agencement des croûtes d'érosion sont confirmées par des corrélations dont la signification écologique directe est l'existence d'une compensation écologique dont bénéficient les systèmes à des degrés divers

Enfin, cette compensation écologique paraît plus évidente dans les systèmes structurés linéaires (modèle 1 et 2) qui semblent plus aptes à produire le ruissellement et à capturer un supplément d'eau. Ils sont secondés par ordre décroissant par F2 (modèle 3) et F3 (modèle 4 et 5) qui ne semblent subsister qu'avec les seules ressources hydriques provenant des pluies l'apport d'un supplément d'eau par le ruissellement étant très faible.

CHAPITRE IV

CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES VEGETAUX DANS LES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES

Le défi qui nous est posé est donc de développer des approches intégrées qui permettent de modéliser la dynamique d'ensemble avec un bon degré de prévisibilité Barbault (1992)

CHAPITRE IV : CONSEQUENCES SUR LA DISTRIBUTION DES VEGETAUX DANS LES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES

1 - Structure organisationnelle des trois modèles de distribution de la végétation des plateaux latéritiques

1.1. Etude et analyse des trois "patterns" au sol et sur image aérienne

1.1.1. Dénombrement, analyse des surfaces et des formes de bosquets à travers une fenêtre d'images aériennes de chacun des trois faciès

S'il est possible de caractériser les trois faciès en fonction des pentes et combinaison ou de la distribution des croûtes, il s'agit maintenant de confirmer leur distinction par des séries d'analyses statistiques de paramètres relatifs aux images des trois faciès.

Les données analysées sont obtenues grâce à une nouvelle application d'analyse de la fragmentation utilisée avec succès par J. Lauga (1999) pour reconnaître et classer certaines structures forestières du Midi Pyrénées. Les étapes suivies sont :

- extraction d'une fenêtre d'image aérienne (exemple : 300 m², 600 m² ou 900 m²) de même dimension dans chacun des trois systèmes et conversion en format binaire ;
- caractérisation automatique des bosquets et affichage des paramètres suivants relatifs aux unités structurales de chaque faciès : (1) superficie : SURFA (pixels) et nombre de bosquets correspondants, (2) n° de ligne du barycentre : LBARY(nombre réel) ; (3) n° de colonne du barycentre : CBARY (nombre réel) ; (4) longueur du grand axe de l'ellipse équivalente : GRAXE ; (5) longueur du petit axe de l'ellipse équivalente : PTAXE ; (6) allongement (ALLON) : rapport grand axe/petit axe (sans dimension) ; (7) périmètre : PERIM (pixels) et (8) le rapport normalisé (RAPNO) : Périmètre/surface (sans dimension) ;
- et enfin l'analyse des paramètres obtenus.

Dans l'ensemble de ces paramètres ci-dessus, nous avons choisi ceux qui paraissent pertinents par rapport à notre objectif qui est de reconnaître sur image des caractéristiques des unités structurales des trois faciès pour envisager à l'avenir leur classification automatique. Ainsi, il est supposé que : les paramètres numérotés 1, 2 et 3 offrent la possibilité de calcul des surfaces productives et la cartographie automatique de la production forestière par affectation des valeurs "attribut" aux points de correspondance ligne et colonne ; les numéros 4, 5, 6 et 8 sont supposés aptes à discriminer les composantes du pattern que sont les unités structurales.

Compte tenu de la distribution des paramètres bruts obtenus (dans les trois fenêtres d'images), nous avons procédé à un tirage aléatoire de sous-échantillons pour effectuer les calculs statistiques descriptifs et les analyses. Ceux-ci portent sur des données brutes et celles ayant fait l'objet d'une transformation logarithmique simple, pour voir celles qui donnent les meilleurs résultats. Les résultats obtenus sont consignés dans le **tab. 11 (a, b et c)**

Le paramètre longueur du grand axe de l'ellipse équivalente de chacun des bosquets identifiés présente une forte hétérogénéité au vu des coefficients de variation (de 115% à 210%) et décrit des intervalles de confiance (par faciès) ayant des plages correspondant à des zones de transition entre les 3 faciès. L'écart type permet de se rendre compte que la longueur du grand axe varie relativement peu dans les organisations linéaires et diffuses et est très irrégulière dans les systèmes mixtes.

Tab. 11 (a) Résultats sur la description statistique des données brutes.

Description statistique	LONGUEUR DU GRAND AXE (m)			LONGUEUR DU PETIT AXE (m)		
	fenêtre de 900 m ² du faciès F1	fenêtre de 900 m ² du faciès F2	fenêtre de 900 m ² du faciès F3	fenêtre de 900 m ² du faciès F1	fenêtre de 900 m ² du faciès F2	fenêtre de 900 m ² du faciès F3
Effectifs	151	151	151	151	151	151
Minimum	3,00	2,00	3,00	1,00	1,00	1,00
Maximum	407,00	993,00	50,00	8,00	7,00	5,00
Moyenne	42,01	72,64	9,54	3,94	4,03	2,04
95% Borne supérieure (intervalle de confiance)	51,61	101,85	12,52	4,19	4,42	2,36
95% Borne inférieure (intervalle de confiance)	32,42	43,42	6,55	3,70	3,64	1,71
Ecart type	59,67	152,45	10,93	1,52	2,03	1,18
Coefficient de variation (%)	142	210	115	39	50	58

Quand à la longueur du petit axe, elle présente une homogénéité acceptable, d'où le faible écart type obtenu dans les trois cas. L'étendue faible des intervalles de confiance que décrit ce paramètre autour des moyennes, rapproche sensiblement F1 et F2 qui se distinguent de F3.

Tab. 11 (b) Résultats sur la description statistique des données brutes

Description statistique	ALLONGEMENT			RAPPORT NORMALISE		
	fenêtre de 900 m ² du faciès F1	fenêtre de 900 m ² du faciès F2	fenêtre de 900 m ² du faciès F3	fenêtre de 900 m ² du faciès F1	fenêtre de 900 m ² du faciès F2	fenêtre de 900 m ² du faciès F3
Effectifs	151	151	151	151	151	151
Minimum	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00
Maximum	66,00	158,00	11,00	5,00	8,00	2,00
Moyenne	8,60	12,93	3,43	1,53	1,76	1,11
95% Borne supérieure (intervalle de confiance)	10,04	17,40	4,04	1,66	2,00	1,20
95% Borne inférieure (intervalle de confiance)	7,15	8,47	2,81	1,40	1,51	1,02
Ecart type	8,97	23,29	2,26	0,78	1,28	0,32
Coefficient de variation (%)	104	180	66	51	73	29

Si ce tableau indique que ces deux rapports sont globalement satisfaisants pour distinguer les unités structurales des trois faciès, avec plus de précision en F1 et F2 (écart type faible), le rapport normalisé très homogène en F1 (CV = 51%) et en F2 (CV = 29%) est encore plus parlant. Les faibles intervalles de confiance qu'ils décrivent autour de la moyenne leur attribuent une bonne précision, ce qui confirme cette uniformité.

Les tests de comparaison des moyennes de sous échantillons transformés permettent de valider la qualité des paramètres dans la caractérisation des unités structurales des trois faciès. (tab. 11, c).

Tab. 11 (c) Résultats de test de comparaison des données transformées

Paramètres de comparaison	Organisation de la végétation			Signification ¹ des comparaisons par paire au seuil 5%
	F1	F2	F3	
Log GRAXE	x	x		N.S
		x	x	*
	x		x	*
logPTAXE	x	x		N.S
		x	x	*
	x		x	*
LogRAPNO	x	x		N.S
		x	x	*
	x		x	*
LogALLON	x	x		N.S
		x	x	*
	x		x	*

Il ressort de cette comparaison que d'une part les unités structurales de F1 et F2 ne sont pas significativement différentes sur les images et que d'autre part elles diffèrent chacune de celles de F3. Si on effectue une analyse discriminante, le résultat est également le même : par l'effet combiné de GRAXE, PTAXE et RAPNO, on classe correctement 65% des unités structurales de F1, contre 70% de F3 et seulement 22% appartenant à F2.

Tant dans l'analyse des données brutes que dans celle des données transformées en logarithme, il ressort que les unités structurales correctement identifiables sont celles de F1 et de F3. Le faciès F2 conduit à des mauvais classement, ce qui s'explique par le fait qu'il est un faciès de transition entre F1 et F3.

Cette méthode permet sur la base des intervalles de confiance définis avec les données brutes relatives aux images des faciès, de séparer les bosquets appartenant à F1 et à F3. Il en est de même de l'application d'une analyse discriminante utilisant ces mêmes données après transformation logarithmique.

1.1.2. Reconnaissance au sol des structures organisationnelles à l'aide d'une méthode simplifiée

Sans une certaine expérience pratique, la distinction des différents faciès sur le terrain n'est pas évidente. Nous avons à ce titre mis au point une méthode simple qui permet d'identifier les types de structure. Elle consiste à parcourir des séries de transversales perpendiculaires à un transect qui traverse les unités structurales à identifier. A un intervalle de pas réguliers, préalablement fixé, l'absence ou la présence de la végétation sur les transversales est notée. Par une simple représentation graphique des observations (1 = présence de la végétation et 0 = absence) on peut conclure qu'en cas :

- d'un étalement régulier d'espaces nus ou boisés sur toutes les transversales, que le faciès est du type structuré linéaire (**fig.23,a**) ;
- d'un étalement suffisant d'espaces nus et boisés mais entrecoupés respectivement de bandes boisées et nues, il s'agit d'un faciès à organisation intermédiaire ou mixte (**fig.23,b**) ;
- l'absence d'étalement d'une transversale, sans tomber indistinctement sur des taches de végétation et des espaces nus, indique qu'il s'agit d'un faciès de brousse diffuse (**fig.23,c**).

¹ N.S = effet non significatif (P>0,05) ; * = effet très hautement significatif (P<0,001)

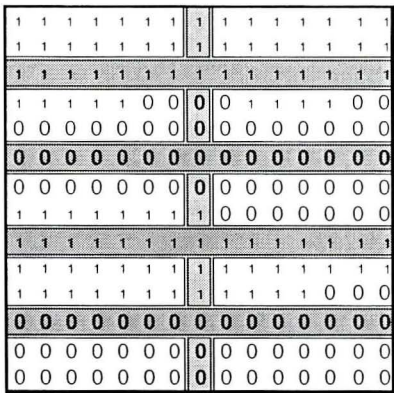


Fig.23(a) identification d'un faciès linéaire

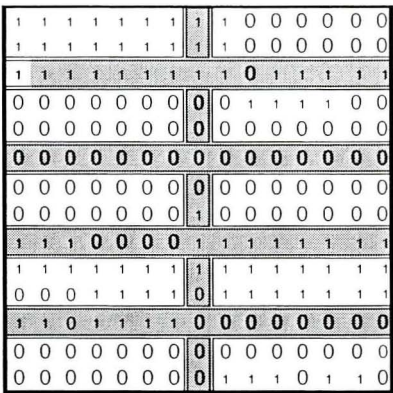


Fig.23(b) identification d'un faciès mixte

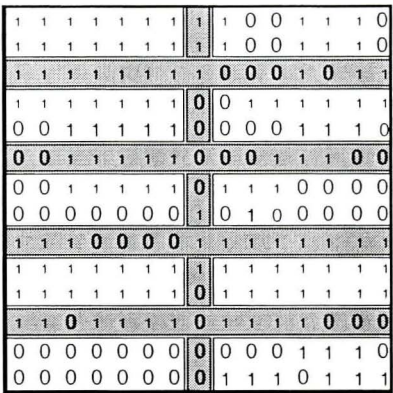


Fig.23(c) identification d'un organisation diffus

1.2. Résultats sur l'organisation des trois types de structures

1.2.1. Rapports caractéristiques définissant les niveaux de perception écologique et d'organisation spatiale (aux échelles des séquences et des unités fonctionnelles)

L'étude de la structure du cadre physique (pente, variabilité du modelé et données relatives au couple sol nu - végétation relevé sur image) présente les plateaux comme un cadre où les unités structurales s'organisent en fonction d'une forte hiérarchie de facteurs. Pour une meilleure compréhension des processus, des analyses sur ces facteurs se sont déroulées de manière détaillée à des échelles stationnelles et locales : période ou unité fonctionnelle (zone nue + zone boisée) et séquence fonctionnelle (regroupement de 4 à 6 périodes assez homogènes), pour être validées ensuite aux échelles sous-secteur et secteur écologique. Puisque l'étude des pentes et des organisations des croûtes d'érosion présente une grande signification écologique à l'échelle bandes nue et boisée, il est important de calculer des rapports caractéristiques synthétiques qui correspondent aux modèles de combinaison des pentes et d'agencement des croûtes, et renseigneraient sur l'organisation des structures.

La mesure de largeur de 300 unités structurales nues et 300 boisées (soit 150 périodes représentant une longueur de 8424 m, sept plateaux pilotes et trois modes d'organisation de la végétation), permet de présenter une description statistique de la largeur (en m) de la bande nue (BN), de la largeur de la bande boisée (BB), de la longueur de la période (PER) et du rapport inter bande /bande (RIBB) à travers le **tab. 12**.

Tab.12 : Mesure des unités structurales (en m) et des RIBB

	Organisation linéaire (F1)				Organisation mixte (F2)				Organisation diffuse (F3)			
	BN	BB	PER	RIBB	BN	BB	PER	RIBB	BN	BB	PER	RIBB
Moyenne(m)	56,2	46,4	102,6	1,25	36,0	42,2	78,3	0,86	24,1	45,2	69,4	0,55
□95%	64,6	51,2	114,4	1,42	39,3	45,8	85,0	0,89	28,6	51,9	79,9	0,61
95% □	47,9	41,5	90,9	1,07	32,8	38,6	71,6	0,82	19,6	38,5	58,8	0,48
Ecart type	24,7	14,3	34,7	0,52	9,0	10,0	18,6	0,09	12,5	18,5	29,2	0,19
CV (%)	44	31	34	41	25	24	24	10	52	41	42	35

Les constats qui se dégagent sont : les largeurs des périodes sont croissantes de F3 (69,41m) à F1 (102,69m) ; par conséquent les RIBB décroissent de F1(=1,25) à 0,55 en F3, ce qui confirme la corrélation forte existant entre la SPR la SBS (**cf Chap.III**). Ainsi, plus le RIBB est fort et tend vers 1, plus la capacité du système à produire et à contrôler le ruissellement est forte. Et comme les meilleurs RIBB sont fortement conditionnés par une largeur de bande nue supérieure à celle de la bande boisée et donc par une grande période, elle même liée à une pente longitudinale régulière et

relativement faible (cf. **Chap.III** : modèles 1 et 2 d'agencement des pentes), ils représentent donc un critère d'appréciation de l'efficacité théorique du contrôle du flux hydrique en surface.

Etant donné que la largeur de la période et le rapport inter bande/bande ont un rôle déterminant dans l'organisation des structures contractées, il est alors nécessaire de procéder à des tests de comparaison de leur variance aux trois échelles emboîtées suivantes (**tab.13 a, b et c**) pour voir comment ils se comportent :

Tab. 13 (a) Echelle stationnelle : comparaison des variances des largeurs de périodes et des RIBB des unités fonctionnelles d'un même faciès (par le Test de Bartlett au seuil 5%)

Type faciès	Effectif d'unités fonctionnelles	Site de plateau	Variance des largeurs de périodes	Variance des rapport inter bande/bande (RIBB)
F1	36	Dingazi	N.S.	N.S.
F1	36	Dorobobo	N.S.	N.S.
F1	36	Banizoumbou	N.S.	N.S.
F2	48	Kouré	N.S.	N.S.
F2	48	Kirtachi	S	N.S.
F3	48	Tientergou	N.S.	S
F3	48	Mossipaga	N.S.	N.S.

N.B : N.S. = non significative et S= significative

L'analyse statistique met en évidence que les périodes et le rapport inter bandes/bandes à l'intérieur des unités fonctionnelles d'un même système ne sont pas significativement différents. Le cas de Kirtachi où les périodes varient significativement s'explique par le passage du transect dans un amalgame d'unités structurales mixtes (linéaires et circulaires). Quant-à la variation des RIBB à Tientergou, elle est due au modèle de correspondance des pentes qui conditionne une distribution aléatoire la végétation.

Tab. 14 (b) Echelle des sites de plateau : comparaison des variances des largeurs de périodes et des RIBB des faciès du même genre, coexistants sur un même plateau ou situés à des latitudes différentes (par le Test de Bartlett au seuil 5%)

Type de faciès	Plateaux comparés		Variance des largeurs de périodes	Variance des rapport inter bande/bande (RIBB)
Linéaire	Dingazi	Dorobobo	N.S.	S
	Dingazi	Banizoumbou	S	N.S.
	Dorobobo	Banizoumbou	N.S.	N.S.
Mixte	Kouré	Kirtachi	N.S.	N.S.
Diffus	Tientergou	Mossipaga	N.S.	N.S.

N.B : non significative et S= significative

Les conclusions de cette analyse sont en concordance avec les modèles de correspondance des pentes définis précédemment. Pour peu que ces modèles soient différents (Dingazi : modèle 1 ≠ Banizoumbou : modèle 2) les périodes d'un même type de faciès peuvent varier. Par contre la variation du RIBB à cette échelle serait liée aux sous structures affiliées dans les faciès 1 (tigré typique, tigré à bandes larges et tigré rosacé). Les faciès 2 et 3 semblent être très peu influencés, car même les variations de l'un ou de l'autre paramètre à l'échelle des unités fonctionnelles disparaissent à ce niveau.

Tab. 13 (c) Echelle du grand transect pluviométrique et latitudinal : comparaison des variances des largeurs de périodes et des RIBB entre les trois grands groupes de faciès (par le Test de Bartlett au seuil 5%)

Type de faciès comparés			Variance des largeurs de périodes	Variance des rapport inter bande/bande (RIBB)
F1	F2	F3		
X	X		S	S
	X	X	S	S
X		X	S	S

N.B : S : variance significative

Les trois faciès présentent des caractéristiques de périodes et du rapport inter bande/bande significativement différentes. Ces deux caractéristiques étant en rapport direct avec la circulation et le contrôle du flux hydrologique en surface, leur différence entre les trois grands groupes de faciès justifierait une efficacité de contrôle du ruissellement et des répercussions différentes sur la dynamique de la végétation. Enfin, cette analyse confirme les hypothèses émises par Valentin et d'Herbès (1999) sur la différence du mode de captage des eaux de ruissellement entre les systèmes contractées.

1.2.2. Indice de diversité de Simpson (variabilité zonale des patterns)

Le dernier paramètre à être analysé dans la description des structures est l'indice de diversité zonale de Simpson, qui concorde aussi avec les modèles de correspondance de pentes (fig.24) et qui caractérise de façon satisfaisante les différentes structures (Delbaere, 1994). L'objectif étant de comprendre et d'interpréter les successions zonales des unités fonctionnelles (perpendiculairement à la pente longitudinale), 150 des 300 transects latéraux (environ 200 m dans chaque cas) ont été parcourus et mesurés en suivant l'axe central de l'inter bande. En fonction du nombre de zone traversée (S), de ni la largeur cumulée au niveau de la zone traversée numéro i et de N la longueur totale du transect latéral dans chaque structure, l'indice **C** est calculé selon la formule :

$$C = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S [ni / N]^2$$

La structure d'ensemble des résultats obtenus fait correspondre pour F1 un indice moyen de 1,11 (CV = 11%) ; pour F2 un indice moyen de 1,48 (CV = 9%) et enfin pour F3 un indice moyen de 2,30 (CV = 7%).

L'interprétation de la valeur de l'indice relatif aux structures à organisation linéaire égal à 1 serait que le champ latéral de l'inter bande est relativement homogène. L'indice de 1,48 tend à indiquer une réduction sensible de la largeur de l'inter bande d'où un passage du transect dans les zones nues et les zones boisées dans un ordre irrégulier d'où la variation de la structure. Enfin l'indice de 2,30 relatif aux organisations diffuses indique le passage du transect latéral dans ces mêmes zones mais dans un ordre purement aléatoire, car la structure devient dense et très hétérogène.

Cette description des structures en fonction de la fréquence des zones traversées latéralement (zone nue ou zone de végétation) concorde avec les résultats déjà présentés car ces indices de Simpson sont inversement proportionnels aux RIBB .

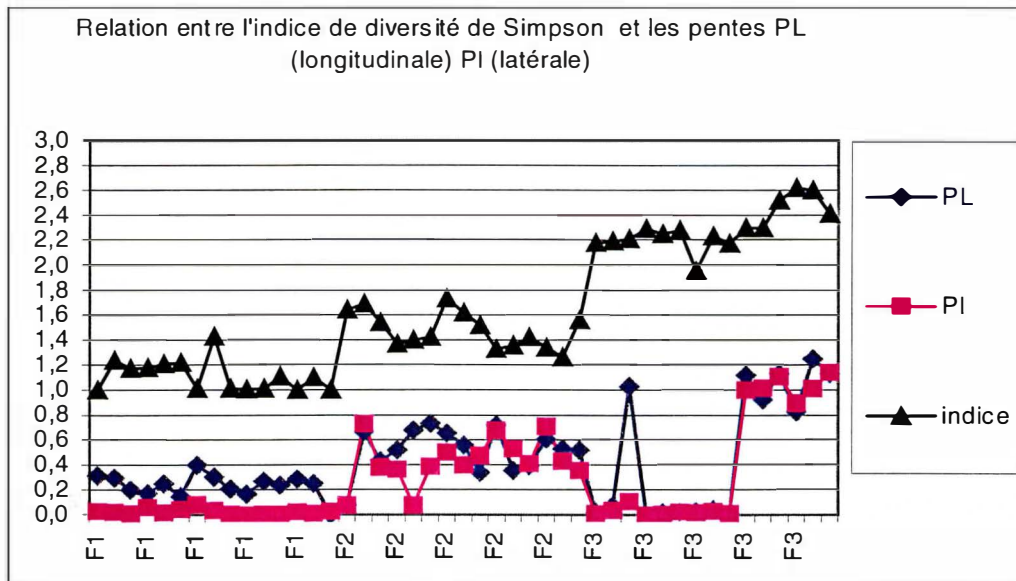


Fig. 24 Concordance entre l'indice de Simpson et les modèles de correspondances des pentes

1.3. Discussion des résultats

Cette première partie du **chapitre IV** a étudié les trois faciès de brousses contractées à travers la reconnaissance au sol et sur image des unités structurales (deux méthodes utilisées) d'une part et leur caractérisation (une méthode utilisée) à des échelles pertinentes d'autre part. Les trois différentes méthodes utilisées participent finalement pour constituer un ensemble cohérent dont l'analyse permet de mieux comprendre et interpréter les résultats.

La reconnaissance des unités structurales à travers l'analyse des paramètres issus des images permet de voir que les formes géométriques des bosquets diffèrent selon les unités structurales échantillonnées. Les trois variables GRAXE, PTAXE et RAPNO discriminent de manière satisfaisante les bosquets des structures linéaires (65% correctement identifiés) et ceux des organisations diffuses (70% correctement isolés). Par contre ces mêmes variables séparent difficilement les bosquets du faciès de brousse mixte en raison de ses unités structurales de forme très différente.

Au moyen d'une exploration rapide et d'un inventaire simple, il est possible de représenter graphiquement une matrice de données de présence et d'absence de la végétation qui permet une reconnaissance satisfaisante au sol des trois structures à travers leur unités.

L'étude des rapports caractéristiques relatifs aux unités structurales, permet de voir leur variation aux différentes échelles. Ainsi, tant la largeur des périodes que le RIBB restent statistiquement invariants à l'échelle des unités fonctionnelles d'un même faciès ou à l'échelle des faciès du même genre coexistants sur un même plateau ou à des latitudes différentes. Cette situation s'explique par le fait que l'existence d'un faciès dans une portion bien déterminée du plateau n'est pas le fruit du hasard, car c'est le modèle de combinaison des pentes qui conditionne les largeurs des périodes et par conséquent le RIBB. En revanche, à l'échelle régionale, la différence des largeurs des périodes et du RIBB se justifie et s'explique par le jeu de compensation de facteurs écologiques décrit au chapitre III.

La stabilité du RIBB à l'échelle de l'unité fonctionnelle, fait de lui un critère valable indiquant une efficacité théorique du contrôle et de l'utilisation du surplus d'eau de ruissellement. Plus fort en F1, le RIBB = 1,25 indique un impluvium de grande capacité. Plus réduit en F2 (RIBB = 0,86), cela signifie que cet impluvium est légèrement moins large que la zone de végétation. Enfin, s'il est insignifiant en F3 (RIBB = 0,55), voudra dire que cet impluvium est deux fois moins large que la zone boisée à laquelle il devrait apporter un supplément d'eau de ruissellement.

Enfin l'indice de diversité de Simpson calculé pour traduire la variabilité zonale des structures représente un critère satisfaisant de caractérisation qui est aussi en concordance parfaite avec les modèles de correspondance des pentes. Un indice égal à 1 caractérise une variation zonale latérale assez faible. Un indice de 1,48 traduit l'étroitesse de l'impluvium dont le parcours conduit à traverser des zones nues et boisées. Quand l'indice est égal à 2,30, le système recèle latéralement une distribution purement aléatoire des zones différentes à traverser.

2 - Structures démographique et agrégative des peuplements ligneux et herbacés

Ce second paragraphe décrit la structure de la végétation qui est l'expression synthétique des modes d'organisation spatiale des végétaux. Par l'étude de la démographie des espèces, leur organisation dans l'espace, la composition floristique et de la stratification, il serait possible d'obtenir des réponses écologiques de plusieurs espèces simultanément, donc les groupes d'espèces inféodées aux différentes unités de végétation. Est pris en considération la dimension "ESPACE" pour étudier d'une part la structure de la végétation (étude des densités, de l'occupation spatiale, de la stratification et des variations phytodynamiques) et d'autre part la composition floristique (chorologie, répartition des taxa, richesse par unité d'espace et leur origine).

2.1. Résultats relatifs à la démographie et aux modes d'agrégation des ligneux

En se référant aux travaux de Ichaou, (1995 et 1997) et aux autres sources bibliographiques relevant du domaine, il ressort que les structures forestières contractées de plateaux qui se situent dans la zone biogéographique ouest africaine sèche sont dominées par des espèces de la famille des combretacées (85 à 95%). Ichaou (1997) indique qu'à l'échelle des trois faciès étudiés, *Combretum micranthum* représente 76% des effectifs totaux des tiges, *Guiera senegalensis* 14,2%, *Combretum nigricans* 5,06%, divers acacias 2,7% et 2% d'autres espèces. Pour ces raisons, l'option de travailler sur les trois espèces dominantes est retenue. Ces espèces sont très caractéristiques de ces formations, par leur taille, leur nombre, leur forme physiologique et leur âge. Elles exercent ainsi une certaine action sur les stations, ce qui permet de rendre compte de la démographie ligneuse totale en travaillant sur elles.

Cinq termes sont utilisés : le brin correspond à une tige relativement érigée individualisée dès 20 cm du sol ; l'arbuste représente un regroupement de tiges issues d'une même souche ; l'hectare de plateau correspond à l'unité de surface qui prend en compte le sol nu et la zone de végétation et enfin l'hectare végétalisé est l'unité de surface (théorique) avec 100% de recouvrement.

2.1.1. Densité ligneuse par unités de surface

Le **tab. 14 (a)** présente le nombre total de tiges (des trois espèces confondues) par hectare de plateau, puis par hectare végétalisé pour permettre la comparaison sans biais entre les systèmes (**tab. 14 b**). La structure d'ensemble des classes d'amplitude de diamètre traduit globalement que pour les trois systèmes, les tiges de diamètres ≤ 6 cm représentent au moins les 3/4 de l'ensemble des

tiges. Toujours en considérant les effectifs par hectare de plateau, les tiges de Ø à 1,30 m du sol > 6 cm (qui sont commercialisables) sont respectivement de 21% de l'ensemble des tiges pour F1, 15% pour F2 et 13 % pour F3, ce qui constitue une information utile à la gestion forestière.

Tab.14 (a) Densité des tiges par faciès (ha de plateau)

Faciès	Tiges de Ø ≤ 6 cm	Tiges de Ø 6 à 10 cm	Tiges de Ø 10 à 14 cm	Tiges de Ø 14 à 20 cm	Tiges de Ø ≥ 20 cm	Densité totale par hectare de plateau
Organisation linéaire	6995 (78,99%)	1683 (19,01%)	99 (1,12%)	78 (0,88%)	0 (0%)	8 855
Organisation mixte	7907 (85%)	1116 (12%)	186 (2%)	53 (0,57%)	40 (0,43%)	9 302
Organisation diffuse	9442 (87%)	977 (9%)	124 (1,14%)	202 (1,86%)	108 (1%)	10 853

Tab.14 (b) Densité des tiges par faciès (ha végétalisé)

Faciès	Tiges de Ø ≤ 6 cm	Tiges de Ø 6 à 10 cm	Tiges de Ø 10 à 14 cm	Tiges de Ø 14 à 20 cm	Tiges de Ø ≥ 20 cm	Densité totale par hectare végétalisé
Organisation linéaire	17272	4156	244	193	0	21864
Organisation mixte	17004	2400	400	114	86	20004
Organisation diffuse	13489	1396	331	289	154	15659

L'expression de la densité de tiges par hectare végétalisé (rendant compte de la standardisation des résultats sur une base de recouvrement égal), donne l'avantage aux systèmes linéaires (à faible recouvrement) qui disposent d'un plus grand nombre de tiges. L'analyse combinée des mêmes observations avec certaines données complémentaires, pourrait en plus expliquer la contribution de chaque espèce dans la caractérisation de la station et dans l'occupation spatiale.

A cet effet, trois hypothèses sont formulées afin de permettre de répondre sur une base statistique aux questions suivantes :

1^{ère} hypothèse : est-ce que la fréquence de tiges ou d'arbustes diffère d'un site à l'autre à l'intérieur de chacun des faciès ? et par espèce ?

- la fréquence d'arbustes et de tiges des trois espèces est significativement différente dans les faciès F1 et F2. En F3 par contre elle reste identique.(voir **tab.15 a et b**) ;

2^{ème} hypothèse : est-ce que le nombre de tiges ou d'arbustes diffère d'un faciès à un autre?

- la fréquence des tiges et des arbustes en fonction des faciès sous H0 traduit le rejet de l'hypothèse (P<0,01). En effet parmi les trois espèces, *Combretum micranthum* (2) avec une bonne fréquence (par rapport à l'ensemble des arbustes) de 65,91%, est fortement inféodé aux plateaux abritant le faciès F1. Ensuite viennent les deux autres espèces : *Guiera senegalensis* (1) avec 24,23% et qui est relativement bien représenté dans tous les faciès et *Combretum nigricans* (9,85%) qui est plus fréquent dans les faciès de brousse à organisation mixte (F2) et à organisation diffuse (F3) surtout.

- l'espèce (3) est très peu représentée dans les structures linéaires (F1), voir **tab.15, a**. D'ailleurs la présence de ce ligneux dans ce faciès ne serait pas possible s'il ne trouvait pas des conditions écologiques qui sont certainement dues aux corrections écologiques.

3^{ème} hypothèse : est ce que le nombre de tiges par arbuste diffère d'un faciès à un autre ou d'un site à un autre?

- sur l'ensemble des plateaux, les espèces (1) et (2) présentent un nombre de tiges par arbuste qui ne diffèrent pas significativement (P=0,5), d'où leur forte ressemblance physiologique.

Tab. 15 (a) Fréquence des arbustes dans les sites pilotes

Faciès	Sites pilotes	Fréquence des arbustes (%)			% total
		<i>Guiera senegalensis</i> (1)	<i>Combretum micranthum</i> (2)	<i>Combretum nigricans</i> (3)	
F1	Banizoumbou	36,34	56,81	6,85	100
F1	Dingazi	13,54	85,49	0,97	100
F1	Dorobobo	4,32	95,05	0,63	100
F2	Kirtachi	37,25	29,85	32,89	100
F2	Kouré	35,66	58,38	5,95	100
F3	Mossipaga	41,47	18,80	39,73	100
F3	Tientergou	26,30	42,39	31,31	100
% par rapport à tous les arbustes		24,23	65,91	9,85	100

Tab. 15(b) Fréquence des tiges dans les sites pilotes

Faciès	Sites pilotes	Fréquence des tiges (%)			% total
		<i>Guiera senegalensis</i> (1)	<i>Combretum micranthum</i> (2)	<i>Combretum nigricans</i> (3)	
F1	Banizoumbou	30,00	66,74	3,22	100
F1	Dingazi	10,37	89,32	0,31	100
F1	Dorobobo	4,08	95,53	0,39	100
F2	Kirtachi	38,85	46,27	14,89	100
F2	Kouré	33,65	62,89	3,46	100
F3	Mossipaga	44,85	30,05	25,10	100
F3	Tientergou	20,88	61,13	17,99	100
% par rapport à toutes les tiges		24,69	68,67	6,64	100

Les moyennes respectives de tiges par arbuste représentent pour l'espèce(1), 5,01 tiges (écart type = 4,64) et pour l'espèce (2), 5,11 tiges avec un écart type de 5,35.

- le nombre de tiges par arbuste de l'espèce (3) plus réduit (espèce tendant à être monocaule), égal à 3,30 tiges avec un écart type de 2,99 diffère significativement du cas des deux premières espèces ($P < 0,001$)

- l'analyse comparative du nombre de tiges par arbuste (pour une même espèce) et entre les trois faciès indique :

* un nombre de tiges par arbuste qui ne diffèrent pas significativement pour toutes les espèces et dans les faciès F2 et F3

* en F1, le nombre de tiges par arbuste est d'une part plus réduit pour toutes les espèces, et d'autre part significativement différent ($P < 0,01$). Les espèces semblent apparemment réguler les effectifs de tiges en fonction des conditions du milieu pour assurer leur survie.

La vérification des trois hypothèses et les éléments de comparaison obtenus entre faciès et entre espèces représentent des indices de base à considérer dans la compréhension de la régénération, de la dynamique et de la productivité de ces systèmes en fonction de la disponibilité en eau.

Indépendamment de ce point ci-dessus, la vérification des trois hypothèses permet de mieux interpréter les analyses relatives à la structure agrégative (ou en amas) des espèces ligneuses pour expliquer le fonctionnement biologique des systèmes. Par exemple, l'examen des **fig. 25** et **26** qui montrent la structure démographique des arbustes et des tiges, permet de voir que *Combretum micranthum* est l'espèce qui marque la physionomie du faciès F1 ; *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis* étant les deux espèces qui caractérisent la physionomie du faciès F2 et enfin les trois espèces réunies déterminent la physionomie des organisations diffuses de la végétation.

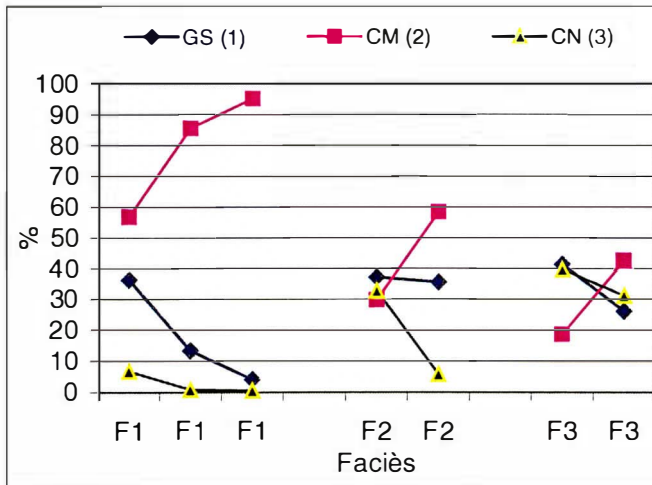


Fig.25 Fréquence des arbustes dans les Faciès

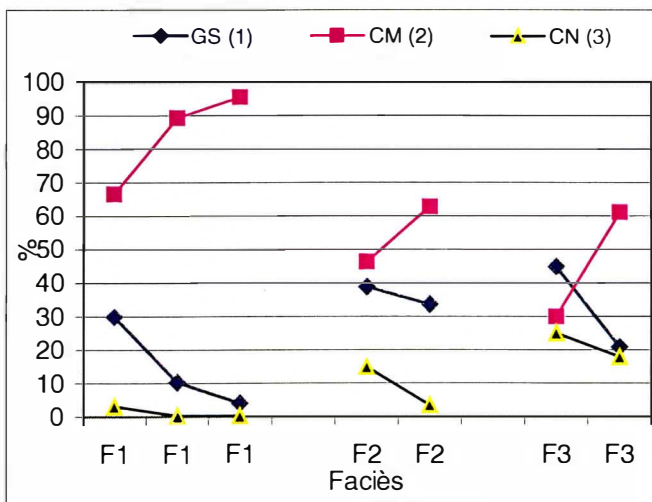


Fig.26 Fréquence des tiges dans les Faciès

2.1.2. Recouvrement des espèces et des peuplements ligneux

Les résultats de l'analyse des fréquences et les tendances de dominance que reflètent les espèces selon les faciès ont été complétés par le calcul du recouvrement de chacune d'elles, ainsi que celui de l'ensemble du peuplement pour voir quel type d'utilisation spatiale globale elles font du milieu. A ce titre les recouvrements calculés par espèce (tab. 16) sont en concordance avec leur fréquence selon les faciès. Le recouvrement du peuplement et la fréquence des trois espèces permettent de comprendre que l'étude des trois espèces suffit largement pour donner une idée fiable de l'occupation spatiale de la végétation dans les faciès :

* $30,09\% \pm 7$ pour F1 contre $40,5\% \pm 3,5$ de recouvrement global déterminé par les traitements d'images ;

* $45,07\% \pm 6$ pour F2 contre $46,5\% \pm 5,5$;

* et $79,20\% \pm 3$ pour F3 contre $70\% \pm 12$).

En effet, l'écart faible entre les intervalles de confiance des deux moyennes de recouvrements déterminés pour un même faciès valide des calculs effectués ;

- les recouvrements spécifiques calculés tendent quant - à eux à corroborer les premières tendances définies par la fréquence des arbustes dans les faciès. Le pourcentage de recouvrement de "GS" indique sa présence active dans les trois faciès (14,91% en F1 ; 36,64% en F2 et 23,54% en F3). Les surfaces couvertes par "CM" déterminent sa dominance en F1 principalement (84,53% du total) et enfin l'occupation de "CN" est plus importante en F3 (43,02%) puis en F2 (14,02%) ;

- ces recouvrements spécifiques tendent par ailleurs à corroborer la contribution de chacune des espèces (définies précédemment) dans la détermination de la physionomie des trois faciès.

Tab. 16 Recouvrement global ligneux des espèces selon les structures végétales (%)

Espèces ligneuses	Organisation linéaire (F1)		Organisation mixte (F2)		Organisation diffuse (F3)	
	% moyen	% par rapport au recouvrement total	% moyen	% par rapport au recouvrement total	% moyen	% par rapport au recouvrement total
<i>Guiera senegalensis</i> (1)	4,48	14,91	16,51	36,64	18,64	23,54
<i>Combretum micranthum</i> (2)	25,43	84,53	22,22	49,3	26,47	33,42
<i>Combretum nigricans</i> (3)	0,16	0,55	6,33	14,06	34,08	43,02
% total du peuplement	30,09 ± 7	100	45,07 ± 6	100	79,20 ± 3	100

2.1.3. Niveaux d'intégration et modes d'agrégation par la structure verticale des ligneux

Puisque la démographie ligneuse et les recouvrements des espèces sont en concordance et prédéterminent relativement la physionomie de chacun des faciès, l'analyse se poursuit par l'organisation des effectifs sur le plan vertical. Les niveaux d'intégration et d'hiérarchisation des tiges sont constitués des différentes composantes de l'unité fonctionnelle qui sont par ordre :

- la bande nue (existence de quelques herbacées et des ligneux très rares) ;
- le front pionnier jumelé à une frange herbacée où dominant essentiellement *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum* ;
- le cœur du fourré ou zone boisée (couverture ligneuse dense constituée principalement de *Combretum nigricans*, *Combretum micranthum*, *Guiera senegalensis* et diverses autres espèces : *Acacia ataxacantha*, *Acacia erythrocalyx* et *Acacia macrostachya* ;
- la zone de sénescence ou frange à chicots constituée de sujets sénescents de *Combretum micranthum*, *Guiera senegalensis* associés le plus souvent à *Boscia angustifolia* qui reste encore vert.

Les différents niveaux (que nous définissons) où prédominent les ligneux sont organisés en trois strates imbriquées bien différenciées : la strate I ou strate herbacée (à composition mixte : herbacée + plantules des ligneux) de moins d'un mètre de hauteur ; la strate II ou strate arbustive constituée d'arbustes et d'arbrisseaux de taille variant de 1 à 7 mètres et enfin une strate III, constituée d'arbres dont la hauteur peut dépasser 7 mètres.

Pour mettre en relief la structuration verticale d'ensemble des unités fonctionnelles, (tab.17) l'augmentation du nombre des classes d'amplitude de hauteur permet de mettre en évidence les variations graduelles des effectifs selon les faciès (fig. 27 a, b et c). Dans un premier temps on observe un pic décrit par la classe de hauteur allant de un à deux mètres dans les trois faciès, ce qui indique que les hauteurs dominantes sont bien localisées dans une zone donnée du faciès. En F1 l'allure régulière de la courbe trace la régression des effectifs au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la classe de hauteur dominante. Cette cadence uniforme traduirait la structure verticale contagieuse des

différents agrégats qui semblent en équilibre. Dans les formes d'organisations végétales mixtes et diffuses, l'allure de la courbe asymétrique semble indiquer une hétérogénéité de la structure verticale des tiges. Les variations très marquées entre les classes de hauteur indique que ces deux structures verticales sont "jardinées" donc fragilisées par les prélèvements.

Tab.17 Effectifs des tiges par classe de hauteur (%)

Faciès	Effectifs par classe d'amplitude des hauteurs					
	0 à 1 m	1 à 2 m	2 à 3 m	3 à 4 m	4 à 5 m	> 5 m
F1	25,12	32,95	24,09	14,09	3,39	0,36
F2	20,90	29,69	25,17	19,01	4,65	0,58
F3	17,75	34,82	23,72	17,35	5,37	1,00

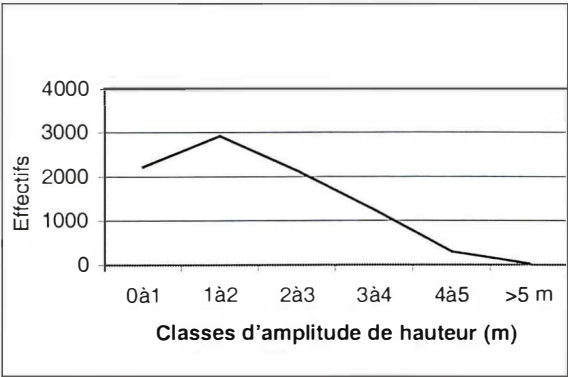


Fig.27 (a) Distribution verticale des individus de F1

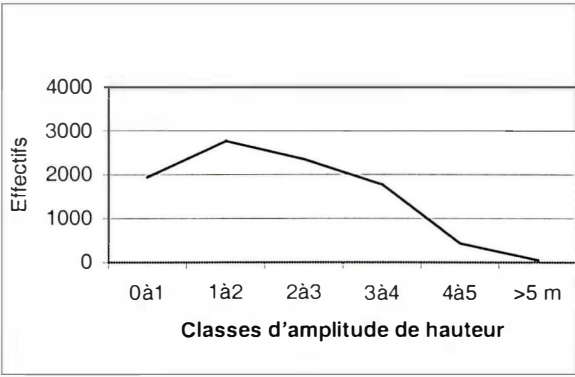


Fig.27 (b) Distribution verticale des individus de F2

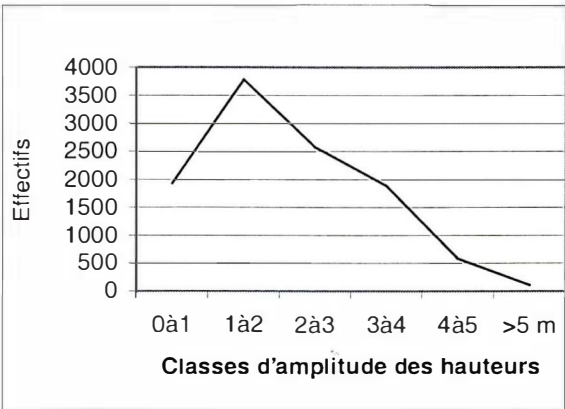


Fig.27 (c) Distribution verticale des individus de F3

2.1.4. Structure horizontale : définition dendrochronologique de trois zones
homogènes de répartition des principaux ligneux

Les différentes composantes de l'unité fonctionnelle des structures linéaires ont été décrites par Ambouta (1984), selon une succession horizontale bien marquée. Les premiers résultats exposés corroborent ces observations sous un angle analytique en donnant un rôle fondamental au modèle d'agencement des pentes qui conditionne le modelé et la distribution de la végétation. Une des voies de validation serait d'analyser la distribution spatiale horizontale des ligneux dans les structures linéaires mieux connues pour l'étendre ensuite par analogie aux organisations peu ou pas structurées.

La détermination des âges de tiges ligneuses par dendrochronologie a donné des résultats (Fig. 28 a, b et c), qui permettent de comprendre que les patterns s'organisent horizontalement selon :

- un gradient régulier d'âges croissants de l'amont de la pente vers l'aval qui s'étend sur les trois zones homogènes (front pionnier, cœur du fourré et zone de sénescence) du faciès F1,
- une série concentrique d'âges décroissants, à partir d'un semis aléatoire de noyaux de végétation jusqu'à la lisière du bosquet (en passant par des zones concentriques centrales) dans le faciès F3,
- une disposition hybride en plages homogènes dans les structures intermédiaires (F2).

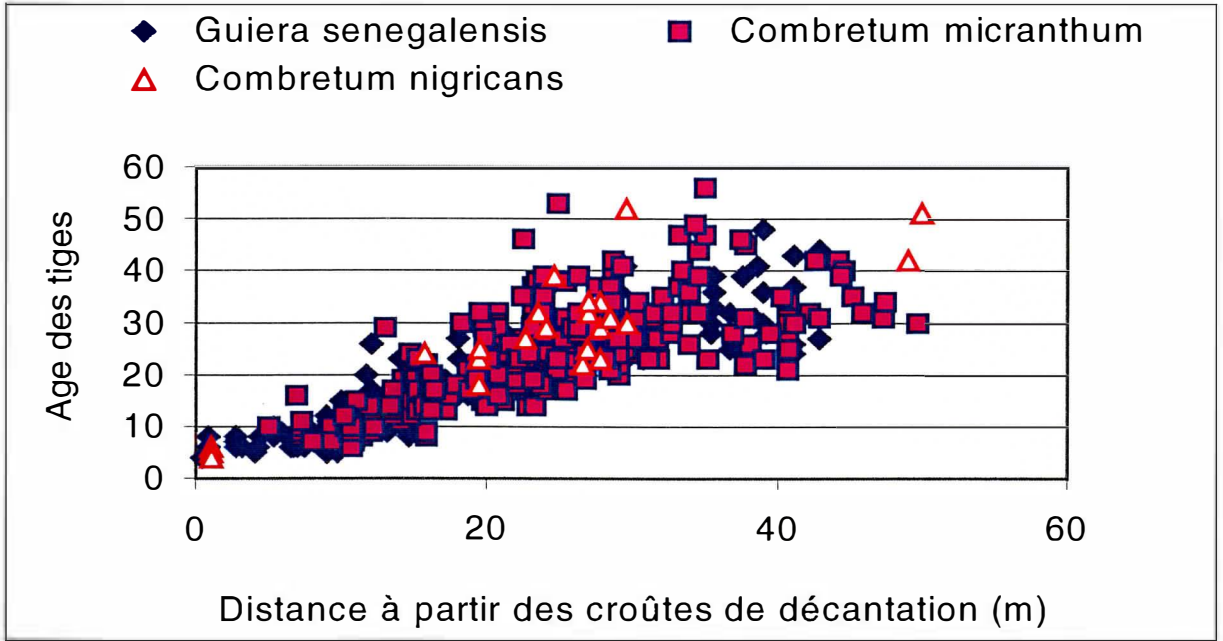


Fig. 28 (a) : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation linéaire de la végétation

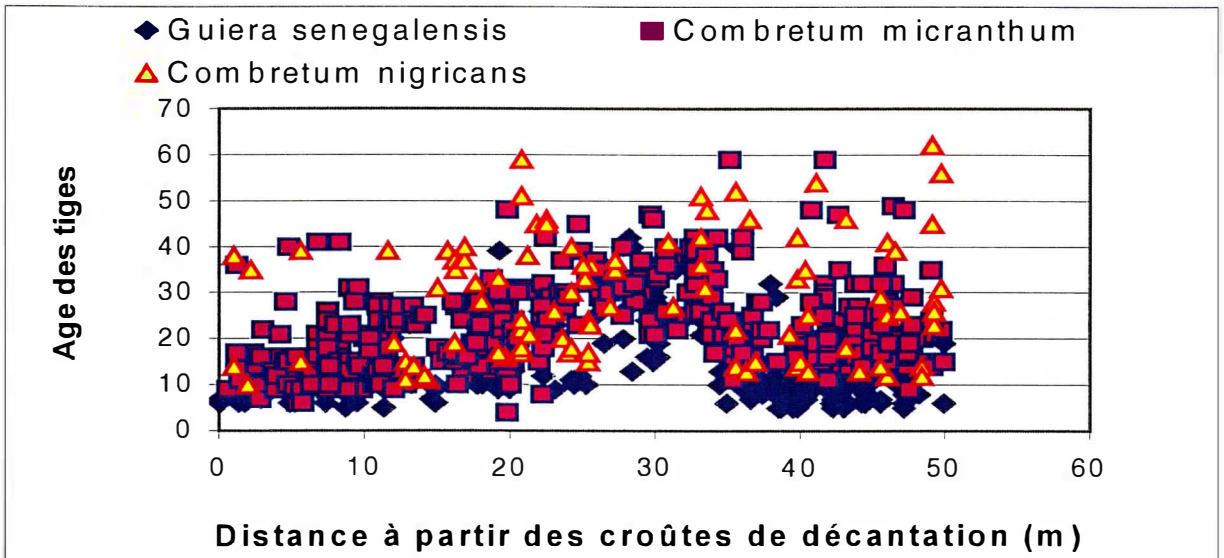


Fig. 28 (b) : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation mixte de la végétation

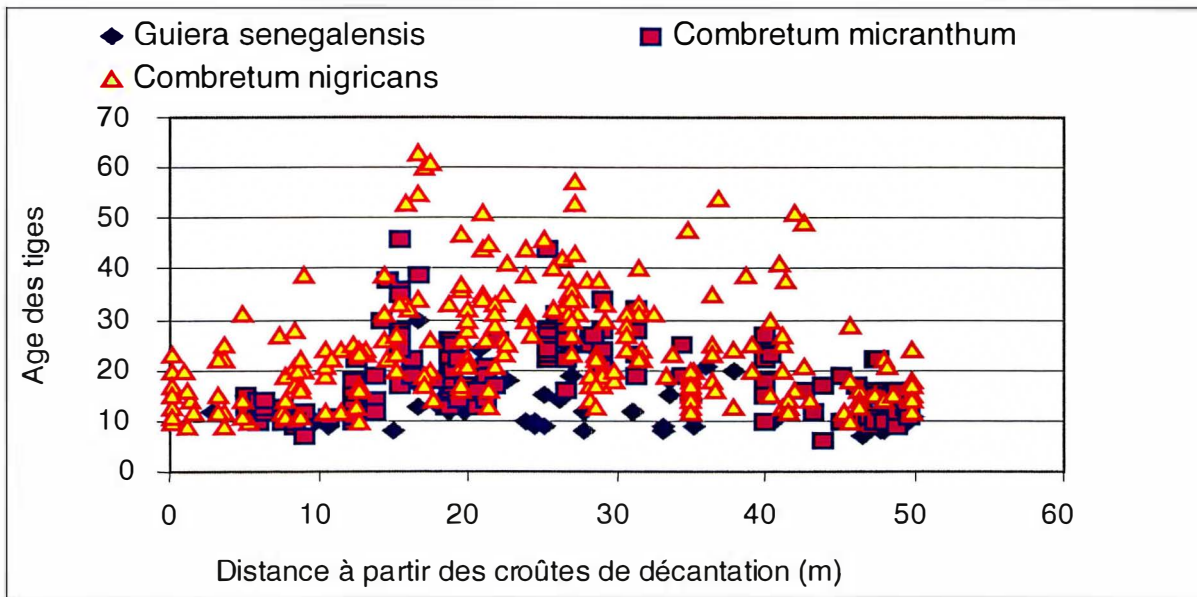


Fig. 28 (c) : Distribution des trois espèces dans le mode d'organisation diffuse de la végétation

2.1.5. Tendance des processus directionnels décrits par l'âge des ligneux

Cette structure horizontale des ligneux dans les trois faciès a pu être validée par une vérification des processus directionnels que décrivent les âges des tiges (**fig. 29, 30 et 31 a, b et c**). Après avoir procédé à un lissage des données, les surfaces des tendances ont été relevées selon les angles suivants : angle = 0° qui correspond à l'orientation de la pente longitudinale (direction perpendiculaire aux zones boisées) ; angle = 90° qui est la direction latérale \pm parallèle aux zones boisées et enfin angle = 45° dans le sens des deux diagonales (direction de contrôle des processus).

L'analyse des figures relatives aux tendances directionnelles des processus, décrites par les âges permet d'une part de valider l'existence des zones homogènes selon les faciès et d'autre part de caractériser l'influence des modèles de combinaison des pentes sur les états de surface (croûtes d'érosion et végétation ligneuse) :

- pour les structures linéaires, l'organisation horizontale de la végétation suit un gradient régulier d'âges croissants de l'amont (front pionnier) vers l'aval des bandes boisées (zone de sénescence) en passant par le milieu du fourré (cœur du fourré). Cette tendance confirme le sens uniforme que prend la plus grande variabilité des âges dans le sens longitudinal, validant ainsi l'existence d'une seule direction privilégiée des flux hydrologiques en surface (qui conditionnent la colonisation amont des ligneux et leur sénescence en aval). Dans ce cadre on observe donc une linéarité du phénomène de la distribution horizontale des espèces.

- pour les structures végétales diffuses, les figures confirment l'existence d'une série concentrique d'âges décroissants à partir des positions aléatoires de noyau de végétation (noyau du bosquet) jusqu'à la lisière du bosquet (zone de lisière) en passant par des zones intermédiaires (zones concentriques). La variabilité des âges indique une tendance d'isotropie des écoulements en surface d'où un faible apport supplémentaire d'eau pour la végétation qui ne subsiste que par les quantités de pluies directement tombées et captées par le système. Il semble donc qu'à l'échelle du

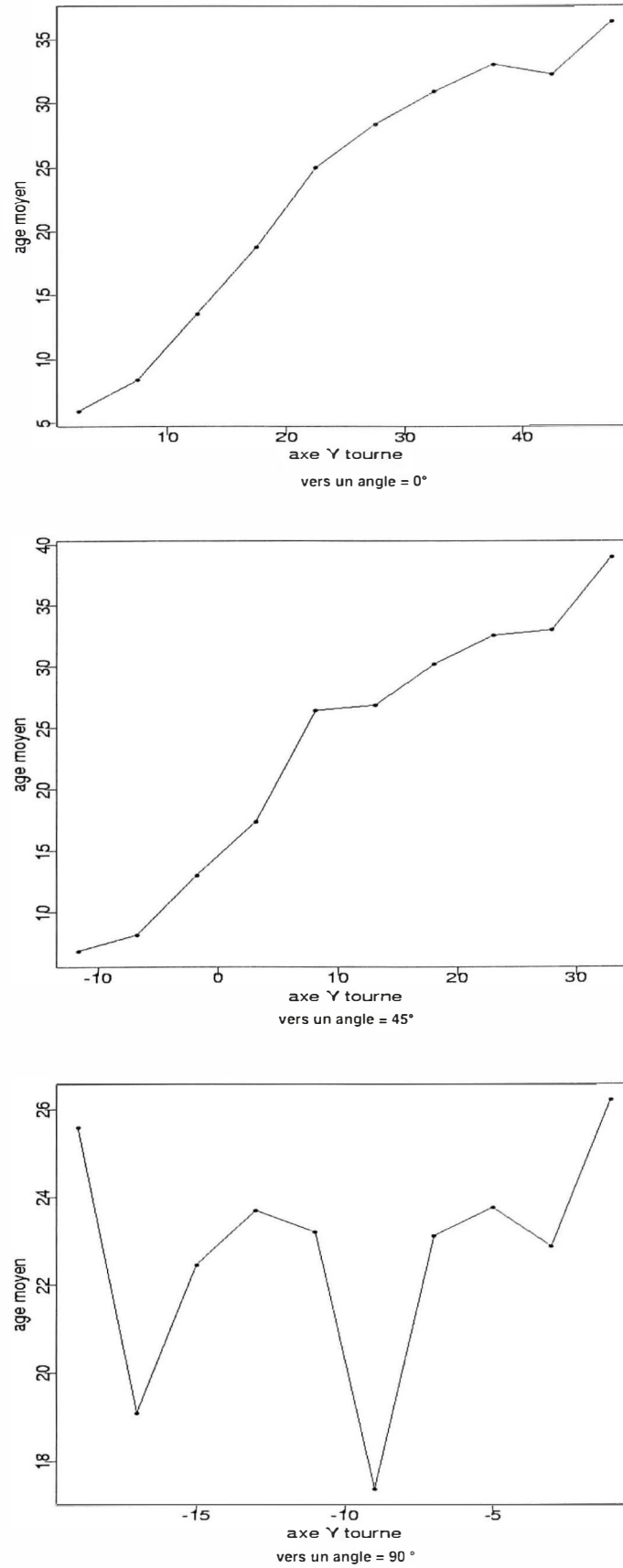


Fig. 29 (a, b et c) : Variation de la structure des âges des trois espèces : structure linéaire F1(F1)

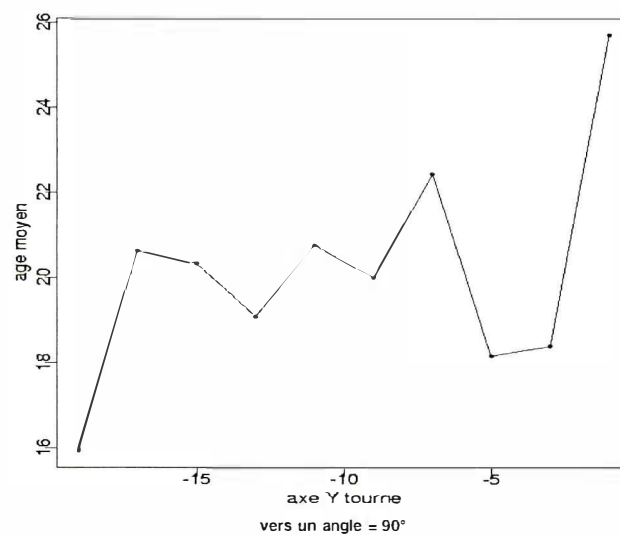
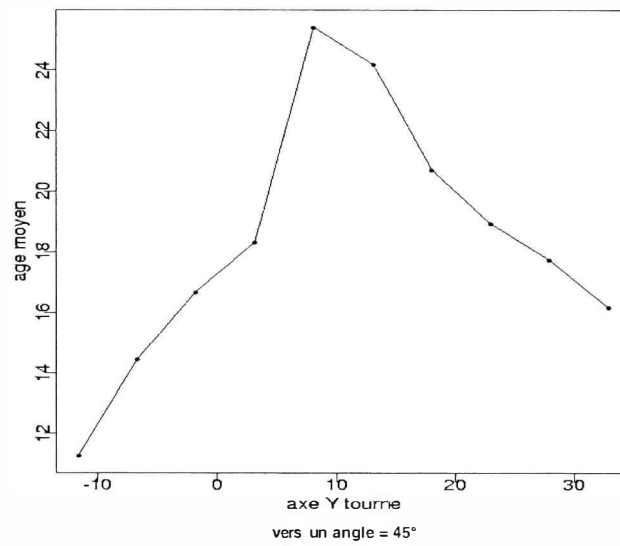
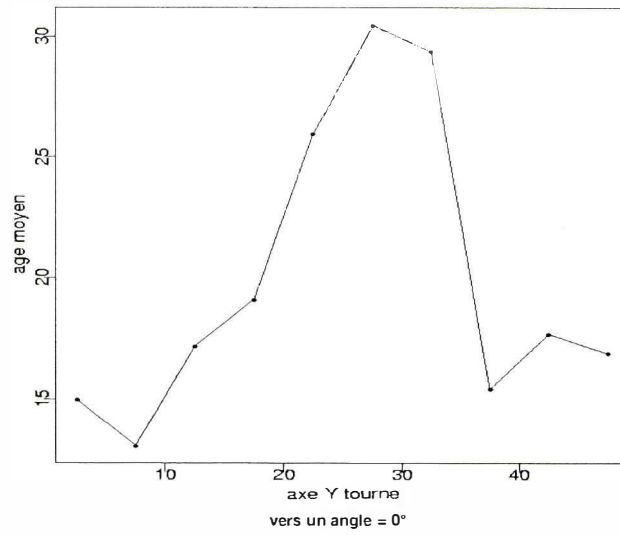


Fig. 30 (a, b et c) : Variation de la structure des âges des trois espèces : Structure mixte (F2)

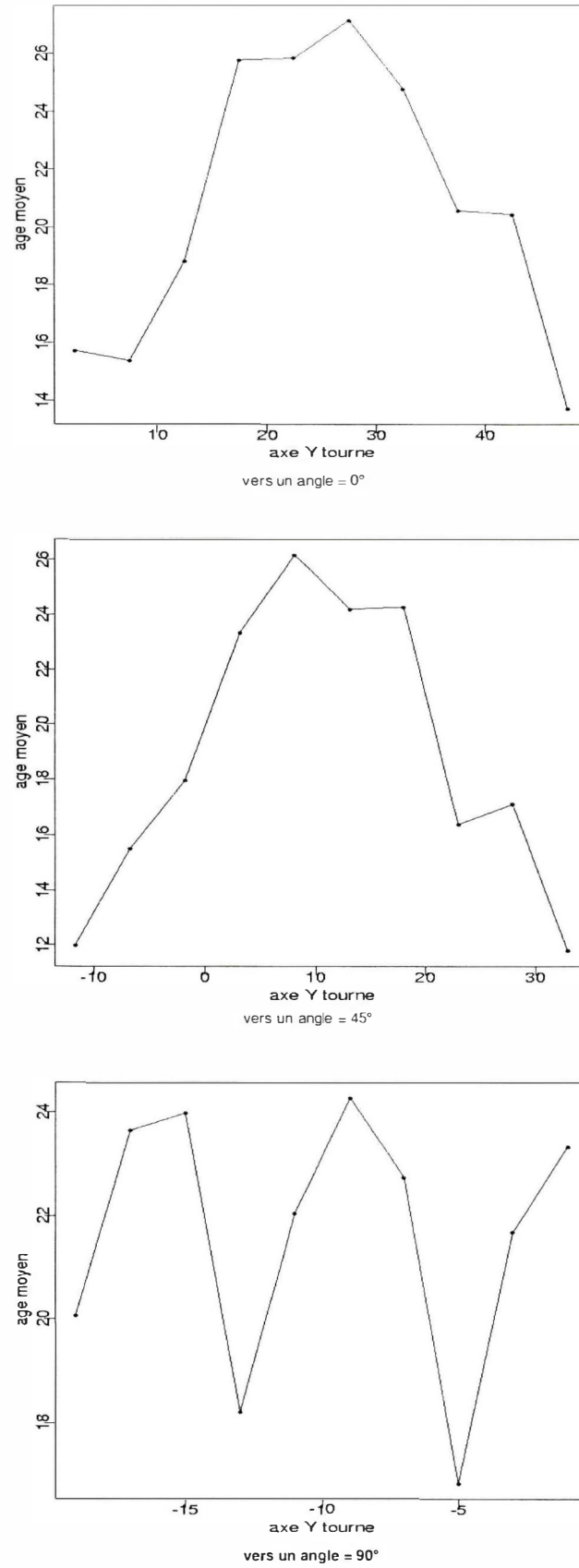


Fig. 31 (a, b et c) : Variation de la structure des âges des trois espèces : Structure "diffuse"(F3)

faciès de brousse diffuse, les conditions mésologiques des stations influencent plus cette distribution qui est aléatoire et marquée par des noyaux de végétation (dominés par CN) autour desquels des séries concentriques (associations des trois espèces) sont articulées, jusqu'à la lisière où le faible impact du surplus d'eau de ruissellement semble justifier un effet de bordure qui favorise l'installation de *Guiera senegalensis* en premier lieu.

- pour les structures mixtes, on observe une disposition hybride en plaques homogènes de végétation. Les directions que prennent les tendances de variation des âges dépendent de la ressemblance à l'un ou à l'autre des deux premiers faciès, et déterminent une mosaïque de zones hétérogènes. Le modèle de combinaison des pentes, influence de manière irrégulière la structuration de la végétation qui s'organise de manière plus difficile à modéliser en raison de ses caractéristiques.

L'étude de la structure organisationnelle de la végétation ligneuse tend à se relier parfaitement à la structure du cadre physique et aux données mésologiques décrites précédemment. La distribution spatiale des tiges des trois espèces ligneuses permet de préciser davantage les premiers résultats et les hypothèses émises sur le rôle que jouent les pentes et les états de surfaces (distribution des eaux de ruissellement) et les conséquences qui en résultent en terme de dynamique spatiale et temporelle des peuplements ligneux.

2.2. Résultats relatifs à la démographie et aux modes de distribution des espèces herbacées

Dans l'analyse des systèmes, la préoccupation principale étant de comprendre les relations entre phénomènes simultanés, la composante herbacée a été également inventoriée pendant trois années successives pour dégager en fonction des zones et des fréquences, sa contribution dans la caractérisation de ces écosystèmes. La terminologie suivante est adoptée pour caractériser les zones d'inventaire des herbacées :

- front pionnier en F1 et lisière du bosquet en F3 (pour les ligneux) correspondent à la lisière : Li (pour les herbacées) ;
- cœur du fourré en F1 et noyau du bosquet en F3 (pour les ligneux) correspondent au sous-bois : Sb (pour les herbacées) ;
- la zone de sénescence en F1 et les zones concentriques en F3 (pour les ligneux) correspondent à la zone ensoleillée : Ze (pour les herbacées) en raison de leur faible couverture respective.

2.2.1. Mise en évidence de trois zones homogènes définies par les herbacées

Sur la base d'un effectif total de cinquante six espèces recensées pendant les trois ans dans l'ensemble des quadrats permanents, trente neuf espèces (voir **annexe 2**) dont le nombre d'individus est >10 ont été prises en compte dans une analyse factorielle des correspondances qui a permis de montrer que :

- quel que soit le faciès on retrouve un modèle de distribution des individus similaire d'une zone homogène à une autre. Le sous bois (Sb) est toujours bien distinct des zones ensoleillées (Ze) et des lisières (Li) (**fig. 32**);
- les lisières disposent d'une présence et d'une distribution des individus intermédiaire entre les zones ensoleillées et les sous bois, en présentant toutefois plus de similitude avec les Ze ;

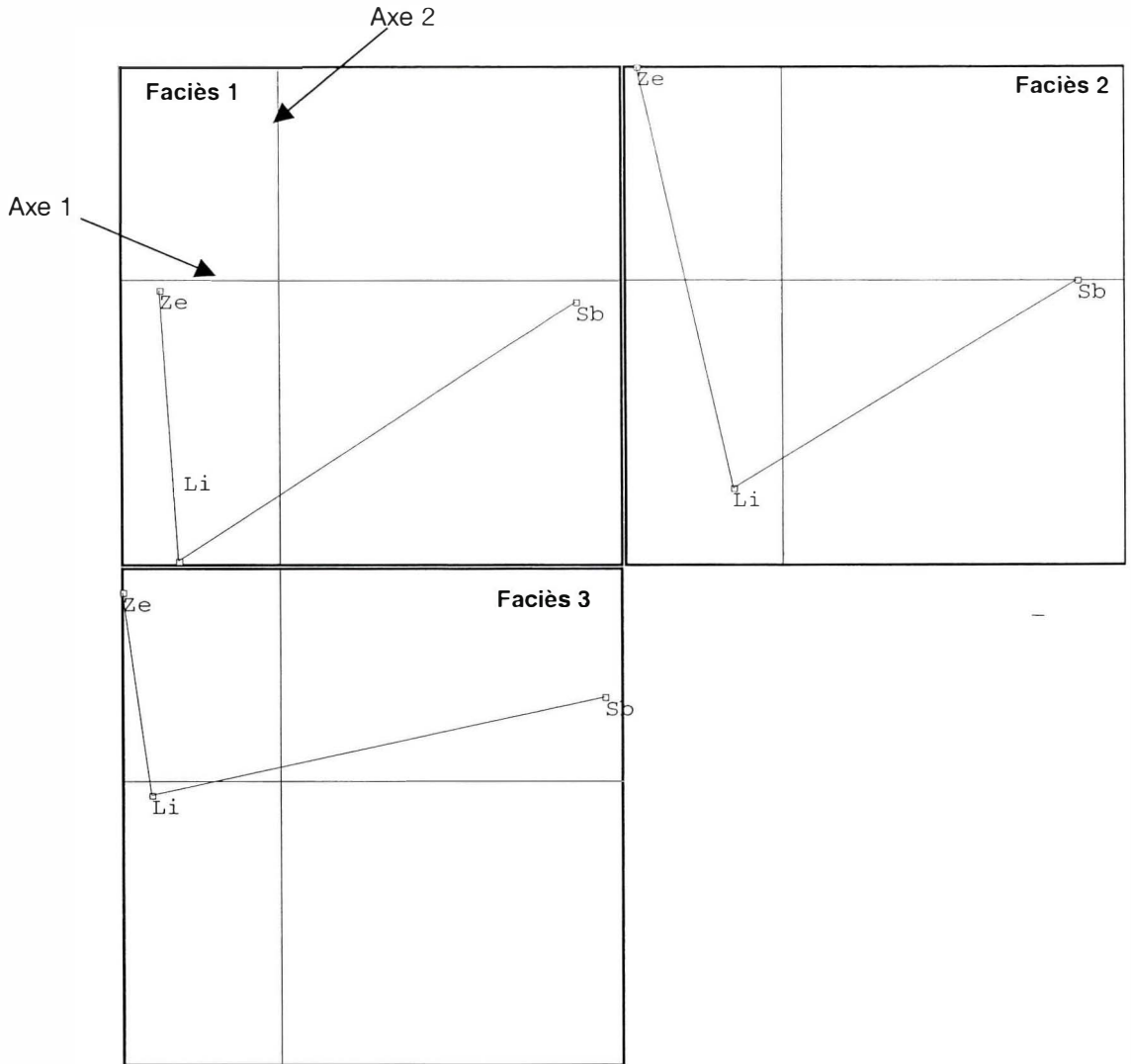


Fig.32 : Similitude de la distribution des individus d'une zone homogène à une autre dans les 3 faciès (A.F.C. sur les herbacées : projection des zones homogènes par faciès : Plan F1, F2)
 - un tel schéma de zonation se retrouve pour chacun des faciès avec toutefois des différences plus marquées au niveau du faciès 1.

2.2.2. Groupes fonctionnels herbacés des zones homogènes

Le nombre d'espèces n'est pas significativement différent d'un faciès à l'autre ou d'un milieu à l'autre ($\chi^2=2,39$; $P=0,664$), **tab.18**. De même, il n'existe pas de différences significatives entre milieux par faciès ($\chi^2=4,06$; $ddl=4$; $P=0,698$). Cependant en considérant le nombre d'individus (**tab.19**) par zones homogènes et par faciès, il existe une différence hautement significative ($\chi^2 = 437,5$; $ddl=4$; $P<0,001$). Cette différence d'effectif d'espèces entre les zones homogènes d'un même faciès d'une part ou entre les trois faciès d'autre part, traduit la variation des relations espèces-milieux, donc des fonctionnements écologiques.

Par exemple les effectifs d'individus largement plus importants dans les lisières des faciès F1 et F2 (à cause de la concentration des éléments fins et du supplément d'eau) ou dans les sous bois et les zones ensoleillées du faciès F3 (macro porosité et/ou la forte humidité relative) permettent de penser que certaines espèces sont bien inféodées à un faciès ou à une zone homogène précise pour

déterminer sa physionomie. Par contre, les effectifs réduits dans la zone ensoleillée de F1 (zone de sénescence avec une faible répercussion réduite du flux hydrologique) ou dans la lisière du F3 (faible apport d'eau de ruissellement dû aux modèles de correspondance des pentes) traduit probablement l'exigence des espèces face à un mode de fonctionnement hydrologique moins efficace.

Tab. 18 : Nombre d'espèces par m² par faciès et par zones homogènes

Milieux	F1	F2	F3
Sb	28	27	24
Li	28	17	14
Ze	26	19	14

Tab. 19 : Nombre d'individus par m² par faciès et par zones homogènes

Milieu	F1	F2	F3	Total par zone
Sb	1303	1633	2376	5312
Li	1851	2520	1810	6181
Ze	1489	2859	3154	7502
Total par faciès	4643	7012	7340	18995

Tout en tenant compte du principe selon lequel les systèmes végétaux naturels des régions arides sont d'abord des systèmes fortement contraints et dépendants pour la production biologique, des facteurs physiques propres à ces zones (Long, 1985), l'étude de la variation des effectifs par espèce peut donner un autre détail. En effet cette dernière aurait des répercussions sur les espèces qui s'associent ou s'opposent pour déterminer d'abord des groupes fonctionnels par zone homogène (effets des facteurs écologiques dans leur ensemble) ou ensuite par faciès (sous l'influence des facteurs mésologiques). L'échelle d'analyse étant le niveau "population" non pas l'individu, il résulte trois types d'utilisation du milieu qui déterminent deux types de groupes fonctionnels (Tab. 20) :

Tab. 20 Synthèse de groupes fonctionnels des zones homogènes et des faciès

Espèces herbacées	Type biologique	Zones homogènes			Faciès déterminés			Exigences écologiques (selon plusieurs auteurs)		
		Li	Sb	Ze	F1	F2	F3	sol	lumière	humidité
Borreria scabra	The		x					1	3	1
Triumfetta pentandra	The		x					1	3	3
Digitaria horizontalis	The		x					3	3	2
Microchloa indica	The	X		x				2	1	2
Pennisetum pedicellatum	The						X	2	3	3
Brachiaria distichophylla	The						X	3	3	2
Panicum laetum	Hf				X			1	2	2
Tripogon minimus	The					X	X	4	1	3

N.B. : Sol : 1 = argilo-sableux ; 2 = limono-sableux ; 3 = sableux ; 4 = latérite ; Lumière : 1 =

héliophile ; 2 = indifférente ; 3 = sciaphile ; Humidité : 1 = indifférente ; 2 = ombrophile ; 3 = drainage ou sol inondable. The = Thérophyte ; Hf = Hydrophyte facultatif. L'espèce Zornia glochidiata n'est pas prise en compte dans la synthèse, car elle est présente dans les trois zones homogènes des trois faciès.

- groupes fonctionnels par zone homogène : 2 types d'utilisation du milieu définis par les espèces :
+ une utilisation indifférenciée, opportuniste par l'ensemble des individus de la population. Une seule espèce pratique ce mode d'utilisation : Zornia glochidiata (Fabaceae) est abondante en Sb, en Li et en Ze des trois faciès. Elle est trop commune pour donner des indications précises.

+ une utilisation globale indifférenciée de la population, mais avec spécialisation du fait des individus qui n'exploitent durant tout leur cycle qu'une seule zone homogène. Les espèces suivantes pratiquent ce mode d'utilisation semi-spécialisée des milieux :

Borreria scabra (Rubiaceae) est très fortement représentée dans les **Sb** (des trois faciès) exclusivement. Elle est rare en Li et absente en Ze.

Triumfetta pentandra (Tiliaceae) est également fortement représentée dans les **Sb** (des trois faciès). Elle est aussi rare en Li et absente en Ze.

Digitaria horizontalis (Gramineae) est moins bien représentée dans l'ensemble. Elle n'existe cependant que dans les **Sb** (des trois faciès) exclusivement. Elle est rare ou absente en Ze et en Li dans certains faciès.

Microchloa indica (Gramineae) est aussi moins bien représentée, mais n'existe que dans les **Ze** et les **Li** (des trois faciès). Elle est absente en Sb.

- **groupes fonctionnels par faciès** : un seul type d'utilisation du milieu défini par les espèces :

+ une utilisation totalement sélective du faciès par l'ensemble de la population. Les espèces suivantes sont spécialisées vis à vis de telle ou telle zone homogène mais appartenant à un seul faciès :

Pennisetum pedicellatum (Gramineae) et ***Brachiaria distichophylla*** (Gramineae) se localisent principalement dans le sous-bois du faciès F3. Ces deux espèces ne sont recensées qu'en F1 et F2 au cours des trois années d'inventaire.

Panicum laetum (Gramineae) est très bien représentée en Sb et en Li du faciès F1. Quand le faciès F2 tend vers une structuration linéaire, cette espèce se rencontre aussi dans son Sb. Elle n'a pas été identifiée en F3.

Tripogon minimus (Gramineae) se développe très bien dans les Ze du faciès F2, sa présence en F3 fait supposer qu'il ne s'installe que dans les zones de faible couverture mais avec suffisamment d'humidité.

Cette synthèse permet de mettre en évidence des caractéristiques propres ou communes aux faciès ou aux zones homogènes qui pourtant sont situés à des latitudes différentes et sous des conditions pluviométriques très différentes.

Les indications écologiques des espèces du sous bois déterminent un fonctionnement similaire dans tous les faciès. A ce titre *Borreria scabra*, *Triumfetta pentandra* et *Digitaria horizontalis* constituent le groupe fonctionnel des sous bois. Par ailleurs, aussi paradoxal que cela paraisse, les sous-bois des faciès F1 et F3 constituent des milieux écologiques identiques vu les exigences écologiques des espèces les plus fréquentes. Cette condition permettrait ainsi à ces espèces de prospérer dans des conditions écologiques de F1, qui leur sembleraient *a priori* inaccessibles.

La présence des apports d'éléments fins qui s'accumulent au niveau des lisières est confirmée par les espèces recensées (surtout quand le modèle de combinaison des pentes le permet : F1). A ce niveau, *Microchloa indica* est l'espèce caractérisant le fonctionnement des lisières.

Les zones ensoleillées s'apparentent aux lisières et les deux s'opposent de façon tranchée au sous - bois. Enfin, quoique les faciès contractés soient caractérisés par une réduction surfacique du couvert végétal, il n'en demeure pas moins qu'ils disposent des aptitudes écologiques approchant

celles des formations où la pluviométrie favorable permet l'installation d'une couverture végétale homogène sur les plateaux.

2.3. Résultats de l'étude de la composition taxinomique de la flore

2.3.1. Importance des taxa en présence

La mise en commun des données d'inventaires floristiques des sept plateaux pilotes révèle une flore assez riche comportant 53 espèces ligneuses (soit 21 familles et 38 genres) et 141² herbacées regroupées en 40 familles et 101 genres (voir la liste de la flore en **annexe 3**). Deux familles dominent largement l'ensemble des ligneux (Combretacées : 8 espèces et Mimosacées : 9 espèces) contre deux autres familles qui dominent les herbacées (Poacées : 25 représentants et Fabacées : 12 représentants).

2.3.2. Diversité floristique comparée entre les faciès

En considérant les effectifs bruts des taxa en présence, on dénote une richesse floristique assez appréciable dans les trois faciès avec un léger avantage pour les faciès F1 (256 espèces : 53 ligneux + 203 herbacées) et F3 (226 espèces : 72 ligneux + 154 herbacées). Le faciès F2 est relativement moins riche avec un effectif de 180 espèces (dont 48 ligneux et 132 herbacées).

Trois types d'indices ont été utilisés pour apprécier la richesse et la diversité qui caractérisent les milieux. L'utilisation de ces trois indices présente un triple avantage pour une meilleure caractérisation de la diversité : le coefficient de similitude de Jaccard : K (Saadou 1990) est employé dans les approches floristiques pour apprécier la diversité par le degré de lien floristique des taxa en présence ; le quotient de similarité de Sorensen (Saadou 1990) quant-à lui permet de comparer les biotopes en fonction de la diversité des taxa dans les approches physiologiques ; enfin l'indice d'Odum Debauche (Bachelier 1978) permet de comparer la similarité des milieux en fonction des effectifs de l'espèce la plus dominante dans les milieux à comparer.

Le calcul du coefficient de similitude de Jaccard (K) intra ligneux et intra herbacées d'une part et entre tous les taxa pris globalement d'autre part donne les résultats consignés dans le **tab. 21** :

Tab. 21 Coefficients de Jaccard (K) des trois Faciès de brousses contractées

Coefficients	Total des espèces par faciès			F1∩F2		F2∩F3		F1∩F3	
	F1	F2	F3	espèces communes	K en %	espèces communes	K en %	espèces communes	K en %
Intra ligneux	53	48	72	30	42	32	36	31	33
Intra herbacées	203	132	154	80	31	70	32	81	29
Intra taxa	256	180	226	110	34	102	34	112	30

Interprétation des coefficients calculés dans le tableau ci-dessus

- K intra-ligneux (K_L)

K_L (F1∩F2) = 42%, les faciès de brousses structurées linéaires et mixtes sont proches sur le plan floristique ;

K_L (F2 ∩ F3) = 36%, les faciès de brousses mixtes et les brousses diffuses sont relativement proches sur le plan floristique ;

K_L (F1 ∩ F3) = 33%, les faciès de brousses structurées linéaires et les brousses diffuses sont relativement proches sur le plan floristique.

- K intra herbacées (K_H)

² Ensemble des espèces rencontrées : seules celles représentées par plus de 10 individus ont été retenues dans les analyses

$K_H (F1 \cap F2) = 31\%$, les faciès de brousses structurées et les brousses diffuses ont un lien floristique relativement proche ;

$K_H (F2 \cap F3) = 32\%$, la tendance de liaison floristique entre ces deux faciès est identique au cas précédent, donc relativement proche;

$K_H (F1 \cap F3) = 29\%$, la tendance de liaison floristique entre ces deux faciès est faible.

- K Intra taxa (K_T)

$K (F1 \cap F2) = 34\%$, les deux faciès sont relativement proches l'un de l'autre ;

$K (F2 \cap F3) = 34\%$, ces deux faciès indiquent la même tendance d'un lien relativement proche ;

$K (F1 \cap F3) = 30\%$, dans ce dernier cas le lien floristique est faible entre les deux faciès.

L'interprétation des coefficients (K) permet de faire les constats suivants : K (intra ligneux) dégage des liens floristiques assez appréciables entre les trois faciès d'une part, et d'autre part, il traduit un lien floristique marqué entre les faciès F1 et F2 ; K (taxa) met aussi en évidence un lien floristique légèrement plus faible mais qui dépasse nettement le lien que met en relief K(intra herbacées) qui est moins fort. Autrement dit, les valeurs des coefficients K calculés sur les ligneux montrent des liens floristiques assez évidents entre les milieux. Les herbacées montrent des liens floristiques de même nature compte tenu de leurs faibles exigences qui leur permettent d'être plus plastiques.

Le calcul du quotient de similarité de Sorensen (1948) constitue la seconde méthode utilisée pour comparer la similitude des trois faciès en fonction toujours de leur diversité. Le calcul s'est fait sur la base de la formule :

$$QS = 2c / (a+b)$$

(où a = nombre d'espèces du milieu A, b= nombre d'espèces du milieu B et c =nombre d'espèces communes aux deux milieux).

Cet indice variant de 0 = aucune similarité à 100 = similarité totale, les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{array}{lll} QS_L (F1 \cap F2) = 59 & QS_L (F2 \cap F3) = 53 & QS_L (F1 \cap F3) = 50 \\ QS_H (F1 \cap F2) = 48 & QS_H (F2 \cap F3) = 49 & QS_H (F1 \cap F3) = 45 \\ QS_T (F1 \cap F2) = 50 & QS_T (F2 \cap F3) = 50 & QS_T (F1 \cap F3) = 46 \end{array}$$

A ce niveau, les tendances de similarité entre les faciès sont satisfaites pour l'ensemble des trois paramètres considérés, avec toutefois un léger avantage dans les indications que fournissent les ligneux.

Enfin le troisième et dernier indice utilisé dans ce cadre est celui d'Odum Debauche (1958), calculé en fonction des effectifs moyens de l'espèce *Zornia glochidiata* (la plus dominante sur trois faciès et pendant trois années successives), et dont les individus sont les plus nombreux dans l'ensemble des taxa. La formule utilisée est :

$$I = (\Sigma(a-b)/N) \cdot 100$$

où a = nombre d'individus de l'espèce dominante dans le milieu A ; b nombre d'individus de la même espèce dans le milieu B et N = nombre total d'individus recensés dans les deux milieux.

Ce rapport, à l'inverse du précédent est égal à 0 quand les deux milieux sont strictement identiques et à 100 quand ils sont entièrement différents. Les calculs effectués donnent les résultats suivants qui traduisent une très bonne similarité entre les trois faciès en fonction de cette espèce dominante.

$$I(F1 \cap F2) = 2,32 \quad I(F2 \cap F3) = 1,16 \quad I(F1 \cap F3) = 1,15$$

L'indice d'Odum Debauche (1958) tend à présenter les trois faciès comme étant des milieux identiques par rapport à l'espèce *Zornia glochidiata*, ce qui porte à croire que la contraction de la végétation n'est pas une réponse de dégradation du milieu ?

On a l'impression finalement qu'en se situant en F1 ou en F3, par rapport aux paramètres utilisés dans les calculs de ces trois indices, la plus grande contraction n'a pas d'effets sur le nombre d'espèces, et sur la réduction de leur diversité. En effet, les résultats obtenus par les calculs les rapprochent sensiblement.

2.3.3. Spectres biologiques des phytocénoses

Les données d'inventaires des ligneux et des herbacées dans leur ensemble permettent de relier chacune des espèces à son type biologique, pour ensuite reconstituer le spectre biologique par regroupement. Les spectres biologiques représentant un indice de la diversité biologique actuelle des trois faciès (**tab. 22**) traduisent pour l'ensemble une dominance des thérophytes qui se sont installés sur l'ensemble des plateaux. Les conditions écologiques et leurs aptitudes à boucler le cycle végétatif en quelques mois favorisent leur dissémination plus facilement dans cette région. Les phanérophytes qui sont des ligneux représentent le tiers (30% en moyenne), ce qui indique leur adaptation aux milieux. Il faut noter la présence des cryptophytes (environ 7%) qui sont plus exigeants, ce qui permet d'apprécier l'aptitude des milieux pour leur maintien.

Tab. 22 Spectre biologique des trois faciès (en %)

Type biologique	F1	F2	F3	% moyen pour les formations contractées de plateaux
Thérophytes (Th)	62	60	47	56
Phanérophytes (P)	26	28	37	30
nanophanérophytes (np)	(6)	(7)	(6)	(6)
microphanérophytes (mp)	(15)	(19)	(27)	(20)
mésophanérophytes (mP)	(5)	(2)	(6)	(4)
Chaméphytes (CH)	5	5	4	5
Hémicryptophytes (H)	2	1	3	2
Cryptophytes (Cr)	5	6	9	7
Géophytes rhisomateux (Gr)	(0,80)	(2)	(4)	(2)
Géophytes tuberculeux (Gt)	(0,00)	(0)	(0)	(0)
Géophytes bulbeux (Gb)	(1,61)	(2)	(2)	(2)
Hydrophytes stricts (Hs)	(2,41)	(1,65)	(2)	(2)
Hydrophytes facultatifs (Hf)	(2,41)	(1,65)	(1)	(1)

2.3.4. Origine des flores et mode de répartition des groupes taxinomiques

Au delà des considérations sur la structure du cadre physique, la structure démographique, et fonctionnelle des espèces végétales présentes dans les trois faciès, se pose la question de leur histoire pour comprendre la richesse et la diversité actuelles. La distribution géographique des espèces étant une caractéristique qui informe sur le caractère de la flore, en situant les constituants dans le contexte africain et mondial, cela permet de se faire une idée sur la genèse du milieu d'origine de cette flore. La question qu'il convient de poser à cette étape est de savoir si les taxa en présence, sont des collections d'espèces, réunies par le hasard de leur histoire, ou bien représentent-ils

véritablement des ensembles organisés, structurés selon des lois ou des règles de fonctionnement ? Les résultats sur la distribution géographique (**tab. 23**) des espèces sur le plan africain et mondial suscitent les commentaires suivants :

- sur le plan africain la flore qui domine ces trois faciès est caractéristique des régions soudano-zambézienne et guineo-congolaise (le cumul des spectres biologiques correspond à : F1 = 88%, F2 = 90% et F3 = 91%), ce qui confirme les hypothèses émises par Troupain (1966) sur l'appartenance de cette flore aux zones humides et forestières ;

- le deuxième fait marquant est que les suppositions sur l'appartenance de fait (de cette flore) à la zone saharo-sindienne ne se vérifient pas au vue de la faible proportion (9 à 12%) obtenue à l'échelle de cette région de l'ouest nigérien ;

- il se confirme enfin que la flore en présence, d'origine plus humide arrive encore à se maintenir dans ces milieux ;

- sur le plan mondial, même si les taxa africains dominent, les empreintes des taxa pantropicaux et paléotropicaux font rappeler que l'origine lointaine de cette flore et son appartenance commune aux zones tropicales d'Afrique, d'Asie de l'Australie et des Iles du pacifique se sont maintenues ;

- l'étude de la distribution et de l'origine de la flore se relie aux tendances décrites par les spectres biologiques des phytocénoses pour traduire l'adaptation marquée des taxa aux conditions écologiques actuelles de la zone.

Tab.23 Distribution géographique de la flore (en %)

	Distribution géographique de la flore	
	au plan africain	au plan mondial
Faciès de brousses structurées linéaires	GC SZ = 48%	A = 60%
	SZ = 40%	Pal = 16%
	GC SZ SS = 5%	Pant = 15%
	SZ SS = 5%	AS = 4%
	SS = 2%	Autres = 5%
Faciès de brousses à organisation mixte	GC SZ = 51%	A = 62%
	SZ = 39%	Pal = 14%
	GC SZ SS = 5%	Pant = 14%
	SZ SS = 4%	AS = 3%
	SS = 1%	Autres = 7%
Faciès de brousses à organisation diffuse	GC SZ = 49%	A = 74%
	SZ = 42%	Pal = 10%
	GC SZ SS = 4%	Pant = 9%
	SZ SS = 4%	AS = 3%
	SS = 1%	Autres = 4%

N.B : **A** : taxon africain ; **Pal** : taxon paléotropical commun à l'Afrique, l'Asie, l'Australie, les Iles du pacifique ; **Pant** : taxon pantropical rencontré sous les tropiques ; **As** : taxon africain et asiatique ; **Autres** : taxa rencontrés sur les autres parties du monde. **SS** : région Saharo-Sindienne qui couvre la partie nord du continent africain, allant du Sahara aux côtes sud méditerranéennes ; **SZ** : région Soudano-Zambézienne couvrant les domaines soudaniens et sahéliens de l'Afrique tropicale, l'Afrique de l'est et les grands lacs. Elle couvre aussi le nord de la Namibie et de l'Afrique du sud ; **GC** : région Guinéo-Congolaise qui couvre la frange sud-ouest du golfe de Guinée, de la Casamance au sud de la Côte d'Ivoire et du Ghana. Elle s'étale aussi du sud du Nigeria au sud du Cameroun, de la république Centrafricaine, du Zaïre, du Gabon et au nord de l'Angola.

2.4. Discussion des résultats

Dans cette deuxième partie du chapitre, nous avons étudié l'organisation de la végétation, les aspects démographiques et la flore dans les trois ensembles que définissent les peuplements ligneux

et herbacés. L'emploi des méthodes descriptives et analytiques permet de répondre à la question suivante : quels types de processus écologiques régissent la distribution des végétaux dans les trois faciès ?

L'analyse et l'interprétation des résultats d'inventaires floristiques échelonnés sur trois à quatre années permettent de voir que :

- la standardisation des densités de peuplements ligneux par hectare végétalisé donne un avantage aux faciès structurés linéaires (21 884 tiges/ha végétalisé) contre 15 659 dans le faciès à organisation végétale diffuse ;

- de l'ensemble des tiges présentes, les $\frac{3}{4}$ disposent d'un diamètre (\varnothing) à 1,30 m du sol ≤ 6 cm ;

- les données démographiques laissent présager des incidences favorables à la gestion forestière du faciès F1 (21% de l'ensemble des tiges sont exploitables) contre 15% en F2 et 13% seulement en F3. L'appréciation quantitative du bois-énergie disponible généralement faite par les forestiers, étant basée sur la grosseur des tiges, doit être à l'avenir nuancée et complétée par ces résultats ;

- les nombres de tiges par arbuste sont statistiquement différents d'un faciès à un autre : par exemple *Combretum micranthum* représente 65,91% du total des tiges et détermine la dominance physiologique du faciès F1 ; *Guiera senegalensis* représente 24,23% de l'ensemble des tiges et se répartit de façon relativement égale dans les trois faciès ; enfin *Combretum nigricans* avec 9,85% des tiges est surtout présent en F3, puis en F2. Ainsi CM et GS déterminent la physiologie du faciès F2, alors que le faciès F3 est marqué par les trois espèces ligneuses ;

- la morphologie de GS et CM semble identique, car les nombres de tiges par arbuste sont statistiquement non différents ;

- le recouvrement spécifique confirme la tendance de représentation des arbustes par faciès et corrobore la contribution de chacune des trois espèces dans la détermination de la physiologie des faciès ;

- la tendance régulière de la courbe d'évolution des effectifs ligneux en présence traduit une structure verticale équilibrée en F1, alors que cette structure verticale est très irrégulière et affectée par des prélèvements en F2 et F3 ;

- l'âge des ligneux déterminé par dendrochronologie permet de reconstituer la structure horizontale de ces peuplements. En F1, le gradient régulier d'âges décroissants de l'amont de la pente vers l'aval permet de mettre en évidence trois zones homogènes (zone pionnière, cœur du fourré et zone de sénescence). Ensuite les tendances des processus directionnels décrites par les âges suivent principalement une direction privilégiée qui est celle de la pente principale et des écoulements. En F3 on observe une série concentrique d'âges décroissants partant d'un semis aléatoire de noyaux vers la lisière du bosquet en passant par des zones concentriques intermédiaires (les processus directionnels décrits par les âges des ligneux mettent en évidence les trois zones homogènes de ces systèmes : noyau du bosquet, zone concentrique et lisière du bosquet). En F2, nous observons une structure horizontale hybride entre les deux premiers cas décrits ;

- la structure organisationnelle d'ensemble des trois ligneux serait en relation avec la structure du cadre physique (d'où la concordance de leur distribution à celle des croûtes d'érosion elles-mêmes reliées aux modèles d'agencement des pentes),

- à l'exemple des ligneux, les herbacées décrivent aussi trois zones homogènes (lisière, sous bois et zone ensoleillée) qui correspondent parfaitement aux zones décrites par les ligneux ;

- le mode de distribution des herbacées serait similaire pour une même zone homogène (quel que soit le faciès), ce qui du reste, a pour conséquence une distinction marquée entre les sous bois des zones ensoleillées qui diffèrent elles aussi des lisières ;

- une association de trois herbacées *Borreria scabra*, *Triumfetta pentandra* et *Digitaria horizontalis* constitue le groupe fonctionnel des sous-bois, alors que l'espèce *Microchloa indica* serait l'espèce dominante marquant les zones ensoleillées et les lisières ;

- deux herbacées : *Pennisetum pedicellatum* et *Brachiaria distichophylla* se joignent à *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans* et *Guiera senegalensis* pour déterminer le groupement végétal du faciès F3 ;

- *Panicum laetum* et *Combretum micranthum* constituent le groupement végétal du faciès F1 ;

- *Tripogon minimus*, *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis* forment le groupement végétal de F2 ;

- les effectifs des taxa en présence dénotent une richesse floristique plus marquée en F1 avec 256 espèces, contre 226 espèces en F3 ;

- le coefficient de Jaccard (K) calculé sur le nombre d'espèces ligneuses traduit des liens floristiques étroits entre les trois faciès, comparativement aux K calculés sur les effectifs herbacés ou sur la totalité des taxa. Par ailleurs, le K (ligneux) = 42% traduit un lien floristique très étroit entre F1 et F2 ;

- le quotient de similarité de Sorensen calculé en fonction des effectifs ligneux (QS = 45 à 50) indique une bonne similitude de la diversité des trois faciès, résultat qui a été corroboré par le calcul de l'indice d'Odum Debauche (variant de 1,15 à 2,32) dont l'interprétation assimile les trois faciès comme étant sensiblement identiques sur le plan de la diversité floristique. Les taxa en présence ne sont donc pas des collections d'espèces, réunies par les hasards de leurs histoires respectives. Ils représentent véritablement des ensembles organisés, structurés selon des lois ou de règles du fonctionnement passé et actuel des trois milieux ;

- l'étude des spectres biologiques et de l'origine de la flore recensée dans les trois faciès, indique une adaptation des espèces et l'aptitude des milieux au maintien de la diversité. Cette flore a pour origine les zones soudano-zambézienne et Guinéo-congolaise plus humides ;

- enfin, la distribution géographique, l'origine de la flore et les spectres biologiques se rejoignent pour traduire une adaptation marquée des taxa aux conditions écologiques actuelles de la zone.

Ces résultats d'analyse de la fréquence et de la structure des ligneux et herbacées se relient entre eux. Ils éclairent beaucoup de zones d'ombre et d'hypothèses émises qui sont restées sans validation. Ils permettent de compléter nos résultats de D.E.A. Il serait cependant nécessaire de poursuivre les efforts dans les inventaires de cette flore de plateaux pour qu'ils soient exhaustifs.

3 - Conclusion

Ce quatrième chapitre traite des premières conséquences qui résultent de l'efficacité d'utilisation des ressources hydriques par le milieu physique, pour moduler la répartition de la végétation dans les trois systèmes. Cette étude a insisté d'abord sur l'organisation végétale qui s'opère à l'intérieur des ensembles définis pour dégager les types de relations qui se développent.

Au demeurant, les peuplements ligneux et herbacés sont considérés comme des systèmes organisés présentant des structures interprétables en termes de relations entre les espèces (ligneuses et herbacées), mais aussi relations entre celles-ci et les autres facteurs des milieux. Les facteurs susceptibles d'intervenir dans l'organisation des peuplements sont supposés être les mêmes que ceux qu'on pourrait évoquer dans la détermination de leur diversité.

Une logique d'ensemble s'est dégagée à travers les étapes suivantes :

La reconnaissance des faciès et des unités structurales est possible grâce à des analyses de données issues d'images aériennes. De plus, au moyen d'une exploration rapide et d'un inventaire simple, il est possible de représenter graphiquement une matrice de données (de présence et d'absence de la végétation) qui permet une reconnaissance facile au sol des trois structures.

Des paramètres comme la largeur des périodes et le RIBB caractérisant la structure des faciès et l'indice de diversité zonale de Simpson représentent des critères satisfaisants de reconnaissance des unités structurales et des faciès qui concordent bien avec les modèles de correspondance des pentes.

La largeur des bandes et le RIBB constituant des paramètres invariants dans les unités fonctionnelles de chacun des trois faciès constituent des paramètres pertinents (attributs vitaux) de caractérisation des faciès.

L'interprétation des résultats du premier paragraphe tend à les relier parfaitement et présente les trois systèmes comme un réseau de relations et d'implications dont les conséquences et les répercussions directes ont été analysées dans le second paragraphe.

Résultant des processus décrits dessus, la structure démographique et la distribution des espèces se font selon des règles bien précises que renforce l'étude de la flore en présence, pour présenter les espèces et les trois faciès comme étant adaptés pour conserver la diversité biologique.

Les densités de peuplements ligneux par hectare végétalisé sont plus importantes dans les structures végétales linéaires comparativement au faciès de brousse diffuse.

De l'analyse de la structure des tiges ligneuses, il ressort que les $\frac{3}{4}$ sont de faible diamètre (\varnothing à $1,30\text{ m} < 6\text{ cm}$). Les effectifs de tiges exploitables (de diamètre à $1,30\text{ m}$ du sol $\geq 6\text{ cm}$) ont une incidence plus favorable en terme de gestion forestière dans le faciès F1 (21% de l'ensemble des tiges sont exploitables) contre 15% en F2 et 13% seulement en F3.

Les nombres de tiges par arbuste étant significativement différents d'un faciès à un autre, cela a pour conséquence une fréquence et un recouvrement qui diffèrent par espèce et par faciès. Il résulte une dominance phytosociologique des formations contractées dans leur ensemble par CM qui représente 65,91% du total des tiges. Par faciès, la dominance phytosociologique du F1 est marquée par CM, celle du F2 par le couple CM et GS, et celle du F3 par l'association des trois espèces ligneuses dominantes.

La courbe de régression des classes de hauteur des ligneux dominants traduit une structure verticale équilibrée en F1 contre une structure verticale très hétérogène et perturbée par les prélèvements en F2 et F3. La structure horizontale des peuplements mise en évidence par l'analyse des âges des ligneux permet de définir trois zones homogènes que l'analyse des fréquences et l'utilisation du milieu par les herbacées confirment également.

La structure organisationnelle d'ensemble des ligneux et herbacées est en relation avec la structure du cadre physique. Il résulte une concordance de distribution de la végétation à celle des croûtes d'érosion elles-mêmes reliées aux modèles d'agencement des pentes.

Le mode de distribution des herbacées similaire pour une zone homogène (quel que soit le faciès) a pour conséquence une distinction marquée entre les trois zones homogènes. Il résulte des groupes fonctionnels déterminés :

- par une association de trois herbacées *Borreria scabra*, *Triumfetta pentandra* et *Digitaria horizontalis* dans les sous-bois,
- par l'espèce *Microchloa indica* dont la dominance détermine le fonctionnement des zones ensoleillées et des lisières.

Par rapport aux groupements végétaux des faciès : deux herbacées *Pennisetum pedicellatum* et *Brachiaria distichophylla* se joignent à *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans* et *Guiera senegalensis* pour déterminer le groupement du faciès F3 ; *Panicum laetum* et *Combretum micranthum* composent le groupement du faciès F1 ; *Tripogon minimus*, *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis* forment celui de F2.

Les liens floristiques marqués entre les taxa des trois faciès et la bonne similitude de la diversité des trois milieux tendent à confirmer que ces systèmes sont sensiblement identiques sur le plan de la diversité floristique. Enfin, l'étude des spectres biologiques et de la flore recensée dans les trois faciès, traduit la bonne adaptation des espèces et l'aptitude des milieux au maintien de la diversité en fonction des conditions écologiques actuelles de la zone.

CHAPITRE V CONSEQUENCES SUR LE FONCTIONNEMENT, LA DYNAMIQUE ET LA PRODUCTIVITE DES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES

On entend par bon fonctionnement :

- une efficacité bioénergétique des productions utilisables,*
- une efficacité des systèmes de recyclage organique et minéral,*
- une efficacité de l'utilisation de l'eau,*
- une économie pour les intrants d'origine allochtone,*
- un maximum d'auto-régulation..., mais aussi qualité des produits récoltables.*

(Long, 1985)

CHAPITRE V : CONSEQUENCES SUR LE FONCTIONNEMENT, LA DYNAMIQUE ET LA PRODUCTIVITE DES TROIS SYSTEMES ECOLOGIQUES

1 - Répercussions dynamiques directes du fonctionnement hydrologique de surface

1.1. Résultats sur les effets de la dynamique du contrôle du flux hydrique de surface

1.1.1. Indice d'efficacité pluviale (IEP) relatif aux trois systèmes

Cet indice a été utilisé par de nombreux auteurs pour caractériser la dynamique des systèmes arides et semi-arides en raison de son emploi simple et de son caractère synthétique. Le Houérou (1984) indique après l'étude de 1500 paires de données en provenance de nombreuses zones arides du monde que l'IEP dépend avant tout de l'état dynamique de la végétation et de celui de la surface du sol, les deux étant liés. Contre toute attente, cet auteur indique aussi que l'IEP dépend finalement relativement peu du climat, des régimes pluviométriques, de la qualité et de la distribution saisonnière des pluies. Relativement stable en zone aride, quel que soit le climat, cet indice d'Efficacité Pluviale (IEP) est représenté par le rapport du nombre de kg de matière sèche produite par hectare et par an divisé par la pluviométrie moyenne annuelle exprimée en mm :

IEP = kg MS ha⁻¹ an⁻¹ / P (mm) où MS = matière sèche produite en kg par ha et par an et P = pluviométrie moyenne annuelle exprimée en mm.

Outil efficace qui peut s'utiliser dans ce cadre, son calcul nécessite les données suivantes :

- les productivités de phytomasse ligneuse aérienne sur pied (**cf. Ch.V, 3 : 3.1.1.1**) ramenées à l'année représentent respectivement : 1038 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (F1 = structures linéaires) ; 1151 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (F2 = organisations végétales mixtes) et 969 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (F3 = organisations végétales diffuses) ;
- les productivités annuelles moyennes de phytomasse herbacée (**cf. Ch.V, 3 : 3.2.1.1**) entre 1997 et 1999 des trois faciès sont de 1918 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (en F1), 1105 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (en F2) et de 1946 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ (en F3) ;
- les pluviométries réelles annuelles moyennes s'élèvent pour la période considérée à 378 mm (sites échantillonné pour F1), 539 mm (sites d'inventaire en F2) et 687 mm pour les sites des mesures en F3 ;
- en cumulant les productivités de phytomasses herbacée et ligneuse, celles-ci représentent 2957 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ en F1, 2255 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ en F2 et 2915 kg de MS ha⁻¹ an⁻¹ en F3 ;
- enfin en couplant des données de pluviométrie et de productivité annuelle totale (n = 126) les calculs donnent respectivement un IEP de 7,8 kg MS ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹ pour les brousses linéaires, de 4,2 kg MS ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹ pour les structures à organisation mixte et de 4,2 kg MS ha⁻¹ an⁻¹ mm⁻¹ pour les organisations végétales diffuses.

En référence à Le Houérou (1984), les végétations en état dynamique médiocre présentent un IEP de 1 à 3, celles en état moyen de 3 à 6 et celles en bon état de 6 à 12. Les chiffres obtenus montrent que les faciès de brousses linéaires sont en bon état dynamique. En revanche, il faut être prudent sur la validité des IEP établis pour les structures mixtes et diffuses, en raison de leurs isohyètes qui sont légèrement en dehors de l'intervalle de validité des calculs (50 à 500 mm). Mais comme l'IEP tend à diminuer avec la pluviométrie et pour des états dynamiques comparables, ces IEP indiquent que les faciès peu ou pas structurés disposent quand même d'une dynamique en état moyen.

1.1.2. Croissance comparée des ligneux

Comme les résultats obtenus le confirment, en faisant abstraction des facteurs anthropiques, la phytomasse semble ne pas dépendre seulement du régime des pluies en zone semi-aride, mais aussi du rôle joué par la nature du sol (géomorphologie et topographie). Pendant six ans (1994 à 1999), l'accroissement courant d'une population de 450 tiges des trois espèces ligneuses a été mesuré (voir description et schémas des dispositifs dans la partie méthode) dans les trois faciès à raison de 150 tiges par faciès, soit 50 tiges distribuées de façon aléatoire pour chacune des trois modalités : suppression radicale du bénéfice du supplément d'eau de ruissellement (dispositif type Seghieri : ds) ; suppression partielle du bénéfice du supplément d'eau de ruissellement (dispositif type Ichaou : di) ; et les témoins : te.

La mesure de l'accroissement a porté sur le paramètre dendrométrique le moins influencé par l'action de l'homme qu'est la surface terrière (ramenée à l'hectare végétalisé pour permettre une comparaison sur des bases plus justes). Elle permet de mettre en évidence l'impact du supplément d'eau de ruissellement sur la croissance des ligneux (**Fig. 33**) :

- dans le dispositif témoin des trois faciès, l'accroissement courant cumulé est significativement différent entre les faciès ($P = 0,001$). Il est de loin plus favorable en F1, puis en F2 et se réduit sensiblement en F3 ;

- l'évolution relativement normale de l'accroissement cumulé de manière sensiblement homogène entre les trois dispositifs installés en F3 montre que les dispositifs de type "Seghieri" et "Ichaou" n'ont pas d'effet néfaste significatif sur la croissance des ligneux. Ainsi, l'utilisation de l'un ou de l'autre mode de piégeage des eaux de ruissellement dans ce système, semble avoir peu d'effet négatif sur cette croissance qui dépend essentiellement de la pluviométrie normale tombée. Cela confirme nos résultats relatifs à l'efficacité de captage du supplément d'eau de 9% seulement par ce système ;

- en revanche dans les systèmes structurés linéaires et mixtes, l'impact négatif des deux dispositifs ("ds" et "di") est hautement significatif sur la croissance des ligneux. Cet impact est plus marqué dans le dispositif type "Seghieri". Le piégeage du supplément de l'eau de ruissellement représente donc un danger réel sur la dynamique des ligneux situés en aval. Ce résultat prouve que le captage du supplément d'eau de ruissellement dans les structures linéaires et mixtes est nécessaire pour le fonctionnement de ces deux systèmes.

1.1.3. Surface colonisée par les herbacées en amont des dispositifs

En dehors de l'effet principal des trois dispositifs expérimentaux sur la croissance des ligneux, des observations générales sur l'installation de la couverture herbacée ont été faites au terme des six ans d'observation :

- en F1, une bande de couverture herbacée d'environ 2,5 m de large s'est installée en amont du muret (ds), alors que 80% des ouvrages de piégeage de l'eau (di) portent sur leurs bourrelets ou dans leurs surfaces décapées, des plantes herbacées résultant de la présence des alluvions et colluvions déposées. La parcelle délimitée comme témoin dans ce faciès ne présente pas d'effet visible de colonisation herbacée ni dans la partie nue ni dans celle qui est végétalisée.

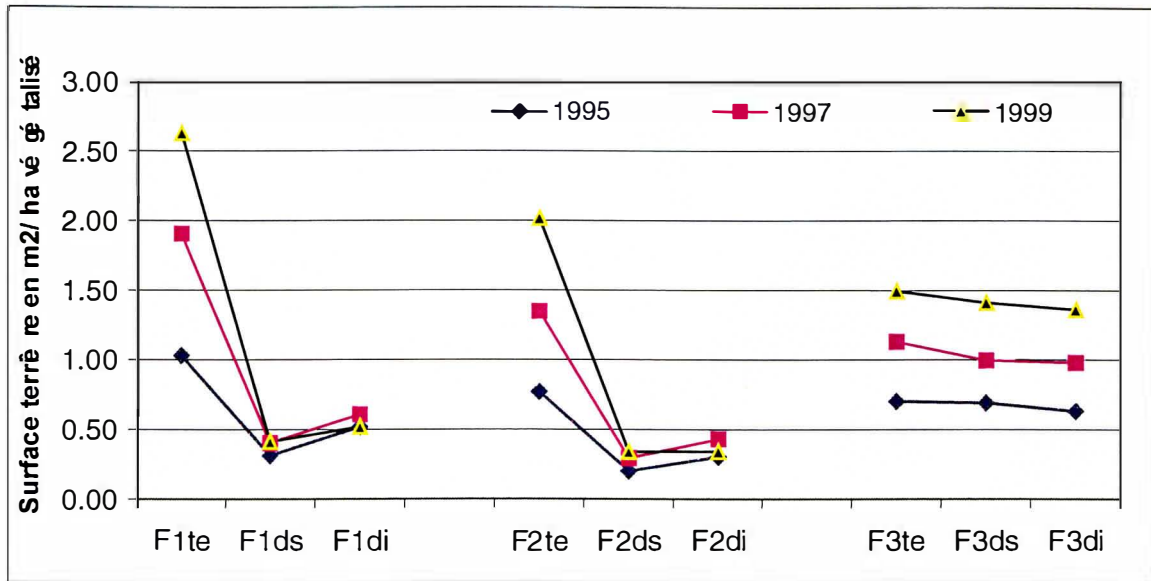


Fig.33 : Suivi de l'accroissement courant cumulé en six ans en fonction des dispositifs

Légende : **te** = témoin dans un faciès de brousse linéaire, **ds** : dispositif du type Seghieri implanté dans un faciès de brousse mixte et **di** = dispositif du type Ichaou dans un faciès de brousse diffuse.

- en F2, l'effet dominant du "ds" est une modification dans le sens du ruissellement, ce qui occasionne une colonisation quasiment continue par les herbacées. Cette colonisation est régulière dans la frange herbacée non perturbée du témoin. Quant au "di", il a eu pour conséquence une colonisation herbacée semi-continue en raison de la structure du dispositif lui même ;

- en F3, le "ds" tend à créer un point de collecte des eaux déviées qui est colonisé par *Tripogon minimus* et d'autres hydrophytes stricts ou facultatifs. Le "di" quant-à lui tend à créer une situation analogue à celle de F1 en colonisant l'ensemble des bourrelets et des surfaces de captage de l'eau. Le témoin n'a pas présenté de situation particulière visible. A ce titre, le piégeage de l'eau de ruissellement par quelque procédé que ce soit, loin de perturber ce système le favorise au contraire en installant une couverture végétale herbeuse (due au piégeage des graines) qui à la longue permettra l'installation des ligneux.

1.1.4. Observations phénologiques comparées entre les trois dispositifs

450 tiges ont fait l'objet d'observations phénologiques en fonction de leur état physiologique dans les trois dispositifs. Les résultats de six ans de comptages effectués tous les deux ans, sont présentés dans chacun des cas (**tab. 24 : a, b et c**). Il se dégage les tendances suivantes dans les **fig. 34 (a, b et c)**.

Tab.24(a) Suivi de la vigueur des ligneux dans les dispositifs témoins

Définition des états	% des tiges répartis selon leurs états par faciès											
	F1				F2				F3			
	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999
Très vigoureux (tv)	50	54	53	52	58	54	54	53	60	61	62	63
Vigoureux (v)	30	25	24	20	32	30	25	27	30	28	27	25
Chétif (ch)	6	6	8	10	7	12	15	15	9	10	9	10
Mort ou sénéscent (ms)	14	15	15	18	3	4	6	5	1	1	2	2

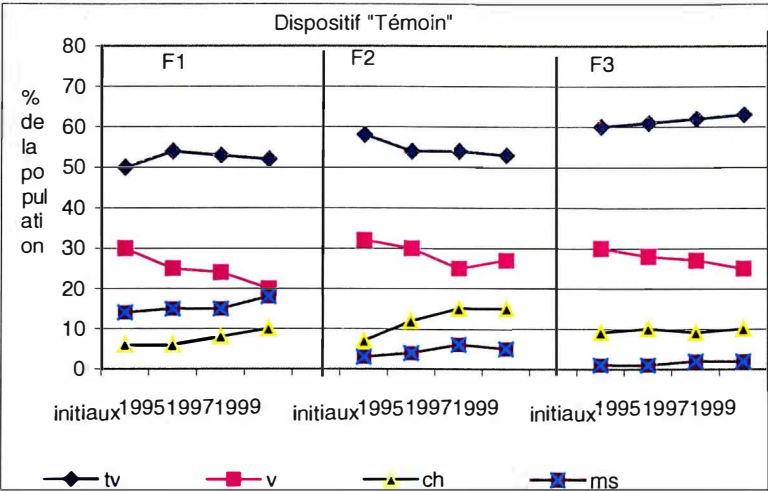


Fig. 34 (a) Evolution de l'état physiologique des ligneux dans les témoins

Indications données par le dispositif témoin

Il faut d'abord mentionner les appréciations relatives aux dispositifs témoins, car ces derniers représentent le modèle de fonctionnement biologique et hydrique dans les conditions naturelles des trois systèmes. Selon les trois faciès, on observe :

- en F1, une situation d'équilibre marquée par une stabilité du pourcentage des tiges très vigoureuses qui dominent, une légère baisse des tiges vigoureuses qui tendent à devenir chétives qui elles mêmes finissent par atteindre le groupe de celles qui sont sénescentes ;
- en F2, la même situation se présente avec cependant une proportion plus faible des tiges mortes et sénescents ;
- en F3, l'évolution des quatre types d'état de tiges est régulée de façon homogène.

Tab.24 (b) Suivi de la vigueur des ligneux (dispositif type "Seghieri")

Définition des états	% des tiges répartis selon leurs états par faciès											
	F1				F2				F3			
	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999
Très vigoureux (tv)	51	44	36	21	52	51	46	27	56	55	50	49
Vigoureux (v)	37	43	33	36	36	32	35	37	40	40	45	44
Chétif (ch)	8	9	23	29	10	13	15	28	2	3	3	4
Mort ou sénescents (ms)	4	4	8	14	2	4	4	8	2	2	2	3

Impact du dispositif "type Seghieri"

- le dispositif type "Seghieri", en supprimant le supplément d'eau de ruissellement (qui n'atteint pas la bande boisée) a un effet global négatif sur la phénologie des ligneux dans les faciès F1 et F2 ;
- on remarque dans ces deux faciès une dépréciation très marquée de l'état des tiges très vigoureuses, un accroissement marqué du nombre des tiges chétives et une augmentation sensible du nombre de tiges sénescents ;
- dans le faciès F3 où l'efficacité de récolte du supplément d'eau est relativement faible, la suppression de cet apport semble avoir très peu d'effets sur le comportement physiologique des ligneux. Les tiges très vigoureuses et celles qui sont vigoureuses restent stables les deux premières années, elles baissent ensuite légèrement après et se stabilisent à nouveau. Aussi, les tiges chétives et sénescents, déjà en nombre réduit en 1994 (temps T0) restent relativement stables en pourcentage et semblent plutôt dépendantes des conditions naturelles du milieu que des effets induits par ce dispositif.

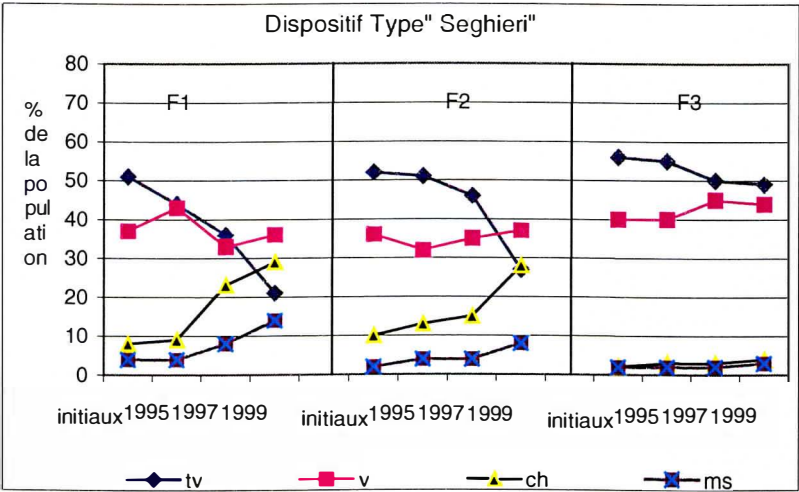


Fig. 34 (b) Evolution de l'état physiologique des ligneux sous l'influence du ds

Tab.24 (c) Suivi de la vigueur des ligneux (dispositif "type lchaou")

Définition des états	% des tiges réparties selon leurs états par faciès											
	F1				F2				F3			
	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999	initiaux	1995	1997	1999
Très vigoureux (tv)	50	47	39	23	57	51	35	29	60	55	52	51
Vigoureux (v)	30	43	30	36	27	22	35	37	30	32	33	34
Chétif (ch)	12	12	20	26	14	23	24	28	9	10	10	10
Mort ou sénescant (ms)	8	8	11	15	2	4	6	6	1	3	5	5

Impact du dispositif "type lchaou"

- ce dispositif présente des tendances identiques à celles du cas précédent, mais il faut nuancer l'intensité moins marquée en raison du contrôle horizontal du flux en surface qui est moins efficace que dans le cas précédent. Les ouvrages, quoique disposés en quinconce ne captent pas toute l'eau de ruissellement (cas de fortes pluies où il peut y avoir un trop plein ou cas de mauvaise orientation des ouvrages qui captent faiblement le ruissellement) ;
- en F1 et F2, s'observe le même type de comportement que dans le "ds" (les pourcentages des tiges très vigoureuses baissent au profit des tiges chétives et sénescantes). En F3, la mise en place de ce dispositif est sans incidence sur la phénologie des espèces ligneuses.

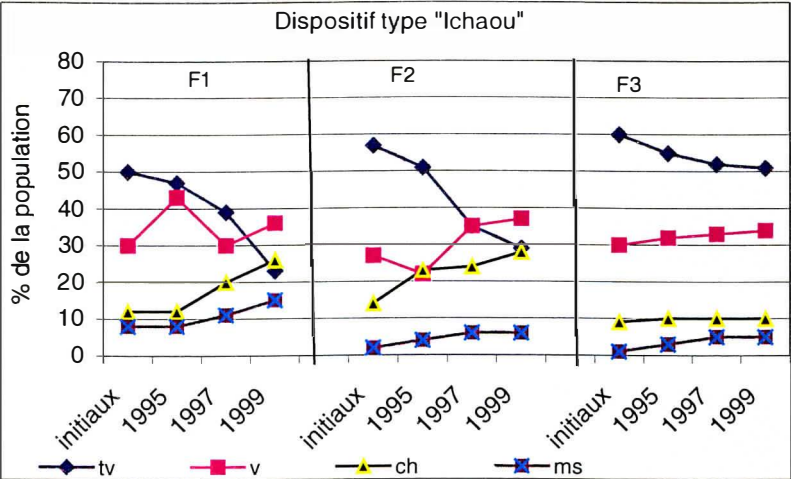


Fig.34 (c) Evolution de l'état physiologique des ligneux sous l'influence du di

1.2. Discussion des résultats

Le fonctionnement hydrologique, se traduit directement par l'efficacité du contrôle de ruissellement et représente l'une des bases fondamentales permettant de comprendre la dynamique des systèmes forestiers contractés. Pour tirer ses conséquences sur la dynamique des trois systèmes, il est adopté dans un premier temps une méthodologie graduelle dont les résultats sont :

- un IEP de $7,8 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ dans les brousses structurées linéaires, qui correspond à des conditions d'équilibre permettant une utilisation rationnelle du flux hydrologique de surface. Il résulte des incidences positives claires sur la dynamique d'ensemble de ce système. Quelques constations permettent de soutenir la thèse d'un fonctionnement très efficace en F1 :

- + l'accroissement courant cumulé de la surface terrière par ha végétalisée pendant les six ans de cette étude est de loin plus important que dans les deux autres faciès ;

- + la suppression de l'apport supplémentaire d'eau de ruissellement dans les dispositifs du "type Seghieri" et "Ichaou" a un impact négatif significatif sur la croissance des ligneux dans ce système ;

- + ce faciès est si bien auto-régulé que son fonctionnement réagit à la mise en place des deux types de dispositifs (de suppression partielle et totale de l'apport d'eau par l'impluvium), en enclenchant une dynamique importante de colonisation herbacée en amont des ouvrages de piégeage du ruissellement ;

- + les observations phénologiques sur les tiges "privées" de l'apport du ruissellement laissent présager le danger réel que pourrait causer une manipulation sans discernement de ce système. Les tiges très vigoureuses diminuent sensiblement au profit de celles qui sont chétives et sénescents qui elles, augmentent au-delà du nombre observé dans les témoins ;

- en revanche, les organisations végétales diffuses (F3) avec un IEP moyen de $4,2 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ sont des systèmes dont l'équilibre paraît plus faible qu'en F1. Les conditions pluviométriques réelles permettant l'installation d'une couverture végétale plus ou moins homogène, déterminent principalement le fonctionnement hydrologique et la dynamique :

- + en effet l'accroissement courant cumulé de la surface terrière par ha végétalisée pendant les six années d'étude, relativement faible, est sensiblement le même dans les témoins et les deux dispositifs ;

- + l'évolution normale et homogène de l'état des tiges ligneuses suivies dans ces dispositifs confirme encore que ces dispositifs sont sans effet significatif sur la dynamique de ce système. D'ailleurs, ces dispositifs de piégeage des eaux de ruissellement représentent des procédés mécaniques qui empêchent la perte des eaux ruisselantes (dans la vallée) et occasionnent l'installation d'une couverture biologique (qui commence par les herbacées) ;

- enfin, le faciès F2 est un faciès de transition entre les deux premiers systèmes, qui se comporte de façon similaire avec F1 (effets ressentis des "ds" et "di", accroissement courant cumulé, colonisation herbacée et autres effets du "ds", baisse des pourcentages de tiges très vigoureuses et augmentation des tiges chétives ou sénescents). Dans d'autres cas F2 se comporte comme F3 (IEP = $4,2 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).

L'approche méthodologique graduelle qui a permis de comprendre globalement les répercussions directes du fonctionnement hydrologique fait porter un regard nouveau sur ces formes

de contraction de la végétation. Les résultats obtenus permettent une meilleure compréhension du fonctionnement biologique et de la dynamique de chacun des systèmes qui seront développés dans les quatre prochains paragraphes. Ces résultats corroborent aussi les hypothèses de Le Houérou (1987) qui pense que l'instabilité phytodynamique qu'on attribue aux formes de contraction végétale doit être nuancée. La mise en évidence par l'étude expérimentale du contrôle de la dynamique du flux hydrologique en surface (à travers l'IEP, les accroissements et la colonisation herbacée) montre que le fonctionnement de ces écosystèmes dépend davantage de la topographie, de l'état dynamique des systèmes que de la pluviométrie elle-même.

2.- Capacité de régulation et de régénération des systèmes en rapport avec le fonctionnement hydrologique et la biologie des espèces

2.1. Résultats relatifs à la dynamique des peuplements et des espèces ligneuses

2.1.1. Réponses des systèmes en rapport avec leur fonctionnement biologique

2.1.1.1. Régénération ligneuse après coupe rase et coupe par furetage

2.1.1.1.1. Croissance des souches après exploitation

Le suivi de la croissance des trois espèces (*Guiera s.*, *Combretum m.* et *Combretum n.*) a porté dans un premier temps sur la hauteur des rejets de souches et a duré six ans. Les résultats obtenus concernent deux modes d'exploitation : une coupe rase intervenue en début de saison végétative (six parcelles de 1000 m² chacune par faciès) et exploitation par furetage en avril - mai (18 parcelles de même surface par faciès). Les hauteurs de coupe sont 20 cm du sol.

L'analyse des données de la classe de hauteur dominante en effectifs (2 à 3 m) permet de montrer deux tendances générales (tab. 25 : a et b et fig. 35 : a, b et c) :

- les pourcentages de rejets des classes d'amplitude de hauteur (3-4m ; 4-5m ; 5-6 m) montrent que la vitesse de croissance en hauteur des rejets¹ est plus favorable dans le dispositif "exploitation par furetage" que dans celui exploité par coupe rase ;
- la performance de croissance en hauteur des tiges de la classe d'amplitude numériquement dominante (2-3m) est d'une part plus favorable pour F1 (quel que soit le mode d'exploitation), et d'autre part nettement plus caractéristique dans le cas de la coupe par furetage.

Tab. 25 (a) Croissance en hauteur des rejets (six ans après une exploitation par furetage)

Nombre de parcelles échantillonnées (1000 m2)	Type de faciès	Répartition des % de tiges dans les classes de hauteur (m)					
		0-1 m	1-2 m	2-3 m	3-4 m	4-5 m	5-6 m
18	F1	1	10	53	17	10	9
18	F2	10	27	43	11	6	3
18	F3	8	33	39	10	4	6

Tab. 25 (b) Croissance en hauteur de rejets (six ans après une coupe rase)

Nombre de parcelles échantillonnées (1000 m2)	Type de faciès	Répartition des % de tiges dans les classes de hauteur (m)					
		0-1m	1-2m	2-3m	3-4m	4-5m	5-6m
6	F1	4	38	38	13	6	1
6	F2	16	36	34	8	3	3
6	F3	22	35	29	10	4	0

¹ Jusqu'en 1995, peu d'observations et d'articles distinguaient les rejets de souche des rejets de racines (drageons). On entrevoit mieux aujourd'hui l'importance des drageons et des marcottes (Bellefontaine, 1998b et Bellefontaine et al. 1999 et 2000)

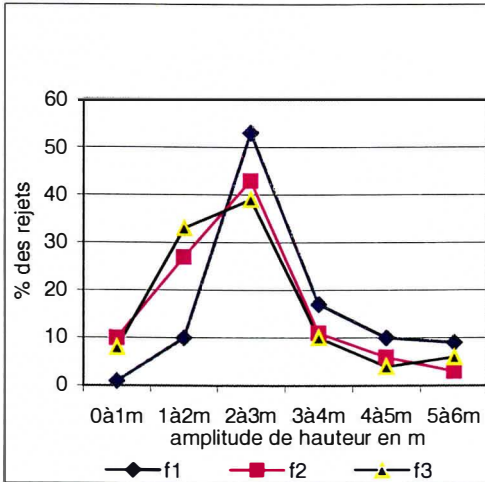


Fig. 31 (a) Croissance en hauteur des rejets
(six ans après l'exploitation par furetage)

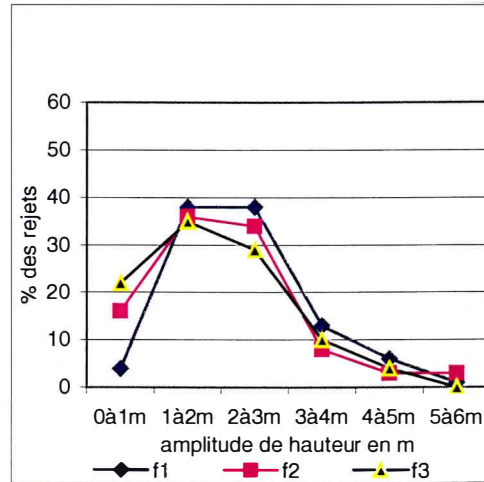


Fig. 31 (b) Croissance en hauteur des rejets
souches (six ans après coupe rase)

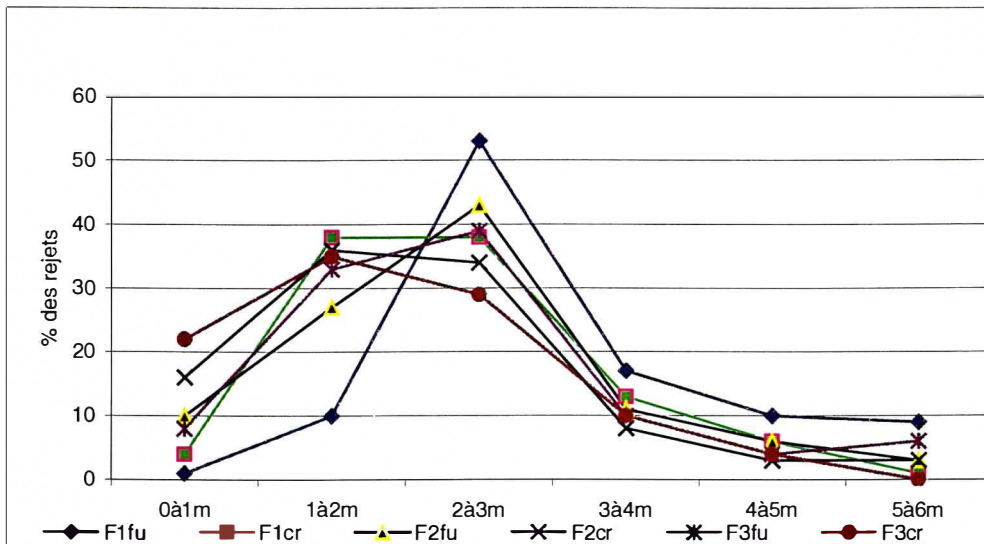


Fig. 35 (c) Effets coupe rase et exploitation par furetage sur la croissance en hauteur des rejets

L'évolution de la croissance en diamètre des rejets des trois espèces a quant à elle été suivie pendant 10 ans à travers des parcelles exploitées par furetage (dans le cadre des marchés ruraux de vente de bois énergie). En effet, en dehors du fait que la coupe rase offre des tendances d'aptitude de croissance plus faible en hauteur, l'évolution de la croissance en diamètre doit être suivie avec plus de minutie vu son importance en terme de dynamique forestière et de gestion sylvo-pastorale.

L'analyse des **fig. 36 (a, b et c)** découlant des résultats (**tab. 26 : a b et c**), permet de comprendre les tendances de cette évolution d'une part et la liaison qui existe entre la croissance observée des rejets de souche et le diamètre initial coupé au préalable, d'autre part.

Tab.26 (a) Relation entre le diamètre de la souche coupée et la croissance diamétrique des rejets de souche dans le faciès F1 (marché rural de Dorobobo)

Séquence fonctionnelle (4 bandes nues et boisées) sondées	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Classes de Ø initial des souches coupées	% des effectifs de rejets par classes d’amplitude de croissance en diamètre (10 ans après)					
				1-3 cm	3-5 cm	5-7 cm	7-9 cm	9-11cm	≥11 cm
2	9	112	2 à 4 cm	32	42	11	8	4	4
		83	4 à 8 cm	17	23	30	17	10	4
		27	8 à 14 cm	11	19	33	22	11	4
		13	≥ 14 cm	23	23	23	15	8	8
Nombre total de tiges suivies		235							

Tab.26 (b) Relation entre le diamètre de la souche coupée et la croissance diamétrique des rejets de souche dans le faciès F2 (marché rural de Gombéwa)

Séquence fonctionnelle (4 bandes nues et boisées) sondées	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Classes de Ø initial des souches coupées	% des effectifs de rejets par classes d'amplitude de croissance en diamètre (10 ans après)					
				1-3 cm	3-5 cm	5-7 cm	7-9 cm	9-11cm	≥11 cm
2	9	201	2 à 4 cm	64	17	8	5	4	2
		116	4 à 8 cm	27	33	18	10	8	4
		66	8 à 14 cm	23	27	21	14	9	6
		23	≥ 14 cm	30	30	17	13	4	4
Nombre total de tiges suivies		406							

Tab.26 (c) Relation entre le diamètre de la souche coupée et la croissance diamétrique des rejets de souche dans le faciès F3 (marché rural de Fayra)

Séquence fonctionnelle (4 bandes nues et boisées) sondées	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Classes de Ø initial des souches coupées	% des effectifs de rejets par classes d'amplitude de croissance en diamètre (10 ans après)					
				1-3 cm	3-5 cm	5-7 cm	7-9 cm	9-11cm	≥11 cm
3	9	145	2 à 4 cm	32	42	11	7	4	4
		94	4 à 8 cm	27	32	23	12	4	2
		50	8 à 14 cm	22	32	22	16	6	2
		25	≥ 14 cm	32	36	20	8	0	4
Nombre total de tiges suivies		314							

Les données consignées dans ces trois tableaux et les figures ci-dessous montrent que :

- l'importance des tiges ayant atteint le diamètre commercialisable (5 cm) indique un niveau de croissance en diamètre des rejets de souche sensiblement identique entre F1 et F2. Cette croissance est plus réduite en F3 ;
- quel que soit le faciès considéré, les souches ayant un diamètre initial de 8 à 14 cm ont donné la meilleure croissance en diamètre (comme le justifient les pourcentages d'effectifs des quatre classes d'amplitude de diamètres supérieurs) ; elles sont suivies respectivement par celles de diamètre initial 4 à 8 cm et ≥ 14 cm ;

- les souches de diamètre initial de 2 à 4 cm ont donné dans l'ensemble les croissances en diamètre les plus faibles.

Ces résultats obtenus après dix ans d'observation sont des indications précieuses pour la gestion forestière. Ils tendent à déterminer le diamètre optimum d'exploitabilité entre 8 à 14 cm en fonction de la bonne régénération enregistrée dans ces systèmes. Notons par ailleurs que d'une part dans les structures des marchés ruraux, l'ensemble des villageois est impliqué dans la gestion, ce qui réduit les coupes illégales, et que l'influence néfaste des troupeaux n'est pas significative dans ces parcelles selon Peltier (1994) et Peltier *et al.*(1994).

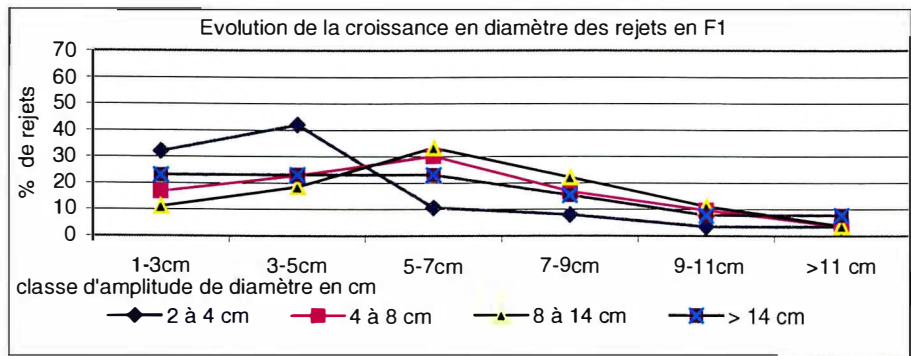


Fig. 36 (a) Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F1)

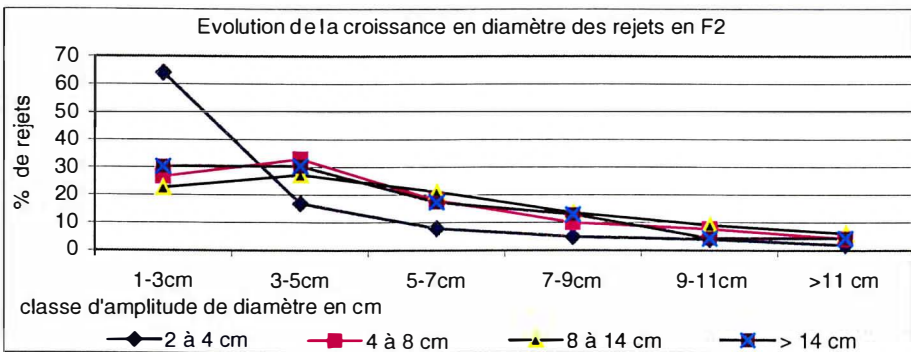


Fig. 36 (b) Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F2)

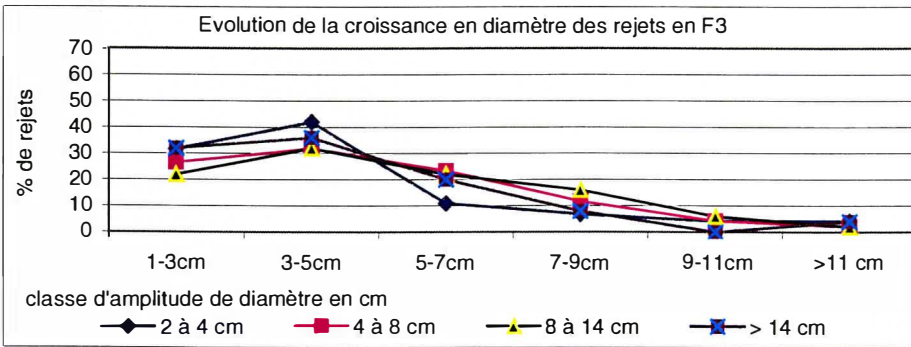


Fig. 36 (c) Effets du diamètre initial de la souche sur la croissance en diamètre des rejets (en F3)

2.1.1.1.2. Relation entre la hauteur de coupe et la croissance des rejets de souches

La première analyse des résultats de croissance des rejets suivis dans les deux dispositifs d'exploitation indique une meilleure aptitude de renouvellement pour le dispositif "exploitation par

furetage”, comparativement à la coupe rase. La seconde analyse donne des détails précis sur la croissance en diamètre après cette exploitation par furetage qui intervient en Avril - Mai.

Il convenait de poursuivre les investigations pour connaître pour chaque espèce (économiquement importante) quelle serait la meilleure hauteur de coupe qui favoriserait non seulement la performance de croissance en hauteur, mais aussi la croissance en diamètre des rejets de souches. Dix ans de mesure et de suivi de parcelles des marchés ruraux de bois énergie rendent compte des effets de trois niveaux de coupe (actuellement adoptés au Niger) sur la croissance en diamètre des rejets de souche.

L'analyse des résultats figurant aux **tab. 27 (a, b et c)** et des tendances que décrivent les **fig. 37 (a, b, et c)** permet de constater que pour des coupes intervenant juste avant la saison hivernale :

- quel que soit le faciès considéré, les effectifs de rejets ayant atteint le diamètre commercialisable (5cm) sont nettement plus importants pour le niveau de coupe < 20 cm. Le niveau de coupe à 20 cm du sol présente aussi des effets appréciables certes, mais plus faibles que le niveau précédent ;
- le niveau de coupe > 20 cm du sol semble compromettre une bonne croissance en diamètre des rejets des trois ligneux étudiés.

Par ailleurs, ce suivi de coupes pratiquées par les marchés ruraux indique en gros que la croissance en diamètre engendrée sous l'effet du facteur niveau de coupe (abstraction de l'époque) semble nettement meilleure en F1, puis F2 et F3.

Tab.27 (a) Impact de la hauteur de coupe sur la croissance en diamètre des rejets de souche (faciès F1 : marché rural de Dorobobo)

Séquences fonctionnelles sondées (n = 8 zones nues et boisées)	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Hauteur de coupe adoptée par les marchés ruraux	% des effectifs de rejets par classes d'amplitude de croissance en diamètre (après 10 ans)					
				1-3 cm	3-5 cm	5-7 cm	7-9 cm	9-11cm	≥11 cm
2	9	98	20 cm du sol	19,4	27,4	28,6	8,2	8,2	8,2
		101	<20 cm du sol	26,7	18,8	26,7	7,9	10,9	8,9
		36	>20 cm du sol	41,7	25,0	22,2	2,8	5,6	2,8
Nombre total de tiges suivies		235							

Tab.27 (b) Impact de la hauteur de coupe sur la croissance en diamètre des rejets de souche (faciès F2 : marché rural de Gombéwa)

Séquences fonctionnelles (8 bandes nues et boisées) sondées	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Hauteur de coupe adoptée par les marchés ruraux	% des effectifs de rejets par classes d'amplitude de croissance en diamètre(après 10 ans)					
				1-3 cm	3-5 cm	5-7 cm	7-9 cm	9-11cm	≥11 cm
2	9	201	20 cm du sol	28,9	23,9	26,9	7,9	6,5	5,9
		137	<20 cm du sol	24,0	21,9	29,9	10,9	5,8	7,3
		68	>20 cm du sol	35,3	41,2	14,7	4,4	2,9	1,5
Nombre total de tiges suivies		406							

Tab.27 (c) Impact de la hauteur de coupe sur la croissance en diamètre des rejets de souche (faciès F3 : marché rural de Fayra)

Séquences fonctionnelles (8 bandes nues et boisées) sondées	Nombre de placettes	Nombre total de tiges suivies	Hauteur de coupe adoptée par les marchés ruraux	% des effectifs de rejets par classes d'amplitude de croissance en diamètre (après 10 ans)					
				1-3cm	3-5cm	5-7cm	7-9cm	9-11cm	≥11cm
3	9	112	20 cm du sol	38,4	20,5	24,1	7,1	5,4	4,5
		118	<20 cm du sol	35,6	22,0	27,9	5,9	4,2	4,2
		84	>20 cm du sol	41,7	40,5	11,9	2,4	2,4	1,2
Nombre total de tiges suivies		314							

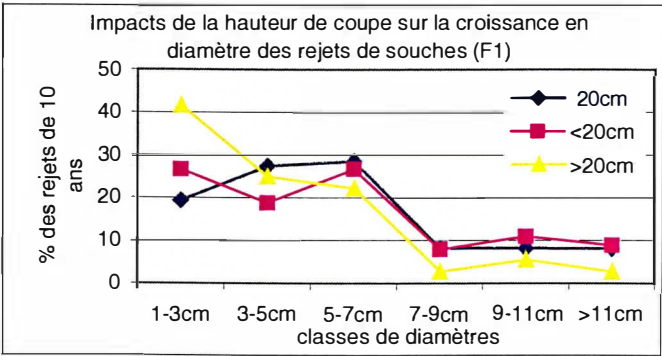


Fig.37 (a) Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F1)

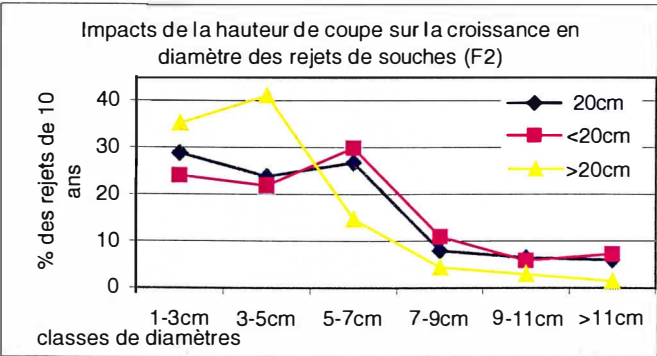


Fig. 37 (b) Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F2)

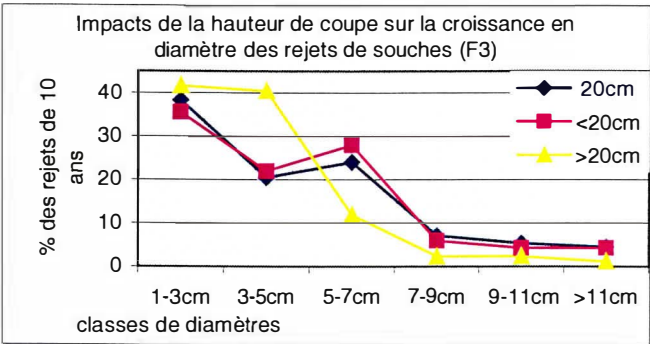


Fig. 37 (c) Comparaison des effets des hauteurs de coupe (en F3)

2.1.1.2. Vitalité ligneuse sans exploitation

Puisque la performance de croissance en hauteur et en diamètre en fonction des niveaux de coupe adoptés, du diamètre initial de la souche, et sous deux régimes d'exploitation forestière, a pu être appréciée, il convient d'analyser l'évolution de la croissance dans des parcelles non exploitées. A cet effet, les mesures de suivi de la régénération de 1994 à 1999 permettent d'apprécier d'une part l'évolution de l'accroissement courant annuel de la surface terrière (tab. 29 et fig.38) et l'accroissement total en hauteur des tiges au cours de ces 6 ans d'autre part (tab. 30 et fig. 39).

Tab.29 : Evolution de l'accroissement courant annuel de la surface terrière par hectare végétalisé dans les parcelles non exploitées

Faciès	Accroissement courant annuel de la surface terrière (m ² /ha végétalisé)							Ecart type	Intervalle de confiance
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Moyenne		
F1	0,472	0,558	0,536	0,336	0,466	0,258	0,428	0,117	+/-0,0030
F2	0,243	0,526	0,387	0,189	0,421	0,247	0,336	0,129	+/-0,0033
F3	0,224	0,478	0,221	0,205	0,231	0,131	0,248	0,118	+/-0,0030

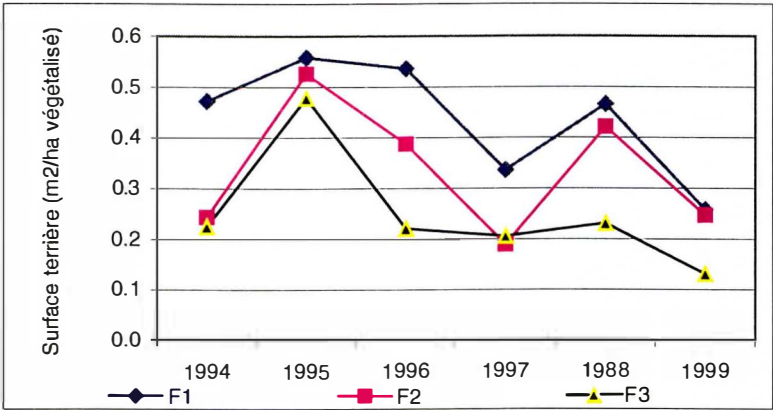


Fig.3 Evolution de l'accroissement annuel de la surface terrière en 6 ans (parcelles non exploitées)

Ces résultats expriment les tendances suivantes :

- l'accroissement annuel de la surface terrière dans son ensemble est faible et n'atteint pas 0,6 m² /ha végétalisé même dans F1 où il semble plus important au cours de ces six années ;
- les années 1997 et 1999 ayant été des années à pluviométrie déficitaire, les répercussions négatives se traduisent par la baisse sensible des tendances de courbes de F1 et F2 ;
- l'année 1995 semble avoir produit les meilleurs accroissements contrairement à 1997 et 1999.

Tab.30 Accroissement moyen total en hauteur des tiges non exploitées** au cours des six ans

Faciès	Effectifs des tiges (%) répartis dans les classes d'amplitude d'accroissement en hauteur					
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	60-80cm	80-100cm	≥100cm
F1	12	22	40	13	12	1
F2	14	16	43	8	17	2
F3	23	19	49	6	2	3

* 1997 était une année avec une pluviométrie très déficitaire par rapport à la moyenne. Est-ce la cause de cette baisse d'accroissement ?

** tiges marquées et suivies durant le temps qu'a duré le suivi

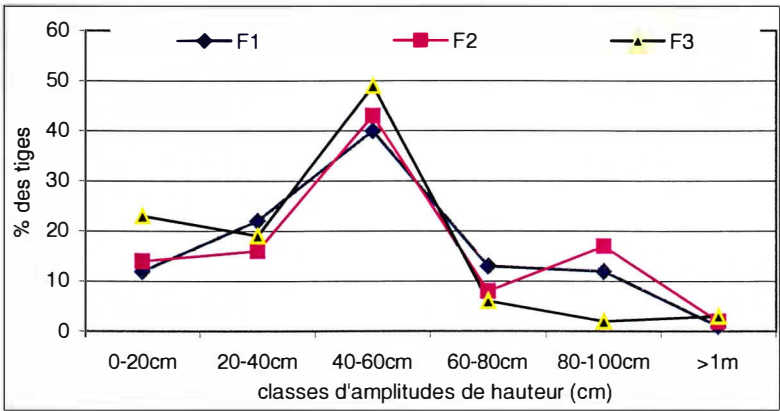


Fig.3 Accroissement cumulé en hauteur au cours des 6 ans (parcelles non exploitées)

Les résultats sur l'accroissement cumulé en hauteur au cours de ces six années indiquent principalement que dans les trois faciès, la hauteur ajoutée moyenne (des trois espèces) est faible et se situe entre 40 et 60 cm pour un grand nombre de tiges : 40% en F1, 43% en F2 et 49% en F3. Cette évolution tend à renforcer celle que montre l'accroissement de la surface terrière. Elle traduit qu'en absence d'une exploitation les peuplements évoluent très peu. La vérification de cette hypothèse sera effectuée après calcul de l'âge des peuplements par dendrochronologie et après avoir déterminé la relation entre l'âge et de diamètre d'une tige.

2.1.1.3. Résultats relatifs à la vitesse de cicatrisation (5 ans après la coupe rase)

La dynamique de la végétation qui s'exprime par la cinématique des successions est abordée ici à travers deux concepts : séquence de végétation et vitesse de cicatrisation. Selon Godron (1995), le premier concept donne une idée du mode de réaction de la végétation quand l'homme vient la bouleverser, alors que le second correspond à la vitesse à laquelle, après destruction de la végétation, un milieu est apte par son activité biologique à reproduire la formation ligneuse caractéristique de la séquence par semis, rejets et drageons. Ces deux concepts étant liés, les données de cubage de la biomasse globale ligneuse sur pied et celle produite au bout de cinq ans dans les trois faciès permettent d'établir les calculs suivants (Tab. 31)

Tab.31 Vitesse de cicatrisation des trois faciès au bout de cinq ans (en fonction d'une coupe rase)

	Biomasse verte ligneuse sur pied des formations caractéristiques en kg ha ⁻¹ de plateau -A-	Biomasse verte ligneuse produite en cinq ans après une coupe rase en kg ha ⁻¹ de plateau -B-	Biomasse verte produite en moyenne par an en kg ha ⁻¹ an ⁻¹ de plateau -C = B/5-	Temps théorique de reconstitution de la formation ligneuse caractéristique -A/C-
F1	18,82	15,16	3,03	6 ans
F2	19,10	12,08	2,41	8 ans
F3	17,70	9,87	1,97	9 ans

Les volumes de végétation ligneuse produits par les trois systèmes au cours des cinq ans permettent de calculer une vitesse de cicatrisation :

- en F1 cette vitesse est de 1,25 fois plus qu'en F2, et de 1,53 fois plus qu'en F3 ;
- en F2 elle est de 1,22 fois plus importante qu'en F3.

2.1.2. Résultats relatifs à la réactivation du processus biologique par paillage

La réactivation du processus biologique par paillage a fait l'objet d'une expérimentation pendant cinq ans. Deux parcelles de 1000 m² chacune sont installées dans les plateaux pilotes de Banizoumbou (en front pionnier dégradé) et à Tientergou (en lisière de bosquet). Au préalable, des brindilles, des branchages et des feuilles de ligneux ont été étalés. Cet obstacle retient les colluvions et les alluvions qui représentent un obstacle au ruissellement. Il s'ensuit une forte activité des termites qui décomposent les branchages déposés et créent de nombreux macropores. Ces derniers permettent à l'eau de s'infiltrer pour approvisionner les horizons supérieurs et inférieurs du sol. La deuxième année, une colonisation herbacée commence et se renforce pour favoriser dès la quatrième année l'installation de jeunes semis. Le recouvrement global (ligneux + herbacées) résultant a atteint 42% à Banizoumbou et 63% à Tientergou. Les plantules, les semis et les drageons recensés par parcelle au cours des cinq ans sont respectivement de 112 et 86 brins pour des tailles qui se situent dans un intervalle de $\pm 0,81$ m autour la hauteur moyenne qui est de 1,20 m. Cette expérience met en évidence qu'il est possible de capter et d'utiliser le supplément du ruissellement en F3, dont seulement 9% sont théoriquement captés par le système. Elle corrobore par ailleurs les résultats sur le faible effet des dispositifs "type Seghier" et "Ichaou" dans ce même faciès.

2.2. Résultats sur la dynamique saisonnière de la strate herbacée

2.2.1. Evolution démographique des individus

Si dans le chapitre précédent (**paragraphe 2**) les données brutes d'inventaire des herbacées ont servi à la mise en évidence de la structure en amas de cette forme de végétation, il s'agit d'analyser ici les variations de leurs fréquences à l'échelle des trois ans de suivi (1997 à 1999). Bien évidemment, compte tenu du nombre important d'espèces en présence, l'analyse n'a porté que sur les espèces dominantes. Au préalable, en tenant compte des cumuls de pluies tombées dans les sept stations pendant les trois années, un classement des années s'est opéré :

- 1998 est l'année ayant enregistré la plus grande quantité de pluies (49,2% du cumul des trois années considérées) ;
- 1999 vient en seconde position avec 28,6% du cumul triennal,
- et enfin 1997 est considérée comme l'année la moins arrosée avec 22,13% des quantités totales de pluie en trois ans.

Les résultats consignés dans le **tab. 32** et les **fig. 40 (a, b et c)** mettent en évidence un certain nombre de faits marquants :

- le nombre d'espèces dominantes n'est pas significativement différent entre les faciès ($P = 0,221$), corroborant ainsi les tendances décrites par les nombres totaux d'herbacées en présence ;
- en revanche la fréquence des individus des différentes espèces dominantes est très significativement différente ($P < 0,0001$) au cours d'une même année, ou d'une année à une autre ou même d'un faciès à l'autre, traduisant ainsi l'évolution de cette strate herbacée ;
- il existe des espèces absentes ou en très faible proportion qui réapparaissent dès que les conditions de pluviométrie augmentent : *Panicum laetum* (pl) et *Triumfetta pentandra* (te) en F1 au cours des années 1998 et 1999 ; "te" en F2 (en 1999) et enfin "te" en F3 (en 1998 et 1999). Cette situation s'explique aisément par le fait que "pl" est un hydrophyte facultatif, alors que "te" ne pousse

que sur les sols humides ou mêmes inondables. C'est pourquoi "pl" n'existe nulle part ailleurs qu'en F1 ;

- l'espèce "zg" présente l'évolution la plus nette et la plus marquée dans les trois faciès, comparativement aux autres espèces dominantes. Cette légumineuse (théoriquement à faible exigence en humidité), occupant une grande place dans la strate herbacée des trois systèmes, tend à prouver au contraire sa capacité d'adaptation à l'abondance de l'humidité. Sa nette augmentation en fréquence en 1998 (comparativement à 1997) et sa réduction sensible en 1999 (comparativement à 1998) justifient aisément cette tendance ;

- d'autres espèces présentent aussi une évolution non négligeable (*Tripogon minimus* en F3, *Loudetia togoensis* en F1 et *Microchloa indica* en F2), car conditionnées par l'existence de dépôts de colluvions et d'alluvions dans les zones boisées accessibles par le ruissellement ;

- enfin *Borreria scabra* représente l'espèce herbacée dont l'évolution se fait à un rythme régulier dans tous les faciès, sans effets des conditions pluviométriques.

Tab.32 Evolution de 1997 à 1999 des herbacées dominantes dans les trois faciès

Faciès	Nombre total d'espèces dominantes	Liste des espèces	Code	Fréquence des individus au cours des trois ans en (%)		
				1997	1998	1999
F1	5	<i>Borreria scabra</i>	bs	8,0	10,2	9,9
		<i>Loudetia togoensis</i>	lt	11,2	14,4	13,8
		<i>Panicum laetum</i>	pl	0,0	5,7	5,5
		<i>Triumfetta pentandra</i>	te	0,0	5,6	5,4
		<i>Zornia glochidiata</i>	zg	22,2	28,6	27,5
F2	5	<i>Borreria scabra</i>	bs	8,1	9,4	8,8
		<i>Cyanotis lanata</i>	cla	5,8	6,7	6,3
		<i>Microchloa indica</i>	mi	8,2	9,6	9,0
		<i>Tripogon minimus</i>	tm	8,8	10,3	9,7
		<i>Triumfetta pentandra</i>	te	0,0	0,0	4,6
F3	6	<i>Zornia glochidiata</i>	zg	27,8	32,3	30,5
		<i>Borreria scabra</i>	bs	4,9	6,3	5,4
		<i>Loudetia togoensis</i>	lt	5,5	7,1	6,1
		<i>Pennisetum pedicellatum</i>	pp	4,9	6,3	5,4
		<i>Tripogon minimus</i>	tm	10,5	14,9	12,8
		<i>Triumfetta pentandra</i>	te	0,0	5,4	4,7
		<i>Zornia glochidiata</i>	zg	22,2	29,7	25,5

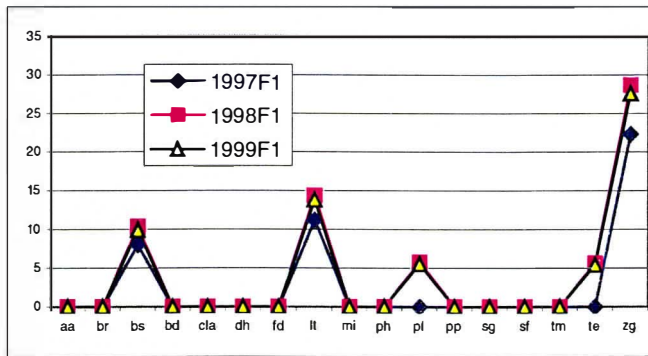


Fig.40 (a) Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F1

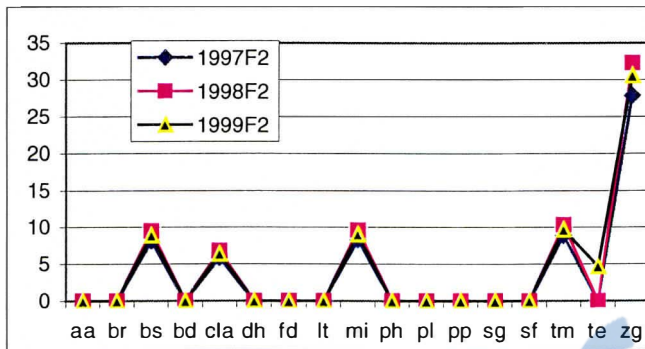


Fig.40 (b) Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F2

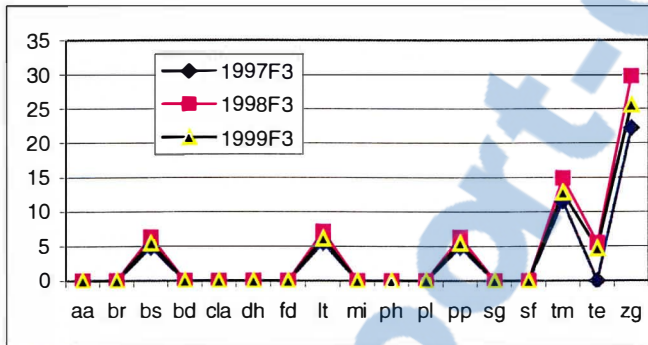


Fig.40(c) Evolution de la fréquence des herbacées dominantes en F3

2.2.2. Reconstitution théorique de l'utilisation du milieu par la strate herbacée

En tenant compte des déplacements de diaspores causés par les vents et le bétail, ainsi que par le ruissellement (qui modifie la nature du stock de graines et son expression au cours des cycles ultérieurs), Grouzis (1995) pense que l'établissement des herbacées est fonction des conditions suivantes : les caractéristiques intrinsèques des semences, notamment leurs propriétés germinatives, les conditions écologiques qui règnent au moment des levées et les phénomènes de concurrence qui s'établissent entre plantules au cours de la période des pluies irrégulières.

Deux sortes d'analyses ont été testées afin de mieux comprendre la distribution spatiale de la strate herbacée au cours des trois années.

La première analyse a porté sur la fréquence de la totalité des espèces et des individus identifiés dans les trois faciès au cours des trois ans. Les résultats obtenus montrent que les zones

homogènes sont déterminantes pour justifier la présence d'une espèce qui s'installe et se comporte vis à vis de tel ou tel facteur écologique. Aussi, la fréquence des individus est le paramètre qui valide le plus les trois zones homogènes comme étant des milieux écologiques où des facteurs se hiérarchisent pour justifier l'installation des espèces selon des règles bien précises :

+ effet du facteur sol sur le nombre d'espèces et le nombre d'individus par zone homogène

- en fonction de la fréquence sur les quatre types de sol : argilo-sableux, latéritique, limono-sableux et sableux, les espèces et les individus se répartissent différemment dans les trois zones homogènes des trois faciès ($\chi^2 = 5916$; ddl=6 ; $P < 0,001$) ;

- en fonction de la présence/absence sur ces mêmes types de sol, les espèces et les individus se répartissent de façon statistiquement non différente dans les trois zones homogènes ($\chi^2 = 0,752$; ddl=6 ; $P < 0,933$) ;

+ effet du facteur lumière sur le nombre d'espèces et le nombre d'individus par zone homogène

- la fréquence observée en fonction des trois modalités d'exigence en lumière par la végétation : espèces héliophiles, indifférentes et sciaphiles, indique que les espèces s'installent de façon statistiquement inégale dans les trois zones homogènes ($\chi^2 = 11005$; ddl=4 ; $P < 0,001$) ;

- en fonction du nombre des espèces et les individus dans les trois zones homogènes, le facteur lumière ne semble pas avoir d'effet ($\chi^2 = 0,143$; ddl=4 ; $P < 0,996$) ;

+ effet du facteur humidité sur le nombre d'espèces et le nombre d'individus par zone homogène

- la fréquence observée en fonction des deux modalités d'exigence en humidité par les espèces (ombrophiles et indifférentes) indique que les espèces s'installent différemment dans les trois zones homogènes ($\chi^2 = 225,5$; ddl=2 ; $P < 0,001$) ;

- en fonction du nombre des espèces et des individus dans les trois zones homogènes, le facteur humidité ne semble pas non plus avoir d'effets ($\chi^2 = 0,144$; ddl=2 ; $P < 0,930$).

Cette première analyse met en évidence une utilisation du milieu (facteurs écologiques) bien précise en fonction des fréquences des individus. La présence des espèces dans les trois zones homogènes ne permet pas d'aboutir au même résultat parce que les nombres d'espèces dominantes ne sont pas significativement différents entre les faciès ($P = 0,221$ cf. **2.2.1 ci-dessus**)

Puisque la fréquence des individus semble être le paramètre pertinent pour rendre compte de l'utilisation du milieu par les espèces, nous avons alors combiné les fréquences des espèces dominantes par faciès et celles qui sont très rares. Un simple tri en fonction de leur affinité écologique théorique permet d'avoir des indications précieuses relatives à l'utilisation du milieu par ces espèces (**Tab. 33**).

L'analyse du comportement des espèces vis à vis du facteur humidité met en évidence une faible proportion des espèces indifférentes et une forte proportion de celles qui sont ombrophiles ou qui aiment les sols drainés et même inondables. La présence de ces dernières espèces confirme donc une fois de plus, les logiques du fonctionnement hydrologique qui conditionne en partie la biologie des espèces localisées dans les lisières et cœurs des fourrés (unités structurales linéaires) et dans les noyaux de bosquet et zones concentriques (unités structurales diffuses).

Tab.33 : Affinités écologiques des herbacées très rares et dominantes des trois faciès

Faciès	Exigence des espèces vis à vis de l'humidité		Exigences des espèces en lumière			Exigences des espèces vis à vis du sol			
	% des espèces ombrophiles, de sol inondable ou drainé	% des espèces indifférentes	% des espèces sciaphiles	% des espèces indifférentes	% des espèces héliophiles	% des espèces de sols sableux	% des espèces de sols limono-sableux	% des espèces de sols latéritiques	% des espèces de sols argilo-sableux
F1	60	40	28	44	28	44	16	12	28
F2	67	33	47	40	13	33	20	7	40
F3	73	27	36	41	23	31	18	14	36

Le comportement de la plupart de ces espèces vis à vis de la lumière prouve aussi que plus de 50% ont des tendances soit sciaphiles (localisation en cœur de fourré et noyaux de bosquet), soit héliophiles (situation en lisière et en zones concentriques des bosquets).

Les exigences édaphiques des espèces représentent l'axe le plus divergent pour cette deuxième analyse. Ne se confirme que la présence des espèces des sols limono-sableux, localisées sur les dépôts de colluvions et d'alluvions qui se concentrent à des niveaux déterminés.

2.3. Discussion des résultats

Pour mieux comprendre les répercussions du fonctionnement hydrologique et biologique sur la capacité de régulation et de régénération des trois systèmes, il est procédé à des analyses de données relatives aux composantes ligneuse et herbacée. Ces données proviennent de dispositifs suivis pendant cinq à six ans, ainsi que durant dix ans pour le dispositif du système d'information et d'évaluation permanent du Projet Energie II (SIEP).

Trois grands processus sont étudiés : la variation de la croissance ligneuse sous et sans régime d'exploitation, la variation dans l'occupation horizontale et verticale de l'espace et dans l'organisation sociale des composantes ligneuse et herbacée, et enfin, la variation des fréquences démographiques des herbacées.

Les principaux résultats obtenus tendent à valider les informations suivantes qui justifient clairement que les fonctionnements hydrologique et biologique de ces systèmes interagissent pour réguler l'évolution de la végétation en présence.

Le suivi de la régénération après coupe a permis de comparer la croissance des rejets en hauteur. La croissance moyenne en hauteur pendant six ans, évaluée à 2 à 3 mètres pour la majorité des rejets, est nettement plus marquée dans les faciès structurés linéaires, comparativement aux faciès de brousses peu ou pas structurées.

L'exploitation des données de suivi pendant 10 ans (dans le cadre du "SIEP") des coupes par furetage des parcelles des marchés ruraux (de vente de bois de feu) permet aussi de voir que la meilleure croissance en diamètre est obtenue sur le faciès F1. Aussi, en considérant les diamètres initiaux des souches exploitées, la classe de diamètre variant de 8 à 14 cm a nettement obtenu la meilleure croissance en diamètre des rejets dans tous les faciès. Cette tendance nettement marquée fait supposer que cette classe correspond à celle du diamètre optimum d'exploitabilité (à 10 ans).

Après avoir dégagé les deux tendances ci-dessus, est déterminée la hauteur de coupe qui favorise la meilleure performance de croissance en hauteur et la plus importante croissance en

diamètre des rejets. Parmi les trois niveaux de coupe (<20 cm du sol, 20 cm et >20 cm) généralement pratiqués par les bûcherons, le niveau de coupe "<20 cm" engendre le plus grand nombre de rejets (de souche ou de racine) ayant atteint le diamètre commercialisable 6 ans après la coupe qui intervient en avril - mai.

Le suivi de la régénération ligneuse sans exploitation forestière pendant 6 ans permet de voir que l'accroissement courant annuel en surface terrière est relativement faible et ne dépasse pas $0,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ végétalisé an}^{-1}$. Cet accroissement semble baisser de façon nette dès la deuxième année de suivi, comme si le diamètre optimum d'exploitabilité était atteint. Sous ce régime, l'accroissement moyen en hauteur de 40 à 60 cm pendant 6 ans (de la majorité des tiges des trois espèces dans les trois faciès) est nettement plus bas que celui obtenu après exploitation. Ces deux tendances traduisent qu'en absence d'exploitation forestière, l'évolution du peuplement paraît faible dans ces formations forestières de plateaux.

La vitesse de cicatrisation des peuplements ligneux des trois systèmes a été aussi calculée. Cinq ans après la coupe rase, nos résultats prouvent que le faciès de brousse structurée linéaire est doté d'une grande capacité de reconstitution. Dans ce faciès, cette vitesse est de 1,25 fois plus grande qu'en F2 et de 1,53 fois plus grande qu'en F3. Le F2 présente une vitesse de 1,22 fois plus grande qu'en brousse diffuse.

En réactivant les processus biologiques de façon artificielle (paillage), on a obtenu après cinq ans, un recouvrement global de 42% à Banizoumbou (F1) et de 63% à Tientergou (F3). Le nombre de plantules, de semis et de drageons comptés dans chacune des deux parcelles de 1000 m^2 est de 112 en F1 et 86 en F3 avec une taille moyenne de $1,20 \pm 0,81 \text{ m}$ en 5 ans. Cette expérimentation montre, que le captage du ruissellement combiné au paillage en F3 qui ne capte (sans intervention humaine) que de faible quantité d'eau de ruissellement, représente une alternative bénéfique pour augmenter le taux de couverture végétale dans ce faciès.

Le suivi de la dynamique herbacée a permis d'apprécier l'évolution démographique des individus et de la strate herbacée. A l'échelle de trois années, dont une (1998) très bien arrosée, une seconde (1999) bien arrosée et une troisième (1997) avec des pluies déficitaires, les analyses des fréquences d'espèces et d'individus permettent de dégager quelques grandes lignes conductrices :

- + en année sèche, la fréquence des individus est fortement hétérogène dans les trois faciès, car les espèces adaptées à la sécheresse évoluent au détriment de celles qui sont très exigeantes ;

- + à l'échelle des trois ans, les espèces herbacées peuvent être classées en trois groupes selon leurs comportements : celles dont l'évolution progressive est nette quelle que soit l'année ou la quantité de pluies tombées (cas de *Zornia glochidiata*), celles qui réapparaissent ou augmentent très fortement leur fréquence durant les années ayant enregistré d'importantes pluies (cas de *Panicum laetum* et de *Triumfetta pentandra*) et enfin celles dont l'évolution est très régulière indépendamment de l'importance des pluies ou du faciès (cas de *Borreria scabra*).

L'étude démographique de la strate herbacée durant les trois années permet de soulever quelques hypothèses relatives à l'utilisation théorique du milieu par les espèces. En tenant compte de la fréquence de la totalité des espèces et individus identifiés dans les trois faciès, on peut indiquer que

l'installation de la majorité des espèces dans les zones homogènes ne se fait pas au hasard. Cette tendance semble vérifiée par les exigences de ces espèces vis à vis des facteurs sol, lumière et humidité qui agissent sur la fréquence des individus. Cette dernière devient significativement différente d'une zone homogène à une autre. En ne tenant compte que des espèces dominantes et celles qui sont très rares, un simple tri permet de se rendre compte que :

- + dans les trois faciès, il existe une forte proportion d'espèces ombrophiles, ce qui tend à justifier et à mettre en relation bien régulée les fonctionnements hydrologique et biologique dans cette zone sèche,

- + les cœurs de fourrés et les noyaux de bosquets regorgent d'espèces sciaphiles prouvant que le recouvrement est très important à ce niveau,

- + les lisières et les zones concentriques des bosquets comportent en majorité des espèces héliophiles. Aussi à ces niveaux, la présence marquée d'espèces aimant les sols limono-sableux confirme l'existence des dépôts de colluvions et d'alluvions.

L'étude des processus physiologique et démographique des strates ligneuse et herbacée tend à confirmer l'hypothèse de Raunet (1985) qui pensait que la dynamique du flux hydrique en surface dans cette zone a une action sur l'évolution et la redistribution locale des matériaux superficiels, qui ont tendance à se répartir comme la végétation. Il pensait aussi que de cette situation résulte toute une série de rétroactions de processus les uns sur les autres : infiltration privilégiée, développement végétal et dépôt de particules qui s'auto-catalysent jusqu'à aboutir à un certain équilibre dynamique des systèmes (objet détaillé dans les trois derniers paragraphes de ce chapitre).

3 - Production biologique des trois systèmes écologiques

3.1. Production ligneuse

3.1.1. Résultats relatifs à la production épigée des ligneux découlant de l'efficacité hydrique et trophique des trois structures

Les deux premiers paragraphes de ce chapitre ont abordé le fonctionnement sous les dimensions "efficacité de l'utilisation de l'eau" et "capacité d'auto-régulation". Ce troisième paragraphe l'aborde exclusivement dans une autre optique, celle de la qualité et de la quantité de production primaire utilisable pour produire de l'énergie domestique. A cet effet, l'appréciation de la quantité et de la qualité des différentes composantes de la phytomasse épigée ligneuse est l'un des meilleurs axes permettant de mesurer l'impact de l'efficacité hydrique sur la production biologique.

3.1.1.1. Phytomasse épigée globale

Les résultats présentés au **tab. 34 (a)** correspondent à la production des unités fonctionnelles de chacun des faciès étudiés dans les trois sites de plateaux pilotes. Deux constats importants se dégagent :

- la matière sèche produite par hectare de plateau est plus importante dans les structures mixtes, puis dans celles qui sont linéaires comparativement aux organisations diffuses ;

- si le taux de matière sèche (déduit de la quantité de matière verte) est plus important en F3 (80%) qu'en F1 (75%) et F2 (68%), contre toute attente le pourcentage du poids caulinaire (bois-énergie de $\varnothing > 4$ cm) est relativement égal entre F1(38%) et F3 (37%). Ce pourcentage est nettement plus faible en F2 (29%).

Ces tendances favorisent F1 ou le mettent en rapport d'égalité de production épigée globale avec F3. Elles vont dans le sens de l'hypothèse de Noy-Meir (1973) qui pense que la contraction de la

végétation en zone aride est non seulement une nécessité, mais peut également créer les conditions d'une production au moins égale ou même supérieure à celle d'une formation végétale uniformément répartie. Cependant, il y a lieu de nuancer cet examen de ressemblance et de différence de production entre les faciès. L'approche comparative de la productivité par hectare de plateau qui est celle utilisée par la majorité des auteurs, ne sera pas celle que nous utiliserons dans cette étude. En raison des recouvrements végétaux significativement différents entre les trois faciès, le raisonnement adopté portera sur des données exprimées en hectare végétalisé qui est une base théorique d'égal recouvrement (100%). Sous cette condition, la comparaison semble plus juste (**tab. 34 b**) :

- le tonnage de matière sèche à utilité domestique (bois-énergie de $\varnothing > 4$ cm) par hectare végétalisé en F1 est de 1,6 fois plus grand que celui obtenu en F3. Celui de F2 est de 1,4 fois plus élevé qu'en F3 également. Par rapport à l'appréciation qualitative du bois-énergie, la production de tiges de $\varnothing \geq 6$ cm des faciès F2 (65%) et F1 (63%) est significativement différente de celle du F3 (49%). Ceci montre que la production des structures linéaires est au moins égale à celle de la végétation diffuse à l'échelle régionale de l'Ouest nigérien ;

- sur le plan qualitatif, les pourcentages de bois-énergie de première qualité (tiges de diamètre ≥ 6 cm) par hectare végétalisé représentent 63% pour F1 et 65% pour F2 contre 49% seulement en F3. Sur ce plan, les structures mixtes et linéaires sont avantagées par rapport aux brousses diffuses où pourtant les plus gros diamètres de tiges ont été dénombrés. Ceci conduit à poser deux questions : est-ce qu'au niveau des structures linéaires et mixtes, les prélèvements des tiges de gros diamètre (≥ 6 cm) doivent être plus intensifs qu'au niveau du F3 ? Ou bien est-ce que les conditions écologiques limitent le cycle de croissance des trois ligneux dominants à un seuil de diamètre qui n'atteint pas celui que présente F3 ? La courbe de tendance des coefficients de survie ainsi que les résultats de l'enquête "filrière" (qui seront présentés en fin du chapitre) permettront de fournir des éléments de réponse à ces deux questions.

Tab.34 (a) : Répartition de la phytomasse ligneuse épigée sur pied par structure (en t/ha de plateau)

Composantes (en tonnes par hectare de plateau)	Phytomasse épigée par structure végétale contractée		
	Linéaire (F1)	Mixte (F2)	Diffuse (F3)
Masse verte (partie caulinaires + feuillage)	18	22	16
Matière sèche totale obtenue (masse calculée avec environ 18% d'humidité)	13,5	14,96	12,8
Masse sèche de feuillage et brins de $\varnothing < 2$ cm	1,62 (12%)	1,49 (10%)	1,17 (9%)
Poids caulinaire (2 cm \geq tiges \leq 4 cm)	6,75 (50%)	9,12 (61%)	6,91 (54%)
Poids caulinaire (bois-énergie de $\varnothing > 4$ cm) dont * tonnes de tiges ayant un $\varnothing \geq 6$ cm	5,13 (38%) (3,21)*	4,33 (29%) (2,84)*	4,71 (37%) (2,30)*

*donc les tiges de $\varnothing \geq 6$ cm ont fait l'objet de tarifs de cubage

Tab.34(b) : Répartition de la quantité de bois-énergie par catégorie de bois commercialisable (t/ha végétalisé)

Décomposition du poids caulinaire (bois-énergie de $\varnothing > 4$ cm) (en tonnes par hectare végétalisé)	Phytomasse épigée par structure végétale contractée		
	Linéaire (F1) (recouvrement moyen de 39%)	Mixte (F2) (recouvrement moyen = 43,5%)	Diffuse (F3) (recouvrement moyen = 69,5%)
Quantité totale de bois-énergie de $\varnothing > 4$ cm	9,91	8,87	6,23
Bois de seconde qualité sur le plan commercial (\varnothing compris entre 4 et 6 cm)	3,66 (37%)	3,10 (35%)	3,18 (51%)
Bois de première qualité sur le plan commercial ($\varnothing > 6$ cm)	6,24 (63%)	5,76 (65%)	3,05 (49%)

3.1.1.2. Comparaison entre les volumes

Les inventaires forestiers et le cubage de peuplement des trois espèces ligneuses effectués dans les trois sites pilotes ont permis les calculs directs des volumes sur pied par faciès et l'établissement des régressions qui permettent d'estimer ces volumes de bois-énergie dans l'ensemble des sept sites.

Deux séries de régressions multiples ont été calculées pour estimer les volumes en stères et les poids de bois sec. Le passage du volume d'encombrement (en stères) en volume plein (en m³) s'est effectué à partir des coefficients d'empilage dont la formule est la suivante :

Coefficient d'empilage = Volume plein des tiges d'un certain nombre de piles / volume d'encombrement des tiges de ces mêmes piles

Nb : le volume plein des piles se calcule par la formule de Smalian :

Volume en m³ = $\pi/8 * L [\sum D^2 \text{ face 1} + \sum D^2 \text{ face 2}]$; le volume d'encombrement s'obtient en empilant les pièces de 1 m de longueur et en mesurant juste la hauteur de la pile.

Au total cinq paramètres sont utilisés pour l'établissement des tarifs qui permettent ces estimations :

- T/HAPL : effectif des tiges totales (de diamètre à 1,30 m ≥ 6 cm) par hectare de plateau ;
- D610 : effectif des tiges de Ø compris entre 6 et 10 cm à hauteur d'homme par hectare de plateau ;
- D1420 : effectif des tiges de Ø compris entre 14 et 20 cm à hauteur d'homme par hectare de plateau ;
- DPL20 : effectif des tiges de Ø>20 cm à hauteur d'homme par hectare de plateau ;
- Hs4m : effectif des tiges de hauteur supérieure à quatre mètres par hectare de plateau.

Les estimations faites à partir des cubages et celles relatives à l'application des tarifs conduisent aux résultats suivants présentés dans les **tab. 35 (a, b, c et d)** par faciès :

*** Faciès de brousse linéaire (F1)**

La corrélation entre VTS/HA (volume des tiges en stère par hectare de plateau) et KGT/HA (masse des tiges en kg par hectare de plateau) est de 0,97, celle du VTS/HA avec le VTM3/HA (volume des tiges en m³ par hectare de plateau) de 0,95. Les tarifs calculés sont :

VTS/HA = 6,010 + 0,1322*T/HAPL – 0,143*D610 + 0,044*Hs4m ; P= 0,006 et R² = 76%

KGT/HA = 1629,164 + 41,971*T/HAPL – 48,205*D610 + 12,685*Hs4m ; P= 0,017

et R² = 71%

Tab.35 (a) Comparaison des volumes estimés et déterminés par cubage (en F1)

DESCRIPTIONS STATISTIQUES (base : n = 18 unités structurales soit 72 bandes boisées)	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES)		
	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA
Moyenne	13,47	3163,13	7,00	12,07	2895,11	6,49
Intervalle de confiance de la moyenne	3,01	804,53	1,62	2,83	776,75	1,56
Ecart type	6,06	1617,82	3,26	5,70	1561,98	3,13
Coefficient de variation (%)	45	51	47	47	54	48

*** Faciès de brousse diffuse (F3)**

Les corrélations entre VTS/HA et KGT/HA et entre VTS/HA et VTM3/HA sont respectivement de 0,98 et 0,99. Dans ce faciès, les tarifs établis sont :

VTS/HA =1,188 + 0,056*Hs4m + 0,017*T/HAPL ; P= 0,000 et R² = 93%

KGT/HA =180,239 + 15,846* Hs4m + 3,796* T/HAPL ; P= 0,000 et R² = 91%

Tab.35 (b) Comparaison des volumes estimés et déterminés par cubage (en F3)

DESCRIPTIONS STATISTIQUES (base : n = 16 unités structurales ou 64 bandes boisées)	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES)		
	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA
Moyenne	9,23	2226,78	4,55	7,95	2004,88	4,03
Intervalle de confiance de la moyenne	2,05	564,61	1,03	1,84	527,17	0,94
Ecart type	3,92	1059,59	1,95	3,46	989,32	1,76
Coefficient de variation (%)	42	48	43	44	49	44

*** Faciès de brousse mixte (F2)**

La corrélation entre VTS/HA et KGT/HA ou celle entre VTS/HA et VTM3/HA est de 0,99. Les tarifs établis s'écrivent:

VTS/HA =16,577 - 0,040*D610 + 0,214*DPL20 + 4,572*D1420 ; P= 0,025 et R² = 77%

**KGT/HA =3806,173 - 9,992* D610 + 67,571* DPL20 + 1116,428*D1420 ; P= 0,011
et R² = 81%**

Tab.35 (c) Comparaison des volumes estimés et déterminés par cubage (en F2)

DESCRIPTIONS STATISTIQUES (base : n = 14 unités structurales ou 59 bandes boisées)	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES)		
	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA
Moyenne	11,54	2675,11	5,52	10,30	2560,31	5,08
Intervalle de confiance de la moyenne	3,60	1097,76	2,08	3,62	1070,30	2,03
Ecart type	6,70	1901,28	3,67	6,27	1853,72	3,52
Coefficient de variation (%)	58	71	66	61	72	69

*** Formations forestières contractées de plateaux de l'ouest nigérien**

En considérant les formations forestières contractées de plateau dans leur ensemble, les corrélations sont aussi bonnes que dans les cas précédents : entre VTS/HA et KGT/HA, r = 0,98 et entre VTS/HA et VTM3/HA, r=0,97. Deux entrées suffisent pour calculer les tarifs qui s'écrivent :

VTS/HA =6,715 + 0,105*DPL20 + 0,034*Hs4m ; P= 0,000 et R² = 61%

KGT/HA =6,884+ 0,038*Hs4m ; P= 0,000 et R² = 55%

Tab.35 (d) Comparaison des volumes estimés et déterminés par cubage (formations forestières contactées de plateaux)

DESCRIPTIONS STATISTIQUES (base : n = 48 unités structurales ou 195 bandes boisées)	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES)		
	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA	VTS/HA	KGT/HA	VTM3/HA
Moyenne	11,49	2708,67	5,75	10,18	2500,72	5,25
Intervalle de confiance de la moyenne	1,58	455,74	0,91	1,58	439,37	0,88
Ecart type	5,86	1571,02	3,16	5,43	1513,15	3,01
Coefficient de variation (%)	51	58	55	53	61	57

De cette approche comparative des résultats ressortent quelques constats :

- même si apparemment les tarifs de cubage semblent surestimer les volumes et les masses de bois-énergie, les estimations par les tarifs ne diffèrent pas significativement de celles obtenues par le cubage de peuplement,
- en considérant le cubage ou les estimations par les tarifs, les productions régressent globalement de F1 à F2 et chutent sensiblement en F3 ;
- en confrontant les coefficients de variation des volumes ou des poids obtenus dans le cadre du cubage et ceux des résultats calculés par tarifs, les valeurs prises deux à deux sont relativement homogènes dans chacun des faciès. Cependant ces CV attestent que les résultats obtenus sont d’une part homogènes en F1 et F3 et d’autre part hétérogènes en F2.

3.1.1.3. Validité et limites de détermination de volume

A l’heure où la nécessité de mieux cerner la productivité des savanes africaines constitue une des principales recommandations qui ressortent des réunions d’aménagistes forestiers, il est important de donner un aperçu sur la crédibilité des résultats obtenus, en interprétant les constats qui ressortent des analyses statistiques et des comparaisons effectuées.

3.1.1.3.1. Comparaison entre les volumes par hectare végétalisé

Pour vérifier si les tendances (mises en évidence par la comparaison préliminaire des résultats par hectare de plateau des sept sites) se confirment, procédons à la conversion des données d’inventaire en volume et en poids par hectare végétalisé (**tab. 36**).

Tab.36 : Comparaison des volumes et poids moyens par hectare végétalisé (obtenus par conversion des données d’inventaire)

Organisations végétales contractées	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE (TROIS ESPECES PRINCIPALES)			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES PRINCIPALES)		
	VTS/HaVeg	KGT/HaVeg	VTM3/HaVeg	VTS/HaVeg	KGT/HaVeg	VTM3/HaVeg
Brousses structurées linéaires (F1)	26	6112	14	23	5594	13
Brousses à organisation mixte (F2)	23	5473	11	21	5238	10
Brousses diffuses (F3)	12	2948	6	11	2654	5
Formations Forestières contractées de l’ouest nigérien	19	4587	10	17	4235	9

Après analyse comparative de ces résultats par hectare végétalisé, on constate que les mêmes tendances observées dans la comparaison préliminaire se maintiennent. La comparaison de ces moyennes permet de tirer la conclusion suivante : les volumes en stères, les poids du bois-énergie et les volumes en m³ ha végétalisé⁻¹, estimés par les tarifs ne diffèrent pas significativement de ceux obtenus par cubage de peuplement (avec les probabilités respectives suivantes P=0,637, P=0,726 et P=0,684).

3.1.1.3.2. Imperfections et limites des tarifs proposés

Pour pouvoir expliquer le degré d'imperfection et les limites des tarifs de cubage qui sont proposés, il faut confronter les résultats du **tab.36** (relatifs aux sept sites pilotes) à ceux obtenus en fonction de la conversion de mesures des paramètres de synthèse ou attributs vitaux (relatif à la production) effectuée dans les 184 unités fonctionnelles des 20 sites de validation (**Tab.37**)

Tab.37 : Volumes et poids moyens par hectare végétalisé déterminés dans les 20 sites de validation

Type de structures	PREDICTION PAR TARIFS DE CUBAGE			CUBAGE DE PEUPLEMENT (TROIS ESPECES)		
	VTS/HaVeg	KGT/HaVeg	VTM3/HaVeg	VTS/HaVeg	KGT/HaVeg	VTM3/HaVeg
Structures linéaires (F1)	26	6217	14	22	5400	12
Structures mixtes (F2)	26	7473	14	26	7238	14
Structures diffuses (F3)	12	3042	6	10	3153	6

Dans un premier temps, la comparaison de moyennes de production (du tab. 39) estimées par l'application des tarifs et grâce aux coefficients de cubage dans les 20 sites de validation, aboutissent aussi à la conclusion suivante : les volumes en stères, les poids du bois-énergie et les volumes en m³ ha végétalisé⁻¹, estimés par les tarifs ne diffèrent pas significativement de ceux obtenus par cubage de peuplement (avec respectivement P=0,780, P=0,868 et P=0,862).

Sur la base :

- de la comparaison de moyennes prises deux à deux **dans les tab 36 et tab.37** (exprimées par hectare végétalisé) et qui sont calculées avec les tarifs et les coefficients de cubage,
- du test de Bartlett au seuil 5% pour comparer les variances des volumes et des poids par hectare végétalisé à l'échelle des sept sites pilotes à celles des résultats obtenus par estimation en fonction de l'attribut vital (paramètres dendrométriques) dans les 20 sites de validation, on aboutit aux conclusions ci-dessous.

Pour les structures linéaires (F1) et les structures diffuses (F3) :

- Aussi bien les variances des volumes et des poids estimés par les tarifs dans les deux catégories de sites, que celles des volumes et des poids estimés par cubage de peuplements entre les deux séries de sites, ne diffèrent pas significativement.
- Il en est de même dans la comparaison des moyennes de productivité de bois-énergie par hectare végétalisé qui ne diffèrent pas significativement entre les sites pilotes et les sites de validation.

Pour les structures mixtes (F2) :

- Dans ce faciès, la comparaison des moyennes de productivité de bois par hectare végétalisé, entre les deux séries de sites, aboutit à la conclusion qu'elles ne sont pas significativement différentes. Cependant, le test de Bartlett au seuil 5% indique que les variances des volumes et des

poids de bois calculés avec les tarifs dans les deux catégories de sites, ainsi que celles des résultats obtenus par cubage dans les deux séries de sites, diffèrent significativement.

Les paramètres dendrométriques ayant servi à établir les régressions en F1 et F3, peuvent se constituer en attribut vital compte tenu de leur caractère invariant dans ces deux faciès et à toutes les échelles. Les tests de comparaison de moyennes de bois-énergie produit par hectare végétalisé et le test de Bartlett pour analyser les variances des résultats entre sites pilotes et sites de validation, constituent deux arguments statistiques qui sont appuyés par :

- dans les sites de validation, en raison du nombre réduit de paramètres synthétiques relevés, l'erreur qu'on suppose commettre en appliquant les tarifs est faible ou nulle. Elle serait, de la même nature que celle commise en utilisant les instruments de mesure, donc très faible voir nulle si le technicien assurant les mesures est le même ,

- par contre dans les sites pilotes, les dispositifs statistiques et le nombre important de données d'inventaire et de cubage analysées autorisent une meilleure appréciation de la qualité des régressions calculées. Pour cette raison, les tarifs de cubage permettent une bonne estimation des volumes et des poids qui ne diffèrent pas significativement à toutes les échelles de ces deux faciès.

En F2, l'organisation très hétérogène de la végétation semble augmenter la variance de la population statistique (les variables étudiées ont une grande variance). Pour cette raison, il n'a pas été possible sur la base de notre effort d'échantillonnage de déterminer un seuil où les productions de bois-énergie et leurs variances ne diffèrent pas significativement entre les sites pilotes et les sites de validation. L'amalgame des unités structurales diversifié à l'échelle fonctionnelle du F2, oblige donc à accroître les taux de sondage pour parvenir à des estimations précises qui soient fiables aux autres échelles.

3.1.2. Processus et mécanismes de croissance et de développement des ligneux

Les conditions qui engendrent les mécanismes d'évolution de la végétation sont maintenant mieux appréhendées après l'étude de la structure de la végétation et du fonctionnement des trois faciès. En fonction de chacun des modes de fonctionnement, la façon la plus simple pour vérifier l'état d'équilibre dans le temps serait la compréhension du rythme de la production des systèmes à travers les accroissements ligneux annuels ou la productivité.

L'accroissement moyen sur une période donnée se détermine en pratique par la procédure suivante : soit V1 le volume sur pied (tiges d'un certain diamètre) à un temps t1 et V2 le volume sur pied (de ces mêmes tiges) au temps t2, l'accroissement moyen sur la période correspondante de t2-t1 années sera : $(V2-V1)/(t2-t1)$. Le terme d'accroissement moyen sera aussi utilisé lorsque la période considérée est la durée écoulée depuis une origine connue, comme par exemple une coupe rase du peuplement, c'est à dire son âge. Si V est le volume sur pied du peuplement à cet âge donné, l'accroissement moyen sera : $V/\text{âge}$ (il en est de même quand on considère la surface terrière).

Par contre l'accroissement courant pour chaque année sera la quantité de bois ou la surface terrière fabriquée durant cette année là. Généralement calculé à partir d'une courbe de production totale s'étendant sur plusieurs années, ceci restreint son utilisation aux seuls peuplements régulièrement mesurés chaque année. Dans cette étude sa détermination résulte d'un suivi après une coupe rase et dans des parcelles témoins permanentes et a donné des résultats satisfaisants.

3.1.2.1. Productivité ligneuse brute estimée (en terme de bois-énergie)

Disposant d'une base de données d'inventaire forestier des sept sites pilotes, où figurent les âges de tiges exploitables ($\varnothing \geq 6$ cm) déterminés par la lecture des cernes, une matrice de données de 21 000 lignes sur trois colonnes (âge, diamètre à hauteur d'homme et hauteur des tiges) est extraite. Deux méthodes de calcul des surfaces terrières appliquées à cette matrice permettent de reconstituer de manière satisfaisante l'accroissement brut théorique annuel :

- 1ère méthode : $[(\text{diamètre à hauteur d'homme en cm}) / 100]^2 / \text{âge de la tige}] \times \pi/4 =$ **surface terrière moyenne annuelle en m^2 (ou $G_{1,30}$)**, qui multipliée par la hauteur de la tige et un coefficient de forme (F), donne directement le volume individuel des tiges. La somme des volumes estimés par tige est faite par unité de surface ;

- 2ème méthode : par le calcul de l'équation de la régression des diamètres à hauteur d'homme (en cm) en fonction de l'âge des tiges, on obtient la pente b (de l'équation $Y = bt + a$) qui correspond à la croissance annuelle du diamètre moyen (en cm). Cette dernière et la densité des tiges servent au calcul de la $G_{1,30}$ du peuplement ou de l'espèce ligneuse considérée.

Faciès structuré linéaire : F1

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (1ère méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,10 m^2	(écart type = 0,04 ; CV = 40%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,28 m^2	(écart type = 0,08 ; CV = 29%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,92	(écart type = 0,35 ; CV = 38%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 2,53	(écart type = 0,78 ; CV = 31%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,36	(écart type = 0,14 ; CV = 39%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 1,01	(écart type = 0,31 ; CV = 31%)

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (2ème méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,17 m^2
Stère ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 1,11 stère
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,58 stère

La contribution de chacune des espèces à cet accroissement est estimée respectivement à 26% pour *Guiera senegalensis* (GS) ; 69% pour *Combretum micranthum* (CM) et 5% pour *Combretum nigricans* (CN).

Faciès de brousse mixte (F2)

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (1ère méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,16 m^2	(écart type = 0,06 ; CV = 38%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,36 m^2	(écart type = 0,13 ; CV = 36%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,51	(écart type = 0,20 ; CV = 39%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 1,08	(écart type = 0,40 ; CV = 37%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,20	(écart type = 0,08 ; CV = 40%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,43	(écart type = 0,16 ; CV = 37%)

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (2ème méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,19 m^2
Stère ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,60 stère
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{an}^{-1}$	= 0,20 stère

La contribution de chacune des espèces à cet accroissement est plus harmonisée, soit 30% pour GS ; 57% pour CM et 13% pour CN)

Faciès de brousse diffuse (F3)

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (1ère méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,09 m^2	(écart type = 0,01 ; CV = 11%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,15 m^2	(écart type = 0,01 ; CV = 07%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,59	(écart type = 0,10 ; CV = 17%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,06	(écart type = 0,09 ; CV = 08%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,23	(écart type = 0,03 ; CV = 13%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,38	(écart type = 0,05 ; CV = 13%)

Accroissement du peuplement : tiges exploitables (2ème méthode)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,13 m^2
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,79 stère
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,35 stère

La contribution des espèces à cet accroissement correspond à 14% pour GS ; 30% pour CM et 55% pour CN).

La présentation de ces résultats suscite quelques commentaires qui s'appuient sur les analyses statistiques :

- les résultats de productivité en stères par hectare végétalisé an^{-1} obtenus dans le F1 par la première méthode représentent plus du double de ceux obtenus en F2 et en F3,
- le test de comparaison des accroissements estimés par les deux méthodes à l'hectare de plateau an^{-1} montre que ceux-ci ne diffèrent pas significativement à l'échelle d'un même faciès ($P=0,06$ au seuil 5%). Ceci est valable pour les trois modes d'expression de l'accroissement annuel ($G_{1,30}$, volume en stères et volume en m^3) ;
- à l'échelle inter faciès, les deux méthodes sont équivalentes, car les résultats en stères par ha de plateau an^{-1} ne diffèrent pas significativement ($P= 0, 09$),
- si l'homogénéité des résultats obtenus par la première méthode est d'une façon générale moyenne, les coefficients de variation (7 à 17%) des résultats en F3 traduisent une très bonne homogénéité ;

La contribution de chaque espèce à la productivité du peuplement est significativement différente entre les faciès ($P<0,01$).

Afin de valider ces résultats bruts de productivité en bois énergie (calculés selon les deux méthodes indirectes), il faut les comparer à ceux obtenus par la mesure directe de la surface terrière.

3.1.2.2. Productivité ligneuse résultant du suivi des paramètres dendrométriques les moins influencés

Selon Catinot (1994), les potentialités naturelles offertes par les savanes ont été pendant longtemps sous-estimées, car on ne savait pas les mesurer du fait de la forme tortueuse (ou en cépées) des arbres et arbustes. Aussi comme ces formations ne fournissaient pas en général du bois d'œuvre, leur étude fut pendant longtemps reléguée au second plan et on crut par ignorance que ces savanes sèches ou "bois de brousse" avaient une croissance lente, comparativement à certaines formes de végétation. Comme on ne compare que ce qui est comparable, il s'impose de plus en plus de mieux évaluer ces accroissements des brousses selon des normes précises dans des dispositifs de parcelles permanentes. Le dispositif mis en place dans l'ouest nigérien a permis d'estimer les accroissements des trois systèmes qui seront présentés de manière classique (par hectare de plateau), mais donc la comparaison se fera par hectare végétalisé.

3.1.2.2.1. Accroissements courants du peuplement ligneux dans les parcelles témoins non exploitées

Les accroissements des parcelles témoins représentent un bon repère de comparaison avec les dispositifs exploités. Ces accroissements sont relatifs aux tiges "condamnées" (ayant des diamètres exploitables dès la première année du suivi) et aux tiges "d'avenir" (celles qui disposent de diamètre inférieur mais proche de celui des premières). La population des tiges a été suivie sans qu'une exploitation intervienne.

Faciès de brousse structurée linéaire (F1)

Accroissement du peuplement : Suivi des témoins non exploités pendant cinq ans

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,143 m ²	(écart type = 0,031 ; CV = 22%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,459 m²	(écart type = 0,074 ; CV = 16%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,635	(écart type = 0,025 ; CV = 04%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,703	(écart type = 0,235 ; CV = 14%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,294	(écart type = 0,016 ; CV = 05%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,715	(écart type = 0,098 ; CV = 14%)

Faciès de brousse à organisation mixte (F2)

Accroissement du peuplement : Suivi des témoins non exploités pendant cinq ans

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,168 m ²	(écart type = 0,022 ; CV = 13%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,312 m²	(écart type = 0,019 ; CV = 06%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,522	(écart type = 0,017 ; CV = 03%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,168	(écart type = 0,068 ; CV = 06%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,189	(écart type = 0,060 ; CV = 32%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,482	(écart type = 0,031 ; CV = 7%)

Faciès de brousse diffuse (F3)

Accroissement du peuplement : Suivi des témoins non exploités pendant cinq ans

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,193 m ²	(écart type = 0,068 ; CV = 35%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,363 m²	(écart type = 0,061 ; CV = 17%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,441	(écart type = 0,034 ; CV = 08%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,846	(écart type = 0,128 ; CV = 15%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,285	(écart type = 0,058 ; CV = 20%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,423	(écart type = 0,090 ; CV = 21%)

La présentation des accroissements courants calculés dans les parcelles montre trois tendances assez nettes :

- l'analyse des jeux de données des accroissements par hectare végétalisé an^{-1} des faciès F1 et F3 indique que leurs moyennes ne sont pas significativement différentes ($P=0,06$). Ces dernières diffèrent chacune de celle du F2 ($P<0,001$) ;

- la comparaison de moyennes des accroissements en stères par hectare végétalisé an^{-1} traduit que la moyenne du F1 (1,703) diffère de celle du F2 (1,168) et de celle du F3 (0,846) ;

3.1.2.2.2. Accroissements moyens du peuplement ligneux après coupe rase

En coupant à ras du sol toute la végétation, comment croissent les peuplements des trois espèces étudiées ? Un suivi d'une durée de cinq ans fournit les résultats ci-dessous :

Faciès de brousse structurée linéaire (F1)

Accroissement du taillis (moyenne établie après cinq ans de suivi)

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,265 m ²	(écart type = 0,011 ; CV = 04%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,646 m²	(écart type = 0,030 ; CV = 05%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,073	(écart type = 0,026 ; CV = 02%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 2,617	(écart type = 0,073 ; CV = 03%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,451	(écart type = 0,012 ; CV = 03%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,099	(écart type = 0,029 ; CV = 03%)

Faciès de brousse à organisation mixte (F2)**Accroissement du taillis (moyenne établie après cinq ans de suivi)**

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,230 m^2	(écart type = 0,018 ; CV = 08%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,500 m^2	(écart type = 0,037 ; CV = 07%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,914	(écart type = 0,014 ; CV = 02%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,987	(écart type = 0,033 ; CV = 02%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,383	(écart type = 0,005 ; CV = 01%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,834	(écart type = 0,013 ; CV = 02%)

Faciès de brousse diffuse (F3)**Accroissement du taillis (moyenne établie après cinq ans de suivi)**

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,263 m^2	(écart type = 0,013 ; CV = 05%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,375 m^2	(écart type = 0,019 ; CV = 05%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,845	(écart type = 0,031 ; CV = 04%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,207	(écart type = 0,045 ; CV = 04%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,422	(écart type = 0,013 ; CV = 03%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,603	(écart type = 0,022 ; CV = 04%)

L'incidence de la coupe rase sur la croissance des peuplements des trois espèces rend compte de nouvelles indications qui diffèrent dans certains cas de celles fournies par les valeurs dans les témoins :

- la comparaison de moyennes des accroissements moyens en stères par hectare végétalisé an^{-1} traduit (comme dans les témoins) que la moyenne de productivité du F1 (2,617) diffère de celle du F2 (1,987) et de celle du F3 (1,207). Ces accroissements moyens résultant de la coupe rase diffèrent aussi très significativement de ceux produits par les témoins dans chacun des faciès ;

- l'un des effets apparents de la coupe rase est l'élaboration d'un accroissement de la surface terrière par hectare végétalisé an^{-1} qui d'une part ne diffère pas significativement entre F1 (0,646) et F2 (0,500), mais d'autre part est supérieur à celui obtenu en F3 (0,375). Cet effet serait-il en relation avec un taux de captage des eaux de ruissellement nettement plus important dans les deux premiers faciès comparativement au F3 ?

- un second effet est la réduction sensible des valeurs des coefficients de variation des accroissements par hectare de plateau ou par hectare végétalisé dans les trois faciès.

3.1.2.2.3. Accroissements moyens du peuplement ligneux après exploitation par furetage (coupe sélective)

Une fois que les tiges condamnées (c'est à dire ayant des diamètres exploitables : ≥ 6 cm à 1,30 m du sol) d'un peuplement sont sélectivement exploitées par furetage, comment s'accroît le peuplement ? Un suivi d'une durée de cinq ans a permis de dégager des tendances :

Faciès de brousse structurée linéaire (F1)**Accroissement du peuplement (cinq ans de suivi)**

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,578 m^2	(écart type = 0,013 ; CV = 02%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,919 m^2	(écart type = 0,034 ; CV = 04%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,470	(écart type = 0,079 ; CV = 05%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 3,406	(écart type = 0,14 ; CV = 04%)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,882	(écart type = 0,033 ; CV = 04 %)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,430	(écart type = 0,049 ; CV = 03%)

Faciès de brousse à organisation mixte (F2)**Accroissement du peuplement (cinq ans de suivi)**

$G_{1,30}$ ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,363 m^2	(écart type = 0,013 ; CV = 04%)
$G_{1,30}$ ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,762 m^2	(écart type = 0,039 ; CV = 05%)
Stère ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,127	(écart type = 0,029 ; CV = 03%)
Stère ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 2,970	(écart type = 0,30 ; CV = 10 %)
M^3 ha de plateau $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 0,509	(écart type = 0,014 ; CV = 03%)
M^3 ha végétalisé $^{-1} \text{ an}^{-1}$	= 1,051	(écart type = 0,059 ; CV = 06%)

Faciès de brousse diffuse (F3)

Accroissement du peuplement (cinq ans de suivi)		
G _{1,30} ha de plateau ⁻¹ an ⁻¹	= 0,498 m ²	(écart type = 0,013 ; CV = 03 %)
G_{1,30} ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	= 0,517 m²	(écart type = 0,021 ; CV = 04%)
Stère ha de plateau ⁻¹ an ⁻¹	= 1,588	(écart type = 0,046 ; CV = 03 %)
Stère ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	= 1,810	(écart type = 0,055 ; CV = 03 %)
M ³ ha de plateau ⁻¹ an ⁻¹	= 1,015	(écart type = 0,029 ; CV = 03%)
M³ ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	= 1,416	(écart type = 0,030 ; CV = 02 %)

Les effets de la coupe sélective (sur la croissance des tiges dans les trois faciès) sont mis en évidence par les faits suivants :

- les accroissements moyens en stères par hectare végétalisé an⁻¹ résultant de cette manipulation sont nettement plus importants et ils diffèrent de ceux résultant de la coupe rase dans chaque faciès (P=0,03), ainsi que de ceux déterminés dans les témoins des trois milieux (P<0,001) ;
- dans ce cas aussi, la comparaison des accroissements moyens en stères par hectare végétalisé an⁻¹ permet de voir que la moyenne des accroissements (ou productivité) du F1 (3,406), ne diffère pas de celle du F2 (2,970). Ces deux moyennes diffèrent significativement de celle du F3 (1,810) ;
- de même les accroissements de la surface terrière par hectare végétalisé an⁻¹ ne diffèrent pas significativement entre F1 (0,919) et F2 (0,762). Cette productivité est cependant différente de celle du F3 (0,517).

3.1.2.3. Productivité réelle en bois-énergie

Le tab. (38) présente une synthèse des accroissements cités ci-dessus qui donne une appréciation de la productivité de chacun des faciès.

Tab. 38 Synthèse des résultats sur les accroissements ligneux des faciès de brousses contractées

Dispositifs suivis en cinq ans	Type d'accroissement mesuré	Brousses linéaires (F1)	Brousses mixtes (F2)	Brousses diffuses (F3)
Témoins non exploités	Surface terrière en m² /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	0,459 (±0,148)	0,312 (±0,038)	0,363 (±0,122)
	Volume en stères /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	1,700 (±0,47)	1,168 (±0,136)	0,846 (±0,256)
	Volume en m³ /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	0,715 (±0,196)	0,482 (±0,062)	0,423 (±0,18)
Exploitation par coupe rase de la végétation	Surface terrière en m² /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	0,646 (±0,060)	0,500 (±0,074)	0,375 (±0,038)
	Volume en stères /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	2,617 (±0,146)	1,987 (±0,066)	1,207 (±0,09)
	Volume en m³ /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	1,099 (±0,058)	0,834 (±0,026)	0,603 (±0,044)
Furetage ou coupe sélective des tiges de Ø commercialisable	Surface terrière en m² /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	0,919 (±0,068)	0,662 (±0,078)	0,517 (±0,042)
	Volume en stères /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	3,406 (±0,028)	2,970 (±0,060)	1,81 (±0,11)
	Volume en m³ /ha végétalisé⁻¹ an⁻¹	1,430 (±0,098)	1,051 (±0,118)	1,416 (±0,060)

Trois autres faits marquants apparaissent :

- les accroissements de la surface terrière ou du volume en stères par hectare végétalisé par an du dispositif de coupe sélective (par furetage) sont deux fois plus importants que les accroissements des parcelles témoins non exploitées, ce qui pousse à admettre que la coupe par furetage peut constituer un bon outil de gestion forestière ;

- la productivité par hectare végétalisé des brousses mixtes (F2) et de brousses structurées linéaires (F1) est nettement plus importante que dans les brousses diffuses (F3) ;

3.2. Production herbacée

3.2.1 Résultats relatifs à la production de la fraction herbacée

Selon Peyre de Fabregues (1996), la production végétale herbacée au Sahel est étroitement conditionnée par les pluies de l'année. Cette situation peut se vérifier au cas où il existe des poches de sécheresse (cas localement observés où les plantes annuelles n'ont pas pousser). L'année suivante, tout redevient normal par suite de bonnes pluies.

Mais par rapport aux systèmes étudiés qui fonctionnent aussi sous l'influence de la topographie, une mise en relation de la dynamique de transfert hydrologique en surface et cette production, peut permettre de comprendre certaines situations. La modélisation de la production herbacée en fonction de l'évolution des plantes annuelles par zones homogènes serait possible. Trois années successives de mesure de la productivité herbacée permettent de traduire quelques tendances.

3.2.1.1. Productions globale et spécifique par zones homogènes

La phytomasse épigée de la strate herbacée représente en moyenne (de 1997 à 1999) : 1918 ± 118 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F1 ; 1105 ± 102 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F2 et $1946 \text{ kg} \pm 207$ kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F3.

Compte tenu de la forte anisotropie de la végétation dans ces milieux, la répartition spatiale de la phytomasse herbacée accuse une variation sensible. Ainsi le niveau de productivité varie sensiblement en fonction des zones homogènes dans un même faciès (**Tab.39**).

Tab 39 Productivité herbacée par zone homogène des trois faciès de brousses contractées (en %)

Zones d'inventaire	(F1) Brousse Tigrée	(F2) Brousse mixte	(F3) Brousse Diffuse
Lisières	52	40	28
Sous-bois	18	28	31
Zones ensoleillées	30	32	41

On remarque que dans les systèmes structurés et mixtes, respectivement 82 et 72% du matériel végétal herbacé est localisé dans les zones de lisière et celles qui sont ensoleillées. Par contre dans le faciès de brousse diffuse 72% du total du stock se retrouvent en sous-bois et en zones ensoleillées.

En considérant globalement les zones homogènes des trois faciès, on recense les espèces suivantes qui contribuent le plus à cette production :

- en lisière : *Loudetia togoensis* (46%), *Zornia glochidiata* (43%), *Tripogon minimus* (5%) et *Borreria scabra* (5%) ;

- en sous-bois : *Borreria scabra* (18%), *Triumfetta pentandra* (8%) ;

- en zones ensoleillées : *Tripogon minimus* (46%), *Zornia glochidiata* (23%), *Loudetia togoensis* (18%). Certaines des espèces ayant une forte activité dans le fonctionnement des zones homogènes (identifiées précédemment) n'ont pas une contribution significative à la production.

3.2.1.2. Répartition taxinomique de la production par zones homogènes

En cumulant les pourcentages de la contribution des espèces à la production des zones homogènes présentée ci-dessus, la répartition taxinomique est :

- en lisière trois familles participent essentiellement à la production. Les Poacées produisent 51% du total produit, les Fabacées 43% et les Rubiacées ne produisent que 5% ;
- en sous bois il existe un nombre suffisant de familles représentées mais deux seulement participent plus à cette production : Rubiacées avec 18% et les Tiliacées ont 8% ;
- en zones ensoleillées, la phytomasse est produite par deux familles : Poacées 64% et Fabacées 23%.

Cette contribution à la production de phytomasse épigée herbacée dans les zones homogènes conditionne celle des faciès où les familles qui produisent le plus sont :

- brousses structurées linéaires : Poacées 62%, Fabacées 16% et Rubiacées 8% ;
- brousses mixtes : Fabacées 40%, Poacées 16%, Rubiacées 15% et Tiliacées 9% ;
- brousses diffuses : Poacées 43%, Fabacées 21% et Tiliacées 5%.

En réalité deux grandes familles (Poacées et Fabacées) participent essentiellement à la production de la phytomasse herbacée dans chaque faciès, avec bien sûr l'appui d'une ou deux familles (Rubiacées et/ou Tiliacées).

3.2.1.3. Fraction consommable de la production herbacée par système

La représentation des familles et des espèces dans les zones homogènes et dans les faciès va influencer le pourcentage de la fraction herbacée consommable par les animaux. Ainsi la production fourragère utile des faciès (tab.40) représente :

- pour le faciès de brousse structurée 30 % (trois espèces : *Zornia glochidiata*, *Panicum laetum* et *Borreria scabra*) ;
- pour le faciès de brousse mixte 55 % que fournissent deux espèces : *Zornia glochidiata* et *Borreria scabra* ;
- enfin dans le faciès de brousse diffuse 21% de la production totale sont consommables par les animaux (fourniture d'une seule espèce *Zornia glochidiata*). Bien entendu d'autres espèces fourragères existent mais avec un très faible niveau de contribution ce qui changerait peu les pourcentages donnés.

Tab. 40 Répartition de la phytomasse herbacée consommable par espèces et par faciès

Faciès	Familles	Espèces	Appoint en %	Degré d'utilisation
Brousses structurées	Fabacées	<i>Zornia glochidiata</i>	16	très recherchée en vert
	Rubiacees	<i>Borreria scabra</i>	8	peu appetée
	Poacees	<i>Panicum laetum</i>	6	très appetée
Brousses mixtes	Fabacées	<i>Zornia glochidiata</i>	40	très recherchée en vert
	Rubiacees	<i>Borreria scabra</i>	15	peu appetée
Brousses diffuses	Fabacées	<i>Zornia glochidiata</i>	21	très recherchée en vert

En fonction des trois zones homogènes, la fraction consommable de la production des herbacées dominantes (tab.41) diffère significativement avec 48% d'appoint total par les lisières, 23% par les zones ensoleillées et 18% provenant des sous-bois.

Tab. 41 Répartition de la phytomasse herbacée consommable par espèces et par zones homogènes

Zones homogènes	Familles	Espèces	Appoint en %	Degré d'utilisation
Lisière	Fabacées	<i>Zornia glochidiata</i>	43	très recherchée en vert
	Rubiaceées	<i>Borreria scabra</i>	5	peu appetée
Sous-bois	Rubiaceées	<i>Borreria scabra</i>	18	peu appetée
Zones ensoleillées	Fabacées	<i>Zornia glochidiata</i>	23	très recherchée en vert

3.3. Discussion des résultats

L'étude de la production biologique des trois systèmes contractés a été abordée sous l'angle des productions utilisables (dans la production d'énergie domestique ou la fourniture de fourrage herbacé).

Pour déterminer la production globale et la productivité de la composante ligneuse à l'échelle des sites pilotes et à celle de la région, des méthodes quantitatives, inventaire forestier et cubage de peuplement, ont permis de procéder à des estimations et d'établir des tarifs de cubage. Ces derniers permettent d'évaluer les productions sur la base de caractéristiques dendrométriques simples à mesurer sur le terrain.

L'évaluation quantitative de la phytomasse épigée ligneuse globale par hectare végétalisé indique que le tonnage de matière sèche pouvant servir comme bois-énergie (tiges de diamètre > 4 cm) en F1 (9,91 T ha végétalisé⁻¹) est de 1,6 fois plus important qu'en F3 (6,23 T ha végétalisé⁻¹). Cette tendance est la même lorsqu'on compare F2 qui produit 8,87 T ha végétalisé⁻¹, à F3 (soit 1,4 fois plus que la productivité du F3).

La comparaison des productions de première qualité (masse des tiges de $\varnothing > 6$ cm) permet de voir que les faciès de brousses structurées avec 6,24 T ha⁻¹ végétalisé (soit 63% de la masse totale) et de brousses mixtes (5,76 T ha⁻¹ végétalisé soit 65%), ont une productivité qui diffère significativement de celle des brousses diffuses (3,05 T ha⁻¹ végétalisé soit 49%). Ces deux premières approches comparatives traduisent une production au moins égale (sinon supérieure) des brousses structurées linéaires et/ou mixtes face aux brousses diffuses. Ces résultats confirment l'hypothèse de Noy - Meir (1973) et valident les résultats obtenus par Ichaou (1995) à l'échelle stationnelle.

Les volumes et les masses de bois-énergie estimés sur la base des tarifs de cubage décrivent une tendance décroissante de la production de F1 à F2, puis une chute sensible en F3. Ces tarifs sont précis en F1 et F3 contrairement à F2 où les dispositifs statistiques mis en place n'ont pas permis de faire des estimables précises et fiables, en raison de la grande variance des variables étudiées.

En comparant les résultats relatifs aux sites pilotes à ceux des sites de validation, les variances des volumes et des poids prédits par les tarifs de cubage ne sont pas significativement différentes en F1 et F3. Cette tendance reste identique quand on compare les volumes et poids calculés grâce aux coefficients de cubage. En F2, les variances des volumes et des poids calculés avec les deux méthodes sont significativement différentes entre les deux séries de sites.

L'étude des mécanismes de la croissance ligneuse s'est faite par un suivi d'une durée de cinq ans. La détermination de l'âge des tiges par dendrochronologie a permis de tester deux méthodes indirectes de calcul de l'accroissement annuel ligneux brut, qui lui même est comparé aux accroissements courants et moyens annuels mesurés directement dans chacun des systèmes.

Plusieurs tendances se dégagent des calculs et des analyses statistiques effectuées :

- les résultats de productivité en stères par hectare végétalisé an^{-1} du F1 représentent plus du double de ceux de F2 et de F3 ;
- à l'échelle inter faciès, les deux méthodes indirectes donnent le même résultat, car les nombres de stères par ha de plateau an^{-1} ne diffèrent pas significativement ;
- la contribution de chaque espèce à la productivité du peuplement diffère significativement entre les faciès ($P < 0,01$). Ceci permettrait de proposer de nouvelles compositions ligneuses dans l'aménagement de certains des systèmes.

La mesure directe des surfaces terrières et des accroissements à travers trois traitements (coupe rase, coupe sélective et témoin non exploité) a permis d'apprécier les accroissements courants et moyens annuels qui décrivent trois grandes tendances :

- les accroissements de la surface terrière ou du volume en stères par hectare végétalisé par an du dispositif de coupe sélective sont deux fois plus importants que les accroissements des parcelles témoins non exploitées. Ceci permet de mettre en évidence l'effet positif de la coupe par furetage dans l'aménagement forestier ;
- la productivité par hectare végétalisé des systèmes à organisation végétale mixte (F2) ou totalement structurée linéaire (F1) est nettement plus importante que dans les formes d'organisation diffuse de la végétation (F3) ;

Enfin, il faut noter qu'il existe de réelles difficultés quand il faut comparer ces résultats (relatifs au bois énergie commercialisable) avec ceux de l'étude bibliographique qui portent en général sur la productivité globale de phytomasse y compris les feuilles. En effet, dans la plupart des cas, toutes les conditions ne sont pas précisées pour pouvoir les apprécier correctement. Il semble donc que l'estimation de la productivité des formations forestières contractées de plateaux sur la base de la connaissance exacte de l'âge et de l'histoire (prélèvements divers) des peuplements donne des résultats nettement supérieurs à ceux qu'indique la littérature pour ces systèmes de production. Les résultats issus de cette étude seraient comparables avec ceux obtenus dans des zones de savanes avec 800 mm de pluies au minimum.

La méthode d'étude de la production herbacée a permis de quantifier la biomasse épigée produite en moyenne par les trois systèmes au cours des trois ans ($1918 \pm 118 \text{ kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F1 ; $1105 \pm 102 \text{ kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F2 et de $1946 \text{ kg} \pm 207 \text{ kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F3). Cette productivité semble légèrement au dessus de celle qu'indique Peyre de Fabregues (1996), de 700 à 1200 $\text{kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les zones sahéliennes recevant de 200 à 750 mm de pluie. Elle dépasse aussi celle obtenue par Achard (1990) de 980 $\text{kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sur Fayra au Niger (567 mm), ainsi que les 890 à 931 $\text{kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ que Chase et Boudouresque (1989) indique pour la forêt de Guesselbody au Niger. Mais comme les systèmes étudiés créent des zones de productions bien localisées le bilan hydrique tient compte de la pluie et d'un supplément d'eau de ruissellement, cette production herbacée pourrait se justifier aisément. Enfin, ces productivités sont relativement égales à celles observées par Geerling et de Bie (1988) : 2150 $\text{kg de MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans les forêts de Bissiga et Nakabé au Burkina-Faso.

4 - Dynamique des systèmes écologiques

4.1. Etude des mécanismes de succession végétale spatio-temporelle

4.1.1. Migration de la végétation et rôle dynamique de certaines espèces ligneuses

Les résultats obtenus constituent une autre estimation du fonctionnement biologique dont la résultante est la dynamique spatio-temporelle, qui découle de la structure démographique et organisationnelle des trois espèces ligneuses et de leur peuplement. (cf Chap.II, paragraphe 2 : 2.1.4 et 2.1.5). Bien entendu, l'appréciation de ce processus s'appuie sur l'étude de l'évolution de la croissance annuelle des ligneux qui ont traversé tant des périodes à pluviométrie normale, que celles avec des quantités de pluies déficitaires. Cette dynamique spatiale et temporelle représente donc une régulation du système en commandant une progression en amont de la bande et une régression en aval. Elle représente un élément justifiant la contraction des fourrés, et permettant d'apprécier les relations qui existent entre divers processus d'évolution des systèmes contractés : la dynamique résulte du fonctionnement qui lui est commandé par la structure de la végétation, qui elle-même est influencée par des facteurs mésologiques et climatiques.

4.1.1.1. Résultats des mesures de la migration des zones boisées

Dans le chapitre II, il est mis en évidence que l'organisation horizontale des patterns se fait selon un gradient régulier d'âges croissants des arbustes de l'amont de la pente vers l'aval, en passant par trois zones homogènes (front pionnier, cœur du fourré et zone de sénescence) du faciès F1 ; une série concentrique d'âges décroissants à partir d'un semis aléatoire de noyaux de végétation jusqu'à la lisière du bosquet (en passant par des zones concentriques centrales) dans les brousses diffuses et enfin par une disposition hybride en plages homogènes dans les structures mixtes (F2).

L'analyse de ces agencements par étude dendrochronologique permet d'estimer directement la migration annuelle des zones végétalisées. Pour mettre en relation l'âge des tiges et le supplément d'eau de ruissellement que capte les systèmes, la distance des arbustes à un point de repère (limite des croûtes de décantation immédiatement en amont de la bande de végétation) a été à chaque fois mesurée.

Les résultats consignés dans les **tab. 42 (a et b)** mettent en évidence l'existence d'un phénomène de migration des peuplements en fonction des faciès et des zones homogènes. La migration des bandes est d'une part irrégulière et d'autre part différente en fonction des conditions écologiques des trois faciès.

En comparant l'importance du phénomène de migration des ligneux et en analysant sa variation entre les trois systèmes, les mesures faites révèlent sans ambiguïté que la migration des peuplements ligneux est nettement plus marquée (de 40 à 80 cm par an) mais très irrégulière dans le faciès linéaire (F1), très faible en F2 (environ 20 cm) et relativement insignifiante dans le faciès de brousse diffuse (F3).

Nb : dans l'interprétation de l'effet de la zone de décantation de l'eau sur la migration (tableaux ci-dessus) comprendre : NS = effet non significatif pour $P > 0,05$; * = effet significatif pour P comprise entre 0,05 et 0,01 ; ** = effet très significatif pour P comprise entre 0,01 et 0,001 ; *** = effet très hautement significatif = $P < 0,001$.

Comme l'effet de la décantation de l'eau sur la migration des zones boisées semble être plus évident dans les structures linéaires principalement, les tendances que rapporte le **tab. 42(b)** par zone

homogène attestent qu'en réalité le peuplement migre le plus dans la zone pionnière située en amont (0,585 m), comble les clairières éventuelles du cœur du fourré (0,481m) et reste plus ou moins stable dans la zone de sénescence (0,15m).

Tab. 42(a) : Migration moyenne annuelle du peuplement ligneux dans les trois faciès (en m)

Structures concernées	Faciès de brousse linéaire (F1)			Faciès de brousse mixte (F2)			Faciès de brousse diffuse (F3)		
	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation
Peuplement (3 espèces)	0,59 ±0,054	0,027	***	0,16 ±0,098	0,049	***	0,05 ±0,126	0,063	NS

Tab. 42 (b) : Migration du peuplement ligneux par zone homogène du faciès linéaire (en m)

Zones homogènes	Zone pionnière			Cœur de fourré			Zone sénescente		
	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation
Peuplement (3 espèces)	0,585 ±0,122	0,061	***	0,481 ±0,072	0,036	***	0,15 ±0,15	0,075	*

4.1.1.2 Résultats des mesures de la migration des espèces ligneuses

L'étude de la migration du peuplement étant globale, l'avancée provoquée par chacune des espèces serait plus intéressante à connaître, car elle permettrait de comprendre comment et par quelle méthode préférentielle (semis, marcottage, drageonnage) chacune se comporte dans les faciès et dans les zones homogènes.

Les résultats d'avancée de chacune des espèces en fonction des faciès, voir **tab.43 (a)**, et **fig. 41 (a)** font remarquer que *Guiera senegalensis* (GS) est l'espèce qui amorce nettement la migration dans les unités structurales linéaires (0,805 m par an) et les lisières de la brousse diffuse (0,68m par an). Ensuite vient *Combretum micranthum* (CM) qui joue un rôle visible dans la colonisation en amont des bandes boisées en F1(0,79m par an) et en F2 (0,49 m par an). CN enfin reste relativement stable et inféodé au cœur du fourré des structures linéaires ou dans les noyaux de végétation du système diffus.

Quand on analyse les données de migration relatives au faciès structuré linéaire dont le fonctionnement biologique et hydrologique se traduit par cette migration en zone pionnière amont (régénération) et une régression en aval des zones boisées (sénescence), les espèces évoluent très différemment selon les zones homogènes, voir **tab.43 (b)**, et **fig 41 (b)** : GS colonise largement la zone pionnière en amont, évolue bien dans le cœur du fourré et reste relativement stable dans les auréoles créées par le phénomène de sénescence en aval ; CM a une dynamique spatiale et temporelle plus faible que celle de GS dans la zone pionnière et le cœur du fourré. Par contre, il traduit une stabilité nette du fait de sa sénescence en aval ; enfin CN est l'espèce la plus stable avec une timide progression dans le cœur du fourré. Son absence en zone sénescente s'expliquerait par

les prélèvements d'usage des populations. En effet, son bois-énergie est très apprécié par les populations locales (souches mortes visibles).

Tab 43 (a) : Migration des espèces comparée dans les trois faciès (en m)

Structures concernées	Faciès de brousse linéaire (F1)			Faciès de brousse mixte (F2)			Faciès de brousse diffuse (F3)		
	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation
Espèces									
GS	0,805 ±0,088	0,044	***	0,08 ±0,188	0,094	NS	0,68 ±0,114	0,057	*
CM	0,79 ±0,070	0,035	***	0,49 ±0,024	0,012	***	0,12 ±0,296	0,148	NS
CN	0,16 ±0,19	0,095	NS	0,12 ±0,212	0,106	NS	0,06 ±0,022	0,011	NS

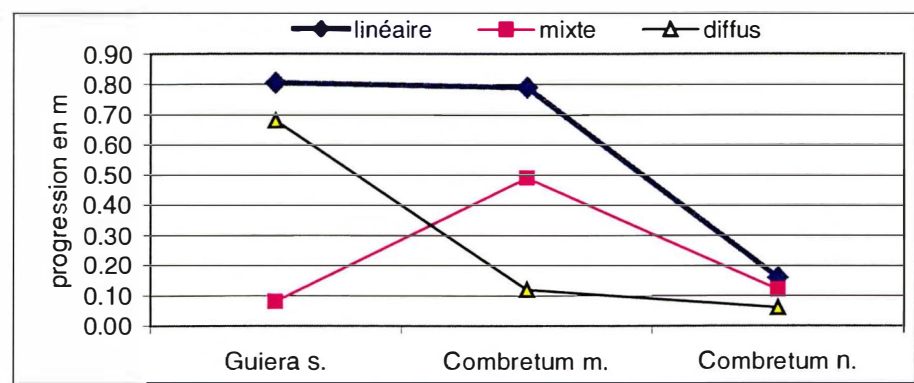


Fig.41 (a) Progression annuelle en m des trois espèces dans les faciès

Tab. 43 (b) : Migration des espèces par zone homogène dans le mode d'organisation linéaire (en m)

Espèces concernées	GS			CM			CN		
	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation	Avancée moyenne	Ecart type	Effet de la zone de décantation
Zones									
Pionnière	0,636 ±0,204	0,102	***	0,521 ±0,144	0,072	***	-	-	-
Cœur de fourré	0,555 ±0,142	0,071	***	0,348 ±0,084	0,042	***	0,341 ±0,308	0,154	*
Sénescente	0,353 ±0,210	0,105	***	0,047 ±0,192	0,096	NS	-	-	-

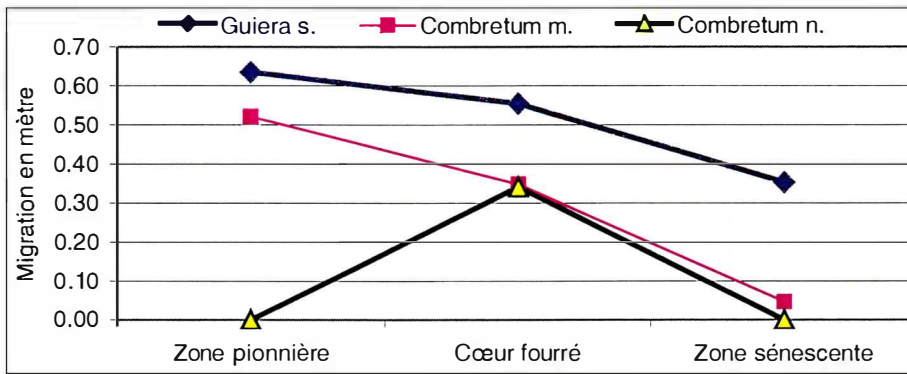


Fig.41(b) Migration annuelle spécifique par zone homogène du faciès linéaire (F1)

4.1.2. Mécanismes d'adaptation et de régulation de la population ligneuse

4.1.2.1. Résultats sur le rythme de la régénération, de la mortalité et de la sénescence

La régénération est perçue à ce niveau comme étant la capacité de renouvellement et de régulation de la population ligneuse dans chacun des trois systèmes. Les facteurs les plus actifs étant le fonctionnement hydrologique et les conditions mésologiques, il faudrait normalement une échelle temporelle suffisamment grande avec des conditions climatiques extrêmes : sèche et humide pour pouvoir l'apprécier. La durée des observations de cette étude permet cependant d'émettre quelques hypothèses en fonction des mesures effectuées dans chacun des faciès :

- dans les faciès de brousse structurée linéaire, si un phénomène de sénescence affecte annuellement les arbustes en aval des bandes sur une étendue d'environ 0,15 m, il est heureusement compensé par une colonisation annuelle (certes irrégulière) en amont des zones boisées de 0,58 m. De ce fait, la régulation de la population ligneuse se fait d'une part par l'enregistrement de la mortalité naturelle des espèces (1 % des tiges environ) ou leur sénescence (4,65 % des tiges) et d'autre part par son enrichissement par des formes de régénérations sexuées ou végétatives (cf. 4.1.2.4 ci-dessous) ;

- dans les organisations végétales mixtes, la régulation se fait par le jeu d'équilibre migration - sénescence observé sur de faibles étendues difficiles à mesurer avec fiabilité et des mortalités naturelles (1% des tiges). Les deux phénomènes interviennent simultanément dans les unités structurales linéaires et le second uniquement dans les unités structurales circulaires ou diffuses ;

- dans les formes d'organisation diffuse de la végétation, on recense surtout des mortalités naturelles proportionnellement plus grandes que dans les deux premiers cas (environ 3,76 % des tiges). Des données sur la mortalité des espèces figurent dans le paragraphe ci-dessous.

4.1.2.2. Liaison "mortalité - diamètre des tiges"

Comme il existe une corrélation entre les diamètres à la base des tiges et leur hauteur, qui varie de 0,87 à 0,97 dans les trois faciès, il s'impose de chercher la relation mortalité - diamètre des tiges en fonction de leur hauteur (**tab. 44**), ce qui peut intéresser la gestion forestière.

De l'analyse des données de ce tableau ressortent les constats suivants :

- la mortalité porte essentiellement sur des tiges de diamètre à la base < 2 cm et dont la hauteur représente moins de 2 m dans les trois faciès ;

- la mortalité des tiges de hauteur < 2 m correspond à 71% du total des tiges mortes en F1, 92% en F2 et 83% en F3 ;

- les effectifs de tiges mortes de diamètre à la base ≥ 2 cm ne diffèrent pas significativement entre F1 et F3. Par contre la différence entre chacun de ces deux effectifs et celui obtenu en F2, est hautement significative ($P<0,001$) ;

Tab.44 Répartition de la totalité des tiges mortes dans les trois faciès (en%)

Classe d'amplitude de hauteur des tiges	en F1 (% par rapport aux 820 tiges mortes sur 14 507)	en F2 (% par rapport aux 158 tiges mortes sur 14 532)	en F3 (% par rapport aux 523 tiges mortes sur 7 729)
<1m	26	28	24
1 à 2 m	45	64	59
2 à 3 m	27	07	15
3 à 4 m	02	01	02
Classe d'amplitude de diamètre à la base des tiges	en F1 (% par rapport au total des 820 tiges mortes)	en F2 (% par rapport au total des 158 tiges mortes)	en F3 (% par rapport au total des 523 tiges mortes)
<2 cm	49	66	50
2 à 3 cm	30	08	22
≥ 3 cm	21	26	28

4.1.2.3. Liaison "mortalité - espèce"

La mortalité des tiges est un phénomène qu'on enregistre fréquemment dans l'évolution des peuplements ligneux. Compte tenu du rôle économique des trois espèces étudiées, chercher à connaître la mortalité de chacune d'elle en fonction de sa hauteur et de son diamètre à la base est très important. Le **tab. 45** présente les pourcentages de tiges mortes par espèce, par rapport à la mortalité totale dans chacun des faciès.

L'analyse de ce tableau met en évidence les faits suivants :

- en F1, par rapport à la mortalité totale des tiges, plus de la moitié des tiges mortes des espèces CM et GS ont un diamètre à la base < 2 cm. Mais comme la hauteur dominante des tiges mortes dans ce faciès varie de 1 à 2 m, cette catégorie de tiges des deux espèces n'a pas un grand intérêt commercial. Par contre les pourcentages de GS (16%) et de CM (15%) pour les tiges de diamètre à la base ≥ 3 cm représentent un potentiel de bois mort qui s'achète ;

Tab. 45 Pourcentages de tiges mortes par espèce, par rapport à la mortalité totale.

Faciès	Espèces	Classe d'amplitude de hauteur des tiges				Classe d'amplitude de diamètre à la base des tiges		
		<1m	1 à 2 m	2 à 3 m	3 à 4 m	<2 cm	2 à 3 cm	≥ 3 cm
en F1 (% de tiges mortes par espèce et par rapport aux 820 tiges mortes)	GS	26	42	00	32	53	31	16
	CM	24	48	21	07	57	28	15
	CN	00	00	00	00	00	00	00
en F2 (% de tiges mortes par espèce et par rapport aux 158 tiges mortes)	GS	37	48	15	00	74	12	14
	CM	23	69	07	01	73	13	14
	CN	25	75	00	00	50	00	50
en F3 (% de tiges mortes par espèce et par rapport aux 523 tiges mortes)	GS	25	59	16	00	73	22	05
	CM	16	60	22	02	41	20	39
	CN	29	59	08	04	37	24	39

- en F2 on observe une mortalité de tiges de diamètre à la base <2 cm (GS=74%, CM=73% et CN=50%) nettement plus importante que celle observée en F1. Aussi, en F2 les tiges mortes de diamètre à la base ≥ 3 cm sont dominées par CN avec 50% ;
- toujours par rapport à la mortalité totale des tiges, en F3 le pourcentage de tiges mortes de l'espèce GS atteint 73% pour les tiges de diamètre < 2 cm à la base. Dans ce faciès, les espèces CM et CN disposent chacune de 39% de tiges de diamètre à la base ≥ 3 cm, ce qui peut intéresser les structures de vente de bois-énergie.

4.1.2.4. Comptage des semis, des drageons, des marcottes et des rejets de souches après excavation

Les résultats obtenus après avoir creusé des excavations dans le cœur du fourré d'un faciès de brousse tigrée (F1) permettent de soulever quelques hypothèses sur la dynamique de régénération des systèmes contractés de plateau en fonction des trois espèces dominantes. Les observations permettent de reconstituer l'origine et les liaisons entre tiges à travers les réseaux racinaires. Les réseaux racinaires de 47 tiges des trois espèces (voir **tab.46**) ont été observés dans trois excavations dont les dimensions sont 2 m de long sur 2 m de large et 1,5 m de profondeur chacune. Les effectifs de tiges par modes de régénération et par espèce se répartissent selon les pourcentages présentés par le tableau 48 qui permet de soulever les hypothèses suivantes :

- la multiplication végétative serait-elle le mode dominant de régénération des trois espèces ?
- la régénération des trois espèces se fait-elle principalement en favorisant la voie sexuée et/ou végétative en fonction sans doute de la situation pluviométrie locale régulière ou non ou des conditions écologiques spécifiques créées par le captage du supplément d'eau de ruissellement ?
- l'espèce *Combretum nigricans* se multiplie-t-elle principalement par multiplication sexuée ?
- la diversification de modes de multiplication végétative : rejets de souches, drageons et marcottes des espèces CM et de GS indique-t-elle l'adaptation de ces espèces dans ces milieux ?
- le phénomène du marcottage de GS et de CM est-il fonction des conditions écologiques propres au sous-bois ?

En dehors du constat sur la mauvaise régénération du *Combretum nigricans* qu'il faut noter, il est bien évidemment plus prudent de ne pas interpréter les résultats de ce tableau et de s'en tenir à ces hypothèses qui offrent des perspectives importantes de travail pour comprendre davantage la dynamique des trois systèmes.

Tab. 46 : Répartition des arbustes en fonction des deux modes de multiplication

Espèces	Effectifs totaux observés	Multiplication sexuée	Multiplication asexuée ou végétative		
		Nombre de semis	Rejets de souches	Drageons	Marcottes
<i>Guiera senegalensis</i>	23	3 (13%)	12 (52%)	3 (13%)	5 (22%)
<i>Combretum micranthum</i>	21	7 (33%)	9 (43%)	2 (10%)	3 (14%)
<i>Combretum nigricans</i>	3	2 (66%)	1 (33%)	0	0
Pourcentage moyen par origine des arbustes		37%	43%	8%	12%
Pourcentage moyen par mode de multiplication		37%	63%		

4.2. Discussion des résultats

La dynamique des systèmes écologiques a été étudiée sous l'angle des mécanismes de succession végétale spatio-temporelle. Qu'il s'agisse de l'analyse de la migration de la végétation (à travers les rôles que jouent les trois espèces) ou de l'étude des mécanismes d'adaptation ou de régulation des populations ligneuses, les trois systèmes représentent un cadre privilégié de relations sol-eau-plantes bien agencées.

Les résultats relatifs à la migration spatio-temporelle de la végétation permettent de mettre en évidence trois différentes tendances de processus de colonisation en amont des zones boisées :

- dans le faciès de brousse structurée linéaire (F1), il existe un phénomène de migration des bandes de végétation dans le temps et dans l'espace. Cette migration se fait par front irrégulier mais bien orienté en direction inverse du sens de la pente du plateau. L'influence du supplément d'eau de ruissellement en amont des bandes boisées agit sur cette colonisation qui est nettement supérieure à celle des faciès de brousses mixte et diffuse. Le phénomène de migration est mis en évidence par la progression de GS et ensuite celle de CM ;

- la migration de la brousse diffuse est faible, circulaire et essentiellement évidente dans les lisières des taches de végétation, où l'influence faible des écoulements du surplus d'eau se fait sentir. GS est l'espèce responsable de cette migration. Dans les noyaux de végétation et leurs zones concentriques par contre, la dynamique de colonisation est sans doute plus reliée à des conditions pluviométriques locales qu'à l'effet de la pente ou la redistribution du ruissellement ;

- dans les plaques de végétation du modèle mixte, l'espèce CM colonise l'espace plus que les autres espèces. Ce faciès est caractérisé par une migration moyenne et très hétérogène en raison certainement des deux types d'unités structurales de la végétation (bandes linéaires et taches diffuses de la végétation).

Ces résultats complètent ceux obtenus par Mougenot, d'Herbès et Ichaou, (1996) dans le Sahel nigérien et corroborent l'hypothèse de la migration émise par Ambouta (1984 et 1996) et par Leprun (1992) après une étude diachronique des systèmes contractés du Gourma malien,

L'étude du phénomène de régulation de la population ligneuse permet de comprendre les stratégies d'adaptation du système et des espèces dominantes :

- en F1, il existe deux phénomènes qui se complètent à savoir une faible mortalité des tiges et une sénescence marquée des arbustes en aval de la bande (4,65% du total des tiges). Ce phénomène de sénescence couvre la bande boisée sur 0,15 m contre une colonisation théorique en amont des bandes d'environ 0,585 m annuellement, d'où un gain qui traduit le maintien à long terme de ce système ;

- en F2 un jeu d'équilibre plus réduit se met en place à travers une balance entre migration en amont et sénescence en aval des zones végétalisées. Difficilement mesurable compte tenu de l'hétérogénéité des unités structurales, cette situation est complétée dans ce faciès par une faible mortalité ;

- en F3 seule la mortalité naturelle régule la population avec un pourcentage nettement plus important qu'en F1 et F2. Cette situation serait-elle liée au fonctionnement de ce système qui est très différent de F1 ?

D'un point de vue appliqué, l'analyse des effectifs de tiges mortes donne des détails intéressants pour les exploitants forestiers :

- la mortalité d'un pourcentage dominant de tiges de diamètre à la base < 2 cm et dont la hauteur représente moins de deux mètres semble indiquer qu'elle résulte d'une sélection naturelle dans les trois faciès. Pour les pourcentages de tiges mortes de diamètre à la base ≥ 2 cm, ils sont d'une part non significativement différents entre F1 et F3, mais différent chacun de celui de F2. Par ailleurs en décomposant la totalité des tiges mortes de diamètre à la base ≥ 3 cm, le potentiel de bois mort commercialisable diffère entre les espèces : en F1 cette catégorie de tiges mortes représente 16% pour GS, 15% pour CM et 0 % pour CN ; en F2, CN fournit à lui seul 50% contre 14% pour GS et 14% pour CM. Enfin en F3, CM et CN disposent chacun de 39% contre seulement 5% pour GS.

Le dernier point d'analyse du mécanisme de la régulation de ces systèmes a été l'étude de la structure souterraine de l'enracinement des trois espèces à la suite de trois excavations. Les réseaux racinaires des arbustes permettent de constater que la multiplication végétative est le mode dominant de régénération des milieux. Par ailleurs deux principales hypothèses sont émises sur la multiplication générative qui semble dominante pour l'espèce *Combretum nigricans* et la capacité d'adaptation remarquable des espèces *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis*. Ces deux espèces se régénèrent en effet par le marcottage et le drageonnage, mais principalement par des rejets de souches dans les conditions écologiques particulières du sous-bois.

5 - Changements temporels dus à l'impact des activités humaines influençant les systèmes écologiques

Par définition, le concept de gestion correspond en gros à l'application des normes et des décisions pour contrôler les pressions qui s'exercent sur les ressources. Seulement, contrôler les pressions liées aux activités humaines et animales présente de nombreuses difficultés de suivi à long terme dans des axes divers : exploitation de bois, déboisement pour la mise en culture, feu de brousse, surpâturage, etc. Le suivi effectué s'est limité à une compréhension globale des répercussions de la coupe de bois qui est un facteur actif et immédiat imposant des changements visibles. Pour y parvenir, deux méthodes classiques sont utilisées.

5.1. Tendances de variation des coefficients de survie des ligneux dans les trois systèmes

La courbe d'évolution des coefficients de survie (Sylla, 1985) des ligneux représente un outil satisfaisant qui permet de comprendre l'importance de l'impact des activités, notamment humaines dont la répercussion sur la végétation se manifeste par des changements sur la représentation de la structure. Pour tracer la courbe d'évolution des coefficients de survie (**fig.42**), la procédure suivie est la suivante :

- choix d'une amplitude fixe de variation des classes de diamètre de façon à classer les effectifs de tiges inventoriées et à avoir une représentation détaillée. Pour une amplitude entre deux classes égale à 2 cm, les effectifs de tiges totaux des trois faciès ont servi à constituer dix classes d'effectifs de diamètre à la base : 0 à 2cm, 2 à 4cm, 4 à 6cm, 6 à 8cm, 8 à 10cm, 10 à 12cm, 12 à 14cm, 14 à 16cm, 16 à 18cm et ≥ 18 cm ;

- les niveaux d'évolution de la courbe de tendance sont calculés en divisant l'effectif d'une classe supérieure par celui de la classe qui la précède immédiatement. Soit neuf niveaux ou coefficients suivants déterminés par faciès (tab.47) :

Tab.47 : Valeurs des niveaux de la courbe d'évolution des coefficients de survie par faciès

Faciès	Niveau 1 (-4cm / 0- cm)	Niveau 2 (4- cm / -4cm)	Niveau 3 (- cm / 4- cm)	Niveau 4 (- 0cm / - cm)	Niveau 5 (0- cm / - 0cm)	Niveau 6 (- 4cm/ 0- cm)	Niveau 7 (4- cm/ - 4cm)	Niveau 8 (- cm/ 4- cm)	Niveau 9 (cm / - cm)
F1	0,60	0,35	0,38	0,34	0,29	0,59	0,67	0,88	0,13
F2	0,58	0,51	0,38	0,32	0,49	0,38	0,40	0,47	0,67
F3	0,58	0,45	0,42	0,39	0,59	0,40	0,84	0,53	0,53

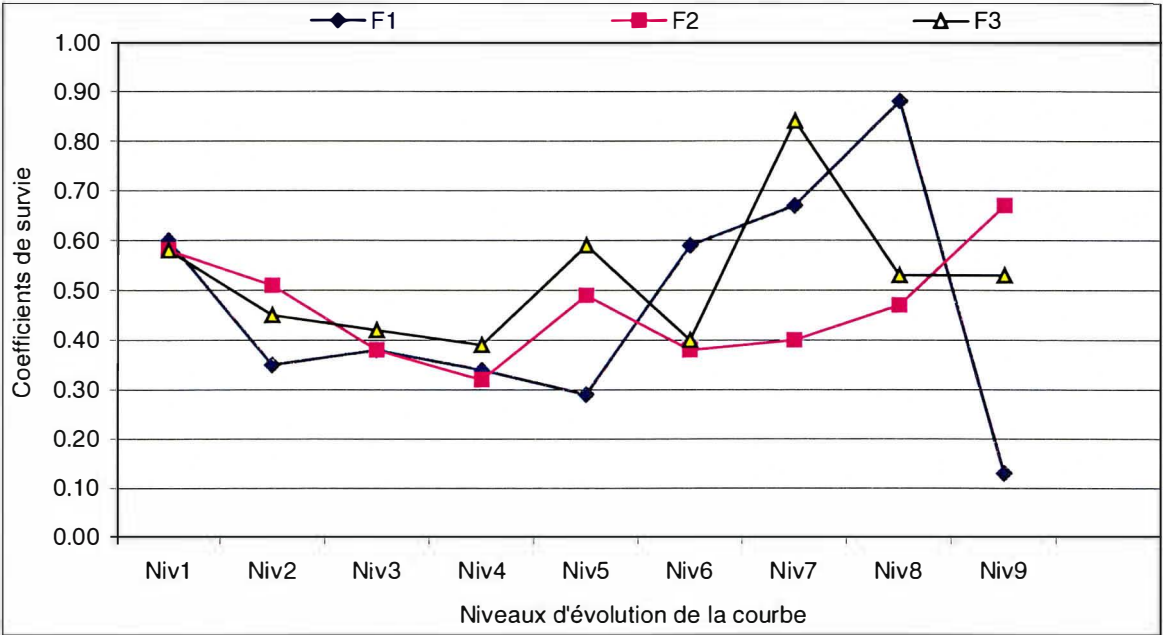


Fig.42 : Courbes d'évolution des coefficients de survie de peuplements des trois faciès

L'interprétation de cette courbe est d'une certaine importance dans l'étude de l'évolution de la végétation à structure composée d'agrégaats en ce sens qu'elle permet de prévoir les conséquences liées à l'intensité des modes d'exploitation. En montrant l'état actuel du creusement de la structure diamétrique, cette courbe permet de prévoir en cas d'aménagement la cadence d'uniformisation des différentes classes de diamètre ou de hauteur. En effet, dans un peuplement inéquienne, certains types de prélèvements peuvent aggraver le déséquilibre de la structure diamétrique qui risque de créer des vides dans les unités structurales.

* La courbe de tendance d'évolution des coefficients de survie du faciès de brousse structurée linéaire (F1) met en évidence quatre faits marquants (voir figure ci-dessus) :

- la chute sensible de la courbe du niveau 1 au niveau 2 correspondrait à la réduction des effectifs par les phénomènes de sélection naturelle et la sénescence. Les tiges concernées sont de faible diamètre à la base (< 2 cm),
- la relative stabilité de la tendance de la courbe entre les niveaux 2 et 5 traduit la régulation des effectifs soit par la mortalité naturelle des tiges (de diamètre < 12 cm) ou leur exploitation,

- la montée de la courbe du niveau 5 au niveau 8 traduit la croissance marquée des effectifs de tiges de diamètre entre 8 et 18 cm dans le cœur du fourré,

- la chute brutale de la courbe pour F, entre les niveaux 8 et 9 correspond à la forte réduction des tiges de diamètre ≥ 14 cm. Cette information et la présence de souches mortes coupées avant l'implantation des parcelles permanentes (notée plus haut dans ce faciès), font comprendre que les prélèvements des gros diamètres interviennent en réalité dans ce faciès. Mais comme prélever dans la zone sénescence ne perturbe pas ce système, on dispose d'un élément de réponse à l'existence de tiges de gros diamètre même en F1.

* La courbe traçant l'évolution des peuplements du faciès de brousse mixte (F2) décrit :

- une régulation modérée des effectifs par la mortalité et la sénescence qui interviennent entre les niveaux 1 et 4 (diamètre ≤ 6 cm),

- le niveau 5 traduit l'existence d'un stock important de tiges de diamètre compris entre 8 et 12 cm,

- la tendance de cette courbe du niveau 6 au niveau 8 indique l'existence d'une coupe sélective avec une intensité qui affecte en partie l'évolution des peuplements dont les tiges atteignent de gros diamètres.

* Enfin la courbe de tendance des coefficients de survie des peuplements du faciès de brousse diffuse (F3) semble comporter deux grandes étapes :

- une première étape allant du niveau 1 au niveau 4 marquée par une régulation de la population par la mortalité des tiges,

- la deuxième étape va du niveau 5 au niveau 9 et est marquée par des prélèvements incontrôlés qui affectent l'évolution du peuplement en réduisant les effectifs dont la survie est faible aux niveaux 6, 8 et 9.

Il semble donc être mis en évidence des prélèvements sélectifs dont l'importance est décroissante du F3 au F1. De ce fait, la répercussion négative se fait sentir en F3, l'évolution est plus importante en F1. Enfin en F2, un déséquilibre est créé par les prélèvements mis en évidence par les niveaux 6 et 7.

5.2. Prélèvements humains déterminés par l'enquête " filière "

Une enquête sur les prélèvements en bois-énergie a permis de se faire une idée sur les tendances de changements qui peuvent être liés à l'impact des activités humaines dans les trois faciès. Les habitants des terroirs qui s'approvisionnent en bois dans trois plateaux (Tientergou F3, Kouré F2 et Dorobobo F1) dont l'accessibilité aux professionnels de la filière bois-énergie est sensiblement la même, ont fait l'objet de sondage durant six semaines par an pendant trois ans (soit trois semaines par an entre novembre et décembre : période froide de forte consommation de bois et trois autres semaines par an entre avril et mai : période de consommation normale de bois). Avec un taux de sondage correspondant à 10% des ménages, les données recherchées étaient :

- la quantité de bois-énergie (en kg) pour l'auto consommation des ménages,
- la quantité de bois-énergie (en kg) destinée à la vente aux professionnels de la filière bois,
- la provenance du bois selon les périodes de l'année (plateau ou terroirs cultivés)
- les diamètres les plus couramment exploités et les espèces préférées.

Il ressort de cette enquête les résultats suivants :

- la consommation moyenne journalière (des 2 saisons) par personne est de $0,82 \text{ kg} \pm 0,02$ dans les ménages des terroirs exploitant la forêt de Tientergou (dont 18% proviennent du plateau et 82% du terroir cultivé), $1,05 \text{ kg} \pm 0,06$ pour Kouré (dont 17% émanent du plateau et 83% du terroir cultivé) et $1,47 \text{ kg} \pm 0,06$ pour Dorobobo (dont 5% viennent du plateau et 95% des parcs à bois et formations forestières résiduelles du terroir),

- les quantités de bois-énergie destinées à la vente (flux de bois dans la filière commerciale qui approvisionne Niamey) proviennent à 90% des plateaux et correspondent à $80 \text{ kg} \pm 22 \text{ ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} pour Tientergou, $37 \text{ kg} \pm 17 \text{ ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} à Kouré et $48 \text{ kg} \pm 12 \text{ ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} pour Dorobobo,

- le diamètre (à hauteur d'homme) moyen des tiges exploitées sur les trois plateaux varie de 4 à 6 cm. En cas de vente, c'est le bois de première qualité (diamètre $\geq 6 \text{ cm}$) qui est proposé, le bois de seconde qualité (diamètre $< 6 \text{ cm}$) étant ramassé par les femmes et les enfants pour les besoins familiaux.

Sur la base de l'ensemble des données d'enquête, on détermine les prélèvements annuels en bois-énergie (cumul de l'auto consommation en milieu rural et le bois commercialisé) se chiffrent à :

- * 173 kg ha^{-1} de plateau an^{-1} ($0,58 \text{ stère ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} , soit l'équivalent de $0,83 \text{ stère ha}^{-1}$ végétalisé an^{-1} si toute la quantité provenait du plateau) dans le massif forestier de Tientergou (F3),

- * $107 \text{ kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ ($0,36 \text{ stère ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} , soit l'équivalent de $0,83 \text{ stère ha}^{-1}$ végétalisé an^{-1} si toute la quantité provenait du plateau) dans le massif forestier de Kouré (F2),

- * et $112 \text{ kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ ($0,37 \text{ stère ha}^{-1}$ de plateau an^{-1} , soit l'équivalent de $0,94 \text{ stère ha}^{-1}$ végétalisé an^{-1} si toute la quantité provenait du plateau) dans le massif de Dorobobo (F1).

5.3. Discussion des résultats

Les calculs des coefficients de survie et leurs courbes donnent des indications qui concordent avec les résultats relatifs aux mécanismes de régulation des peuplements ligneux :

- en F1 et F2, le fonctionnement des unités structurales linéaires se traduit par la chute de la courbe entre les premiers niveaux d'évolution. Les effets de la sénescence et de la sélection naturelle se combinent et justifient la différence non significative entre la mortalité de tiges (de diamètre à la base $< 2 \text{ cm}$) dans ces deux faciès (cf 4.1.2.2 du paragraphe 4). En revanche pour les tiges de diamètre à la base $> 2 \text{ cm}$, l'effet de la mortalité naturelle et des prélèvements variant entre les deux faciès, se traduit par une évolution progressive plus nette de la structure en F1, comparativement à F2 où cette dernière est plus faible à cause de l'impact plus ressenti des coupes ;

- en F3, l'importance des effectifs de tiges mortes qui diffèrent de ceux enregistrés dans les deux premiers faciès est mise en évidence par la descente de la courbe d'évolution des coefficients du niveau 1 au niveau 4. Aussi l'intensité des coupes de tiges de gros diamètres à la base fait adopter à la courbe une allure asymétrique. La structure du peuplement ressent nettement l'effet de coupe des gros diamètres.

Les enquêtes filière bois-énergie d'une durée de six semaines par an, répétées pendant trois, ans donnent une estimation de l'importance des prélèvements en bois-énergie sur trois des sept sites pilotes d'étude. Ces sites sont choisis en fonction de leur accessibilité sensiblement identique et du poids de l'exploitation forestière qui sévit.

En fonction de nos résultats, les prélèvements annuels par hectare ne sont pas en inadéquation avec les potentialités et les accroissements annuels. Ils n'ont pas d'impacts négatifs significatifs à l'heure actuelle :

- sur le plateau de Dorobobo (site témoin des formes d'exploitation en F1), la quantité prélevée de bois-énergie de 0,94 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1} représente 28% des 3,40 stères ha^{-1} végétalisé an^{-1} de productivité réelle de peuplement après exploitation par furetage dans ce faciès (voir 3.1.2.3 paragraphe 3) ;

- dans le cas du plateau de Kouré (site témoin des formes d'exploitation en F2), la quantité prélevée de bois-énergie de 0,83 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1} représente également 28% des 2,97 stères ha^{-1} végétalisé an^{-1} de productivité réelle de peuplement après exploitation par furetage comme indiqué précédemment ;

- enfin, sur le plateau de Tientergou (site témoin des formes d'exploitation en F3), la quantité prélevée de bois-énergie de 0,83 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1} représente 46% de la quantité de 1,81 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1} de productivité réelle de peuplement après exploitation par furetage. Dans ce dernier cas, la situation, loin d'être grave pour traduire des changements visibles, commence à prendre de l'importance.

6 - Conclusion

La tendance d'ensemble des résultats obtenus converge pour mettre en évidence un fonctionnement spécifique à chacun des faciès, d'où résulte une dynamique dans le temps et dans l'espace, qui semble s'expliquer par la faculté des milieux physiques à assurer une compensation de l'action des principaux facteurs écologiques. La première conséquence est une distribution de la végétation selon des modalités précises.

Dans un premier temps, un indice d'efficacité pluviale (IEP) a été calculé pour avoir une appréciation générale de la dynamique dans les trois systèmes. Le calcul de l'IEP est avantageux car l'IEP dépend (selon Le Houérou, 1984) avant tout de l'état dynamique de la végétation et de l'état du modelé (topographie, géomorphologie, pédologie). Cet auteur précise par ailleurs que l'IEP ne dépend que relativement peu du climat, des régimes pluviométriques et de la qualité de la distribution saisonnière des pluies.

Ensuite une approche expérimentale a permis de vérifier dans le détail ce qui se passait dans les zones boisées au cas où la distribution du ruissellement et ses effets sont partiellement ou totalement supprimés en amont. Il ressort de cette expérimentation :

- que les systèmes structurés linéaires (F1) détenant le plus grand IEP ($7,78 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{an}^{-1} \text{mm}^{-1}$) favorisent en 6 ans un accroissement courant cumulé de la surface terrière par hectare végétalisé nettement supérieur à celui des systèmes peu ou pas structurés. Ces faciès sont d'autant plus auto-régulés que la suppression partielle ou totale du supplément d'eau apporté par le ruissellement a un effet négatif significatif sur la croissance des ligneux situés en aval de la bande boisée. Ceci se vérifie aussi par une colonisation herbacée en amont des dispositifs de piégeage du ruissellement d'une part et par le danger réel de la suppression de l'apport d'eau par le ruissellement sur l'évolution de la végétation ligneuse d'autre part ;

- dans les systèmes avec une végétation diffuse (F3), l'IEP indique une dynamique moyenne. Ceci est vérifié par la mise en place des dispositifs expérimentaux de suppression partielle ou totale

du ruissellement. Il ressort que dans ce faciès la dynamique est principalement fonction de la pluviométrie qui tombe et qui conditionne l'installation de la végétation. A cet effet, les accroissements courants cumulés en 6 ans de la surface terrière par hectare végétalisé mesurés entre les deux dispositifs de piégeage du ruissellement et le témoin ne sont pas significativement différents. Il résulte que les dispositifs de piégeage des eaux de ruissellement loin de constituer une entrave à la dynamique, permettent la reconstitution du couvert végétal dans les espaces nus ;

- dans les systèmes mixtes (F2), l'IEP est de 4,2 également et la dynamique s'approche de celle de F1 dans certains cas et de celle du F3 dans d'autres.

Le fonctionnement hydrologique se traduit donc directement par l'efficacité du contrôle de ruissellement et représente l'une des bases fondamentales permettant de comprendre la dynamique des systèmes forestiers contractés. L'approche expérimentale valide les répercussions globales ressorties qui découlent de la dynamique des trois systèmes. Ces résultats corroborent aussi les hypothèses de Le Houérou (1987) qui pense que l'instabilité phytodynamique qu'on attribue aux formes de contraction végétale doit être nuancée. La mise en évidence par l'étude expérimentale du contrôle de la dynamique du flux hydrologique en surface (à travers l'IEP, les accroissements et la colonisation herbacée) montre que le fonctionnement de ces écosystèmes dépend davantage de la topographie, de l'état dynamique des systèmes que de la pluviométrie elle-même.

On est alors outillé pour mieux comprendre les répercussions de ces fonctionnements hydrologique et biologique sur la capacité de régulation et de régénération des trois systèmes, en analysant des données relatives aux composantes ligneuse et herbacée. Bien que les expérimentations conduites n'aient duré que de cinq à six ans, rarement dix ans comme dans le dispositif de suivi et d'évaluation permanent du Projet Energie II, la capacité de régulation et de régénération de chacun des systèmes est mise en évidence après l'étude de ces trois grands processus : variation de la croissance des ligneux sous et sans régime d'exploitation forestière ; variation dans l'occupation horizontale et verticale de l'espace et dans l'organisation sociale des composantes ligneuse et herbacée et enfin variation des fréquences des espèces herbacées. Quels sont les constats essentiels selon les processus étudiés et quelles en sont les aptitudes de chaque faciès à s'auto-réguler et à se régénérer ?

- A tout point de vue, les situations les plus favorables se rencontrent dans les systèmes structurés linéaires comparativement aux systèmes à végétation diffuse ou mixte. Ceci se justifie dans la mesure où le F1 en réduisant son recouvrement végétal crée une situation où la quantité de ressource hydrique disponible permet une meilleure dynamique. Cette affirmation qui *a priori* étonne, se vérifie et met en évidence les conséquences très favorables qui découlent du rôle joué par le cadre physique du faciès F1 : la croissance moyenne en hauteur des rejets, semis et drageons, 6 ans après une coupe rase atteint trois mètres et dépasse celle des deux autres faciès ; dix ans de suivi de taillis après coupe par furetage traduisent une croissance en diamètre des rejets en F1 nettement supérieure à celle dans les deux autres cas. Dans cette expérimentation, il ressort aussi que les souches dont les tiges exploitées ont initialement un diamètre à hauteur d'homme variant de 8 à 14 cm, engendrent la meilleure croissance en diamètre des rejets. La stabilisation de la courbe d'évolution de la croissance des rejets semble indiquer que la classe de diamètre 8 à 14 cm

correspond aux diamètres optimums d'exploitation économiquement viable en F1 (voir courbe d'évolution des coefficients de survie du F1) pour certaines espèces. D'un point de vue de la gestion forestière, cette expérimentation recommande une hauteur de coupe des arbustes inférieure à 20 cm du sol, si l'exploitant coupe juste avant l'hivernage et souhaite disposer d'un grand nombre de rejets de souche qui pourraient atteindre le diamètre commercialisable après 6 ans dans les trois faciès.

- six ans de suivi de régénération dans les témoins (non exploités) indiquent que d'une part l'accroissement courant annuel de la surface terrière est relativement faible et ne dépasse pas $0,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \text{ végétalisé an}^{-1}$, et que d'autre part l'accroissement en hauteur des tiges après six ans n'est que de 40 à 60 cm comparativement à 2 ou 3 m en cas d'exploitation par coupe rase ou par furetage. Il ressort que l'exploitation sélective d'un peuplement forestier qui dispose d'une densité (correspondant à celle déterminée par faciès dans cette étude) de grosses tiges favorise l'évolution des peuplements et constitue un outil de gestion. Dans ce cas, il est important d'estimer la vitesse de cicatrisation des trois systèmes. Et quel est l'effet d'une réactivation des processus biologiques des trois systèmes?

- les aptitudes écologiques du F1 développent une vitesse de cicatrisation 1,53 fois plus rapide que celle du F3 et 1,25 fois plus que celle du F2 ;

- la réactivation des processus biologiques testée en F1 et F3 donne des perspectives intéressantes dans un suivi qui se poursuivrait à long terme. D'ores et déjà en F3, quatre à cinq ans suffisent pour permettre de disposer d'un nombre appréciable de ligneux.

- la stabilité des systèmes contactés serait d'autant plus grande que les trois espèces ligneuses dominantes semblent se multiplier principalement de manière végétative (rejets de souche, marcottes, drageons) et très peu par semis naturels.

Enfin, l'analyse de la structure démographique des herbacées montre que la majorité des espèces régule leur maintien dans ces systèmes par l'augmentation de la fréquence des individus en année de pluies abondantes et leur réduction en cas de sécheresse. Elle permet après trois années d'inventaire de soulever quelques hypothèses relatives à l'utilisation théorique du milieu par les espèces. En effet, l'installation de la majorité des espèces dans les zones homogènes ne se fait pas au hasard. Cette tendance se vérifie par les exigences de ces espèces vis à vis des facteurs sol, lumière et humidité qui interagissent sur la fréquence des individus. Cette dernière devient significativement différente d'une zone homogène à une autre.

L'approche par expérimentation et observation pour comprendre les processus physiologique et démographique des strates ligneuse et herbacée tend à confirmer l'hypothèse de Raunet (1985) qui pensait que la dynamique du flux hydrique en surface dans les milieux étudiés implique une action sur l'évolution et la redistribution locale des matériaux superficiels, qui ont tendance à se répartir contrairement à la végétation qui évolue plus lentement. Il pensait aussi que de cette situation résulte toute une série de rétroactions de processus les uns sur les autres : infiltration privilégiée, développement végétal et dépôt de particules qui aboutissent à un certain équilibre dynamique des systèmes qui par des mécanismes de succession se régénèrent et maintiennent.

L'étude de la phytomasse aérienne a été abordée sous l'angle de l'importance des productions épigées utilisables comme bois-énergie. L'évaluation quantitative de la phytomasse épigée ligneuse globale à l'hectare végétalisé indique que le tonnage de matière sèche pouvant servir

comme bois de feu (tiges de diamètre > 4 cm) en F1 (9,91 T ha⁻¹ végétalisé) est de 1,6 fois plus qu'en F3 (6,23 T ha⁻¹ végétalisé). Cette tendance est la même lorsqu'on compare F2 qui produit 8,87 T ha⁻¹ végétalisé à F3 (soit 1,4 fois plus que la productivité du F3).

La comparaison qualitative des productions favorise les faciès structurés linéaires (masse des tiges de $\varnothing > 6$ cm égale à 6,24 T ha⁻¹ végétalisé soit 63% de la masse totale) et mixtes (5,76 T ha⁻¹ végétalisé soit 65%), comparativement aux brousses diffuses (3,05 T ha⁻¹ végétalisé soit 49%). La validation d'une production supérieure sinon au moins égale des structures végétales linéaires et/ou mixtes face aux brousses diffuses ressort de cette première approche quantitative.

Les productions estimées sur la base des tarifs de cubage de bois-énergie traduisent une tendance décroissante de F1 à F2 puis une chute sensible en F3. Ces tarifs établis disposent d'une bonne précision en F1 et F3. En F2 par contre, en raison du dispositif statistique qui ne semble pas avoir permis une estimation très précise des volumes et poids de bois-énergie (hétérogénéité de la végétation exigeant plus d'efforts de sondage), une utilisation prudente de ces tarifs est à recommander.

En comparant les résultats de production des sites pilotes à ceux des sites de validation, les variances des volumes et des poids estimés par les tarifs de cubage ne sont pas significativement différentes en F1 et en F3. Cette tendance reste identique dans ces mêmes faciès quand on compare les variances des volumes et poids calculés grâce aux coefficients de cubage. En F2, les variances des volumes et des poids calculés avec les deux méthodes d'estimation diffèrent significativement entre les deux échelles.

Par dendrochronologie, l'estimation des âges des tiges a permis d'appliquer deux méthodes indirectes de calcul de l'accroissement annuel ligneux brut, qui est comparé aux accroissements courants et moyens annuels mesurés directement au cours des cinq ans de suivi dans chacun des systèmes. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de calcul de l'accroissement brut annuel et leur analyse décrivent les tendances suivantes :

- les résultats de productivité en stères par hectare végétalisé an⁻¹ du F1 représentent plus du double de ceux de F2 et de F3 ;
- la comparaison des moyennes de productivité calculées par les deux méthodes à l'hectare de plateau an⁻¹ prouvent que les résultats ne sont pas significativement différents à l'échelle d'un même faciès. Ceci est valable pour les trois modes d'expression de l'accroissement annuel ($G_{1,30}$, volume en stères et volume en m³) ;
- à l'échelle inter faciès, les deux méthodes s'équivalent, car les résultats en stères par ha de plateau an⁻¹ ne sont pas significativement différents ;
- la part de chaque espèce ligneuse à la productivité du peuplement diffère significativement entre les faciès ;

Dans une seconde étape la mesure directe des paramètres les moins influencés à travers trois traitements (coupe rase, coupe sélective et témoin non exploité), a permis d'apprécier les accroissements courants et moyens annuels qui décrivent trois grandes tendances :

- les accroissements de la surface terrière ou du volume en stères par hectare végétalisé par an du dispositif de coupe sélective sont deux fois plus importants que les accroissements des

parcelles témoins non exploitées, ce qui tend à soutenir la thèse de la coupe par furetage comme étant un outil d'aménagement forestier ;

- la productivité par hectare végétalisé des systèmes mixtes (F2) ou structurés linéaires (F1) est nettement plus importante que dans les formes d'organisation diffuse de la végétation (F3) ;

L'estimation de la productivité des formations forestières contractées de plateaux sur la base de la connaissance exacte de l'âge et de l'histoire (prélèvements divers) des peuplements donne des résultats supérieurs à ceux qu'indique la littérature relative à cette zone écologique (Catinot, 1994 ; CTFT, 1982 *in* Ichaou 1995 ; Clément, 1982 *in* Ichaou 1995). Ils seraient comparables avec ceux obtenus dans de zones de savanes avec 800 mm de pluies (CTFT : Gonsé et Wayen, 1978 *in* Ichaou 1995 ; Nouvellet : Gonsé, 1985-1991, *in* Ichaou 1995 ; Renes et Coulibaly, 1988, *in* Ichaou 1995).

Par ailleurs, la méthode d'étude de la production herbacée indique que la biomasse produite en moyenne par les trois systèmes au cours des trois ans (1918 ± 118 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F1 ; 1105 ± 102 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F2 et de $1946 \text{ kg} \pm 207 \text{ kg}$ de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ en F3) est relativement importante. Ceci peut s'expliquer par l'apport d'un supplément d'eau de ruissellement dans le bilan hydrique. Sous cette dernière condition, il est normal que ces productivités soient égales à celles observées par Geerling et de Bie (1988) : 2150 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ dans les forêts de Bissiga et Nakabé au Burkina-Faso.

Enfin le dernier paragraphe porte sur l'appréciation des pressions humaines en terme de récolte de bois-énergie, par l'établissement des courbes d'évolution des coefficients de survie des ligneux dont les étapes marquantes concordent avec les résultats traduisant les mécanismes d'adaptation et de régulation des peuplements ligneux. En F1 l'évolution des peuplements ligneux se passe à une cadence normale sous l'effet de la migration en amont des bandes boisées et de sénescence en aval. En F2 et F3 les phénomènes de mortalité et de sélection naturelle se combinent pour réguler la population des tiges ligneuses. Seulement dans ces deux faciès, des coupes sélectives semblent déséquilibrer la structure des peuplements. En fonction des résultats d'enquête répétée sur trois ans, ces prélèvements annuels par hectare ne sont pas en inadéquation avec les potentialités et les accroissements annuels pour représenter des impacts négatifs significatifs sur l'évolution de ces peuplements à l'heure actuelle.

CHAPITRE VI SYNTHESE DES RESULTATS ET DISCUSSION GENERALE

Pour comprendre un phénomène il faut toujours prendre en compte plusieurs niveaux de la hiérarchie. Les niveaux supérieurs ont un rôle contraignant en fixant un cadre au déroulement des processus. Les niveaux inférieurs imposent des conditions limitantes liées par exemple à la nature des éléments dans une hiérarchie emboîtée.

Burel et al. (1992)

CHAPITRE VI : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET DISCUSSION GENERALE

1 - Intégration des paramètres de synthèse déterminant les modèles de structures du niveau de la station à celui de la région

Les niveaux d'intégration des systèmes écologiques étudiés s'inscrivent dans le contexte des plateaux de l'ouest nigérien. Ces derniers sont perçus selon des découpages en aires écologiques relativement homogènes à un niveau de perception donné. Les analyses faites ont privilégié les niveaux unité fonctionnelle ou station et site de plateau pour que la synthèse des résultats soit pertinente. L'objectif visé est de s'appuyer sur les résultats de ces études fines pour valider la typologie des faciès, mettre en évidence les types de relations spatiales, et enfin pour déterminer l'hétérogénéité générale réelle du territoire considéré qui est la base de généralisation des résultats expérimentaux relatifs aux stations.

Cette démarche s'inspire de Blandin et Lamotte (1985) qui indiquent que l'approche biologique est systémique et, à tous les niveaux d'organisation, permet d'analyser des structures et des fonctionnements, de mettre en évidence des interactions, d'établir les liens entre structure et fonction. Ce chapitre vise à faire une synthèse des résultats obtenus pour les mettre en relation et faire ressortir l'importance des paramètres synthétiques ou attributs vitaux déterminés (Aronson and *al.*, 1993, 1995 et 1996). Les attributs vitaux sont des caractéristiques d'un système écologique qui permettent de mettre en relation la structure végétale du système à son mode de fonctionnement, ce qui permet d'envisager sa dynamique et son évolution. La combinaison de certains attributs vitaux représente une valeur qui sert de critère d'évaluation des fonctionnalités ou de la classification de ces systèmes.

1.1. Trois systèmes écologiques prédéterminent trois logiques de fonctionnement

De nombreux arguments ressortent de cette étude pour montrer que la contraction des systèmes écologiques des plateaux dans l'ouest nigérien est régie par trois logiques fonctionnelles nettement différentes. Il est donc important de rediscuter la procédure de détermination des attributs vitaux dont la finalité est d'une part de reconnaître ou pas un des trois faciès et d'autre part de se faire une idée précise des conséquences de chaque mode de fonctionnement en termes d'adaptation et de régulation ou de productivité en biomasse.

Le sens essentiel de la définition de ces attributs est de réduire un grand nombre de données à un petit nombre d'informations utiles pour prendre des décisions. Si un trop grand nombre d'attributs vitaux peut rendre difficile leur choix par les non-spécialistes (public, décideurs politiques, voire privés), cette définition a tenu compte de l'optique de cette thèse qui doit répondre aux attentes des forestiers travaillant sur le terrain et des écologues sur le plan fondamental. Pour cette raison, tout au long de la présentation des résultats, la portée des attributs a été décryptée en référence à des données plus fines qui sont nécessaires pour définir les modalités des actions à entreprendre. Pour les cas des attributs exprimant une relation, leurs éléments constitutifs sont là pour permettre leur interprétation.

Le recours à l'agrégation et à l'intégration a permis sous cette condition la discrimination des variables retenues en fonction de :

- leur pertinence par la contribution dans la définition d'une relation eau - sol - végétation,

- la fiabilité de l'attribut vital pour rester invariant à toutes les échelles d'organisation de la végétation,
- leur sensibilité par la capacité à déterminer un seuil valable de validation,
- l'accessibilité de ces variables, en fonction des compétences et des coûts qu'il faut mobiliser et les problèmes d'échantillonnage qui se posent pour récolter les données,
- leur contribution pour permettre d'élaborer des hypothèses de travail.

Par ailleurs, l'agrégation et l'intégration des paramètres a permis de bénéficier de deux avantages, dont le premier est la possibilité de combinaison d'observations portant sur un même paramètre pour définir l'attribut vital, tout en utilisant des tests statistiques pour valider les questions liées à la variabilité des phénomènes. Le second avantage représente la possibilité de description synthétique des phénomènes complexes qui outre les problèmes d'agrégation de chacun des paramètres, soulève parfois les problèmes liés à la variabilité temporelle des phénomènes, à la prise en compte des interactions et à la multiplicité des unités de mesure ou de surface qui sont normalisées pour permettre les comparaisons entre les faciès.

Quatorze attributs vitaux de nature différente, mais ayant des relations, et trois critères principaux sont déterminés par cette étude pour permettre une caractérisation aisée des trois faciès et de leurs modes de fonctionnement :

Critères de caractérisation des trois faciès de brousses contractées

- le modèle de combinaison des pentes longitudinale et latérale des unités fonctionnelles,
- le recouvrement global de la végétation contractée,
- la présence des espèces ligneuses et herbacées clés de voûte .

Attributs vitaux de caractérisation des trois faciès de brousses contractées

Caractérisation de l'organisation et de la structure de la végétation :

*** selon la structure horizontale du faciès**

- la juxtaposition linéaire ou circulaire des zones homogènes

***selon l'organisation des unités structurales**

- le rapport interbande/bande (RIBB),
- la largeur des bandes boisées,
- l'indice de diversité zonale (IDZ),
- les caractéristiques de l'ellipse équivalente des bosquets dans les unités structurales

(traitement d'image)

Caractérisation du fonctionnement des systèmes écologiques

*** selon les critères taxonomiques**

- le spectre biologique dominant la flore inventoriée
- le recouvrement de chacune des trois espèces : Guiera s., Combretum m. et Combretum n.

***selon la production de biomasse épigée et les accroissements ligneux**

- l'effectif des tiges exploitables (6 cm) par classes de diamètre et par classes de hauteur

***selon la compensation écologique assurée par les facteurs mésologiques**

(topographique, édaphique, géomorphologique et climatique)

- le modèle d'agencement des croûtes d'érosion,
- le pourcentage du supplément d'eau de ruissellement capté (PSR),
- l'indice d'efficacité pluviale (IEP).

Caractérisant de l'évolution des systèmes

*** selon les mécanismes d'adaptation et de régulation des systèmes**

- le taux de mortalité des trois espèces ligneuses : GS, CM et CN,
- le taux de sénescence des trois espèces ligneuses : GS, CM et CN.

***selon les impacts de prélèvements en bois-énergie (activités humaines)**

- la courbe de tendance d'évolution des coefficients de survie des ligneux : GS, CM et CN.

Les natures des quatorze attributs ayant des liens étroits, l'approche systémique utilisée met en évidence des inter relations (**fig.43**), d'où leur pertinence en matière de caractérisation.

1.2. Validation des paramètres écologiques vitaux et mise en évidence des relations entre structure, fonctionnement et dynamique à travers leurs réponses à différentes échelles

En s'inspirant de Burel et *al.* (1992), la compréhension des processus écologiques à l'échelle des plateaux de l'ouest nigérien s'est faite par le changement d'échelle au moment de la récolte des données par des plans d'échantillonnage appropriés d'une part, et d'autre part par le changement d'échelle au moment de l'analyse et la comparaison des résultats. Ces changements d'échelles ont permis de sélectionner les échelles qui correspondent à des changements de niveaux d'organisation, c'est à dire de changements dans la nature des facteurs d'organisation de la végétation (Senft et *al.*, 1987, Wiens et Milne, 1989 *in* Burel et *al.*, 1992). Deux séries de sites ont permis de mettre en évidence ces changements dans la nature des facteurs d'organisation de la végétation :

- les sites dits **lourds** (Banizoumbou et Tientergou) ont permis les études fines à l'échelle de la bande, à celles des unités fonctionnelles et du site de plateau, d'où sont retenues les variables invariantes qui constituent la typologie de base ;
- les sites de **transfert d'échelles** sont au nombre de sept, répartis à l'échelle de la zone d'étude selon des positions latitudinales qui tiennent compte du gradient pluviométrique. Dans chacun des sites, quatre à six transects secondaires de 400 à 600 mètres échantillonnent des unités fonctionnelles de chacun des trois faciès de manière à vérifier le comportement des variables invariantes sélectionnées dans les sites lourds. Après la vérification, les variables invariantes ou leurs combinaisons qui ont gardé les mêmes tendances, sont qualifiées **d'attributs vitaux** qui devraient répondre de la même façon quelque soit l'échelle considérée. C'est donc aux échelles stationnelles ou de l'unité fonctionnelle et du site de plateau que sont définis les déterminants des faciès, et sont expliquées les variations d'occupation spatiale des différents faciès en fonction des particularités mésologiques locales du plateau.

Ainsi, les observations recueillies dans les deux sites lourds dont l'analyse a fourni des éléments de compréhension ou d'explication d'un processus donné, orientent le choix des variables invariantes qui constituent la typologie de base. Ces variables sont ensuite vérifiées dans les stations de transfert d'échelle. Une fois que cette vérification donne des tendances qui confirment leurs

caractéristiques, les variables invariantes constituent "**les attributs synthétiques vitaux**", qui répondent en principe de la même façon quelque soit l'échelle d'analyse.

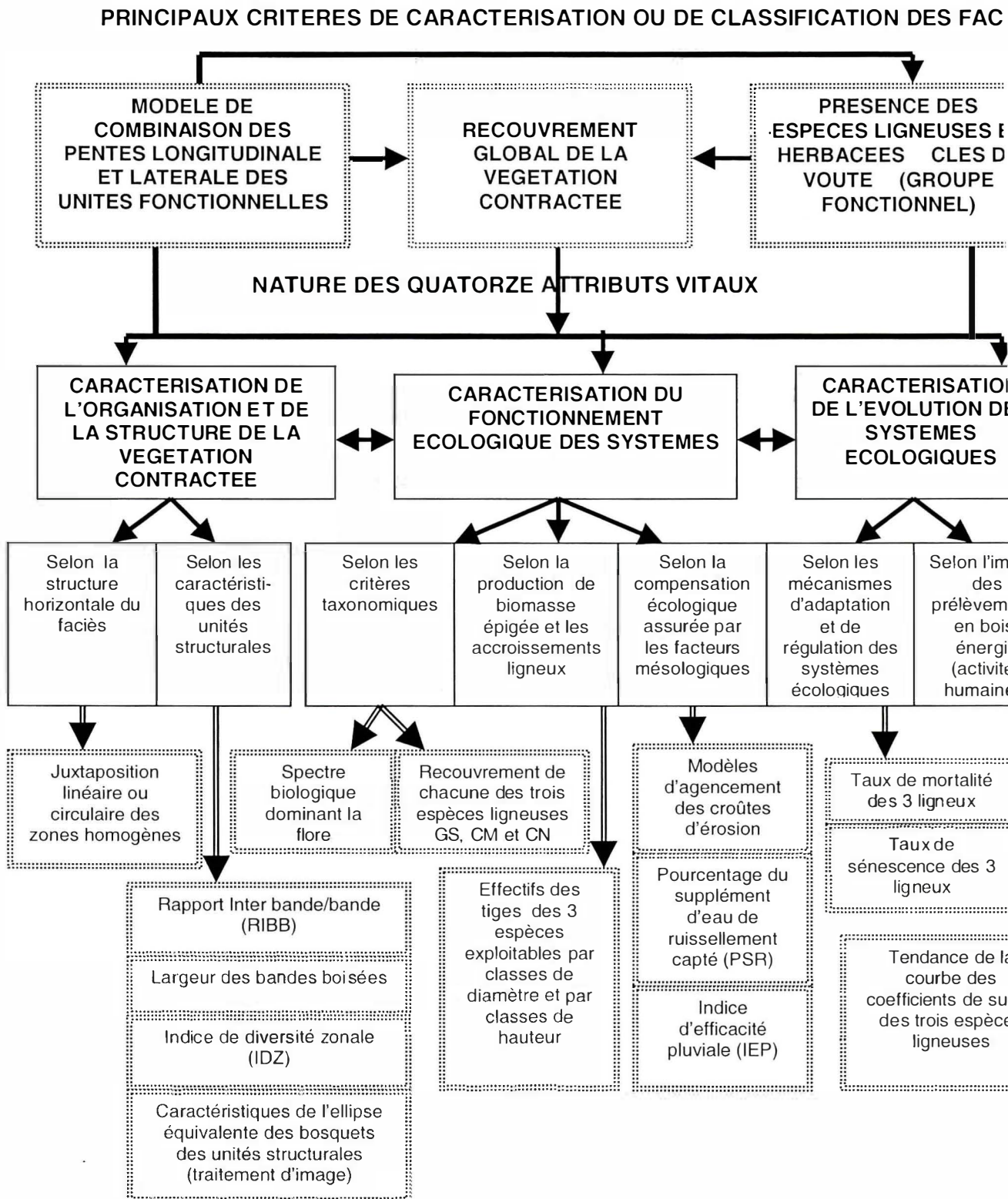


Fig.43 Critères et attributs vitaux définis dans l'optique de la caractérisation ou la classification des faciès de brousses contractées.

Des mesures et observations, permettant de vérifier si les attributs vitaux et les critères sont aptes pour caractériser ou pas un des trois faciès, ont porté sur les vingt sites de validation (184 unités fonctionnelles dont les types de faciès sont identifiés d'avance sur des photos aériennes). En fonction des données synthétiques recueillies, la validation procède par simple comparaison des paramètres synthétiques avec les modèles résultant des mesures, observations et expérimentations dans les trois faciès. La question sous-jacente est de savoir si ces critères et attributs vitaux valident une caractérisation satisfaisante de ces structures végétales contractées, et par analogie entrevoir les modes de fonctionnement et la productivité en fonction de leurs réponses aux échelles ci-dessous.

En raison du nombre important des analyses comparatives effectuées (**voir annexe 1**) entre les mesures dans les sites de validation et celles de définition des critères et attributs vitaux d'une part, et la vérification du type de faciès sur l'image d'autre part, nous adoptons par convention la codification suivante, pour traduire les degrés de caractérisation de chaque faciès, en fonction de la nature de l'attribut vital ou du critère testé :

- degré de caractérisation très satisfaisante du faciès : code 4
- degré de caractérisation satisfaisante du faciès : code 3
- degré de caractérisation moyenne du faciès : code 2
- degré de caractérisation faible du faciès : code 1
- degré de caractérisation nulle du faciès : code 0

1.2.1. Réponse des attributs vitaux à l'échelle d'une station et d'un sous-secteur écologiques

Les mesures de validation intervenues dans les niveaux hiérarchiques d'échantillonnage suivants : station écologique (unité fonctionnelle), faciès (regroupement d'unités fonctionnelles analogues) ou sous-secteur (site ou plateau avec un ou les trois faciès), confrontées aux critères et attributs vitaux, déterminent les degrés de caractérisation suivants (**Tab. 48**) :

1.2.2. Réponse des attributs vitaux à l'échelle du secteur écologique latitudinal et pluviométrique

Le secteur écologique étudié correspond au niveau régional de perception phytoécologique des plateaux de l'Ouest nigérien. C'est la zone d'agencement des trois principaux faciès de brousses contractées de plateaux et de leurs zones de transition. Cet ensemble est étudié par une forte hiérarchisation d'échantillonnage qui va du 15° de latitude Nord (avec un peu moins de 300 mm) jusqu'au sud du 13 ° N pour environ 750 mm.

Comme les sites de validation (**cf. Tab.6**) sont localisés entre les latitudes 14°54' au Nord et 12°47' au Sud, les réponses données (**Tab.48**) par les mesures stationnelles ponctuelles sont les mêmes vis à vis d'un même faciès et quelque soit sa position latitudinale ou pluviométrique. Il existe donc une compensation des facteurs écologiques qui justifie cette situation.

1.2.3. Compensation des facteurs écologiques

A l'échelle des plateaux de l'ouest nigérien, les faciès de brousses contractées s'organisent selon une dispersion bien déterminée avec des filiations. La coexistence entre faciès est possible sur un même plateau, mais dans des zones de transition bien déterminées. Comment s'explique cette situation ? En réalité, il existe un jeu de compensation des facteurs écologiques tant à l'échelle d'une station qu'à celle de la région, d'où le fonctionnement et la genèse de cette forme de végétation :

Tab. 48 Appréciation des degrés de caractérisation des faciès par les critères et attributs vitaux

Eléments analysés		Degré de caractérisation			Observations
		du F1	du F2	du F3	
Critères	Modèles de combinaison des pentes longitudinale et latérale des unités fonctionnelles	4	4	4	L'usage des critères p largement aider à mener actions précises et à prendre décisions car la caractérisation c faciès est précise.
	Recouvrement global de la végétation	4	3	4	
	Présence des espèces ligneuses et herbacées clés de voûte	4	4	4	
Attributs vitaux	Juxtaposition linéaire ou circulaire des zones homogènes	3	2	3	La caractérisation des faciès fonction de la structure horizont et de l'organisation de la végétat est satisfaisante à ces échell. Les utilisateurs potentiels peuv par une analyse coût – avanta retenir le meilleur mode caractérisation qui leur convient.
	Rapport Inter bande/bande (RIBB)	4	4	4	
	Largeur des bandes boisées	3	3	2	
	Indice de diversité zonale (IDZ)	4	4	4	
	Caractéristiques de l'ellipse équivalente des bosquets dans les unités structurales (traitement d'image)	4	1	4	
	Spectre biologique dominant la flore inventoriée	2	2	2	La caractérisation du faciès p son fonctionnement et à trave les critères taxonomiques e également satisfaisante.
	Recouvrement de chacune des trois espèces ligneuses : GS, CM et CN	4	4	4	
	Effectifs des tiges des 3 espèces exploitables par classes de diamètre et par classes de hauteur	4	3	4	Cet attribut vital permet un caractérisation assez facile u fonctionnement des trois faciès
	Modèles d'agencement des croûtes d'érosion	3	3	3	La topographie, la surface modélé et la géomorpholog gèrent le ruissellement selo des modèles de fonctionneme et déterminent les trois faciès.
	Pourcentage du supplément d'eau de ruissellement capté (PSR)	4	3	3	
	Indice d'efficacité pluviale (IEP)	4	2	2	
	Taux de mortalité des 3 ligneux	2	3	4	La régulation des population ligneuses et les prélèvemen de bois permettent c reconstituer l'évolution d systèmes et l'aptitude du milie
	Taux de sénescence des 3 ligneux	4	3	0	
	Tendance de la courbe des coefficients de survie des trois espèces ligneuses	3	3	3	

- à l'échelle stationnelle (unités fonctionnelles) ou à celle des sites de plateaux (coexistence entre faciès) les conditions pluviométriques étant relativement homogènes (**cf. Chap. I, 2 : 2.1.**), la variation des facteurs géomorphologiques (topographie, modelé et croûtes d'érosion) est le facteur déterminant le gradient local de l'organisation de la végétation et du fonctionnement de ces trois systèmes ;

- à l'échelle régionale des plateaux de l'ouest nigérien se situant tous sur le Continental Terminal, où la géomorphologie et la pédologie sont globalement identiques, la variation de l'organisation de la végétation et du fonctionnement de ces systèmes ne peut s'expliquer que par les différences des quantités de pluie, d'où le gradient latitudinal et régional des trois principaux faciès et leur degré de contraction.

La compensation régle à ce titre l'action des principaux facteurs écologiques. Pour cette raison, les résultats d'analyse des structures végétales avec le mode de relation entre elles et la phytomasse peuvent s'expliquer par les répercussions de la correction écologique sur l'efficacité hydrique de chacun des trois faciès (**Chap. III**) et sur l'efficacité trophique (rôle de la faune du sol : termites, etc.) dans les zones homogènes où les espèces clé de voûte se comportent différemment.

2 - Confirmation d'hypothèses, réponses à certaines questions et perspectives d'applications utiles à l'aménagement forestier

Dans l'étude de la variabilité avec des tendances homogènes de l'organisation de la végétation contractée et dans la définition des attributs vitaux et des critères de caractérisation des faciès se sont dégagées des relations entre une structure contractée, son mode de fonctionnement et sa dynamique. Dans l'optique d'une gestion durable, et sur la base de l'ensemble des résultats obtenus, il devient possible d'émettre de nouvelles hypothèses et d'en valider certaines qui ont été émises au départ.

2.1. Hypothèses construites et/ou validées

2.1.1. Hypothèse sur le fonctionnement biologique et hydrologique

A cette étape finale du développement, il est possible de dégager des éléments de réponse à la question centrale posée dans le cadre de la problématique de cette thèse : existe-t-il une configuration donnée de facteurs écologiques sur les plateaux de l'ouest nigérien pour qu'une structure de contraction de la végétation soit plus favorable que d'autres ?

La réponse à cette question est oui. En effet, l'aptitude de ces systèmes contractés est fonction du jeu de correction écologique entre la géomorphologie et la pluviométrie. Par exemple en comparant F1 et F3, le modèle de combinaison de pentes longitudinale et latérale du F1 génère des modèles d'agencement des croûtes d'érosion (cf. **Chap.III : paragraphe 1**) dont l'efficacité théorique de captage du supplément d'eau de ruissellement (cf. **Chap.III : paragraphe 2**) est nettement plus favorable à une activité biologique des espèces clé de voûte et à leur productivité. En F3 par contre, les modèles de combinaison de pentes génèrent des modèles d'agencement des croûtes d'érosion qui traduisent une faible efficacité de récolte d'un supplément d'eau de ruissellement. Par conséquent, l'activité biologique et la production plus faible de phytomasse dépendent essentiellement des quantités de pluies.

2.1.2. Vérification de l'hypothèse de Noy-Meir (1973) relative à la productivité des systèmes contractés

Noy-Meir (1973) pense que la contraction de la végétation en zone aride est non seulement une nécessité, mais peut également créer les conditions d'une production supérieure ou au moins égale à celle d'une formation végétale uniformément répartie. Cette hypothèse, déjà vérifiée par Ichaou (1995) à l'échelle de quelques stations écologiques, se vérifie encore à l'échelle régionale de l'ouest nigérien en fonction des résultats de production de phytomasse épigée ligneuse et herbacée globale, et de la productivité en bois-énergie (cf. **Chap. V paragraphe 3**) qui sont plus importantes dans les faciès structurés linéaires comparativement aux faciès de brousses diffuses.

2.1.3. Hypothèse de la migration des zones boisées

Les résultats d'analyse de la structure horizontale de la végétation dans les trois faciès ont mis en évidence l'existence de trois zones homogènes distinctes dans chacun des faciès. Sur la base d'un lissage des surfaces de tendance de variation des âges des ligneux entre les trois zones, les processus directionnels apparus mettent en relation les fonctionnements biologique et hydrologique en F1. Par analogie à ce système, il est déduit l'agencement des âges des arbustes dans les zones homogènes des deux autres faciès.

Une régression calculée entre les âges (déterminés par dendrochronologie) et la distance séparant les arbustes au repère formé par la limite des croûtes de décantation en amont immédiat des zones boisées, permet d'estimer la migration dans le temps du peuplement ou de chaque ligneux

dans les trois faciès. En comparant les distances de progression annuelle moyenne, il ressort que la dynamique des peuplements est nettement plus marquée mais très irrégulière dans le faciès de brousse linéaire (F1) ; elle est très faible en F2 et relativement insignifiante dans le faciès de brousse diffuse (F3).

L'orientation de cette migration se fait selon différentes tendances du processus de colonisation en amont des zones boisées :

- dans le faciès de brousse structurée linéaire (F1), le phénomène de migration des bandes de végétation se fait par front irrégulier mais bien orienté en direction inverse du sens de la pente du plateau. Sous l'influence du captage du supplément de ruissellement en amont des bandes boisées, cette colonisation est nettement supérieure à celle des faciès de brousses mixte et diffuse et est mise en évidence par la progression de *Guiera senegalensis* et ensuite celle de *Combretum micranthum*. Les marcottes et les drageons seraient entre autres responsables de cette progression. Ces formes de multiplication végétative seraient des outils importants, permettant un développement rapide du clone et une colonisation optimale du site ;

- la migration dans le faciès de brousse diffuse est faible, circulaire car elle est essentiellement perceptible dans les lisières des taches de végétation, où l'influence faible des écoulements du surplus d'eau se fait sentir. *Guiera senegalensis* est également l'espèce responsable de cette migration.

- dans les plaques de végétation du faciès de brousse mixte, *Combretum micranthum* est l'espèce qui colonise le plus l'espace. Ce faciès est caractérisé par une migration moyenne et très hétérogène en raison probablement de l'existence des deux types d'unités structurales de la végétation (bandes linéaires et taches diffuses de la végétation).

2.1.4. Hypothèse d'une conservation de la diversité

Notion écologique fondamentale dont les conséquences sont de première importance, bien qu'encore controversées (Bachelier, 1978), la diversité serait liée à la stabilité des systèmes. Savoir s'il y a conservation de la diversité n'aurait de sens que par rapport aux conséquences économiques et écologiques potentielles de la dégradation de la biodiversité. La question cruciale que se pose cette étude est la suivante : les écosystèmes contractés fonctionnent-ils différemment d'écosystèmes de zones plus humides ? Les éléments de réponse ne peuvent être discernés qu'à travers l'intensité des processus fonctionnels de ces systèmes, tels que la productivité primaire. Or la phytomasse aérienne globale par unité de surface végétalisée des systèmes les plus contractés dépasse celle des systèmes avec une distribution plus homogène de la végétation. Nous serons donc tenté de croire à une conservation de cette biodiversité dans les systèmes les plus contractés étudiés.

Ceci concorde avec la conclusion tirée des calculs de trois indices différents de similarité entre les trois faciès. On a l'impression finalement qu'en se situant en F1 (structures végétales fortement contractées) ou en F3 (structures végétales diffuses), en gros la plus grande contraction n'a pas d'effets sur le nombre d'espèces, et sur la dégradation de la diversité. La contraction de la végétation représente à cet effet un atout écologique et même une nécessité pour se maintenir.

2.1.5. Hypothèse d'une résilience acceptable des systèmes face aux caractères climatiques hostiles

L'accumulation de résultats et d'arguments qui montrent qu'en passant de 300 à environ 800 mm, on ne perd ni la qualité, ni la quantité des productions biologiques, constitue un indice révélateur du pouvoir de correction écologique par lequel les systèmes étudiés augmentent potentiellement la quantité de l'eau disponible pour les plantes.

La résilience des systèmes les plus contractés est acceptable malgré les caractères climatiques hostiles (vitesse de cicatrisation, diversification des modes de régénération de la végétation, etc.). Ces propos rejoignent l'idée de leur stabilité, car lorsqu'un des facteurs principaux (géomorphologie et pluviométrie) à la base de leur fonctionnement se modifie, la réaction de l'autre tend alors à réduire les conséquences de ce changement.

La stabilité à moyen terme serait d'autant plus grande que les trois espèces ligneuses dominantes semblent adopter deux stratégies de régénération : par graines et par multiplication végétative selon les années et les conditions écologiques locales. Les quelques observations effectuées sur les structures linéaires à l'heure actuelle, permettent de penser qu'elles se multiplient principalement de manière végétative (rejets de souche, marcottes, drageons) et très peu générativement (semis naturels). On serait souvent en présence de plages de clones (Bellefontaine et al., 1999 et 2000) dans les cœurs des fourrés et les fronts pionniers.

De nombreux ouvrages d'écologie attribuent à la stabilité une composante statique (permanence des conditions environnementales) et une autre qui est dynamique (la résilience ou l'aptitude du milieu à tendre vers un équilibre relatif en cas de perturbation). La contraction semble donc être favorable pour qu'une auto-régulation maintienne les systèmes les plus contractés à un niveau satisfaisant de stabilité et de productivité.

2.2. Applications déduites utiles à la gestion sylvo-pastorale

Les agrégations successives des données récoltées et traitées par niveau d'échantillonnage du dispositif emboîté, permettent la généralisation des conclusions des analyses dans un domaine de validité acceptable. Pour cette raison, nous assumons le risque d'envisager une évolution des peuplements ligneux qui pourrait être prévisible et ordonnée selon les scénarios suivants :

2.2.1. Régime forestier sans changement de la composition initiale des peuplements

A l'état actuel des connaissances acquises sur les structures forestières contractées de plateau, l'idéal serait d'adopter le principe de la prudence en cas de doute, en envisageant une évolution directionnelle de ces systèmes qui respecte l'autorégulation que la nature adopte. Seules quelques activités de plantation artificielle ou de multiplication végétative des trois espèces ligneuses pourraient être proposées dans les zones homogènes suivantes :

- la partie du front pionnier colonisée par les herbacées des structures linéaires (F1), à condition de ne pas perturber le modelé et gêner les transferts horizontaux hydriques,
- les zones de lisières des bosquets ou même les espaces nus de la brousse diffuse (F3).

Ce scénario correspond au respect des espèces ligneuses clé de voûte dans les trois faciès et à l'amélioration de leur activité productive.

2.2.2. Régime forestier avec adoption d'une nouvelle composition des peuplements

Dans le chapitre IV (paragraphe 2), il a été mis en évidence que la physionomie des trois faciès est respectivement marquée par les espèces ligneuses suivantes par ordre d'importance :

- F1 : *Combretum micranthum* ;
- F2 : *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis* ;
- F3 : *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans* et *Guiera senegalensis*.

Dans le chapitre V (paragraphe 4) il est apparu que la dynamique spatio-temporelle de chacun des trois systèmes semble commandée respectivement par les espèces ligneuses suivantes :

- F1 : *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum* ;
- F2 : *Combretum micranthum* ;
- F3 : *Guiera senegalensis*

Enfin, rappelons la contribution de chacune des trois espèces ligneuses dans la productivité en bois-énergie des faciès (Chap V, paragraphe 3 : 3.1.2.1.) qui représente :

- en F1 : GS = 26% ; CM = 69% ; CN= 05% ;
- en F2 : GS = 30% ; CM = 57% ; CN= 13% ;
- en F3 : GS = 15% ; CM = 30% ; CN= 55%.

Sur la base de ces trois résultats, il est possible tout en respectant le fonctionnement biologique des systèmes de proposer la nouvelle composition suivante des peuplements dans les faciès :

- en F1, réduction importante de l'espèce *Combretum nigricans* pour faire émerger l'activité biologique de CM et GS ce qui permettrait une réduction de l'hétérogénéité spatiale et une harmonisation de la stratification végétale.

- en F2, réduction marquée de l'espèce *Combretum nigricans* pour faire émerger l'activité biologique de GS et homogénéiser la structure démographique des tiges.

Ces nouvelles compositions offriraient l'avantage d'un gain de la productivité ligneuse sans perturbation de l'état d'équilibre dynamique des deux faciès.

2.2.3. Durée de rotation et quota d'exploitation forestière

La durée de la rotation ainsi que le quota d'exploitation de bois-énergie adoptés actuellement dans le cadre des marchés ruraux de vente de bois-énergie dans la région de Niamey (par concertation entre les techniciens forestiers et les exploitants) ne présentent aucune garantie justifiable pour éviter l'épuisement des stocks.

Par rapport à la composition actuelle (sans adoption d'une nouvelle composition des peuplements) et aux volumes sur pied des tiges de diamètre exploitable, qui correspondent à 21% du total des tiges en F1 ; 15% en F2 et 13% en F3 (c.f. chap.IV, Paragraphe 2), les quotas totaux à prélever ne doivent pas dépasser 3/4 des tiges exploitables (soit 16% en F1 ; 11% en F2 et 10% en F3). En prédestinant le quart restant de tiges exploitables pour la production des semences, la multiplication générative des peuplements ligneux serait possible.

Par ailleurs, en fonction des résultats expérimentaux sur les accroissements courants annuels des tiges ligneuses d'avenir après furetage (chap.V, paragraphe 3) dans les parcelles permanentes, il est possible de calculer la possibilité (qui tient compte des prélèvements estimés par l'enquête

filière). Cette possibilité équivaut à l'accroissement net annuel (accroissement annuel des tiges d'avenir moins la quantité de bois-énergie théoriquement prélevée par an par les villageois) et représente par faciès :

- en F1 : $(1,47 - 0,37) = 1,10$ stère ha^{-1} de plateau an^{-1} (ou 2,47 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1}) ;
- en F2 : $(1,13 - 0,36) = 0,77$ stère ha^{-1} de plateau an^{-1} (ou 2,14 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1}) ;
- en F3 : $(1,59 - 0,58) = 1,01$ stère ha^{-1} de plateau an^{-1} (0,98 stère ha^{-1} végétalisé an^{-1}).

En tenant compte de cette possibilité nette et des accroissements des trois ligneux dominants il faudrait une durée de rotation d'environ six ans (nombre d'années qui sépareront deux coupes successives par furetage dans une même parcelle) pour que les trois faciès disposent d'un stock de bois-énergie appréciable.

2.2.4. Utilisation des paramètres vitaux et simplification des inventaires forestiers classiques

D'un point de vue appliqué, l'optique de cette étude, de mettre en relation structure, fonctionnement et dynamique des systèmes contractés de plateaux, vise la définition de **critères et d'attributs vitaux** qui permettent une caractérisation satisfaisante ou mieux une classification automatique de ces formations sur toute l'étendue de l'ouest nigérien. Ceci se justifie par des enjeux écologiques et économiques que représente la superficie de ces systèmes de production sylvo-pastorale qui occupent les 2/3 des surfaces forestières productives du Niger. Le bois-énergie consommé dans les principales villes du pays provenant essentiellement de ces types de formation, leur aménagement pour une gestion durable s'impose.

Dans le cadre de la Stratégie Energie Domestique (axe de la politique forestière nationale) mise en œuvre depuis douze ans pour l'aménagement et la gestion des systèmes de production forestière, le manque crucial de données de base sur la productivité de ces formations, auquel se heurtent encore les services forestiers est préoccupant. Cette situation entrave l'objectif d'aménager de manière simplifiée et à faible coût la plupart des surfaces forestières.

Une meilleure connaissance écologique des systèmes forestiers contractés des plateaux, la mise au point de méthodes permettant aux agents de terrain de reconnaître les types de faciès, comment ils fonctionnent, qu'est-ce qu'ils produisent, constituent des attentes réelles. La définition des critères et des attributs vitaux représente un transfert de connaissances scientifiques fondamentales vers leur application directe et donne l'opportunité de :

- prévoir en gros les quantités de bois-énergie exploitable dans un système forestier contracté de cette zone ;
- modifier et de simplifier les approches des inventaires forestiers classiques au sol qui constituent l'une des charges financières les plus lourdes du coût à l'hectare d'un aménagement forestier classique ;
- permettre à l'avenir une cartographie automatique des systèmes et de leur production dans un SIG (système d'informations géographiques),
- gérer ces écosystèmes en fonction des résultats de suivi écologique à long terme.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Cette étude qui concernait les principales structures forestières contractées des plateaux de l'ouest nigérien répond à deux objectifs :

- apporter de nouvelles connaissances sur ces structures typiques ;
- donner des éléments supplémentaires permettant de mieux les différencier en vue de leur aménagement et de leur gestion durable en tant que sources de bois d'énergie et de pâturage pour les populations.

Elle repose sur une forte hiérarchisation des échelles en vue d'analyser des stations écologiques réparties sur un transect de 300 km correspondant à un gradient pluviométrique compris entre 300 et 800 mm environ. Ceci permet de prendre en compte les variations de ces structures végétales contractées qui sont typiquement linéaires au nord de la zone et se modifient progressivement vers le sud, passant à des formes plus diffuses et définissant ainsi plusieurs faciès.

Pour atteindre ces objectifs, le cadre physique, la végétation et la flore ont été étudiés et mis en relation afin de comprendre le fonctionnement de ces systèmes en terme de dynamique spatio-temporelle.

La principale hypothèse de travail a été que l'alternance de bandes de sol nu et de bandes de végétation, comme on les rencontre au nord du transect, crée des conditions écologiques particulières permettant le développement de la végétation dans des milieux *a priori* défavorables. Cette hypothèse est testée par l'étude du cadre physique, à travers le rôle qu'il joue dans la redistribution du flux hydrique de surface et par-là même, sur la végétation et son organisation, sur la flore et enfin sur les niveaux de productivité.

L'ensemble des résultats, qu'ils concernent la végétation, la flore ou la productivité convergent et confortent l'idée selon laquelle les zones de sols nus jouant le rôle d'impluvium doivent être considérées comme une "ressource" supplémentaire d'eau par rapport à l'eau fournie par les précipitations. Ceci se vérifie car en fonction du modèle de combinaison des pentes longitudinale et latérale des impluviums, un mode de fonctionnement hydrique bien particulier se met en place, caractérisant chaque faciès et influençant sa productivité.

A ce titre, les faciès de brousses les plus contractées à structure linéaire, sont dotés d'un fort pouvoir de correction écologique due aux facteurs géomorphologiques, par lesquels la pluviométrie est efficacement gérée pour être mise à la disposition des zones végétalisées. Une accumulation d'arguments parfaitement concordants se dégage et met en relief l'efficacité du fonctionnement biologique et hydrique des structures linéaires face aux faciès de brousses mixtes et/ou diffuses.

Quelques principaux résultats appuyant cette affirmation sont repris ci-dessous :

- Les données mésologiques permettent une description fine de la configuration des plateaux, où les combinaisons de pentes longitudinale et latérale déterminent des seuils théoriques d'efficacité de récolte d'eau de ruissellement par les systèmes. La répercussion directe des suppléments d'eau captés (à prendre en compte dans les bilans hydriques) se traduit par l'hétérogénéité des profils de sol et la variabilité du modelé. En effet, la pente conditionne la production d'un ruissellement, assure son contrôle et engendre des modèles d'agencement des croûtes d'érosion qui sont les indices témoins des flux hydriques en surface.

- L'analyse de l'ensemble des facteurs mésologiques supposés actifs met en évidence l'existence d'un réseau de relations qui permettent une compensation écologique dans ces milieux semi-arides. La correction du facteur pluie semble la plus évidente dans les systèmes structurés linéaires qui sont plus aptes à maîtriser le ruissellement et à capturer un supplément d'eau. Ensuite viennent par ordre décroissant les structures mixtes et les structures les plus diffuses qui ne semblent subsister qu'avec les seules quantités de pluies, le captage d'un supplément d'eau de ruissellement étant très faible.

- Ainsi, pour de mêmes conditions pluviométriques à l'échelle locale, c'est le cadre physique (géomorphologie, modelé, pente..) qui est le facteur déterminant du fonctionnement de ces structures forestières contractées. Cette première condition justifie l'existence de structures différentes sur un même plateau avec une quantité égale de pluie. Par contre à l'échelle régionale, c'est la pluviométrie qui conditionne le gradient de contraction végétale, plus accentuée au nord et qui disparaît progressivement vers le sud, où ces structures sont diffuses.

- L'une des premières conséquences qui résulte de l'efficacité d'utilisation des ressources hydriques par le milieu physique est la répartition (structure) de la végétation dans les trois systèmes. L'application de méthodes descriptives (quadrats et transects linéaires) et analytiques permet de discriminer les principaux facteurs susceptibles d'intervenir dans l'organisation de la végétation, qui sont d'ailleurs les mêmes que ceux qu'on pourrait évoquer dans la détermination de la diversité biologique.

- En étudiant les structures végétales, se dégagent des tendances de processus directionnels décrits par les âges des ligneux. Trois zones homogènes, zone pionnière ou lisière du bosquet, cœur du fourré ou noyau du bosquet et zone de sénescence ou zone concentrique, mises en évidence correspondent parfaitement à celles (lisière, sous-bois et zone ensoleillée) que décrivent la fréquence des herbacées dans chacun des faciès. Il résulte des groupements fonctionnels végétaux spécifiques aux faciès et aux zones homogènes.

- En analysant de manière combinée l'organisation de la végétation et le fonctionnement hydrique de chaque système, on détermine dans chaque cas, une efficacité théorique du contrôle de ruissellement et de la gestion de l'eau en surface. Cette approche permet de comprendre et de mieux interpréter les bases fondamentales de la dynamique de ces trois systèmes forestiers contractés.

- Au préalable, une approche théorique qui consiste à calculer l'indice d'efficacité pluviale (IEP) traduisant l'équilibre de chacun des systèmes, a démontré que les aptitudes d'utilisation rationnelle du flux hydrologique de surface décroissent des structures végétales linéaires vers les structures diffuses. Ceci est vérifié par des expérimentations avec des modalités de suppression partielle ou totale de l'apport supplémentaire d'eau de ruissellement.

- Des mesures d'accroissements ligneux, de la productivité en bois-énergie, l'étude de la dynamique spatio-temporelle et de la capacité d'autorégulation de chacun des faciès montrent que :

+ l'accroissement courant cumulé de la surface terrière des tiges ligneuses par ha végétalisée, est nettement plus important dans les faciès de brousse linéaire que dans les deux autres faciès ;

+ les accroissements de la surface terrière ou du volume en stères par hectare végétalisé par an du dispositif de coupe sélective sont deux fois plus importants que les accroissements des parcelles témoins non exploitées ;

+ la productivité en bois-énergie par hectare végétalisé des systèmes à organisation mixte ou totalement structurée linéaire est plus importante que dans les formes d'organisation diffuse de la végétation ;

+ la phytomasse épigée ligneuse (tiges de $\varnothing > 6$ cm) représente $6,24 \text{ T ha}^{-1}$ végétalisé dans le faciès de brousse structurée, comparativement à $5,76 \text{ T ha}^{-1}$ végétalisé dans le faciès de brousse mixte. Ces deux niveaux de production diffèrent significativement de celui du faciès de brousse diffuse qui est de $3,05 \text{ T ha}^{-1}$ végétalisé ;

+ les répercussions du fonctionnement hydrologique sur la capacité de régulation et de régénération des trois systèmes sont évidentes. Un suivi de la régénération sans coupe et après coupe a permis de comprendre qu'en absence d'exploitation forestière, l'évolution du peuplement ligneux paraît faible dans ces formations forestières de plateaux ;

+ le calcul de la vitesse de cicatrisation des peuplements ligneux après coupe rase montre que le faciès de brousse structurée linéaire est doté d'une grande capacité de reconstitution. Dans ce faciès, cette vitesse est de 1,25 fois plus grande que celle des structures mixtes. Par rapport aux structures diffuses, elle est de 1,53 fois plus grande. Le faciès de brousse mixte présente à son tour une vitesse de 1,22 fois plus grande qu'en brousse diffuse ;

+ le suivi de l'évolution de la strate herbacée dans les trois faciès permet de constater qu'il existe une forte proportion d'espèces ombrophiles. Ceci tend à mettre en relation les fonctionnements hydrologique et biologique. Les sous-bois abritent de nombreuses espèces sciaphiles prouvant que le recouvrement est très important à ces niveaux. Les lisières et les zones ensoleillées comportent en majorité des espèces héliophiles et/ou aimant les sols limono-sableux, ce qui confirme l'existence des dépôts de colluvions et d'alluvions ;

+ la quantification de la phytomasse épigée herbacée situe les niveaux de productivité à $1918 \pm 118 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F1, $1105 \pm 102 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F2 et $1946 \text{ kg} \pm 207 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en F3. Ces productions sont relativement proches de celles observées en zone soudanienne ;

+ l'évaluation des mécanismes de succession végétale spatio-temporelle indique que la migration de la végétation se combine à la sénescence de certaines tiges et à la mortalité pour réguler les populations ligneuses dans un cadre privilégié de relations sol-eau-plantes bien agencées ;

+ dans le faciès de brousse structurée linéaire, il existe un phénomène de migration des bandes de végétation dans le temps et dans l'espace. Cette migration se fait par front irrégulier mais bien orienté en direction inverse du sens de la pente du plateau. L'influence du supplément d'eau de ruissellement en amont des bandes boisées agit sur cette colonisation qui est nettement supérieure à celle des faciès de brousses mixte et diffuse. Le phénomène de migration est mis en évidence par la progression de l'espèce *Guiera senegalensis* et ensuite celle de l'espèce *Combretum micranthum*. Ces deux espèces adoptent une stratégie remarquable de régénération végétative, par marcottage, par drageonnage et surtout par rejets de souche pour assurer cette colonisation en amont des bandes ;

+ la migration de la brousse diffuse est faible, circulaire et essentiellement évidente dans les lisières des taches de végétation, où l'influence faible des écoulements du surplus d'eau se fait sentir. *Guiera senegalensis* est l'espèce responsable de cette migration. Dans les noyaux de végétation et leurs zones concentriques par contre, la dynamique de colonisation est sans doute plus reliée à des conditions pluviométriques locales qu'à l'effet de la pente ou la redistribution du ruissellement ;

+ dans les plaques de végétation du faciès de brousse mixte, l'espèce *Combretum micranthum* colonise l'espace plus que les autres espèces. Ce faciès est caractérisé par une migration moyenne et très hétérogène en raison certainement des deux types d'unités structurales de la végétation (bandes linéaires et taches diffuses de la végétation).

- Quatorze attributs vitaux de nature différente et trois critères principaux sont proposés dans cette étude pour permettre une caractérisation aisée des trois faciès ou de leurs modes de fonctionnement.

- Par ailleurs, des applications utiles à la gestion forestière sont déduites et peuvent servir dans le cadre d'un aménagement bien contrôlé. Tout en respectant le fonctionnement des systèmes, il est possible de mettre en œuvre les nouvelles compositions suivantes des peuplements dans les faciès :

+ dans les faciès linéaires, réduction importante de l'espèce *Combretum nigricans* pour faire émerger l'activité biologique des espèces *Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis*, ce qui assurera une réduction de l'hétérogénéité spatiale et de la stratification de la végétation ;

+ au sein des structures mixtes, réduction marquée de l'espèce *Combretum nigricans* pour faire émerger l'activité biologique de *Guiera senegalensis* et homogénéiser la structure démographique des tiges.

- En fonction des résultats expérimentaux sur les accroissements courants annuels des tiges ligneuses après furetage, il est possible de calculer une possibilité (qui tient compte des prélèvements estimés par enquête). Cette possibilité équivaut à l'accroissement net annuel suivant en bois-énergie (prélèvements locaux déduits) :

+ dans les faciès de brousses linéaires = $1,10 \text{ stère ha}^{-1} \text{ de plateau an}^{-1}$ (ou $2,47 \text{ stère ha}^{-1} \text{ végétalisé an}^{-1}$) ;

+ dans les faciès de brousses mixtes = $0,77 \text{ stère ha}^{-1} \text{ de plateau an}^{-1}$ (ou $2,14 \text{ stère ha}^{-1} \text{ végétalisé an}^{-1}$) ;

+ dans les faciès de brousses diffuses = $1,01 \text{ stère ha}^{-1} \text{ de plateau an}^{-1}$ ($0,98 \text{ stère ha}^{-1} \text{ végétalisé an}^{-1}$).

Sur la base de cette possibilité nette, il faudrait une durée de rotation de six ans entre deux coupes successives par furetage dans une même parcelle pour que chacun des trois faciès puisse disposer d'un stock de bois-énergie appréciable.

A tout point de vue, les conditions les moins favorables se rencontrent dans les structures mixtes ou diffuses. Qu'il s'agisse de la production de phytomasse épigée, de la productivité et de la croissance des ligneux ou de la prise en compte de la flore herbacée (associations et exigences écologiques), les résultats obtenus semblent indiquer un avantage décisif des structures contractées en bandes, dont le fonctionnement hydrique traduirait en plus une nette stabilité du système.

Finalement si certains de nos résultats sont tout à fait concordants avec l'état des connaissances fonctionnelles antérieurement acquises dans cette frange sahélienne, d'autres remettent en question la vision qu'on avait sur les systèmes contractés qui sont souvent assimilés à une dégradation du milieu. Les espaces nus qui représentent une ressource, avec un fort pouvoir de correction écologique, ont été considérés comme des espaces perdus par la dégradation et qu'il faut à tout prix révégétaliser !

En terme de perspective, les recherches exposées dans ce mémoire, bien qu'ayant abouti à des nouveaux résultats intéressants qui contribuent à améliorer la connaissance des structures végétales contractées, ne sont pas une fin en soi et ne doivent pas masquer leurs imperfections et leurs limites. En fonction des questions que posent les résultats obtenus, il s'impose à nous d'orienter les recherches dans cette région vers de nouvelles pistes et à optimiser celles que nous avons proposées. Les filières suivantes doivent être explorées :

- valider les hypothèses émises sur le fonctionnement hydrique des zones homogènes dans les faciès de brousses diffuse et mixte, par des mesures de suivi d'humidité du sol ;
- tester à toutes les échelles de l'ouest nigérien la pertinence et la puissance des attributs vitaux dans la caractérisation des trois faciès et dans la détermination des relations entre un faciès de brousse contractée, son fonctionnement et sa dynamique ;
- mettre au point une cartographie automatique des ressources sylvo-pastorales, pour faciliter la tâche des agents de développement ;
- parvenir à une simplification de l'approche des inventaires forestiers au sol et à une estimation rapide et fiable des volumes de bois énergie sur pied qui permettent non pas la mise sous aménagement simplifié de quelques massifs forestiers contractés de plateaux, mais l'ensemble des systèmes dans la partie occidentale du Niger ;
- appliquer certains résultats dans un plan d'aménagement intégré et multidisciplinaire du territoire national ;
- développer des méthodes de suivi de la dynamique de régénération des trois espèces ligneuses étudiées à travers leurs réseaux racinaires et des mesures de leur accroissement ;
- intégrer ces résultats dans de modèles prévisionnels du fonctionnement interactif entre les systèmes écologiques et les systèmes humains après une évaluation plus conséquente de l'impact des activités humaine et animale ;
- poursuivre le suivi des parcelles permanentes dans le but d'en tirer des normes fiables de suivi environnemental et de gestion durable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACHARD F., 1990 - Pastoralisme et écosystèmes forestiers contractés du sud du Niger : Ressources fourragères et impact du pâturage sur la forêt. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*, (Actes séminaire inter. Niamey 1995), 9p

ACHARD F., 1990 - Place de la brousse tachetée à Combrétacées dans les systèmes d'élevage soudano-sahélien. *Rapport Ministère de l'hydraulique et de l'Environnement*, Niamey Niger, 43p

AKE ASSI L., 1984.- Flore de la Côte d'Ivoire - Etude descriptive et biogéographique, avec quelques notes ethnobotaniques. *Th Doc.ès Sc Nat.* TII, Univ. d'Abidjan, 1098p.

ALBERGEL J., RIBSTEIN P. et VALENTIN C., 1986 - L'infiltration : quels facteurs explicatifs. Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journ. hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. *Coll. ORSTOM, Colloques et séminaires*, pp 25-48

ALBERGEL J., CASENAVE A., RIBSTEIN P. et VALENTIN C., 1992 - Aridité climatique et aridité édaphique : étude des conditions de l'infiltrabilité en Afrique tropicale sèche. In L' Aridité : Une contrainte au développement Edt. E. Le Floc'h, M. Grouzis, J.C. Bille et A. Cornet. *ORSTOM éditions*. pp 123-130

AMBOUTA K.J.M, 1984 - Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigérien. *Th. docteur-Ing.* Univ. Nancy I, 116p+annexes.

ARONSON J., FLORET C., LE FLOC'H E., OVALLE C. and PONTANIER R., 1993 - Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. II. Case Studies in Southern Tunisia, Central Chile and Northern Cameroon. *Restoration Ecology Vol 1 n° 3* pp 168-187

ARONSON J., DHILLION S. and LE FLOC'H E., 1995 - On the need to select an Ecosystem of Reference, However Imperfect : A Reply to Pickett and Parker. *Restoration Ecology Vol 3 n° 1* pp 1-3

ARONSON J. and LE FLOC'H E., 1996 - Vital Landscape Attributes : Missing Tools for Restoration Ecology. *Restoration Ecology Vol 4 n° 4* pp 377-387

AUDRY P. et ROSSETTI C., 1962 - Observation sur les sols et la végétation en Mauritanie du sud-est et sur la bordure adjacente du Mali. (de 1959 à 1961). *Prospection Ecologique en Afrique Occidentale*, Rapport UNSF/OL/ES/3 Rome, 53-71.

BACHELIER G., 1978 – La faune des sols : son écologie et son action. Documentations techniques n°38 ORSTOM Paris, 391p

BARBAULT R., 1992 – Ecologie des peuplements. Structure, Dynamique et Evolution. Edt. Masson 273pp

BARBAULT R., 1995 - Ecologie des peuplements. Structure et dynamique de la biodiversité. Edt. Masson, 288p.

BELLEFONTAINE R., 1998-b - Multiplication végétative naturelle des ligneux sahéliens. *Seconde rencontre des chercheurs, enseignants et praticiens de la multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux. INRA, Antibes, 24 - 26 novembre 1998, 8 p.* (sous presse).

BELLEFONTAINE R., ICHAOU A., 1999.- Pour une gestion reproductible des espaces sylvo-pastoraux des zones à climats chauds et secs. Une règle d'or : l'O.S.R. *Le Flamboyant n°51* pp 18-21.

BELLEFONTAINE R., EDELIN C., ICHAOU A. et DU LAURENS D., 2000.- Le drageonnage : nouvelles perspectives pour tenter de pallier localement la régénération naturelle ou artificielle des ligneux dans les zones semi-arides. **Accepté** pour être publié au mois de décembre 2000 à "Science et Changements Planétaires" SECHERESSE, John Libbey Eurotext.

BERHAUT. J., 1967 - Flore du Sénégal. 2e éd. *ClairAfrique*. Dakar, 481p

- BERHAUT. J., 1971,1974,1975,1976,1979** - Flore illustrée du Sénégal. *Dicotylédones*, 6 tonnes.
- BERNUS E. et SIDIKOU. A. H., 1983** - Atlas du Niger, *Editions J.A.*, 64p.
- BERNUS E. et CRESSIER P., 1999** – Vallée de l'Azawagh (Sahara du Niger), *Editions Sépia*, 422p.
- BILLE J.C., 1977** – Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Travaux et documents de l'ORSTOM*. Paris, 82p
- BILLE J.C., 1980** – Mesure de la production primaire appétée des ligneux. In Le Houérou H.N. 1980. Les fourrages ligneux en Afrique. Etat actuel des connaissances. *Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique*, Addis Ababa, 8-12 Avril 1980 et autres contributions CIPEA, 77-89pp.
- BLANDIN P. et LAMOTTE M., 1985** - Ecologie des systèmes et aménagement : fondements théoriques et principes méthodologiques. In *Fondements de l'aménagement du territoire*. Edt. Maxime Lamotte (Masson), pp 139-162
- BLONDEL J., 1979** – Biogéographie et écologie. *Masson*, Paris, 173p
- BLONDEL J., 1995** - Biogéographie : Approche écologique et évolutive. *Masson*, Paris, 286p.
- BOALER S.B. et HODGE C.A.H., 1962** - Vegetation stripes in Somaliland. *Journal of Ecology*, **50**, 465-474.
- BOALER S.B. et HODGE C.A.H., 1964** - Observation on vegetation arcs in the northern region, Somali Republic. *Journal of Ecology*, **52**, 511-544.
- BOUDET G., 1971** - Y a-t-il désertification et assèchement du climat en Afrique Tropicale sèche ? Le faciès de végétation de "brousse tigrée" en est-il la conséquence ? *Rapport IEMVT, Maisons-Alfort*, France, 17p
- BOUDET G., 1972** – Désertification de l'Afrique tropicale sèche. *Adansonia*, **sér.1, 12, 4**, 504-524
- BOUDET G., 1977** – Désertification et remontée biologique au Sahel. *Cah. ORSTOM*, sér. Biol., **vol. XII, 4**, 293-300.
- BUREL F. 1991** - Dynamique d'un paysage : réseaux et flux biologiques. *Thèse de doctorat d'Etat*, Université de Rennes. 236p.
- BUREL F., BAUDRY J., CLERGEAU P., CONSTANT P. et EYBERT M-C. 1992** - Approche spatiale des phénomènes écologiques : échelles et hiérarchie. *Bull. Ecol. T.* **23 (1-2)**, 93-101
- CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989** – Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. *Edt de l'ORSTOM*, **229p**.
- CASENAVE A. et VALENTIN C., 1992** - A runoff capability : Classification system based on surface features criteria in semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, **130**, 231-249.
- CATINOT R., 1994** - Aménager les savanes boisées africaines. Un tel objectif semble désormais à notre portée. *Bois et Forêts des Tropiques*, **241**, 53-69.
- CHARRE J., 1974** – Climat du Niger. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, *Univer. Grenoble*. 161p
- CHASE R.G. and BOUDOURESQUE E., 1989** - A study of methods for the revegetation of barren crusted sahelian forest soils. Soils and water management systems for rainfed agriculture in the sudano sahelian zone : *proceedings of an international workshop*, 11-16 January 1989, ICRISAT sahelian center, Niamey, Niger. 125-135.

CLAUDE J., 1992 - Aridité climatique, aridité édaphique à différentes échelles de temps et d'espace pp29-35 In : L'Aridité une contrainte au développement , Caractérisation, Réponses biologiques, Stratégies des sociétés. Edt. Le Floc'h, Grouzis, Cornet et Bille (1992), *ORSTOM EDITIONS*, 597p.

CLOS-ARCEDUC M., 1956 - Etude sur photographie aérienne d'une formation végétale sahélienne : La brousse tigrée. *Bulletin de l' IFAN, T.XVIII, série A, 3*, 677-687.

COLLINET J. et VALENTIN C., 1979a. – Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah.ORSTOM, sér. Pédol., XVII, 4, pp 283-328

COLLINET J., 1986 – Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. *Coll.ORSTOM*, Colloques et Séminaires, p 117-153

CORNET A.,1981 – Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes du Sénégal. *ORSTOM Paris*, 354p.

CORNET A.,1992 - Relation entre la structure spatiale des peuplements végétaux et le bilan hydrique des sols de quelques phytocénoses en zone aride. In L'Aridité, une contrainte au développement. *Editions de l' ORSTOM*, Paris, 245-265.

CORNET A., MONTAÑA C., DELHOUME J.P. et LOPEZ-PORTILLO J., 1992 - Water flows and the dynamics of desert vegetation stripes. Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows. *Eds. A. J. Hansen*, 16p

COURAULT D., d'HERBES J.M. et VALENTIN C., 1990 - Le bassin versant de Sama Dey. Premières observations pédologiques et phytoécologiques. *Programme Hapex Sahel, ORSTOM*, 39p.

COURAULT D., d'HERBES J.M. et VALENTIN C., 1991 - Caractéristiques spectrales des principales organisations de la surface des sols du Niger. *Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Actes des deuxièmes journées de télédétection. eds.ORSTOM 39-47

COUTERON P., MAHAMANE A. et OUEDRAOGO P.,1996 - Analyse de la structure de peuplements ligneux dans un fourré tigré au Nord -Yatenga (Burkina-Faso): état actuel et conséquences évolutives. *Annales des Sciences Forestières*, **53**, 867-884.

COUTERON P. 1998 - Relations spatiales entre individus et structure d'ensemble dans les peuplements ligneux soudano-sahéliens au nord-ouest du Burkina-Faso. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, pp 24-27

DAGET P. et POISSONNET J., 1971 – Méthodes d'inventaire phytoécologique et agronomique des prairies permanentes. **Doc. 56, CEPE/CNRS, Montpellier**, 206p.

DAGET P. et GODRON M., 1979 – Vocabulaire d'Ecologie. 2è édition revue et complétée. A.C.C.T. / C.I.L.F / C.N.R.S. *Hachette* Paris, 300p

DAGET P. et GODRON M., 1995 – Pastoralisme : Troupeaux, espaces et sociétés. Hatier –AUPELF-UREF , 510p

DELBAERE E., 1994 - Identification de la structure des écosystèmes contractés sahéliens par télédétection aérienne et satellitaire. Facteurs du milieu déterminant ces structures. *Mém. de fin d' étu.* Inst. sup. tech. d' Outre-Mer. Paris. 75p.

DELHOUME J.P., 1995 - Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la Biosphère de Mapimi, Nord-Mexique). *Thèse Université de Poitiers*, France, 293p+annexes.

d'HERBES J.M. et AMBOUTA K.J.M., 1996 - Banded vegetation patterning in arid & semi-arid environments. Ecological processes and consequences for management. *Inter. Symposium*, Paris, 2-5 April 1996, 6p

d'HERBES J.M. et MOUGENOT B., 1996 - Specific methods of study : patterns at a regional scale. Banded vegetation patterning in arid & semi-arid environments. Ecological processes and consequences for management. *Inter. Symposium*, Paris, 2-5 April 1996, 13p

d'HERBES J.M., AMBOUTA K.J.M., et PELTIER R., 1997 - Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens. Actes de l'Atelier international, 20-25 novembre 1995, Niamey, Niger. *John Libbey Eurotext*, Paris, 336p.

d'HERBES J-M. et VALENTIN C., 1997 – Land surface conditions of the Niamey region : ecological and hydrological implications. *Journal of hydrology* **188-189**, 18-42

d'HERBES J-M., VALENTIN C. et THIERY J., 1997 - La brousse tigrée au Niger : synthèse des connaissances acquises. Hypothèses sur la genèse et les facteurs déterminant les différentes structures contractées. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens* (Actes du séminaire inter Niamey, 1995), 131-152.

DULIEU D., GASTON A. et DRELEY J., 1977 – La dégradation des pâturages de la région de N'Djamena (Rép. Du Tchad) en relation avec la présence de Cyanophycées psammophiles. Etude préliminaire. *Rev. Elev. Méd. Vét. Pays Tropicaux*. **30, 2**, 181-190

DUNKERLEY D.L. and BROWN K.J., 1995 - Runoff and runoff areas in land patterned chenopod shrubland, arid western. New South Wales, Australia : characteristics and origin. *Journal of Arid Environments* **30**, 41-55

DUVIGNEAUD P., 1980 – La synthèse écologique. *Doin.*, Paris, 380pp

EHRMANN M., 1994 - Hydrodynamique et fonctionnement de la végétation herbacée d'une brousse tigrée dans le Sahel nigérien. *Mémoire D.E.A.*, Univ. Paris VI, 92p.

EHRMANN M., 1999 - Etude du fonctionnement et de la dynamique de la brousse tigrée nigérienne. *Mémoire Doctorat.*, Univ. Paris VI, 178p.

ESCADAFAL R., 1981 – Une méthode nouvelle de description de la surface du sol dans les régions arides. *Sols*, n°5, 21-27

FAMANTA M., 1992 - Cours de biométrie à l'usage des élèves ingénieurs de l'IPR de Katibougou Mali, 51p.

FLORET C., LE FLOC'H E., PONTANIER R. et ROMANCE F., 1977 - Contribution à l'étude de cas sur la désertification région d'Oglat-Merteba, Tunisie. *Conférence des Nations Unies sur la Désertification. Nairobi (1977)*. Extrait et adapté du document A.CONF., **74/12, 3 -93 et 10-143** (Version Française)

FLORET C. et PONTANIER R., 1984 - Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot., Fr.*, 131, *Actualit. Bot.* **2/3/4**, 265-275

FORMAN R.T.T. et GODRON M., 1986 - Landscape ecology. *Jonh Miley and sons*, 619p

FOURNIER A., 1987 – Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée dans les savanes soudanaises de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes Ouest-Africaines. *Bull. Ecol. Tome* **18-4**, 409-430

FOURNIER A., 1991 – Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest. Variations selon un gradient climatique. *Ed. de l'ORSTOM. Collection ETUDES ET THESES*, 312p.

FRANCOUAL T., 1994 - Etude des organisations d'un paysage sahélien en relation avec la dynamique temporelle et spatiale des états de surface par télédétection. *Mé. pour Dipl. d'Agro. Appro.* Inst. Nat. Agro, Paris-Grignon, 35p+annexes.

GALLE S. et PEUGEOT C., 1993 - Soil water spatial distribution on tiger bush in Niger. *American Geophysical union AGU Fall Meeting*, dec. 6-10, San-Francisco, 13p.

GALLE S., 1995 - Rapport de campagne 1993-1994. Multigraphie ORSTOM

GALLE S., SEGHERI J. et MOUNKAILA H. 1997 - Fonctionnement hydrique et biologique de la brousse tigrée nigérienne à l'échelle locale. Cas d'une brousse tigrée au Niger. Dans *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*. Ed. d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K. et Perlier R., édition John Libbey Eurotext, Paris p 105-118 .

GALLE S., EHRMANN M. et PEUGEOT C., 1999 - Water balance on a banded vegetation pattern. A case study of tiger bush in western Niger. *Catena* **37**, 197-216.

GARBA Y., 1998 - Rôle de l'occupation de sols sur le peuplement acridien de la région de Banizoumbou (Niamey Niger). *Thèse de doctorat en Scie. de la vie Univ.* Paris Sud Orsay, pp 15-36

GAVAUD M. et BOULET R., 1967 - Carte pédologique du Niger occidental. *ORSTOM* Dakar, 82p.

GAVAUD M., 1977 - Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. *Travaux et documents de l'ORSTOM* Paris, n°76, 102p.

GEERLING C., DE BIE S., 1988 - Forêts classées et élevage dans le Sanmatenga et l'Oubritenga, Burkina Faso. *Université Agronomique de Wageningen, Pays Bas*, Rap. Tech. 74p.

GODRON M., DAGET P., EMBERGER L., LE FLOC'H E., LONG G., POISSONET J., SAUVAGE C., et WACQANT J.P., 1968 - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Principes et transcription sur cartes perforées. *Editions CNRS*, 291p.

GODRON M., 1972 - Les échantillonnages phytoécologiques Fascicule 2. *CNRS-CEPE*, 18p

GODRON M., 1976 - Echantillonnage linéaire et cartographie. *Investigat. Pasquera*, **36**, (1), 171-174

GODRON M., 1995 - Ecologie des parcours pp. 45-86 In. DAGET P. et GODRON M., 1995 - Pastoralisme : Troupeaux, espaces et sociétés. Hatier -AUPELF-UREF , 510p

GREENE R.S.B., 1992 - Soil physical properties of three geomorphic zones in a semi-arid Mulga Woodland. *Soil Water Manage. Conserv.*, **30**, 55-69.

GROUZIS M., 1987 - Structure, Productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso) Thèse d'état en Sciences naturelles. Univers. Paris Sud, Centre d'Orsay. 326p.

GROUZIS M., 1995 - Les végétations annuelles pp 111-119. In Edt. Daget P. et Godron M., 1995 - Pastoralisme : Troupeaux, espaces et sociétés. Hatier -AUPELF-UREF , 510p

GUINKO S., 1984 - Végétation de la Haute-Volta. *Thèse de Doctorat es sciences naturelles*, Bordeaux III. Tome I et II, 397p.

HEMMING C.F., 1965 - Vegetation arcs in Somaliland. *Journal of Ecology*, **53**, 57-67

HUTCHINSON J., et DALZIEL J.M., 1954-1958-1963-1972 - Flora of west tropical africa. Crown agents for oversea governments and administrations. *Milbank, London*, 2nd edition, **3 vol**, 828p., 544p. et 574p.

ICHAOU A., 1995 - Etude de la productivité des formations forestières de brousse tigrée et brousse diffuse : conséquences pour la gestion et la régénération de ces formations. *Mémoire Ing. E et F ORSTOM-IPR.* de Katibougou Université du Mali, 161p.

ICHAOU A., 1995 - Mode de régénération des taillis de formations forestières contractées (cas des plateaux de la région du fleuve). Exposé dans le cadre de la rencontre des cadres forestiers centraux et départementaux sur les marchés ruraux de vente de bois-énergie Niamey, Mai 1995. 21p.

ICHAOU A., 1996 - Recherche écologique appliquée à l'aménagement des écosystèmes forestiers contractés des plateaux de l'ouest nigérien. *ORSTOM/Projet Energie II*, 30p.

ICHAOU A., et AMBOUTA K.J.M., 1996 - Utilisation durable des ressources forestières. Cas des formations forestières contractées des plateaux de l'ouest nigérien. *Direction Environnement et Faculté d'Agronomie Niamey*, 12p.

ICHAOU A., 1998 - Contribution à l'étude de la végétation contractée des plateaux le long d'un gradient pluviométrique et latitudinal de la zone ouest du Niger. DEA de Biologie et d'Ecologie appliquées, Univ. Ouagadougou (Burkina Faso), 126p

ICHAOU A., d'HERBES J.M., 1997 - Productivité comparée des formations structurées et non structurées dans le Sahel nigérien : Conséquences pour la gestion forestière. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, pp 119-130.

ICHAOU A., BELLEFONTAINE R., MONTAGNE P. et FABRE A., 1999 - Ecosystèmes forestiers contractés des plateaux du Sahel nigérien : Vers une meilleure connaissance du fonctionnement interactif entre les systèmes écologiques et les systèmes humains. *Contribution au Séminaire International sur la gestion des formations forestières naturelles sahéliennes*. Septembre 1999 du 11-13, Bamako (MALI)

ICHAOU A., 2000 - Production de phytomasse ligneuse et herbacée, comparée à l'échelle des trois principaux systèmes forestiers contractés des plateaux de l'ouest nigérien. **(en révision)**

LAMOTTE M., et BOULIERE F., 1967 – Problèmes de productivité biologique. *Edt Masson et cie* 246p

LAMOTTE. M., 1985 - Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire. *Ed.Lamotte.Masson* 175p

LE FLOC'H E., GROUZIS M., CORNET.A. et BILLE J.C., 1992 - L'Aridité une contrainte au développement : Caractérisation, Réponses biologiques, Stratégies des sociétés. *ORSTOM EDITIONS*, 597p.

LE FLOC'H E., ARONSON J., DHILLION S., GUILLERM J.L., GROSSMANN A. and CUNGE E. 1998 - Biodiversity and ecosystem trajectories : first results from a new LTER in southern France. *Acta Oecologica 19 (3) Elsevier, Paris*. 285-293

LE HOUEROU H.N., 1974 – Deterioration of the natural equilibrium in the arid zone of North Africa. *Proceed. French. Israel semin. Spec. Publ. n°39*, pp 45-57.

LE HOUEROU H.N., 1976a – The nature and causes of desertization. *Arid Zone Newsletter ; 3 : 1-7*, Tucson, Arizona.

LE HOUEROU H.N., 1976b – Contribution à une bibliographie écologique des zones arides de l'Afrique et de l'Asie du Sud Ouest. In : Th. Monod, edit. La désertification au sud du Sahara, Comptendu. Coll. Nouakchott, Nilles édit. *Afrique Dakar-Abidjan*, pp 170-212

LE HOUEROU H.N., 1979 – Ecologie et désertification en Afrique. *Trav.de l'Institut de Géographie de Reims, n°39-40*, 5-26

LE HOUEROU H.N., 1981 - Long term dynamics in arid-land vegetation and ecosystems of North Africa. In IBP synthesis (Goodall, Evenari et Noy-Mer, eds.). Cambridge Univ. Press, 357-344.

- LE HOUEROU H.N., 1984** – Rain use efficiency : a unifying concept in arid Land ecology. *J. Arid Env.*, **7**, 213-247.
- LE HOUEROU H.N., 1987** – Aspects météorologiques de la croissance et du développement végétal dans les déserts et les zones menacées de désertification. *OMM/PNUE Genève*, 58p.
- LE HOUEROU H.N., 1992** – Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. In *L'Aridité, une contrainte au développement. Editions de l'ORSTOM*, Paris, 197- 220
- LEDANT J.P., 1985** – La réduction de biomasse en Afrique de l'Ouest (seconde partie : aperçu par zone). *Annales de Gembloux* 1985, **91**, 111-123
- LEPRUN J.C., 1978** - Compte rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres des cures salées, les formations de "brousse tigrée" dans le Gourma. *Report ACC-DGRST Lutte contre l'aridité*, Paris. 21p.
- LEPRUN J.C., 1979** – Etude de l'évolution d'un système d'exploitation sahélien au Mali. Volet pédologique. Rapport de campagne 1979. *ORSTOM/DGRST*, Paris 27p.
- LEPRUN J.C., 1992** - Etude de quelques brousses tigrées sahéliennes : structure, dynamique, écologie. *L'aridité, une contrainte au développement*, Editions de l'ORSTOM, Paris. 221-244
- LONG. G., POISSONET P., POISSONNET J., GODRON M., et DAGET Ph., 1970** - Méthodes d'analyse par points de la végétation prairiale dense. Comparaison avec d'autres méthodes. Document n° 55 du CEPE, CNRS, Montpellier, 32p
- LONG. G., 1974** - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. **Tome I** : Principes généraux et méthodes. *Masson et Cie* Paris, 256p.
- LONG. G., 1975** - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire **Tome II** : Application du diagnostic phyto-écologique. *Masson et Cie*. Paris, 222p.
- LONG. G., 1985** - Phyto-écologie et aménagement rural. In *Fondements de l'aménagement du territoire*. Edt. Maxime Lamotte (Masson), pp 57-97
- LUDWIG J.A., and TONGWAY D.J., 1998** - Spatial organisation of landscapes and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology*, **9** (4). 12- 24.
- MAC FAYDEN W.A., 1950 (a)** - Vegetation patterns in British Somalilands. *Nature*, **165**, 121p.
- MAC FAYDEN W.A., 1950 (b)** - Vegetation patterns in the semi desert plains of British Somalilands. *Geographic Journal*. **36**, 113p
- MALAM ISSA O., TRICHET J., DEFARGE C., COUTE A., and VALENTIN C., 1999** – Morphology and microstructure of microbiotic soil crusts on a tiger bush sequence (Niger, Sahel). *Catena* 37 pp 175-196
- MAUCHAMP A., 1992** - L'hétérogénéité spatiale, sa dynamique et ses implications dans une mosaïque de végétation en zone aride. *Thèse Univ. de Montpellier II*, France. 67p.
- MAUCHAMP A. and JANEAU J.L., 1993** - Water funneling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihua. *Journal of Arid Env.* **25**, 299-306
- MAUCHAMP A. and RAMBAL S., 1994** - Simulating the dynamics of a vegetation mosaic : a spatialized approach. *Ecological Modelling* **71**, 107-130
- MONTANA C., 1992** - The colonization of bare areas in two-phase mosaics of an arid ecosystem. *Journal of Ecology*, **80**, 315-327.

MOUGENOT B., d'HERBES J.M. & ICHAOU A., 1996 - How do vegetated arcs move upwards in the Nigerien tiger bush. Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment. *Ecological processes and consequences for management*. International. Symposium, Bondy, April 1996. 12p.

MOUGENOT B., et HAMANI S., 1997 - Les possibilités de classification des formations contractées à partir de la télédétection aérienne et satellitaire. Exemple dans l'ouest nigérien. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. (actes de l'atelier inter. Niamey, 1995). 17p.

NOUVELLET Y., 1992 - Evolution d'un taillis de formation naturelle en zone soudanienne du Burkina Faso. (Fascicule 1). *Thèse de doctorat de l'Univ. Pierre et Marie Curie* (Paris VI). 209p

NOY-MEIR I., 1973 - Desert ecosystems : environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*. **4**, 25-51

P4AS-ECR AGRYMET, 1992 - Faciès Agricoles. Site "Est Ouallam " Tillabery, Tera et Bonkougou. Notices explicatives Sysame, Projet de gestion des ressources renouvelables, 40 p.

OUEDRAOGO P., 1997 – Rôle des termites dans la structure et la dynamique d'une brousse tigrée soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Paris IV, Paris.

PELTIER R., 1994 - Aménagement Villageois du massif de brousse tachetée de Tientiergou. Méthodes utilisées pour assurer une gestion durable avec participation des populations riveraines et proposition pour une extension aux formations naturelles du sud du Niger. *SEED-CTPT- Projet Energie II- Energie Domestique*. 45p.

PELTIER R., MAHAMANE EL.L. et MONTAGNE P., 1994 - Aménagement villageois des brousses tachetées au Niger. *Bois et Forêts des Tropiques*, **242** : 59-76p et **243** : 5-24p.

PEUGEOT C. 1995 - Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations in-situ et modélisation. *Thèse de Doctorat*, Université Grenoble I, 356p

PEUGEOT C., ESTEVES M., GALLE S., RAJOT J.-L. and VANDERVAERE J.P., 1997 - Runoff generation processes : results and analysis of field data collected at the East Central Superfisite of the HAPEX-Sahel experiment. *Journal Hydrol HAPEX-Sahel Special Issue*. **188-189**, 179-202.

PEYRE DE FABREGUES B. 1996 – Exploitation des pâturages sahéliens , Tradition et Modernisation : Caractérisation des ressources pastorales. *Le Flamboyant* n°40, pp21-24

RAUNET M. 1985 - Etude de la brousse tigrée et de sa dynamique "hydro-phyto-pédologique". Recherches d'applications pratiques. *Journal of Ecology*. **59** (2) 615-622.

SAADOU M., 1984 - Contribution à l'étude de la flore et de la végétation des milieux drainés de l'ouest de la République du Niger, de la longitude de Dogondoutchi au fleuve Niger. Thèse de Doctorat de spécialité Université de Bordeaux III et de Niamey. 177p

SAADOU M., 1990 – La végétation des milieux drainés nigériens à l'est du fleuve Niger. Thèse d'état Es-Sciences Naturelles Université de Niamey. 395p+annexes

SAADOU M., 1993 - Les forêts sèches basses des plateaux latéritiques situés à l'est du fleuve en secteur phytogéographique Nord-soudanien. *Bulletin africain de l'inst. oikos*. n°5, 31-41

SAADOU M., 1997 - Contribution à l'étude de la flore et de la végétation de la République du Niger : quelques observations sur la végétation sahélienne des plateaux latéritiques de l'ouest de la République du Niger. *Annales de l'Univ. A. Moumouni*, Niamey. **Tome V**, 17-36.

SEGHIERI J., GALLE S., RAJOT J.L. and EHRMANN M., 1997 - Relationships between soil moisture and growth of herbaceous plants in a natural vegetation mosaic in Niger. *Journal of Arid Environment*. **36** , 87-102

- SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., VALENTIN C., 1992** - La dynamique des états de surface d'un territoire agro-pastoral soudano-sahélien sous aridification climatique : conséquences et propositions In l'Aridité, une contrainte au développement, eds. E. Le Floc'h, M. Grouzis, J.C. Bille et A. Cornet. *ORSTOM éditions*. pp 419-447.
- SYLLA M.L., 1985** - Inventaire forestier de la forêt classée de la Faya Kassela Mali. *Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle Université de Nancy I*, 186p
- THIERY J.M., D'HERBES J.M. & VALENTIN C. 1995** - Model for simulating the genesis of banding patterns in Niger. *Journal of Ecology*, **83**, 497-507
- THIERY J.M., d'HERBES J.M., EHRMANN M., GALLE S., PEUGEOT C., SEGHERI J. et VALENTIN C. 1997** - Modèles de paysage et modèles de ruissellement pour une brousse tigrée nigérienne. *Communication pour les Journées du Programme Environnement. Vie et Sociétés : Les Temps de l'environnement* Toulouse, 5-7 Novembre 1997.
- TONGWAY D.J., and LUDWIG J.A., 1994** - Small-scale resource heterogeneity in semi-arid landscapes. Pacific Conservation *Springer-Verlag, Ecological Studies*, **92**, New-York. chap.16, 327-333.
- TROCHAIN J. L., 1957** - Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l' Afrique Tropicale. *Bull. Inst. Etudes centrafr.* **13**, 55-94.
- TROCHAIN J-L., 1970** - Les territoires phytogéographiques de l'Afrique noire francophone d'après la trilogie : climat, flore et végétation. *C. R. Séances Soc. Biogéogr.* n°**395** : 139-157.
- TROUPAIN G., 1966** – Etude phytocénologique du Parc National de l'Akagera et Rwanda Oriental. Recherche d'une méthode d'analyse appropriée de la végétation d'Afrique Intertropicale. *INRS, Butare Rwanda* n° **2**, 293p
- VALENTIN C., 1981** – Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadès-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. *Thèse 3^{ème} cycle, Univer. Paris VII, Etudes et Thèses*, ORSTOM, 1985, 259p.
- VALENTIN C. et d'HERBES J.M., 1999** - Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena* **37**, 231-256
- VALENTIN C., d'HERBES J.M. et POESEN J., 1999** – Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena* **37**, 1-24
- VON BERND J., 1979** – Zum problem der vegetations streifen (Brousse tigrée) in semi ariden Africa. Geockologische untersuchungen in West Niger.
- WHITE F., 1986** - La végétation de l'Afrique. *ORSTOM UNESCO Paris, Recherches sur les ressources naturelles XX*. 384p+carte.
- WHITE L.P., 1969** - Vegetation arcs in Jordan. *Journal of Ecology*, **57**, 461-464.
- WHITE L.P., 1970** - Brousse tigrée patterns in southern Niger. *Journal Ecol.* **58** , 549-553
- WHITE L.P, 1971** - Vegetation stripes on sheet wash surfaces. *Journal of Ecology*, **59**, 615-622.
- WORRAL G.A., 1960** - Tree patterns in the Sudan. *Journal of Soil Science*, **11(1)**, 63-71.
- WORRAL G.A., 1960** - Patchiness in vegetation in the Northern Sudan. *Journal of Ecology*, **48**, 107-117p.

BIBLIOGRAPHIE

ALEGRIA J., HEERMANS J. G. et MINNICK G., 1986 - Système de sondage pour déterminer la quantité de bois de chauffe des Combretacées dans la forêt classée de Guesselbodi (Kolo) Niger. *Projet PUSF*, 37p.

AMBOUTA K.J.M., 1996 - Définition et caractérisation des structures de la végétation contractée au Sahel : Cas de la brousse tigrée de l'ouest nigérien. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*, (Actes séminaire inter. Niamey 1995), 12p

AUBREVILLE A., 1936 - Extrait d' un rapport de mission au Niger et Nigeria : Les forêts de la colonie du Niger. *Revue bois et forêts des tropiques* **148**, 95p.

AUBREVILLE A., 1950 - Flore forestière soudano-guinéenne. AOF Cameroun, AEF, *Soc éd.géo.mar.colon* Paris, 525p.

BARBAULT R., 1981 – Ecologie des populations et des peuplements. *Edt. Masson*, Paris 200p

BARBAULT R., 1995 - Abrégé d'écologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère. *Collection Abrégés de sciences. 3è édition révisée et augmentée*. Edt. Masson 280p.

BARNAUD G., 1997 – Evaluation du patrimoine naturel : Contexte scientifique et méthodes. Bureau permanent du CNPN (Evaluation pour la conservation), 38p

BERTRANDO B., 1984 - Etude des variations spatio-temporelles des précipitations annuelles et de la saison des pluies au Niger. *Mém. de maîtrise-univ. D'Aix*. Marseille II, 84p.

BLONDEL J., 1976 – Stratégies démographiques et successions écologiques. *Bull. Soc.*, **101**, 695-718

BLONDEL J., 1986 – Biogéographie évolutive. *Masson*, Paris, 221p.

BOUCHON J., 1974 – Les tarifs de cubage. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts. 19, avenue du Maine. 75732 Paris Cedex 15 p38-50

BOULARD B., 1988 - Dictionnaire de botanique. *Ed. MARKETING*, 398p.

BOURLIERE F., et LAMOTTE M., 1978 - La notion d'écosystème. In Problèmes d'écologie : structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres (M. Lamotte et F. Bourlière, eds). *Masson*, Paris, 1-16

CAILLIEZ F., 1980 – Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers avec référence particulière aux forêts tropicales **Vol. 1** Estimation des volumes. *FAO* 98p

CARATINI R., 1983 - La vie des plantes. *Bordas Encyclopédie*, 580-589.

CHASE R.G. and BOUDOURESQUE E., 1987 - Methods to stimulate plant regrowth on bare sahelian forest soils in the region of Niamey, Niger *Agriculture, Ecosystems and Environment* **18** - ICRISAT sahelian center, Niamey, Niger, 211-221

CHEVALIER A., 1900 - Géographie botanique : Les Zones et les provinces botaniques de l'Afrique Occidentale française. *C.R. Acad. Sc*, **130**, 1205-1208.

CHEVALIER A., 1933 - Les territoires géobotaniques de l'Afrique Tropicale nord-occidentale et ses subdivisions. *R. Séances Soc. Géobot*, 4-26.

CORNET A., 1981 – Mesure de la biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. *Acta Oecologica, Oecologica Plantarum*, **2**, (16), 251-266.

CORNET A., DELHOUME J.P. et MONTAÑA C., 1983 - Vegetation patterns and soils in the Mapimi Bolson (Chihuahuan desert, Mexico), Part I. Vegetation arcs. In *Contributed papers*, 2nd symposium on resources of the Chihuahuan desert region, Mexico. *Botanical biology*, **13**, 18p.

CORNET A., DELHOUME J.P., et MONTAÑA C., 1988 - Dynamics of stripped vegetation patterns and water balance in the chihuahuan desert. Diversity and pattern in land communities. *SPB Academic publication*, 221-231.

COURAULT D., d'HERBES J.M., VALENTIN C. et REMY D., 1991 - Etude de la variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des sols au Niger à partir d'images satellitaires. *Physical Measurements and Signatures in Remote sensing, Proceeding of the 5th International, Colloquim, Courchevel, France, 14-18 janvier 1991*, 601-604

COUTERON P., et SERPANTIE G., 1995 - Cartographie d'un couvert végétal soudano-sahélien à partir d'images SPOT XS. Exemple du Nord-Yatenga (Burkina Faso). *Photo-interprétation*, **1**: 19-24.

COUTERON P., 1996 - Sécheresse et hétérogénéité spatiale de paysages végétaux soudano-sahéliens ; exemples au nord-ouest du Burkina Faso. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*, (Actes du séminaire inter. Niamey, 1995), 6p

COUTERON P., 1997 - Contractions du couvert végétal et sécheresse. Exemples au nord-ouest du Burkina Faso. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*. (Actes du séminaire inter. Niamey 1995), 7-10.

DAJOZ R., 1974 - Dynamique des populations. *Masson et Cie*. Paris. 301p.

DAGET P., 1976 – Les modèles mathématiques en écologie. *Masson*, Paris, 178pp

DANJIMO B., 1997 - Contribution à l' étude floristique et écologique des formations naturelles et des agrosystèmes au sud du Département de Dosso (Niger), *DEA. Fac. des Sc. et Tech.*, Univ. de Ouagadougou B.F., 76 p+ annexes.

de RAVIGNON F. et LIZET B., 1987 - Comprendre un paysage. *Guide pratique de recherche. INERA* 143p.

DE WINTER J., FISCHER M., HELLEMANS PH., TRAUTMANN A., KINNI A., BAGOUDOU M., ABOUBACAR S., 1988 - Aménagement et protection des forêts naturelles dans la région Niamey. *Résumé du rapport de la 1ère phase*. 21p.

DE WINTER J., FISCHER M., HELLEMANS PH., DOULAYE I., GAMBO S., et BAGOUDOU M., 1989 - Aménagement et protection des forêts naturelles dans la région de Niamey. *Résumé du rapport de la 2^{ème} phase*. 50p.

DELABRE, 1998 - Caractérisation et évolution d'écosystèmes anthropisés sahéliens : les milieux post-culturels du sud-ouest nigérien. *Thèse de Doctorat*. Université de Paris VI, 282p

DEVINEAU J L., 1996 - Analyse de la structure de la végétation et sur la terminologie utilisée. *ORSTOM*, 6p.

DIARRA A., SELMI M. T., 1993 - Plan d'Aménagement et de Gestion de la Forêt protégée de Bounounou -Nebielianayou. (Burkina Faso).120p.

DJIBO H., MONTAGNE P., GEESING D., PELTIER R. et TOURE A., 1996 - L'aménagement villageois sylvo-pastoral de la formation de brousse tachetée de Tientiergou, Niger. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*, (Actes de l'Atelier inter. Niamey, 1995), 13p.

DUBOIS D., et LANG J., 1984 - Etude lithostratigraphique et géomorphologique du continental terminal et du cénoï inférieur du bassin des Iullemmeden (Niger). *Bull. de l'I.F.A.N. T3, A, n°1-2*, 42p.

- EMBERGER L., 1966** - Réflexion sur les spectres biologiques de RAUNKIAER. In mém. Publiés par la soc. Bot. de France, 147-163.
- FAIRBAIRN. W.A., 1943** - Classification and description of the vegetation type of the Niger colony. French West Africa. *Imp. for Inst. paper. n°23*, Alfort, 38p.
- FAURIE C., FERRA Ch., MEDORI P. et DEVAUX J., 1998** - Ecologie : approche scientifique et pratique. 4è édit. Lavoisier *Techn. Et Docum.* 332p
- FIES J.-C., 1992** – Mesures de conductivité hydrique de croûtes. Rapport *HAPEX SAHEL* Niger. 7p
- FRANKLIN J., 1991** - Land cover stratification using Landsat Thematic Mapper data in Sahelian and Sudanian woodland and wooded grassland. *Journal of Arid Environments*, **20**, 141-163.
- FRIES. J., 1993** - Needs and possibilities. Renewable energy for Development. Management of natural forests in semi-arid areas of West-Africa. *A Stockholm Environment Institute Newsletter*. **6 (2)**, 12-15
- FRONTIER S., PICHOD-VIALE D., 1991** - Ecosystèmes structure - fonctionnement évolution. Masson. *Collection d'écologie*, **21**, 392p.
- GADO B., 1978** - Contribution à l'histoire des populations d'entre le fleuve Niger et le Dallol Maouri. *Th. Doctorat 3é cycle*. Un. Paris I, 492p.
- GAMBO S., 1988** - La politique nigérienne en matière d'aménagement des ressources forestières. *Direction de l'Environnement* Niamey. 29p+annexes.
- GARBA R., 1991** - Etude des régimes pluviométriques du Niger : Caractérisation des distributions moyennes mensuelles et variations observées au cours des 40 dernières années. *Mem. Ing. d'application en Hydrologie*. AGRYMET Niamey. 53p.
- GAVAUD M., 1966** - Etude pédologique de reconnaissance de la République du Niger au 1/500 000, feuille de Niamey. *ORSTOM* Paris.
- GAVAUD M., 1977** - Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. *Travaux et documents de l'ORSTOM* Paris, **n°76**, 102p.
- GEERLING., 1982** - Guide de Terrain des ligneux Sahéliens et Soudano-Guinéens. 340p.
- GODRON M., 1966** - Application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et de la structure de la végétation. *Oecol. Plant*, **1**. 187-197.
- GODRON M., 1967** - Les groupes écologiques imbriqués "en écailles". *Oecol. Plant*, **2**. 217-226.
- GODRON M., 1968** - Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale (Recouvrement, information mutuelle entre espèces et facteurs écologiques, échantillonnage). *Oecol. Plant*. Gauthier-Villars **III** p185-212.
- GODRON M., 1984** – Abrégé d'écologie végétale, Masson, Paris, 200p.
- GODRON M., 1984** – Ecologie de la végétation terrestre, Masson, Paris, 196p.
- GOODALL D.W., 1952** – Some considerations in the use of point quadrats for the analysis of vegetation. *Austr. Jour. Sc. Res. B*, **5**, 1-14
- GOUNOT M., 1969** - Méthode d'étude quantitative de la végétation. *Edt. Masson*, Paris, 303p
- GREIG-SMITH P., 1979** - Pattern in vegetation. *Journal of Ecology*, **67**, 755-779.

GROUZIS M., MALDAGUE M., SKOURI M., et TOURE I.A., 1989 - Eléments de stratégie pour le développement Agro-Sylvo-Pastoral au Sahel. *F.A.P.I.S.* 117p.

GUILLAUME K., 1995 - Dynamique de la matière organique et minéralisation dans les sols de la brousse tigrée (Niger). *Mémoire D.E.A.*, Université Paris VI. 63p

GUINAUDEAU F., 1984 - Estimation des volumes et de la productivité des formations forestières sèches. Revue des méthodes et des résultats. *Rapport préparé pour la FAO.* 83p.

GUINKO S., 1973 - Contribution à l'étude écologique des savanes marécageuses du bas-Dahomey. *Thèse 3^e cycle.* Univer de C.I., 142p+annexes.

HAMANI S., 1995 - Contribution des données satellitaires haute résolution à l'évaluation des potentialités de la végétation contractée "brousse tigrée" des plateaux de l'ouest nigérien. *Mé. DESS, GDTA*, présenté à l'E.N.S.G. 41p+Annexes.

HAMANI S., 1996 - Appui dans la mise en place et la conduite de l'étude relative à la "gestion durable des formations forestières contractées des plateaux de l'ouest nigérien " (à l'aide de la télédétection aérospatiale). *Projet Energie II Volet Offre Niamey*, 14p.

HIERNAUX P., 1995 - Brousses tigrées, caractéristiques et formes de dégradation. ICRISAT, Note ronéo.

HIERNAUX P., 1996 - Does patchiness increase vegetation productivity, biodiversity and stability? The case of the "brousse tigrée" in the sahel. *Banded vegetation patterning in arid and semi-arid environment : ecological processes and consequences for management* Inter. Symposium. Paris, 2-5 April 1996, 13p

HOOCH. J., 1971 - Les savanes Guyanaises "Koron". Essai de phytoécologie numérique, *Mémoire ORSTOM*, 251p.

HOPKINS C., 1992 - Remeasurement of the 1982-83 test cut at the Guesselbodi forest. *Rapport Projet Energie II, Volet Offre, Niamey, Niger*, 36p.

ICHAOU A., 1991 - Contribution à la mise en place d'un système de contrôle et de suivi statistique du trafic de bois-énergie aux entrées des villes de Niamey, Maradi, Zinder et Tahoua. *Projet Energie II (Volet Offre)*. 111p.

ICHAOU A., 1992 - La contribution du terroir cultivé à l'approvisionnement en bois-énergie et autres produits forestiers des populations rurales de la zone définie par le Schéma Directeur d'Approvisionnement en Bois-énergie (SDAN). *Projet Energie II (Volet Offre)* 66p.

ICHAOU A., 1993 - Synthèse bibliographique des inventaires de ressources ligneuses réalisés dans les terroirs agricoles de la zone de SDAN. *Rapport de stage I.P.R.* Katibougou, Mali, 69p

JACQUEMINET C., 1991 - Méthode pour un diagnostic du couvert végétal en milieu sahélien sur images SPOT, à l'aide d'un indicateur : la structure spatiale du couvert ligneux. Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales, *Deuxièmes Journées de Télédétection*, ed. M. Pouget. 281-329

JAMBU M., 1990, Exploration informatique et statistique des données. Eds Dunod informatique. 492p

KARIMOU B.H., 1993 - Dynamique saisonnière de la strate ligneuse le long d'un gradient successional dans les jachères du Sahel nigérien. (leur importance dans l'espace agro-sylvo-pastoral). *Fac. d'Agro. Univ. A. Moumouni.* Niamey, 35p+annexes.

KLEIN H. D., 1981 - Contribution à l'estimation de la production en pâturage sahélien au Niger. *Revue Elevage et médecine vétérinaire des pays tropicaux.* **34**, 2, 211-220.

LAMOTTE M., 1967 - Initiation aux méthodes statistiques en biologie. 2^{ème} éd. Masson et Cie. 135p.

LAMOTTE M., et BOULIERE F., 1978 – Problèmes d'écologie : Structure et fonction des écosystèmes terrestres. *Edt Masson* 345p

LANLY J.P., 1977 – Manuel d'inventaire forestier. *Fao* – Rome Version française pp 50-89

LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPFFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., and HUBERT P., 1992 - Rainfall estimation in the Sahel : the EPSAT- NIGER experiment. *Hydrological Science Journal* **37**, **3**, **6**, 210-215

LEBRUN J.P., 1966 - Les formes biologiques dans les végétations tropicales *in mém. publié par la société botanique de France*, 164-175.

LEBRUN J.P. et PEYRE DE FABREGUE B., 1967 - Plantes rares ou intéressantes de la République du Niger. *Adansonia, ser. 2*, **7(3)**, 391-398.

LEBRUN J.P., 1975 - Quelques aires remarquables des phanérogames africaines des zones sèches. *In Boissiera* **24**, 91-105p.

LEFEUBRE J.C., et BARNAUD G., 1988 – Ecologie du paysage : mythe ou réalité ? *Bull. Ecol.* **19**, 493-522

LEMEE G., 1978 – Précis d'Ecologie végétale. *Masson Paris* pp 212-301

LEPRUN J.C., 1976 - Rapport préliminaire de la mission pédologique dans le Gourma du Mali, novembre 1975. *Report ACC-DGRST Lutte contre l'aridité*, Paris. 46p

LOIREAU M., 1993, Dynamique d'un paysage sahélien au Niger. Bilan entre la production primaire et l'utilisation des ressources par des groupes sociaux. Caractérisation de l'espace et des ressources à l'aide de la télédétection spatiale haute résolution. Mémoire de DEA, Espaces et Société, Univers. Paul Valéry, Montpellier, 123p.

LUDWIG J.A., and MARSDEN S.G., 1996 - Stripes, strands or stipples : modelling the influence of three banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. In *Banded vegetation patterning in arid and semi-arid environment. Ecological processes and consequences for management*. Intern. Symposium, Bondy, 2-6 apr. 1996. 24p

MAHAMANE A., 1993 - Contribution à l'étude de la régénération des populations ligneuses en zone soudano-sahélienne : cas de deux types de formation végétale dans le bassin versant de Bidi (Burkina Faso). *Mémoire DSPU, ENGREF-IAMM-CIHEAM*. Montpellier, France. 130p

MAHAMANE A., 1996 - Typologie et dynamique des peuplements arborés du bas glacis de Bondoukuy, ouest du Burkina Faso. *Mémoire D.E.A., Fac. Sc. Univ. de Ouagadougou B.F.*, 103p

MAHAMANE EL.L. et MONTAGNE P., 1997 - Les grands axes stratégiques du Projet Energie II-Volet Offre pour une gestion rationnelle des écosystèmes contractés péri-urbains. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*, (Actes de l'atelier inter. Niamey, 1995). 17p

MAIGA H., et MAIGA B., 1991 - Etude synthétisée des travaux d'inventaire réalisés au Mali rapport entre la production ligneuse et la pluviométrie *Mémoire d'Ing. des Sciences appliquées de l'I.P.R.* de Katibougou Mali. 67p.

MAINGUET M., 1999 - Aridity, Droughts and Human Development. *Springer Verlag, Heidelberg*, RFA, 350p. (Traduction en anglais, revue et corrigée de l'Homme et la Sécheresse, publié chez Masson, éd. Collection géographie).

MERING C., 1988 - Use of SPOT satellite images for the inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel. In *Proc 22th ERIM Symposium for Remote Sensing*. Oct. 20-26, Abidjan, Ivory Coast., 235-249

MERING C., 1991 - Apport des méthodes de la morphologie mathématique à l'analyse thématique des images de télédétection. Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales, *Deuxièmes Journées de Télédétection*, Bondy, 4-6 dec.1990. ed. M. Pouget 279p.

MILLOGO-RASOLODIMBY J., 1995 - Aperçu général sur l'Ecologie Végétale Appliquée. *FAST, Uni.de Ouaga* (BF) 45p+annexes.

MINISTERE DE L' ENV. ET DU TOURISME, 1994 - " Suivi de la productivité des formations naturelles dans la zone d'aménagement forestier de Nebielianayou "Burkina Faso. *Direction de l'Environnement Ouagadougou* Burkina Faso. 21p.

MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ENV., 1986 - Rapport des travaux réalisés par la section inventaire des ressources naturelles pendant la période 1er janvier 1984 au 31 décembre 1985. *P.U.S.F.*, 119p.

MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ENVIR., 1995 - Bilan-Diagnostic et perspectives sur les politiques et stratégies environnementales. *Direction de l'Environnement*. 57p.

MITJA D. et PUIG H., 1990 – Phytomasse de la strate herbacée de cinq jachères en zone de savane humide (Booro-borotou, Côte d'Ivoire). *Bull. Ecol.* **T.21, 1**, 1990, 19-31

MONOD Th., 1954 - Mode contracté et diffus de la végétation saharienne. In : J.L. Cloudsley-Thompson edit. *Biology of desert : Proceed. of Sympos. On the Biology of hot and cold deserts*, pp 35-44, *Inst. Of Biology London*, 223p

MONTANA C., LOPEZ-PORTILLO J. and MAUCHAMP A., 1990 - The response of two woody species to the conditions created by a shifting ecotone in an arid ecosystem. *Journal of Ecology*, **78**, 789-798.

MORRISON C.G.T., 1948 - Tropical soil-vegetation catenas and mosaic. A study in the South West part of anglo-egyptian Sudan. *Journal of Ecology*, **36**, 1-84.

MUSICK H.B. & GROVER H.D., 1991 - Image textural analysis as indices of landscape pattern. Quantitative methods in landscape ecology : *the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*, eds. M.G. Turner & R.H. Gardner, 77-103.

NOSS R.F., 1990 - Indicators for Monitoring Biodiversity : A Hierarcical Approach. *Conservation Biolo.* **Vol.4 n° 4** , 40p.

NOUVELLET Y. et SAWAGOGO L., 1995 - Recherches sur l'aménagement des formations naturelles dans la région du centre-ouest du Burkina Faso. *IRBET*. 75p.

NOY-MEIR I., 1974 - Stability in arid ecosystems and the effects of man on it. In : *Proceedings of the first international congress of Ecology*, The Hague, The Netherlands, September **8-14**, p220-225

NOY-MEIR I.,1974 - Desert ecosystems : Higher trophic levels. *Annual Review of Ecology and Systematics* **5**, 195-214

NOY-MEIR I., 1981 - Spatial effects in modelling of arid ecosystems. In : *Arid lands Ecosystems*. Goodall D. and Perry R. (eds), Cambridge University Press, p. 255-269.

NOY-MEIR I., 1985 - Desert ecosystems structure and function. In : *Hot deserts and arid shrublands evenari*. Noy-Meir and Goodall D.W.(eds). *Ecosystems of the World vol. 12A*, p.93-103.

ORR B., 1995 - Natural forest management in Sahelian ecosystems of southern Niger. *Journal of Arid Environments* **30**, 129-142.

PADONOU M. et SOW, N., 1997 - Analyse de l'évolution du couvert végétal dans la zone du Liptako burkinabé. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens*.(Actes de l'atelier inter. Niamey, 1995) 36p.

PARDE J., 1966 - Cours de dendrométrie, **Fascicule 1**, *ENEF France*, 51p.

PARDE J. et BOUCHON J., 1988 - Dendrométrie, 2^{ème} édition, *ENGREF Nancy. France*, 75p.

PARENT S., 1991 - Dictionnaire des sciences de l'environnement. Terminologie bilingue français-anglais. *ed. Hatier Rageot*. 748p.

PARKAN J., 1972 - Cours d'Ecologie Forestière. *I.P.R. de Katibougou*. 203p.

PELTIER R., 1989 - Un essai sylvo-pastoral au nord Cameroun. *Inst. R. Agro. /Centre de rech. fores. Maroua*. Cameroun. 41p.

PEYRE DE FABREGUE B. et LEBRUN J.P., 1969 - Plantes rares ou intéressantes de la République du Niger n° II. *Adansonia, ser. 2,9 (1)*, 157-168.

PEYRE DE FABREGUES B., 1971 - Evolution des pâturages naturels sahéliens du Sud Tamesna (Rép. Niger) . *IEMVT. miméog. Maison -Alfort*. 135p.

PEYRE DE FABREGUES B. 1976 - Lexique de noms vernaculaires de plantes du Niger (2^e édition provisoire), 157p.

PEYRE DE FABREGUES B et LEBRUN J. P., 1976 - Catalogue des plantes du Niger. *Etude botanique n°3*, 433p+annexes

PIERI C., 1989 - Fertilité des terres de savanes. *Min. de la Coop. Et du Dév./CIRAD*, 444p.

PLOTNICK ROY E., GARDNER ROBERT H. and O'NEILL ROBERT V., 1993 - Lacunarity indices as mesures of landscape texture. *Landscape Ecology vol. 8 n°3* pp 201-211

POUPON H., 1980 - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au Nord du Sénégal. *Doc. ORSTOM*. 351p.

PROJET ENERGIE II -VOLET OFFRE, NIGER 1991 - Schéma directeur d'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Niamey, *SEED-DE* 203p.

PUIG H. et PREVOST M.F. 1986 – Périodicité de l'accroissement chez quelques arbres de Guyane. *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris*, **132**, 159-172

PUIG H., BRIERA et LESCURE J.-P. 1990 - Phytomasse et productivité. *Bois et Forêts des Tropiques* **31**, 25-31p

RAMADE F., 1978 – Eléments d'écologie appliquée.(2^{ème} édit.) *MacGraw-Hill*, pp 117-200

RAMADE F., 1987 – Les catastrophes écologiques. *MacGraw-Hill*, Paris, 318pp

SAADOU M., 1994 - Les poacées soudano-zambésiennes des milieux terrestres nigériens : étude écomorphologique et rôle dans la flore sahélienne. *Annales de l'Uni.nat. de la Côte d'Ivoire, tome XXVI- B* (Sciences Biologiques) de 1994-95 : 222-236

SAADOU M. et GARBA M., 1994 - Estimation des volumes de bois disponibles des peuplements ligneux des écosystèmes naturels et des agrosystèmes du Département de Tillabéry entre les latitudes de 12°45 'N et 14°30 'N. *Faculté des Sciences – Direct. Environn. Niamey*, 132p.

SAADOU M., 1997 - Méthodes d'étude de la végétation : résumé de cours en DEA. à l'Université de Ouagadougou. *FAST. Burkina Faso*. 48p.

SAPORTA G., 1992 - Probabilités, Analyse des données et Statistique. *Editions Technip*, 493p

- SAWADOGO L. 1996** Evaluation des potentialités pastorales d'une forêt nord-soudanienne du Burkina Faso (cas de la forêt classée de Tiogo). Th.Doct.3ème. cycle Uni. de Ouaga. 125p.
- SCHNELL R., 1971** - Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux. Les problèmes généraux : les milieux et les groupements végétaux. *Gauthier-Villars*. 951p.
- SCHNELL R., 1976** - Flore et végétation de l' Afrique tropicale. *Gauthier-Villars* : 261-283.
- SERVICE ECOLOGIE ENV. SECRETARIAT EXECUTIF CILSS, Ouagadougou Burkina. Faso, 1988** - Rapport final, 313p.
- STAFFORD SMITH D.M. and PICKUP G , 1990** - Pattern and production in arid lands. *Proc. Ecol. Soc. Australie.*, **16**, 195-200.
- SYLLA M.L., 1991** - Cours de Dendrométrie à l'usage des élèves ingénieurs de l'I.P.R. de Katibougou Mali 68p.
- SYLLA. M. L., 1991** - Contribution à la session de recyclage dans le cadre de la formation continue en inventaire forestier pour ingénieurs. Direction des Eaux et Forêt IPR, 36p+annexes.
- TAITA P., 1997** – Contribution à l'étude de la flore et de la végétation de la réserve de la biosphère de la mare aux hippotames (Bala, ouest du Burkina Faso). Thèse 3èm cycle Univ. Ouagadougou, 126p
- THIERY J.M. 1994** - Les applications de °VOYONS° pour des recherches en pays tropicaux. Proc. 2nd Colloque Africain sur les pratiques. Projet de recherche Irat/Cirad. Ronéo.
- TILMAN D. and KAKEIVA P., 1997** - Spatial Ecology : The role of space in population dynamics and interspecific interactions. *Monographs in population Biology* **30**, Princeton University press, 368p
- TONGWAY D.J., 1990** - Soil and landscape processes in the restoration of rangelands. *Australian Rangeland Journal*, **34**, 12-29
- TONGWAY D.J., 1991** - Functional analysis of degraded rangeland as a means of defining appropriate restoration techniques. 36p.
- TOUTAIN B. et DE WISPELAERE G., 1979** - Etude de l'évolution des paysages pastoraux du nord de la Haute-Volta, soudano-sahélien. Conséquences et propositions. L'Aridité, une contrainte au développement, eds. E. Le Floc'h, M. Grouzis, J.C. Bille et A. Cornet. *ORSTOM éditions*. Paris. 419-447.
- TROCHAIN J. L., 1980** - Ecologie végétale de la zone intertropicale non désertique. Edt. Masson, 468p.
- TURNER M.G. and GARDNER R.H., 1990** - Quantitative Methods in Landscape Ecology. Springer-Verlag (eds. R.H., GARDNER), 408p
- WARREN A., 1973** - Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan - a discussion. *Geoderma*, **9**, 75-78.
- WEBER J.L. et LAVOUX T., 1994** – Réflexions sur les critères de définition et de choix des indicateurs de l'environnement. n°3 *IFEN*, 54p
- WHITE F., 1983** - The vegetation of Africa. A description memoir to accompany the UNESCO/AEFTFAT/UNSO vegetation map. 32p.
- WHITE P.S., 1979** - Pattern, process, and naturel disturbance in végétation. *The Botanical Review*, **45**, 229-299
- WORRAL G.A., 1959** - The butana grass patterns. *Journal of Soil Science*, **10(1)**, 34-61.

ANNEXES

ANNEXE 1

Démarches conceptuelle et méthodologique utilisées dans les analyses, la mise en relation et la comparaison des résultats obtenus

1. Introduction :

L'adoption de cette méthodologie dans le traitement des données s'est faite dans le souci d'une meilleure organisation qui permette d'atteindre l'objectif visé. Afin d'éviter la dispersion et pour gagner plus de temps, nous avons commencé par des traitements de dégrossissement et de vérification de la qualité des données. Cette étape a permis aussi de construire de nouvelles variables.

Lors d'une seconde étape s'est réalisé le tour des traitements préliminaires permettant d'avoir des ébauches de résultats selon les grands axes de la thèse.

Une troisième étape a permis de vérifier les résultats obtenus aux différents niveaux de l'échelle de travail. Elle procède par des analyses multivariées, des tests de comparaisons et des mises en relation de ces résultats. Elle a eu pour finalité de retenir des caractéristiques de synthèse (critères et paramètres écologiques vitaux) indispensables pour caractériser les trois systèmes étudiés sur la base des connaissances expérimentales.

Une quatrième étape a permis la validation finale des résultats dans un contexte de changement d'échelle. Cette dernière s'est faite par comparaison et par des tests d'analyse des variances des résultats expérimentaux à ceux obtenus par la conversion des paramètres synthétiques (attributs vitaux) récoltés dans les sites de validation. Cette étape a permis aussi de déduire une compensation de facteurs écologiques qui régit le fonctionnement, la dynamique et la productivité des trois systèmes écologiques à l'échelle régionale de l'ouest nigérien.

2. Rappel sur la problématique de la thèse

Afin d'établir une chronologie des différentes questions auxquelles cette thèse envisage d'apporter des éléments de réponse, il faut rappeler que la problématique de ce travail est un ensemble construit autour des trois principaux modes de contraction de la végétation de plateaux. Elle se fonde sur des logiques de fonctionnement supposées différentes sur les plans biologique et hydrologique.

Ainsi, toutes les investigations faites s'accordent pour répondre principalement à la question centrale qui est posée : y - a - t - il une configuration donnée de facteurs écologiques pour qu'une structure contractée soit plus favorable que d'autres sur les plateaux de l'ouest nigérien ?

Dans le détail, l'étude s'est aussi attelée à répondre à diverses questions de second ordre qui ont permis de discuter la diversité biologique, la résilience, la productivité et la stabilité des modes de structuration de la végétation en fonction des contraintes climatiques et anthropiques.

Avec ces soucis, l'exercice de la thèse s'est traduit à construire deux séries d'hypothèses. La première est de portée scientifique générale et vise à mieux connaître les processus biologiques qui résultent de cette contraction de la végétation. Par contre la seconde est d'ordre opérationnel et permet d'apprécier les changements quantitatifs et qualitatifs engendrés qui sont déterminants à différents niveaux d'échelles.

Pour suivre ce cheminement, il est étudié d'abord deux principales composantes de l'espace : la structure (relations spatiales) du cadre physique et de la végétation, et le fonctionnement (interactions entre des éléments de l'espace). De l'étude de ces deux composantes se déduit l'approche pertinente pour mettre en évidence la troisième et dernière composante : la dynamique (modifications dans le temps des deux premières composantes).

Les données traitées, les hypothèses émises dans les analyses et les comparaisons devraient permettre de faire des réflexions orientées vers les optiques finales visées :

- asseoir des bases d'un suivi écologique à long terme des écosystèmes contractés ;
- disposer d'informations préalables à la perspective d'une cartographie automatique de la production sylvo-pastorale ;
- modifier et simplifier les approches des inventaires forestiers au sol ;
- estimer les quantités de bois énergie exploitables dans la région.

3. Hypothèses de portée scientifique générale

Quoique les formes d'organisation de la végétation des plateaux gréseux semblent globalement se ressembler par leur contraction et qu'elles se situent :

- sur une même partie de la toposéquence représentative de cette région sahélienne,
- et sur un substrat géologique sans variabilité sensible (le continental terminal) ; notre étude émet les hypothèses suivantes :

3.1. il existerait trois grands types de contraction de la végétation de plateaux :

- les structures végétales s'organisent sur des étendues spatiales bien déterminées ;
- les filiations et la coexistence entre structures seraient possibles, mais dans de zones de transition bien déterminées.

3.2. les logiques de fonctionnements biologique et hydrologique sont supposées différentes d'un type à un autre :

- les unités fonctionnelles ont une influence différente sur l'organisation de la végétation dans l'espace, avec pour conséquence la formation des trois faciès de végétation ;
- il devrait y avoir un jeu de compensation de principaux facteurs écologiques à l'échelle régionale ;
- la distribution des flux hydrologiques en surface justifierait le rôle fonctionnel des sols nus qui sont des ressources et pourrait être un indice d'équilibre et de stabilité des systèmes contractés (la contraction de la végétation serait donc une nécessité absolue pour l'existence de ces systèmes).

4. Hypothèses opérationnelles

Dans le cas où les hypothèses générales émises se confirmeraient, la dynamique, donc les changements quantitatifs et qualitatifs engendrés dans le temps et dans l'espace devraient présenter une certaine variation entre les faciès. Les principales hypothèses opérationnelles posées sont :

- la dynamique d'avancée des zones boisées pourrait être fondée selon le cas,
- l'hypothèse d'une productivité au moins égale des systèmes les plus contractés face aux systèmes avec une végétation uniformément répartie sur les plateaux, pourrait se confirmer à l'échelle de la région (hypothèse émise par Noy-Meir, 1973, confirmée par Ichaou, 1995, 1996, à des échelles de stations écologiques).
- de ce mode de fonctionnement longtemps supposé très fragile, peut pourtant se justifier l'existence d'une diversité biologique et d'un état d'équilibre non moins intéressants.

5. Principales questions posées

En fusionnant ces deux types d'hypothèses, on peut dégager une série de questions auxquelles il serait intéressant que l'étude apporte des éléments de réponse :

- quels sont les principaux facteurs qui conditionnent l'existence de ces types de structures ?
- quelle est l'échelle où les effets de ces facteurs principaux sont les plus actifs ?
- quels sont les facteurs déterminants les largeurs des bandes et interbandes ?
- ces largeurs de bandes et interbandes varient-elles en fonction des échelles spatiales ou du gradient des précipitations ?
- quels rôles peuvent jouer le cadre physique (géomorphologie, topographie, pédologie, états de surface) et la pluviométrie dans la compensation écologique ?
- quels sont les facteurs qui permettent la coexistence de structures différentes sur un même plateau, avec un même régime de précipitation ?
- si l'hypothèse d'avancée des bandes est fondée, peut-on la quantifier ?
- quelles conséquences sur la gestion forestière peuvent se déduire du fonctionnement et de la dynamique de ces systèmes ?
- pourrait-on proposer un régime d'exploitation forestière plus adapté à ces systèmes ?
- si les trois types de structures existent, quels sont les variables et paramètres synthétiques qui provoquent le maximum de discrimination ?
- peut-on utiliser valablement ces paramètres comme attributs écologiques vitaux permettant une caractérisation satisfaisante des faciès, de leurs fonctionnements (potentialités) et de leurs évolutions ?
- l'étude pourra-t-elle proposer des perspectives qui modifieront les approches des inventaires forestiers classiques au sol ?
- serait-il possible de disposer de connaissances scientifiques permettant un suivi écologique à long terme ?

Pour répondre à ces treize questions, les catégories de variables suivantes sont utilisées dans les axes d'analyses qui ont permis d'obtenir des éléments de réponse :

6. Principales variables et axes d'analyses

6.1. Quelles sont les principales observations ?

- les arbustes : trois espèces ligneuses (*Guiera s.* : GS, *Combretum m.* : CM, *Combretum n.* : CN)
- les structures végétales : trois principaux faciès de végétation contractée de plateaux gréseux (F1 : faciès de brousse structurée linéaire, F2 : faciès de brousse contractée mixte, F3 : brousse diffuse)
- liste de la flore inventoriée dans les trois systèmes forestiers de plateau

6.2. Liste des variables brutes et construites, quantitatives ou qualitatives

Les variables prises en compte sont constituées pour la plupart par les mesures effectuées directement sur le terrain (variables brutes) ou obtenues par combinaison des variables brutes (variables construites). Elles sont quantitatives ou d'ordre qualitatif.

6.2.1. Mesure du cadre physique et de son rôle dans le fonctionnement

hydrologique des systèmes écologiques

- pente principale ;
- pente latérale ;

- modèles d'agencement des pentes ;
- modèles d'agencement des croûtes d'érosion ;
- pourcentage du supplément d'eau de ruissellement captée (PSR).

6.2.2. Mesures de la structure de la végétation (au sol)

- largeur bande boisée (arc, tache de végétation) ;
- largeur impluvium (bande de sol nu) ;
- largeur période (bande nue + bande boisée) ;
- rapport des largeurs interbande/bande (RIBB) ;
- recouvrement végétal global (du faciès ou de chaque espèce).

6.2.3. Paramètres sur la forme des bosquets (traitement d'image des faciès)

- longueur du grand axe de l'ellipse équivalente à chaque bosquet : GRAXE ;
- longueur du petit axe de l'ellipse équivalente à chaque bosquet : PTAXE ;
- rapport grand axe /petit axe (sans dimension) ou allongement (ALLON) ;
- périmètre du bosquet /surface du bosquet (sans dimension) ou rapport normalisé (RAPNO) .

6.2.4. Inventaire de la flore et la diversité biologique par faciès

- densité globale de peuplement d'arbustes (trois espèces ligneuses dominantes) ;
- densité globale des tiges ligneuses (trois espèces ligneuses dominantes) ;
- densité globale des espèces herbacées ;
- densité spécifique des arbustes (trois espèces ligneuses) ;
- densité spécifique des tiges ligneuses (trois espèces ligneuses) ;
- nombre de brins totaux par arbustes ;
- nombre de types biologiques en présence ;
- nombre d'espèces herbacées ;
- nombre d'espèces ligneuses ;
- nombre total de familles (de ligneux) ;
- nombre total de familles (d'espèces herbacées) ;
- répartition géographique africaine et mondiale des herbacées ;
- répartition géographique africaine et mondiale des ligneux.

6.2.5. Mesures sur le fonctionnement écologique

- migration annuelle des trois espèces ligneuses ;
- migration annuelle des zones boisées ;
- mortalité des tiges ligneuses ;
- estimation du phénomène de sénescence.

6.2.6. Mesures des paramètres d'estimation de la production en phytomasse épigée ligneuse et herbacée par faciès et/ou zones homogènes

- accroissement annuel réel du peuplement de ligneux (sans régime d'exploitation ou après coupe) ;
- accroissement annuel réel par espèce ligneuse (sans régime d'exploitation ou après coupe) ;
- accroissement annuel théorique du peuplement des trois espèces ligneuses ;
- âge moyen des tiges exploitables de chaque espèce ligneuse ;
- âge moyen des tiges ligneuses exploitables dans le peuplement ;
- contribution de chacune des trois espèces à la productivité en bois-énergie ;

- contribution en fourrage des espèces herbacées par faciès et par zones homogènes ;
- contribution en fourrage des familles dominantes d'appartenance des espèces herbacées ;
- densité globale des tiges exploitables du peuplement (trois espèces ligneuses) ;
- densité spécifique des tiges exploitables ;
- diamètre moyen à hauteur d'homme (à 1,50 m du sol) des tiges exploitables (par espèce) ;
- diamètre moyen à hauteur d'homme (à 1,50 m du sol) des tiges exploitables du peuplement ;
- diamètre moyen à la base (à 20 cm du sol) des tiges exploitables (par espèce) ;
- diamètre moyen à la base (à 20 cm du sol) des tiges exploitables du peuplement ;
- hauteur moyenne des tiges exploitables (par espèce) ;
- hauteur moyenne des tiges exploitables du peuplement ;
- production de phytomasse globale épigée ligneuse ;
- production de phytomasse épigée des trois ligneux ;
- production de phytomasse globale épigée herbacée ;
- structure des classes de diamètres des tiges ligneuses exploitables ;
- structure des classes de hauteurs des tiges ligneuses exploitables ;
- surface terrière (par espèce) ;
- surface terrière du peuplement ;
- volume sur pied de la phytomasse épigée ligneuse à utilité domestique (trois espèces).

6.3. Liste des facteurs écologiques supposés actifs

Les principaux paramètres écologiques qui sont supposés avoir des effets actifs sur les variables sont hiérarchisés par catégories :

6.3.1. Facteurs d'ordres biologique et climatique

- espèces (trois modalités : GS, CM, CN) ;
- faciès de végétation (trois modalités : F1, F2, F3) ;
- moyenne de la pluviométrie sur les 30 dernières années (trois modalités : faible, moyenne, bonne).

6.3.2. Facteurs d'ordre géomorphologique

- pourcentage de captage du supplément d'eau de ruissellement : PSR (trois modalités : faible, moyen, satisfaisant) ;
- unité géomorphologique : UGM (trois modalités : plateau supérieur : PS, plateau démantelé : PD et bas plateau : BP).

6.3.3. Facteurs d'ordre topographique

- pente principale (trois modalités : forte, moyenne et faible)
- pente latérale (trois modalités : moyenne, faible, nulle)

7. Liaisons entre facteurs écologiques

L'étude envisagée constitue un test original d'analyse fonctionnelle systémique dans une optique de changement d'échelle (de l'échelle fine à l'échelle régionale). Dans l'approche utilisée, la forte hiérarchisation de niveaux d'échantillonnage constitue une garantie qui peut permettre la validation de résultats à ces mêmes échelles d'analyse.

Pour chacun des niveaux d'échantillonnage, l'analyse cherche à comprendre :

- comment agissent les principaux facteurs pris isolément ?

- quelles sont les liaisons interactives entre eux?
- existe-t-il une compensation entre certains des facteurs ?

Les hypothèses à vérifier sur le rôle joué par l'ensemble des facteurs cités nous intéressent toutes dans l'absolu. Mais les efforts d'investigation ont porté en direction de quelques facteurs dans un premier temps, et ensuite sur certaines hypothèses complémentaires. Ces facteurs retenus sont :

- les espèces ligneuses dominantes ;
- la pente principale et le modèle de combinaison des pentes ;
- le supplément d'eau de ruissellement captée et la pluviométrie (PSR);
- les caractéristiques de la structure de la végétation.

8. Tableau d'hypothèses testées par les analyses pour permettre la comparaison et la mise en relation des résultats

Ce tableau a pour finalité de permettre le choix des meilleures contingences dans la synthèse écologique envisagée. Il se compose de trois grandes colonnes (une première colonne portant les variables entrées, une seconde portant les échelles pertinentes d'analyse et enfin une troisième subdivisée qui donne la liste des facteurs dont les effets supposés actifs sur les variables sont étudiés. Pour une utilisation rationnelle de ce tableau lors des analyses, comparaisons et mises en relation, nous avons tenu compte :

8.1. des dispositifs adoptés

Ils sont du type emboîté. Le premier (à une échelle régionale) correspond à un secteur écologique (grand transect de 300 km de long qui va du 15° N avec 300 mm de pluie aux environs du 12°30 N pour un peu moins de 800 mm de pluie). Le second est à une échelle intermédiaire (sept sites de plateaux où les stations écologiques sont localisées) correspondant aux éléments du secteur écologique. Dans les sept plateaux pilotes, les stations écologiques sont représentées par des transects secondaires caractérisant des conditions homogènes des trois principaux faciès de végétation. Ces sept sites comptent 48 parcelles (éléments de stations) dont 18 (sur trois sites) étudient le faciès à structure linéaire, 14 (sur deux autres sites) étudient le faciès à structure mixte et enfin 16 parcelles (sur deux sites) sont relatives au faciès de végétation diffuse.

8.2. des échelles pertinentes d'analyse :

Les deux dispositifs emboîtés impliquent donc une hiérarchie adoptée dans l'échantillonnage. Ces différents niveaux échantillonnage correspondent aux échelles où l'analyse (**tab.8**), la mise en relation et la comparaison paraissent pertinentes :

Echelle 1 = parcelle (zones nue et boisée) = ELEMENT DE STATION ECOLOGIQUE = PERIODE ;

Echelle 2 = transect secondaire = STATION ECOLOGIQUE RELATIVE A UN FACIES = UNITE FONCTIONNELLE ;

Echelle 3 = site de plateau = UN FACIES OU LES TROIS QUI COEXISTENT = ELEMENT DE SECTEUR ECOLOGIQUE ;

Echelle 4 = grand transect latitudinal et pluviométrique = SECTEUR ECOLOGIQUE (avec trois types de faciès de végétation).

Les échelles 1 et 2 ou échelles fines permettent une compréhension en détail du fonctionnement d'un système et des processus écologiques.

Tab. 50 Hypothèses testées par les analyses, les comparaisons et les mises en relation des résultats

Variables entrées	Echelles d'analyse	esp.	pluvi	PSR	UGM	lati	Pente Long	Pente latér	faciès
structure végétation contractée									
rapport inter-bande/bande	1 et 2		X	X	X	X	X	X	x
recouvrement global	2	x	X	X	X	x	X	X	X
largeur période	1 et 2		X	X	X		X	X	X
largeur impluvium	1 et 2		X	X	X		X	X	X
largeur bande boisée	1 et 2		x	x	x		x	x	x
Analyse des formes des bosquets vus sur images									
GRAXE	2								X
PTAXE	2								X
ALLON	2								X
RAPNO	2								x
flore et diversité biologique									
densité spécifique des arbustes	2	X	X	X	X				X
densité spécifique des tiges	2	X	X	X	X				X
densité globale de peuplement	2	X	X	X	X				X
densité globale des tiges	2	X	X	X	X				X
densité globale des herbacées	2	x	x	x	x				X
nombre des espèces ligneuses	2	X	X	X	X				X
nombre des espèces herbacées	2	X	X	X	X				X
nombre de brins par arbustes	2	X	X	X	X				X
nombre total de familles (d'herbacées)	2	X	X	X	X				X
nombre total de familles (de ligneux)	2	X	X	X	X				X
nombre types biologiques en présence	2	X	X	X	X				X
répartition géographique des ligneux	3 et 4	X	X	X	X				X
répartition géographique des herbacées	3 et 4	X	X	X	X				x
fonctionnement écologique									
avancée annuelle des espèces	1 et 2	X		X					x
avancée annuelle des zones boisées	1 et 2	X		X					x
mortalité des tiges	2	X							X
productivité									
quantité de bois-énergie	2 et 3	X		X	-				X
biomasse globale ligneuse	2 et 3	X		X	-				X
biomasse globale des 3 ligneux	2 et 3	X		X	-				X
contribution 3 espèces en bois-énergie	2 et 4	X		X	-				X
biomasse globale épigée herbacée	2 et 3	x		x	-				x
contribution fourrage des herbacées	2 et 4	X		X	-				X
contribution fourrage des principales familles (d'herbacées)	2 et 4	X		X	-				X
densité spécifique tiges exploitables	2 et 3	X		X	-				X
densité peupl. des tiges exploitables	2 et 3	X		X	-				X
accroissement annuel réel par espèce	2	X		X	-				X
accroissement annuel réel peuplement	2 et 3	X		X	-				X
accroissement théorique peuplement	2 et 3	X		X	-				X
diamètre moyen à 1,50 m tiges expl/esp	2 et 3	X		X	-				X
diamètre moyen à 1,50 m tiges expl/peu	2 et 3	X		X	-				X
diamètre moyen à 20 cm tiges expl/esp.	2 et 3	X		X	-				X
diamètre moyen à 20 cm tiges expl/peu.	2 et 3	X		X	-				X
hauteur moyenne spéci. tiges exploit.	2 et 3	X		X	-				X
hauteur moyenne peupl. tiges exploit.	2 et 3	X		X	-				X
nombre tiges expl/ arbuste (espèces)	2 et 3	X		X	X				X
nombre tiges exploit. (peuplement)	2 et 3	X		X	X				X
nombre tiges expl /arbuste (zon. hom)	2 et 3	X		X	X				X
surface terrière (espèces)	2 et 3	X		X	-				X
surface terrière (peuplement)	2 et 3	X		X	-				X
âge moyen spécifique tiges exploita.	2, 3 et 4	X		-	-				X
âge moyen peuplements exploitables	2, 3 et 4	X		-	-				X
structure classes hauteurs tiges explo.	2 et 3	X		X	-				X
structure classes diamètres tiges expl.	2 et 3	X		X	-				X

L'échelle 3 dite échelle intermédiaire permet de comprendre les interactions entre les faciès qui peuvent coexister sur un même plateau. Elle a permis aussi de définir les attributs vitaux qui caractérisent essentiellement les trois modes de contraction de la végétation sur ces plateaux.

L'échelle 4 est celle du niveau régional. Elle a permis d'analyser le fonctionnement des trois modes d'organisation de la végétation selon leurs positions latitudinale et pluviométrique. C'est aussi à cette dernière échelle qu'a été mise en évidence la compensation de facteurs écologiques géomorphologique et pluviométrique.

ANNEXE 2 Noms des familles et espèces**Acanthaceae**

Blepharis maderaspatensis (L.) Hayne ex Roth.

Aizoaceae

Mollugo nudicaulis L.

Amaranthaceae

Achyranthes aspera L.

Pandiaka angustifolia (Vahl.) Hepper.

Asteraceae = Compositae

Bidens biternata (Lour.) Merr. Et Sherff.

Caesalpiniaceae

Cassia mimosoides L.

Commelinaceae

Commelina forskalaei Vahl.

Cyanotis lanata Benth.

Convolvulaceae

Evolvulus alsinioides L.

Ipomoea pileata Roxb.

Ipomoea vagans Bak.

Cyperaceae

Fimbristylis hispidula (Vahl.) Kunth. Subsp. *hispidula*

Fabaceae = Papilionaceae

Indigofera dendroides Jacq.

Tephrosia pedicellata Bak.

Zornia glochidiata Reichb. Ex DC.

Lamiaceae = Labiées

Plectranthus gracillimus (T.C.E. Fries) Hutch. Et Dandy.

Malvaceae

Sida cordifolia L.

Poaceae

Aristida mutabilis Trin. Et Rupr.

Brachiaria ramosa (L.) Stapf.

Brachiaria villosa (Lam.) A. Camus.

Dactyloctenium aegyptium (L.) Willd.

Digitaria gayana (Kunth.) A. Chev.

Digitaria horizontalis Willd.

Diheteropogon hareupii Hitch.

Eragrostis tremula Steud.

Loudetia togoensis (Pilger.) C.E. Hubb.

Microchloa indica (L.F.) P.Beauv.

Panicum laetum Kunth.

Pennisetum pedicellatum Trin.

Schizachyrium exile (Hochst.) Pilger.

Schoenefeldia gracilis Kunth.

Setaria sphacelata (Schum.) Mass.

Sporobolus festivus Hochst. ex A. Rich.

Tripogon minimus (A.Rich.) Steud.

Portulacaceae

Portulaca grandiflora Hook.

Rubiaceae

Spermacoce filifolia (Schum. et Thonn.) Lebr. Et St.

Spermacoce radiata (DC.) Hiern.

Spermacoce ruelliae Dc.

Tiliaceae

Triumfetta pentandra A. Rich.

ANNEXE 3 Noms des Embranchements, Familles et espèces

Embranchement des Angiospermes

Acanthaceae

- Blepharis linariifolia* Pers.
- Blepharis maderaspatensis* (L.) Hayne Ex Roth.
- Justicia insularis* T. Anders.

Aizoaceae

- Mollugo nudicaulis* L.

Amaranthaceae

- Achyranthes aspera* L.
- Amaranthus graecizans* L.
- Pandiaka angustifolia* (Vahl.) Hepper.
- Pupalia lappacea* (L.) Juss.

Amaryllidaceae

- Pancrathium trianthum* Herb.

Ampelidaceae

- Ampelocissus africana* (Lour.) Merrill.
- Cissus quadrangularis* L.

Araceae

- Stylochiton hypogaeus* Lepr.
- Stylochiton lancifolius* Kotschy et Peyr.

Asclepiadaceae

- Caralluma adscendens* (Roxb.) R. Brown.
- Ceropegia rynchantha* Schltr.
- Cryptolepis sanguinolent* (Lindl.) Schltr.
- Gymnema sylvestre* (Retz.) Schultes.
- Pergularia tomentosa* L.

Asparagaceae

- Asparagus africanus* Lam.

Asteraceae = Compositae

- Acanthospermum hispidum* DC.
- Bidens biternata* (Lour.) Merr. Et Sherff.
- Vernonia galamensis* (Cass.) Less.

Caesalpiniaceae

- Cassia mimosoides* L.
- Cassia nigricans* Vahl.
- Cassia obtusifolia* L.

Capparidaceae

- Cleome gynandra* L.
- Cleome monophylla* L.
- Cleome viscosa* L.

Caryophyllaceae

- Polycarpaea bizantha* Hochst. ex A. Rich.
- Polycarpaea linearifolia* (DC.) DC.

Colchiaceae

- Gloriosa simplex* L.

Commelinaceae

- Aneilema pomeridianum* Stanfield et Brenan
- Commelina benghalensis* L.
- Commelina erecta* L.
- Commelina forskalaei* Vahl.
- Cyanotis lanata* Benth.

Convolvulaceae

- Evolvulus alsinioides* L.
- Ipomoea asarifolia* (Desr.) Roem. Et Schult..
- Ipomoea coscinosperma* Hochst. et Choisy.
- Ipomoea heterotricha* F. Didr.
- Ipomoea pileata* Roxb.

Ipomoea vagans Bak.
Merremia pinnata (Choisy.) Hall.F.

Cucurbitaceae

Citrullus lanatus (Thunb.) Mast. Et Nakai.
Cucumis melo Naud.
Cucumis prophetarum L.

Cyperaceae

Cyperus amabilis Vahl.
Cyperus rotundus L.
Fimbristylis debilis Steud.
Fimbristylis hispidula (Vahl.) Kunth. Subsp. *hispidula*
Kyllinga welwitschii Ridley.
Mariscus squarrosus (L.) C.B.Cl.

Dracaenaceae

Sansevieria liberica Gér. Et Labr.

Euphorbiaceae

Acalypha ciliata Forsk.
Chrozophora brocchiana Vis.
Euphorbia convolvuloides Hochst. ex Benth.

Fabaceae = Papilionaceae

Abrus precatorius L.
Alysicarpus ovalifolius (Schum. et Thonn.) J. Léonard.
Crotalaria atrorubens Hochst. ex Benth.
Crotalaria macrocalyx Benth.
Crotalaria pallida Ait.
Indigofera astragalina DC.
Indigofera dendroides Jacq.
Indigofera diphylla Vent.
Indigofera prieuriana Guil. Et Perr.
Indigofera tinctoria L.
Macrotyloma uniflorum (Lam.) Verdc.
Sesbania pachycarpa DC.
Stylosanthes erecta P.Beauv.
Tephrosia bracteolata Guil. Et Perr.
Tephrosia linearis (Willd.) Pers.
Tephrosia pedicellata Bak.
Zornia glochidiata Reichb. Ex DC.

Hyacinthaceae

Dipcadi viride (L.) Moen.
Urginia indica (Roxb.) Kunth.

Iridaceae

Gladiolus gregarius Welw. Ex Bak.

Lamiaceae = Labiées

Aeolanthus pubescens Benth.
Endostemon tereticaulis (Poir.) M. Ashby.
Leucas martinicensis (Jacq.) R. Br.
Plectranthus gracillimus (T.C.E. Fries) Hutch. Et Dandy.

Malvaceae

Hibiscus asper Hook.F.
Sida alba L.
Sida cordifolia L.
Sida ovata Forsk.
Wissadula amplissima (L.) R. E. Fries.

Nyctaginaceae

Boerhavia erecta L.

Pedaliaceae

Ceratotheca sesamoides Endl.
Sesamum alatum Thon.

Poaceae

Andropogon gayanus Kunth.
Aristida adscensionis L.
Aristida mutabilis Trin. Et Rupr.
Aristida sieberiana Trin.
Brachiaria ramosa (L.) Stapf.
Brachiaria villosa (Lam.) A. Camus.
Cenchrus biflorus Roxb.
Chloris gayana Kunth.
Ctenium elegans Kunth.
Cymbopogon schoenanthus (L.) Spreng.
Dactyloctenium aegyptium (L.) Willd.
Digitaria gayana (Kunth.) A. Chev.
Digitaria horizontalis Willd.
Diheteropogon hareupii Hitch.
Eragrostis pilosa (L.) P. Beauv.
Eragrostis tremula Steud.
Loudetia togoensis (Pilger.) C.E. Hubb.
Microchloa indica (L.F.) P.Beauv.
Panicum laetum Kunth.
Panicum nigerense Hitch.
Panicum subalbidum Kunth.
Pennisetum pedicellatum Trin.
Schizachyrium exile (Hochst.) Pilger.
Schoenefeldia gracilis Kunth.
Setaria pumila (Poir.) Roem. Et Schult.
Setaria sphacelata (Schum.) Mass.
Sporobolus festivus Hochst. ex A. Rich.
Tetrapogon cenchrifomis (A.Rich.) Clayton.
Tripogon minimus (A.Rich.) Steud.

Portulacaceae

Portulaca grandiflora Hook.

Rubiaceae

Mitracarpus villosus (S.W.) DC.
Spermacoce filifolia (Schum. et Thonn.) Lebr. Et St.
Spermacoce radiata (DC.) Hiern.
Spermacoce ruelliae DC.

Sapindaceae

Cardiospermum halicacabum L.

Scrophulariaceae

Striga bilabiata (Thun.) O.Ktze.

Solanaceae

Physalis angulata L.

Sterculiaceae

Walteria indica L.

Tiliaceae

Corchorus tridens L.
Triumfetta pentandra A. Rich.

Turneraceae

Tricliceras pilosum (Willd.) R. Fern.

Embranchement des Bryophytes**Bryaceae**

Archidium tenellum P. Vard.
Fissidens desertorum (C.Null.) Par.

Marchantiaceae

Riccia trichocarpa Howe.

ANNEXE 4 Noms des familles et espèces

Anacardiaceae

- Lannea acida* A. Rich.
- Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst.

Apocynaceae

- Strophanthus sarmentosus* DC.

Asclepiadaceae

- Leptadenia hastata* (Pers.) Decne. in DC.
- Leptadenia pyrotechnica* (Forsk.) Decne.

Bombacaceae

- Adansonia digitata* L.
- Bombax costatum* Pellegr. et Vuillet.

Burseraceae

- Commiphora africana* (A. Rich.) Engel. in DC.

Caesalpiniaceae

- Bauhinia rufescens* Lam.
- Cassia sieberana* DC.
- Cordyla pinnata* (Lepr. ex A. Rich.) Milne-Redhead
- Detarium microcarpum* Guill. et Perr.
- Piliostigma reticulatum* (DC.) Hochst.

Capparidaceae

- Boscia angustifolia* Guill. et Perr.
- Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir.
- Capparis corymbosa* Lam.
- Maerua angolensis* DC.

Combretaceae

- Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. et Perr.
- Combretum aculeatum* Vent.
- Combretum glutinosum* Perr. ex DC.
- Combretum micranthum* G.
- Combretum nigricans* Lepr. ex Guill. et Perr.
- Guiera senegalensis* J.F. Gmel.
- Terminalia avicennioïdes* Guill. et Perr.
- Terminalia macroptera* Guill. et Perr.

Euphorbiaceae

- Croton zambesicus* Müll. Arg.

Mimosaceae

- Acacia ataxacantha* DC.
- Acacia machrostachya* Reichenb. ex Benth.
- Acacia nilotica* (L.) Willd. ex Del.
- Acacia erythrocalyx* Breman
- Acacia senegal* (L.) Willd.
- Acacia sieberiana* DC.
- Dichrostachys cinerea* (L.) Wight et Arn.
- Entada sudanica* Schweinf.
- Prosopis africana* (Guill. et Perr.)

Moraceae

- Ficus polita* Vahl.

Olacaceae

- Ximenia americana* L.

Rhamnaceae

- Ziziphus mauritiana* Lam.

Rubiaceae

- Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don)
- Feretia apodanthera* Del.
- Gardenia sokotensis* Hutch. Kew Bull.
- Mitragyna inermis* (Willd.) O. Ktze.

Sapotaceae

Manilkara multinervis (Bal.) Dubard,

Ebenaceae

Diospyros mespiliformis Hochst. ex A. DC.

Tiliaceae

Grewia flavescens Juss.

Grewia venusta Fresen.

Verbenaceae

Vitex doniana Sweet, Hort.

Balanitaceae

Balanites aegyptiaca (L) Del.