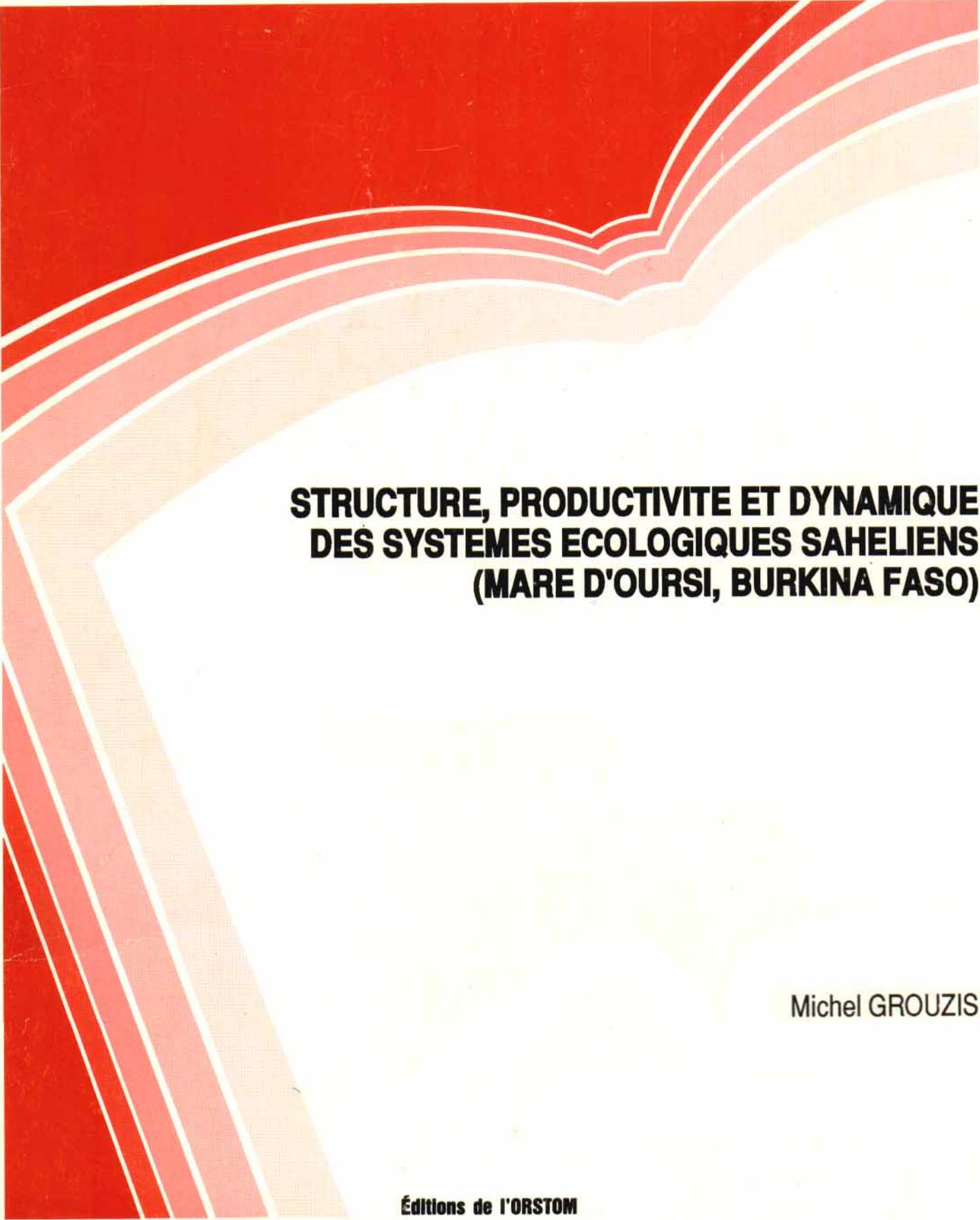


Etudes et Thèses



STRUCTURE, PRODUCTIVITE ET DYNAMIQUE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES SAHELIENS (MARE D'OURSIS, BURKINA FASO)

Michel GROUZIS

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Michel GROUZIS

**STRUCTURE, PRODUCTIVITE ET DYNAMIQUE
DES SYSTEMES ECOLOGIQUES SAHELIENS
(MARE D'OURSI, BURKINA FASO)**

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

Collection **ETUDES et THESES**

PARIS 1988

Cet ouvrage a fait l'objet d'une thèse
de doctorat d'état en Sciences Naturelles,
soutenue le 25 septembre 1987
à l'Université de Paris Sud, Centre d'Orsay

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contre façon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

ISSN : 0767-2888
ISBN : 2-7099-0927-8

© ORSTOM 1988

AVANT-PROPOS

Avant d'exposer les résultats de ce travail j'aimerais adresser mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué ou facilité sa réalisation.

Je remercie tout d'abord Monsieur B. SAUGIER, Professeur à l'Université de Paris Sud, d'avoir accepté de présider mon jury et pour l'accueil qu'il m'a toujours réservé lors des nombreuses entrevues que j'ai eues avec lui, pour les problèmes qu'il m'a posés et les suggestions qu'il m'a faites.

Je suis très sensible à l'intérêt que Monsieur le Professeur A. LACOSTE témoigne à mon travail. Je le remercie d'avoir bien voulu participer à mon jury.

Je remercie vivement le Docteur H. BREMAN du Centre de Recherches Agrobiologiques de Wageningen d'avoir bien voulu retarder sa mission en Afrique et me consacrer une part importante de son temps en participant à mon jury.

Que Monsieur A. BERGER, Directeur de Recherches au CNRS trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour l'intérêt particulier qu'il a toujours porté à mon travail et pour avoir bien voulu faire partie de mon jury.

Monsieur G. BOUDET, Chef du Service Agrostologie à l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux a suivi la progression de mes recherches avec une attention constante. Ses conseils m'ont été précieux et je tiens à le remercier.

Je suis très reconnaissant à Monsieur J.-L. GUILLAUMET, Directeur de Recherches à l'Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération, d'avoir guidé mes premiers pas à l'ORSTOM et d'avoir accepté la lourde tâche d'être le rapporteur de ma thèse.

Ce travail a été réalisé au Centre ORSTOM de Ouagadougou. Je tiens à exprimer mes sentiments de profonde reconnaissance à :

- Monsieur J. CLAUDE, Directeur du Centre de 1977 à 1983, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, les moyens matériels qu'il a mis à ma disposition et la confiance qu'il m'a accordée au moment de son départ du Burkina Faso ;

- Monsieur A. BERNARD pour la rigueur de son organisation ;

- Monsieur A. COLONGE dont les compétences ont beaucoup facilité les missions de terrain.

Au cours de ce programme j'ai eu le plaisir d'encadrer le travail de divers stagiaires : TRAORE (1977) et N'GARSARI (1979) de l'Institut Supérieur Polytechnique de Ouagadougou, Madame LEGRAND (1978, Institut Agricole de Beauvais), Madame PALE (1981, DEA Université Paris VI) et LEVANG (1977) et LEGRAND (1978) tous deux volontaires du Service National. Une partie des résultats présentés dans la méthodologie et le chapitre germination leur revient et je les en remercie.

Le cadre pluridisciplinaire de ce programme a évidemment facilité les échanges avec les collègues des autres disciplines : hydrologie, agronomie, économie... J'ai découvert l'intérêt et la richesse des collaborations concrètes. Mentionnons notamment celles développées avec M. SICOT (Agronome ORSTOM) pour les relations phytomasse/précipitation, M. METHY (Physicien CNRS) pour les études radiométriques, J. ALBERGEL (Hydrologue ORSTOM) et J.P. CARBONNEL (Géologue CNRS) pour les aspects d'évolution climatique et F. PARIS (Archéologue ORSTOM), A. PERSON et J.F. SALIEGE (Géologue et Chimiste de l'Université de Paris VI) pour les études de dynamique historique. Certains résultats présentés dans ce mémoire sont le fruit de ce travail collectif.

Ce travail a bénéficié localement du concours du personnel du centre et je tiens à exprimer ma reconnaissance tout particulièrement à M. MAIGA et S. NIGNAN, techniciens botanistes et compagnons de brousse et à O. PASSARI pour son talent et la qualité de ses dessins d'illustrations.

La rédaction de ce mémoire a été réalisée au Centre L. Emberger, laboratoire propre du CNRS à Montpellier. Que Monsieur DI CASTRI Directeur du Centre, et Monsieur JACQUARD Chef de l'Unité Biologie des Populations et

des Peuplements soient remerciés pour leur accueil.

Outre les échanges fructueux avec les nombreux spécialistes de ce centre j'y ai bénéficié des compétences de l'Unité BIOMETRIE : initiation au traitement des données, accès à la programmathèque particulièrement adaptée à nos besoins.

Je suis heureux de témoigner à Monsieur M. VILANOVA, responsable de l'Atelier de dessin, ma profonde gratitude pour son accueil, ainsi qu'à M. C. LACOMBE pour sa dextérité dans l'exécution des graphiques.

Madame F. BARBRY et Madame M. SOPHY ont aidé Jacqueline GROUZIS à se familiariser avec le traitement de texte. Qu'elles reçoivent l'expression de ma reconnaissance. Mes remerciements s'adressent particulièrement à J. GROUZIS, pour avoir assuré avec beaucoup de patience, de compétence et de gentillesse le traitement et la mise au point de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur M. BARBRY de l'Institut de Botanique de Montpellier pour avoir effectué les travaux photographiques.

Je tiens à remercier enfin les Instituts et les organismes qui ont financé cette recherche. L'Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération a soutenu ce travail en me donnant une part importante des moyens nécessaires à sa réalisation. Cette étude a par ailleurs bénéficié de l'aide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique et du Fond Européen pour le Développement.

Les autorités du Burkina Faso, notamment le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur grâce au soutien des directeurs successifs de la Direction de la Recherche : Messieurs NACRO, BONKOUNGOU et KABORE, ont beaucoup facilité la réalisation de ce travail. L'hospitalité, l'estime et l'aide appréciable que m'ont apportées les Sahéliens, m'ont beaucoup touché.

Que ce mémoire soit le témoignage de ma profonde gratitude.

ABSTRACT

The study deals with the structure, some aspects of the functioning and the dynamics of natural vegetation types of sahelian shortgrassland in the north of Burkina Faso.

Sahelian ecological conditions (i.e, climatic and edaphic aridity, variability, seasonality...) are first described. The problem of imbalance between human needs and limited natural resources is adressed.

In a second part methodological aspects relating to sampling and accuracy of measurements in aboveground or belowground phytomass evaluation, either by the traditional method of hand clipping or by remote sensing method are discussed.

Results for the 1976-1984 period at different scales (ecological site, basin, and region) are related to :

(1) vegetation structure (biological and floristic spectrum of the herbaceous layer, density and demographic structure of lignous plants), (2) the establishment of vegetation : seed production seed germination under experimental conditions, seedling establishment of vegetation, (3) the phenology and productivity of aboveground and underground vegetation. Annual variation in herbaceous phytomass can be expressed as a function of rainfall, a relation used for evaluating productivity and carrying capacity on a frequential basis, (4) the conditions of desertification and regeneration capability of sahelian vegetation (as defined by the effects of exlosure on flora, phytomass, rain use efficiency, tree density and by the effects of management : tillage, afforestation...).

These structural features and present day dynamic characteristics as well as some aspects of past dynamics (climatic evolution ancient landuse...) avail the design of a sahelian ecological system

dynamics model. This model shows that, in spite of conspicuous homogeneity, this system has a large floristic, structural, functional and dynamic diversity.

As a result of persistent drought and human degradation this ecological system evolves towards desertisation.

Some priorities in research programmes (process of establishing equilibrium in sahelian ecosystem, limits of its upsetting process of regeneration and rehabilitation conditions...) are then proposed.

Keywords : Burkina Faso - Sahel - Ecosystems - Vegetation structure - Establishment - Productivity - Rain use efficiency - Carrying capacity - Climatic evolution - Ancient landuse - Ecological equilibrium.

RESUME

Cette étude s'insère dans le cadre d'un programme pluridisciplinaire sur l'inventaire des ressources d'un milieu sahélien (Bassin versant d'Oursi, Nord du Burkina Faso) et l'analyse de son fonctionnement. Elle porte plus spécifiquement sur la structure, certains aspects du fonctionnement et l'évolution des phytocénoses sahéliennes.

La première partie traite d'une part, des caractères généraux du milieu et d'autre part, des hommes et de leurs activités. Les conditions sahéliennes (aridité climatique, aridité édaphique, variabilité, saisonnalité...) sont de ce fait rappelées et le problème du déséquilibre entre les besoins d'une population en expansion et les ressources limitées d'un environnement soumis à de sévères conditions est posé.

Dans une deuxième partie, l'étude aborde les aspects méthodologiques relatifs à l'échantillonnage et à la précision des mesures dans l'estimation des phytomasses épigée et hypogée. Les techniques classiques de la récolte et les techniques radiométriques sont discutées.

Les résultats recueillis de 1976 à 1984 à l'échelle de la station écologique, du bassin versant et de la région sont alors présentés dans la troisième partie qui comporte cinq chapitres. Le premier chapitre donne les caractéristiques pluviométriques et édaphiques des stations d'études. Une analyse structurale de la végétation (spectre biologique, spectre floristique de la strate herbacée, densité et structure démographique du peuplement ligneux) y est par ailleurs menée. L'objectif est de bien caractériser les unités d'observations afin de cerner leur variabilité et de faciliter les comparaisons avec des études régionales conduites dans d'autres pays sahéliens.

La reconstitution de la strate herbacée, les variations inter-annuelles de la composition floristique et de la production dépendent étroitement de la production de semences, de leur longévité et de leurs facultés germinatives. Cet important aspect de la compréhension de la

dynamique des phytocénoses sahéliennes constitue le thème d'étude du chapitre II. Il est abordé à la fois sur le plan expérimental (propriétés germinatives des semences en conditions contrôlées) et in situ (établissement des plantules, stock de semences...). Les résultats montrent que la quantité de diaspores ne constitue pas un facteur limitant pour la reconstitution de la végétation. Ils précisent les conditions pluviométriques d'établissement et mettent en évidence les mécanismes physiologiques (inhibition, dormance, post-maturation) qui régissent la germination.

La production primaire, donnée de base en écologie, car elle permet de comprendre le fonctionnement d'un écosystème, est étudiée dans le chapitre III. La variabilité des cycles phénologiques et les valeurs caractéristiques (production annuelle, productivité, vitesse de croissance relative) sont appréhendées à l'échelle de la station écologique, à partir de l'étude fine d'unités représentatives des principaux types de végétation. Le déterminisme écologique de cette production est discuté notamment par rapport à l'énergie incidente et à l'eau (pluie, pluie infiltrée). Sur le plan de l'application au développement, un modèle simple de production en fonction des précipitations efficaces est proposé pour fournir les valeurs régionales de production et de capacités de charges fréquentielles. Cet outil permet de suivre les variations interannuelles de la production végétale, de la charge pastorale et de prendre éventuellement dès la fin de la période des pluies, les mesures nécessaires pour adapter la charge aux ressources de l'année.

L'étude de la production épigée est complétée par celle de la fraction hypogée. Le chapitre IV rapporte notamment les observations et conclusions relatives à la distribution des systèmes racinaires en relation avec les conditions édaphiques, les variations interannuelles de la phytomasse, de la production annuelle hypogée et du rapport fraction hypogée/fraction épigée. Une estimation du "turn-over" de la fraction hypogée est par ailleurs réalisée.

La dynamique des systèmes écologiques est abordée dans le chapitre V. Après avoir rappelé les conditions de la dégradation (sécheresse, facteurs anthropiques), les capacités de régénération des

phytocénoses sont définies à l'aide d'une étude expérimentale portant sur les effets d'une mise en défens sur l'évolution de la flore, de la phytomasse, de l'efficience en eau, la densité des ligneux. Les effets d'aménagements (travail du sol, reboisement...) permettent par ailleurs de préciser les possibilités de restauration des systèmes écologiques fortement dégradés.

Ces différentes caractéristiques de structure et de dynamique actuelle, associées à certains aspects de la dynamique historique (évolution climatique, occupation ancienne) permettent d'élaborer un modèle dynamique du système écologique sahélien. Celui-ci montre que ce système écologique est d'une grande complexité qui sous une relative homogénéité physiologique masque une grande diversité floristique, structurale fonctionnelle et évolutive. Sous l'effet conjugué de la persistance de la sécheresse et surtout de l'anthropisation, ce système écologique est le siège de processus de dégradation conduisant à sa désertisation progressive.

A l'issue de cette analyse et après avoir tiré les principales caractéristiques de la structure et de la dynamique des systèmes écologiques sahéliens, la quatrième partie propose des axes prioritaires de recherche : définition de l'équilibre écologique, de leur seuil de rupture, des conditions de régénération et de restauration.

INTRODUCTION GENERALE

Cette étude a été réalisée au Burkina Faso, pays de l'Ouest Africain, situé entre les parallèles 9° et 15° de latitude Nord et les méridiens 2° de longitude est et 5° de longitude Ouest. Bordé au Nord par le Niger et le Mali et au Sud par la Côte d'Ivoire, le Togo et le Bénin (carte de situation) ce pays couvre une superficie de 274 000 km².

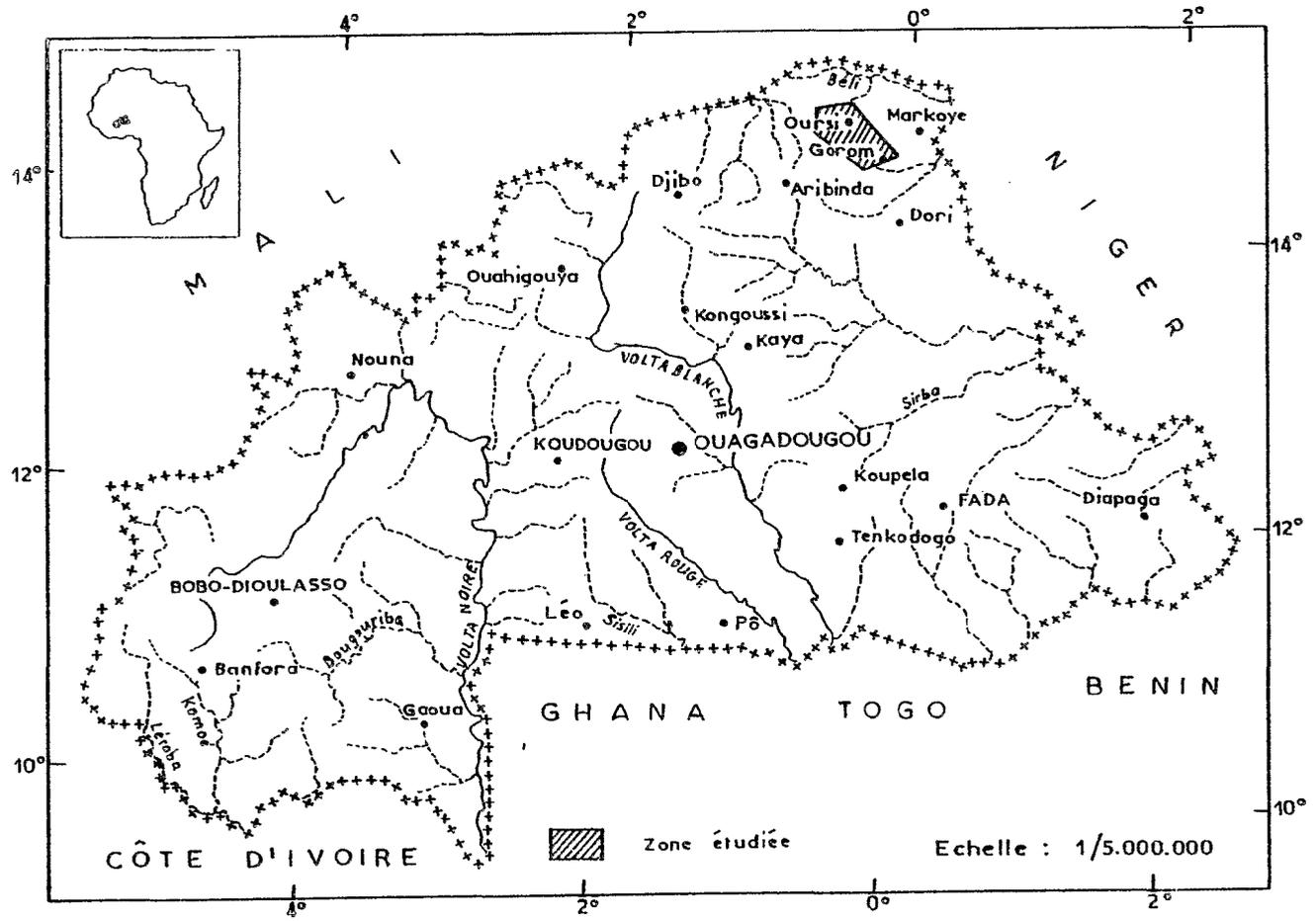
Trois zones climatiques principales s'étagent du Nord au Sud. Ce sont la zone sahélienne (précipitations inférieures à 600 mm), la zone soudano-sahélienne (précipitations comprises entre 600 et 1000 mm) et la zone soudanienne (précipitations supérieures à 1000 mm). Le réseau hydrographique est pauvre et se caractérise principalement par l'absence d'importants cours d'eau permanents. Deux plateaux latéraux constitués de grès infracambrien bordent au Sud-Est et à l'Ouest-Nord-Ouest une plaine centrale qui occupe 85 % du territoire et qui est formée essentiellement de roches éruptives et métamorphiques.

La population du Burkina est de 7 millions d'habitants (1981). C'est une population rurale (94 %) caractérisée par une répartition géographique très déséquilibrée. Plus de 90 % de la population vivent dans les parties arides et semi-arides du pays correspondant aux zones sahéliennes et nord soudaniennes qui couvrent plus des 2/3 du territoire.

L'économie du Burkina Faso est essentiellement agraire. En effet l'agriculture occupe 88 % de la population active totale et représente 50 % du produit intérieur brut. Cette agriculture est dominée par les cultures vivrières et des systèmes de production qui restent dans l'ensemble extensifs. Seules certaines cultures industrielles bénéficient des moyens de production appropriés. L'élevage représente 10 % du P.I.B. et plus de 30 % des exportations officielles du pays. Malgré un développement rapide au cours de ces dernières années l'industrie occupe toujours une place modeste dans l'économie du pays.

Le Burkina Faso tout comme l'ensemble des pays sahéliens se trouve confronté à des problèmes liés à la croissance démographique, à la

CARTE DE SITUATION DE LA ZONE D'ÉTUDE



contrainte sécheresse, au déficit structurel de la production vivrière et à la dégradation des conditions d'élevage. Du fait de son enclavement, de la faiblesse de ses potentialités et de l'insuffisance de son infrastructure le Burkina Faso accuse pleinement les effets de ces contraintes notamment, la frange sahélienne de son territoire.

Ce milieu sahélien peut être considéré comme un système écologique défini par des conditions spécifiques d'aridité : longueur de la saison sèche, intensité de l'évaporation, faiblesse et forte variabilité des précipitations, précarité de la réserve hydrique du sol, couverture végétale discontinue... C'est une zone qui présente des caractères fluctuants pour ce qui concerne les variables écologiques. Les équilibres biologiques y sont fragiles et peuvent être rompus à tout moment. De telles conditions imposent des limitations sévères à son exploitation.

Pour parvenir à une utilisation plus rationnelle du milieu sahélien, il est non seulement nécessaire de comprendre le réseau d'interactions complexes et dynamiques qui se manifestent au niveau de cette entité, mais encore de saisir les relations entre l'homme et son milieu. Cela suppose une bonne connaissance de la structure et du fonctionnement de l'écosystème et de la variation de ses ressources en fonction des aléas climatiques. De nombreux travaux ont été menés dans le cadre sahélien. Citons notamment ceux de l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux relatifs à l'estimation des ressources fourragères de différents territoires, ceux de l'ORSTOM dans le cadre du programme biologique international sur "l'écologie d'une savane sahélienne du Ferlo septentrional" (BILLE 1977, BOURLIERE 1978, POUPON 1980, CORNET 1981), et plus récemment le projet "production primaire au Sahel" (PENNING DE VRIES et DJITTEYE 1982), ainsi que le projet "Inventaire et Surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens" (VAN PRAET 1983).

De nombreux résultats ont été obtenus dans le cadre de ces programmes mais il faut reconnaître qu'outre le caractère ponctuel dans le temps et dans le thème d'étude de certaines de ces recherches, ces travaux n'ont pas toujours intégré les rapports de l'homme avec son milieu. Or, afin de pouvoir dégager les lignes directrices de la planification de ces

zones à conditions marginales il est nécessaire d'aboutir à une approche multidisciplinaire des interactions de l'écosystème. Seule, cette approche permet de définir les bases écologiques d'un développement rural intégré.

C'est dans cet esprit et, suite aux successions de sécheresse des années 1970, qu'a été élaboré, à l'initiative de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique^{*}, un programme de recherche intégré dans la région de la Mare d'Oursi (Burkina Faso), considérée comme représentative des contraintes générales du Sahel burkinabe. L'objectif de ce vaste programme est de dresser un inventaire des ressources des milieux physiques et biologiques, des conditions de leur exploitation par l'homme, et de définir l'évolution de ces différentes ressources en fonction des facteurs écologiques.

C'est dans le cadre de ces travaux que se situent nos recherches axées sur l'étude de la structure, de la productivité et de la dynamique des systèmes écologiques du bassin versant de la Mare d'Oursi. Sur le plan fondamental ce travail vise à mieux comprendre les processus d'établissement, du fonctionnement et d'évolution des phytocénoses sahéliennes en relation avec les conditions écologiques, notamment le facteur climatique et le facteur anthropique. Sur le plan de l'application au développement ce travail a pour objectifs, l'estimation de la productivité des herbages et l'appréciation de leur variation spatio-temporelle.

La conception de cette étude s'est faite sur la base de trois points essentiels :

- la végétation étudiée est dominée par des espèces annuelles : cette caractéristique conduit à privilégier tous les aspects permettant la compréhension de la reproduction du système (stock et caractères morphologiques des semences, aptitudes à la germination, conditions d'établissement...);

* Comité Lutte contre l'Aridité en Milieu Tropical : Action concertée et conjointe contre l'aridité (Mali, Burkina Faso, Niger)

- la végétation étudiée constitue la quasi-totalité de l'alimentation des troupeaux de cette zone d'élevage : ce fait incite à réunir toutes les informations qualitatives et quantitatives de base nécessaires à une bonne connaissance de la productivité des herbages (composition floristique, cycle phénologique, dynamique de la production, déterminisme écologique de la production...) ;

- l'importance de la pression exercée par l'homme et ses activités sur la dynamique régressive globale du système, conduit à effectuer une analyse fine de l'évolution comparée de la végétation protégée et exploitée en vue de déterminer l'importance relative des facteurs écologiques et de l'homme sur les capacités de régénération de ces phytocénoses et sur la dynamique de ces systèmes écologiques.

La première partie de ce mémoire traite d'une part, des caractères généraux du milieu (climat, sol, végétation) et d'autre part, des hommes et de leurs activités.

La seconde partie aborde certains aspects méthodologiques qui ont fait l'objet d'observations spécifiques. Les problèmes d'échantillonnage, leur représentativité, la précision des mesures et les conditions d'utilisation de techniques nouvelles dans l'estimation des phytomasses constitueront les centres d'intérêt de cette partie.

Les résultats recueillis de 1976 à 1984 sont présentés dans la troisième partie. Ceux-ci portent sur la caractérisation des unités de végétation étudiées et des conditions écologiques qui leur sont associées (chapitre I), les modalités de la mise en place du peuplement (chapitre II), la production primaire, son déterminisme écologique et la détermination des capacités de charge (chapitre III), les systèmes racinaires (chapitre IV). Le chapitre V définit, après avoir rappelé les conditions de la dégradation, les capacités de régénération des phytocénoses. Un modèle de la dynamique du système écologique sahélien y est proposé.

Après avoir synthétisé les principales caractéristiques de la structure et de la dynamique des systèmes écologiques étudiés, une prospective relative à des axes prioritaires de recherches et à des actions de développement sera présentée dans la dernière partie.

PREMIERE PARTIE



LES HOMMES ET LEUR MILIEU

CARACTERES GENERAUX

1 - LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE.

D'une superficie d'environ 60 000 ha, la région étudiée inclut entièrement le bassin versant de la Mare d'Oursi. Elle se situe entre les parallèles 14°20' et 14°50' de latitude Nord et les méridiens 0°10' et 0°40' de longitude Ouest. Cette région appartient à l'Oudalan, circonscription administrative la plus septentrionale du Burkina Faso et représente à "l'intérieur de la boucle du Niger sahélienne une entité régionale, nettement distincte du Liptako au Sud et du Gourma au Nord" (BARRAL 1977)

GROUPES HUMAINS	ZONE D'ETUDE (1)		OUDALAN (2) %	MODE DE VIE %
	Effectif	%		
KEL TAMACHEK	ILLELAN (TOUAREG)	588	3,3	} nomades 74 (76)
	BELLA	7 748	43,3	
PEUL	DJELGOBE	476	2,7	
	GAOBE	4 372	24,4	
	RIMAIBE	2 880	16,1	
	MALLEBE	1 240	6,9	
	SONGHAY	346	1,9	
	FORGERONS	216	1,2	
	DIVERS	16	0,1	
TOTAL	17 882	100 %	100 %	

Tableau 1 - Catégories socio-ethniques de la population.
 Etabli d'après : (1) LANGLOIS (1983) SODTER (1980)
 (2) BARRAL (1977)

2 - LES HOMMES ET LEURS ACTIVITES.

2.1 - Caractéristiques de la population.

L'effectif de la population de la zone de la Mare d'Oursi s'élève à environ 18 000 personnes (SODTER 1980, LANGLOIS 1983). Cela correspond à une densité de l'ordre de 14 habitants au km². Cette valeur se situe à un niveau nettement supérieur à la densité de 7,5 habitants au km², obtenue pour l'ensemble de l'Oudalan lors du recensement administratif de 1975 (INSD, 1979). La démographie est en pleine expansion. En effet, avec un taux de croissance de l'ordre de 2,5 % par an, la population double tous les trente ans.

Sur le plan du peuplement, la région de la Mare d'Oursi offre une grande diversité. L'examen du tableau 1 permet de voir, en effet, que s'y côtoient quatre grands groupes ethniques et plus d'une dizaine de groupes sociaux. Les données de la zone corroborent celles obtenues pour l'Oudalan (BARRAL 1977). Elles permettent de souligner la représentativité du phénomène sédentaire (25 % de la population) et la place prépondérante du nomadisme qui est pratiqué par 75 % de la population totale. La mobilité des hommes et de leur bétail reste la composante principale du mode de vie de l'Oudalan.

2.2 - Les activités.

Dans l'Oudalan, la plupart des unités de production pratiquent à la fois l'agriculture et l'élevage. L'importance relative de ces deux activités repose en partie sur l'appartenance ethnique. MILLEVILLE et al. (1982) rappellent que "des rapports complexes de complémentarité et de concurrence s'exercent entre ces deux activités économiques aussi bien au niveau du système de production qu'à l'échelle de l'espace régional". Des activités secondaires, principalement migration du travail et cueillette, sont souvent associées aux activités dominantes d'agriculture et d'élevage, afin de diversifier les sources de revenus monétaires.

Examinons très brièvement les caractéristiques de ces principales activités.

2.2.1 - L'agriculture.

Quatre vingt dix pour cent des surfaces cultivées sont consacrées au petit mil : *Penissetum americanum* (L.) K. SCHUM. Les cultures sont essentiellement localisées sur les formations sableuses (systèmes dunaires, piémonts des massifs cristallins).

La sécheresse des années 1972-1973 a induit le développement de la culture de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH). Cette plante est cultivée sur les sols plus argileux des glacis de bas de pente et dans les bas fonds argileux à bilan hydrique plus favorable. De plus, les récentes années de déficit pluviométrique (1983-84) ont eu pour conséquence l'extension des cultures de contre-saison, pratiquées pendant la saison fraîche au bord des mares temporaires. Elles se rapportent au niebe (*Vigna unguiculata* (L.) WALP.), à la pastèque et à certaines plantes maraîchères telles que oignons, carottes...

L'étude du système de culture effectuée par MILLEVILLE (1980) montre qu'en moyenne, l'unité de production agricole compte 5,5 personnes. Elle cultive 4 ha dont 44 % de mil, 47 % de mil-sorgho et 9 % de sorgho. Cette surface cultivée représente la surface récoltable. Elle est en moyenne de 10 à 15 % inférieure à la surface semée. MILLEVILLE (op. cit) corrobore les résultats avancés par PERETTI (1976) pour ce qui concerne la surface moyenne cultivée par habitant et qui se situe à 0,8 ha par habitant. De plus, il note une grande variabilité de cette surface cultivée : 0,15 à 1,98 ha par habitant.

Les techniques agricoles sont toutes manuelles et extensives : préparation succincte par abattage des arbres, semis sans travail du sol, fumure obtenue par ouverture des terroirs cultivés au bétail (QUILFEN et MILLEVILLE 1983). Le sarclage représente la principale contrainte de travail.

Compte tenu de ces techniques culturales extensives et des conditions pluviométriques globalement défavorables, les rendements sont faibles. Avec des densités de 5 à 6 000 poquets à l'hectare réalisés avec 3kg de semences par semis, les rendements moyens en mil, mil-sorgho et sorgho sont respectivement de 150, 230 et 400 kg.ha⁻¹. Ces rendements sont

environ cinq fois inférieurs à ce qu'il est possible d'obtenir en parcelles expérimentales fertilisées (CIDR 1977).

Les normes établissent les besoins céréaliers à $200 \text{ kg.hab.}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour la zone soudano-sahélienne. Pour couvrir ces besoins, il est nécessaire d'obtenir des rendements de l'ordre de 275 kg.ha^{-1} . Il apparaît donc nettement que la zone de la Mare d'Oursi, et plus généralement celle de l'Oudalan, est loin d'assurer son autosuffisance céréalière.

2.2.2 - L'élevage.

L'élevage constitue l'activité économique de base. Avec 6 % de la population du pays, l'Oudalan possède 20 % du bétail.

Les bovins sont du type zébu (*Bos indicus*) et les ovins et les caprins sont de type sahélien. LHOSTE (1977) évalue l'effectif de la zone à 13 - 14 000 bovins et à 37 000 ovins et caprins. Cela représente pour le bassin versant de la Mare d'Oursi, environ 1 zébu et 3 petits ruminants par habitant. Le troupeau moyen compte 41 bêtes. Le taux d'exploitation est de 6 à 10 % par an.

Cet élevage extensif est de type transhumant. Il est entièrement tributaire de la végétation naturelle, qui entre dans près de 95 % de l'alimentation du bétail et des réserves en eaux des mares naturelles. On peut considérer avec MILLEVILLE et al. (1982), l'élevage sahélien comme "une activité de cueillette par animal interposée... le prélèvement des ressources fourragères ne s'accompagne d'aucune action de régénération, ... si ce n'est l'absence de leur exploitation".

Exprimé en unité bovin tropical (1 UBT = animal de 250 kg de poids vif : BOUDET (1978)), la charge en bétail de la zone d'étude s'élève à 15300 soit 4 ha par UBT (LHOSTE, 1977). Cette charge est excessive et explique d'une part l'état déplorable des animaux en fin de saison sèche et, d'autre part la dégradation de la végétation.

ALIMENTATION	céréales	Panicum laetum Cenchrus biflorus	récolte massive
	autres	Nymphaea lotus Boscia senegalensis Tribulus terrestris	
	légumes, fruits	Cleome gynandra Leptadenia hastata Cassia obtusifolia Citrillus lanatus Ziziphus mauritiana Balanites aegyptiaca	cueillette sporadique
TECHNOLOGIE	Armature habitat :	Acacia seyal, Combretum glutinosum, Combretum micranthum, Mitragyninermis	
	Literie :	Guiera senegalensis, Balanites aegyptiaca, Acacia adansonii, Piliostigma reticulata.	
	Baton, pilon :	Grewia bicolor, Dalbergia melanoxylon	
	Cordage :	Hibiscus cannabinus, Adansonia digitata.	
	Récipients, mortiers, écuelles :	Sclerocarya birrea Commiphora africana, Piliostigma reticulata.	
	Nattes, vannerie :	Hyperthelia dissoluta, Andropogon gayanus, Diheteropogon hagerupii, Hyparrhenia glabriscula.	
	Colorant, tannage :	Anogeissus leiocarpus, Indigofera tinctoria, Acacia adansonii.	
Source d'énergie :	Acacia sp, Pterocarpus lucens.		
PHARMACOPEE		Cassia italica, Acacia nilotica, Chrozophora brocchiana.	

Tableau 2 - Utilisation des végétaux spontanés par les populations dans le bassin versant de la Mare d'Oursi.



Nymphaea (nénuphar)



Battage du Cenchrus biflorus (cram-cram)



Panicum laetum (fonio)



Bois de chauffe



Clôture des champs de contre saison avec des épineux divers (Balanites, Acacia, Ziziphus)

CUEILLETTE ET UTILISATION DES VEGETAUX

Néanmoins sur le plan économique, le troupeau bovin au-delà d'une certaine taille permet de satisfaire les principaux besoins (vivriers, monétaires) et de pallier les insuffisances de la production agricole (COMBES 1984).

2.2.3 - La cueillette.

La cueillette joue un rôle important dans l'économie de ces populations. Tout comme BERNUS (1967) on doit admettre qu'il ne s'agit pas de prélèvements sporadiques mais de véritables récoltes. En fait l'activité de cueillette varie en fonction de la saison et du groupe ethnique.

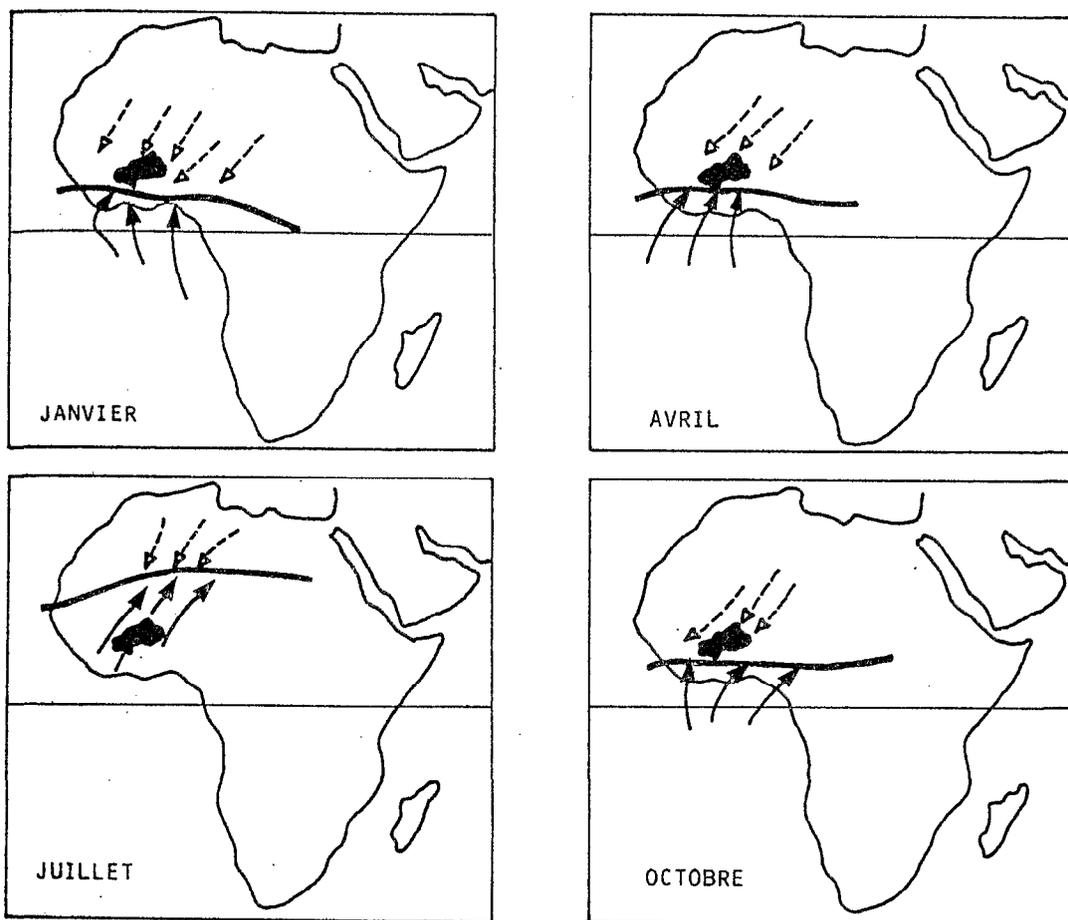
Le tableau 2 donne un inventaire non exhaustif d'espèces végétales utilisées par les populations de cette région.

Les collectes concernent tout d'abord les produits alimentaires. Ils constituent un complément à la ration quotidienne mais ils peuvent, pendant les périodes de soudure ou de disette, couvrir entièrement les besoins des individus.

A titre d'exemple, une personne est susceptible de récolter par jour 3,75 kg de semoule de fonio sauvage (*Panicum laetum*). Cette quantité permet de nourrir 6 personnes, soit la totalité d'une unité de production (MILLEVILLE 1980). Il est intéressant de signaler que la récolte des produits alimentaires, principalement de *Panicum laetum*, *Cenchrus biflorus*, *Nymphaea lotus*, a lieu même si la production céréalière est satisfaisante. Cette stratégie a pour but d'augmenter les réserves en grains et de retarder l'ouverture des greniers familiaux.

Sur le plan technologique, les végétaux ligneux fournissent le matériau nécessaire à la fabrication de nombreux objets de la vie domestique: armature de l'habitat, literie, manche d'outils et d'ustensiles, récipients... Notons, que le bois est la principale source d'énergie calorifique.

Les produits végétaux sont aussi largement utilisés dans la pharmacopée traditionnelle.



d'après PALLIER (1981)

Fig. 1 - Situation du Burkina Faso par rapport au F.I.T.

- : tracé au sol du Front Inter Tropical
- : direction des principaux flux humides (mousson)
- > : direction des principaux flux secs (alizés)

3 - LE MILIEU NATUREL.

3.1 - Les traits généraux du climat.

3.1.1 - Les mécanismes atmosphériques.

Le régime climatique en Afrique Occidentale et, plus spécifiquement au Burkina Faso, est déterminé par les déplacements du Front Intertropical (FIT). Il représente la zone de contact de la masse d'air sec continental du nord-est (harmattan) et de la masse d'air humide du sud-ouest (mousson). C'est au niveau de cette zone de front que se constituent les nuages qui engendrent les pluies (RODIER 1975). Au cours de l'année, le FIT se déplace en suivant sensiblement la position zénithale du soleil (FONTES 1983, DORIZE 1986). Ce déplacement saisonnier des latitudes subéquatoriales en hiver au tropique nord en été, est illustré sur la figure 1, empruntée à PALLIER (1981). Au cours de la remontée vers le nord le passage au niveau de la Mare d'Oursi s'effectue vers le mois de mai. Le retour vers le sud du FIT se situe vers la mi septembre.

3.1.2 - Les facteurs du climat.

Les principales caractéristiques des paramètres climatiques sont issues des observations effectuées à la station climatologique de JALAFANKA (altitude : 310 m ; coordonnées : 14°37' N, 0°29' W). Sur le plan physique elles ont été présentées dans le détail par CHEVALLIER et al. (1985). L'évolution de ces paramètres sera reprise ici, en essayant de mettre en évidence les contraintes qu'ils déterminent sur la vie des plantes et des hommes.

La température.

L'évolution annuelle des moyennes décadaires des températures maximales et minimales de l'air sous abri (fig. 2) fait apparaître deux périodes chaudes. La première se situe en Avril, Mai et Juin, mois au cours desquels la moyenne des maxima varie de 38,3 à 40,8° C (tableau 3). La seconde se place en Octobre, juste à la suite de la saison pluvieuse ; la moyenne des maxima atteint 38°6.

Les températures les plus basses sont enregistrées en Décembre, Janvier et Février c'est-à-dire au cours de l'hiver boréal (moyenne des minima de 15,1 à 17,5° C). Un minimum secondaire s'observe au mois d'Août, période pendant laquelle la mousson est dominante.

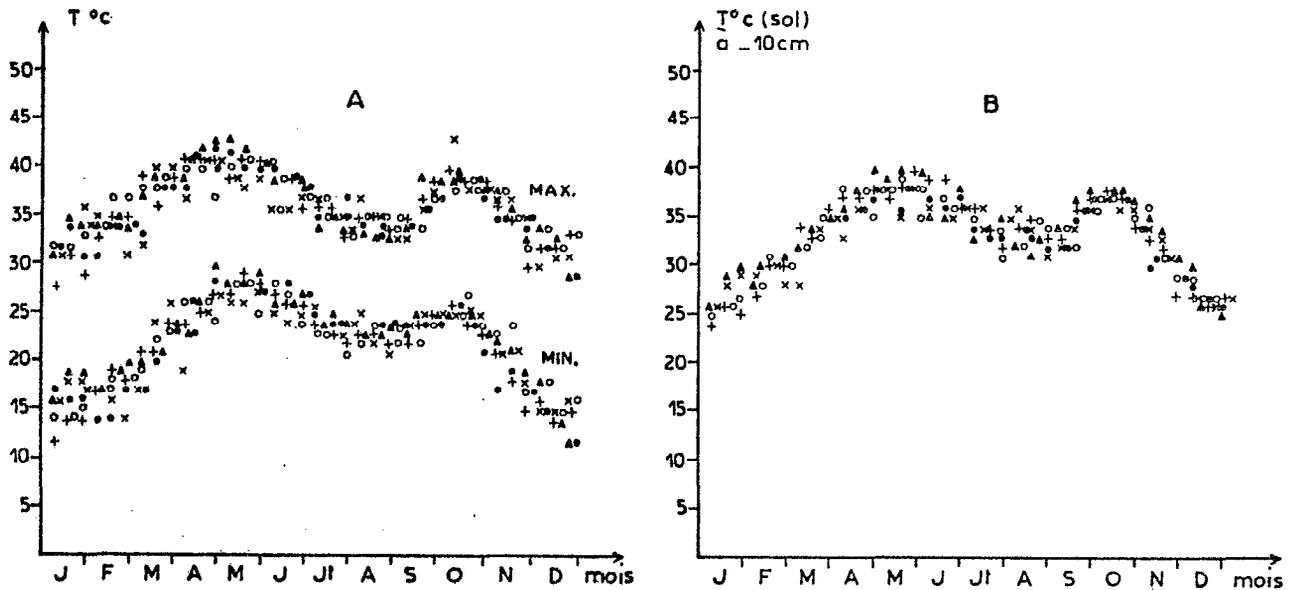


Fig. 2 - Paramètres climatiques à la station météorologique de JALAFANKA. Variations annuelles des moyennes décadales des maxima (max) et des minima (min) de la température de l'air sous abri (A) et de la température journalière moyenne du sol à -10 cm (B).
● 1977 ○ 1978 × 1979 ▲ 1980 + 1981

Mois														
Paramètres	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Jut.	Aou.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel	
T_M °C	31,3	33,9	37,1	40,4	40,8	38,3	34,9	33,9	36,4	38,6	35,1	31,6	35,9	
T_m °C	15,1	17,5	21,4	25,6	27,6	25,8	23,8	23,3	24,1	23,9	19,2	15,3	21,8	
$T_M + T_m/2$	23,5	26,2	29,8	33,6	34,6	32,4	29,8	28,4	30,1	30,9	27,4	23,8	29,3	
H %	24,3	22,4	17,5	19,5	35,4	44,5	53,5	62,4	53,6	31,8	21,3	23,0	34,1	
$V_{m.s}^{-1}$	2,7	2,8	2,4	2,8	3,6	4,1	4,1	3,1	2,5	2,2	2,2	2,4	2,9	
Direction vent	NE,E	E	NE	E	SW	SW	SW	SW,W	SW,W	E	NE,E	NE,E	-	
ETP $mm-j^{-1}$	6,5	7,3	8,3	8,9	9,4	8,9	7,9	7,3	7,4	7,9	7,1	6,2	7,9	

Tableau 3 - Moyennes mensuelles et annuelles (1976-1983) des paramètres climatiques de la station de JALAFANKA - (extrait de CHEVALLIER et al. 1985).

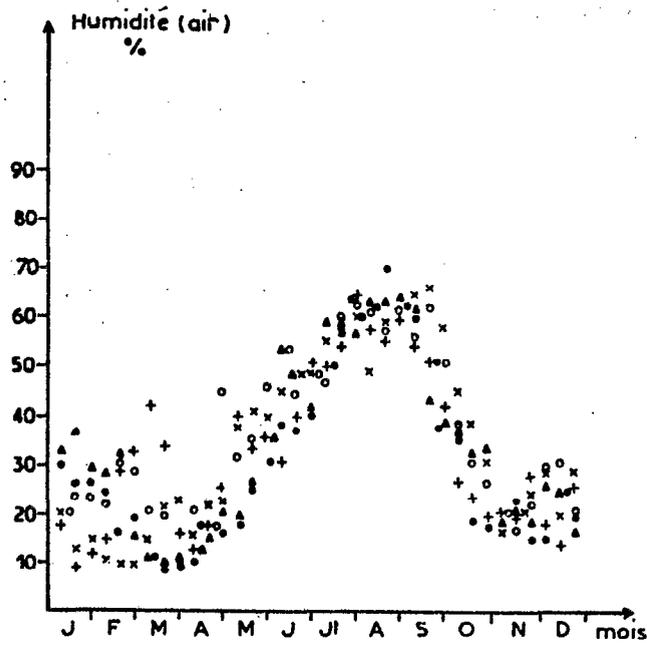


Fig. 3 - Paramètres climatiques à JALAFANKA.
Variations annuelles des moyennes décadaires de l'humidité relative journalière moyenne de l'air sous abri.
●1977 ○1978 ×1979 ▲1980 +1981

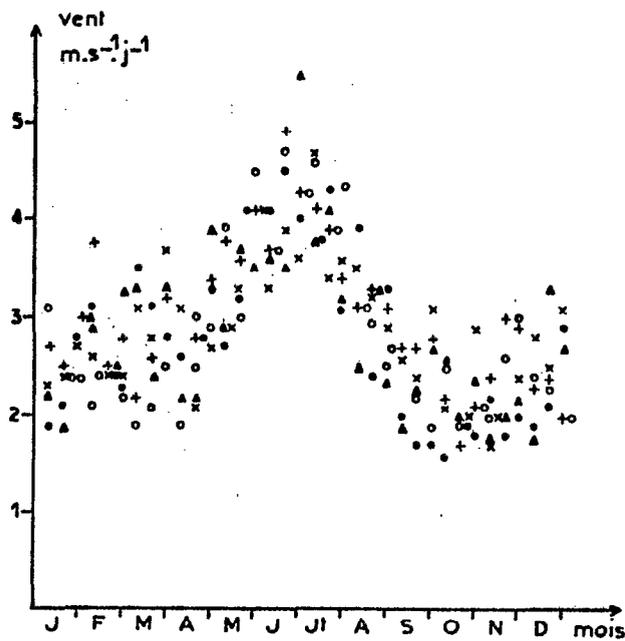


Fig. 4 - Paramètres climatiques à JALAFANKA.
Variations annuelles des moyennes décadaires de la vitesse du vent.
●1977 ○1978 ×1979 ▲1980 +1981

Les températures extrêmes observées au cours de la période d'étude ont été de :

- 45,7° C pour le maximum absolu (Mai 1983) ;
- 7,6° C pour le minimum absolu (Décembre 1977).

L'amplitude thermique journalière d'une dizaine de degré au cours de la saison des pluies (10,6° C en Août) atteint des valeurs plus élevées en saison sèche (16° C en Janvier, Février et Mars).

Les variations de la température journalière moyenne au sol à 10 cm de profondeur suivent parfaitement celles des températures de l'air sous abri. La région étudiée est donc caractérisée par des températures élevées.

L'humidité relative.

Les variations au cours de l'année de l'humidité relative de l'air sont reportées sur la figure 3. Les moyennes mensuelles des humidités relatives, très peu élevées en saison sèche, en régime d'harmattan (HR de l'ordre de 20 % , tableau 3) augmentent ensuite dès le mois de Mai et passent par un maximum (de l'ordre de 63 %) au mois d'Août. Ces variations reflètent bien la dynamique des masses d'air précédemment décrites (§ 311). La moyenne annuelle de l'humidité relative est faible (34 %).

Signalons enfin que la sécheresse atmosphérique accentue le déficit en eau caractéristique de la saison sèche. Cette sécheresse atmosphérique peut induire une fermeture stomatique chez certaines espèces (BOYER et GROUZIS 1977).

Les vents.

Les vents continentaux secs du Nord-Est et d'Est dominant du mois d'Octobre au mois d'Avril. Ces vents augmentent le déficit de saturation et accentuent les conditions d'aridité de la saison sèche. De Mai à Septembre ce sont les vents du Sud-Ouest et d'Ouest qui sont les plus fréquents. La figure 4 illustre les variations de la vitesse du vent. De 2 à 3 m.s⁻¹ pendant la période d'harmattan, elle augmente et atteint 4 m.s⁻¹ au cours des mois de Juin et Juillet.

	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc	an
1977				2006	2385	2129	2085	2086	2398	2535	2477	2192	2230
1978	2291	2330	2570	2485	2543	2529	2433	2717	2451	2484	2317	2192	2518
1979	2076	2561	2378	2627	2261	2285	2399	2472	2380	2314	2333	2132	2348
1980	2122	2281	2622	2573	2737	2407	2468	2507	2591	2518	2285	2057	2433
1981	2291	2413	2396	2449	2578	2685	2607	2647	2521	2569	2333	2132	2484
1982	2269	2289	2202	2586	2529	2452	2362	2281	2180	2299	2228	1992	2306
1983	2027	2244	2283	2372	2480	2242	2313	2427	2370	2520	2346	2033	2305
moyenne	2179	2353	2409	2443	2502	2390	2381	2448	2413	2463	2331	2104	2375

Tableau 4 - Moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles du rayonnement global ($J.cm^{-2}.j^{-1}$)
(Extrait de CHEVALLIER et al. 1985)

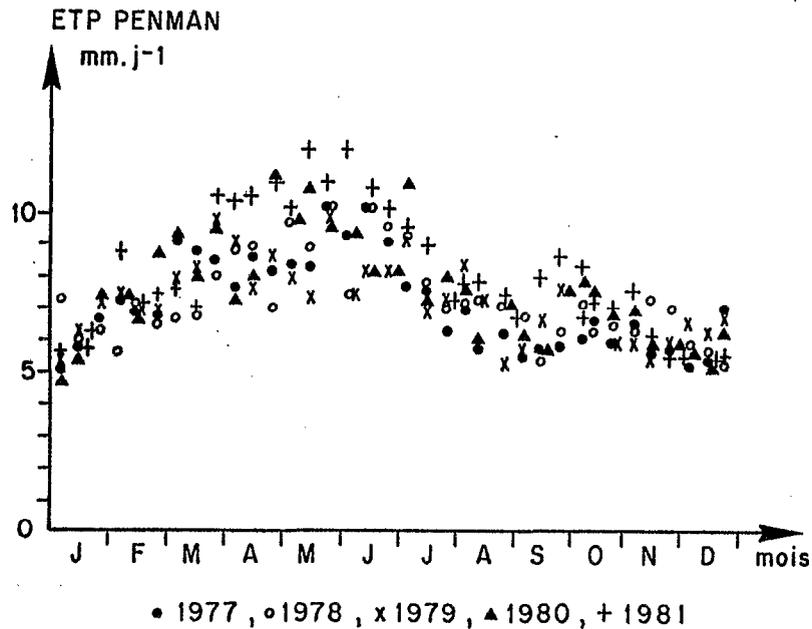


Fig. 5 - Paramètres climatiques à JALAFANKA.
Variations des moyennes décadaires de l'évapotranspiration potentielle.

Le rayonnement global.

Les valeurs du rayonnement global présentées dans le tableau 4 ont été estimées à partir de la durée d'insolation (CHEVALLIER et al. 1985). La variabilité interannuelle de ce facteur climatique est faible. En effet le coefficient de variation calculé sur les sept années d'observations n'est que de 4,5 %. Le rayonnement global atteint une valeur minimale en Décembre; le maximum est observé en Mai.

Sur l'ensemble de l'année, le rayonnement est élevé. Il joue un rôle très important dans ces régions arides car il intensifie le pouvoir évaporant de l'air et détermine ainsi une partie du bilan hydrique.

L'évapotranspiration potentielle.

Au cours de l'année, l'ETP passe par 2 maxima (figure 5) : l'un en Mai (= $9,5 \text{ mm.j}^{-1}$) et le deuxième moins élevé, en Octobre (= 8 mm.j^{-1}). Les valeurs les plus faibles sont observées au cours de la période fraîche de Décembre-Janvier ($6,5 \text{ mm.j}^{-1}$).

La moyenne interannuelle de l'ETP (2872 mm) situe la zone d'étude dans les régions ayant des caractères marqués d'aridité (COCHEME et FRANQUIN 1967). Avec un coefficient de variation de 3 % calculée sur sept ans, la variabilité interannuelle de ce facteur climatique est relativement faible, confirmant ainsi les observations de RIOU (1975) et de COCHEME et FRANQUIN (op. cit.).

Sans anticiper sur les données de précipitation, on peut noter que la valeur moyenne interannuelle de l'ETP est ici environ 8 fois supérieure à celle des précipitations. Bien que légèrement inférieur aux valeurs présentées par DANCETTE (1976) pour le Nord Sénégal, il apparaît que le bilan hydrique climatique est nettement déficitaire. Ces caractères soulignent de nouveau l'aridité du climat de cette zone.

	JAN	FEV	MRS	AVR	MAI	JUN	JUT	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Total annuel mm	Déficit % moy. 1956-1981
	1				7,0	11,8	106,1	113,4	49,4	104,9			455,6	
1976	2	-	-	-	15,5	2,5	23,0	25	11	23,0	-	-	-	-1,4 %
	3				2	3	11	9	6	7			38	
S	1				20,2	89,1	109,3	176,7	84,9	0,3			480,5	
1977	2	-	-	-	4,2	18,5	22,8	37	17,5	0	-	-	-	+ 4 %
T	3				8	9	11	12	6	1			47	
A	1	-	-	-	11,7	9,9	23,4	183,8	92,8	57,6	0,5		379,7	
1978	2	-	-	-	3,1	2,6	6,2	48,4	24,4	15,2	0	-	-	-17,8 %
I	3	-	-	-	1	4	7	12	9	8	3		44	
O	1			26,0	45,2	38,4	78,1	105,3	64,1	15,2			372,3	
1979	2	-	-	7	0	12,1	10,3	21,0	28,3	17,2	4,1	-	-	-19,4 %
N	3			1		5	10	9	14	7	3		49	
M	1				9,8	77,3	123,4	146,3	15,0	0,5			372,3	
1980	2	-	-	-	2,6	20,8	33,1	39,3	4,0	0,1			-	-19,4 %
E	3				1	4	8	11	6	2			32	
T	1				9,1	10,5	59,1	113,7	156,5	30,5			379,4	
1981	2	-	-	-	2,3	2,7	15,5	29,9	41,2	8,0	-	-	-	-17,9 %
O	3				2	3	6	13	9	9			42	
J	1			3,8	5,0	27,5	102,0	37,3	124,0	78,5	3,8		382,0	
1982	2	-	-	1	1,3	7,2	26,7	9,8	32,5	20,6	1	-	-	-17,3 %
A	3			3	1	6	6	6	7	4	2		35	
L	1				8,1	1,9	31,6	25,4	74,7	54,4	8,1		204,2	
1983	2	-	-	-	4	0,9	15,5	12,4	36,6	26,6	4	-	-	-55,8 %
A	3				2	2	4	7	9	6	1		31	
N	1				10,4	15,4	23,6	101,4	109,1	26,6			286,5	
1984	2				3,6	5,4	8,2	35,4	38,1	9,3			-	-38 %
A	3				3	3	7	9	7	1			30	
	1	0	0	3,3	3,8	22,8	49,8	89,0	121,2	60,4	17,8	0	0	368,1
JALAFANKA	2			0,9	1,0	6,2	13,5	24,2	32,9	16,4	4,8			-20,5 %
1976-1984	3			0,4	0,6	3,8	5,8	9,3	9,8	6,6	2,2		# 39	
	1	0	0	1	4	18	68	124	158	67	12	1	0	462
GOROM-	2	0	0	0,3	0,8	4,0	15,0	27,4	34,9	14,8	2,6	0,1	0	-
GOROM	3													42
1956-1981														

(1) Précipitations (mm). (2) Précipitations en pourcentage du total ; (3) Nombre de jours de pluies.

La pluviométrie.

A JALAFANKA, la pluviométrie annuelle moyenne (1976-1984 tableau 5), répartie en 39 jours de pluie est de 368 mm. La variabilité est forte : la pluviométrie de l'année 1977 est par exemple plus de 2 fois plus élevée que celle observée en 1983. Le coefficient de variation de la pluie annuelle, calculée sur les neuf années d'observations, est de 22,4 %. Ce résultat corrobore ceux avancés par FONTES (1983) pour la région sahélienne du Burkina Faso et, par LE HOUEROU et GRENOT (1987) plus généralement pour la zone soudano-sahélienne (25 %). Il précise par ailleurs le caractère aride du climat puisqu'il est notoirement démontré que l'irrégularité des précipitations augmente quand la quantité annuelle des pluies diminue (RIOU 1980, LE HOUEROU et POPOV 1981, LE HOUEROU et GRENOT 1987).

Les pluies s'étendent en moyenne de Mars à Octobre (tableau 5). Elles sont néanmoins peu importantes en Mars, Avril, Mai et Octobre. Elles se concentrent entre Juin et Septembre où tombent 87 % des précipitations annuelles. Le mois le plus pluvieux est Août. Il totalise à lui seul, le tiers des précipitations.

Tout comme pour la quantité annuelle, la variabilité de la répartition pluviométrique est grande. Remarquons par exemple (tableau 5) que :

- le mois de Juin 1982 totalise 102 mm pour 49,8 mm en moyenne ;
- le mois d'Octobre 1976 enregistre près de 105 mm pour 17,8 mm en moyenne.
- Le coefficient de variation de la pluie d'Août, mois le plus pluvieux, atteint 27 %.

Le régime des précipitations est très irrégulier non seulement dans le temps mais aussi dans l'espace. Nous reviendrons sur ce caractère, mais signalons, à titre d'exemple, qu'un écart annuel de 136,1 mm a été enregistré en 1978, entre deux pluviomètres voisins d'environ 5 km (CHEVALLIER et al. 1985).

Les années d'observations de la pluviométrie sont manifestement

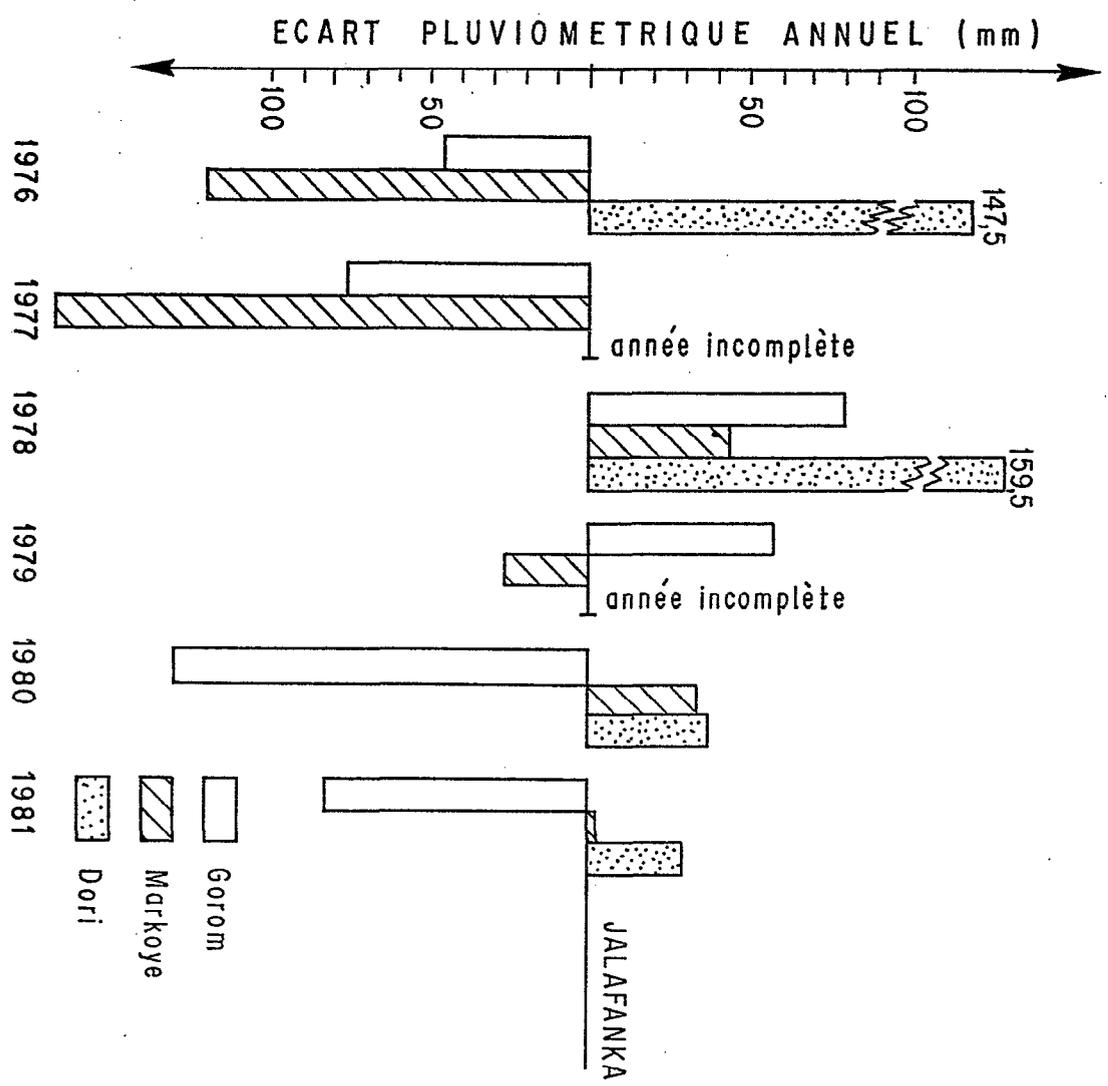


Fig. 6 - Comparaison des pluviométries annuelles de GOROM-GOROM, MARKOYE et DORI à celle de JALAFANKA.

insuffisantes pour permettre l'analyse fréquentielle de la pluviométrie du bassin. On a donc tenté de se rattacher aux stations de GOROM-GOROM, MARKOYE et DORI relevant de la météorologie nationale. Ces postes sont distants respectivement de 40 km au Sud-Est, de 70 km à l'Est et de 120 km au Sud-Sud-Est d'Oursi.

La figure 6 montre qu'aucun rapprochement n'est possible entre ces stations, à partir des données recueillies de 1976 à 1981 sur la base des quantités annuelles de pluies. Les coefficients de corrélation sont d'ailleurs faibles (r^2 le plus élevé = 0,37 : SICOT et GROUZIS 1981). Cette indépendance statistique de JALAFANKA par rapport aux stations les plus proches a été confirmée par CHEVALLIER et al. (1985) qui, en effectuant en outre, un essai d'homogénéisation des données à partir d'un vecteur régional (HIEZ 1977) n'ont pas obtenu de résultats significatifs. Par contre, la comparaison de la répartition mensuelle moyenne des pluies entre la station de JALAFANKA et GOROM-GOROM (tableau 5) fait apparaître une grande similitude. Le régime pluviométrique de ces deux stations paraît donc identique. Une étude plus approfondie de CHEVALLIER et al. (op. cit.) confirme ce résultat, l'étend aux postes de MARKOYE et DORI et conclue à une grande unité climatique régionale du régime pluviométrique.

Bien que les données correspondant à la station de DORI semblent être les plus représentatives de la pluviométrie régionale (CHEVALLIER et al. 1985), cette station n'a pas été retenue pour représenter une chronique du bassin versant de la Mare d'Oursi en raison notamment de :

- la valeur de la moyenne annuelle de la pluviométrie trop élevée (535 mm : 1920-1981) par rapport à celle d'OURSIS (368 mm : 1976-1984) ;

- la distribution gaussique des pluies annuelles, caractère plutôt anormal dans le contexte sahélien. En effet BRUNET-MORET (1968) a montré que la distribution des pluies annuelles devient asymétrique lorsque l'aridité devient assez nette. Les hauteurs annuelles des précipitations de GOROM-GOROM et MARKOYE offrent cette caractéristique puisqu'elles s'ajustent bien à une loi de type Pearson III (la gamma tronquée, figure 7).

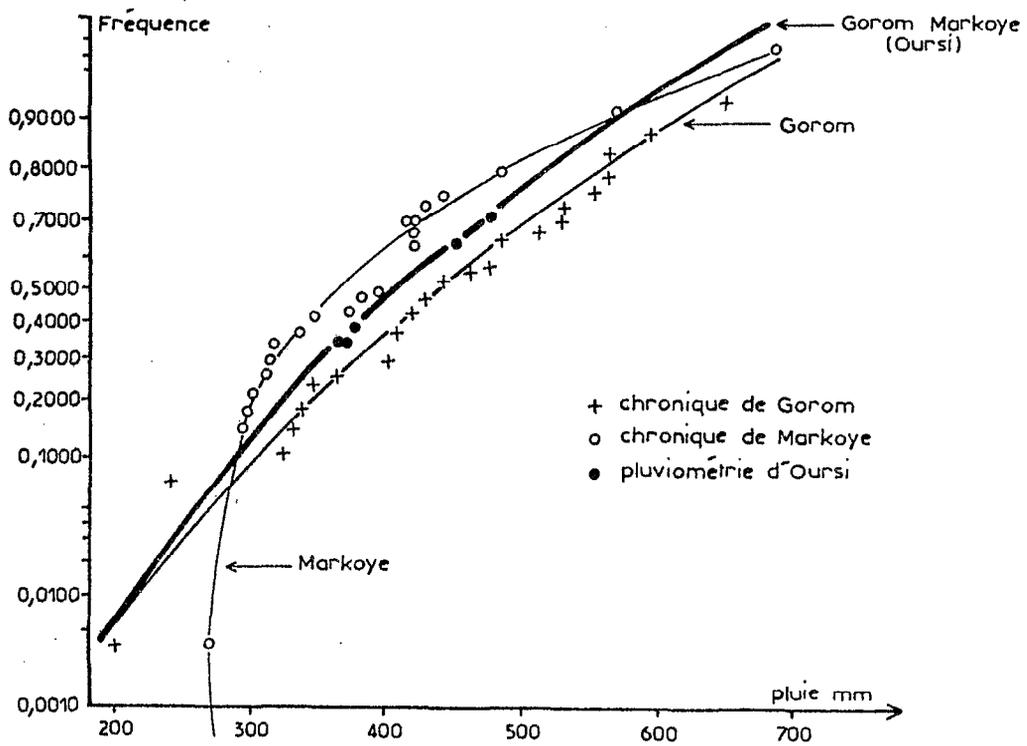


Fig. 7 - Ajustement de la pluviométrie annuelle de GOROM-GOROM, MARKOYE et OURSI à une loi de PEARSON III.

La localisation de la station d'OURSI par rapport à GOROM et MARKOYE, leur appartenance à une même unité climatique régionale, nous ont conduit à adopter pour l'ensemble du bassin une chronique constituée par la réunion de celles de GOROM-GOROM et de MARKOYE (SICOT et GROUZIS 1981). Il n'est pas nécessaire d'affiner l'approximation, étant donné l'étendue de variation de la répartition spatiale. La figure 7 illustre la formulation fréquentielle de type gamma tronquée de cette chronique qui se place entre les 2 précédentes. On en tire pour OURSI, les hauteurs de pluie non dépassées (tableau 6).

FREQUENCE	RECURRENCE (an)	PLUIE mm	FREQUENCE	RECURRENCE (an)	PLUIE mm
0,01	100	218	0,50	2	412
0,02	50	236	0,80	5	512
0,05	20	266	0,90	10	576
0,1	10	294	0,95	20	632
0,2	5	330	0,98	50	692

Tableau 6 - Hauteurs de pluie maximales à Oursi pour quelques fréquences remarquables de la chronique pluviométrique.

En moyenne le déficit pluviométrique de JALAFANKA par rapport à GOROM-GOROM est de 20 % (tableau 5). Les années 1983 et 1984 ont été particulièrement désastreuses. Nous reviendrons plus en détail dans le chapitre V sur ces problèmes d'évolution climatique dans la période historique récente. Remarquons déjà que les observations effectuées au cours de cette étude se situent dans un contexte de sécheresse climatique.

3.1.3 - Saisons et période de végétation.

Les données climatiques sont synthétisées sur le climogramme de la figure 8 et le diagramme de la figure 9. Pour définir la période humide, les précipitations ont été comparées non à l'ETP (THORNTHWAITE, 1948) mais à 0,35 ETP. De nombreux travaux (CORNET 1981, DOORENBOS et KASSAM 1979) ont en

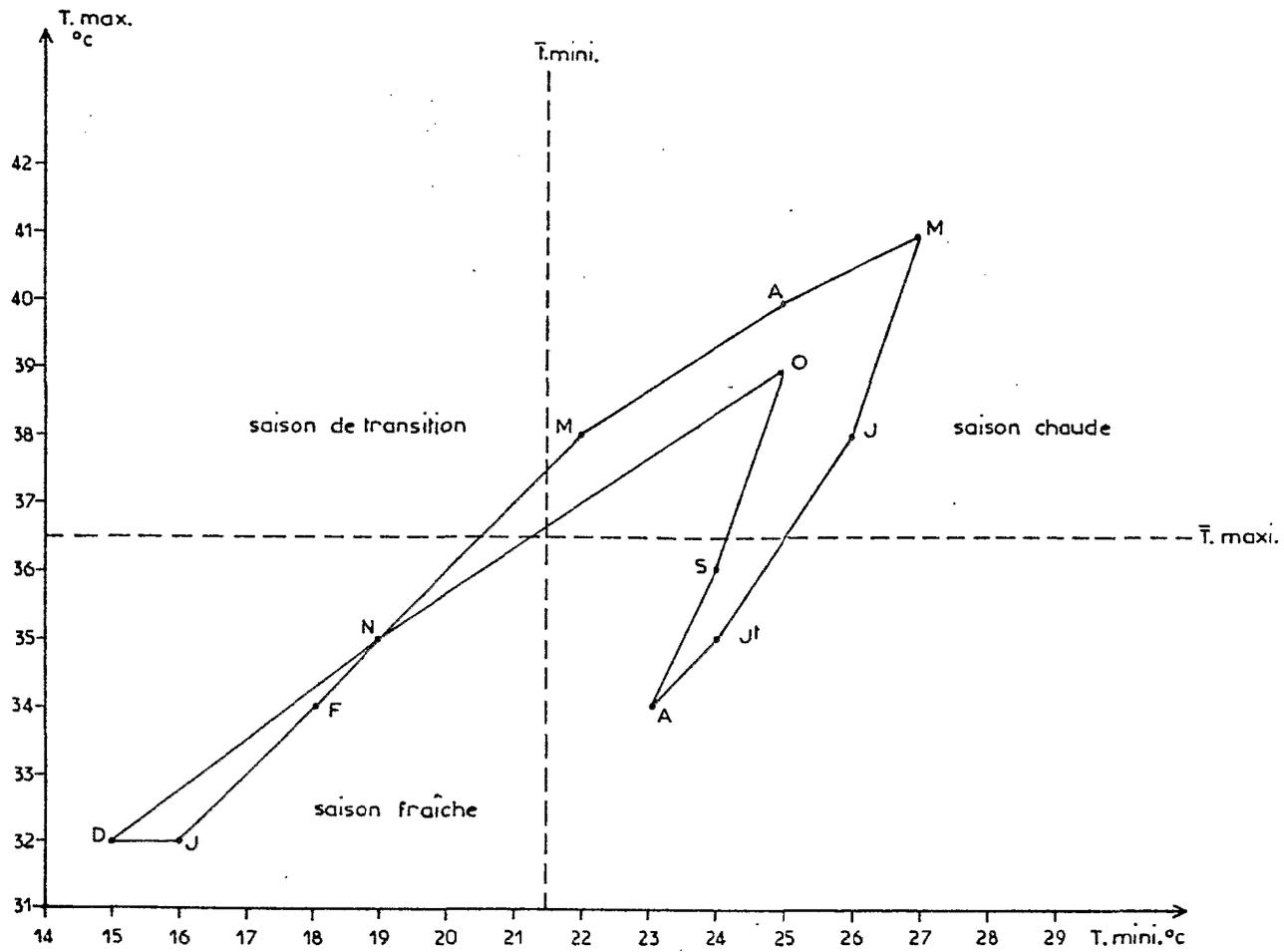


Fig. 8 - Climogramme moyen (1977 à 1981) à JALAFANKA.

effet montré que la croissance de la strate herbacée est arrêtée ou nettement ralentie lorsque l'ETR est inférieur au tiers de l'ETP.

On peut distinguer deux saisons.

Une saison sèche qui comporte :

- une période fraîche (novembre, décembre, janvier et février) caractérisée par des moyennes de températures minimales de l'ordre de 15°C et maximales d'environ 33°C. L'humidité de l'air est très basse en raison de la prédominance des vents continentaux secs. Par ailleurs les mois sont pluviométriquement secs ;

- une période chaude (mars, avril et mai) pendant laquelle la moyenne des températures maximales voisine 41°C. L'humidité relative s'élève en mai. Des pluies existent mais sont rares, localisées et peu importantes.

Une saison humide qui comprend :

- une période chaude (juin, octobre) caractérisée par des températures élevées : moyenne des maxima supérieure à 38°C, moyenne des minima de l'ordre de 25°C. L'humidité relative moyenne atteint près de 45 %. Ce sont des mois pluvieux, mais les pluies intermittentes sont insuffisantes pour assurer normalement la croissance des végétaux. Ce sont des mois qui peuvent être considérés comme transitoires entre les saisons sèches et humides et, qui peuvent avoir certaines années un rôle important en favorisant le démarrage de la végétation (juin) ou en prolongeant la période de végétation active (octobre) ;

- une période relativement fraîche où les températures subissent une baisse sensible. L'humidité de l'air est élevée (50 à 60 % en moyenne). Les précipitations abondantes sont supérieures à 0,35 ETP. C'est la période de la végétation active qui se situe entre les premières décades de juillet et de septembre. Elle est conforme à celle définie par FONTES (1983) pour le Nord du Burkina Faso sur la base des travaux de PAPADAKIS (1966).

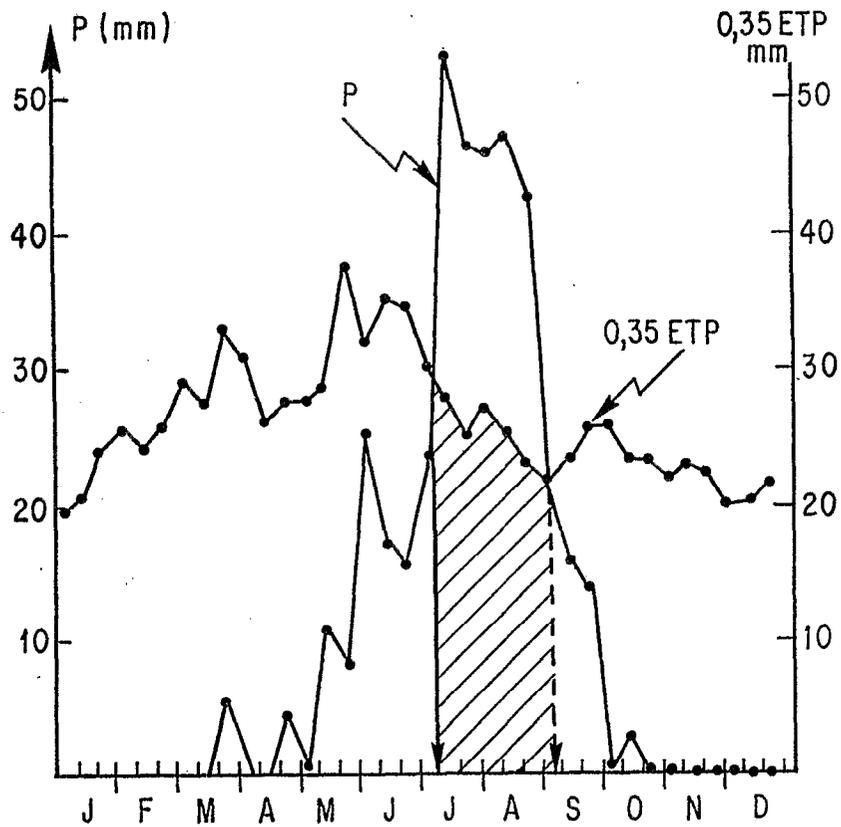
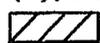


Fig. 9 - Pluviométrie et Evapotranspiration moyennes à JALAFANKA (1976-1981).



: Période de végétation.

3.2 - Traits généraux du substrat édaphique.

La figure 10 inspirée de SICOT (1982), résume bien la diversité géomorphologique d'une région présentant une apparente homogénéité à petite échelle. Ce schéma va nous permettre de synthétiser les études géomorphologiques (JOLY et al. 1980) géologiques (DELFOUR et JEAMBRUN 1970) et pédologiques (LEPRUN 1977) qu'il n'est évidemment pas utile, ni possible de relater ici dans le détail.

La coupe allant du Sud au Nord du bassin versant de la Mare d'Oursi (figure 10) fait apparaître les unités suivantes :

3.2.1 - Reliefs, collines, affleurements.

Les roches qui les constituent sont soit basiques, soit granitiques. Les sols qui leur sont associés sont décrits par LEPRUN (op. cit.) comme étant des sols minéraux bruts non climatiques d'érosion.

Les contraintes, c'est-à-dire l'ensemble des facteurs limitants agissant sur le développement du couvert végétal et/ou sur les propriétés agricoles des unités (JOLY et al. 1980), sont surtout d'ordre topographique, (pente forte) et édaphique (principalement au niveau des cuirasses).

3.2.2 - Les ensablements de piémonts.

Ces ensablements sont constitués soit par des dunes d'obstacles, soit par des placages amorphes (JOLY et al. 1980). Ils présentent le même aspect d'une jupe sableuse plaquée sur la roche.

Les sols des dunes d'obstacles sont à rapprocher de ceux de l'erg récent que nous étudierons ultérieurement. Ceux des placages amorphes ont été identifiés par LEPRUN (1977) comme des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, à drainage limité en profondeur, sur sables éoliens reposant sur l'altération verticale de roches basiques. Ces sols sableux dont le taux d'argile augmente en profondeur sont recherchés pour les cultures du petit mil.

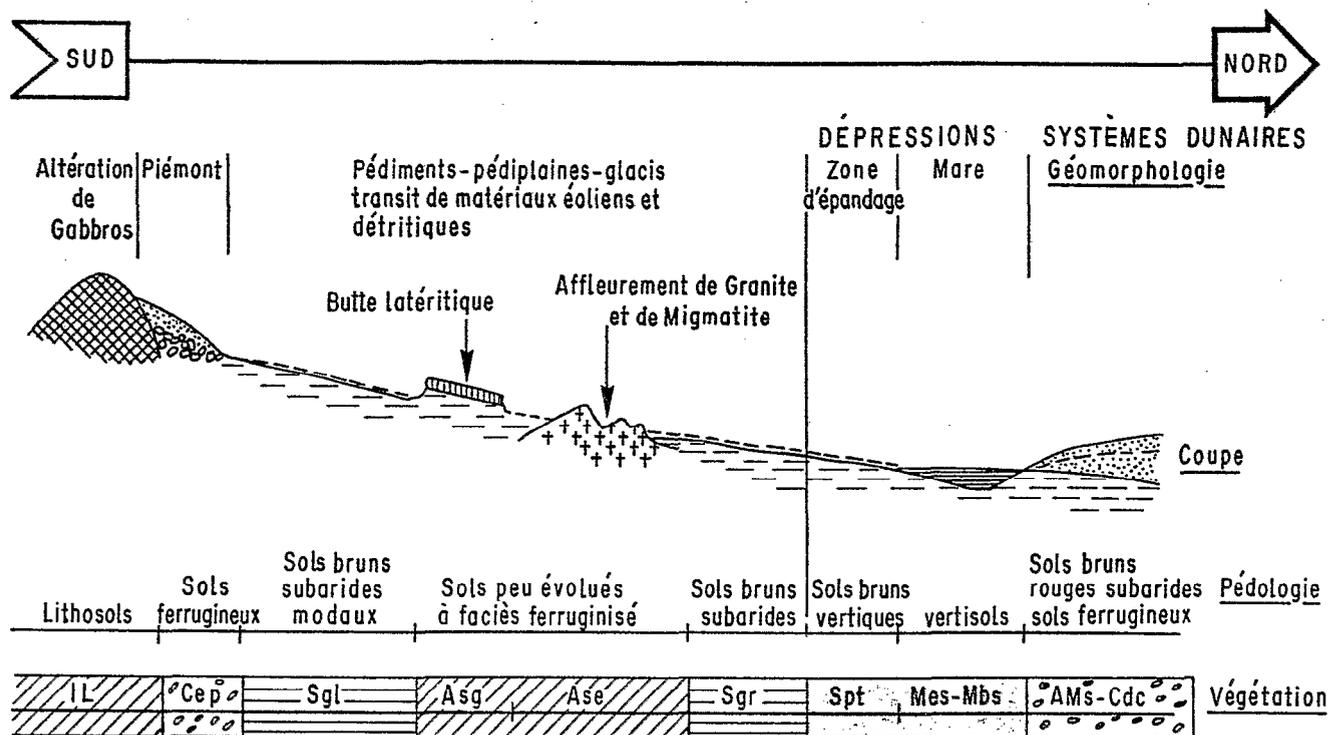


Fig. 10 - Surface fonctionnelle actuelle du Bassin de la Mare d'Oursi et répartition des unités de sol et de végétation.
 Pour la végétation, voir la signification des abréviations en annexe 1.

Les contraintes sont d'ordre édaphique (sols fragiles), anthropique (déflation) et hydrique (ravinement linéaire).

3.2.3 - Pédiplaines, glacis.

Les grandes zones de glacis, c'est-à-dire les paysages à topographie plane, à pente faible (inférieure à 10 %) et à pente latérale quasi-nulle, couvrent environ 60 % de la superficie de l'Oudalan (LEMASSON 1980). La nature de la couverture meuble et l'origine des matériaux permettent de distinguer différents types :

- Les pédiplaines, dont le modelé résulte de l'arénisation progressive du substrat granitique (altérites autochtones). Le sol est de type ferrugineux tropical lessivé à taches, concrétions et horizon éluvial bien développé sur arène granitique acide à texture grossière. En surface, placages sableux (sable grossier délié) alternent avec des plages encroûtées.

Les contraintes caractéristiques de cette unité sont d'ordre édaphique en raison des profils minces et/ou tronqués, et d'ordre hydrique du fait de l'influence des battements de nappes et du ruissellement diffus, sur lequel nous reviendrons plus en détail ultérieurement.

- Les formations allochtones à sols bruns subarides modaux.

- Les formations allochtones à surfaces argilo-limoneuses couverts de blocailles grossières (quartz, roches métamorphiques ou de gravillons ferrugineux). Le sol est comme précédemment de type brun subaride modal.

Ces glacis sont de mauvais supports physiques pour la végétation en raison de leur compacité. De plus, leur imperméabilité en fait des terrains impropres à l'agriculture. Ils sont le siège d'un ruissellement diffus intense. Ce dernier entraîne des éléments fins et contribue d'une part, à la concentration relative des gravillons et blocailles et d'autre part, à la destruction des placages sableux et à la formation d'un glaçage superficiel du sol.

3.2.4 - Dépressions, bords de mares.

Ils occupent environ 10 % du territoire de l'Oudalan. Les sols sont lourds, à argiles gonflantes. Au cours de la saison sèche apparaissent d'importantes fentes de retrait. Ils subissent chaque année une inondation temporaire. Deux sous-unités peuvent être distinguées :

- les glacis d'épandage, rattachables sur le plan géomorphologique aux unités précédentes, mais qui en diffèrent légèrement d'un point de vue pédologique en raison du caractère d'hydromorphie du sol brun subaride.

- les bordures de talwegs et les bordures exondées de la mare, formations alluviales à sols hydromorphes peu humifères à pseudogley vertiques, à taches et concrétions ferrugineuses et calcaires, sur matériau de dépôt argilo-limoneux au-dessus d'arène granitique altérée. L'imperméabilité du sol et le piétinement généralisé par le bétail sont les principales contraintes qui agissent sur ces milieux.

3.2.5 - Systèmes dunaires.

Les formations dunaires, appartenant au système des grands cordons dunaires qui jalonnent l'extension maximum du Sahara vers le sud (JOLY et al. 1980), couvrent près de 30 % de la superficie de l'Oudalan. Elles sont constituées de deux ensembles morphologiques bien différenciés :

- l'erg ancien, de faible ondulation ; les sols enrichis en éléments fins présentent une surface typiquement encroûtée avec des épandages discontinus et minces de sables déliés. Les sols sont ferrugineux tropicaux peu lessivés, à drainage interne limité en profondeur sur sable éolien ou en association à des sols gravillonnaires.

- l'erg récent, cordon orienté WNW-ESE, à modelé très accusé, et à front nord plus élevé ; la surface est constituée de sables déliés épais. Les sols sont brun-rouges subarides peu différenciés sur sables éoliens, pauvres en argiles et limons. Ce cordon, long de plusieurs dizaines de kilomètres, en arrêtant l'écoulement est responsable de la formation des mares endoréiques dont la plus importante est celle de la Mare d'Oursi.

Les formations dunaires subissent de fortes contraintes anthropiques (erg ancien : domaine privilégié de la culture de mil ; erg récent : zone d'extension des cultures ; piétinement par le bétail). L'érosion éolienne très active agit par déflation et peut entraîner, lorsque la végétation est très dégradée, la remobilisation des sables. La dune vive autour de la Mare d'Oursi témoigne de cette dynamique.

3.3 - La végétation.

3.3.1 - Caractères généraux.

La région de la Mare d'Oursi est le domaine des steppes à épineux, c'est-à-dire une formation herbeuse ouverte, généralement non parcourue par les feux et dans laquelle les graminées présentent des caractères de xéromorphie (TROCHAIN 1957). Ce type de végétation assure la transition entre les savanes soudaniennes à Andropogonées et Combrétacées, situées plus au sud et la végétation désertique.

D'après les inventaires floristiques établis par GASTON et BOTTE (1971), TOUTAIN (1977) et GROUZIS et NGARSARI (1981), la flore de cette zone comprend près de 400 espèces. Ces inventaires permettent d'évaluer pour l'ensemble de la flore sahélienne du Nord du Burkina Faso, la proportion des différents types biologiques définis par RAUNKIAER (1905) et considérés par différents auteurs (LEBRUN 1966, EMBERGER 1966, MANGENOT 1969) comme applicables aux régions tropicales à saison sèche défavorable.

Les thérophytes, plantes annuelles passant la mauvaise saison à l'état de graines, représentent 61 % des espèces. Les phanérophytes, c'est-à-dire les plantes ayant les bourgeons de renouvellement à plus de 25 cm du sol pendant la saison sèche, constituent 17,3 % des taxons. Les chamaephytes, géophytes et hémicryptophytes sont peu représentés (22 % des taxons) et sont principalement liés pour les derniers aux stations humides de bords de mares.

La nette dominance des types biologiques thérophyte et phanérophyte, traduit la meilleure adaptation écologique aux sévères conditions d'aridité qui règnent sur le milieu (GROUZIS 1979).

La classification proposée par EVENARI et al. (1975), EVENARI (1985) et utilisée par FLORET et PONTANIER (1982) nous semble d'un grand intérêt pour caractériser l'adaptation à l'aridité de cette flore sahélienne. EVENARI et al. (op. cit.) distinguent les espèces "arido-passives", c'est-à-dire les taxons dépourvus d'organes photosynthétiques pendant la saison défavorable et les espèces "arido-actives" qui, au contraire, portent des organes chlorophylliens et doivent disposer pour fonctionner des réserves en eau.

Le premier groupe, comprenant les thérophytes, les ligneux et sous-ligneux caducifoliés et les plantes à bulbes, représente 78,5 % des taxons. Le deuxième groupe, qui rassemble en particulier les ligneux et sous-ligneux à feuillage persistant, et les crassuléscentes ne représente que 21,5 % des espèces. Ces proportions diffèrent très nettement de celles obtenues par FLORET et PONTANIER (1982), qui montrent que ce sont les arido-actives qui forment la plus grande partie de la végétation de la plupart des systèmes écologiques de la Tunisie présaharienne.

Comme pour les autres régions arides du monde, les espèces arido-actives de la zone sahélienne du Burkina Faso, offrent un ensemble de caractères favorisant l'économie de l'eau. Ces caractères se situent au niveau de :

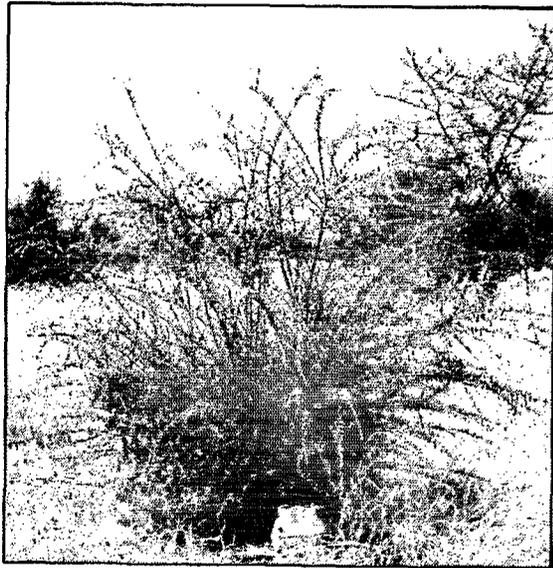
- la morphologie : aphyllie (*Leptadenia pyrotechnica*) ; microphyllie (*Acacia sp*) ;

- l'anatomie : sclérophyllie, cuticule cireuse (*Boscia senegalensis*) ; développement des tissus parenchymateux aboutissant à la crassulescence des organes (*Cissus quadrangularis*, *Caralluma dalzielli*, *Caralluma retrospiciens*) ; stomates situés dans des cryptes protégés par une forte pilosité (*Guiera senegalensis*) ;

- la physiologie : forte proportion de plantes fixant le CO₂ atmosphérique par la voie de HATCH, SLACK et KORTSCHAK ou encore cycle en C₄, parce que le premier composé stable de la photosynthèse est un produit à 4 atomes de carbone, contrairement à la voie classique du cycle de CALVIN où le premier composé formé est à 3 atomes de C (JOLIVET 1978). En effet, en nous inspirant des travaux de DOWNTON (1975), GROUZIS (1976), IMBAMBA et

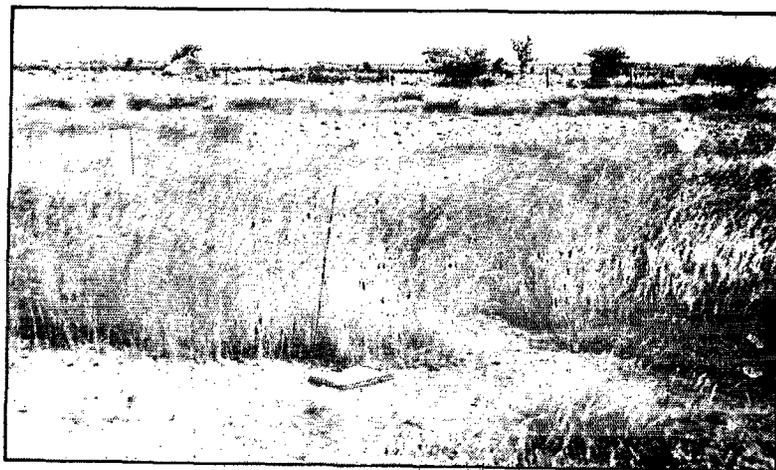


Piémont de Kolel
Protection du sol
contre l'érosion
par la paille en
zone protégée



Maerua crassifolia. Potentiel de croissance au cours
d'une saison de végétation en absence de pâturage

Glacis de Bas Kolel
Zone favorable co-
lonisée par les
Aristida



PAPA (1979), ZIEGLER et al. (1981), PENNING de VRIES et DJITEYE (1982), on peut estimer que les plantes de type C_4 représentent environ 22 % de l'ensemble des taxons. On les trouve notamment parmi les graminées et certaines familles de dicotylédones telles que : Aizoacées (*Gisekia pharnaceoides*), Capparidacées (*Cleome gynandra*), Zygophyllacées (*Tribulus terrestris*), Portulacacées (*Portulaca oleracea*).

Or ces espèces C_4 offrent par rapport aux C_3 un ensemble de propriétés les rendant mieux armées pour la croissance et la survie sous des conditions extrêmes de température et de sécheresse (LARCHER 1980, QUEIROZ 1975). Il s'agit notamment de :

- l'optimum de température pour la fixation nette de CO_2 qui se situe entre 30 et 40° C pour les C_4 contre 15 à 25° C pour les C_3 ;
- la vitesse de photosynthèse environ deux fois supérieure à celle des C_3 ;
- une meilleure efficacité en eau. Ainsi le rapport (transpiration g H_2O /g matière sèche) est de 250 à 350 pour les C_4 et de 450 à 950 pour les C_3 (QUEIROZ 1975) ;
- une utilisation plus efficace de l'azote et du phosphore (PENNING de VRIES et DJITEYE 1982).

3.3.2 - Les unités de végétation.

La diversité édaphique détermine une diversité de la nature des groupements végétaux malgré la relative monotonie de la physionomie des types de végétation. Dans les milieux arides, c'est en effet l'édaphisme qui est responsable de l'organisation des grands traits de la végétation en aggravant ou en compensant les effets de l'aridité climatique (KOECHLIN 1986).

La définition et la cartographie de la végétation de la Mare d'Oursi ont été réalisées par TOUTAIN (1976). L'annexe 1, extrait de la notice de la carte donne les symboles et les espèces dominantes des groupements végétaux. La localisation de ces unités le long du profil du bassin de la Mare d'Oursi est par ailleurs représentée sur la figure 10.

Les 23 unités de végétation reconnues par cet auteur sur des bases floristiques peuvent être regroupées en quatre grands ensembles correspondant à des conditions géomorphologiques et édaphiques différentes.

**Les unités de végétation liées aux dunes
et aux ensablements.**

La strate herbacée constitue l'essentiel de la végétation. Le recouvrement continu atteint des valeurs élevées (80 %) dans les unités peu dégradées. Par contre, le recouvrement devient inférieur à 10 % dans le stade 4 de dégradation. *Aristida mutabilis*, *Schoenefeldia gracilis* et *Cenchrus biflorus* sont les espèces caractéristiques. *Zornia glochidiata*, légumineuse à cycle court, prolifère dans les zones les plus paturées. La strate arbustive est très lâche. Elle est représentée notamment par *Combretum glutinosum*, *Acacia senegal* auxquelles se subsiste de plus en plus *Balanites aegyptiaca* en raison de sa dissémination par les animaux. Ces formations colonisent les dunes et les piemonts. Elles sont parmi les productives et constituent les réserves fourragères de la saison sèche. Neuf groupements ont été reconnus par TOUTAIN (op. cit.).

**Les unités de végétation liées aux cui-
rasses ferrugineuses.**

Les espèces ligneuses (*Pterocarpus lucens*, *Combretum micranthum*, *Commiphora africana*, *Boscia senegalensis*) se regroupent en fourrés denses, difficilement pénétrables, entrecoupés d'espaces nus. C'est la physionomie d'un "bush" ou "fourré" (GUILLAUMET et KOECKLIN 1971). La strate herbacée (*Aristida adscensionis*, *Schoenefeldia gracilis*, *Panicum laetum...*) est discontinue. Sa répartition est étroitement corrélée à l'état de surface du sol et de ses conséquences sur la répartition de l'eau. Des épandages sableux alternent avec des microdépressions et des sols nus glacés. Ces groupements associés aux pédiplaines (figure 10) sont paturés en toute saison. Pendant la période sèche le feuillage des ligneux offre un complément alimentaire non négligeable. Cinq groupements ont été décrits.

Les unités de végétation liées aux affleurements rocheux.

Elles occupent l'essentiel de la surface. La strate herbacée dominée par *Schoenefeldia gracilis* est discontinue. Le recouvrement est faible. La strate arbustive (*Acacia laeta*, *Acacia raddiana*) est très lâche. Ces groupements qui colonisent les formations allochtones (figure 10) sont peu productifs. Ils sont néanmoins bien exploités à la fin de la saison des pluies. L'unité "Spt" des dépressions et talwegs (Annexe 1), bénéficiant des eaux de ruissellement, se présente comme des formations mixtes herbacées-ligneux hauts. Les espèces tant herbacées (*Panicum laetum*) que ligneuses (*Acacia seyal*, *Acacia adansonii*) sont hygrophiles. La production est élevée. Ce sont des pâturages de la saison des pluies.

Les formations inondables.

Ce sont généralement des prairies composées de graminées annuelles (*Echinochloa colona*, *Oryza barthii*, ou pérenne (*Echinochloa stagnina*) selon la durée de l'inondation. Le recouvrement est continu. La productivité est élevée. Elles sont parcourues pendant la saison sèche.

4 - LES CONDITIONS SAHELIENNES DE LA MARE D'OURSIS.

La zone de la Mare d'Oursi appartient à une région à climat typiquement sahélien, caractérisée par des conditions spécifiques d'aridité.

Le rayonnement global et les températures élevées déterminent des niveaux d'évapotranspiration très défavorable au bilan hydrique climatique. Les pluies, peu abondantes, se concentrent sur quatre mois de l'année. De plus, elles présentent une forte variabilité aussi bien dans la répartition temporelle que spatiale. Ces dernières années, la fréquence des années déficitaires de plus en plus élevée, accentue les difficultés de la région face aux problèmes des besoins en eau, au cours de la longue saison rigoureusement sèche. A ces conditions d'aridité climatique s'ajoute une aridité édaphique, due à l'extension des grandes zones de glacis

caractérisées par un ruissellement diffus intense. Les réserves en eau du sol sont précaires car l'eau s'infiltré peu. Le réseau hydrographique est dégradé. L'écoulement est discontinu. Comme dans les autres régions arides du monde, l'organisation des grands traits de la végétation repose sur les conditions édaphiques. La diversité des unités de végétation est grande, malgré la relative monotonie des types physiologiques.

Les systèmes d'exploitation sont adaptés aux conditions d'aridité et à la diversité du milieu. Les techniques utilisées s'ajustent à la culture des grands espaces et à la pluviométrie erratique. De même, les pratiques pastorales sont fondées sur la mobilité et le calage des rythmes quotidiens et saisonniers d'exploitation à la distribution des ressources (eau, herbage).

Le fonctionnement de ces systèmes agro-pastoraux repose cependant sur un espace ouvert et sous utilisé. Or, la tendance actuelle est à la saturation de cet espace, en raison notamment de l'accroissement démographique. Le problème du déséquilibre entre les besoins d'une population en expansion, et les ressources d'un milieu soumis à de sévères conditions d'aridité et en voie de dégradation, se pose de façon cruciale.



DEUXIEME PARTIE



METHODOLOGIE

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation de méthodes et techniques usuelles qu'il n'est pas utile de décrire dans le détail et qui seront brièvement rappelées au moment voulu. Par contre certains aspects méthodologiques ont fait l'objet d'observations spécifiques soit pour éprouver de nouvelles techniques : c'est le cas des mesures radio-métriques, soit pour évaluer la représentativité des mesures effectuées, aspect qui fait souvent défaut dans de nombreux travaux.

Les problèmes d'échantillonnage, leur représentativité et la précision des mesures seront donc les centres d'intérêt de cette partie.

Unité de végétation (lieu-dit) (1)	Superf. % total	Physionom. de la végétation (2)	Conditions édaphiques (3)	utilisat. pastorale niveau de production	utilisat. agricole
Ams (Oursi)	5 %	formation herbacée	<ul style="list-style-type: none"> . cordon dunaire . sables éoliens . sol peu évolué à faciès brun rouge sur sol brun rouge subaride bien différencié, hydro-morphe. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de saison sèche. . production : 1 à 1,5 t. ha⁻¹ 	zone d'extension des cultures.
Cep (Kolel)	2,4 %	formation herbacée	<ul style="list-style-type: none"> . piemont . gabbros . sols ferrugineux tropical, peu lessivé, peu différencié sur sables éoliens de l'erg ancien. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de saison sèche après les récoltes. . production : 0,5 à 1 t. ha⁻¹ 	terrain privilégié pour les cultures de mil.
Ase (Gountouré)	4,3 %	formation complexe herbacée ligneux - bas	<ul style="list-style-type: none"> . pédiplaines à plaquages sableux . débris de cuirasse latéritique . sol ferrugineux tropical lessivé sur granite à migmatite à gros grains. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de fin de saison des pluies. . pâturage arbustif en saison sèche. . production : 0,5 à 1 t. ha⁻¹ 	
Sgr (Kolel glacis)	20,7 %	formation herbacée	<ul style="list-style-type: none"> . glacis de transit . sol brun subaride modal entièrement développé sur gabbros. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de fin de saison des pluies. . production : 0,5 à 1 t. ha⁻¹ 	
Sgl (Kouni-Kouni)	8,9 %	formation herbacée	<ul style="list-style-type: none"> . glacis de transit. . sol brun subaride modal sur matériau d'altération de roches basiques. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de fin de saison des pluies. . production : 0,5 à 1 t. ha⁻¹ 	
Spt (Winde Tiuluki)	10 %	formation complexe herbacée ligneux hauts.	<ul style="list-style-type: none"> . glacis d'épandage. . sol brun subaride vertique peu épais sur migmatite. 	<ul style="list-style-type: none"> . pâturage de début de saison des pluies . production : 1,5 à 2 t. ha⁻¹ 	terrain de culture du sorgho.

Tableau 7 - Principales caractéristiques des unités étudiées à grande échelle. (1) terminologie de TOUTAIN (1976) ; cf. annexe 1. (2) terminologie GODRON et al. (1983) ; (3) LEPRUN (1977).

1 - LES DIFFERENTS NIVEAUX D'ETUDES.

Les relations entre la végétation et le milieu ne sont pas de même nature qualitativement et quantitativement suivant les échelles auxquelles on les examine (LONG 1974). Aussi, trois niveaux de perception ont été retenus pour exprimer la diversité aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ce sont les niveaux de la station, du secteur et de la région écologiques.

1.1 - La station écologique.

La station est "une surface où les conditions écologiques sont homogènes ; elle est caractérisée par une végétation uniforme" (DUCHAUFOR 1962, GODRON et al. 1983). C'est à ce niveau que les relations milieu végétation sont les plus significatives et les actions de l'homme sur le milieu les mieux perçues.

En fait les observations relatives à la méthodologie (mesure de phytomasse épigée, hypogée, radiométrie, phénologie...) et à l'évolution saisonnière de la végétation sont exécutées sur des éléments de la station écologique. L'élément de la station (parcelle) est pris au sens de LONG (1974) c'est-à-dire portion de station comme échantillon de référence, et non à celui de GOUNOT (1969). L'échelle de temps est la décade. La grande diversité des milieux représentés dans la zone d'étude, les objectifs poursuivis (suivi détaillé des différentes phases du cycle de végétation) et les impératifs matériels (fréquence des relevés, importance et difficultés des déplacements) ne permettent pas une étude exhaustive. Il a fallu choisir un certain nombre d'unités pour appréhender la variabilité du milieu.

Le choix des unités dans lesquelles seront implantées les stations de mesures, a été principalement dicté par l'importance de l'unité au niveau du secteur d'étude, la physionomie et la composition floristique de la végétation, les conditions liées au substrat édaphique (géomorphologie, géologie, pédologie) et des critères agronomiques liés au niveau de production et à l'utilisation pastorale et/ou agricole.

Six unités, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 7 ont été retenues. L'ensemble de ces six unités représente



Secteur écologique: ensemble des unités

Unité de végétation définie par
TOUTAIN (1976): Ase, Sgr, Spt

Site: 28, 27, 15

Station et éléments:

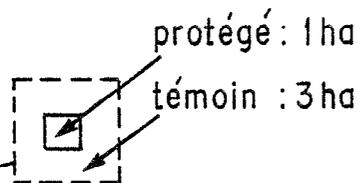


Fig. 11 - Les différents niveaux de perception.

plus de 50 % de la superficie du territoire étudié. Par ailleurs le rapprochement de certaines unités à celles étudiées, permet d'augmenter encore l'efficience de l'échantillonnage.

1.2 - Le secteur écologique (ou du bassin-versant).

A ce niveau, les variables écologiques prépondérantes sont : la topographie, les types lithologiques (MANIL 1963, LONG 1974). Il correspond en outre à la meilleure définition de l'utilisation de l'espace par l'homme (pratiques agricoles, pastorales). Les observations effectuées ont pour but d'établir un bilan annuel de la production et de vérifier certaines relations établies au niveau de la station pour une éventuelle extrapolation à l'échelle régionale.

L'échantillonnage retenu au niveau du bassin versant est constitué suivant les années de 35 à 42 sites de mesures, établis dans 14 des 23 unités de végétation définies par TOUTAIN (1976). Pour chaque unité, le nombre de sites observés est proportionnel à la superficie occupée, son niveau de dégradation, son niveau de production et à l'hétérogénéité de la structure de la végétation.

Un site est considéré comme une portion de territoire appartenant à une même unité de végétation défini par TOUTAIN (1976).

Ces différents niveaux sont schématisés sur la figure 11 et la répartition de l'échantillonnage à l'échelle du bassin-versant est représentée sur la figure 12.

1.3 - La région.

Ce sont de "grandes étendues de pays sur lesquelles règne le même climat, qu'occupe une même végétation" (MANIL 1963). Cette échelle est nécessaire pour appréhender les variations pluriannuelles des paramètres climatiques en particulier. Dans l'unité régionale sahélienne les villes suivantes ont été retenues :

- DORI, GOROM, MARKOYE : BURKINA FASO
- TILLABERY, : REPUBLIQUE du NIGER
- HOMBORI, GAO : REPUBLIQUE du MALI

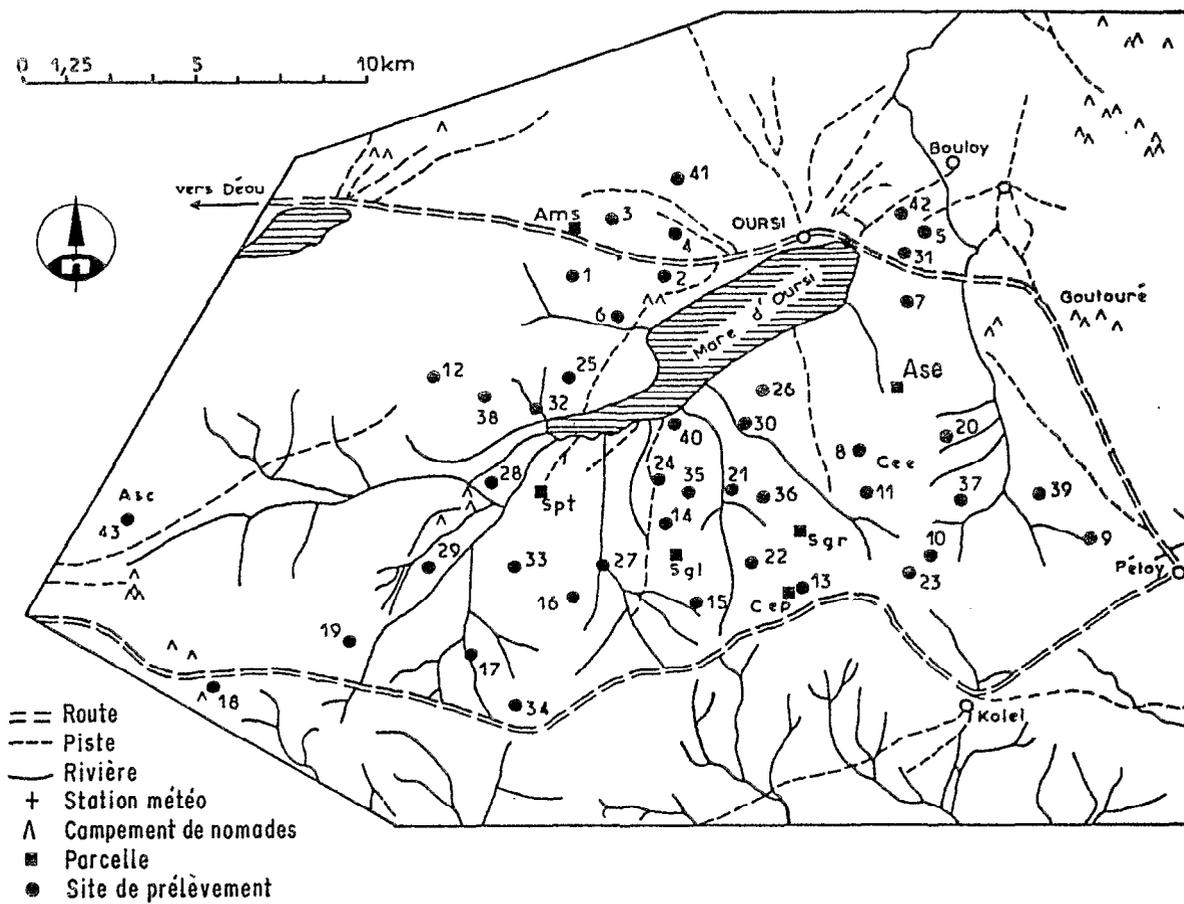


Fig. 12 - Répartition des sites de mesures de phytomasse au niveau du secteur écologique.

Par ailleurs, des villes situées en zone soudannienne ont aussi été étudiées pour confirmer à l'échelle du pays des tendances mises en évidence régionalement. Il s'agit notamment de : DEDOUGOU, FADA NGOURMA, BOBODIOULASSO, GAOUA, BANFORA.

2 - ANALYSE FLORISTIQUE : RECOUVREMENT ET CONTRIBUTION SPECIFIQUE.

2.1 - Principe de la mesure et définitions.

La détermination de la fréquence des espèces, nécessaire à l'évaluation du recouvrement et à la définition de la composition floristique et de son évolution est faite selon la méthode des points quadrats. Cette méthode développée par le C.E.P.E. de Montpellier et largement utilisée en France pour l'étude phytoécologique des formations herbacées (GODRON et al. 1967, POISSONET 1968...) a été appliquée avec succès sur les formations tropicales (POISSONET et CESAR 1972).

Rappelons brièvement que la méthode consiste à recenser les présences des espèces à la verticale de points disposés régulièrement le long d'un décamètre, tendu au-dessus du toit du tapis herbacé. Par convention, chaque espèce n'est recensée qu'une fois par ligne de visée. Quand la végétation est haute, une tige métallique à bord effilé matérialise la ligne de visée. DAGET et POISSONET (1971) donnent les définitions suivantes :

- La fréquence spécifique (FS) d'une espèce est le nombre de points où cette espèce a été rencontrée. La fréquence centésimale (FC) est égale au rapport (en %) de la FS au nombre (N) de points échantillonnés.

$$FC = \frac{FS}{N} \times 100$$

Quand le nombre de points est très élevé, la FC représente le recouvrement (GODRON 1968).

- La contribution spécifique est définie comme le rapport de la fréquence spécifique à la somme des fréquences spécifiques de toutes les espèces recensées.

$$CSi = \frac{FSi}{\sum_{i=1}^n FSi} \times 100$$

n est le nombre d'espèces.

POISSONET et POISSONET (1969) ont montré que la CSi peut être considérée, à une certaine approximation près, comme une expression relative de la biomasse.

2.2 - Effectif de l'échantillonnage et précision.

Les lectures s'effectuent tous les 20 cm, espacement préconisé pour la végétation haute.

La détermination du nombre d'observation a été effectuée par le calcul de l'intervalle de confiance, à partir de l'effectif cumulé ligne par ligne des contacts de l'espèce dominante sur l'effectif cumulé des contacts enregistrés pour l'ensemble des espèces (BOUDET 1978).

Les résultats du tableau 8 montrent que des précisions de 5 % sont obtenues avec quatre lignes (200 points) pour les groupements Spt, Ams, alors que 250 points n'offrent que des précisions de 6 à 7,6 % pour les groupements Sgl, Sgr et Cep, ce qui s'explique par la plus grande hétérogénéité de ces derniers.

Nous avons pris pour tous les groupements étudiés 5 lignes de 10m soit un échantillon de 250 points.

	Ligne	n	N	FC ± IC
Spt 8.8.77	1	39	102	38,2 ± 9,6 %
	2	80	215	37,2 ± 6,5 %
	3	125	299	41,8 ± 5,7 %
	4	161	384	41,9 ± 5,0 %
Ams 11.8.77	1	14	52	26,9 ± 12,3
	2	41	126	32,5 ± 8,3
	3	49	174	28,3 ± 6,8
	4	51	230	22,2 ± 5,4
Cep 9.8.77	1	30	47	63,8 ± 14
	2	59	89	66,3 ± 10
	3	88	126	69,8 ± 8,1
	4	128	173	73,9 ± 6,6
	5	154	208	74,0 ± 6
Sgr 19.9.77	1	26	31	83,8 ± 13,2
	2	52	82	63,4 ± 10,6
	3	77	117	65,8 ± 8,7
	4	106	164	64,6 ± 7,4
	5	140	213	65,7 ± 6,5
Sgl 15.8.77	1	21	22	95,5 ± 8,9
	2	46	55	83,6 ± 9,9
	3	64	86	74,4 ± 9,4
	4	81	105	77,1 ± 8,2
	5	99	136	72,8 ± 7,6

Tableau 8 - Effectif de l'échantillonnage et précision des mesures.

3 - PHYTOMASSE EPIGEE.

3.1 - Généralités.

La détermination de la productivité des herbages sahéliens, essentielle pour l'aménagement de telle zone pastorale nécessite des mesures extensives et fréquentes de la phytomasse. Bien que la définition de la nature des écosystèmes pâturés sahéliens soit généralement précise, car elle fait appel à des méthodes éprouvées d'inventaire de la végétation (BOUDET 1978, COULIBALY 1979, ANONYME 1975) l'évaluation de leur production est souvent conduite avec une méthodologie inappropriée en raison de l'hétérogénéité de ces milieux et de la grande variabilité de la production

qui en résulte. On se contente bien souvent d'évaluer la phytomasse d'une surface "homogène" de 4 à 25 m² et d'extrapoler cette valeur à l'unité de végétation inventoriée. Cette estimation est loin d'être représentative de l'unité étudiée. Elle ne permet certainement pas de donner une fourchette d'évaluation de la mesure. Le calcul de la charge pastorale à partir de cette valeur unique peut alors être considérée comme hautement critiquable.

Cette situation nous a conduits à l'aide de la technique classique de la récolte intégrale, avec coupe et pesée de la végétation, à définir une méthode d'évaluation de la phytomasse à l'échelle du secteur écologique (LEVANG et GROUZIS 1980).

Cette technique de mesure directe est utilisable avec succès en milieu sahélien, mais elle s'avère le plus souvent longue et onéreuse, en particulier dans le cas des couverts hétérogènes. De plus, son caractère destructif ne permet pas de suivre la dynamique saisonnière d'une parcelle sur un même échantillon. Pour éviter ce dernier écueil et en prévision de l'utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT dans la régionalisation des observations nous avons été amenés (GROUZIS et METHY 1983) à définir les conditions d'utilisation d'un radiomètre pour l'estimation des phytomasses herbacées en milieu sahélien.

3.2 - Détermination de la phytomasse épigée par la méthode de la récolte intégrale.

L'objectif est de mettre au point une méthodologie d'évaluation de la phytomasse herbacée au niveau du bassin-versant. Les observations portent plus particulièrement sur la détermination de la surface du prélèvement, et de la taille de l'échantillon.

3.2.1 - Matériel et méthodes.

Les études de détail ont été effectuées sur trois unités :

- Spt : végétation à recouvrement continu sur sols vertiques hydromorphes (bas-fond) ;

- Ams* : végétation à recouvrement continu sur sols sableux (systèmes dunaires) ;
- Sgr : végétation à recouvrement discontinu sur sols divers (glacis).

Des études complémentaires ont été menées sur 4 unités (Cdc, Cep, Ase, Sgl) pour vérifier si la même méthode était valable dans des unités de végétation à structure semblable.

La méthode utilisée est celle de la récolte intégrale qui consiste à récolter toute la matière végétale sur pied (coupe à ras du sol). Le poids de matière fraîche est mesuré sur le terrain ; la teneur en eau est déterminée sur plusieurs échantillons par dessiccation à l'étuve à 85° C jusqu'à l'obtention du poids constant.

L'étude méthodologique a été réalisée du 15 août au 15 septembre 1977, période correspondant à la phytomasse sur pied maximale.

Six surfaces élémentaires de prélèvement (S) ont été étudiées : 1, 3, 4, 8, 12 et 16 m². Dans les groupements à recouvrement continu (Ams, Cdc, Spt...), la méthode des carrés imbriqués de WIEGERT (1962) a été utilisée. Dans les groupements à recouvrement discontinu (Ase, Ase, Sgl, Sgr...) des bandes de 1 sur 16 m devaient permettre de réduire une variance très importante (Van DYNE et al., 1963 ; JAIN, 1967).

Trente à quarante répétitions (n) ont été effectuées pour toutes les surfaces. Contrairement à l'étude de la surface de prélèvement nous ne cherchons plus à réduire la variance mais à la stabiliser : l'ensemble de l'hétérogénéité de la station sera alors pris en compte.

Le couple (S, n) donnant la meilleure évaluation de la phytomasse sera celui dont la variance est stabilisée à sa plus faible valeur.

* Symboles des unités de végétation définies par TOUTAIN (1976). Leur signification est donnée dans l'annexe 1.

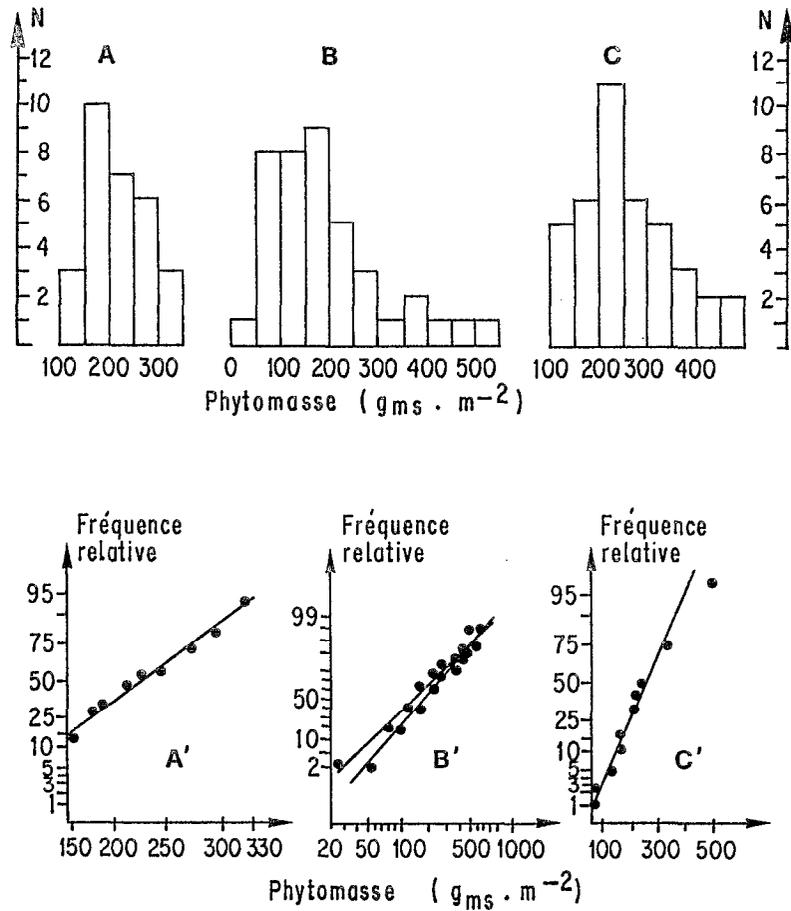


Fig. 13 - Distribution de la phytomasse herbacée et ajustement des distributions à une loi théorique par la méthode graphique.

A : Groupement à *Panicum laetum* et *Schoenefeldia gracilis* sur sol vertique hydromorphe ($x = 221 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$, $s = 28$).

B : Groupement à *Schoenefeldia gracilis* et *Aristida adscensionis* sur glaciais ($x = 190$, $s = 117$).

C : Groupement à *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis* et *Schoenefeldia gracilis* sur sable dunaire ($x = 258$, $s = 97$).

A', C' : échelle gaussio-arithmétique,

B' : échelle gaussio-logarithmique.

Les paramètres statistiques utilisés sont :

n = effectif de l'échantillon

\bar{x} = moyenne arithmétique $\Sigma x/n$

s = écart type de l'échantillon = $\sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$

P = indice de précision sur la moyenne = $\frac{st}{\sqrt{n \cdot \bar{x}}}$

t = coefficient de Student.

3.2.2 - Résultats.

Loi de distribution de la phytomasse.

Les répartitions des fréquences par classe de phytomasse pour les trois groupements étudiés et leurs ajustements à des distributions théoriques sont respectivement représentés sur la figure 13. Il apparaît que dans les groupements de bas-fonds (A) ou sableux (C), les phytomasses se distribuent suivant une loi normale comme le montre l'alignement des points sur le graphique à échelle gauusso-arithmétique (A', C'). Par contre dans le groupement de glacis (B), l'alignement des points n'est obtenu que par l'utilisation d'une échelle gauusso-logarithmique. La figure 13 B' donne le tracé de la droite établie avec la variable non normalisée ($x_0 = 0$, droite inférieure) et de celle établie avec la variable normalisée ($x_0 = -25$, droite supérieure). C'est donc une loi de répartition log-normale déjà signalée par SICOT (1976). Cependant au seuil $p = 0,05$, l'hypothèse de normalité n'est rejetée ni par le test du chi carré ni par le test de Kolmogorov-Smirnov. Il n'a pas été utile de normaliser les données par l'artifice d'un changement de variable comme le préconise BOUDET (1983) pour les unités trop hétérogènes. Les données ont été traitées selon une loi normale.

Choix du couple surface, effectif (S,n).

Les moyennes, écarts types et précisions au seuil de probabilité $p = 0,05$, en fonction de la surface et du nombre de prélèvement pour les différents groupements sont reportés dans les tableaux 9, 10 et 11. L'examen de ces derniers montre que :

N Répétitions	Surface en m ²					
	1	3	4	8	12	16
x g MS/m ²	181 ± 28	202 ± 31	197 ± 29	196 ± 23	198 ± 21	198 ± 22
10 s	39	43	40	32	30	31
% précision	15	15	15	12	11	11
x	216 ± 26	225 ± 22	223 ± 22	223 ± 20	226 ± 20	223 ± 20
20 s	56	47	47	43	43	42
% P	12	10	10	9	9	9
x	221 ± 22	227 ± 21	225 ± 20	224 ± 18	227 ± 17	225 ± 16
30 s	58	56	54	48	45	43
% P	10	9	9	8	7	7

Tableau 9 - Groupement à *P. laetum* et *S. gracilis* : variations de la moyenne (x), de l'écart type (s) et de la précision (P) en fonction de la surface et du nombre de prélèvement. (bas-fond)

N Répétitions	Surface en m ²					
	1	3	4	8	12	16
x g MS/m ²	240 ± 89	261 ± 103	256 ± 96	263 ± 102	270 ± 101	270 ± 101
10 s	124	144	134	142	141	141
% précision	37	39	37	39	37	37
x	242 ± 46	276 ± 53	268 ± 48	267 ± 51	272 ± 49	271 ± 49
20 s	98	113	103	108	105	104
% P	19	19	18	19	18	18
x	249 ± 34	276 ± 44	270 ± 40	270 ± 41	274 ± 41	274 ± 41
30 s	92	117	106	109	109	111
% P	14	16	15	15	15	15
x	258 ± 31	277 ± 36	273 ± 33	273 ± 36	277 ± 36	278 ± 36
40 s	97	115	105	113	114	114
% P	12	13	12	13	13	13

Tableau 10 - Groupement à *C. biflorus*, *A. mutabilis* et *S. gracilis* : variation de la moyenne (x), de l'écart type (s) et de la précision (P) en fonction de la surface et du nombre de prélèvement. (dune)

- aux différents effectifs de l'échantillonnage, l'augmentation de la surface de prélèvement ne modifie pas significativement la moyenne pour les trois groupements, mais elle diminue l'écart type excepté pour le groupement dunaire (tableau 10) ;

- l'augmentation du nombre de prélèvement n'influence ni la moyenne ni l'écart type au-delà de 20 répétitions. Dans le groupement de glacis (tableau 11), on note toutefois une tendance à la diminution de l'écart type, mais les différences observées ne sont pas significatives ;

- dans tous les cas, la meilleure précision sur la moyenne est obtenue avec la surface et le nombre de prélèvement maximaux.

Les phytomasses moyennes n'étant pas significativement différentes au seuil de probabilité $p = 0,05$, c'est le niveau de précision souhaité qui permettra de déterminer le couple S, n .

Les variations de la précision en fonction du nombre de répétition pour des surfaces extrêmes des trois groupements sont reportées sur la figure 14. Comme la moyenne, l'écart type et le coefficient de Student sont stabilisés pour un nombre de prélèvement supérieur à 30, l'expression de la précision est : $P = Cte/\sqrt{n}$. Nous sommes donc en mesure de prolonger par le calcul la courbe de variation de la précision en fonction de l'effectif de l'échantillon (figure 14). On voit que pour une précision de 10 %, il est nécessaire de prélever dans un groupement de bas-fond 25 échantillons de 1 m^2 soit 25 m^2 ou 14 de 16 m^2 , soit 224 m^2 . Dans un groupement de glacis à recouvrement discontinu, et pour la même précision il faut prélever : 151 échantillons de 1 m^2 , soit 151 m^2 ou 83 de 16 m^2 , soit 1328 m^2 .

Il apparaît très nettement que la surface de 1 m^2 est la plus intéressante car la plus économique. Par ailleurs, une précision de 10 % dans les formations de glacis nécessite un nombre de prélèvement pratiquement irréalisable, avec la méthode de la récolte.

Comme l'augmentation de l'effectif de l'échantillon au-delà de 40 n'améliore que très peu la précision (fig. 14), 30 à 40 prélèvements de 1 m^2 donneront une évaluation satisfaisante de la phytomasse à un coût de sondage réduit. Il faut cependant noter que la précision obtenue sera différente selon les milieux. Elle sera de l'ordre de 10 à 13 % pour les groupements dunaires et de bas-fond, et de l'ordre de 20 % pour les glacis.

N Répétitions	Surfaces en m ²					
	1	3	4	8	12	16
x g MS/m ²	177 ± 37	190 ± 119	187 ± 109	179 ± 113	202 ± 92	223 ± 82
10 s	121	166	155	158	129	114
% Précision	49	62	59	63	46	37
x	178 ± 46	165 ± 56	168 ± 52	165 ± 54	175 ± 45	186 ± 42
20 s	98	119	110	115	96	90
% P	26	34	31	33	26	23
x	190 ± 45	163 ± 42	169 ± 41	166 ± 40	171 ± 33	175 ± 31
30 s	121	112	109	107	89	83
% P	24	26	24	24	19	18
x	190 ± 37	155 ± 33	164 ± 32	159 ± 31	163 ± 26	167 ± 24
40 s	117	103	101	97	81	76
% P	19	21	19	19	16	14

Tableau 11 - Groupement à *S. gracilis* et *A. adscensionis* : variations de la moyenne (x), de l'écart type (s) et de la précision (P) en fonction de la surface et du nombre de prélèvement. (glacis)

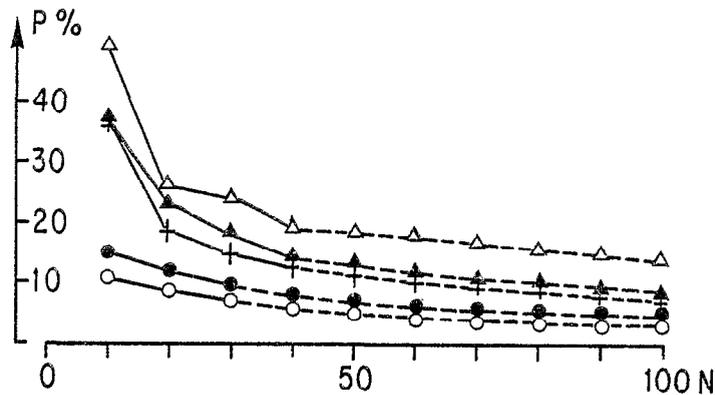


Fig. 14 - Variation de la précision (P en %) en fonction du nombre (N) et de la surface de prélèvement pour trois groupements végétaux.
 - Groupement à *S. gracilis* et *A. adscensionis* : 1 m² (Δ) et 16 m² (▲)
 - Groupement à *C. biflorus*, *A. mutabilis* et *S. gracilis* : 1 m² (+)
 - Groupement à *P. laetum* et *S. gracilis* : 1 m² (●) et 16 m² (○) (Trait : valeurs observées, tireté : valeurs calculées).

L'étude des autres groupements confirme les résultats obtenus sur les 3 ensembles étudiés en détail, de sorte que la méthode de sondage est valable non seulement pour des groupements à structure de végétation semblable, mais encore pour tous les milieux.

Répartition de l'échantillonnage.

L'échantillonnage doit être réparti sur l'ensemble du site pour tenir compte de toute son hétérogénéité. Les difficultés de repérage et de déplacement sur le terrain ne permettant pas un échantillonnage au hasard, des prélèvements systématiques suivant un ou plusieurs transects ont été effectués.

En comparant divers espacements LEVANG (1978) montre que les moyennes de phytomasse ne sortent jamais de l'intervalle de confiance ($p = 0,05$) de la mesure la plus précise (maximum de prélèvement et écartement minimum) tant que l'effectif de l'échantillon est supérieur ou égal à 30. De même, les précisions obtenues sur les mesures de phytomasse ($n = 30$) de plusieurs sites d'une même unité de végétation mais d'étendue variable (1 ha à 1 200 ha) sont comparables. Cela montre que la surface du site a peu d'importance par rapport au nombre d'échantillons. Par conséquent l'espacement entre prélèvement sera déterminé par la surface du site à sonder.

Par ailleurs la comparaison de plusieurs transects dans un même site montre qu'un seul suffit à évaluer la phytomasse à condition de l'orienter dans le sens du gradient apparent d'hétérogénéité lorsqu'il existe.

Conclusion.

L'objectif a été de mettre au point une méthode d'évaluation de la phytomasse herbacée à l'échelle du bassin-versant.

L'étude de l'influence de la surface, du nombre de prélèvement et de la répartition de l'échantillonnage a été réalisée dans trois groupements végétaux. La généralisation de la méthode a été testée dans quatre autres groupements.

Les principaux résultats font apparaître que :

- les moyennes ne sont pas significativement affectées par l'augmentation de la surface de prélèvement, alors que l'écart type est généralement diminué ;

- l'augmentation de l'effectif de l'échantillonnage au-delà de 20 répétitions n'influence ni la moyenne ni l'écart type de l'échantillon ;

- la meilleure précision est obtenue avec la surface et le nombre de prélèvements maximaux. Cependant pour un niveau de précision donné, nous avons le choix entre plusieurs couples (S, n). Le couple occasionnant le moindre travail (S x n minimum) sera retenu. C'est dans tous les cas celui où S est égal à 1 m², ce qui corrobore les résultats de FRIEDEL (1977). En ce qui nous concerne, la précision choisie est celle qui correspond à l'efficience maximale du nombre de prélèvements, c'est-à-dire trente à quarante.

Trente à quarante prélèvements de 1 m² donneront une évaluation satisfaisante de la phytomasse à un coût de sondage réduit, à condition de les répartir suivant un transect dans le site, pour tenir compte de son hétérogénéité.

Pour évaluer la phytomasse totale du bassin-versant à la fin de la période des pluies une valeur moyenne de la phytomasse par unité de végétation a été déterminée à partir des résultats obtenus sur les divers sites.

La phytomasse moyenne de l'unité j est donnée par la formule suivante :

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^p s_i \cdot \bar{x}_i}{\sum s_i}$$

où s_i est le coefficient de pondération par la surface du site i, établie $\sum s_i$

par planimétrie.

p le nombre de sites sondés de l'unité j, \bar{x}_i la phytomasse moyenne du i^e site de l'unité j.

3.3 - Détermination radiométrique de la phytomasse.

Un couvert végétal est dans les conditions naturelles, le siège d'interactions entre le rayonnement d'origine solaire et les organes végétaux. Obstacles privilégiés, les feuilles présentent des propriétés optiques du point de vue de la transmission et de la réflexion, qui sont fonction de la radiation considérée : élevées dans le proche infrarouge, la transmittance et la réflectance sont au contraire faibles dans le domaine photosynthétiquement utilisable (R. P. U.) où s'exerce l'action des pigments chlorophylliens, avec toutefois un maximum relatif vers 550 nm. Les propriétés optiques du couvert présentent des caractéristiques semblables qui peuvent, dans certains domaines spectraux, être bien corrélées à la quantité de matière végétale à l'origine de l'interception (JENSEN, 1980). Ce sont en fait des indices basés sur une combinaison de propriétés dans plusieurs domaines spectraux qui ont fait l'objet du plus grand nombre de travaux. JORDAN (1969) est ainsi parvenu à la détermination de l'indice foliaire des forêts tropicales à partir du rapport des transmittances pour 800 nm et 675 nm, longueurs d'onde pour lesquelles on trouve généralement les corrélations les plus favorables. En effet les feuilles transmettent et réfléchissent beaucoup à 800 nm et très peu à 675 nm, d'où le bon contraste observé entre ces deux longueurs d'onde. Mais c'est avec l'essor de la télédétection passive que ce type de technique, appliqué au rayonnement ascendant réfléchi vers la basse atmosphère, a connu son plein développement. A la suite des travaux de COLWELL (1973) le rapport infrarouge/rouge a été en particulier appliqué à l'analyse des images satellites (LANDSAT, NOAA... : CARNEGIE et al. 1975, JOHNSON 1976, KIMES et al. 1981, TUCKER et al. 1983...).

Au sol, les résultats obtenus par ce type de méthode sont prometteurs. Cependant, les observations n'ont été réalisées que sur des végétations prairiales monospécifiques (*Bouteloua gracilis* : PEARSON et al. 1976; *Dactylis glomerata* : METHY, 1977), exception faite des travaux de THALEN et al. (1980) relatifs à des couverts semi-naturels aux Pays-Bas. De plus les individus présentaient à l'instant des mesures, le même stade phénologique. L'application de la méthode à d'autres types de végétation demandait donc à être précisée.

Tout en fixant les conditions d'utilisation d'un radiomètre (effet du type de temps, de la hauteur du soleil), on définira principalement les effets de la structure de la végétation et ceux du stade phénologique sur les paramètres d'étalonnage dans les steppes à épineux sahéliens.

3.3.1 - Principe, matériel et protocole.

Principe physique de la méthode.

La méthode est basée sur l'existence dans le proche infrarouge (notamment aux alentours de 800 nm) d'une corrélation positive entre réflectance et phytomasse. La corrélation entre ces deux paramètres est au contraire négative dans les longueurs d'ondes du R.P.U. correspondant à l'absorption chlorophyllienne (plus particulièrement aux alentours de 680 nm). C'est le rapport des deux réflectances qui est utilisé de manière à accroître la sensibilité de la méthode.

Le radiomètre se compose (METHY 1977) de deux cellules photoélectriques au silicium, équipées chacune d'un filtre interférentiel à couches métalliques dont les pics de transmission sont respectivement centrés sur 676 nm et sur 802 nm (tolérance 1 %) pour l'appareil utilisé. Un système de diaphragmes limite le champ angulaire à 25°. Pour une distance de 1,25 m, ces deux ensembles visent une même cible, assimilable à une surface circulaire d'un diamètre de 0,55 m. Un millivoltmètre d'une résolution maximale de 0,1 mV permet la mesure de la tension aux bornes des résistances de charge des photocellules. Cette tension est proportionnelle à la luminance spectrale énergétique des cibles visées, c'est-à-dire la puissance rayonnée par unité d'angle solide (ou intensité) ramenée à l'unité de surface émettrice apparente.

La détermination effective des réflectances monochromatiques implique la visée d'un écran étalon à l'instant des mesures. Cependant, la distribution spectrale du rayonnement global varie peu au cours d'une journée sereine et le rapport des énergies monochromatiques incidentes est sensiblement constant. Pour une cible donnée le rapport des réflectances recherché est donc en fait égal, à un facteur constant près, au rapport R des tensions délivrées par le radiomètre.

La fraction réfléchie du rayonnement solaire, qui dépend de l'architecture du couvert, des propriétés optiques des feuilles et du sol, varie en fonction de la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon (h). Il en est de même du rapport des deux réflectances monochromatiques choisies et on voit apparaître la nécessité d'effectuer, sur le matériel végétal étudié, une analyse préalable de cet effet, pour permettre une comparaison des mesures relatives à des hauteurs solaires différentes. Cette analyse comportera l'établissement de la courbe $R = f(h)$ sur une cible représentative. En affectant une valeur unitaire au rapport obtenu pour la hauteur du soleil choisie pour les normalisations ultérieures (par exemple 60°) il est possible d'obtenir une courbe de normalisation permettant d'attribuer à chaque hauteur du soleil un facteur de normalisation. Le produit par ce facteur des valeurs de R donne des mesures normalisées comparables entre elles.

Caractéristiques de la végétation.

Etant donné l'importance de l'architecture du couvert végétal sur les réponses du radiomètre, il nous a paru utile de décrire dans le détail, les 6 unités de végétation correspondant à des structures et à des situations écologiques bien contrastées, qui ont été retenues pour l'étalonnage du radiomètre.

Les structures verticales sont représentées sur la figure 15.

Le groupement établi sur dune (Oursi fig.15A) est dominé par *Zornia glochidiata* (contribution spécifique 66,4 %), légumineuse basse (20 cm) plus ou moins étalée. Les autres espèces constituant ce groupement sont : *Heliotropium strigosum* (9,6 %), *Brachiaria xantholeuca*, *Tribulus terrestris* (4 %) et 18 espèces compagnes dont la contribution spécifique s'élève à 16 %.

Alysicarpus ovalifolius (36,7 %), *Cenchrus biflorus* (23,9%), *Schoenefeldia gracilis* (17 %), *Aristida mutabilis* et 15 espèces diverses (15,4 %) constituent le groupement établi sur sables éoliens en position de piémont (Kolel, fig. 15B). Le couvert végétal est relativement continu et l'on peut discerner dans le couvert herbacé une strate haute (40-45 cm) constituée par les graminées cespiteuses érigées et une strate basse, représentée par *Alysicarpus ovalifolius*, légumineuse à port plus ou moins étalé.

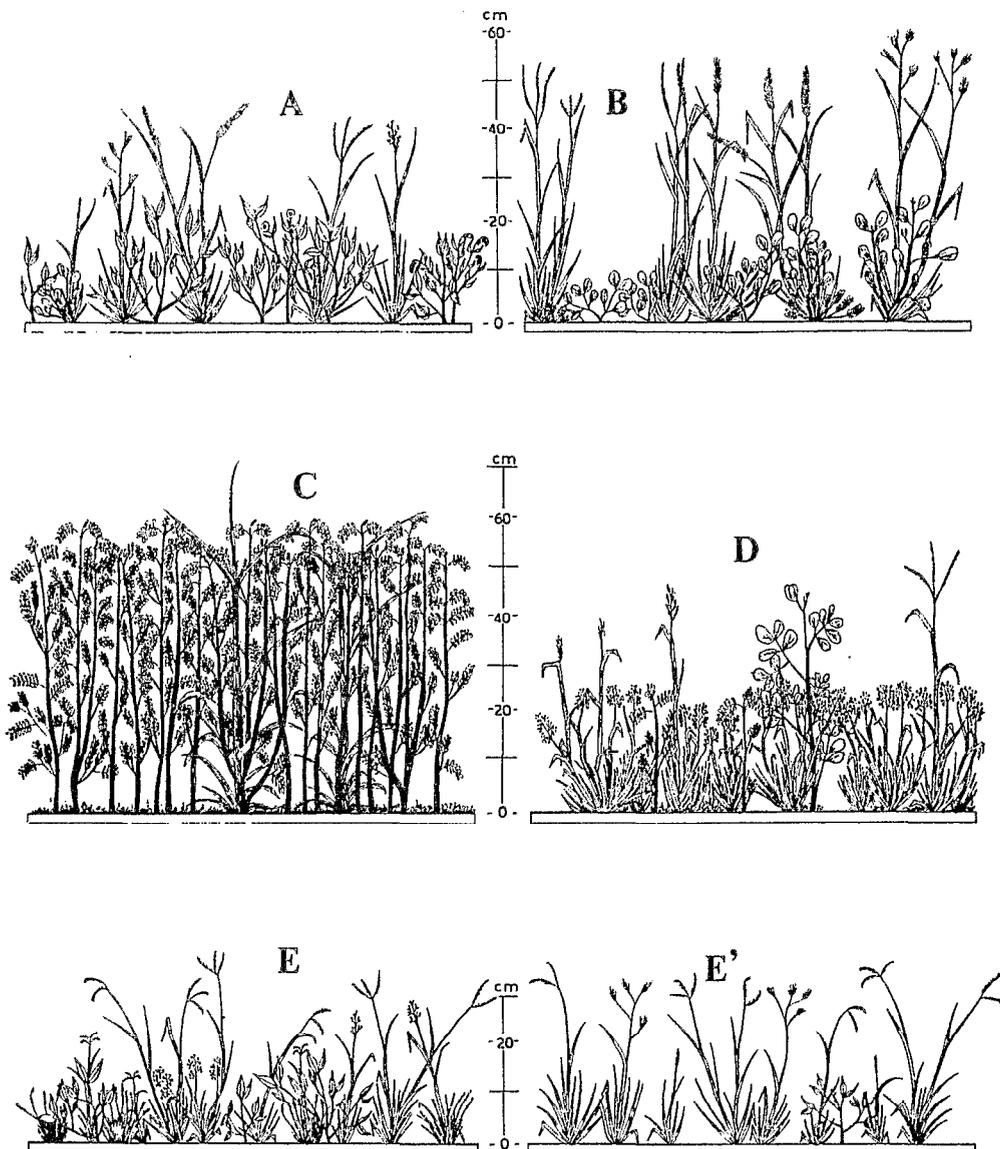


Fig. 15 - Aspect architectural des groupements végétaux étudiés.

- A : Oursi, groupement à *Zornia glochidiata*, *Heliotropium strigosum*, *Brachiaria xantholeuca*.
- B : Kolel, groupement à *Alysicarpus ovalifolius*, *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*.
- C : Winde Protégé, groupement à *Aeschynomene indica* et *Cyperus esculentus*.
- D : Winde, groupement à *Panicum laetum*, *Echinochloa colona*, *Aeschynomene indica*.
- E' : Gountoure, groupement à *Aristida mutabilis* et *Schoenefeldia gracilis* sur microbuttes sableuses.
- E : Gountoure, groupement à *Zornia glochidiata*, *Tripogon minimus* et *Panicum laetum* sur dépressions.

Deux groupements sont situés dans le bas-fond argileux de Winde Tiuluki. La station de Winde (fig. 15D) représente une végétation à recouvrement continu, dominée par *Panicum laetum* (70 %), graminée étalée (20-25 cm) portant à maturité des panicules lâches et blanches. Les autres espèces sont : *Aeschynomene indica* (21 %), *Echinochloa colona* (5 %) et diverses espèces (4 %). Le deuxième groupement (Winde Protégé, fig. 15C) correspondant à la même situation écologique dérive de la précédente par une simple mise en défens de la végétation. La composition floristique et la structure sont alors totalement modifiées (GROUZIS, 1982, 1986). *Aeschynomene indica* (96 %), légumineuse érigée d'environ 60 cm de hauteur, confère au groupement sa physionomie.

Le groupement situé sur un glacis à placages sableux (Gountoure) est constitué de 2 sous-unités correspondant aux microvariations des facteurs écologiques, en particulier de la microtopographie. Les microbuttes sableuses (fig. 15E') sont dominées par *Aristida mutabilis* et *Schoenefeldia gracilis*. La végétation est peu dense. Les microdépressions, zone d'épandage à bilan hydrique plus favorable (fig. 15E) comprennent une végétation à recouvrement élevé, à base de *Zornia glochidiata*, *Tripogon minimus* et *Panicum laetum*. Les échantillons ont été distribués dans ces deux sous-unités, mais ont ensuite été réunis, car à l'échelle de l'utilisation pastorale, l'ensemble de ce groupement constitue une homogénéité certaine.

Le groupement à *Schoenefeldia gracilis* sur le glacis limoneux de Kouni-Kouni représente une végétation à recouvrement discontinu, c'est-à-dire qu'il est constitué d'une alternance de plages de sol nu et de plages couvertes. Ce groupement est floristiquement pauvre puisque 6 espèces seulement y ont été dénombrées. Parmi celles-ci *Schoenefeldia gracilis* (97 %) constitue à elle seule la presque totalité de la végétation.

Les teneurs en eau et les proportions moyennes en matériel sec des échantillons relatifs aux différents stades phénologiques sont rassemblées dans le tableau 12. Soulignons que le stade phénologique est caractérisé par celui de la ou des espèces dominantes puisque le cycle phénologique des taxons constituant la peuplement n'est pas synchrone (GROUZIS, 1979). L'examen de ce tableau montre que la teneur en eau est généralement supérieure à 62 % exceptée pour le stade de dessèchement. La proportion moyenne du matériel non photosynthétique de l'échantillon est

faible, sauf pour le stade de dessèchement où il peut constituer une grande fraction de l'échantillon (Kouni 85,4 %, Winde Protégé 80 %).

Stations	Phénologie	Date de mesure	Teneur en eau $\bar{x} \pm s$	Poids de matériel sec en % du total
Oursi	v	24-7-1981	77,7 ± 5,7	1,2
	m	12-8	74,4 ± 9,4	7,2
	fF	31-8	70,4 ± 8,7	6,2
	d	20-9	60,9 ± 6,6	44,4
Kolel	v	25-7-1981	77,7 ± 6,6	3,4
	m	12-8	78,1 ± 3,1	19,9
	fF	6-9	68,2 ± 6,2	30,4
	d	21-9	-	-
Gountoure	v	27-7-1981	73,3 ± 7,8	2,9
	m	15-8	68,4 ± 11,3	10,7
	fF	26-8	66,3 ± 7,7	13,4
	d	21-9	53,6 ± 9,9	49,9
Kouni-Kouni	v	-	-	-
	m	-	-	-
	fF	2-9-1981	61,8 ± 15,8	9,1
	d	24-9	40,8 ± 17,3	85,4
Winde	v	31-7-1981	79,9 ± 3,3	13,4
	m	12-8	71,7 ± 7,6	17,1
	fF	2-9	67,3 ± 6,4	29,4
	d	23-9	44,8 ± 11,5	64,5
Winde Protégé	v	31-7-1981	81,2 ± 1,1	2,5
	m	12-8	75,8 ± 3,1	7,2
	fF	2-9	69,9 ± 2,4	32
	d	23-9	20,3 ± 7,2	79,8

Tableau 12 - Teneur en eau (% MF) et proportions moyennes de matériel non photosynthétique pour les différents stades phénologiques.

v : végétatif ; m : montaison ou début floraison
fF : fin floraison-fructification ; d : dessèchement.

La nature et les caractéristiques des cibles observées lors de la détermination du facteur de normalisation sont données ci-après :

- . 29.07.1981
 - . stade végétatif
 - . temps serein
 - . caractéristiques structurales et floristiques : groupement herbacé homogène, recouvrement 90 %, hauteur 15-20 cm ; feuillage vert sombre, fleurs jaunes, graminées au stade tallage ; *Tribulus terrestris*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*.

- . 13.08.1981
 - . stade montaison
 - . temps serein
 - . caractéristiques : groupement herbacé dominé par des graminées cespiteuses à (*Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Aristida funiculata*) érigées à feuillage vert foncé, recouvrement 100 %, hauteur 30-40 cm.

- . 01.09.1981
 - . stade floraison fructification
 - . temps : passages nuageux fréquents
 - . caractéristiques : même groupement que le précédent ; épis clairs, recouvrement 80 %, hauteur 40 cm.

- . 06.10.1981
 - . stade dessèchement
 - . temps serein
 - . caractéristiques : groupement herbacé à graminées (*Schoenefeldia gracilis*, *Panicum laetum*) en cours de dessèchement ; couleur jaune dominante, organes chlorophylliens environ 20 % du total ; recouvrement 80 %, hauteur 30 cm.

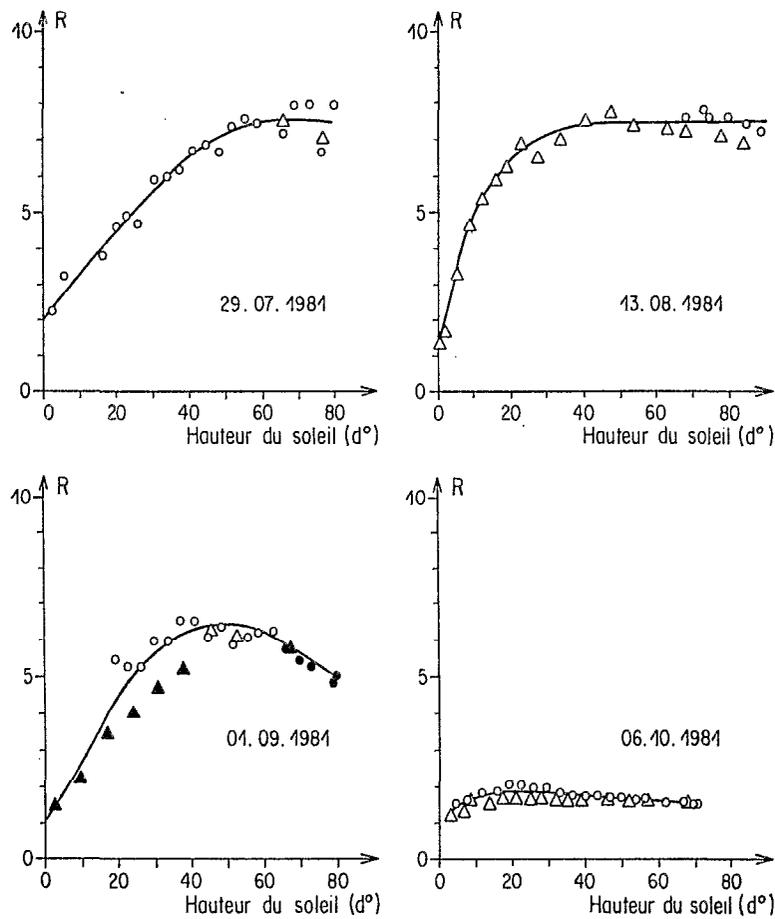


Fig. 16 - Variations en fonction de la hauteur angulaire du soleil du rapport des signaux relatifs aux domaines spectraux proche infrarouge (802 nm) et rouge (676 nm), étudiés pour quatre dates centrées sur les périodes de mesures. Temps serein : \circ matin, Δ après-midi ; temps nuageux : matin \bullet , après-midi \blacktriangle ;

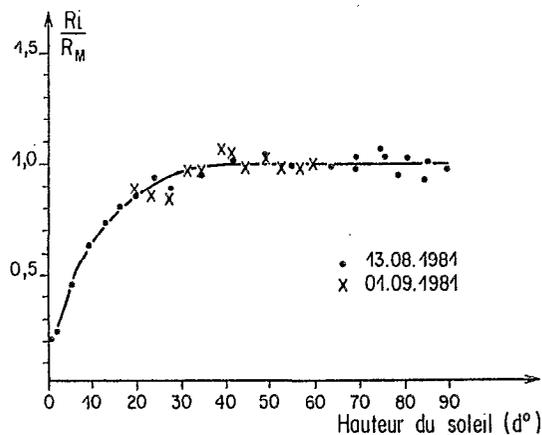


Fig. 17 - Facteur de normalisation en fonction de la hauteur angulaire du soleil pour les stades de montaison et floraison-fructification.
 R_i = valeur du rapport pour une hauteur i ;
 R_M = valeur du rapport correspondant au palier représenté sur la figure 16.

Protocole de mesure.

Trente à trente cinq échantillons réunissant une large gamme de phytomasse ont été répartis dans l'unité de végétation étudiée, pour tenir compte de son hétérogénéité. Après chaque mesure radiométrique, le matériel végétal est coupé à ras du sol sur une surface circulaire de $0,25 \text{ m}^2$. Le poids de matière fraîche est mesuré sur le terrain ; la teneur en eau est déterminée par dessiccation à l'étuve à 85°C jusqu'à l'obtention du poids constant.

3.3.2 - Résultats.

Effet de la hauteur angulaire du soleil sur le rapport R.

Les différentes cibles choisies présentent des courbes de variations de $R = f(h)$ qui confirment bien la nécessité de normaliser tous les résultats ultérieurs (fig. 16). Cette nécessité apparaît tout spécialement si l'on considère le sens même de l'évolution de R en fonction de la hauteur angulaire du soleil. En effet, pour chacune des dates qui ont fait l'objet de mesure, R croît lorsqu'augmente cette hauteur, pour atteindre un palier qui est toutefois inobservable dans les conditions nuageuses. L'évolution du rapport obtenu sur *Dactylis glomerata* (METHY, 1977) et la plupart des exemples de la littérature font au contraire apparaître avant le palier une décroissance de R. KUMAR & MONTEITH (1981) attribuent l'origine du résultat mis en évidence à une plus grande quantité de feuilles éclairées aux faibles hauteurs du soleil sous incidence rasante; le rayonnement spéculaire conduirait sur les feuilles comme sur la couverture végétale à une valeur de R plus élevée qu'en rayonnement diffus.

La distribution des résultats relatifs à la journée du 01-09-1981 (fig. 16) souligne la nécessité d'opérer par temps serein. Il est à noter enfin que l'effet de hauteur est moindre sur la courbe du 06-10 qui correspond au stade de dessèchement. Le défaut de pigments chlorophylliens, et l'absence de sélection spectrale qui en résulte, expliquent cette propriété.

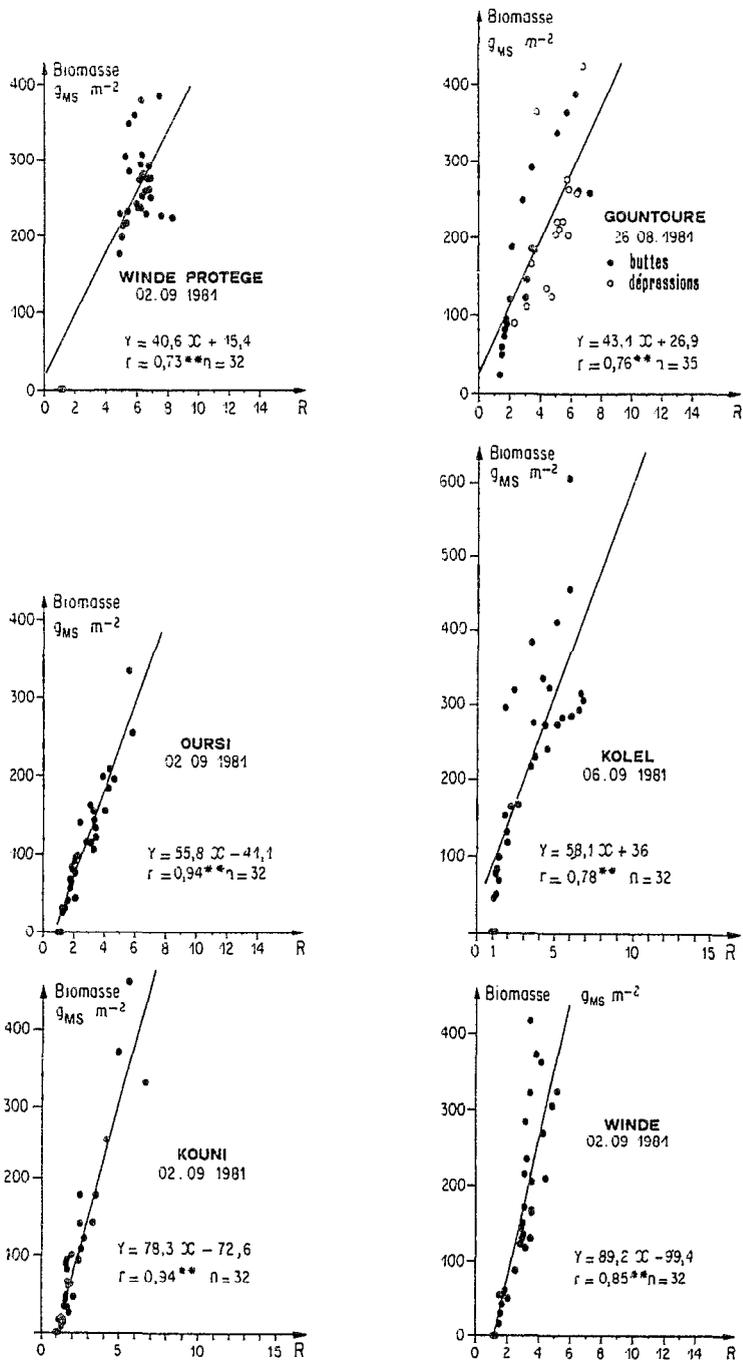


Fig. 18 - Relations entre le poids de matière sèche de la phytomasse épigée et le rapport des signaux photoélectriques relatifs aux deux radiations (stade floraison-fructification).

Les courbes sont utilisables pour le calcul des coefficients de normalisation adaptés au stade phénologique considéré. Toutefois l'aspect des courbes obtenues le 13-08 et le 01-09, si l'on excepte les points obtenus en conditions nuageuses pour cette dernière journée, a conduit à tracer une courbe de normalisation unique pour les stades de montaison et de floraison-fructification (fig. 17). Ce sont donc au total trois courbes qui ont été nécessaires pour normaliser les résultats obtenus sur l'ensemble du cycle végétatif.

Effet de la structure de la végétation.

Les résultats relatifs aux différents groupements pour le stade phénologique correspondant au maximum de phytomasse sur pied sont représentés sur les graphiques de la figure 18. Les variations de la phytomasse en fonction du rapport de luminance R ont été ajustées à une droite d'équation générale $Y = ax + b$, où Y est la phytomasse herbacée épigée en $g_{MS} \cdot m^{-2}$ et x le rapport de luminance infrarouge/rouge. Les liaisons sont toutes hautement significatives ($p = 0,01$) quel que soit le type structural. Les valeurs du coefficient de détermination (r^2) à ce stade phénologique montrent qu'en moyenne 70 % de la variabilité de la phytomasse herbacée des six groupements sont expliqués par les variations du rapport R.

L'observation des graphiques de la figure 18 révèle une assez grande dispersion des points échantillonnés. Ce caractère est imputable à la nature plurispécifique de la végétation et au protocole de mesure (échantillons différents) qui augmentent la variabilité. Cette dispersion est d'ailleurs plus accusée pour la droite relative à la station de Winde protégé. En effet, la signification de la liaison entre phytomasse et rapport ne tient qu'à l'intégration des 2 valeurs de sol nu dans la série. Si l'on retire ces 2 valeurs de l'échantillonnage, la relation devenant alors $y = 11,7 x + 195$ avec $r = 0,195$ ($n = 30$), n'est plus significative.

La grande dispersion des résultats obtenus pour ce type de végétation malgré son homogénéité apparente s'explique aisément par sa structure (fig. 15) et la morphologie de l'espèce dominante. En effet, la hauteur assez élevée d'*Aeschynomene indica* (60-80 cm) et le caractère plagiotrope de ses rameaux perturbent la réflexion par les strates basses

assez fortement recouvertes. De plus, le niveau du toit de la végétation est trop rapproché de la cellule photoélectrique qui se situe à 1, 25 m du sol.

L'examen du graphique relatif à la station de Kolel pour laquelle de fortes valeurs de phytomasse ont été observées, montre qu'il semble y avoir un effet de saturation à partir d'une phytomasse d'environ $400 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$.

Les droites de régression relatives aux différents groupements végétaux ont été comparées deux à deux par analyse de covariance (DUNN & CLARK, 1974).

Stations	Winde Protégé	Gountoure	Oursi	Kolel	Kouni	Winde
Winde Protégé $y = 40,6x + 15,4$						
Gountoure $y = 43,1x + 26,9$	NS					
Oursi $y = 55,8x - 41,1$	NS	NS				
Kolel $y = 58,1x + 36,0$	NS	NS	NS			
KOUNI $y = 78,3x - 72,6$	**	**	**	NS		
Winde $y = 89,2x - 99,4$	**	**	**	*	NS	

Tableau 13 - Comparaison des pentes des droites de régression par analyse de covariance. Tableau de signification du coefficient de Fisher.

NS : différence entre pentes non significative ($p = 0,05$)

* : différence entre pentes significative ($p = 0,05$)

** : différence hautement significative ($p = 0,01$)

L'analyse du tableau 13, qui donne la signification du coefficient de Fisher dans la comparaison des pentes des droites, permet globalement de discriminer deux groupes :

- les stations de Winde Protégé, Gountoure, Oursi et Kolei qui, à l'exception de la première, correspondent au sol clair à texture sableuse et ayant les espèces communes suivantes : *Zornia glochidiata*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*, *Alysicarpus ovalifolius*...

- les stations de Winde et Kouni, établies sur sol foncé, à texture limono-argileuse et constituées essentiellement de *Schoenefeldia gracilis* et *Panicum laetum*. L'analyse statistique par analyse de covariance montre qu'il est possible de confondre les droites relatives à ces deux stations.

(F calculé = 0,037 (1 ; 61) 4).

L'équation commune est : $y = 83,0x - 82,2$ avec $r = 0,90$. La même analyse réalisée avec les droites correspondant à Gountoure, Oursi et Kolei montre que les différences sont hautement significatives (F calculé = 14,84 (2 ; 95) 4,83 pour $p = 0,01$). Il est donc statistiquement inconcevable de formuler une équation commune aux groupements des sols sableux.

Effet du stade phénologique.

Les résultats relatifs à l'analyse des effets du stade phénologique sur les paramètres d'étalonnage sont représentés dans le tableau 14 et le graphique 19.

Ils permettent de confirmer la nature hautement significative ($p = 0,01$) de la liaison phytomasse-rapport de luminance et de montrer que les valeurs des pentes s'élèvent généralement au fur et à mesure que l'on s'avance dans le cycle de végétation (fig. 19). Au stade de dessèchement (teneur en eau moyenne des échantillons 45 % du poids de matière fraîche, proportion d'organes non photosynthétiques de l'ordre de 65 % du poids total), la méthode n'est plus utilisable. En effet, la végétation tend alors à se comporter comme un sol nu.

Pour chaque groupement, les pentes des droites relatives à chaque stade phénologique ont été comparées par analyse de covariance. L'analyse montre que les différences entre celles-ci sont généralement hautement significatives, ce qui montre la nécessité d'étalonner en fonction du stade phénologique.

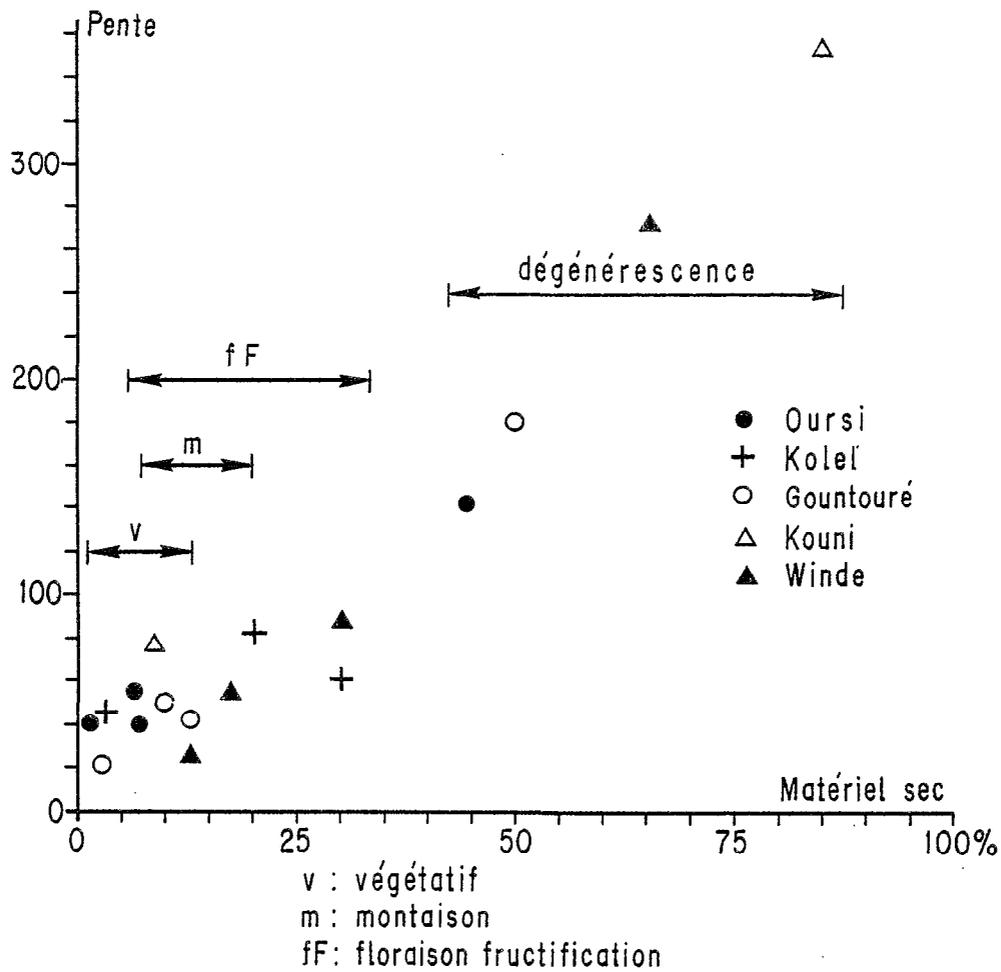


Fig. 19 - Variation de la pente des droites de regression en fonction du pourcentage du matériel sec de l'échantillon pour les différents stades phénologiques.

Stations	Stade phénologique	Equations	
Oursi	v	$y = 39x - 25,1$	$r = 0,97^{**}$
	m	$y = 41,1x - 17,0$	$r = 0,92^{**}$
	fF	$y = 55,8x - 41,1$	$r = 0,94^{**}$
	d	$y = 142,7x - 118,6$	$r = 0,92$
Kolel	v	$y = 46,5x - 35,9$	$r = 0,96^{**}$
	m	$y = 82,4x - 102,8$	$r = 0,88^{**}$
	fF	$y = 58,1x + 36,0$	$r = 0,78$
Kouni	fF	$y = 78,3x - 72,6$	$r = 0,94^{**}$
	d	$y = 356,5x - 335,8$	$r = 0,94$
Winde	v	$y = 24,2x - 6,2$	$r = 0,87^{**}$
	m	$y = 55,1x - 33,5$	$r = 0,84^{**}$
	fF	$y = 89,2x - 99,4$	$r = 0,85^{**}$
	d	$y = 274,7x - 250,5$	$r = 0,84$
Winde Protégé	v	$y = 15,2x + 29$	$r = 0,61^{**}$
	f	$y = 37,3x - 22,6$	$r = 0,64^{**}$
	F	$y = 40,6x + 15,4$	$r = 0,73^{**}$
	d	$y = 771 x - 817,8$	$r = 0,76$
Gountouré	v	$y = 22,5x - 7,8$	$r = 0,94^{**}$
	m	$y = 50,9x - 11,7$	$r = 0,84^{**}$
	fF	$y = 43,1x + 26,9$	$r = 0,76^{**}$
	d	$y = 182,4x - 130,7$	$r = 0,67$

Tableau 14 - Equations des droites, pour différents stades phénologiques.

v, m, fF, d : cf tableau 12.

** liaison hautement significative (p = 0,01)

Comparaison des résultats.

Signalons tout d'abord que les résultats ne s'adressent pas exactement à la même cible. La phytomasse sur pied relative à la méthode de la récolte est obtenue par sommation de la matière verte (b) et de la matière morte (g) de plots appariés (méthode de WIEGERT et EVANS, 1964 utilisée pour la détermination de la production nette). La cible pour les mesures radiométriques correspond à un emplacement distant de 0,50 à 1 m de ces plots. Les valeurs moyennes des couples se rapportant à différents stades de végétation ont été comparées par le test de STUDENT (fig. 20). Seules les moyennes des couples repérées par une double flèche sont

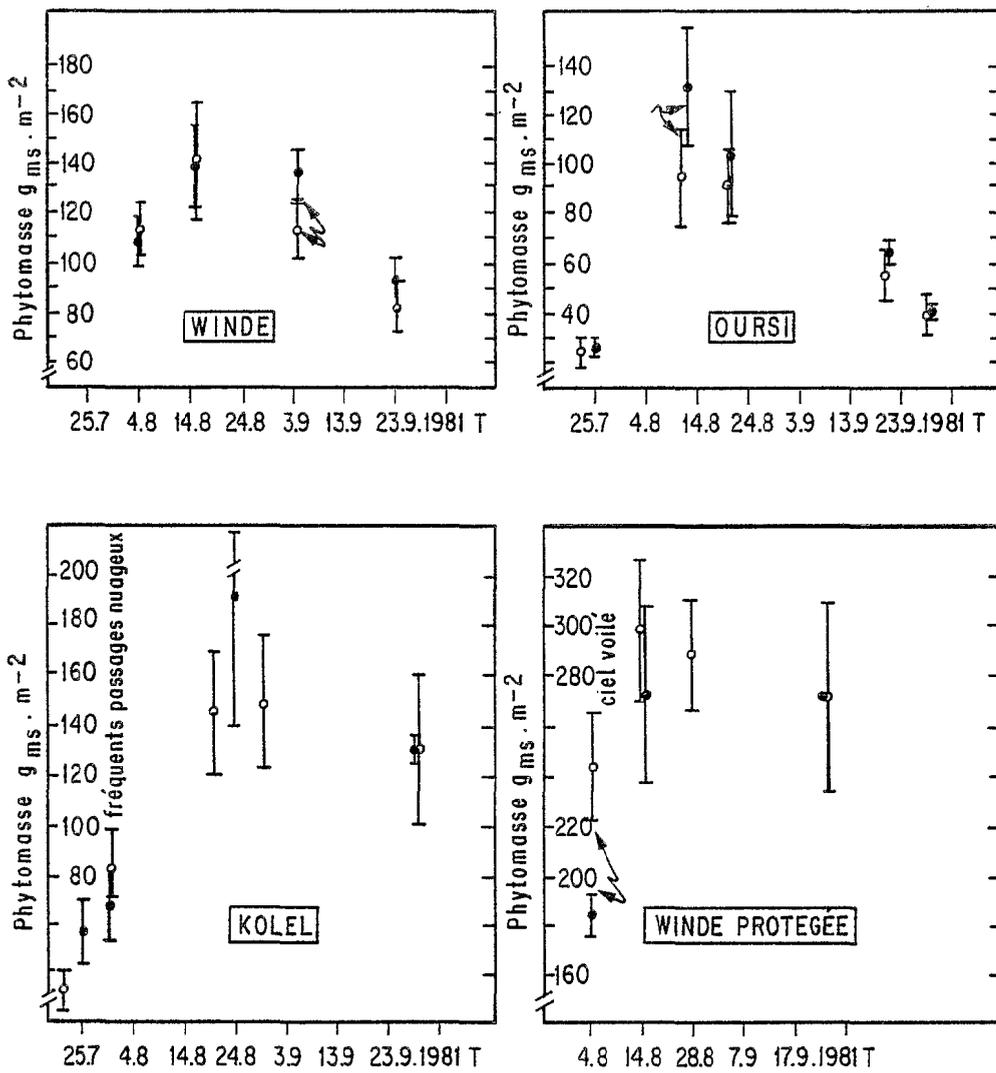


Fig. 20 - Comparaison des mesures de phytomasse par les méthodes de la récolte (O) et radiométrique (●).
 → différence entre moyennes significative (p = 0,05).

significativement différentes. Les valeurs soulignent que les résultats obtenus par mesures directes et mesures radiométriques sont semblables dans près de 90 % des cas si l'on excepte celle du 4.8.81 pour la station de WINDE PROTEGEE et qui s'explique par des perturbations atmosphériques. Les précisions sur les moyennes (IC/X en %) sont comparables (7 à 25 % suivant l'hétérogénéité des groupements) et parfois meilleures avec la détermination radiométrique. Il faut cependant reconnaître que les valeurs correspondant à la mesure directe représentent la somme de 2 facteurs, ce qui augmente l'erreur.

Notons aussi que les valeurs obtenues à la fin du cycle (fin septembre) restent comparables malgré un certain défaut en pigments chlorophylliens. Selon PEARSON et al. (1976) la méthode n'est applicable que si la végétation contient au moins 30 % de matériel vert. Cette limite se rapproche de celle que nous avons donnée au vu des courbes d'étalonnage en fonction du stade phénologique. Il y a donc là une apparente contradiction qu'il serait nécessaire de préciser par des observations plus poussées sur de même cibles échantillons.

3.3.3 - Conclusions.

La technique de détermination de la phytomasse herbacée épigée basée sur les propriétés du rayonnement solaire réfléchi a été testée sur des végétations spontanées, plurispécifiques sahéliennes, de structure et de composition floristique variées.

Les résultats soulignent en premier lieu la nécessité de tenir compte de la hauteur angulaire du disque solaire au-dessus de l'horizon. De plus, il faut opérer par temps serein, quoique les limites dues aux variations de la lumière incidente puissent être levées en utilisant des valeurs relatives à une cible-référence (JENSEN, 1980 ; TUCKER et al., 1980). Ces conditions doivent être un préalable à l'emploi de la méthode, et les résultats médiocres de WALLER et al., (1981), ne sont pas étonnants puisque obtenus dans les conditions d'expérimentation les plus défavorables à l'utilisation de la technique, c'est-à-dire sans tenir compte : du cycle phénologique, de la hauteur du soleil et des situations atmosphériques.

La dispersion assez forte des valeurs observées lors de l'établissement des courbes d'étalonnage est à relier non seulement à la nature hétérogène de la végétation sahélienne (plurispécificité, architecture variée, état de surface du sol différent) mais encore au choix de la méthode d'échantillonnage. En effet, et en prévision de l'application de la méthode à l'évaluation de la phytomasse sur des étendues assez larges (plusieurs dizaines d'hectares), nous avons préféré couvrir la gamme de phytomasse en multipliant les cibles pour intégrer le maximum de variabilité. La défoliation successive d'une cible unique aurait sans nul doute réduit cette dispersion, mais la courbe d'étalonnage ainsi obtenue aurait été difficilement utilisable.

Pour le groupement protégé de Winde, dominé par *Aechynomene indica*, la dispersion est telle que l'utilisation de la méthode est hautement critiquable. Ceci résulte du fait que les différentes strates de végétation ne participent pas également à la réflexion du rayonnement solaire à cause de l'architecture de l'espèce dominante (hauteur élevée, plagiotropie des rameaux).

Malgré cette dispersion, les résultats permettent d'exprimer la phytomasse herbacée en fonction du rapport des signaux photoélectriques obtenus dans les domaines spectraux proche infrarouge-rouge par une relation linéaire. Les liaisons sont hautement significatives et l'on observe, au moment du maximum de phytomasse, que les variations du rapport R expliquent en moyenne 70 % de la variabilité de la phytomasse herbacée. Il n'est statistiquement pas possible de confondre les équations relatives à chaque type de végétation, chacun manifestant des caractéristiques propres liées aux propriétés optiques des espèces, à l'architecture du feuillage et à l'état de surface du sol.

L'importance de la phénologie a par ailleurs été soulignée, ce qui confirme les observations de THALEN et al. (1980). En effet, les modifications du couvert liées à l'apparition des fleurs et à la diminution de la proportion des organes chlorophylliens agissent sur les paramètres, de sorte qu'il est nécessaire d'étalonner pour les différents stades phénologiques. Le rapport de luminance décroît quand la dégénérescence s'installe.

En attendant d'avoir des informations complémentaires, il est prudent de ne pas utiliser la méthode, lorsque la quantité d'organes photosynthétiques est inférieure à 30-40 %, en raison de la faible sélection spectrale. C'est aussi dans ce sens que vont les conclusions de KOUDA (1981) qui utilise les indices de végétation pour l'estimation des phytomasses herbacées.

La méthode radiométrique est donc applicable à la végétation spontanée plurispécifique sahélienne, à condition de satisfaire aux exigences suivantes :

- opérer par temps serein, normaliser les valeurs en fonction de la hauteur du soleil ou opérer pendant la période correspondant au pallier, étalonner préalablement l'appareil.

La rapidité du procédé permet d'étendre les mesures sur de plus amples surfaces. En effet, en considérant qu'une mesure radiométrique demande une demi-minute et la coupe de 0,25 m² de végétation 5mm, l'étalonnage de l'appareil pour un groupement nécessite 2h45mn (30 points). L'application de cet étalonnage à 5 sites du même groupement demande 1h15mn alors qu'il faudrait 15h pour avoir le même résultat par la méthode de la récolte, si l'on ne tient pas compte du temps nécessaire aux manipulations de séchage des échantillons. La possibilité d'accroissement de l'effectif de l'échantillonnage qui en résulte permet d'augmenter la précision des mesures de phytomasse. C'est de plus un précieux relais dans l'utilisation des images SPOT pour la détermination de la phytomasse et la régionalisation des observations (DE WISPELAERE et al., 1983).

4 - PHYTOMASSE HYPOGEE.

De par leur fonction d'absorption et de transport de l'eau et des éléments minéraux vers les parties aériennes et leur effet dans l'évolution des propriétés du sol (structure, teneur en matière organique...), le système racinaire joue un rôle important dans l'évolution des systèmes écologiques.

La détermination de la production totale, la définition de la tranche de sol exploitée par les racines pour l'étude du bilan hydrique nous ont en outre incités à mener une étude spécifique sur les systèmes racinaires.

Plus encore que pour la production épigée, les méthodes d'étude de la fraction hypogée en milieu sahélien sont à leurs premiers balbutiements. C'est pourquoi nous avons été amenés à proposer une méthodologie adaptée à l'estimation de la phytomasse racinaire de la végétation sahélienne et à la détermination de la distribution des racines dans le sol.

4.1 - Méthodes utilisées, choix.

Les diverses méthodes d'étude de l'enracinement décrites par de nombreux auteurs ont été rassemblées dans l'ouvrage de BOHM (1979). Elles varient suivant la finalité de l'étude (étude descriptive ou étude quantitative), la nature du sol (dureté, texture) et les espèces végétales constituant la végétation (espèces ligneuses, herbacées perennes ou annuelles, absence ou présence de pivot, végétation abondante ou clairsemée...).

Parmi les méthodes descriptives, l'étude du profil cultural de HENIN et al. (1969) consiste à mettre en évidence les caractéristiques physiques des diverses couches de terrain et à examiner la façon dont elles sont exploitées par les racines. C'est une méthode simple mais elle présente des inconvénients :

- la destruction partielle du site d'étude exclut de nombreuses répétitions ;

- c'est une méthode qualitative qui ne permet pas de mettre en évidence des différences minimes pouvant entraîner des conséquences importantes au niveau de la réaction des plantes (CHOPART et NICOU 1976).

Venant en complément de l'étude du profil cultural, la méthode des profils racinaires décrite par SCHUURMAN et GOEDEWAGEN (1971) a pour but

d'apprécier le développement des racines non plus sur un plan, mais sur un certain volume de sol. Elle a l'avantage de donner une image très nette de l'enracinement de la plante. Elle offre les mêmes inconvénients que l'étude du profil cultural avec en plus des difficultés de manipulation (panneau encombrant et lourd pouvant atteindre jusqu'à 200 kg).

Les méthodes quantitatives ont pour objet la détermination d'un poids de racines par unité de volume ou poids de sol. Deux possibilités sont offertes pour atteindre cet objectif : le prélèvement de blocs de sol (monolithes) et la méthode des carottages.

La première méthode consiste à découper des blocs parallélépipédiques ou cylindriques (KREUTZER 1968) de dimensions variables. Ces blocs peuvent être de petites tailles (CESAR 1971 : 20 x 20 x 20 cm, 40 x 40 x 20 cm) ou de plus grande taille (LIETH 1968, 0,5 à 1 m³). Ces prélèvements sont destructifs, longs (et donc coûteux) et il est difficile de prélever un nombre élevé de blocs nécessaire à l'obtention d'une précision suffisante.

La méthode des carottages est la plus couramment utilisée dans les recherches écologiques sur les systèmes racinaires (BOHM 1979). Les prélèvements sont effectués au moyen de sonde dont les types sont très nombreux et plus ou moins complexes. Le carottage peut s'effectuer en enfonçant la sonde horizontalement dans les parois d'une fosse préalablement creusée, ou verticalement à partir de la surface du sol.

Bien que détruisant le site d'étude, le premier procédé présente l'avantage de permettre une observation rapide du profil avant de délimiter les horizons à prélever (PICARD 1969, CHOPART et NICOU 1976). Le deuxième procédé perturbe peu le milieu et permet d'obtenir une précision identique à celle des blocs en un temps nettement plus court (CESAR et MENAUT 1974). Il est donc raisonnablement rapide. Par contre il devient difficilement réalisable pour des sols très durs (CESAR 1971, CESAR et MENAUT 1974). De plus il semble moins performant dans le cas de systèmes racinaires peu denses (WALLACE et al. 1974, CHOPART et NICOU 1976).

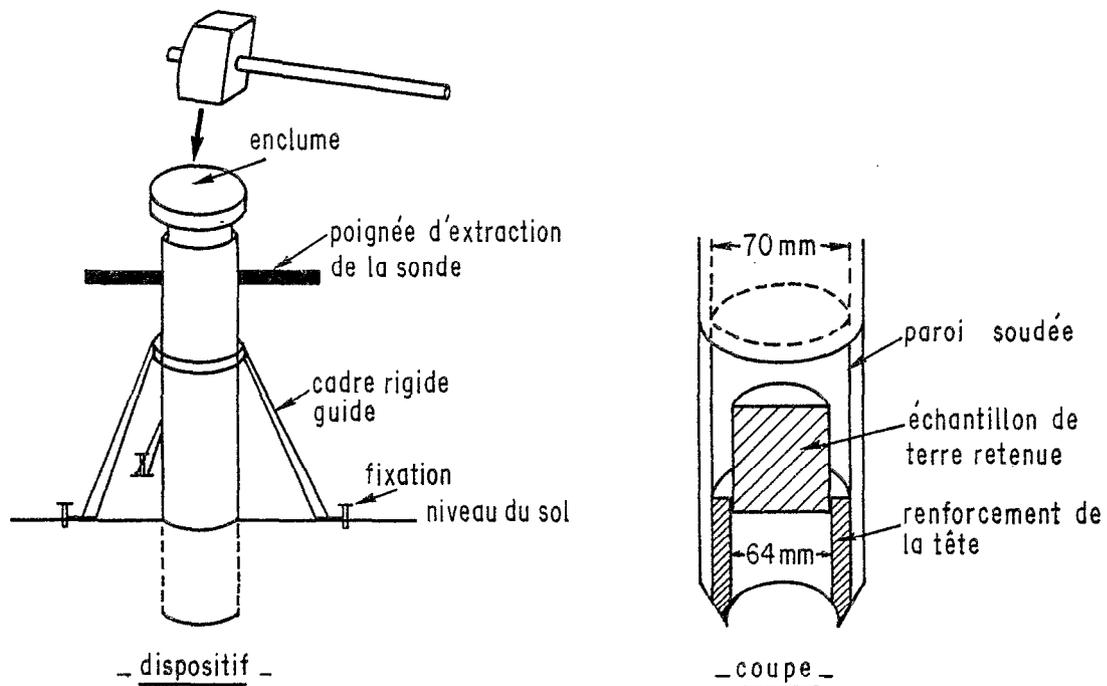


Fig. 21 - Dispositif de prélèvement pour l'étude de l'enracinement.

L'objectif de notre travail étant d'estimer la phytomasse racinaire et sa distribution, notre choix a porté sur une méthode quantitative. Malgré la présence de sols parfois durs et une végétation discontinue et clairsemée dans certaines unités étudiées, la méthode des sondages verticaux a été retenue en raison notamment de sa rapidité d'exécution (et donc du coût) et de la possibilité de multiplier l'échantillonnage et donc d'améliorer la précision des mesures. De plus elle autorise la préservation du site de prélèvement du fait de son caractère relativement peu destructif.

4.2 - Matériel et méthodes.

4.2.1 - La sonde.

L'appareillage utilisé (fig. 21) est inspiré de celui de SCHURMAN et GOEDEWAGEN (1971). Les sondes sont fabriquées dans un tube d'acier de 6 mm d'épaisseur et de 70 mm de diamètre intérieur. La tête de sonde est renforcée par une bague intérieure en laiton de 3 mm d'épaisseur. Finalement le diamètre intérieur de la sonde est de 64 mm, ce qui est nettement supérieur à la limite de 40 mm fixée par SCHURMAN et GOEDEWAGEN (op. cit.) en dessous de laquelle de trop grandes forces de frottements entre échantillon et bords de sonde s'établissent. Le renforcement de la tête de la sonde constitue en outre un dispositif qui, tout en diminuant les frottements avec les parois, permet de retenir la carotte de terre dans la sonde au moment de son extraction (fig. 21).

4.2.2 - Unités de végétation étudiées.

L'étude méthodologique a été menée sur les mêmes unités que celles ayant servi à la détermination de la phytomasse épigée (§ 321), c'est-à-dire Ams, Spt, Sgl selon la terminologie de TOUTAIN (1976). Au cours de l'année 1978, époque à laquelle s'est déroulée cette étude, les espèces dominantes de ces unités ont été les suivantes :

- pour Ams : *Cenchrus biflorus*, *Zornia glochidiata*, *Heliotropium strigosum*...
- pour Spt : *Panicum laetum*
- pour Sgl : *Schoenefeldia gracilis*

4.2.3 - Echantillonnage et traitements des échantillons.

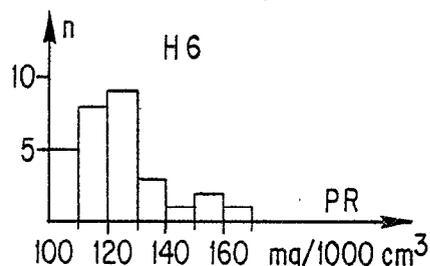
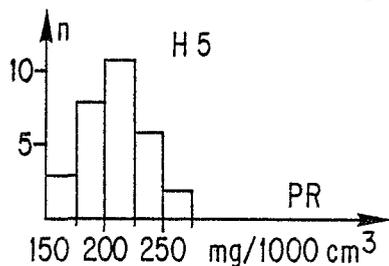
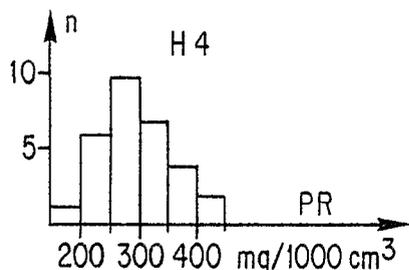
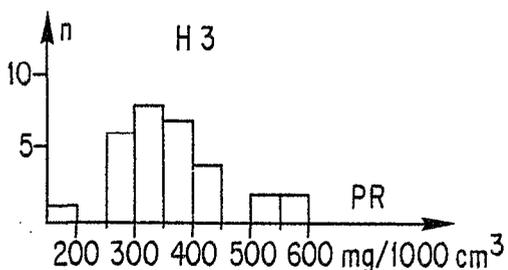
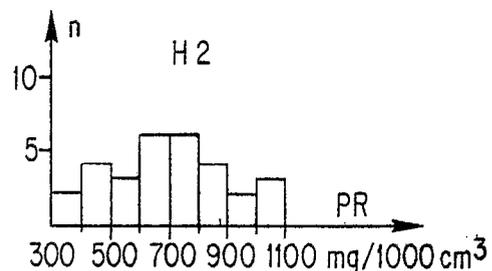
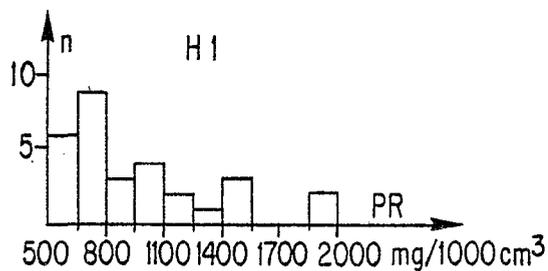
Dans une unité de végétation physionomiquement homogène, les échantillons espacés de 50 cm sont prélevés.

Les horizons suivants ont été retenus : 0 à - 7,5 cm ; 7,5 - 15 cm ; 15 - 30 cm ; 30 - 45 cm ; 45 - 65 cm ; 65 - 100 cm. Pour les deux premiers horizons, un échantillon est constitué par deux prélèvements. Pour les quatre autres horizons, un échantillon correspond à un prélèvement.

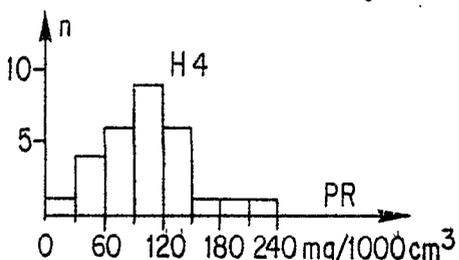
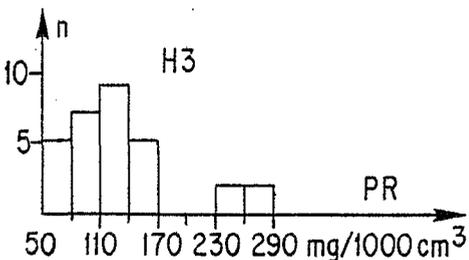
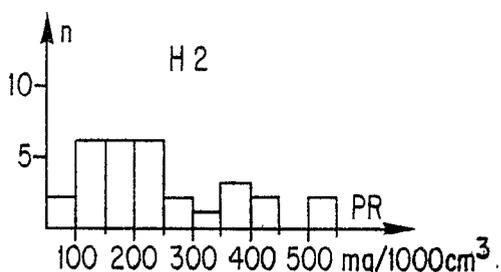
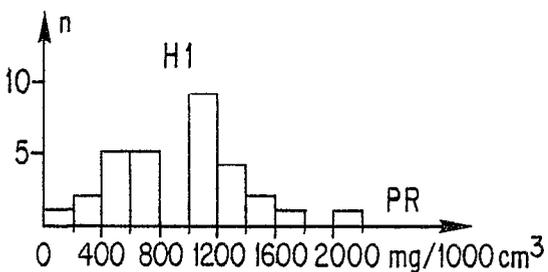
Le nombre d'échantillon pris dans chaque unité étant le premier facteur déterminant de la variabilité (CANODE et al. 1977), l'effectif de l'échantillon est porté à 20 (Sgl) et 30 (Ams, Spt) afin de tester la méthodologie et de déterminer l'effectif à partir duquel la précision des mesures est jugée satisfaisante.

Les échantillons (terre-racines) sont séchés au soleil pendant quelques jours afin de permettre une meilleure conservation avant leur traitement.

Le premier traitement relatif aux échantillons provenant de sols sableux (Ams) consiste en un tamisage à sec à l'aide de deux tamis de 1 mm et 0,5 mm (16 et 14 mesh). Après élimination des impuretés (sables, cailloux, matière organique autre que racinaire...) les racines retenues sont rincées à l'eau et séchées à l'étuve à 105°C pendant 13 heures, puis pesées. Lorsque le taux d'argile des échantillons est élevé (supérieur à 15 % : Sgl, Spt), les échantillons sont trempés dans un dispersant (métaphosphate de sodium ou chlorure de sodium à 5 %). Le déterrage s'effectue par aspersion au jet d'eau avec récupération des racines sur les deux tamis de 1 mm et de 0,5 mm. Les opérations de tri, séchage et pesée sont ensuite réalisées.



A_Groupement à *Cenchrus biflorus* (Oursi)



B_Groupement à *Panicum laetum* (Windé)

Fig. 22 - Histogrammes de distribution de la phytomasse hypogée
 n : effectif ; Pr : phytomasse racinaire.

4.2.4 - Erreur relative sur les mesures.

Il est nécessaire de déterminer la précision obtenue sur les volumes de terre puisque les résultats sont exprimés en fonction de ceux-ci. On peut estimer le diamètre de la sonde à 0,1 cm et la hauteur de la carotte de terre à 0,5 cm près.

Pour les deux premières tranches de sol (deux prélèvements par échantillon), le volume prélevé est à 10 % près de 482 cm^3 . Pour les deux horizons suivants (un seul prélèvement par échantillon), le volume est de $482 \text{ cm}^3 \pm 33,7$. Les horizons "45 - 65 cm" et "65 - 100 cm" représentent respectivement des volumes de $643 \text{ cm}^3 \pm 38,5$ et $1126 \text{ cm}^3 \pm 45$. Cette imprécision inévitable sur les volumes prélevés est à prendre en compte lors de l'examen des résultats.

4.3 - Résultats.

4.3.1 - Loi de distribution de la phytomasse racinaire.

Pour chaque horizon les répartitions des fréquences par classe de phytomasse pour les groupements Ams et Spt sont représentées sur la figure 22 (A et B).

L'examen des histogrammes indique que les phytomasses racinaires semblent se distribuer suivant une loi normale dans la majorité des cas (fig. 22 A horizons H_2 , H_4 , H_5 ; fig. 22 B horizons H_4 , H_3 , H_1). Le doute subsistant pour les autres cas, la normalité de la distribution a été vérifiée par un test du chi carré. Les résultats montrent qu'au seuil de probabilité $p = 0,05$ les répartitions observées ne diffèrent pas significativement d'une distribution normale. Les données ont donc été traitées suivant une loi normale.

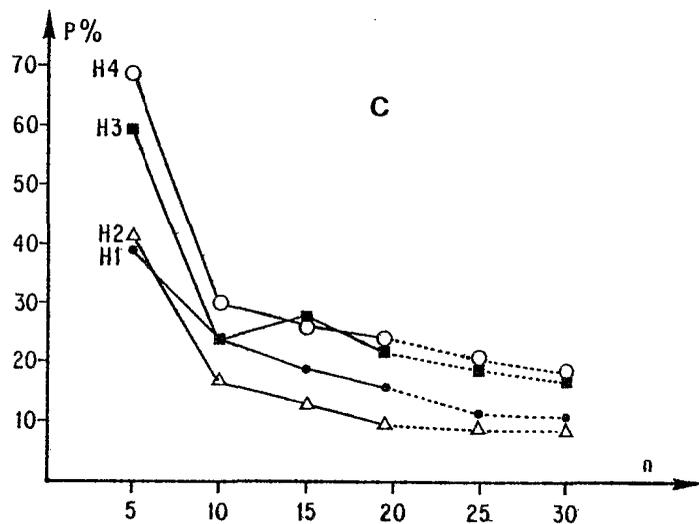
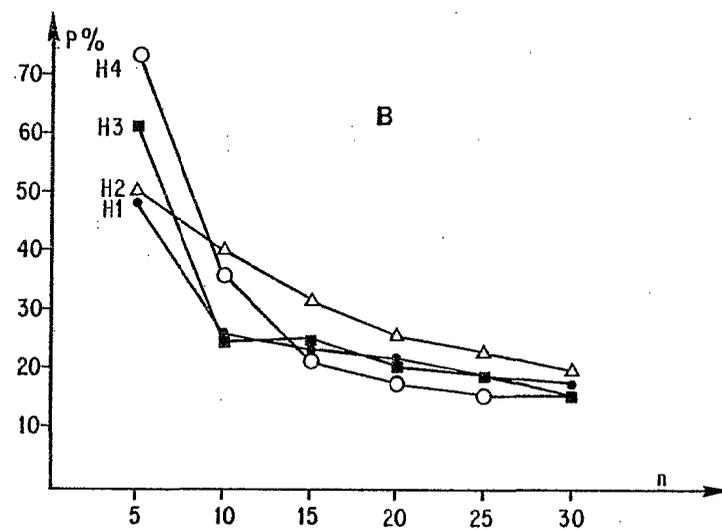
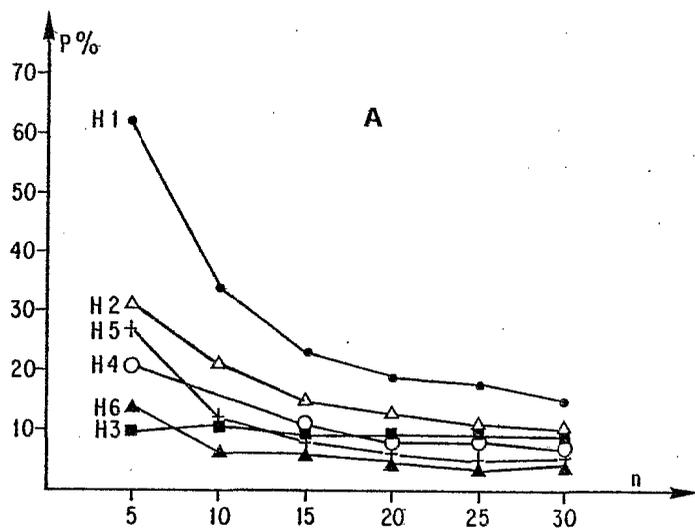


Fig. 23 - Evolution de la précision (P %) en fonction de l'effectif de l'échantillonnage (n).
 A : Groupement à *Cenchrus biflorus* (Oursi)
 B : Groupement à *Panicum laetum* (Winde)
 C : Groupement à *Schoenefeldia gracilis* (Kouni)

4.3.2 - Précision sur la moyenne.

Les variations de la précision en fonction de l'effectif de l'échantillonnage pour les différents horizons sont représentées sur la fig. 23.

Dans l'ensemble les précisions sont meilleures sur l'unité de végétation établie sur sable. Celles-ci sont en effet généralement inférieures à 20 % sur sols légers et supérieures ou voisines de 20 % sur les sols lourds. Pour le maximum de prélèvement ($n = 30$) la précision obtenue sur la dune (fig. 23 A) varie de 5 à 15 % contre 16 à 20 % pour le groupement à *Panicum laetum* (fig. 23 B) et 8 à 23 % pour le groupement à *Schoenefeldia gracilis* (fig. 23 C). Notons que ce dernier résultat est une extrapolation des données relatives à l'effectif $n = 19$. Ce caractère serait dû à une phytomasse plus élevée en milieu sableux, ce qui diminuerait la variabilité.

Sur le cordon dunaire la précision est par ailleurs meilleure pour les horizons inférieurs contrairement à ce qui est observé pour les groupements établis sur les sols lourds. Ce caractère serait à mettre en relation avec de plus grandes fluctuations des teneurs en eau de l'horizon superficiel sur sable. Il en résulte une plus grande hétérogénéité des conditions de développement du système racinaire.

Les graphiques de la fig. 23 permettent aussi de constater qu'en dessous de 10 prélèvements la précision des mesures diminue fortement. Elle peut atteindre plus de 70 % pour 5 répétitions. A partir d'un effectif de 15 échantillons les précisions deviennent satisfaisantes. Elles sont inférieures à 30 % et souvent proches de 15 - 20 %. Le gain de précision résultant de l'augmentation de l'effectif au-delà de 15 est généralement très faible par rapport au surcroît de travail nécessaire.

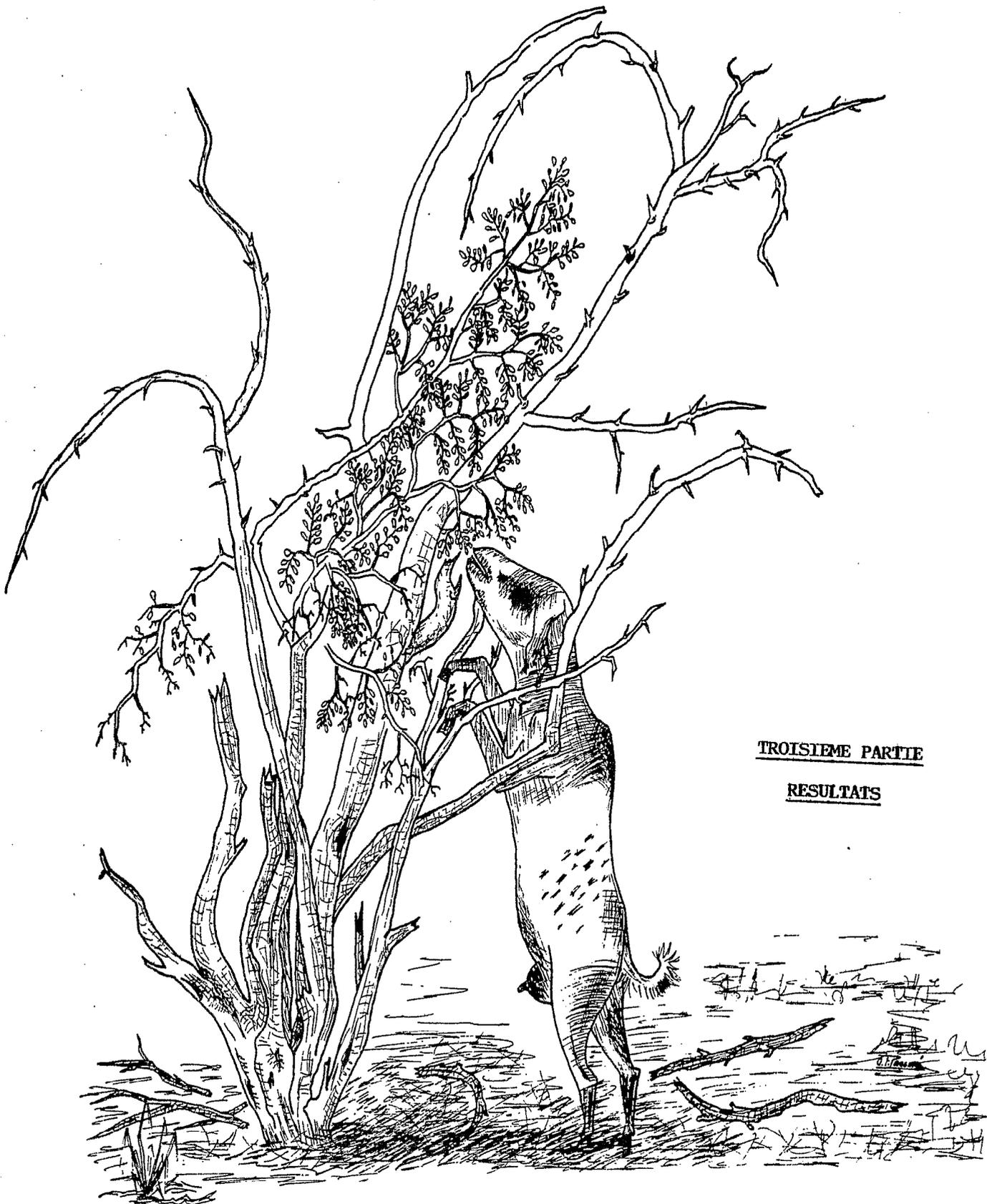
4.3.3 - Conclusions.

Compte-tenu des objectifs assignés à l'étude des systèmes racinaires, une méthode d'étude quantitative a été retenue. La technique des sondages verticaux s'avère satisfaisante malgré les difficultés de pénétration dans les sols lourds (dépression, glacis...). L'évolution de la

précision sur la moyenne en fonction de l'effectif de l'échantillonnage met en évidence la nécessité d'observer 10 à 15 répétitions par horizon, si l'on veut obtenir des précisions comparables à celles obtenues pour la phytomasse épigée. Par contre, au-delà de 15 répétitions l'amélioration de la précision est faible.

Compte-tenu de ces résultats, du temps et du coût des prélèvements, des effectifs de 15 à 30 échantillons ont été utilisés pour déterminer les profils et estimer les productions racinaires. Par contre cinq échantillons ont été jugés nécessaires pour les aspects qualitatifs comme l'évolution de la phytomasse au cours de la saison sèche.

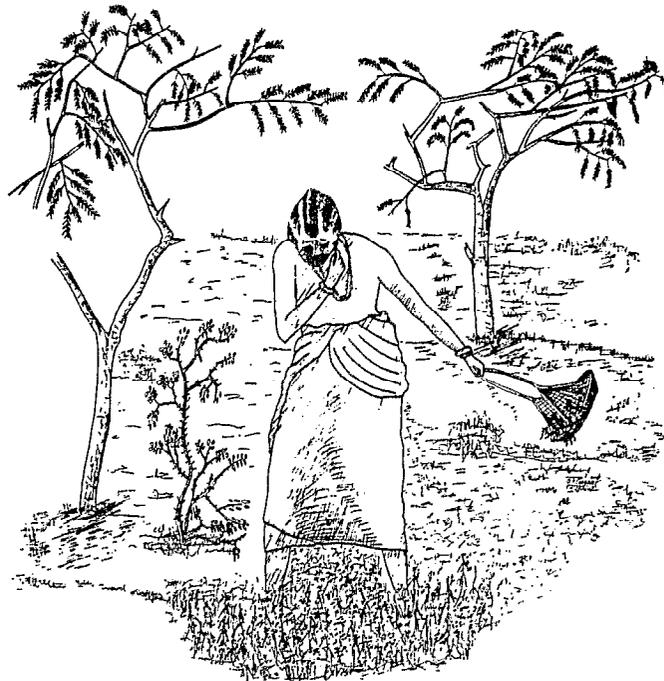




TROISIEME PARTIE

RESULTATS

CHAPITRE I



LES UNITES ETUDIEES :

PLUVIOMETRIE, SUBSTRAT EDAPHIQUE, STRUCTURE DE LA VEGETATION

Sous de mêmes conditions climatiques les variations de la nature du sol rendent très polymorphe la végétation qui apparaît physionomiquement homogène. C'est cette grande diversité et le souci de rendre comparable nos résultats avec d'autres études régionales qui nous ont conduit à caractériser précisément les unités sur lesquelles porteront les observations à grande échelle. Elles serviront de plus à préciser les principaux traits de la structure de la végétation de cette unité sahélienne du Burkina Faso.

Les critères de choix de ces unités ont été donnés dans la partie méthodologie (§ 11 deuxième partie). Rappelons que six unités ont été retenues pour réunir le maximum de variabilité écologique. Ce sont (tableau

7) : Oursi (Ams), Kolel (Cep), Gountouré (Ase), Kouni (Sgl), Bas Kolel (Sgr), Windé (Spt). Nous verrons principalement ci-après, les caractéristiques pluviométriques, édaphiques et celles liées à la végétation.

1 - CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES.

1.1 - Méthodes.

La variabilité de la pluviométrie évoquée dans l'étude climatologique (§ 312 partie I) se retrouve aussi à l'échelle microclimatique. Elle porte non seulement sur la quantité de pluie mais encore sur sa répartition dans le temps. Cette distribution est déterminante pour le bon déroulement du cycle végétatif. L'analyse de la répartition pluviométrique a été réalisée selon la méthode utilisée par GALLE (1985). Cet auteur définit la structure temporelle des pluies par un certain nombre de paramètres statistiques caractéristiques de l'histogramme de répartition des précipitations décennales.

Pour calculer les paramètres il agit comme si chaque classe d'abscisse représentant les décades, avait un nombre d'évènements proportionnel à la hauteur de l'histogramme.

Le repère de base est centré sur la première décade de la mousson, la crête de l'histogramme est repérable par son abscisse (x) dont l'unité est la décade, et son ordonné (y) dont l'unité est égale au nombre total de réalisation (surface de l'histogramme).

Soit $y(x)$, les paramètres décrivant la structure temporelle des pluies sont :

- la moyenne : centre de gravité de l'histogramme.

$$m = \sum_{x=0}^{x=n} y(x)$$

- l'écart type

$$s = \left(\sum_{x=0}^{x=n} (y(x) - m)^2 \right)^{1/2}$$

- le coefficient d'assymétrie

$$Cs = \frac{\left(\sum_{x=0}^{x=n} (y(x) - m)^3 \right)}{\left(\sum_{x=0}^{x=n} (y(x) - m)^2 \right)^{3/2}}$$

Il est d'autant plus bas que la pluviométrie est déficitaire en début de saison. C'est le cas notamment de la pluviométrie des stations de Gountouré et Windé de l'année 1978 qui ont respectivement un Cs de -0,86 et -1,32 (tableau 15 et fig. 24).

- le coefficient d'aplatissement :

$$Ck = \frac{\left(\sum_{x=0}^{x=n} (y(x) - m)^4 \right)}{\left(\sum_{x=0}^{x=n} (y(x) - m)^2 \right)^2}$$

Il est d'autant faible que la pluviométrie est régulièrement répartie. C'est le cas par exemple de la pluviométrie de l'année 1977 à Windé (Ck = 2,19) par opposition à celle de l'année 1978 (Ck = 7,07).

1.2 - Résultats.

L'examen des totaux pluviométriques annuels portés sur la figure 24 confirme la variabilité interannuelle. A titre d'exemple la station d'Oursi en 1981 accuse un déficit de 50 % par rapport à l'année 1977.

La variabilité spatiale apparaît aussi nettement. Un écart de 170 mm s'observe par exemple entre la pluviométrie enregistrée en 1981 à Oursi et à Kolel. La variabilité spatiale se situe aussi au niveau de la répartition pluviométrique. Ainsi la distribution des précipitations à Oursi en 1978 (Cs : -0,43 et Ck : 2,73) diffère nettement de celle de Windé (Cs : -1,32 ; Ck : 7,07) pour la même année.

Les histogrammes de la figure 24 et les valeurs des paramètres caractéristiques portées dans le tableau 15 illustrent nettement la

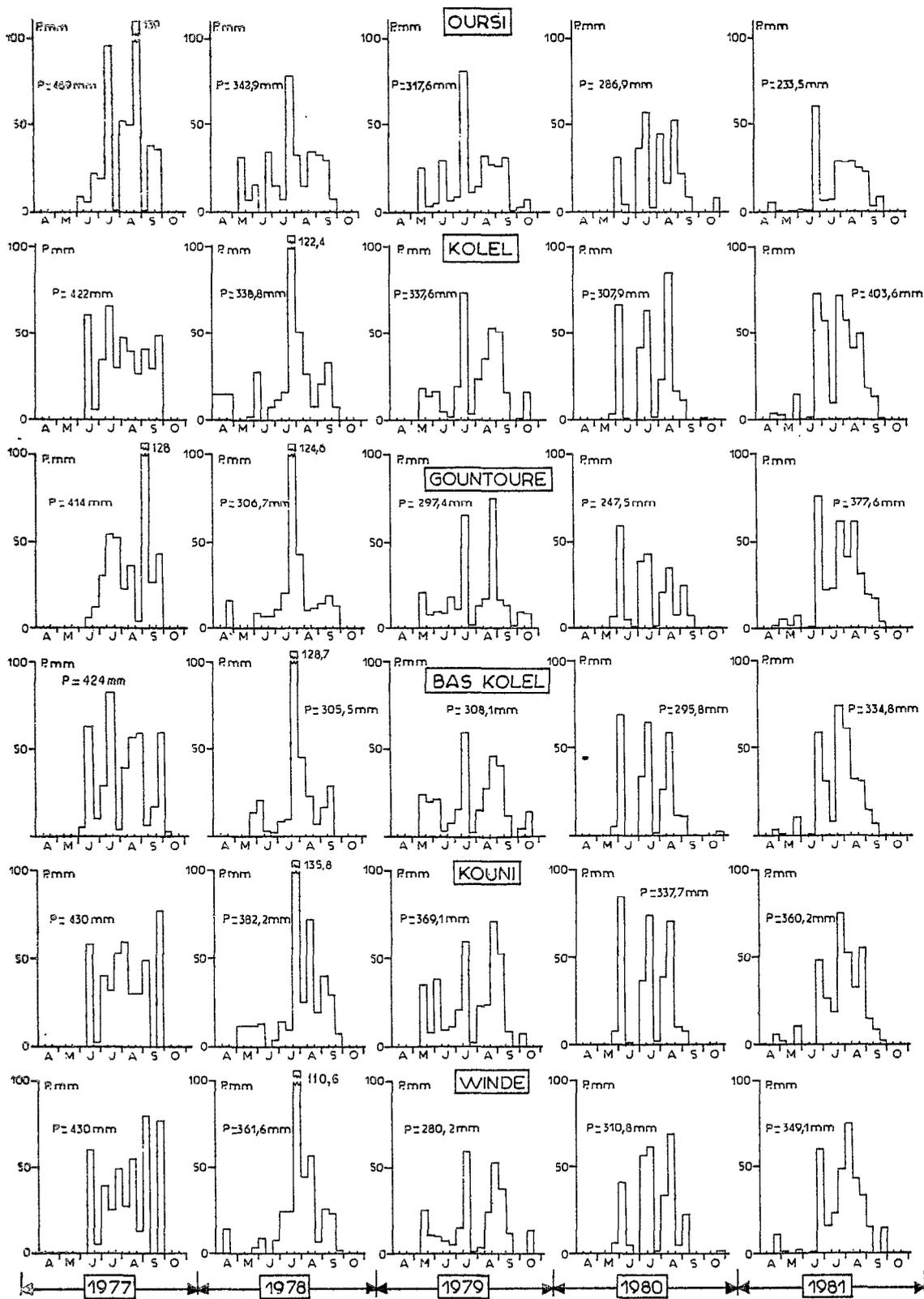


Fig. 24 - Précipitations décadaires au niveau des différentes stations (1977-1981).

variabilité interannuelle de la répartition pluviométrique. Les cinq années analysées se distinguent bien les unes par rapport aux autres.

En 1977, le total pluviométrique annuel de 414 à 469 mm selon les stations excède de 12,5 % à 27,5 % la moyenne interannuelle établie à la station climatologique. La faiblesse des valeurs de Cs et Ck caractérise une pluviométrie également répartie au cours du temps. Climatiquement, c'est la meilleure année.

L'année 1978 s'en distingue très nettement. C'est l'année où les Ck les plus élevés sont enregistrés, ce qui indique une assez grande hétérogénéité de la distribution décadaire des pluies. Après un début incertain, les pluies se concentrent en fin Juillet et au début du mois d'Août.

L'année 1979 se caractérise par une saison des pluies plutôt précoce (2^e décade de Mai) et un sévère déficit pluviométrique dans la troisième décade du mois de Juillet. Les Cs sont peu élevés car les pluies se répartissent à peu près équitablement de part et d'autre du centre de gravité se situant selon les stations considérées entre le 13 juillet et le 23 juillet. Les Ck sont aussi peu élevés car dans les deux ensembles, le niveau moyen des pluies est comparable.

Le cycle pluviométrique de l'année 1980 est précoce ; de plus il est marqué par deux déficits situés dans les troisièmes décades des mois de Juin et de Juillet.

La faiblesse des précipitations marque le début de la saison 1981. Ce n'est qu'à la troisième décade de Juin que la saison des pluies peut être considéré comme réellement établie. Un déficit pluviométrique se situe au cours de la deuxième décade de Juillet.

Cette étude succincte des caractéristiques pluviométriques au niveau stationnel confirme les variabilités interannuelle et spatiale observées à l'échelle régionale.

Elle montre par ailleurs l'intérêt de suivre les variations pluviométriques au niveau de la station si l'on veut approcher réellement les relations eau-végétation. Il apparaît enfin que les années étudiées représentent une gamme assez variée de cycles pluviométriques.

Stations	Paramètres	1977	1978	1979	1980	1981
OURSI (Ams)	moyenne : m	22,0	20,5	20,6	21,0	20,7
	écart type : s	2,7	3,6	3,7	3,1	3,2
	assymétrie : Cs	- 0,28	- 0,43	- 0,17	- 0,16	- 0,49
	aplatissement : Ck	2,85	2,73	2,81	3,58	3,77
KOLEL (Cep)	m	21,5	21,1	21,3	19,8	20,3
	s	3,2	2,6	3,7	2,9	2,7
	Cs	0,02	- 0,20	- 0,38	- 0,28	- 0,40
	Ck	2,22	3,80	3,17	2,24	3,8
GOUNTOURE (Ase)	m	22,5	20,6	20,9	19,5	20,6
	s	2,7	3,2	3,8	3,2	2,8
	Cs	- 0,25	- 0,86	- 0,23	- 0,09	- 0,41
	Ck	2,1	5,7	2,8	2,2	3,7
BAS KOLEL (Sgr)	m	21,4	21,1	20,7	19,5	20,4
	s	3,3	2,4	4,1	3,0	2,6
	Cs	0,07	- 0,21	- 0,21	- 0,09	- 0,58
	Ck	2,3	4,29	2,57	2,97	4,27
KOUNI (Sgl)	m	21,7	21,7	20,3	19,4	20,6
	s	3,2	2,3	3,9	2,9	2,8
	Cs	- 0,02	- 0,22	- 0,32	- 0,19	- 0,81
	Ck	2,31	3,97	2,38	2,09	4,7
WINDE (Spt)	m	21,9	20,7	20,8	20,0	20,6
	s	3,3	3,1	4,0	2,8	2,9
	Cs	- 0,18	- 1,32	- 0,31	- 0,12	- 0,75
	Ck	2,19	7,07	2,72	3,19	5,25

Tableau 15 - Paramètres statistiques des histogrammes des pluies décadaires des différentes stations.*

2 - CARACTERISTIQUES EDAPHIQUES.

Les principales caractéristiques pédologiques des sols des stations d'études établies par LEPRUN (1977) et SICOT (1978) sont résumées sur la figure 25 et le tableau 16.

*Calculs établis d'après un programme aimablement communiqué par P. HUBERT (Ecole des Mines Paris), que nous remercions vivement.

2.1 - Texture.

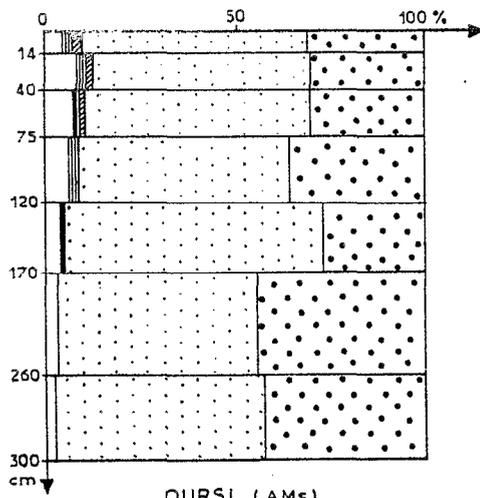
L'analyse granulométrique montre que le sol du piémont de Kolel, de texture sableuse se distingue de celui d'Oursi par un enrichissement progressif en éléments fins en profondeur.

Caractéristiq. pédologiques	OURSI Ams	KOLEL Cep	GOUNTOURE Ase	KOLEL GL. Sgr	KOUNI Sgl	WINDE Spt
.densité cm^3 cm^{-3}	1,6-1,7	1,5-1,6	1,5-2,2*	1,6-1,9	1,5-1,8	1,4-1,6
.porosité to- tale %.....	33,1-36,8	32-35,5	24,5-32,3	19,2-32,7	18,6-31,4	25,5-18,3
.Instabilité struct. Is	0,5	0,3-0,5	3	5,4-5,6	4,9-8	4,4-4,7
.Perméabilité Kcm.h^{-1}	4,7-18	3,2-1,3	0,4-1,2	0,5-1,5	2,1-0,8	-
.Humidité pon- dérale à :						
pF 2,5...	4,5-1,6	2,9-9,6	7,2-16,7	21,6-9,4	18,3-31,4	-
pF 3.....	3,3-0,9	2,0-6,8	5,0-14,2	15,5-6,9	14,0-24,8	17,5-21,2
pF 4,2...	2,9-0,5	1,7-4,4	2,7-10,2	11,1-3,8	4,4-16,4	11,0-13,9
.pH eau 1/2,5	6,2-6,8	6,9-7,6	6,6-7,4	7,5-9,5	7,6-8,7	6,9-8,6
.Bases échang. S meq % sol..	3,3-0,6	2,1-5,7	2,6-9,7	3,9-18,7	18,6-29,6	5,7-18,7
.Cap.éch. tot. T meq % sol..	4,3-1,4	2,3-4,7	4,3-9,3	4,4-18,2	12,8-30,3	13,9-18,8
.Taux saturat. V %.....	33-76	80-100	60-100	88-100	100	38-100
.Mat.org.tot.%	0,2-0,1	0,4-0,3	0,4	0,7-0,3		1,1
.Carbone %...	1,2-0,6	2,4-2	2,1	3,8-1,6		6,3
.Mat. humique tot. C %....	0,4-0,3	0,5-0,8	0,6	1,5-0,5		
.Ac. humi. C %	0,2-0,1	0,3-0,4	0,4	1,3-0,3		
.Ac. fulvi. C %	0,24-0,2	0,2-0,4	0,18	0,21-0,23		
.Taux humifi- cation %.....	31,9-35,9	19,9-40,5	28,4	38,7-29,6		
.Azote %.....	0,14-0,04	0,26-0,20	0,14	0,24-0,1		0,58
. C/N	8,9-16	9,1-10	14,9	15,9-10,1		10,9

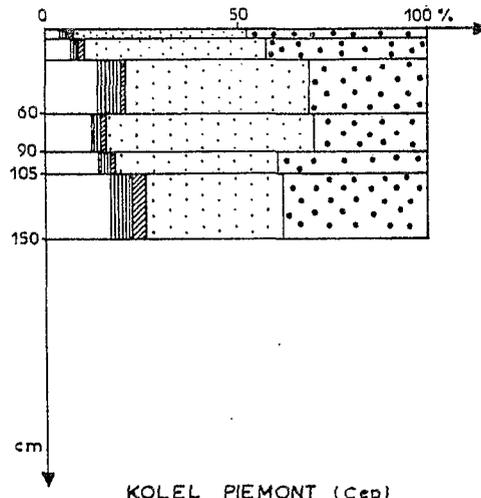
Tableau 16 - Caractéristiques pédologiques des sols des stations étudiées.
données extraites de LEPRUN 1977 SICOT 1978

* roche mère altérée.

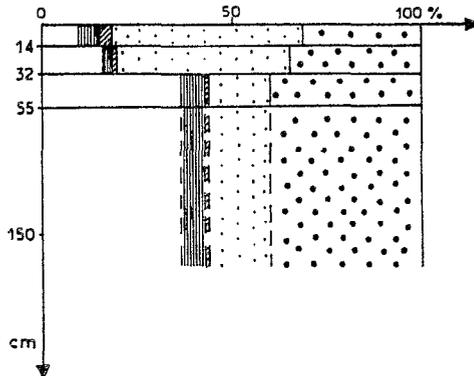
Les sols des stations de Kouni et de Windé ont une texture d'argile sableuse. La nature des argiles différencie cependant ces deux sols. A Kouni, la montmorillonite représente 80 à 90 % du total de la fraction argileuse, tandis qu'à Windé l'argile se partage également entre la kaolinite (47-61 %) et la montmorillonite (31-51 % du total).



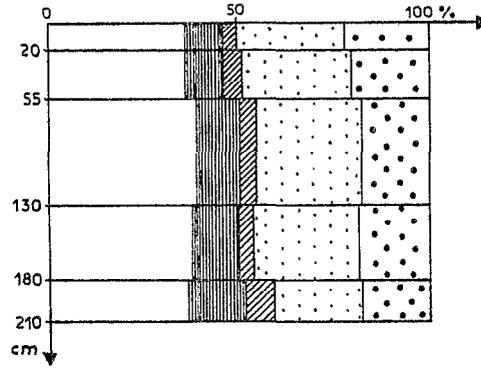
OURSI (AMs)



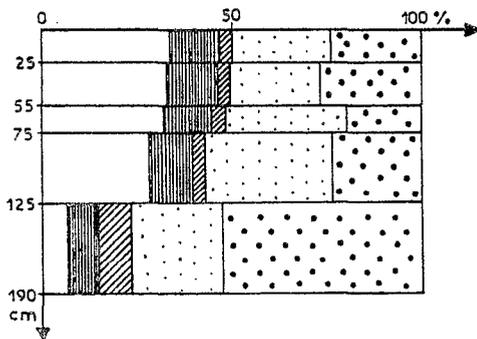
KOLEL PIEMONT (Cep)



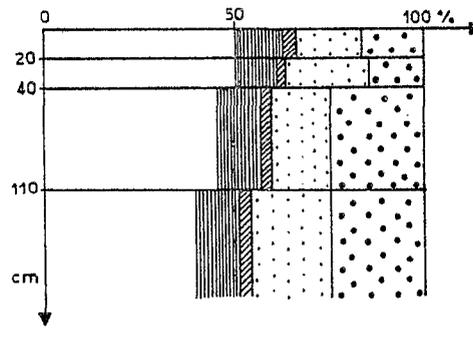
GOUNTOURE (Ase)



KOUNI-KOUNI (Sg1)



KOLEL GLACIS (Sgr)



WINDE-TIULUKI (Spt)

Argile
 Limon fin
 Limon grossier
 Sable fin
 Sable grossier

Fig. 25 - Caractéristiques granulométriques des stations.
(Extrait de SICOT 1978)

Le sol de la station de Gountouré est constitué par un complexe gravillonnaire lié par un ciment sableux en surface, puis d'argile sableuse à partir de 30 cm de profondeur. Le profil du glacis de Kolel présente une texture limono-argilo-sableuse qui fait place à une texture sableuse à partir de 1,30 m de profondeur.

2.2 - Propriétés hydrodynamiques.

Les valeurs de la densité et de la porosité (tableau 16) sont comparables pour les différents substrats. Elles caractérisent des sols très tassés. Les valeurs de l'Is suggèrent que les différents milieux sont très stables. Pour ce qui concerne la perméabilité, le sol d'Oursi se distingue nettement des autres qui ont en général une faible perméabilité.

La texture argileuse des sols de Kouni, Windé et du glacis de Kolel leur confère des potentialités de rétention hydrique élevées. Par contre celle des sols d'Oursi, Kolel et Gountouré est plutôt faible.

En dehors des sables, ces sols constituent de très mauvais supports physiques pour la végétation en raison de leur compacité et de leur imperméabilité qui s'opposent à la circulation de l'eau.

2.3 - Propriétés chimiques.

Le pH est généralement basique à l'exception du sol d'Oursi et de l'horizon de surface du profil de Gountouré. Le complexe absorbant est généralement saturé. Ce caractère est imputable d'une part à l'alcalinité du milieu et d'autre part à la forte proportion de montmorillonite (80 à 90 % du total des argiles) dans la constitution des argiles. La saturation du complexe absorbant est moins prononcée dans deux cas où ces deux critères ne sont pas réunis. Il s'agit d'Oursi où la désaturation est en rapport avec l'acidité, et de Windé où une plus forte proportion de kaolinite associée à un lessivage plus accentué, ramène le taux de saturation à 38 %.

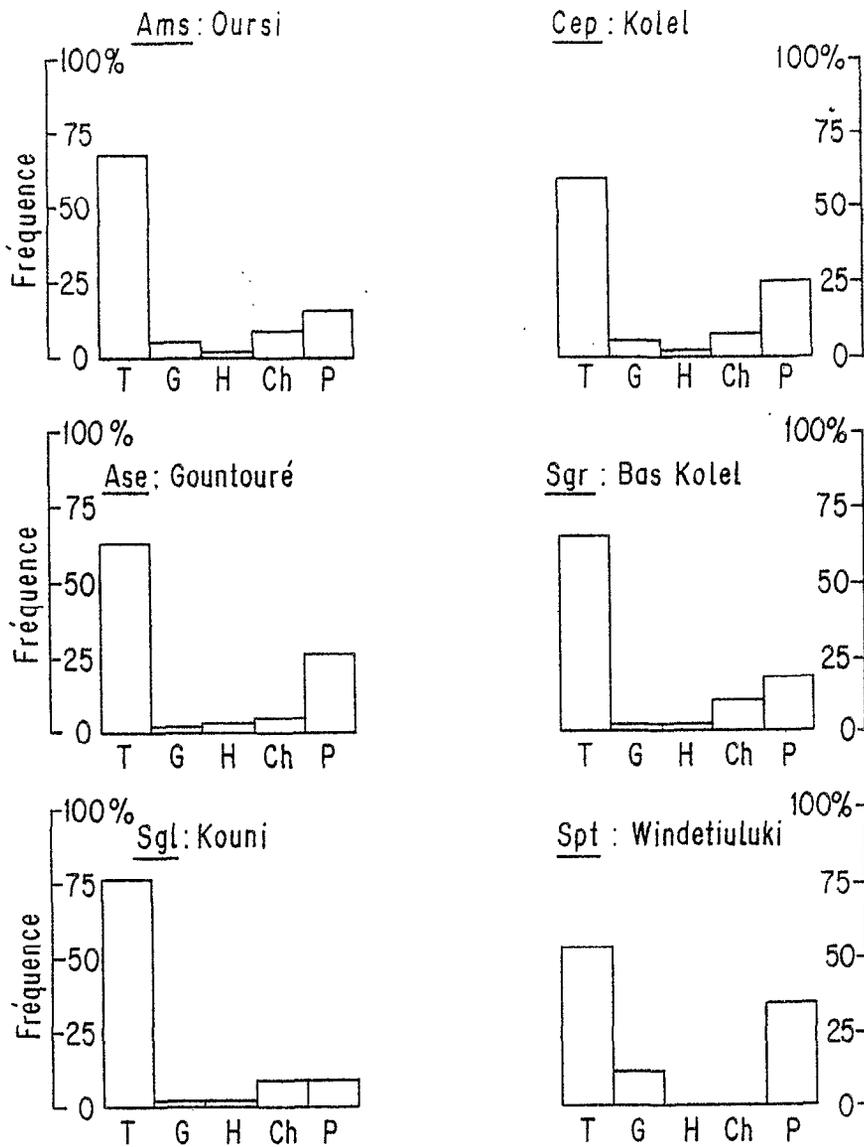


Fig. 26 - Spectres biologiques des différentes unités de végétation

T : Thérophyte, G : Géophyte, H : Hémicryptophyte,
 Ch : Chamaephyte, P : Phanérophyte

2.4 - Matières organiques.

Les teneurs en C et en N sont faibles. Les valeurs du rapport C/N (8 à 16) sont favorables à la transformation accélérée de la matière organique. Cependant les valeurs de la teneur en matière organique, très faibles, montrent que celle-ci ne s'accumule pas. Ce caractère résulterait d'un déséquilibre occasionné par un transfert des produits organiques bruts vers les dépressions (bétail, ruissellement : SICOT 1978).

2.5 - Conclusion.

Les principaux types de sol du bassin versant de la mare d'Oursi sont représentés au niveau des stations étudiées. Ils sont dans l'ensemble bien pourvus en éléments minéraux, carencés en N, très stables sur le plan structural et à l'exception des sols sableux d'assez mauvais supports physiques pour la végétation.

3 - STRUCTURE DE LA VEGETATION.

Bien que strate ligneuse et strate herbacée soient étroitement liées, ces deux éléments du système écologique sont décrits séparément par commodité. Le spectre biologique de l'ensemble des espèces est auparavant donné.

3.1 - Le spectre biologique.

Les spectres biologiques des différentes unités, c'est-à-dire la proportion relative des types biologiques recensés au cours de la saison 1977, sont représentés sur la figure 26. L'examen de ces histogrammes montre que les thérophytes représentent plus de 50 % des espèces et jusqu'à 76 % dans l'unité Sgl (Kouni). Les phanérophytes constituent 10 à 35 % des taxons. Leur importance s'accroît dans les milieux édaphiquement plus humides (Ase, Spt), ce qui est tout à fait comparable à ce que l'on observe lorsque l'humidité atmosphérique augmente (CORNET et POUPON 1978). Les géophytes, les hémicryptophytes et chamaephytes sont dans l'ensemble peu représentés.

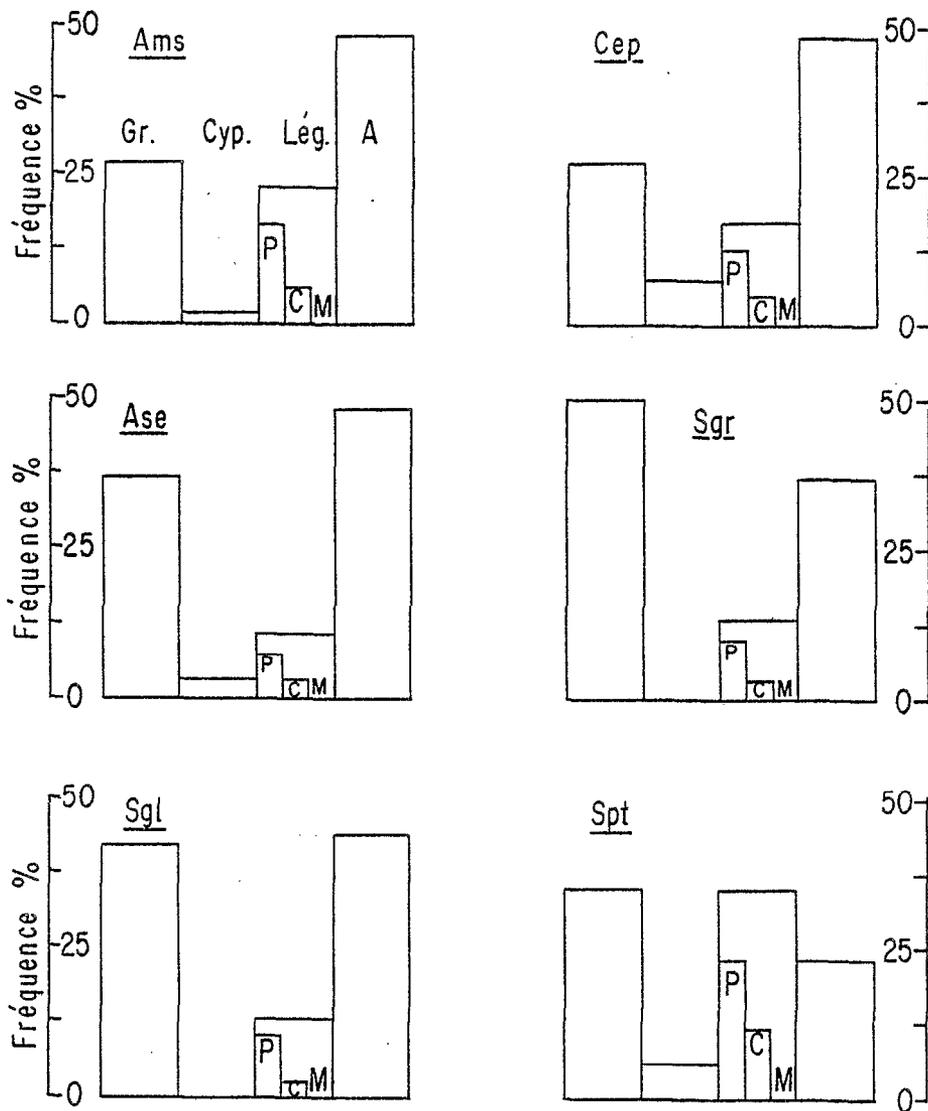


Fig. 27 - Spectres floristiques de la strate herbacée des différentes unités de végétation.

Gr : graminées, Cyp : cypéracées,
 Lég : légumineuses,
 A : autres familles, P : papilionacées,
 C : césalpiniacées, M : mimosacées.

Ces caractères confirment le spectre donné pour l'ensemble des espèces de la région (première partie § 3.3). Ils illustrent par ailleurs l'existence d'une certaine variabilité d'une unité à l'autre.

3.2 - La strate herbacée.

3.2.1 - Spectre floristique et diversité floristique

L'examen des spectres floristiques de la strate herbacée établis sur la base des observations du cycle végétatif de l'année 1977 (fig. 27) montre l'importance des graminées puisqu'elles constituent 25 à 50 % des espèces des différentes unités. Dans les unités établies sur sols lourds, la proportion des graminées est comparable (Sgl) ou supérieure (Spt, Sgr) à celle des diverses familles. Dans les unités des sols légers (Ams, Cep, Ase), elle est jusqu'à deux fois plus faible. Les légumineuses contribuent par leur présence à moins de 13 % de la communauté dans les unités Sgr, Sgl et Ase et à environ 20 % dans Ams et Cep. Elles représentent 35 % des espèces dans l'unité Spt. Au niveau de la famille il apparaît que c'est Ase (Gountouré) qui rassemble la plus grande diversité.

La liste floristique des espèces inventoriées en 1977 dans les différentes unités est donnée en annexe II. Le nombre d'espèces herbacées varie de 18 pour l'unité la plus pauvre (Spt) à 64 pour l'unité la plus riche (Ase, tableau 17).

Paramètres	Unités					
	Ams	Cep	Ase	Sgr	Sgl	Spt
Nbre total espèces herbacées.....	49	39	64	30	36	18
Nbre famille.....	21	21	24	14	18	8
Nbre espèces exclusives.....	12	5	16	0	3	7
Nbre espèces communes.....	6			1		

Tableau 17 - Effectif des espèces herbacées dans les différentes unités. Relevés du cycle 1977.

Six espèces sont communes aux sols sableux ; une seule espèce se retrouve sur les sols lourds (cf. liste en annexe II). Les espèces exclusives à chaque unité sont plus nombreuses sur les sols légers que sur les sols lourds. Les taxons exclusifs à Ams (annexe) sont représentés par des dicotylédones précoces à cycle court (*Limeum viscosum*) ou par des chamaephytes (*Cassia italica*, *Indigofera diphylla*, *Tephrosia purpurea*). Les espèces propres à Spt sont des plantes hygrophiles, indicatrices selon DOS SANTOS (1981) des milieux humides et des milieux hydromorphes. Ce sont par exemple *Echinochloa colona*, *Aeschynomene indica*, *Dicliptera verticillata*...

La plus grande diversité floristique se retrouve dans l'unité Ase où 16 espèces herbacées sont exclusives. Cette richesse est due à la plus grande variation des facteurs écologiques de ce milieu : gradient de texture, gradient d'humidité, microvariation de l'état de surface du sol...

3.2.2 - Variabilité interannuelle de la composition floristique.

Cet inventaire floristique correspond à l'année de mise en place des observations (1977). En fait, et tous les auteurs ayant travaillé en zone sahélienne le confirment, la variabilité interannuelle de la composition floristique est très prononcée (PENNING DE VRIES et DJITTEYE 1982, CORNET 1981, BOUDET 1984).

Les tableaux de l'annexe III rassemblent les variations interannuelles de la fréquence et de la contribution spécifique des espèces des différentes unités étudiées.

En nous basant sur la présence des espèces sur la ligne d'observation pendant les cinq années de mesure, on peut distinguer :

- des espèces permanentes, c'est-à-dire des espèces que l'on rencontre chaque année ; la variabilité se situant plus au niveau de l'abondance. Ce sont non seulement les espèces dominantes dont les FC sont généralement élevées telles que : *Zornia glochidiata* (Ams : 33,2 à 43,6 %), *Cenchrus biflorus* (Cep : 18 à 41,2 %), *Schoenefeldia gracilis* (Sgl : 31,2 à

50 %), mais encore des espèces à fréquence faible telles que : *Diheteropon hagerupii* (Ase : 0,4 à 3,6 %), *Sporobolus festivus* (Ase : 1,2 à 3,6 %). Chez certaines espèces la variabilité interannuelle de la FC est très forte. C'est le cas notamment de *Heliotropium strigosum* sur dune qui voit sa FC passer de 32 % en 1978 à 0,8 % en 1979 ;

- les espèces fluctuantes, que l'on retrouve 2 à 4 années sur 5 et qui forment la majorité des taxons ;

- les espèces occasionnelles, que l'on rencontre 1 année sur 5. Ce sont des phorbes telles que : *Phyllanthus pentandrus*, *Euphorbia forskalii*, *Borreria chaetocephalla*, *Mollugo nudicaulis* et des graminoides telles que : *Fimbristylis hispidula*, *Chloris lamproparia*, *Dactyloctenium aegyptium*. La prolifération de ces espèces occasionnelles, certaines années, témoigne de la richesse des sols en semences dormantes, et de leur durée de vie élevée.

De nombreux auteurs (GASTON 1983, CORNET 1981, TOUTAIN et PIOT 1980) ont cherché à relier les variations interannuelles de la composition floristique à la répartition des pluies. Les résultats sont plus ou moins satisfaisants mais ne permettent pas une généralisation. Plus récemment, BOUDET (in BARAL et al. 1983, et 1986) essaie d'interpréter les variations interannuelles de la composition floristique en adoptant les critères de vitesse de germination des espèces, en relation avec la dureté des graines établis par PENNING DE VRIES et DJITTEYE 1982.

Dans le chapitre suivant, nous reviendrons d'une manière plus détaillée sur les propriétés germinatives des semences et leurs effets sur la dynamique des peuplements herbacés. Cependant une tentative d'explication de la variabilité interannuelle de la fréquence des espèces dominantes est donnée à partir des paramètres de la structure temporelle des pluies.

Les équations ci-après expriment la contribution spécifique (CSi) de quelques espèces dominantes en fonction du coefficient d'aplatissement (Ck) et du coefficient d'assymétrie (Cs) de la distribution décadaire des pluies de chaque année d'observation.

Kolel (Cep)	: <i>Alysicarpus ovalifolius</i>	: CSi = 8,59-25,6C _s +3,3C _k	R ² =0,66
Gountouré (Ase)	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>	: CSi = 43,3-24,6C _s -4,3C _k	R ² =0,87
	: <i>Zornia glochidiata</i>	: CSi = 18,2-15,2C _s -2,8C _k	R ² =0,56
Oursi (Ams)	: <i>Zornia glochidiata</i>	: CSi = -7,3-14,6C _s +17,3C _k	R ² =0,83
Kolel (Cep)	: <i>Cenchrus biflorus</i>	: CSi = 41,2+65,2C _s +7,1C _k	R ² =0,35
Oursi (Ams)	: <i>Heliotropium strigosum</i>	: CSi = 40,4-15,0C _s -8,9C _k	R ² =0,21
Kouni (Sgl)	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>	: CSi = 89,5+ 4,4C _s +2,6C _k	R ² =0,34
Winde (Spt)	: <i>Panicum laetum</i>	: CSi = 83,7+11,2C _s -3,9C _k	R ² =0,36

En général sur les sols légers, les paramètres de la structure temporelle des pluies expliquent plus de 50 % de la variabilité observée. Mais ce n'est pas toujours le cas et chez certaines espèces telles que *Cenchrus biflorus*, *Heliotropium strigosum* les coefficients de détermination sont faibles. Il y a donc lieu de rechercher d'autres facteurs explicatifs tels que physiologie de la semence, vitesse de croissance du système racinaire...

Pour les espèces des sols lourds, les paramètres de la structure temporelle n'expliquent qu'environ le tiers de la variabilité. Cette caractéristique s'explique notamment par les pertes (Sgl) et apports (Spt) d'eau par ruissellement et qui viennent modifier les réponses des plantes à la répartition de l'eau météorique.

Les caractéristiques de la saison des pluies approchées par les paramètres de la distribution des précipitations décadaires, bien qu'expliquant une bonne part de la variabilité de la contribution spécifique de certaines espèces, ne permettent pas de prévoir la composition floristique en raison notamment de l'impossibilité de généralisation due à la multiplicité des cas possibles et de l'interférence d'autres phénomènes tels que redistribution de l'eau et physiologie de la plante.

3.3 - La strate ligneuse.

3.3.1 - Caractéristique de densité.

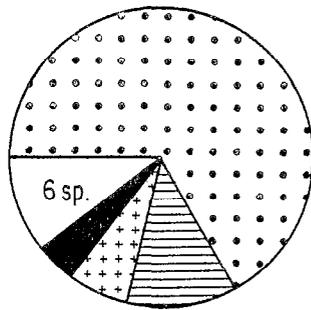
Le tableau 18 donne le nombre d'espèces de chaque unité, leur densité et leur surface terrière, c'est-à-dire la somme des sections de troncs par hectare de référence.

Unité	Ams	Cep	Ase	Sgl	Sgr	Spt
Nbre espèces	10	17	22	3	8	10
densité n.ha ⁻¹	94	78	636	12	59	484
Surf ₂ terrière m ² .ha ⁻¹	0,62	0,11	1,6	-	0,10	3,2

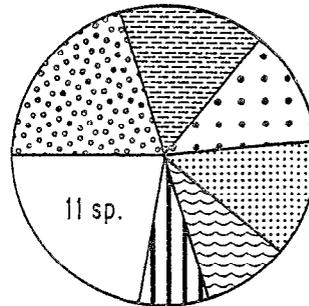
Tableau 18 - Diversité floristique et caractéristiques de densité des peuplements ligneux des différentes unités.
(Relevés de 1977)

Tout comme pour la strate herbacée, ce sont les unités sur sols légers qui offrent la plus grande diversité floristique et plus particulièrement l'unité Ase avec 22 espèces. La liste floristique est donnée en annexe II.

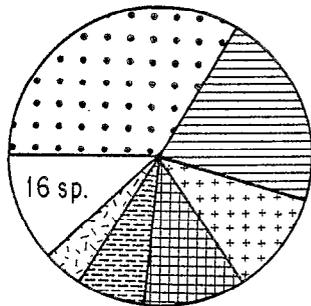
Quatre vingt quatorze individus ont été dénombrés sur la dune (Ams). On y rencontre 10 espèces, mais *Balanites aegyptiaca* et *Guiera senegalensis* constituent près de 79 % du peuplement si on se base sur la densité (fig. 28). Sur l'hectare de référence du piemont sableux (Cep) on compte 78 individus. Six espèces sur les 17 présentes forment 78 % du peuplement. La plus forte densité (636 individus. ha⁻¹) est observée dans l'unité Ase. Cinq espèces seulement contribuent à 83,4 % du peuplement. L'unité Sgr compte 59 individus. *Acacia raddiana* constitue à elle seule 57 % du peuplement ligneux. Avec *Acacia seyal* et *Acacia laeta* elles représentent 83,1 % du peuplement. C'est dans l'unité Sgl que la densité est la plus faible (12 individus.ha⁻¹). Remarquons cependant que 15 arbres dont trois *Acacia seyal* et douze *Acacia nilotica* var. *adansonii* gisent sur la



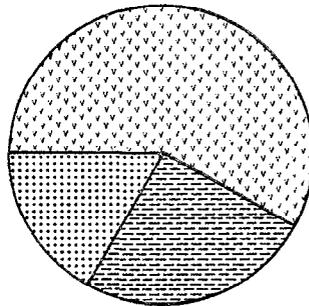
OURSI (Ams)



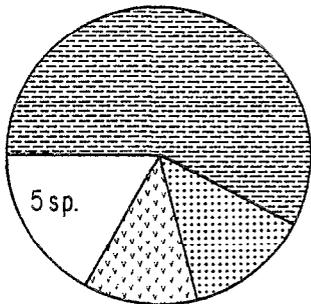
KOLEL (Cep)



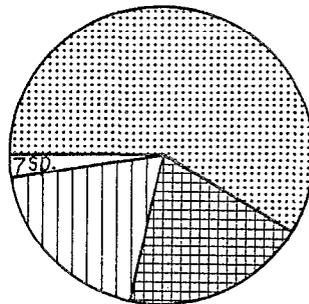
GOUNTOURE (Ase)



KOUNI (Sge)



BAS KOLEL (Sgr)



WINDE (Spt)

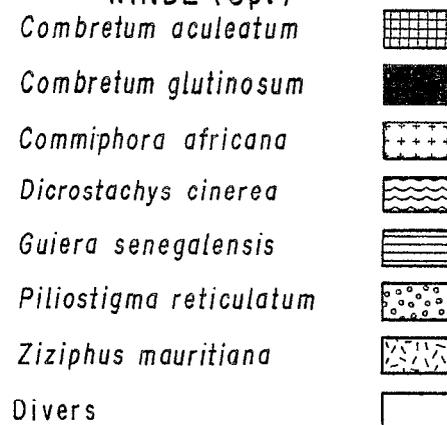


Fig. 28 - Répartition de l'effectif des espèces ligneuses dans les différentes unités de végétation.

parcelle, ce qui sous entend des conditions particulièrement drastiques au niveau de cette unité au cours de ces dernières années. Quatre cent quatre vingt quatre individus de 10 espèces ont été dénombrés dans l'unité Spt. Trois espèces (*Acacia seyal*, *Acacia adansonii*, et *Combretum aculeatum*) forment plus de 97 % du peuplement. On peut noter la dominance particulièrement nette d'*Acacia seyal* qui regroupe 58,6 % des individus de l'unité.

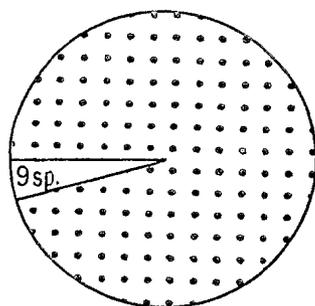
Dans l'ensemble, ces densités sont nettement moins élevées que celles rapportées par POUPON (1980) dans le Ferlo sénégalais et qui évoluent de 296 ind. ha⁻¹ au sommet des dunes à près de 3500 ind. ha⁻¹ dans les dépressions. De plus et contrairement au travail précédemment cité, on n'observe pas de relation nette entre densité et éléments de relief. A notre avis ce caractère est dû à l'importance de l'anthropisation dans notre zone d'étude.

Si on raisonne sur la surface terrière pour déterminer la contribution des espèces au peuplement ligneux, on observe des modifications de rang, confirmant l'observation de BOUXIN (1975), à savoir qu'il n'y a pas "nécessairement parallélisme entre la distribution de la surface terrière d'une espèce et sa densité..." (fig. 29). A titre d'exemple *Combretum aculeatum* qui représentait 19,3 % du peuplement de l'unité Spt sur la base des densités ne constitue plus que 0,4 % du peuplement en prenant comme critère la surface terrière. De même *Acacia raddiana* (Gountouré) évolue de 7,3 % (densité) à 18,3 % (surface terrière) du peuplement. Il n'y a cependant pas de profond changement quand on somme la contribution des 3 ou 4 espèces dominantes de chaque unité.

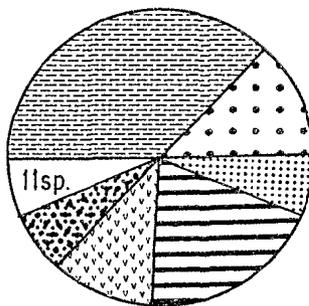
Les valeurs des surfaces terrières de l'ensemble des taxons portées dans le tableau 18 sont du même ordre de grandeur que celles rapportées pour d'autres régions sèches telles que :

- l'Arizona (0,21 à 4,15 m².ha⁻¹ WHITTAKER et NIERING (1975) in POUPON (1980) ;

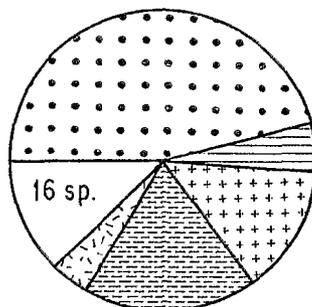
- le Ferlo sénégalais (0,6 à 8,8 m².ha⁻¹ POUPON op. cit). Les valeurs obtenues pour la dune sont identiques, mais celle relative au bas-fond est nettement plus basse (3,2 contre 8,8 m².ha⁻¹).



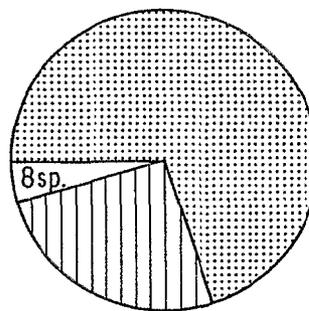
OURSI (Ams)



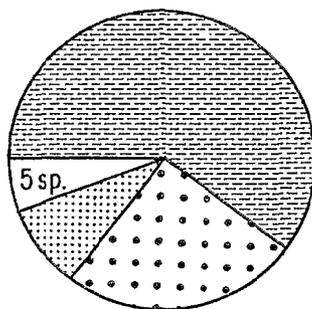
KOLEL (Cep)



GOUNTOURE (Ase)



WINDE (Spt)



BAS KOLEL (Sgr)

Fig. 29 - Répartition des surfaces terrières des espèces dans les différentes unités de végétation.
(se référer à la figure 28 pour la légende)

Ce rapport est cependant plus élevé que le rapport de densités ce qui suppose dans notre zone des individus de plus grande taille, c'est-à-dire plus âgés.

3.3.2 - Structure démographique.

Dans cette étude, l'analyse des dimensions des individus repose sur la mesure de la circonférence à la base du tronc. La taille a été caractérisée par la circonférence du tronc plutôt que par la hauteur, car le surpâturage induit chez certaines espèces une morphologie particulière telle que forme rabougrie (*Combretum aculeatum*, *Maerua crassifolia*, *Balanites aegyptiaca*...). Par ailleurs, certaines espèces lianescentes sont difficiles à mesurer (*Combretum aculeatum*, *Tinospora bakis*, *Leptadenia hastata*...). Précisons que la circonférence du tronc est déterminée à environ 20 cm du sol, parce que de nombreuses espèces présentent des ramifications très basses. C'est cette donnée, qui est généralement retenue dans l'étude des ligneux sahéliens (TOUTAIN et al. 1983, BARRAL et al. 1983, POUPON 1977). Seule la plus grosse tige a été mesurée pour les espèces multicaules (POUPON et BILLE, 1974).

Diverses fonctions mathématiques ont été utilisées pour décrire l'équilibre forestier global. Nous ne reviendrons pas sur ces modèles qui ont été revus par DEVINEAU (1975). En exprimant les variations d'effectifs en fonction du diamètre, la loi généralement retenue pour rendre compte de l'équilibre des peuplements non perturbés est la fonction exponentielle. On peut en effet écrire que : "l'effectif est constant dans une classe quelconque de diamètre, c'est-à-dire que la mortalité et le passage à une classe supérieure compensent le recrutement à partir de la classe inférieure" (ROLLET 1979).

La structure démographique des peuplements ligneux a été représentée par l'histogramme de fréquence des classes de circonférences et par un graphique en coordonnées semi-logarithmiques, avec en abscisse la classe de circonférence et en ordonnée, le logarithme de l'effectif de chaque classe. Cette représentation permet de différencier selon les peuplements trois types de courbes (LOETSCH et al. 1961 in DEVINEAU 1975) :

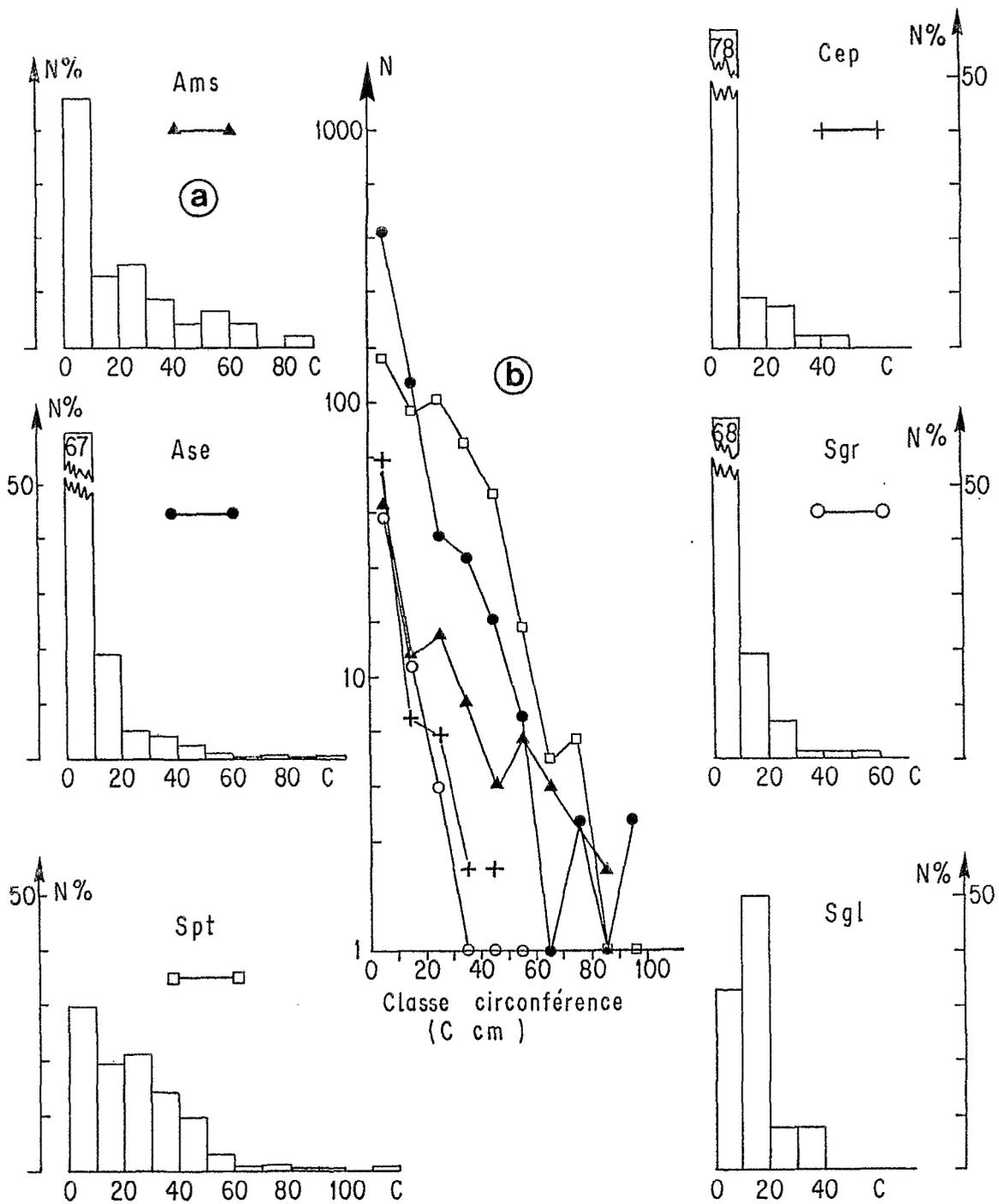


Fig. 30 - Structure démographique du peuplement ligneux des différentes unités de végétation.

a) distribution des circonférences à la base (C en cm)

b) répartition de l'effectif en fonction de la circonférence à la base (coordonnées semi-logarithmiques)

- le premier type est une droite et correspond à l'équilibre du peuplement ;
- le deuxième type est une courbe à concavité tournée vers le bas ; il correspond à un mélange de peuplement pris à des stades de maturité différente ;
- le troisième type est une courbe à concavité tournée vers le haut ; dans ce cas la diminution du nombre de tiges est moins forte que ne le laisserait prévoir une variation linéaire.

De plus, des accidents dans le figuré des courbes indiquent selon ROLLET (1979), des peuplements perturbés.

Le diagramme des classes de circonférence pour l'ensemble du peuplement ligneux des 6 unités est représenté sur la figure 30. L'importance de l'effectif de la première classe des unités Ams, Cep, Ase, Sgr (46 à 78 % de l'effectif total) suggère que la régénération est assurée. Par contre la décroissance rapide entre la première et la deuxième classe indique une espérance de vie faible pour les jeunes plants. Il est prudent de ne pas interpréter l'histogramme relatif à l'unité Sgl, car celui-ci a été établi à partir de 12 individus de trois espèces seulement.

Le graphique 30 b donne pour chaque unité la répartition des individus en fonction de leur circonférence en coordonnées semi-logarithmiques. Il apparaît qu'aucun peuplement n'est en équilibre si on se réfère aux définitions de LOETSCH et al. (1961). Remarquons toutefois que le peuplement de l'unité Sgr pourrait répondre à cet état, si on ne considère que les quatre premières classe de taille.

Les courbes relatives à Cep, Ams, Ase présentent des irrégularités indiquant des perturbations des peuplements. De plus, elles ont tendance à avoir une concavité tournée vers le haut signifiant que le taux de mortalité diminue pour les gros individus. Ce résultat corrobore ceux de POUPON (1977) sur le peuplement ligneux d'une steppe sahélienne du Ferlo sénégalais.

La courbe relative au peuplement de Spt a tendance à présenter une concavité tournée vers le bas, ce qui reflète un mélange de peuplement

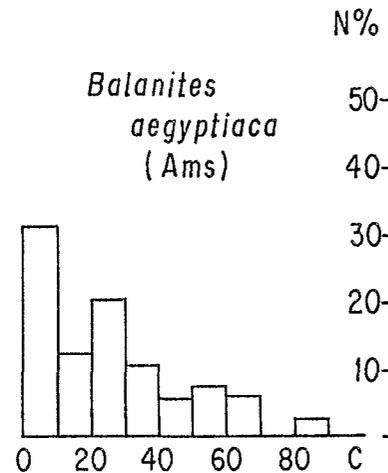
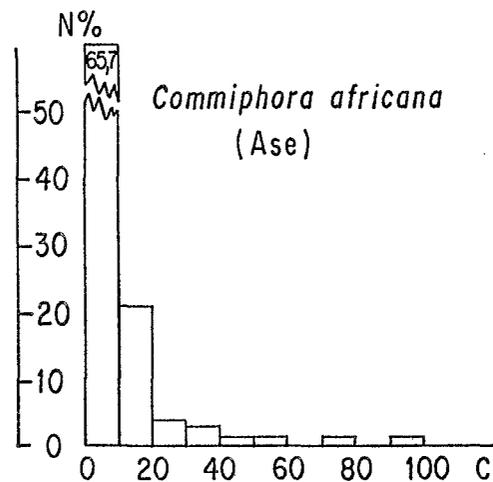
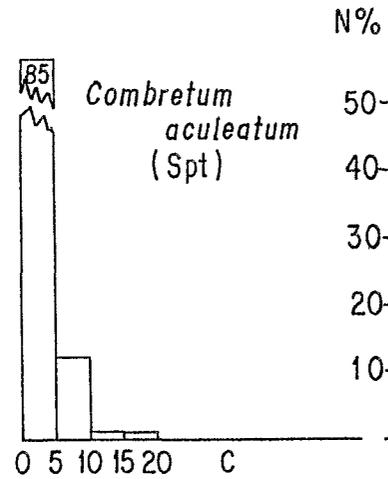
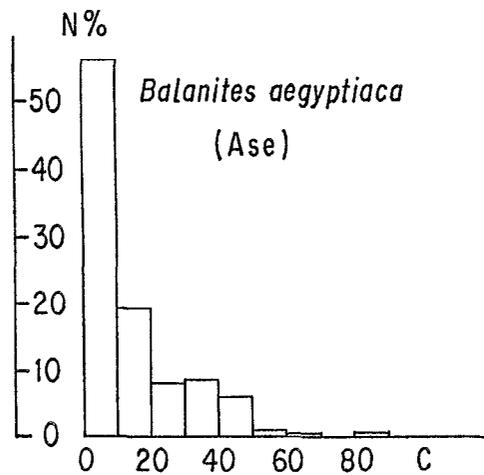
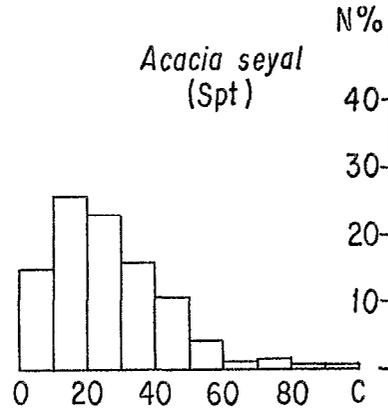
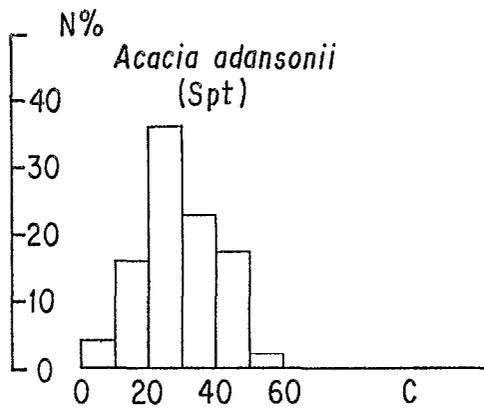


Fig. 31 - Distribution des circonférences à la base (C en cm) des populations de quelques espèces dominantes.

pris à des stades de maturité différente. Ceci apparaît d'ailleurs très nettement lorsqu'on examine la distribution des fréquences des différentes populations d'espèces.

La figure 31 montre notamment que les distributions de fréquence de *Combretum aculeatum*, *Acacia seyal* et *Acacia adansonii* sont très différentes entre elles. Les jeunes individus sont représentés essentiellement par ceux de *Combretum aculeatum*. La distribution des fréquences d'*Acacia adansonii* est normale. Cette espèce se régénère difficilement puisqu'on ne trouve que très peu d'individus dans la classe inférieure. La répartition d'*Acacia seyal* tend vers une loi log-normale tronquée. Cette espèce semble aussi se régénérer difficilement, alors que TOUTAIN (1978) lui affecte un grand pouvoir de régénération en observant la dynamique de la population après une année de protection.

La répartition des fréquences en fonction de la circonférence de *Balanites aegyptiaca* et *Commiphora africana* du groupement Ase (fig. 31) s'ajustent assez bien à la fonction exponentielle (tout au moins les premières classes). Ces deux espèces se régénèrent bien. Leur population est relativement équilibrée et se renouvelle assez rapidement.

La structure démographique de la population de *Balanites aegyptiaca* sur dune (Ams) diffère de celle de l'unité Ase notamment par la faiblesse de la représentation de la première et surtout de la deuxième classe. Ces caractères reflètent des perturbations.

Les courbes de fréquences ont été interprétées différemment par les auteurs : action du feu (MENAUT 1977), effet des prédateurs (WESTMAN et ROGERS 1977, action des facteurs édaphiques (BOUXIN 1977), influence du vent (POUPON 1977). Bien que ces courbes constituent un complément intéressant dans la compréhension de l'écologie de l'espèce, leur interprétation biologique est rendue difficile en raison de perturbation non identifiable. En effet l'histoire du peuplement est généralement méconnue. A titre d'exemple, la figure 32 représente l'influence d'un prédateur (*Arvicanthis niloticus*) sur l'évolution de la structure démographique du peuplement ligneux de l'unité Spt.

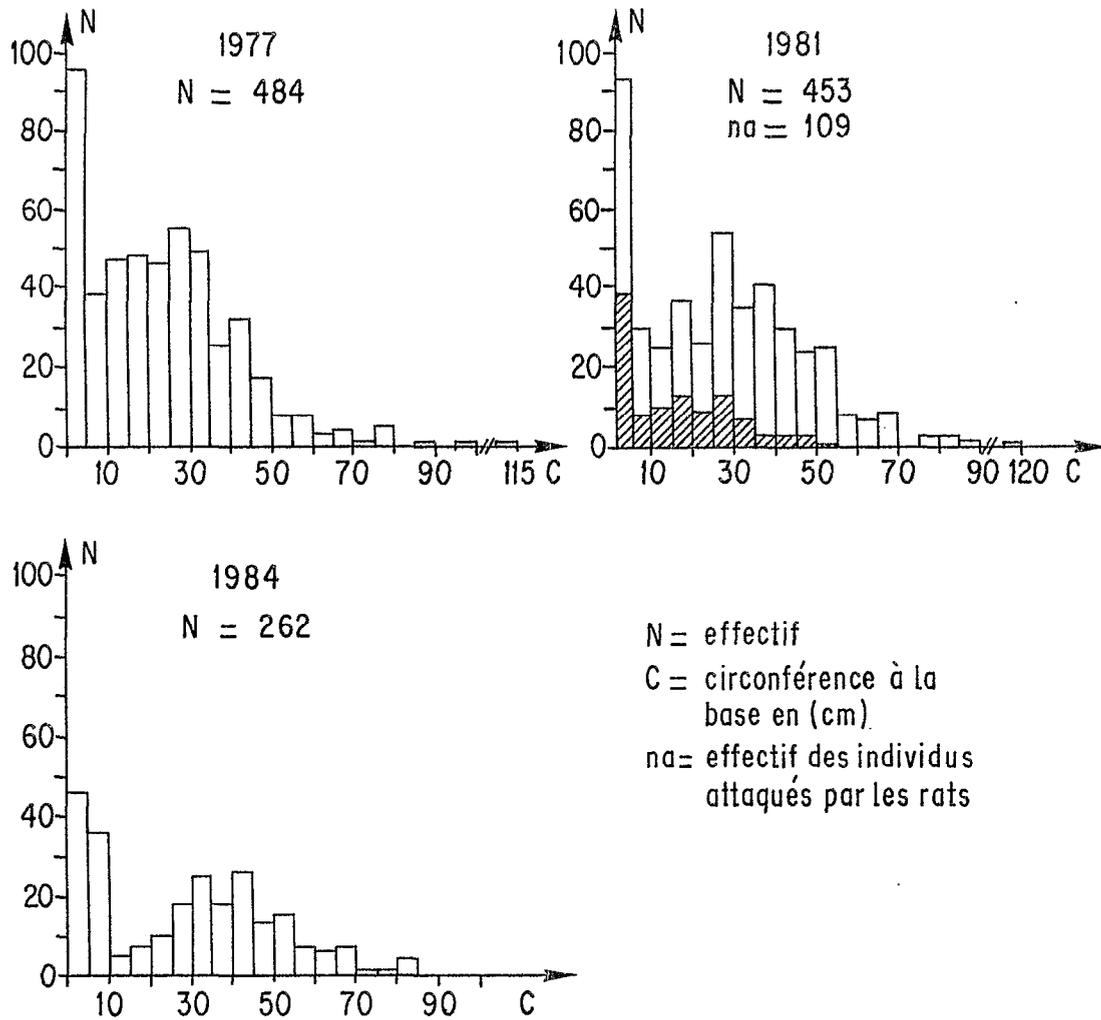


Fig. 32 - Influence d'*Arvicantis niloticus* sur la structure démographique d'un peuplement ligneux (Spt).

En 1977, au moment de la première observation, le peuplement comptait 484 individus. L'histogramme des circonférences (amplitude des classes 5 cm) fait apparaître une classe inférieure bien représentée. En fait celle-ci est constituée presque exclusivement par les pieds de *Combretum aculeatum* abroutis par le surpâturage. Le reste de la distribution suggère une assez grande espérance de vie des individus.

Une pullulation de rats (*Arvicanthis niloticus*) s'est abattue sur le peuplement au cours de l'année 1981. Les arbres sont écorcés à la base ou sectionnés lorsqu'ils sont de petite taille. L'attaque touche 24 % du peuplement. Elle concerne plus particulièrement *Combretum aculeatum* (33 % de la population) et *Acacia seyal* (37 % de la population) qu'*Acacia adansonii* (2,3 %). Ceci est dû notamment au fait que l'écorce des deux premières espèces est plus riche en eau (teneur en eau = 45 %) que celle de la troisième (37 %). Il apparaît sur la figure 32 que ce sont les jeunes sujets qui sont le plus attaqués. En 1984 il ne reste plus qu'environ 50 % du peuplement originel. La courbe de distribution des circonférences est bimodale. Dans sa majorité, le peuplement est constitué d'individus âgés. Tout semble indiquer une mortalité précoce élevée. Quelle interprétation aurions-nous donné à cet histogramme si nous n'avions vécu la perturbation ?

4 - CONCLUSION.

Une des principales caractéristiques du milieu sahélien est contenue dans sa variabilité. Celle-ci se situe au niveau climatique approché ici par la pluviosité. En effet les observations à grande échelle confirment non seulement la variabilité interannuelle des précipitations établie à petite échelle, mais fait apparaître en plus une variabilité spatiale aussi bien de la pluie annuelle que de la répartition saisonnière.

Sur le plan édaphique, les sols des différentes unités offrent des caractéristiques communes : bonne stabilité structurale, bien pourvus en éléments minéraux, carencés en azote. La diversité des éléments retenus se situe au niveau de la texture (sableuse à limono-argileuse) et de la rétention hydrique.

Différentes caractéristiques de la végétation ont été analysées de manière à en préciser sa structure. Les unités de végétation choisies répondent à trois types physiologiques : les formations herbacées (Sgl, Sgr, Cep, Ams), les formations complexes herbacées-ligneux hauts (Spt) et les formations complexes herbacées-ligneux bas (Ase).

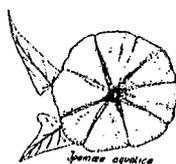
Les spectres biologiques bruts des différentes unités corroborent les observations relatives à l'ensemble de la flore de la région, c'est-à-dire la dominance des thérophytes et des phanérophytes. Des différences apparaissent cependant entre les unités dans la proportion des différents types biologiques.

La variabilité se traduit aussi au niveau floristique notamment sur le plan des effectifs et des variations interannuelles de la composition floristique. La pauvreté de la flore du bas-fond hydromorphe (Spt) en relation avec la contrainte submersion et la pression sélective exercée par le pâturage excessif en saison des pluies s'oppose à la richesse relative de la flore des pédiments (Ase) liée à une grande diversité des facteurs écologiques. Bien que quelques espèces seulement constituent l'essentiel des peuplements ligneux généralement non équilibrés, des différences notables apparaissent dans les caractéristiques de densité ($d = 12$ à 636 ind. ha^{-1} ; surface terrière : $0,1$ à $3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) et la structure démographique des peuplements. Les variations des fréquences en fonction de la circonférence à la base du tronc permettent en effet de distinguer différents types de structure :

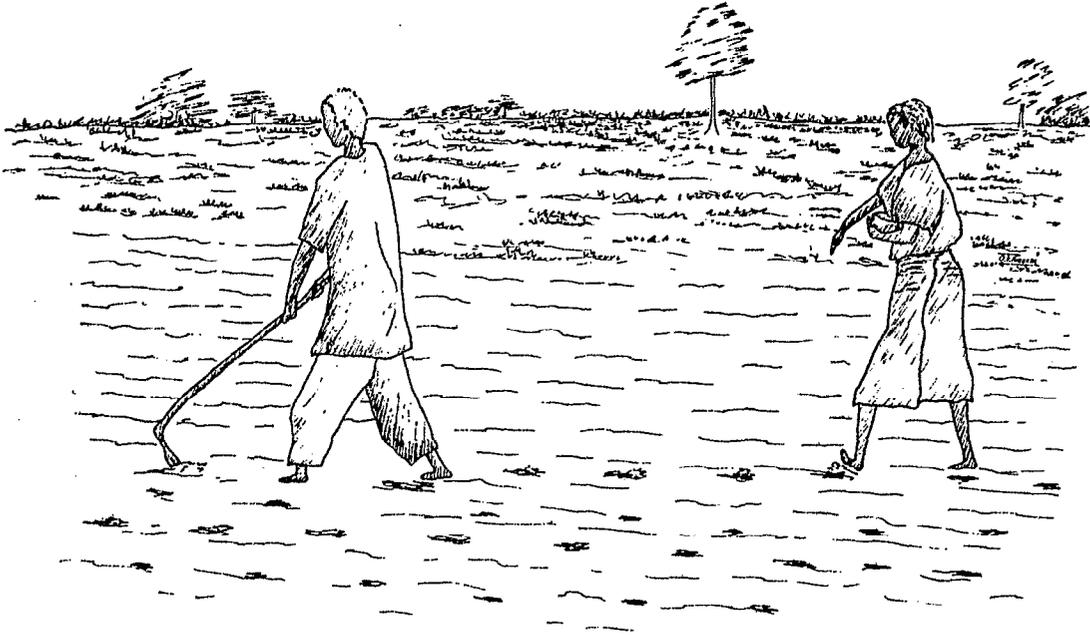
- le premier le plus fréquent, caractérisé par une classe inférieure bien représentée, indique une bonne régénération ;
- le deuxième se rapproche d'une répartition normale à log-normale et traduit une régénération difficile ;
- le troisième à tendance bimodale, semble refléter l'action de facteurs contraignants. C'est le cas par exemple de *Balanites aegyptiaca* sur dune (Ams).

En fait l'interprétation de ces histogrammes est difficile à cause d'une part, de l'artificialisation et d'autre part, de l'effet de certains facteurs tels que accidents climatiques, prédateurs, feux exceptionnels... Ces influences généralement méconnues viennent accentuer la variabilité naturelle.

Cette étude détaillée met en évidence l'une des caractéristiques fondamentales des systèmes écologiques sahéliens : sa grande diversité malgré une apparente homogénéité. Cette variabilité se situe aussi bien au niveau des caractéristiques édapho-climatiques que de la structure de la végétation. C'est cette diversité que nous avons essayé de couvrir dans notre échantillonnage.



CHAPITRE II



LA MISE EN PLACE DU PEUPEMENT

Les peuplements herbacés sahéliens sont donc largement dominés par les plantes annuelles. Cette caractéristique montre l'importance des études relatives à la semence et à son devenir, puisqu'elle constitue le seul lien entre deux cycles successifs de végétation.

Alors que de très nombreux travaux ont été consacrés à la caractérisation des peuplements végétaux sahéliens (ANONYME 1975, BILLE 1977, BREMAN 1982, BARRAL et al. 1983, VANPRAET 1983...) sur les plans de la floristique, de la production, de la capacité de charge et de la cartographie, relativement peu de recherches ont porté sur l'étude des semences et des propriétés germinatives des espèces sahéliennes.

Signalons les publications de BILLE (1972, 1973) sur la description des graines et diaspores du sahel, de MONOD (1974, 1977, 1979)

sur les modes de dissémination et de GASTON (1976) sur la production de semences. Les observations relatives à la germination *in situ* ont été abordées par MIEGE et TCHOUME (1963) et plus récemment par DE VRIES et DJITTEYE (1982) et CISSE (1986). Quant aux études expérimentales sur la germination, les résultats disponibles à notre connaissance sont dûs à GROUZIS (1979), LE GRAND (1979), PALE (1982) pour les espèces pastorales et à SAINT-CLAIR (1976, 1980) et ROUSSEL (1978) pour les plantes cultivées (mil, sorgho).

La reconstitution de la strate herbacée, l'évaluation du potentiel de reproduction, les variations interannuelles de la composition floristique et de la production dépendent étroitement de la production de graines, de la longévité des semences et de leurs facultés germinatives. Elles reposent aussi sur les phénomènes de résistance au déficit hydrique et de compétition qui se déroulent au cours de l'établissement.

Aussi avons-nous jugé nécessaire de préciser certains de ces aspects, en particulier ceux relatifs :

- au stock de semences ;
- à leurs propriétés germinatives ;
- à l'établissement des plantules.

1- PRODUCTION DE SEMENCES ET RECONSTITUTION DES PEUPELEMENTS HERBACES.

1.1 - Production de semences.

Les observations effectuées au niveau de l'espèce font apparaître une grande variabilité du nombre de semences par plante (tableau 19).

Espèce	Nombre moyen par plante	Nombre max. par plante	Auteurs
Cenchrus biflorus	40	2 782	DE VRIES et DJITTEYE (1982)
Schoenefeldia gracilis	350	16 869	
Zornia glochidiata	10	616	
Panicum laetum	66	579	GROUZIS n. pub.

Tableau 19. - Nombre de semences par plante pour quelques espèces.

Le tableau 20 rassemble les données de production grainière des peuplements herbacés sahéliens. Il y apparaît aussi une grande variabilité entre les peuplements, et pour un même peuplement d'une année sur l'autre.

Pour ce qui concerne la région de la Mare d'Oursi, la production grainière établie en mars 1977, à partir d'un échantillon de 20 à 26 placettes de 1/16 m² et exprimée en poids, est beaucoup plus élevée pour les peuplements établis sur sables que sur glacis.

Pays	Production grainière (g. m ⁻²)	fraction phytomasse maximum	Auteurs
TCHAD (Maltam)	20,6 (1973) à 223,8 (1975)	25 à 40 %	GASTON (1976)
SENEGAL (Ferlo)	1,4 à 13	3 %	BILLE (1977)
BURKINA FASO (Oursi)	Unité : semences : graines Cep : 147,5 ± 23,9 : 53,1 ± 8,6 Ams : 47,9 ± 9,4 : 20,1 ± 3,9 Ase : 16,4 ± 4,6 : 6,9 ± 1,9 Sgr : 7,7 ± 2,2 : 4,3 ± 1,2 Sgl : 12,2 ± 3 : 6,8 ± 1,7 Spt : - : 9,5 à 14,6	31 % 11 % 11 % 6 % 8 % 8 à 9,4 %	GROUZIS (1979) GROUZIS (1986)
SENEGAL (Centre)	Zone boisée 26,2 (1978) à 23,9 (1979) Zone déboisée 35,7 (1978) à 26,6 (1979)	-	KAHEM (1981)
MALI Centre Nord	estimé à partir du nombre de graines par plante	6 à 16 % max. 31 %	DE VRIES et DJITTEYE (1982)

Tableau 20. - Production grainière de quelques peuplements herbacés sahéliens.
(moyenne ± IC pour p = 0,05)

Ce caractère est dû au poids plus élevé des graines des espèces dominantes des peuplements : *Cenchrus biflorus* (100 graines correspondent à 200 mg), *Alysicarpus ovalifolius* (360 mg) et surtout *Tribulus terrestris*

(poids de 100 diaspores = 3730 mg) pour le piémont sableux (Cep) contre *Schoenefeldia gracilis* (poids de 100 graines = 16 mg) pour les glacis. La différence observée entre la production du piémont (Cep) et la dune (Ams) s'explique par la présence en proportion plus au moins égale sur la dune de *Cenchrus biflorus* et d'*Aristida mutabilis* dont le poids de graines est faible (41 mg pour 100 graines).

Les résultats du tableau 20 montrent aussi de larges fluctuations interannuelles. GASTON (1976) note que ce sont "les premières séquences pluviométriques jusqu'à la deuxième décade d'août qui conditionnent le succès de la production". Quant au rôle de la consommation primaire, l'auteur remarque une brusque diminution du stock de graines au sol vers le mois d'avril et de mai, due à une exploitation par les oiseaux. Cette remarque met l'accent sur l'importance de la date de mesure.

La comparaison de la production grainière à la phytomasse épigée permet d'estimer la fraction de production emmagasinée sous forme de graines (tableau 20). Pour les peuplements étudiés de la région d'Oursi, les graines représentent 6 à 31 % de la phytomasse maximale. A l'exception des résultats de BILLE (1977), ces proportions se rapprochent de celles des autres auteurs et des 15 à 30 % généralement admises pour les espèces annuelles (OGDEN 1968 in HARPER et al. 1970). Les espèces annuelles sahéliennes, tout comme les autres, dérivent donc une part importante des photosynthétats dans la formation de graines.

1.2 - Reconstitution du peuplement : le facteur semence est-il limitant ?

Les observations effectuées sur certains peuplements montrent que le stock de semences n'est généralement pas un facteur limitant de la reconstitution des peuplements herbacés.

Dans le Ferlo, BILLE (1977) rapporte que la reconstitution s'effectue à partir de 10 % seulement des semences présentes en fin de saison sèche ; DE VRIES et DJITTEYE (1982) pour trois groupements de la région de NIONO du Mali montrent que 5 à 25 % des semences contribuent à la

reconstitution du couvert. NDIAYE (1986) rapporte que 1 à 10 % du potentiel-graines sont utilisés par la mise en place de la végétation annuelle.

Le tableau 21 rassemble les données d'un bilan effectué dans deux faciès d'un peuplement à *Panicum laetum*. A maturité le nombre de graines par unité de surface est respectivement de 8 000 et de 12 000. En fait il s'agit d'une estimation par défaut, car la libération des graines est étalée dans le temps. C'est pourquoi, un nombre potentiel de graines est donné, en se basant sur le nombre de fleurs et en formulant l'hypothèse qu'une fleur donne naissance à une graine. Ce nombre potentiel est nettement plus élevé (60 à 73 000).

	Phytom. max ₂ g.m ⁻²	Graines g.m ⁻²	Pds 1000 gr. mg	Nbre gr ₂ m	Densité pl.m ⁻²	fleurs/ plante	Nbre pot. m ⁻²
Facies I	118,5 ±	9,5 ±	1192 ±	7969	1445 ±	41,5 ±	≈ 60 000
p. bas	IC=15,7	2,1	62,9	≈ 8000	371	4,1	
Facies II	156,1 ±	14,6 ±	1237 ±	11 800	804 ±	91,2 ±	≈ 73 000
p.haut	IC=16,3	2,8	22,4	≈12 000	70	26	

Tableau 21. - Evaluation du nombre de semences dans deux faciès de peuplement à *Panicum laetum* différenciés par la taille des individus.

IC : Intervalle de confiance pour p = 0,05

L'examen des variations du nombre de plantules au cours de la phase d'établissement du cycle suivant (figure 34) montre que le nombre total de levée au cours de l'année 1979 s'élève à 1842 plantules par m². Cela ne représente que 15 % à 23 % de la production grainière par défaut, selon les faciès considérés et, de 23 % à 25 % si on tient compte des prélèvements divers estimés au 1/3 du stock par BILLE (1977).

Notons au passage que les avis sont très partagés pour ce qui concerne la fraction consommée par les oiseaux, rongeurs et insectes divers. Si le chiffre de BILLE (op.cit.) se rapproche de celui de LEPAGE (1972) il diffère assez des 10 % avancés par BOURLIERE (1978) et des 50 à 90 % rapportés par NOY MEIR (1980) pour les zones arides.

En tout état de cause, le bilan est largement excédentaire. Cet excès de semences est de plus accentué par le fait qu'elles ont généralement des durées de vie supérieures à l'année. Citons à titre d'exemple le cas du Ferlo-Sénégalais où une pluviosité annuelle de 38 mm en 1972 n'a pas permis l'installation de la végétation (POUPON 1980). La production grainière de cette année a été quasiment nulle. En 1973, la végétation a pu s'établir de nouveau avec certaines modifications floristiques il est vrai.

Les observations effectuées sur la durée de vie des semences que nous avons réalisées sur certaines espèces (tableau 22) montrent que celles-ci ont généralement une durée de vie supérieure à l'année et que certaines d'entre elles (*Schoenefeldia gracilis*, *Zornia glochidiata*, *Aeschynomene indica*) ont une durée de vie de 3 à 4 ans, tout au moins dans les conditions de conservation. Des durées de vie de 15 ans ont été trouvées chez certaines espèces ligneuses du genre *Acacia* (NONGONIERMA 1979).

Espèce	Durée de conservation (année)			
	1	2	3	4
<i>Cenchrus biflorus</i> G s	NS	NS	- 88 %	
	NS	- 52 %	- 81 %	-
<i>A. adscensionis</i> g	NS	-97 %	- 100 %	- 99 %
<i>Aeschynomene indica</i>	NS	NS	NS	- 94 %
<i>Zornia glochidiata</i>	NS	NS	NS	-89 %
<i>S. gracilis</i> g	+ 100 % *	+ 100% *	+ 100 % *	NS

Tableau 22. - Estimation de la durée de vie des semences de quelques espèces.

G, P : grande, petite semence

g, s : avec ou sans glumelles

* : effet post-maturation (cf § 3.4.2)

NS : différence non significative $p = 0,05$
conservation à sec au laboratoire entre
25° et 35°C.

L'évaluation du stock des semences dans le sol et leurs variations ont été relativement peu abordées bien que ce soit un des aspects

essentiels de la dynamique des peuplements sahéliens. Il faut reconnaître que les manipulations sont longues, fastidieuses et que les résultats ne sont pas toujours à la mesure du temps et des moyens consacrés. Les mesures effectuées au Sénégal, Tchad, Burkina et Mali font apparaître de larges fluctuations imputables au climat, à la consommation primaire et à l'action mécanique exercée sur le milieu. L'ensemble des auteurs s'accordent par contre pour admettre que la quantité de diaspores persistant après la saison sèche ne constitue pas un facteur limitant pour la reconstitution de la végétation.

2 - L'ETABLISSEMENT.

2.1 - Acquis et méthodes d'études.

Lorsque la végétation est dominée par les thérophytes comme c'est le cas en zone sahélienne, la phase d'établissement est primordiale car elle permet la reconstitution du peuplement.

En théorie, le problème est simple, la quantité de pluie nécessaire à l'établissement doit compenser l'évapotranspiration. Dans la pratique il est plus complexe car il vient s'y greffer l'hétérogénéité du substrat, de la situation des diaspores et de la physiologie des semences.

WENT (1955, 1979), dans son étude sur l'écologie des plantes désertiques, rapporte que les annuelles ne germent que pour des pluies supérieures à 10-15 mm. Pour IMAN (1979, in FLORET et PONTANIER 1982) 10 mm semblent suffisants pour permettre la germination.

Pour CORNET (1982), les conditions de levées dans les sols sableux des milieux sahéliens correspondent à des précipitations supérieures à 20 mm, ou bien à une pluie supérieure à 10 mm suivie d'une deuxième décade comportant au moins 10 mm. Des résultats comparables sont donnés par DE VRIES et DJITTEYE (1982). Mc KEON et al. (1985) étudiant les populations de *Stylosanthes humilis* et *Digitaria ciliaris* montrent que la majorité des vagues de levées suit les épisodes pluvieux de 10-20 mm.

Remarquons qu'il y a lieu de distinguer la quantité de pluies nécessaire à la levée de celle assurant l'établissement des plantules. C'est ainsi que les observations de l'année 1977 nous ont permis de montrer que 10 à 20 mm de pluies suffisent à provoquer la levée, mais il faut 65 à 70 mm de pluies pour que la végétation soit définitivement installée sur sables (GROUZIS 1979).

Afin d'apporter des informations complémentaires à ces observations plutôt ponctuelles sur la levée et l'établissement, nous avons suivi pendant plusieurs années, les variations de la densité des plantules en fonction des précipitations et de l'humidité de surface du sol, dans deux unités de végétation bien contrastées. La première correspond à un sol sableux ; elle se situe sur le piedmont de KOLEL. Le deuxième caractérise un sol lourd argileux de bas fond (WINDE). Des relevés sont aussi effectués sur un sol limono-sableux en situation de glacis (KOUNI).

Ces dénombrements sont réalisés dans un élément de station d'une centaine de m², bien homogène pour ce qui concerne l'état de surface du sol. Ils portent sur un effectif de 15 échantillons de 20 x 20 cm². Dans chaque élément de dénombrement, un échantillon de terre est prélevé sur 7,5 cm pour déterminer l'humidité pondérale du sol.

Les coefficients de variation de la densité de plantules varient en moyenne de 29 % pour les valeurs minimales, à 53 % pour les valeurs maximales. Elles sont comparables pour les stations de Windé et de Kolel. Ces données traduisent une forte variabilité des résultats, variabilité qui diminue avec l'installation de la végétation. En effet, l'hétérogénéité est plus forte au début de la saison des pluies, car les plantules sont localisées dans des endroits privilégiés (fentes de retraits comblées, zones d'épandages...).

2.2 - Résultats.

2.2.1 - L'établissement sur sols sableux (Kolel).

Les variations au cours du temps de la densité de plantules, de la pluviométrie et de l'humidité de surface du sol sont représentées pour le sol sableux sur la figure 33.

L'examen de la répartition pluviométrique permet de distinguer les années 1978 et 1979 des années 1980 et 1981. Les deux premières sont caractérisées par des pluies de début de saison peu abondantes (environ 30 mm) et des périodes de net déficit en eau. Si l'on ne tient pas compte de la première averse de 1981, trop isolée et vite évaporée, les années 1980 et 1981 présentent aussi des périodes sans précipitation (2ème et 3ème décades de juin 1980 par exemple), mais le déficit en eau se manifeste peu au niveau de la végétation, car les pluies abondantes du début de saison (60 à 70 mm) permettent de satisfaire les pertes par évaporation.

Il apparaît qu'une douzaine de mm (11,8 mm en 1981) suffisent à provoquer une levée, mais les plantules issues de ces levées précoces (Mars-Mai) correspondant généralement à des événements pluvieux isolés ne se maintiennent pas.

La phase d'établissement se caractérise par des vagues successives de levées, très étroitement liées à la répartition pluviométrique et à l'humidité du sol. Ainsi on en dénombre 2, 3 et 2 respectivement en 1978, 1979 et 1981 (figure 33).

La levée s'effectue à la faveur de pluie amenant l'humidité de surface du sol à des taux de l'ordre de 6 à 9 %. La mortalité des plantules correspond aux périodes sans pluies pendant lesquelles l'humidité du sol s'abaisse à 0,5 %. Ces faits confirment, si besoin est, le rôle prépondérant de l'eau dans la dynamique de la végétation sahélierne correspondant à des pluies annuelles de 400 mm.

Ce n'est qu'au terme de ces fluctuations, qui se situe généralement dans la première décade de juillet, que la végétation peut être considérée comme définitivement installée. Il est alors tombé 65 à 70 mm de pluie ce qui correspond à 18-21 % des précipitations annuelles. La moyenne pour les cinq années observées (1977-1981) est de 69 mm soit 20 % des pluies annuelles.

Le nombre total de plantules ayant levé au cours d'un cycle de végétation, peut être évalué par la somme algébrique des densités maximales et minimales relatives à chaque flux. La valeur la plus élevée qui est de

KOLEL PIEMONT

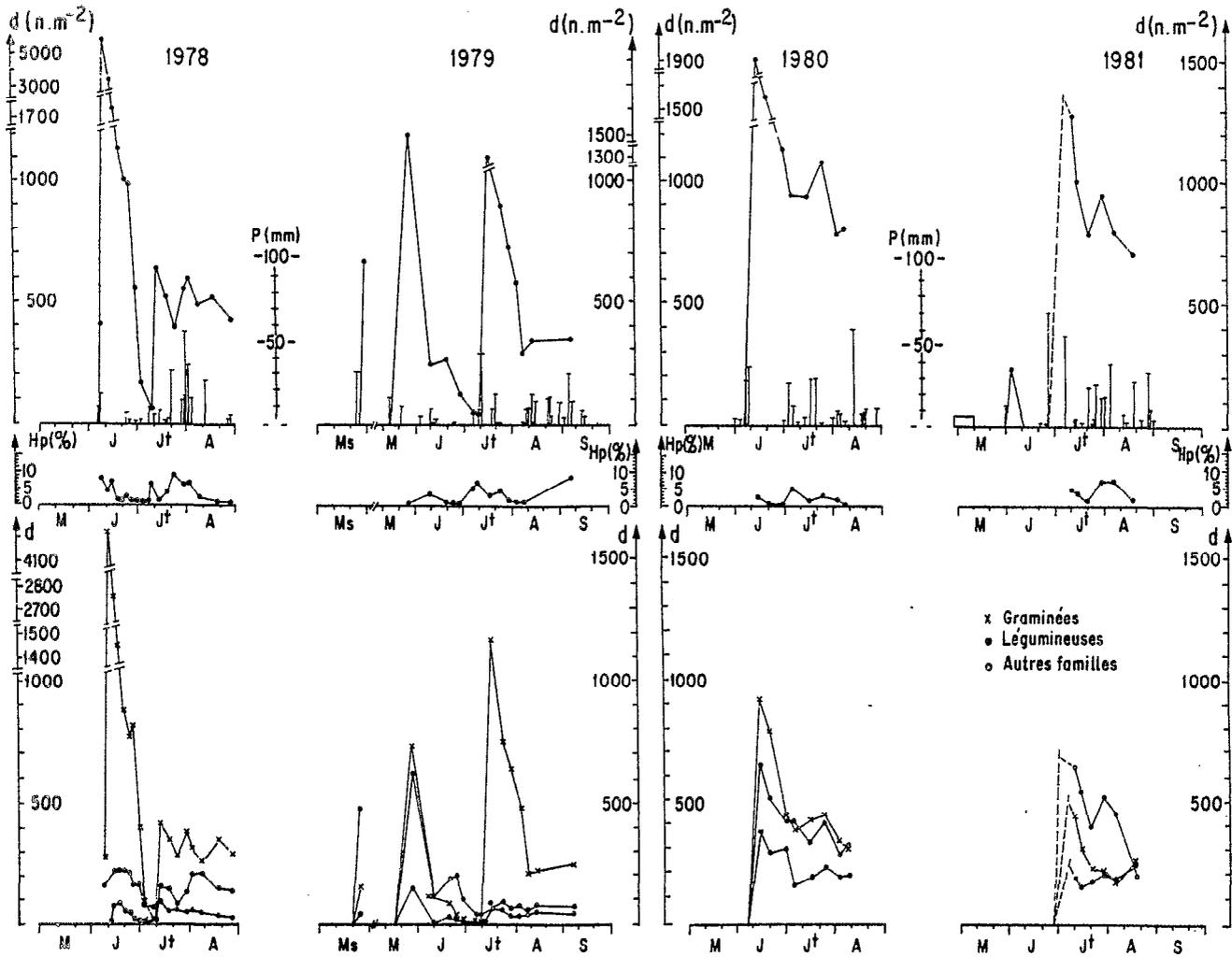


Fig. 33 - Evolution saisonnière de la densité des plantules (d) en relation avec la pluviométrie journalière (P) et l'humidité de surface du sol (H_p) à Kolel.

5664 plantules par m² est obtenue en 1978. La plus basse densité (1502 plantules par m²) est relevée en 1981. Il faut cependant remarquer qu'il s'agit d'une valeur par défaut car l'on a certainement manqué de noter la densité maximale correspondante à l'averse de 70 mm du 26.06.1981. La moyenne des années 1977 à 1980 est de 3469 plantules au m².

L'établissement se caractérise aussi par une importante réduction de la densité des plantules. Il y a annuellement un énorme gaspillage. Lorsque plusieurs levées ont lieu au cours de la phase d'établissement, le nombre de plantules atteignant le stade adulte ne représente que 8 à 10 % du nombre total de levée (1978, 1979). Par contre lorsque la levée résulte d'une pluie abondante, le niveau de stabilisation est beaucoup plus élevé. Il atteint 42 % du nombre total de levée en 1980 et près de 46 % en 1981. Ce dernier chiffre est toutefois à considérer avec réserve puisqu'il est convenu que le nombre total des levées de cette année est sous-estimée.

Ces faits concernent l'ensemble des plantules. Intéressons nous maintenant à l'évolution de la densité des différents groupes de familles (figure 33) c'est-à-dire des graminées, des légumineuses et des autres familles, respectivement représentées principalement par *Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius* et *Tribulus terrestris*. Il apparaît que les années comportant plusieurs déficits hydriques (1978, 1979) favorisent les graminées. Celles-ci représentent en Août 65 à 69 % du peuplement. Par contre les années sans déficit, et pour lesquelles les pluies provoquant la levée sont abondantes, sont plutôt favorables aux légumineuses et aux autres familles. Ces deux groupes représentent en 1980 et 1981 environ 62 % du peuplement.

2.2.2 - L'établissement sur sols lourds (WINDE).

Les résultats relatifs à ce type de sol sont donnés sur la figure 34. Malgré de légères différences l'opposition décrite précédemment entre les années 1978-1979 d'une part, et les années 1980-1981 d'autre part peut être retenue pour cette station. Dans les sols lourds de bas-fonds, 25 mm de pluie correspondant à des humidités de surface du sol de 10 à 15 %, sont en moyenne nécessaires pour provoquer la levée. Il faut en effet une

WINDE

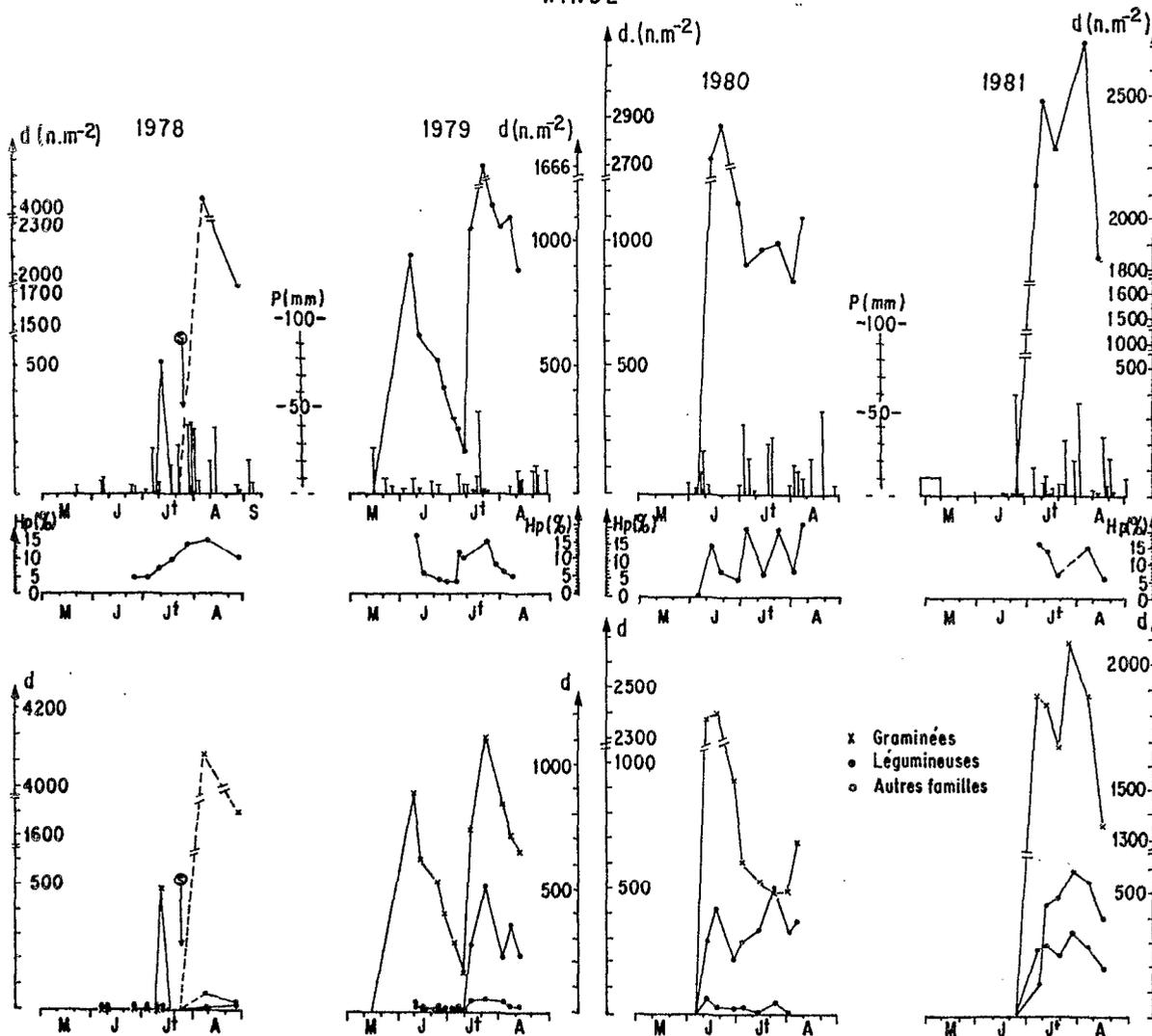


Fig. 34 - Evolution saisonnière de la densité des plantules (d) en relation avec la pluviosité journalière (P) et l'humidité de surface du sol (Hp) à Winde.

plus grande quantité d'eau pour combler le déficit hydrique plus élevé de ce type de sol.

L'établissement se caractérise par des vagues successives de levée, mais celles-ci sont moins nombreuses que sur sol sableux. En effet l'exigence en eau plus élevée pour la germination la retarde et décale le cycle vers une époque où les périodes de déficit pluviométrique sont moins fréquents.

La quantité de pluies permettant l'installation de la végétation ne se différencie pas tellement de celle avancée pour les sols sableux si l'on considère la valeur moyenne 1977-1981 et qui est de 68 mm soit 21 % des précipitations annuelles. Par contre la variabilité interannuelle est nettement plus forte. On peut aisément distinguer les années ayant une répartition hétérogène des précipitations pour lesquelles la quantité de pluie nécessaire à l'installation du peuplement herbacé atteint plus de 25 % du total annuel (1978, 1979). Pour les années offrant une meilleure répartition pluviométrique, le volume des pluies autorisant l'installation de la végétation ne s'élève qu'à 15 % - 17 % du total annuel (1980-1981).

Le total annuel des levées est en moyenne (1977-1980) de 3610 plantules.m⁻², avec une étendue de variation allant de 2427 plantules par m⁻² en 1979 à 4726 pl.m⁻² en 1978.

Si l'on excepte l'année 1981, pour laquelle le dénombrement des plantules est incomplet, on calcule que 34 % du total annuel des levées atteignent le stade adulte. Remarquons que la structure temporelle des pluies a relativement peu d'effet sur ce niveau de stabilisation, contrairement au sol sableux.

Pour ce qui concerne l'évolution des différents groupes de familles, l'observation de la figure 34 montre que les légumineuses et les autres familles sont favorisées par une répartition plus homogène des précipitations, avec toutefois des proportions moins élevées que pour les sols sableux.

2.2.3 - L'établissement sur glacis.

Les résultats détaillés relatifs aux glacis ne sont pas présentés car la variabilité des valeurs obtenues (Coefficient de variation allant de 47 à 120 %) est telle qu'elles perdent toute signification statistique. On peut dire qualitativement que la levée est plus tardive car une compétition pour l'eau entre colloïdes du sol et semences s'exerce en début du cycle. Cette compétition est d'autant plus accentuée que le ruissellement intense de ces milieux amenuise encore plus le stock d'eau. Tout comme pour les sols lourds des bas-fonds, 25 à 30 mm de pluie sont nécessaires à la levée.

Il existe divers flux de levée en relation étroite avec le rythme des précipitations. D'importantes levées peuvent avoir lieu assez tard dans la saison (Août).

L'hétérogénéité élevée du milieu explique la grande variabilité des phénomènes observés. Signalons en particulier, le comportement très différent des taxons au niveau des zones d'épandages à bilan hydrique plus favorable par rapport aux zones de glacis à encroûtement superficiel. La montaison peut être atteint dans le premier élément alors que la levée n'a même pas eu lieu dans les zones à très forte réorganisation superficielle (pellicule peu perméable due à la battance). L'influence de la structure temporelle des pluies sur les différents groupes n'est pas significative étant donné l'écrasante majorité des graminées dans ce milieu.

2.3 - Conclusion.

L'ensemble de ces observations montre qu'une dizaine de mm de pluie suffisent à provoquer la levée dans les milieux sableux, alors qu'il faut 25 à 30 mm sur les sols lourds. De ce fait des levées précoces peuvent avoir lieu sur les sols légers, mais les plantules ne se maintiennent généralement pas. La végétation peut être considérée comme définitivement installée après environ 70 mm de pluie, ce qui représente 20 % des précipitations annuelles. Pour ce critère, les sols lourds ne se distinguent des sols légers que par une plus grande variabilité en relation avec la structure temporelle des pluies.

Pour les deux types de milieux, le total annuel des plantules s'élève en moyenne à 3500 plantes au m². Par contre le niveau de stabilisation après la phase d'éclaircissement naturel est assez différent. Sur les sols sableux il varie de 10 à 40 % du total en fonction du rythme des précipitations. Sur les sols lourds, la quantité de plantes installées représente en moyenne 34 % du total des levées enregistrées ; de plus, elle n'est pas affectée par la répartition pluviométrique. Cette caractéristique peut être due au fait que les bas fonds, en plus des précipitations ponctuelles, recueillent les eaux de ruissellement qui tamponnent le milieu. Remarquons alors que si l'on tient compte de ce phénomène, les quantités d'eau rapportées pour la levée et l'installation en bas-fond sont des valeurs par défaut.

L'établissement des plantules en milieu sahélien se caractérise par des vagues successives de levées qui traduisent :

- l'hétérogénéité des facteurs du milieu : distribution des averses, microvariations du substrat engendrant des conditions hydriques différentes pour une même quantité de pluie tombée ;

- l'hétérogénéité de la position des semences dans le sol : les premières plantules correspondent généralement à des semences enfouies, tandis que celles qui s'accumulent en surface germent plus tardivement. Ce caractère peut s'expliquer par le fait que les diaspores enfouies ne subissent pas de fortes variations de l'humidité. Elles peuvent aussi correspondre à des semences du cycle précédent plus à aptes à germer ;

- l'hétérogénéité des semences : les différents types morphologiques des semences d'un même taxon présentent des aptitudes différentes à la germination.

Pour ce qui concerne les interrelations entre groupes floristiques, il semble qu'une distribution hétérogène des pluies favorise les graminées au dépend des légumineuses et des autres familles. Cela doit être dû à la levée rapide et en masse des graminées dès les premières pluies, ce qui leur permet d'occuper le terrain et les rend plus aptes à prendre le dessus dans la compétition avec les autres taxons. Une

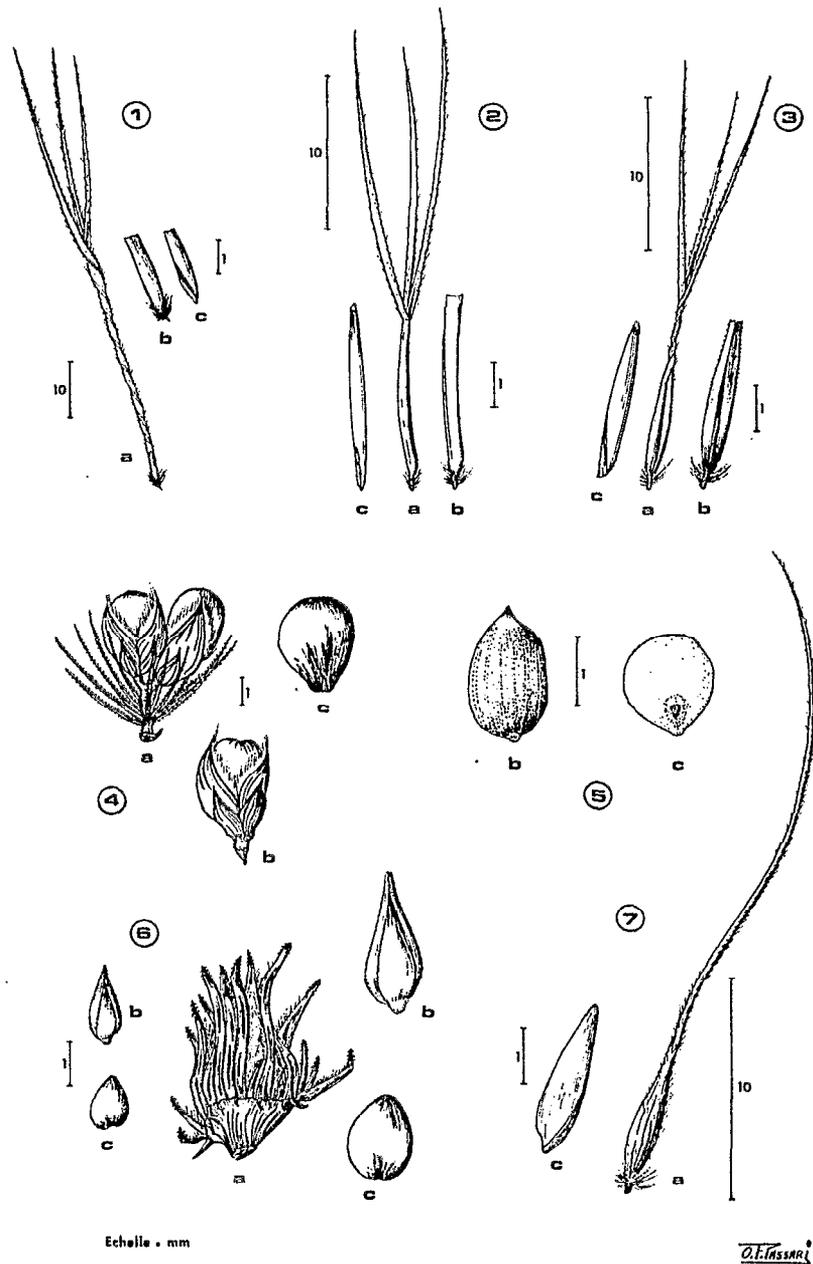


Fig. 35 - Morphologie des diaspores des graminées.

1. *A. funiculata*, 2. *A. adscensionis*,
 3. *A. mutabilis*, 4. *P. americanum*, 5. *P. laetum*,
 6. *C. biflorus*, 7. *S. gracilis*.
 a : diaspore aristée (1, 2, 3, 7) ou glomérule (4,6)
 b : caryopse muni de glumelles
 c : caryopse

distribution plus concentrée des précipitations, avec des pluies de levée abondantes, provoquent la levée de l'ensemble des taxons, en particulier des légumineuses et des autres familles, qui sont alors favorisées dans la compétition.

Une bonne interprétation des observations sur l'implantation de la végétation *in situ*, nécessite cependant une connaissance approfondie de l'aptitude à germer des semences. C'est pourquoi une étude expérimentale a été développée.

3 - ETUDE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES GERMINATIVES DES SEMENCES SAHELIENNES.

3.1 Matériel et méthodes - Définitions.

3.1.1 - Les espèces : choix, écologie, morphologie.

La détermination des propriétés germinatives des semences sahéliennes a porté sur dix espèces dominantes des peuplements herbacés. Elles regroupent 7 graminées et 3 papilionacées.

Ce sont parmi les graminées : *Aristida adscensionis*, *Aristida funiculata*, *Aristida mutabilis*, *Panicum laetum*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*, *Pennisetum americanum* qui est la forme cultivée du mil à chandelles.

Les papilionacées sont constituées de : *Aeschynomene indica*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Zornia glochidiata*.

Ces espèces ont été par ailleurs retenues afin de couvrir le maximum de variabilité écologique. Ainsi on distingue :

- les espèces psammophiles (*A. mutabilis*, *Cenchrus*, *Alysicarpus*, *Zornia*, *Pennisetum*) ;

- les espèces hygrophiles des bas-fonds argileux temporairement inondés : *Panicum laetum* et *Aeschynomene indica* qui se substitue à la première dans les zones protégées (GROUZIS 1982, 1986) ;

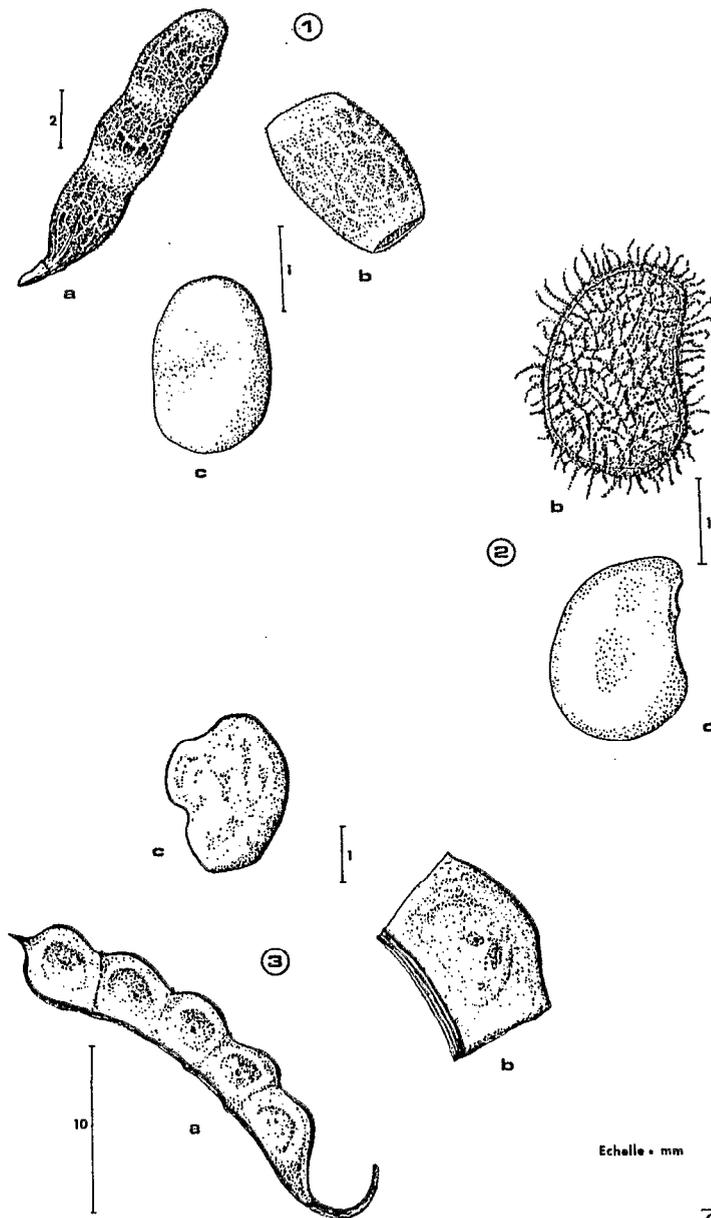


Fig. 36 - Morphologie des fruits et graines des légumineuses.
 1. *Alysicarpus ovalifolius*, 2. *Zornia glochidiata*,
 3. *Aeschynomene indica*

- les espèces associées au glaciaire à fort ruissellement et à bilan hydrique plus défavorable (*A. adscensionis*, *A. funiculata*) et l'espèce ubiquiste de la région : *Schoenefeldia gracilis*.

Chez les graminées, la figure 35 donnant la morphologie des diaspores permet de différencier les espèces dont les semences sont aristées. Ce caractère favorise la dissémination par le vent (anémochorie). Chez les *Aristida* (figure 35 1, 2, 3) l'arête portée par la glumelle inférieure est divisée en 3 subules inégales à subégales suivant les espèces, alors qu'elle est linéaire, longue et flexueuse chez *S. gracilis* (figure 35 7). La colonne de l'arête est scabre, tortueuse pour *Aristida funiculata* et *A. mutabilis* contrairement à *A. adscensionis*. *Pennisetum americanum* et *C. biflorus* présentent des glomérules (figure 35 4, 6). Les épillets sont entourés d'un involucre pédicellé (*Pennisetum americanum*) ou subsessile (*Cenchrus biflorus*), formé de soies libres scabres (*P. americanum*) ou de soies rigides spinescentes à denticules rétrorses soudées en une cupule (*C. biflorus*). Chez *C. biflorus* l'involucre entier se détache et constitue l'unité dont la dispersion est assurée par les animaux (épizoochorie). Contrairement aux formes sauvages (GROUZIS 1980) l'involucre est persistant chez le mil cultivé. Le glomérule de *C. biflorus* contient un, deux, parfois trois épillets de taille et de poids différents (figure 35 6 b, c).

Panicum laetum n'offre pas de dispositif particulier de dissémination. Les gousses des légumineuses (figure 36) sont constituées de plusieurs articles : 3-4 (*Zornia*), 5-10 (*Alysicarpus* et *Aeschynomene*). De nombreuses soies étalées couvrent la surface de la gousse chez *Zornia* lui assurant une dissémination par les animaux.

Chez les graminées les essais de germination portent soit sur la semence entourée des glumelles et dépourvue de l'arête (b fig. 35 1, 2, 3, 5, 6) soit sur le caryopse (c fig. 35). Chez les légumineuses, ce sont les graines qui sont utilisées. Les semences vides, les graines avortées ne sont pas utilisées dans les essais. Pour obtenir la capacité de germination réelle de la population, il faudrait donc pondérer les résultats par le taux de semences morphologiquement entières : le taux de viabilité. Ce taux établi une année, à partir d'une centaine de semences prises au hasard, varie de 92 à 99 %, pour la majorité des graminées à l'exception de

S. gracilis (70 %). Il est moins important chez les Papilionacées étudiées en particulier chez *Zornia* (45 %).

Il est évident que ce taux varie annuellement puisque le succès de la floraison et par suite la formation des graines est étroitement lié à la disponibilité en eau au cours de cette phase. Les variations annuelles de ce taux n'ont pas été établies, de sorte que les résultats présentés dans ce mémoire représentent la capacité de germination potentielle des espèces.

3.1.2 - Conditions expérimentales.

Les semences sont généralement récoltées au cours de la deuxième quinzaine du mois d'octobre, c'est-à-dire au début de la saison sèche et conservées à la température du laboratoire (25° - 30°C) avant utilisation.

Les essais sont effectués dans une étuve bactériologique permettant d'obtenir des températures de 25 à 75°C \pm 1° et d'afficher une thermopériode. Les tests de germinations sont conduits à l'obscurité. Les semences sont cependant exposées à la lumière au moment du dénombrement quotidien des germinations. On doit admettre que la lumière est un facteur que nous n'avons pas étudié bien qu'une photosensibilité positive semble avoir été mise en évidence chez *S. gracilis*, *Dactyloctenium aegyptium* (POURRAT comm. verbale) et *Panicum laxum* (COLE 1977).

A l'exception des essais sur l'influence du potentiel hydrique, les semences sont immergées dans des boîtes de Pétri dans environ 20 ml d'eau du robinet. Une expérimentation dure 10 jours. En effet, le maximum de germination est atteint généralement au bout du 7-8^e jour d'incubation.

Pour chaque traitement les résultats portent sur 100 semences réparties en quatre répétitions pour tester l'homogénéité de l'essai et dépister d'éventuels accidents. L'intervalle de confiance pour $p = 0,05$ est obtenu par la formule :

$$IC = p \pm 2 \sqrt{\frac{pq}{n}} \quad (\text{SCHWARTZ 1969})$$

dans laquelle n est l'effectif de l'échantillon, p le pourcentage observé sur l'échantillon, et $q = 1-p$.

3.1.3 - Définitions.

Nous utiliserons la terminologie proposée par COME (1970) et CHAUSSAT et LE DEUNF (1975). Nous appellerons ainsi :

- post-maturation : la maturation physiologique de la semence ; elle correspond à la levée d'une dormance embryonnaire où d'une inhibition tégumentaire ;

- prétraitement : le traitement permettant à la semence de subir sa post-maturation ;

- critère de germination : une graine est considérée comme germée lorsque la radicule a percé les téguments, ce qui correspond selon EVENARI (1957), à la phase finale de la germination ;

- capacité de germination (Cg) : le pourcentage des semences capables de germer dans des conditions bien définies ;

- vitesse de germination (vg) : le temps mis par les semences pour germer. Parmi les différents paramètres que l'auteur propose pour l'exprimer, nous retiendrons le taux de germination obtenu 2 jours après le semis, d'interprétation plus facile que le temps nécessaire pour atteindre 50 % de la capacité de germination ;

- délai de germination (dg) : temps nécessaire à la manifestation de la germination.

3.2 - Polymorphisme et germination.

De nombreux auteurs ont montré des différences de comportement liées à l'hétérogénéité des semences. Cette caractéristique peut être due à des différences morphologiques (poids, forme, couleur : WILLIAMS et HARPER (1965) ; DATTA et al. 1970), GROUZIS et al. (1976), BASKIN et BASKIN (1976), OLIVIERI et BERGER (1985), et/ou à la position des graines sur l'inflorescence : CHAUSSAT et BOUINOT (1975), CHAUSSAT (1977), ROUSSEL (1978).

Certaines de nos espèces présentent un polymorphisme. C'est pourquoi nous avons recherché des liens éventuels entre ce caractère et les propriétés germinatives.

Les résultats du tableau 23 montrent que les capacités de germination (Cg) varient en fonction des types morphologiques et que la post-maturation ne se manifeste pas également au niveau des différentes semences. Les résultats relatifs à *A. ovalifolius* se rapprochent de ceux obtenus par MAURYA et AMBASHT (1972) sur *Alysicarpus monolifer*. Les Cg sont comparables pour les grandes et les petites semences de *Cenchrus biflorus*. Par contre les résultats sont significativement différents pour les caryopses nues.

Espèces	Couleur ou Taille	Poids 100 unités mg	Cg Oct. 79 %		Cg Avril 80 %	
Aeschynomene indica	mélange	755	15 ± 7,1		48 ± 10	
	sombre	767	7 ± 5,1		25 ± 9,7	
	claire	723	6 ± 4,8		53 ± 10	
Alysicarpus ovalifolius	mélange	-	3 ± 3,4		48 ± 9,8	
	verte	359	0		18 ± 7,7	
	jaune	336	4 ± 3,9		24 ± 8,5	
	brune	334	39 ± 9,8		30 ± 9,2	
Cenchrus biflorus	mélange grande petite	192 216 130	Octobre 80		Avril 81	
			g	s	g	s
			4±3,9	64±9,6	8±5,4	75±8,7
			2±2,8	56±9,9	9±5,7	80±8
			0	11±6,3	2±2,8	43±9,9

Tableau 23 - Polymorphisme et germination.

Cg % : capacité de germination obtenues à : 35°C, eau filtrée, obscurité.

g : semences entourées des glumelles ; s : caryopses.

Ces observations permettent de souligner une des premières propriétés germinatives de certaines semences ; il s'agit de l'existence d'un comportement physiologique particulier en relation avec les types morphologiques.

De telles différences de comportement ne sont pas exceptionnelles et sont souvent interprétées comme une stratégie d'adaptation à la pluviométrie erratique des régions désertiques (HARLAN et al. 1973) ou aux conditions de submersion et de salinité fluctuantes (BERGER 1985). C'est grâce à l'existence de ce polymorphisme qu'HARPER et al. (1970) qualifient de somatique en l'opposant au polymorphisme génétique, que certaines espèces se trouvent adaptées à un milieu aux fluctuations aléatoires.

Dans la suite de ce travail, les observations ont porté sur le mélange des graines, à l'exception de *Cenchrus biflorus* pour laquelle le comportement des deux types morphologiques a été suivi.

3.3 - Température et germination.

Les températures de l'air et du sol à 10 cm de profondeur à l'époque des levées varient de 25 à 42°C environ (cf. première partie). Compte tenu de ces observations nous avons retenu quatre températures constantes (30°, 35°, 40° et 45°C) et une thermopériode (14 h 25°C/10 h 35°C). Les semences utilisées sont constituées par les caryopses entourés des glumelles chez les graminées et des graines chez les légumineuses.

Température	30°C	35°C	40°C	45°C	25°/35°C
paramètres Espèces	Cg v d	Cg v d	Cg v d	Cg v d	Cg v d
<i>Aristida adscensionis</i>	62 60 0 ±9,7	88 85 0 ±6,5	87 84 0 ±6,7	48 45 0 ±10	100 100 0
<i>Aristida mutabilis</i>	2 1 1 ±2,8	2 2 0 ±2,8	6 3 0 ±4,8	1 0 3 ±1,4	2 1 0 ±2,8
<i>Panicum laetum</i>	2 2 1 ±2,8	5 5 0 ±4,4	0 0 >10	0 0 >10	3 1 0 ±3,4
<i>Schoenefeldia gracilis</i>	1 1 0 ±1,4	0 0 >10	1 1 0 ±1,4	0 0 >10	4 4 0 ±3,9
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	1 1 0 ±1,4	3 1 0 ±3,4	5 1 1 ±4,4	0 0 >10	6 6 0 ±4,8
<i>Aeschynomene indica</i>	4 4 0 ±3,9	15 11 0 ±7,1	19 13 0 ±7,9	9 2 0 ±5,7	12 9 0 ±6,5
<i>Zornia glochidiata</i>	9 7 0 ±5,7	6 2 1 ±4,8	1 0 8 ±1,4	0 0 >10	4 1 1 ±3,9

Tableau 24. - Influence de la température sur la germination des semences récoltées au sol en Octobre.

Germination à l'obscurité, eau filtrée.

Cg, v, d : capacité, vitesse et délai de germination.

Les résultats consignés dans le tableau 24 permettent de noter qu' *Aristida adscensionis* est la seule espèce à présenter des capacités et des vitesses de germination élevées. La Cg correspondant à 30°C est significativement moins élevée que celles obtenues à 35° et 40°C. La germination de cette espèce est réduite à près de 50 % de son optimum à 45°C. *Aeschynomene indica* a un pouvoir germinatif faible. Toutes les autres espèces ont un pouvoir germinatif insignifiant : Cg inférieure à 10 % quelle que soit la température expérimentée, délai de germination élevé. Les données du tableau 24 font apparaître par ailleurs que l'alternance de température n'a pas d'effet majeur sur la germination. De plus l'optimum de température pour les espèces qui ont bien germées, se situe à 35°C-40°C, confirmant ainsi les résultats obtenus sur d'autres espèces tropicales (ROUSSEL 1979, TOTHILL 1977, MOTT 1974).

Une étude de la variabilité interannuelle a été menée à une température (35°C) pour confirmer ou infirmer la faiblesse du pouvoir germinatif des semences récemment disséminées. Les capacités de germination portées dans le tableau 25, confirment les résultats à savoir que :

- *Aristida adscensionis* germe bien malgré une assez grande variabilité interannuelle ;

- les autres espèces germent faiblement (*Aeschynomene indica*, *Zornia...*), voire pratiquement pas (*Panicum laetum*, *S. gracilis*, *Alysicarpus*).

Mentionnons le cas particulier de *A. mutabilis* qui offre une très grande variabilité interannuelle (1 % en 1981 à 35 % en 1979).

A l'exception d' *Aristida adscensionis* les semences sahéliennes nouvellement disséminées et morphologiquement mûres ont un pouvoir germinatif faible. Il est clair que les valeurs des capacités de germination rapportées dans cette expérimentation, sont incompatibles avec les densités de plantules observées dans la nature (jusqu'à 5000 plantules.m⁻²). Il y aurait donc au niveau des semences des phénomènes d'inhibition ou de dormance, qu'il convient d'analyser maintenant.

Espèces	1978	1979	1980	1981	1982
Aristida adscensionis	88 ± 6,5	61 ± 9,8	44 ± 9,9	55 ± 9,9	98 ± 2,8
C. biflorus mélange	-	18 ± 7,7	4 ± 3,9	9 ± 5,7	2 ± 2,8
grandes	-	22 ± 8,3	2 ± 2,8	12 ± 6,5	1 ± 1,4
petites	-	12 ± 6,5	0	7 ± 5,1	2 ± 2,8
Panicum laetum	5 ± 4,4	0	0	3 ± 3,4	1 ± 1,4
S. gracilis	0	0	0	8 ± 5,4	11 ± 6,3
Aristida mutabilis	2 ± 2,8	35 ± 9,5	5 ± 4,4	1 ± 1,4	27 ± 8,9
Zornia glochidiata	6 ± 4,8	4 ± 3,9	11 ± 6,3	16 ± 7,3	19 ± 7,9
Aeschynomene indica	15 ± 7,1	15 ± 7,1	16 ± 7,3	25 ± 8,7	19 ± 7,9
Alysicarpus ovalifolius	3 ± 3,4	3 ± 3,4	3 ± 3,4	1 ± 1,4	1 ± 1,4

Tableau 25 - Variabilité interannuelle de la capacité de germination (%) des semences récoltées en Octobre.
germination : 35°C, obscurité, eau filtrée

3.4 - Inhibition et dormance.

3.4.1 - Influence des prétraitements.

Placées dans des conditions de température et d'humidité favorables à la germination, certaines semences sont incapables de germer. Cette absence de germination peut être due soit à l'embryon et l'on parle de dormance soit aux enveloppes (péricarpe, téguments séminaux, glumelles des graminées). On parle alors d'inhibition péricarpique ou tégumentaire (COME 1976, CHAUSSAT et LE DEUNF 1975, BEWLEY et BLACK 1982).

La dormance ou les inhibitions peuvent être levées par différents prétraitements. On distingue :

- les prétraitements à action mécanique visant à diminuer la résistance des enveloppes (téguments séminaux des légumineuses, glumelles des graminées) à la pénétration de l'eau ;

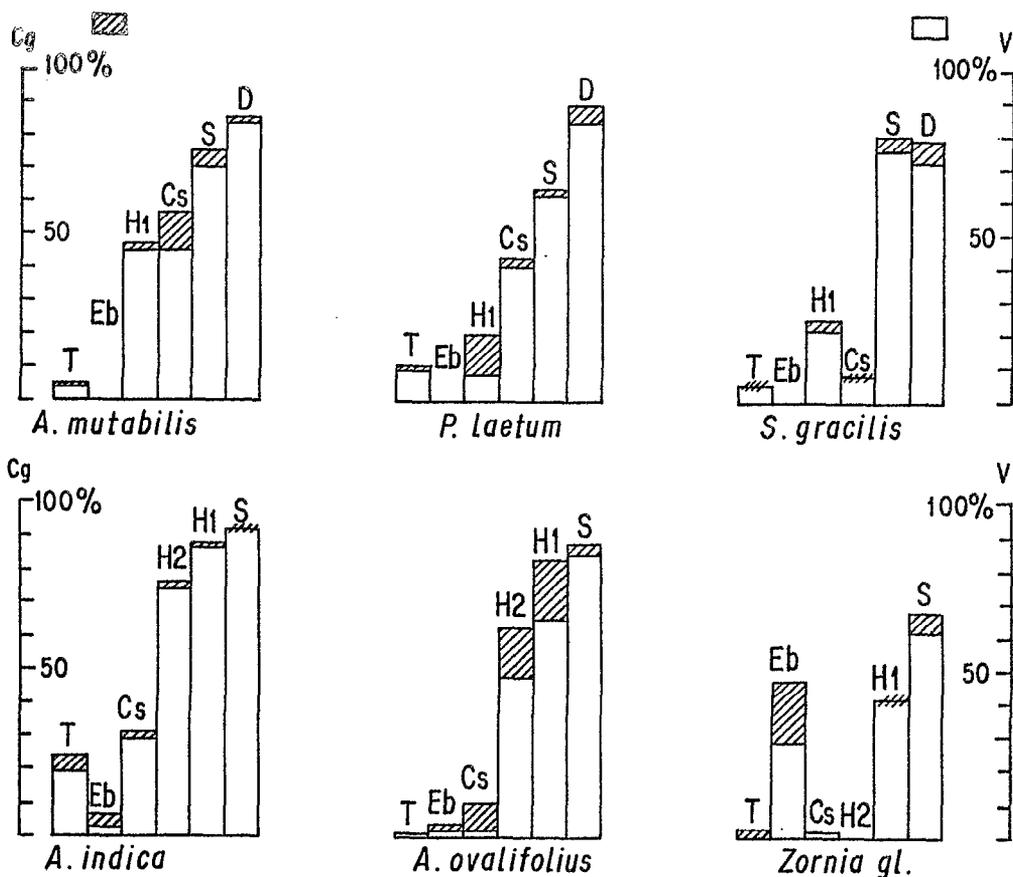


Fig. 37 - Influence des prétraitements sur la germination des semences.

Germination : 35°C, obscurité, eau filtrée

T : témoin ; Eb : eau bouillante ; Cs : chaleur sèche

H : acide sulfurique (H₁ : 5 mn (graminées) ou 1 h (légumineuses) H₂ : 2 h (légumineuses)

S : scarification ; D : dénudation

Cg : capacité de germination ; v : vitesse de germination

- des prétraitements à action physiologique, telle que chaleur sèche simulant l'action de l'élévation de la température du sol sur la semence.

Les prétraitements suivants, inspirés des travaux de AVEYARD (1968), GRANIER et CABANIS (1974) et SHAYBANY et ROUHANI (1976) ont été appliqués aux semences :

- témoin : aucun traitement (T)
- scarification entre deux feuilles de papier de verre (n° 2) (S)
- chaleur sèche : 60°C pendant 8 jours (Cs)
- immersion 5 mn dans l'eau bouillante (Eb)
- immersion dans l'acide sulfurique pur pendant 5 mn pour les graminées (H1) et 1 h (H1) ou 2 h (H2) pour les légumineuses.

Les semences sont ensuite abondamment rincées et immédiatement mises à germer à 35°C, à l'obscurité, dans de l'eau filtrée.

Les résultats sont représentés sur les histogrammes de la figure 37. Chez les graminées, il apparaît que la scarification et la dénudation des semences favorisent très nettement la germination en augmentant la capacité et la vitesse de germination. Chaleur sèche et traitement à l'acide sulfurique augmentent aussi significativement la germination. L'action de la chaleur sèche est plus favorable que celle de l' H_2SO_4 sauf chez *S. gracilis*. Par contre le prétraitement à l'eau bouillante, certainement trop brutal, détruit la faculté germinative des trois espèces.

Chez les légumineuses, la scarification et l'immersion dans l'acide augmentent et activent la germination. Le traitement à l'acide pendant 2 heures encore efficace chez *Aeschynomene indica* et *Alysicarpus ovalifolius*, est néfaste à la germination de *Zornia*. L'eau bouillante agit significativement sur la germination de *Zornia* alors qu'elle diminue la capacité de germination d' *A. indica*. Aucun effet de ce prétraitement n'est décelable chez *A. ovalifolius*.

Ces résultats permettent de conclure qu'il existe chez les trois papilionacées étudiées une inhibition de la germination due à l'imperméabilité des téguments séminaux. Cette inhibition est facilement levée par

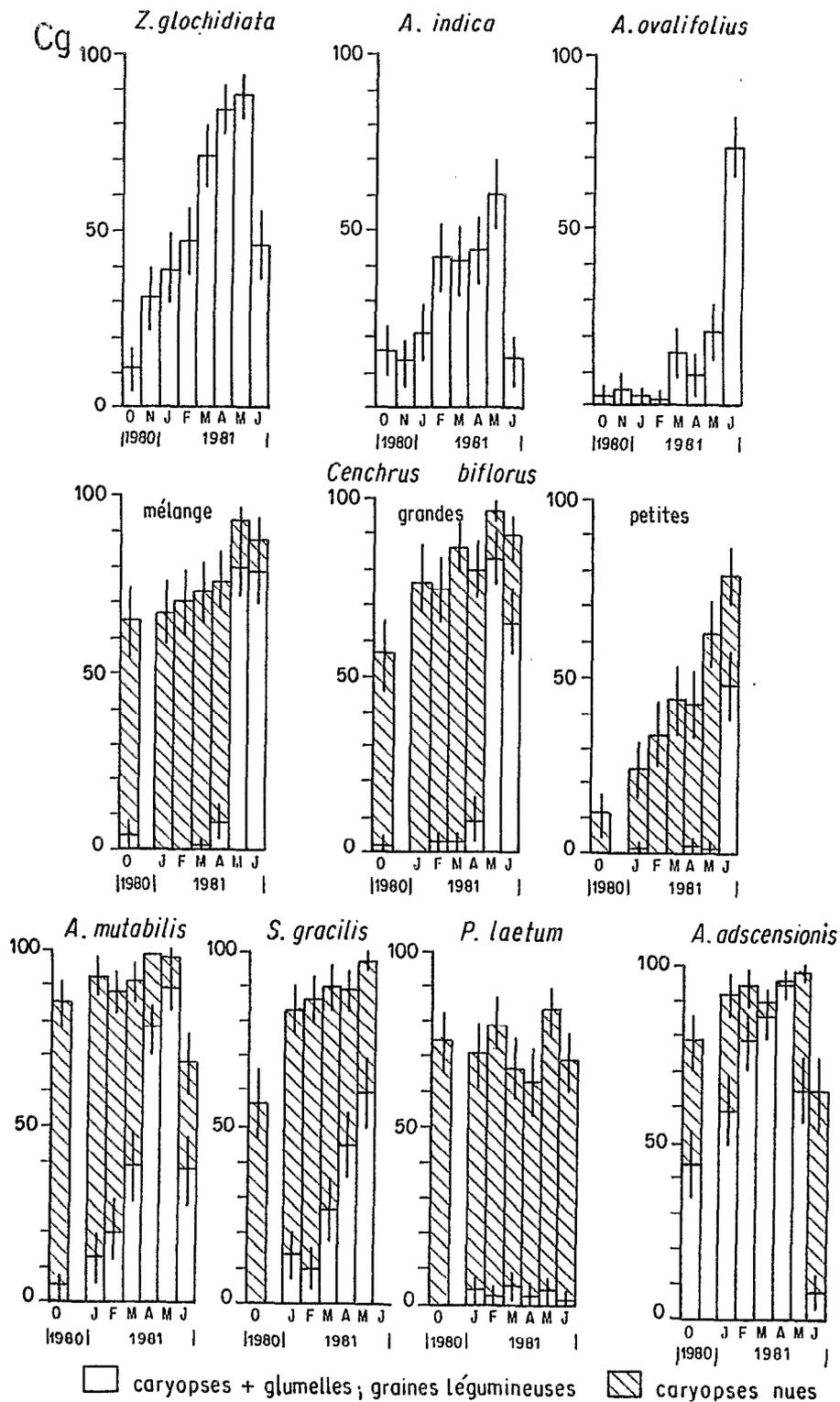


Fig. 38 - Variations saisonnières de la capacité de germination (Cg %) des semences et des caryopes.
 Germination : 35°C, obscurité, eau filtrée
 Récolte : 12.10.80 - 16.01.81 - 22.02.81 - 22.03.81
 17.04.81 - 21.05.81 - 05.07.81

tout prétraitement visant à diminuer la résistance des téguments (scarification, acide et eau bouillante chez *Zornia*)

De même, il existe chez les graminées expérimentées une inhibition exogène, due aux glumelles qui entourent le caryopse. Cette inhibition est levée par scarification et dénudation des semences, mais aussi partiellement par l'action de la chaleur sèche et l' H_2SO_4 .

3.4.2 - Variations saisonnières de la germination : post-maturation.

Les semences récoltées au début de la saison sèche germent peu en raison notamment d'inhibition tégumentaire. Cette propriété évolue-t-elle au cours de la saison sèche ? De plus, quelles sont les caractéristiques des semences lorsque les conditions écologiques deviennent favorables à la levée, c'est-à-dire au début de la saison des pluies ?

Les variations saisonnières des capacités de germination de semences récoltées au cours de la saison sèche et présentées sur la figure 38 permettent de répondre à ces questions. A l'exception de *P. laetum*, on y observe au cours du temps une augmentation sensible de la capacité de germination des semences (graines des légumineuses et caryopses avec glumelles des graminées) des différentes espèces. L'inhibition exercée par les téguments ou les glumelles est donc levée au cours de la saison sèche. La levée de cette inhibition est progressive chez *Zornia*, *Aeschynomene indica*, *Aristida mutabilis*, *A. adscensionis* et *S. gracilis*. Par contre elle est plutôt brutale pour les différents types de semences de *Cenchrus biflorus* et *Alysicarpus ovalifolius*.

La brusque augmentation de la capacité de germination se situe en Mai pour le mélange et les grandes semences de *C. biflorus* et semble être en rapport avec l'apparition des fortes chaleurs (cf. § 3.1.2, 1ère partie). Par contre pour *A. ovalifolius* et les petites semences de *C. biflorus*, elle ne se manifeste que pour les résultats relatifs à la récolte du début de mois de Juillet. Elle est à mettre en relation avec la forte pluie du 26.06.81 (47 à 75 mm suivant les stations) plutôt qu'avec des alternances de phases sèches et humides qui, bien qu'ayant existées au cours de ce cycle

végétatif, ont été rares et peu importantes en raison de la faiblesse des pluies des épisodes pluvieux.

Contrairement à ces deux cas, les résultats de la figure 38 montrent aussi que les capacités de germination de *Zornia*, *Aeschynomene indica*, *A. mutabilis* et *A. adscensionis* chutent au début du mois de Juillet (et même dès la fin Mai pour la dernière espèce). Cette caractéristique s'explique aisément par le fait que les semences testées à cette époque ne représentent qu'une fraction du stock et correspondent à celles qui n'ont pas levé au cours des premiers événements pluvieux en particulier celui du 26.06.81.

L'examen des histogrammes relatifs aux caryopses nues (figure 38) confirme l'existence de l'inhibition due aux glumelles. L'accroissement de la capacité de germination des caryopses nues de *S. gracilis* et de *C. biflorus* au cours du temps met aussi en évidence une dormance qui s'ajoute à l'inhibition exogène exercée par les glumelles.

Il est intéressant de s'attarder sur le cas de *C. biflorus* car il permet d'illustrer le comportement physiologique différent en relation avec la morphologie, précédemment signalé. Les résultats montrent que ce sont les grandes semences qui germent en priorité. En effet, les grands caryopses nues atteignent une Cg de 75 % dès les mois de Janvier-Février, alors qu'il faut attendre le début du mois de Juillet pour que les petits caryopses nues offrent des Cg comparables. Il en est de même pour les semences puisque la Cg maximum est atteint en Mai pour les grandes (83 %) et en Juillet pour les petites (48 %). *C. biflorus* constitue donc un nouvel exemple d'espèces, présentant une adaptation à la pluviométrie erratique par un comportement physiologique particulier des différents types morphologiques de semences. Les grandes semences sont aptes à germer précocement. Elles profitent des premières pluies et occupent rapidement le terrain, ce qui facilite la compétition avec les autres espèces. Par contre, les petites semences germent plus tardivement et assurent la pérennité de la population en cas de déroulement très défavorable de la saison des pluies.

3.4.3 - Discussion.

Ces résultats confirment que sauf exception (*A. adscensionis*) le pouvoir germinatif des semences nouvellement disséminées et morphologiquement mûres reste faible (Cg : 0 à 16 %). Ces mêmes semences récoltées en Mai-Juin, c'est-à-dire à une période où les conditions naturelles deviennent favorables à la levée présentent des capacités de germination nettement plus élevées (48 % à 89 %) à l'exception de *P. laetum* dont la germination ne peut s'effectuer que par ouverture ou élimination des glumelles.

Cet accroissement du pouvoir germinatif au cours du vieillissement a été mis en évidence chez de nombreuses graminées (HARTY 1972, ROUSSEL 1978, SMITH 1979, et SCHOLTES et RENARD 1983). Les semences subissent donc au cours de la saison sèche une post-maturation. Cette maturation physiologique se produit postérieurement à la maturation morphologique qui est la phase d'élaboration des éléments constitutifs de la semence. Elle correspond à la levée d'une inhibition exogène (téguments, glumelles) et d'une dormance pour certaines espèces (*S. gracilis*, *C. biflorus*). Chez les graminées, l'inhibition exercée par les glumelles semble être due beaucoup plus à la limitation du passage de l'eau (ANDERSON 1953) et de l'apport d'oxygène à l'embryon (RENARD et CAPELLE 1976), qu'à la présence d'un inhibiteur (ROST 1975). En effet, si tel était le cas, les semences scarifiées donc en présence d'une fraction de glumelles, n'auraient pas germé aux niveaux obtenus.

3.5 - Sécheresse simulée et germination.

La disponibilité en eau est un des facteurs les plus importants affectant la germination et l'établissement des plantules dans les régions arides et semi-arides. C'est pourquoi nous avons complété cette étude sur les propriétés germinatives des semences en comparant leur résistance à des contraintes hydriques, d'autant plus que l'influence de ce facteur n'a pas été étudiée sur les espèces spontanées contrairement aux plantes cultivées (arachide : GAUTREAU 1966 ; mil, sorgho : SAINT-CLAIR 1976, 1980).

3.5.1 - Conditions expérimentales.

Les semences sont récoltées au sol en Octobre 1981. L'organe utilisé dans l'expérimentation est le caryopse nu pour les graminées et la graine scarifiée pour les légumineuses, afin d'avoir des témoins présentant des taux de germination élevés.

Les essais sont effectués à 28°C à l'obscurité sauf au moment du dénombrement.

Les milieux d'incubation sont obtenus avec du polyéthylène glycol (carbowax 400). En effet, les conditions hydriques sont généralement simulées par des agents osmotiques tels que le NaCl, le mannitol et le polyéthylène glycol (SHARMA 1973, THIMANN et al. 1960, PARMAR et MOORE 1968...). Les agents osmotiques à faible poids moléculaire (NaCl, glycérol, mannitol) peuvent simuler des déficits hydriques, mais ils traversent la membrane et induisent des phénomènes de toxicité qui sont plus complexes que l'effet de la sécheresse (SHARMA 1973). Le PEG de poids moléculaire élevé (20 000) utilisé par WILLIAMS et PHILLIPS (1971), MANOHAR (1966), est une macromolécule qui ne traverse pas la membrane. LAGERWEF et al. (1961) ont cependant montré, qu'appliqué dans sa forme commerciale sans purification, le PEG à poids moléculaire élevé est toxique en raison de la présence d'ions Al^{3+} et Mg^{2+} . Cet effet est contesté par MANOHAR (1966). Il est vrai que l'observation des premiers auteurs est tirée d'une culture hydroponique tandis que celle du deuxième résulte de l'étude de la germination du pois. La durée de l'expérimentation, le métabolisme des plantes étant très différents, il n'est pas étonnant d'avoir ces avis opposés.

Nous avons retenu le PEG C400, utilisé avec succès par SAINT-CLAIR (1980) sur des plantes sahéliennes (mil, sorgho). Les concentrations en PEG 400 et la gamme de potentiel hydrique qui en résulte sont consignées dans le tableau 26.

PEG C 400 %	0	4	7	10	12	15	17,5	20
Pot.hydrigue à 28°C (bar) SAINT-CLAIR 1980	0	-3,3	-5,7	-8,6	-10,9	-14,4	-18,6	-21,7

Tableau 26 : Potentiels hydriques des milieux d'incubation.

Pour éviter la concentration des milieux d'incubation, une quantité d'eau évaluée en moyenne à 0,9 ml a été ajoutée quotidiennement aux solutions. Une vérification du potentiel hydrique de la solution initiale et au dixième jour d'incubation a été effectuée au psychromètre Wescor C52. Les résultats présentés par PALE (1982) montrent qu'il n'y a pratiquement pas de variations du potentiel hydrique pendant la durée de l'expérimentation (2-3 % pour les concentrations les plus élevées).

3.5.2 - Influence du stress hydrique sur la germination.

L'examen des courbes de germinations correspondant aux différents potentiels hydriques expérimentés (figure 39) montre que quelle que soit l'espèce considérée, l'abaissement du potentiel hydrique diminue non seulement la capacité de germination mais aussi la vitesse. De plus le délai de germination augmente.

La capacité de germination de *Zornia* passe par exemple de 96 % à ψ 0 à ψ -8,6) à 3 % (ψ -21,7). La vitesse de germination de *Panicum laetum* qui est de 97 % à ψ 0 s'annule à partir de ψ -14,4. Quant au délai de germination le cas de *Aeschynomene indica* constitue un bon exemple, puisque le délai passe de 0 jour (ψ 0 à ψ -10,9) à 1 jour à ψ -14,4 puis à 4 jours et 7 jours respectivement à ψ -18,6 et ψ -21,7.

Les résultats soulignent aussi que certaines espèces sont capables de germer à des potentiels très bas. C'est le cas notamment de *A. indica*, *Zornia* et *Aristida adscensionis* qui ont des capacités de germination de l'ordre de 20 % à un potentiel de -18,6 bar et surtout *P. americanum* qui a ψ -21,7 présente une Cg de 67 %, avec une vitesse de $53 \% \cdot J_2^{-1}$.

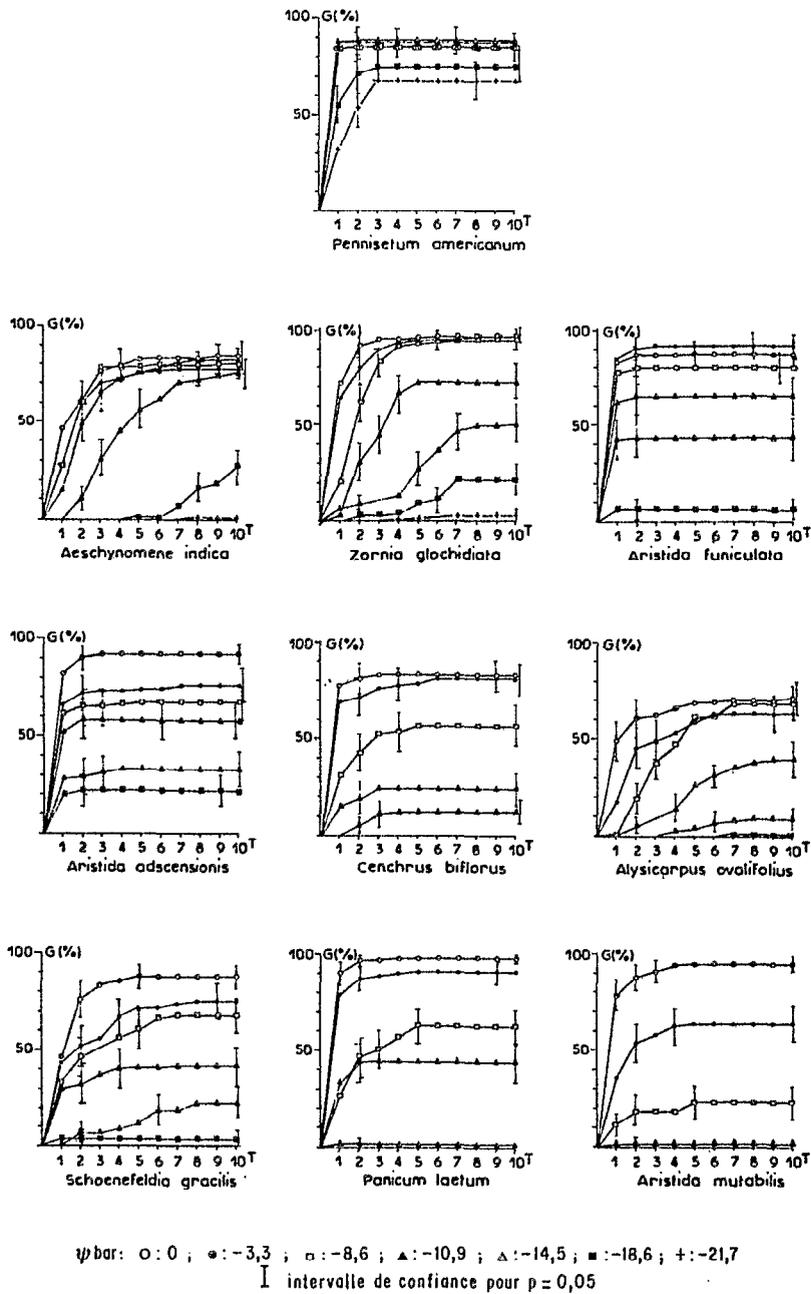


Fig. 39 - Evolution du taux de germination (G %) en fonction du temps (T) pour différents potentiels hydriques développés par du P.E.G. 400.
 Germination : obscurité, 28°C, milieu n

La valeur limite du potentiel pour laquelle la quasi-totalité des espèces ne germent plus est très basse ($\psi -21,7$). Celle-ci est généralement plus basse que celles données dans la littérature : $\psi -7,5$ pour *Aristida contorta*, *Helipterum craspedioides* (MOTT 1974) ; $\psi -10$ pour *Hieracium pratense* (PANEBIANCO et WILLEMSEM 1976). Elle se rapproche de la valeur rapportée par SHARMA (1973) pour *Lolium perenne*, *Danthonia caespitosa* et *Atriplex nummularia*.

Les variations de la capacité de germination exprimées par rapport au témoin sont représentées sur la figure 40. Il est en effet nécessaire d'exprimer les résultats de cette manière pour comparer les différentes espèces, puisque la capacité de germination du témoin n'est pas la même pour tous les taxons.

L'examen des résultats permet de distinguer trois types de réponses au stress hydrique :

- le premier type est représenté par *Aristida mutabilis*. Cette espèce est très sensible au déficit hydrique puisque dès $-8,6$ bar la capacité de germination n'atteint que 25 % du témoin. La germination devient nulle pratiquement à partir de $-10,9$ bar ;

- le deuxième type de comportement est représenté par *Pennisetum americanum* et *Aeschynomene indica*. Ce sont des espèces tolérantes aux stress hydriques tout au moins au cours de la phase de germination, puisqu'elles germent bien jusqu'à $-14,4$ bar. La capacité de germination par rapport au témoin à ce potentiel est de 99 % pour la première espèce et 89 % pour la deuxième. Une différence apparaît cependant entre les deux taxons puisque *Pennisetum* germe encore à 78 % du témoin pour le potentiel le plus bas, alors que *Aeschynomene indica* ne germe plus ;

- le troisième type de comportement comprend les espèces suivantes : *Aristida adscensionis*, *Zornia glochidiata*, *Aristida funiculata*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Panicum laetum*.

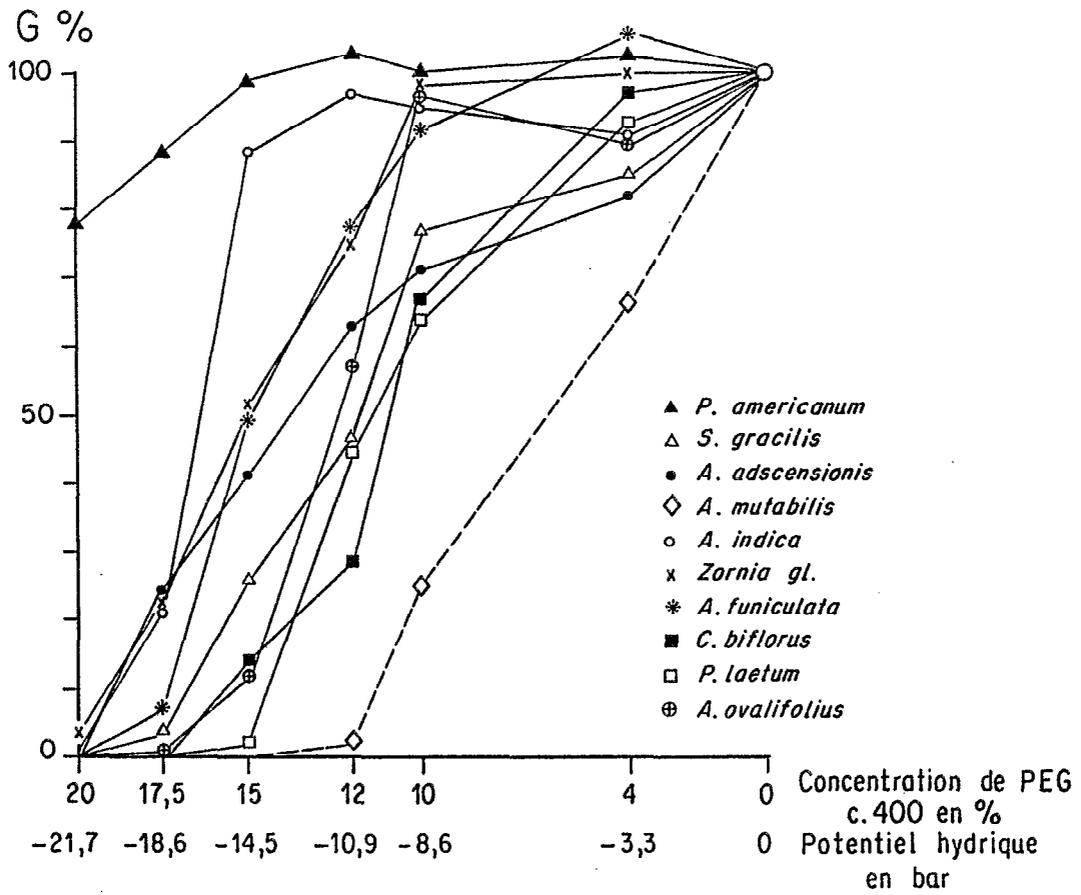


Fig. 40 - Influence du potentiel hydrique sur la capacité de germination exprimée par rapport au témoin.
Germination : obscurité, 28°C, milieu n

Elles ont un comportement intermédiaire c'est-à-dire qu'elles ne germent pas à ψ -21,7 (la capacité de germination par rapport au témoin est nulle), et que les réponses au potentiel ψ -18,6 sont peu importantes ; elles sont inférieures à 30 % de la capacité de germination du témoin. Par contre à ψ -14,4, elles germent peu, mais certaines comme *Zornia* et *Aristida funiculata* ont une capacité de germination atteignant 50 % du témoin.

Pour essayer de donner un classement par ordre de tolérance, nous avons pris le potentiel -14,4 comme référence, car c'est celui pour lequel les espèces ont la plus grande amplitude de variation. L'ordre de tolérance est le suivant : *Pennisetum americanum*, *Aeschynomene indica*, *Zornia glochidiata*, *Aristida funiculata*, *Aristida adscensionis*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Panicum laetum*, *Aristida mutabilis*.

3.5.3 - Discussion.

L'étude de l'influence des contraintes hydriques simulées par l'utilisation d'agents osmotiques, montre que les espèces sahéliennes étudiées germent dans leur grande majorité à des potentiels hydriques très bas. Ce caractère suggère bien l'adaptation de ces espèces à la sécheresse, tout au moins au cours de la phase de germination.

La répartition des légumineuses et des graminées dans l'échelle de tolérance ne répond pas à des règles précises. De plus, il est difficile d'après les résultats présents, de relier la tolérance aux contraintes hydriques au moment de la germination à l'écologie de l'espèce. A titre d'exemple, *P. americanum* et *Aristida mutabilis* qui représentent les extrêmes dans les réponses au stress hydrique, sont toutes les deux des plantes psammophiles. De même, *Aeschynomene indica* et *Panicum laetum* qui s'opposent aussi nettement vis-à-vis des réponses au déficit en eau sont des espèces hygrophiles.

Ce n'est donc pas la résistance au déficit hydrique au moment de la germination qui est le critère prédominant de la répartition écologique des taxons. De même, la faculté de germer à des bas potentiels hydriques ne peut être considérée comme un indice de tolérance à la sécheresse de plantes

adultes (MANCHAR et al. 1968) ou comme critère de sélection de variétés adaptées à la sécheresse (SAINT-CLAIR 1980).

Par contre pour les différentes espèces d'un même habitat, la tolérance au stress hydrique au moment de la germination, constitue un avantage ou un inconvénient suivant les conditions qui suivent la germination.

Lorsque les conditions sont favorables au cours de l'établissement, la tolérance du stress est un atout car elle permet à l'espèce de se fixer dans des conditions marginales, donc d'occuper rapidement l'espace et de remporter la compétition avec les autres espèces. C'est le cas notamment de *Aeschynomene indica* par rapport à *P. laetum* dans les bas-fonds argileux, de *Zornia* par rapport à *A. mutabilis* sur les sols sableux et des *A. funiculata* et *adscensionis* par rapport à *S. gracilis* sur les glacis.

Lorsque les conditions de germinations marginales (bas potentiel) ne sont pas suivies d'évènements pluvieux favorables à l'établissement des plantules, il semble que c'est la stratégie de *A. mutabilis*, espèce la moins tolérante au stress hydrique au moment de la germination qui soit la meilleure adaptation à la pluviométrie aléatoire. Cette espèce attend en effet qu'un certain seuil d'humidité soit atteint pour germer, alors que le maintien des plantules issues d'une germination à -22 bar tel que pour *P. americanum* est pratiquement impossible.

Au niveau du peuplement, c'est l'existence de ces comportements variés et opposés, qui constitue une excellente adaptation à la variabilité des conditions écologiques.

4 - ADAPTATION DES ESPECES AUX CONDITIONS SAHELIENNES DE SEMI-ARIDITE.

L'adaptation des espèces végétales aux conditions sahéliennes de semi-aridité se situe à deux niveaux :

- l'adaptation à la contrainte sécheresse, effet permanent des conditions d'aridité ;

- l'adaptation au risque sécheresse, c'est-à-dire au caractère aléatoire des conditions édapho-climatiques qui règnent au moment de la phase de levée et d'établissement.

La majorité des espèces passent la longue saison rigoureusement sèche sous forme de graine, c'est-à-dire à l'état de vie ralentie. Cela constitue une excellente stratégie d'adaptation aux sévères conditions d'aridité. Par ailleurs la durée de vie qui s'étend sur plusieurs années, permet de surmonter les conditions exceptionnelles de sécheresse telle qu'une année sans pluie.

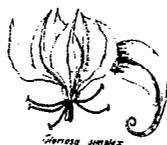
L'abondante production de semences et l'existence de mécanismes physiologiques (inhibition, dormance, post-maturation) constituent une bonne adaptation à la forte variabilité de la pluviométrie. En effet, une grande quantité de semences permet de faire face aux accidents climatiques en assurant la levée lors des phases favorables qui se succèdent au cours de la période d'établissement. De plus, ces caractères permettent d'éviter ou de limiter les levées dans des conditions très défavorables à l'établissement, telles que pluies tardives à la fin de la saison des pluies (Octobre) ou pluies exceptionnelles précédant la saison des pluies (Février, Mars). Ces mécanismes permettent d'attendre les meilleures conditions de température et d'humidité.

La tolérance d'un bon nombre d'espèces au stress hydrique au moment de la germination constitue un avantage car elle autorise d'une part l'établissement de ces espèces dans des zones que les taxons sensibles à la sécheresse ne peuvent coloniser et d'autre part, l'occupation rapide de l'espace. Ce caractère leur permet d'être plus compétitives avec d'autres espèces qui viendraient à s'implanter ultérieurement.

La vitesse de germination est reconnue (GRUPP 1977, BREMAN et al. 1980, Mc KEON 1985) comme un facteur important du déterminisme du succès de l'établissement des taxons dans les milieux où la disponibilité en eau est limitée et aléatoire. Les observations effectuées dans le cadre de cette étude soutiennent cette idée. Des contradictions apparaissent cependant dans le choix des critères à retenir pour la définition de la vitesse de germination. Ainsi, les critères retenus par DE VRIES et DJITTEYE (1982),

CISSE (1986), basés sur la date d'apparition des plantules in situ après des séquences pluviométriques, nous paraissent critiquables car elles ne prennent pas en compte, le stock de graines au sol des différentes espèces, la position des semences dans le sol, l'hétérogénéité des semences. De plus, il y a des imprécisions notamment en ce qui concerne le volume des pluies à prendre en considération. Les conditions d'observations ne sont donc pas identiques pour les différentes espèces et de ce fait n'autorisent pas des comparaisons interspécifiques. Par ailleurs le fait de s'intéresser à des plantules établies, implique que l'on ait dépassé le stade de germination proprement dit et que l'on intègre déjà une partie de la croissance. Ces considérations nous obligent à parler dans ce cas beaucoup plus de vitesse d'occupation de l'espace que de vitesse de germination.

Des réponses variées, voire opposées, ont été observées pour les différentes espèces. Ces comportements différents sont interprétés comme étant la meilleure stratégie adaptative aux caractères aléatoires du milieu. En effet, cette variabilité des comportements intra et interspécifique permet toujours à certains taxons, de trouver les conditions qui sont favorables à leur germination et à leur établissement et d'assurer ainsi la pérennité du peuplement.



CHAPITRE III



PRODUCTION DES SYSTEMES ECOLOGIQUES

La production primaire est une donnée de base en écologie car elle permet de comprendre le fonctionnement d'un écosystème (LAUENROTH et WHITMAN 1977, FOURNIER et LAMOTTE 1983). En milieu sahélien, la connaissance de la production primaire facilite la mise en valeur et la gestion des systèmes écologiques, dont la végétation spontanée constitue l'alimentation de base du bétail.

Les résultats présentés dans ce chapitre porteront d'une part sur l'étude des cycles saisonniers de production des phytocénoses (mode de croissance, phénologie, productivité) qui renseignent sur le fonctionnement de l'écosystème. Les données relatives à cet aspect sont essentiellement issues des observations réalisées dans les six unités décrites dans le

chapitre I (partie III) et plus spécifiquement de celles obtenues en situation protégée. Ce chapitre traite d'autre part de l'estimation de la production annuelle du secteur écologique afin de définir les potentialités de production des matières transformables par l'animal (KOECHLIN et MENAUT 1981). Les observations concernent le bassin versant. Les variations spatiales et interannuelles de la production seront reliées aux facteurs écologiques en particulier au facteur hydrique (pluie, pluie efficace). Il en sera déduit une fonction de production permettant d'estimer les potentialités pastorales de la zone d'étude. En effet l'estimation du stock fourrager à la fin de la saison des pluies constitue un des besoins prioritaires des responsables de la production animale en région sahélienne (BOUDET in BARRAL et al. 1983).

1 - DEFINITIONS ET METHODES D'ETUDES.

On appellera biomasse la fraction vivante et nécromasse la fraction morte sur pied et au sol de la matière végétale (DUVIGNEAUD 1974). La phytomasse représente le poids de matière sèche du total de la matière vivante et morte.

On distingue la production primaire nette qui est la quantité totale de matière produite, déduction faite des pertes par respiration, de la production brute qui est le produit de la photosynthèse totale. La meilleure estimation de la production nette est celle qui prend en compte l'accroissement de biomasse, les variations de la nécromasse et la quantité de matière disparue pendant un intervalle de temps considérée.

La méthode des plots appariés proposée par WIEGERT et EVANS (1964) modifiée par LOMNICKI et al. 1968, permet d'estimer la production nette en considérant tous les paramètres précédents. Cette méthode de calcul reprise et modifiée par CORNET (1981 a) a été appliquée à la détermination de la production nette de formations herbeuses sahéliennes du Sénégal.

Cet auteur définit la production nette par les relations :

$$Y = b_i - b_o + m_i$$

$$m_i = \frac{k a_i}{1 - e^{-kt}} \quad \text{et } k = - \text{Log} \left(\frac{g_i - a_i}{g_o} \right) \frac{1}{t_i - t_o}$$

avec Y : production primaire nette entre t_o et t_i

m_i : matière morte formée entre t_o et t_i

k : taux de disparition de la matière morte

et

b_o, i : la biomasse au temps t_o et t_i

g_o, i : la nécromasse au temps t_o et t_i

a_i : la matière morte accumulée entre t_o et t_i .

L'utilisation de cette méthode nécessite que l'unité de végétation étudiée soit protégée des grands herbivores de façon à ne pas annuler le terme g_o . De plus l'évaluation de m_i demande de longues manipulations. Ce sont là des conditions difficiles à réunir dans le contexte d'une forte pression animale tel que celui qui existe dans la région. Par ailleurs, elle ne répond pas à la totalité des objectifs de ce travail dont certains sont orientés vers l'estimation de la charge pastorale de la zone d'étude.

Aussi deux modes opératoires ont été retenus. Au niveau de la station écologique (cf. partie II, § 11) les variations décennales de la biomasse et de la nécromasse ont été suivies. Dans le cas des parcelles protégées, la production annuelle potentielle est évaluée par la différence maximale entre la phytomasse et la nécromasse observées au cours du cycle (FOURNIER et LAMOTTE 1983). Dans le cas des parcelles témoins la production annuelle est identifiée à la phytomasse maximale observée au cours du cycle végétatif. Il en est de même au niveau du secteur écologique (partie II, § 12). Cette méthode de la phytomasse maximale est considérée comme très acceptable pour les communautés d'annuelles à cycle court (SINGH et al. 1975 MAC NAUGHTON 1968). De plus, c'est une méthode appropriée aux études relatives à des objectifs d'aménagement qui nécessitent des mesures extensives (FOURNIER et LAMOTTE 1983). Par contre elle ne tient pas compte

de l'évolution du matériel mort et entraîne donc une sous-estimation de la production nette allant de 10 à 30 % selon les auteurs (BILLE 1977, WALLENTINUS 1973 et MALONE 1968 in SINGH et al. 1975). De plus il est erroné de parler de production nette dans le cas de ces formations pâturées car une fraction de la phytomasse est consommée par le bétail et une autre dégradée par piétinement. La valeur de la phytomasse maximale observée doit donc être considérée comme un "estimateur" de cette production nette.

Une comparaison de la production potentielle (station protégée) à cet estimateur (équivalent production = production réelle) sera réalisée au chapitre V pour évaluer la sous-estimation obtenue par ce biais. Il faut cependant remarquer que cette valeur représente une réalité puisque c'est cette quantité de matière végétale qui constitue le disponible fourrager herbacé sur lequel s'alimenteront les animaux pendant toute la durée de la saison sèche.

2 - CARACTERES DES CYCLES DE PRODUCTION A L'ECHELLE DE LA STATION ECOLOGIQUE.

2.1 - Les cycles de production , phénologie.

2.1.1 - Les cycles et leur variabilité.

A titre d'exemple, la figure 41 donne les variations saisonnières du poids de matière sèche des différents compartiments végétaux de la station protégée de Windé au cours du cycle 1980. Les courbes présentées corroborent les résultats obtenus par différents auteurs dont CORNET 1981 b, HIERNAUX 1984, et par nous mêmes pour la seule année 1977 (GROUZIS 1979). On distingue différentes phases :

La première correspond à la phase d'établissement. Elle s'étale de la première pluie occasionnant une levée jusqu'à l'installation des "pluies régulières" (HIERNAUX 1984) déterminant le début de la phase de croissance continue (CISSE 1986) qui se situe généralement dans la première décade de Juillet. Nous avons vu au chapitre II (partie III) que les

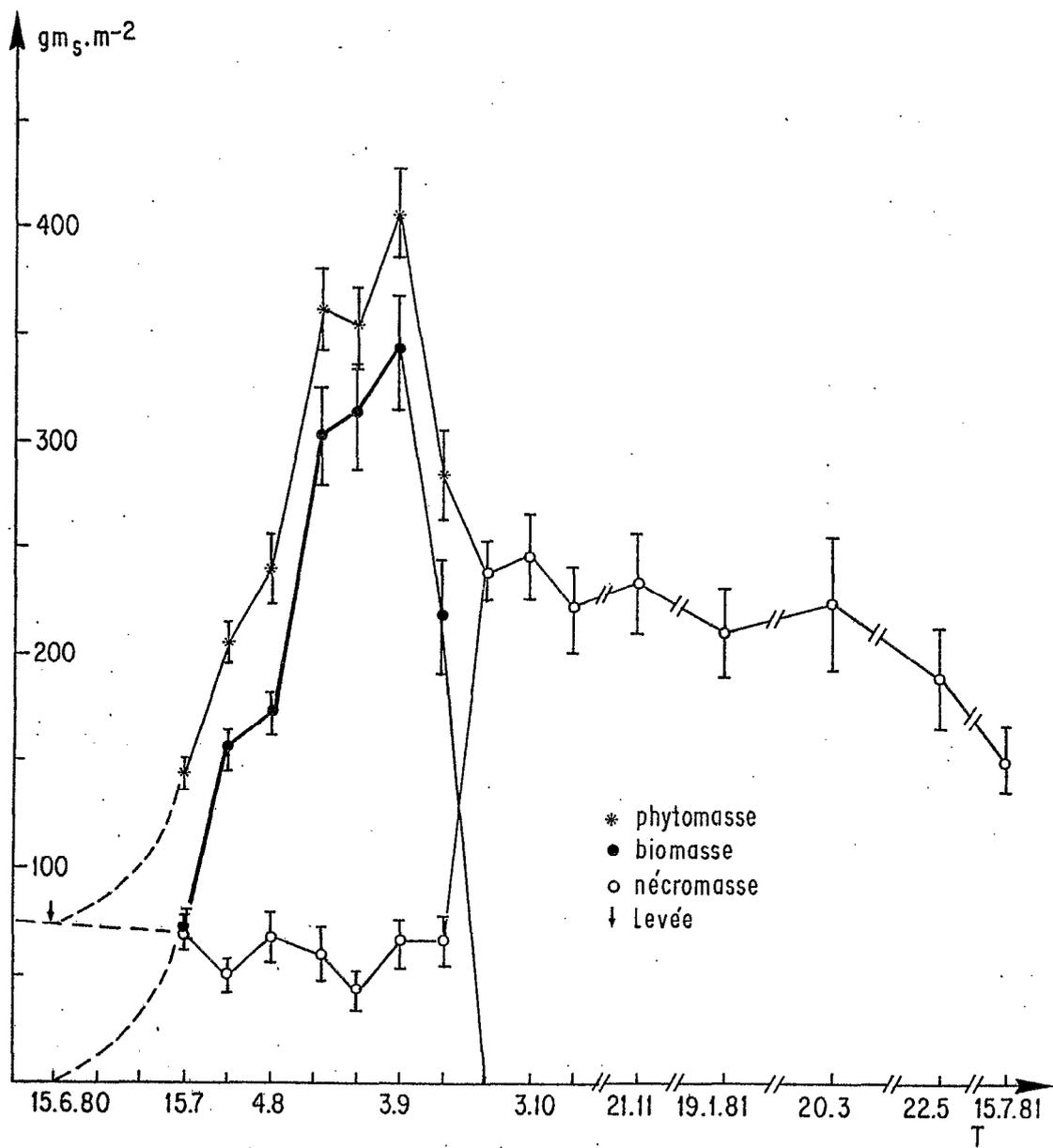


Fig. 41 - Variations saisonnières des différents compartiments végétaux (Windé protégée 1980).

interactions entre la nature du sol, les évènements pluvieux, la capacité de germination et la résistance à la sécheresse des espèces, qui se déroulaient au cours de cette phase, déterminaient la composition floristique du tapis végétal. On y note par ailleurs une dégradation de la nécromasse issue du cycle précédent.

La seconde phase se déroule généralement du début du mois de Juillet à la fin du mois d'Août. C'est une période de croissance rapide, pratiquement linéaire et correspondant à l'élaboration active de la matière vivante, rendue possible par des conditions hydriques généralement favorables (CORNET 1981 a). Elle est déterminante pour la production. On définit au cours de cette phase une productivité moyenne correspondant à l'accroissement de matière végétale par unité de surface et de temps :

$$g_{MS} \cdot m^{-2} \cdot j^{-1} \cdot p = - \sum_{i=1}^n (b_i - b_0) / (t_i - t_0)$$

et une vitesse moyenne de croissance relative. Celle-ci exprime la productivité par unité de matière végétale initiale :

$$g_{MS} \cdot g^{-1} \cdot j^{-1} \cdot VRC = - \sum_{i=1}^n (b_i - b_0) / b_0 (t_i - t_0)$$

Dans ces équations b_i et b_0 représentent respectivement la biomasse au temps t_i et t_0 , et n le nombre d'intervalles considérés.

Notons que ces calculs portent sur la biomasse et non sur la phytomasse pour éviter d'y intégrer une fraction végétale issue du cycle antérieur.

La troisième est une phase de stabilisation de la phytomasse, relativement courte pour les systèmes écologiques étudiés. Elle correspond à la maturation de la communauté végétale et donc à la phytomasse optimale observée. C'est cette valeur qui est utilisée pour exprimer à une certaine approximation près, la production annuelle.

En considérant qu'à l'instant t :

$$Ph = b + g \quad \text{avec IC} = \pm t \sqrt{\frac{s_b^2 + s_g^2}{n_b + n_g - 2}} \quad (\text{COCHRAN 1963})$$

la production annuelle des parcelles protégées s'exprime par :

$$Pr = Ph \text{ max} - g \text{ min}$$

car il faut tenir compte de la matière végétale qui subsiste d'une année sur l'autre. Pour les parcelles témoins où la nécromasse est inexistante en début de cycle en raison du pâturage, l'équivalent production est identifiée à la phytomasse maximale.

La maturation est suivie d'une courte phase de décroissance de la phytomasse. La biomasse chute et la nécromasse qui diminuait lentement auparavant (dégradation de la nécromasse du cycle antérieur compensée par l'apport de matière morte du cycle suivi) augmente brusquement. Cette phase correspond à la dispersion des diaspores, à la disparition des espèces précoces à cycle court et à la consommation primaire.

La dernière phase s'étend du début du mois d'Octobre jusqu'au mois de Juin de l'année suivante. La décroissance de la phytomasse est lente tout au moins dans les stations protégées. Les pertes correspondent essentiellement à la consommation primaire (termites...), à l'enfouissement, à des transferts dus au vent et au prélèvement par les animaux domestiques dans les zones pâturées.

Cette description peut être considérée comme représentative d'une situation moyenne. En fait on observe une grande variabilité due notamment à la répartition des précipitations, à la nature du substrat édaphique et à l'hétérogénéité de la structure spatiale de la végétation.

La figure 42 montre, pour une même unité de végétation, l'importance du cycle pluviométrique (cf. chap.I, partie III) sur le déroulement du cycle de phytomasse et la phénologie. On observe notamment que la première levée s'effectue le 6 juin pour l'année 1979 et seulement le 15 juillet pour 1978. La floraison de l'espèce dominante se situe au début du mois d'Août au cours de l'année 1981. Elle est repoussée à la fin Août en 1979.

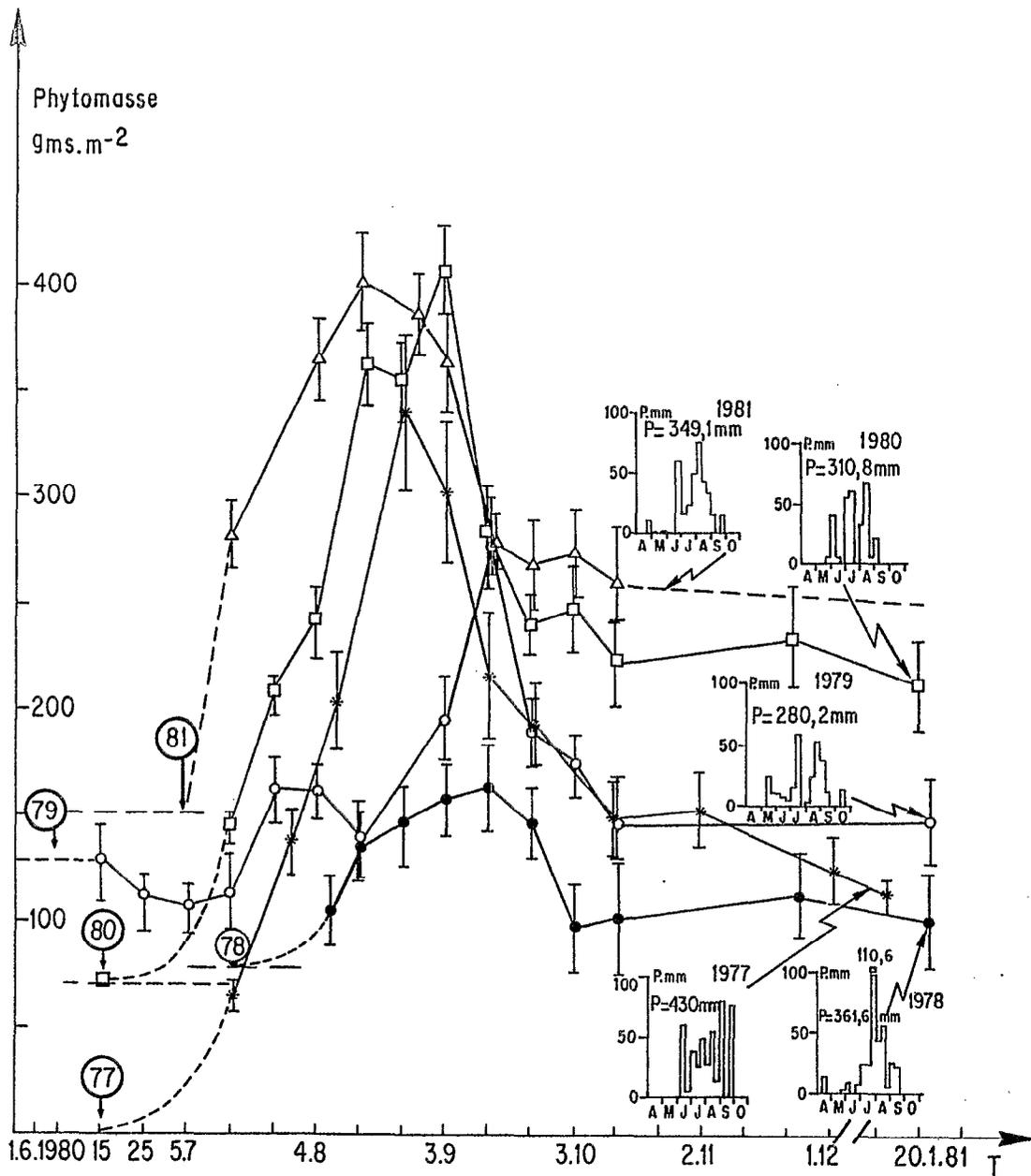


Fig. 42 - Variations interannuelles des cycles de phytomasse en relation avec la distribution décadaire des pluies (station Windé protégée).

Les courbes de phytomasse observées en 1977, 1980 et 1981 correspondent à la forme typique décrite précédemment. En 1978 la forme de la courbe est similaire. Elle est par contre décalée en raison du début tardif de la saison pluvieuse. De plus la concentration des pluies fin Juillet-début Août a provoqué une submersion durable coïncidant avec la phase de croissance rapide. Cette situation a fortement diminué la production cette année et favorisé des espèces plus hygrophiles (cf. chapitre V).

En 1979, la courbe de phytomasse reflète étroitement la distribution bimodale des précipitations décadaires. Le sévère déficit pluviométrique de la troisième décade de Juillet et de la première d'Août entraîne une forte mortalité et une chute de phytomasse.

L'influence du substrat édaphique pour un même cycle pluviométrique (1980) est illustrée par les variations saisonnières de la biomasse des différentes unités de végétation (figure 43). Bien que les premières levées soient concentrées dans la deuxième décade de Juin (10 à 17/6) pour l'ensemble des unités étudiées, l'établissement est plus tardif dans les glacis de Bas Kolel et de Kouni (21 et 27/7) que dans les autres biotopes (1ère décade de Juillet). Des différences notables s'observent dans les niveaux de production et de productivité. Celles-ci s'expliquent non seulement par le niveau de fertilité plus élevé dans les dépressions (chapitre I, partie III), mais encore par un bilan hydrique plus défavorable dans les glacis.

Les variations de biomasse se présentent sous la forme d'une courbe unimodale à l'exception de celle relative à la station de Kolel qui offre deux pics décalés d'un mois. Le premier pic correspond à la production d'espèces précoces localisées dans les dépressions (*Tribulus terrestris...*) tandis que le second reflète la phénologie d'autres espèces dominantes telles que : *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida mutabilis...* Ce caractère est dû à l'hétérogénéité de la structure spatiale de la végétation (GROUZIS 1979), dont les différents éléments, c'est-à-dire les "unités floristiquement écologiquement et physionomiquement différentes" (GOUNOT 1969) ont parfois un comportement phénologique distinct en relation avec les microvariations des conditions écologiques auxquelles ils sont associés.

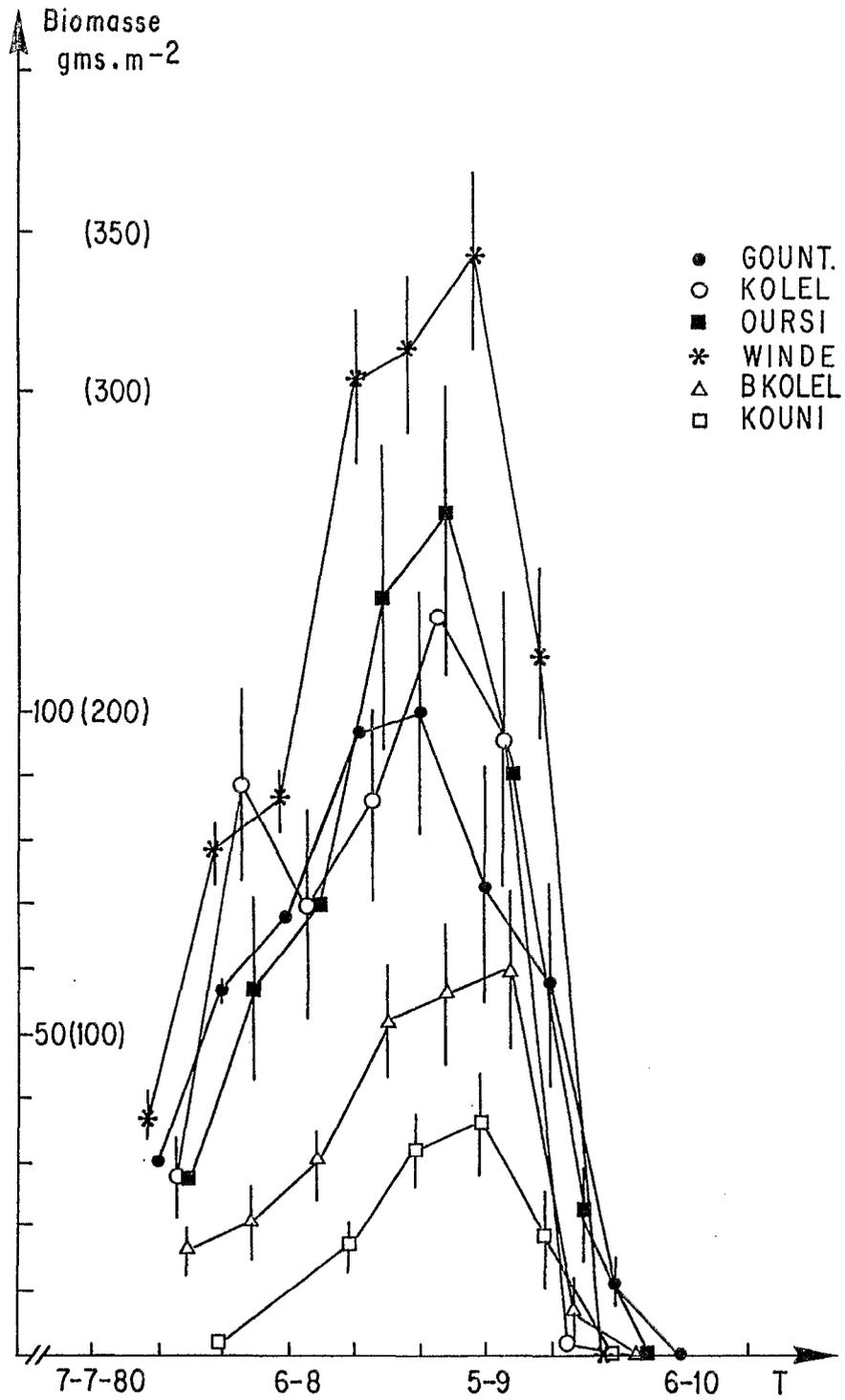


Fig. 43 - Variations intersites des cycles de biomasse (stations protégées, année 1980).

La figure 44 relative à la station du glacis de Bas Kolel illustre parfaitement la complexité du cycle phénologique dans des unités à structure hétérogène. On peut y opposer les glacis aux microdépressions qui se comportent en impluvium (SICOT 1983). L'accumulation d'eau y permet la mise en place plus rapide du peuplement végétal et le déroulement plus précoce du cycle phénologique. C'est ainsi que la levée a lieu le 21.5 dans les dépressions et seulement le 1/7 dans les glacis (figure 44). A la mi-juin des individus de *Panicum laetum*, *Aristida adscensionis* et *A. hordeacea* sont en fleurs et en fruits dans les zones favorables, alors que dans les glacis la levée n'est pas encore assurée. D'autres levées s'effectuent au cours du temps de sorte que le cycle de phytomasse résulte d'une superposition de plusieurs cohortes.

Il est évident que l'on doit tenir compte de cette hétérogénéité pour l'évaluation de la production. Dans les unités constituées d'une mosaïque d'éléments, l'échantillonnage est stratifié.

La phytomasse moyenne de l'unité (X_u) est définie par la relation :

$$X_u = ax_1 + bx_2 + ix_i$$

dans laquelle x_i représente la phytomasse moyenne et i la proportion de l'élément i . Cette proportion variable d'une année sur l'autre est évalué chaque année sur l'hectare de référence (cf. chapitre V).

La production annuelle d'une telle unité (figure 44) est égale à la somme des différences maximales observées pour chaque pic. De plus seules les phases ascendantes sont considérées pour l'évaluation de la moyenne annuelle de la productivité et de la vitesse relative de croissance. Les différences de phénologie observées dans de tel cas ne sont pas dues uniquement à l'utilisation plus ou moins rapide de l'eau et des éléments nutritifs, mais encore aux rapports entre photopériodisme et date de germination (PENNING DE VRIES et DJITTEYE 1982). Ces auteurs ont en effet montré que certaines plantes sahéliennes sont sensibles à l'induction florale dès leurs premiers stades, de sorte que la durée du cycle est en relation avec la situation de la germination par rapport au solstice d'été.

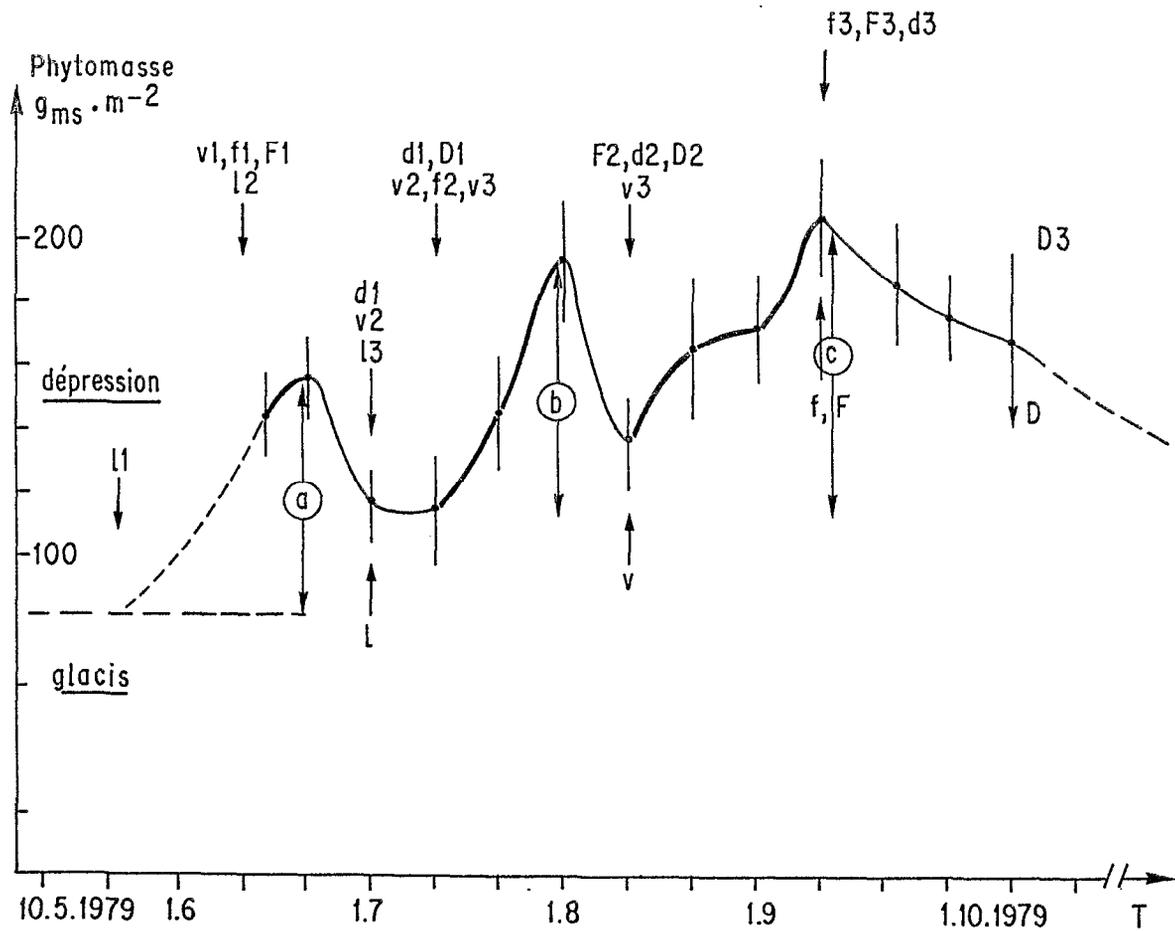


Fig. 44 - Variation du cycle avec l'hétérogénéité de la structure de la végétation (station Bas Kolel 1979).

l : levée ; v : stade végétatif ; f : stade floraison

F : stade fructification ; d : dispersion

D : dessèchement

1, 2, 3, : rang des cohortes successives

a, b, c, : différence maximale observée pour chaque pic

Les plantes fleurissent plus vite quand elles lèvent en jour court, c'est-à-dire à une date située avant ou après le solstice d'été. Il n'est pas étonnant dans ces conditions de trouver côte à côte des plantes à des stades phénologiques successifs surtout lorsque la distribution saisonnière des pluies est hétérogène comme en 1979.

Signalons aussi que cette hétérogénéité est d'autant plus accentuée que l'unité de végétation est protégée de l'exploitation par le bétail. En effet bien que les levées puissent avoir lieu dans les éléments à bilan hydrique favorable, la végétation n'évolue pas dans les zones non protégées car elle est immédiatement consommée par les animaux. Cette autre source de variation sera discutée au chapitre V consacrée à la dynamique des systèmes écologiques.

Cette étude succincte de la variabilité des cycles permet de préciser les points à prendre en compte pour l'évaluation des paramètres de production d'un couvert végétal soumis à de larges fluctuations. Voyons maintenant quelques valeurs caractéristiques.

2.1.2 - Valeurs caractéristiques des différentes phases.

La date et la durée moyennes de la phase d'installation sont consignées dans le tableau 27. L'établissement s'effectue dans la première décennie de Juillet et dure environ un mois pour les unités sur sables. Dans l'unité de bas fond (Windé) la période séparant la première levée de la mise en place du peuplement est deux fois plus courte. Ce résultat s'explique par le fait que la première levée est plus tardive dans ce milieu en raison de la compétition pour l'eau s'exerçant entre colloïdes du sol et semences, comme on l'a déjà suggéré dans le chapitre consacré à la mise en place du peuplement (chapitre II, partie III). Dans les glaciés la période d'installation est plus longue. Cette observation s'explique par l'hétérogénéité précédemment décrite. En effet des levées peuvent avoir lieu très tôt dans les microdépressions mais il faut attendre que la saison soit bien avancée (troisième décennie de Juillet) et que la végétation soit établie sur les surfaces glacées pour admettre que celle-ci soit définitivement installée.

Unité de végétation	Date moyenne installation	Durée moyenne installation (jours)
Ams : Oursi	4 juillet	34
Cep : Kolel	7 juillet	35
Ase : Gountouré	9 juillet	33
Sgr : Bas Kolel	21 juillet	41
Sgl : Kouni	28 juillet	36
Spt : Windé	8 juillet	16

Tableau 27 - Date et durée moyenne (1977-1981) de la phase d'installation.

La phase de croissance est caractérisée par les valeurs de productivité et de vitesse relative de croissance dont les variations interannuelles sont reportées dans le tableau 28.

	Année Unité	1977	1978	1979	1980	1981	Moyenne interan.
PRO DUC TI VI TE	Ams	5,9	2,77	1,97	2,59	0,5 ⁽¹⁾	2,7
	Cep	3,54	3,09	2,97	3,53	2,38	3,10
	Ase	2,35	1,57	2,11	1,70 ⁽²⁾	3,38 ⁽³⁾	2,3
	Sgl	2,45	1,14	1,83	0,90 ⁽²⁾	-	1,6
	Sgr	1,82	3,6	1,8	0,88 ⁽²⁾	1,98	2,0
	Spt	6,9	2,57	4,30	4,96	5,57	4,9
V R C	Ams	0,08	0,09	0,06	0,05	0,02 ⁽¹⁾	0,06
	Cep	0,09	0,12	0,08	0,09	0,04	0,08
	Ase	0,06	0,05	0,07	0,04 ⁽²⁾	0,05 ⁽³⁾	0,05
	Sgl	0,09	0,16	0,06	0,17 ⁽²⁾	-	0,12
	Sgr	0,04	0,09	0,05	0,03 ⁽²⁾	0,03	0,05
	Spt	0,06	0,05	0,10	0,04	0,03	0,06
PRO DUC TI ON	Ams	226	174,6	161,2	134,3	67,3 ⁽¹⁾	152,7
	Cep	187,7	170,7	135,8	134,1	166,4	158,7
	Ase	157,2	88,1	177,3	102,6 ⁽²⁾	206,8 ⁽³⁾	146,4
	Sgl	66,1	46,2	96,6	44,4 ⁽²⁾	-	63,3
	Sgr	104	132,4	262,9	70,3 ⁽²⁾	119,8	137,9
	Spt	340,2	126,3	227,8	364,7	308,2	253,4

Tableau 28 - Variations interannuelles de la productivité ($g_{MS} \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$), de la vitesse relative de croissance ($g_{MS} \cdot g^{-1} \cdot j^{-1}$) et de la production annuelle dans les stations protégées.

(1), (2) et (3) voir texte

La VRC de Sgl, est à interpréter avec précaution car, la durée sur laquelle elle a été calculée, est inférieure à celles des autres unités.

La moyenne interannuelle des moyennes donne pour le bassin versant de la Mare d'Oursi, une productivité de $2,8 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. On note cependant une assez forte variabilité intersite. Les productivités les plus fortes sont obtenues dans l'unité de bas-fond hydromorphe ($5 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$, valeur maximum : $7 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) ; les plus faibles productivités correspondent aux glacis ($1,6$ à $2 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$). Les unités développées sur sables offrent des valeurs intermédiaires. Pour chaque unité, les variations interannuelles rapportées dans le tableau 28 peuvent être importantes. C'est le cas de l'unité Ams d'Oursi, où la valeur très basse de l'année 1981 est imputable d'une part, à un sévère déficit pluviométrique (chapitre I, partie III) et d'autre part, à la prédation par les criquets des graminées plus abondantes dans la station protégée (GROUZIS 1982, 1986). Une évolution semblable a été obtenue par BOUDET (1980) cité par CORNET (1981) mais dans son cas la réduction de la contribution du peuplement graminéen de 70 % en 1977 à 1 % en 1979 est due à des chenilles. Les faibles valeurs observées dans les unités Sgr et Sgl en 1980 sont liées à des perturbations humaines : dégradation intense des stations par les animaux pendant la saison sèche, et installation par les paysans d'une diguette dans les champs situés en amont de la station de Sgr, ce qui réduit les apports d'eau par ruissellement. Les variations interannuelles sont plus modérées pour les autres unités. Ces données sont comparables à celles rapportées par BILLE (1977) pour des unités de végétation analogues du Ferlo sénégalais ($1,4$ à $6,9 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), CORNET (1981 b) pour des groupements situés plus au sud (4 à $9 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), GILET (1967) au Tchad (1 à $4 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) et de HIERNAUX (1984) pour des régions plus humides dans la région de Niono au Mali ($1,5$ à $6 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$).

La moyenne générale des vitesses de croissance relative est de $0,07 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$. La variabilité interannuelle, à l'exception des cas particuliers précédemment cités, est plus modérée. Dans les conditions naturelles du ranch de Niono (Mali) PENNING DE VRIES et DJITTEYE (1982) rapportent une valeur moyenne de $0,1 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ c'est-à-dire un résultat très proche de celui observé compte tenu que la pluviosité y est plus élevée ($580 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$). Pour des sols fertilisés non irrigués la VRC des mêmes unités s'élève à $0,18 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ et peut atteindre $0,25$ à $0,5 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ dans des conditions optimales d'irrigation et de fertilisation.

La production annuelle moyenne pour le bassin d'Oursi est de $158 \pm 30 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$. Les valeurs les plus élevées caractérisent les bas fonds hydromorphes. Celle-ci peut atteindre plus de $350 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ (1980). Elle se situe autour de la moyenne pour les unités sur sables et varie de 60 à 140 $\text{g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ pour les glaciés. On peut noter une différence assez nette entre les glaciés de Bas Kolel et de Kouni bien que ces deux stations offrent des propriétés édaphiques voisines. Cet état relève de leur position topographique respective dont nous analyserons les effets sur le bilan d'eau ultérieurement. Tout comme pour les précédents paramètres ces résultats s'accordent avec ceux obtenus par différents auteurs pour des unités de végétation analogues sous même pluviométrie (BOURLIERE et HADLEY 1970, BILLE et POUPON 1972, CORNET 1981 b) et plus particulièrement TOUTAIN et PIOT (1980) sur d'autres systèmes écologiques du bassin versant de la Mare d'Oursi.

On trouvera dans le tableau 29, les valeurs relatives à la dégradation naturelle de la phytomasse au cours de la saison sèche. A la mi-octobre cinq des six unités perdent en moyenne 25 % du maximum de phytomasse observé (21,3 à 32,8 %).

Unité de végétation	Diminution de la phytomasse	
	mi-octobre	mai-juin
Ams	26,6	47,2
Cep	24,2	53,0
Ase	21,3	55,7
Sgr	23,6	56,3
Sgl	32,8	-
Spt	43,4	72,6

Tableau 29 - Dégradation naturelle de la phytomasse exprimée en pourcentage du maximum observée (moyenne 1977-1980).

Pour le bas fond les pertes correspondant à cette période sont plus élevées (43,4 %). Elles intègrent en effet non seulement la chute des diaspores mais encore la dégradation d'une fraction de la nécromasse favorisée par une humidité plus importante (période de submersion).

En prenant comme critère la diminution de la phytomasse au moins de Juin, l'examen du tableau 29 permet de distinguer deux groupes : d'une part les unités qui perdent en moyenne 50 % de la phytomasse maximale observée au cours du cycle (Ams, Cep, Ase, Sgr) soit environ $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$ et d'autre part le bas fond qui perd plus de 70 % de la phytomasse soit en moyenne $26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$. Si ces chiffres confirment les résultats présentés par TOUTAIN et PIOT (1980) et nous mêmes (GROUZIS 1979) pour le cycle 1977-1978 (perte de $14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$) ils sont relativement moins élevés que ceux rapportés par d'autres auteurs dans des systèmes écologiques similaires. C'est ainsi que KLEIN et al. (1981) montrent que les pertes de phytomasse dressée des formations herbeuses sahéliennes du Niger au cours de la saison sèche représentent 70 % de la phytomasse soient $32 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$. De même BILLE (1977) estime qu'en l'absence de pâturage, la perte de phytomasse entre Octobre et Mai est de l'ordre de $38 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$. Quant à LEPAGE (1972) qui s'adresse aux mêmes communautés que celles étudiées par BILLE, il évalue à $50-60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mois}^{-1}$ la prédation par les seules termites.

En dehors du fait que la dégradation naturelle de la végétation au cours de la saison sèche est importante, les différentes estimations divergent. Ces différences peuvent être liées d'une part, au fait que l'on ne s'adresse pas exactement au même objet (phytomasse dressée, au sol, totale...) et d'autre part, à la très grande hétérogénéité des situations qui ne sont pas toujours abordées de la même manière.

2.2 - Production et facteurs écologiques.

2.2.1 - Rendement énergétique.

La connaissance du rendement énergétique de la production primaire (rapport entre énergie contenue dans la production et énergie incidente) nécessite la détermination des valeurs énergétiques. Bien que l'utilisation des facteurs de conversion unique soit critiquable en raison de la gamme de variation des valeurs énergétiques des organes végétaux (HEIM 1974) la valeur de $4,65 \text{ kcal} \cdot \text{g}_{\text{MS}}^{-1}$ proposée par LARCHER (1975) a été retenue.

Le rayonnement global pour le bassin versant d'Oursi est en moyenne de 2045 Mcal.m^{-2} (§ 3 partie I). Les rendements énergétiques sont calculés d'une part, par rapport au rayonnement global annuel ou à celui correspondant au cycle végétatif (1/6 au 15/9) et d'autre part, par rapport au rayonnement photosynthétiquement utilisable annuel ou durant le cycle (RPU : 50 % du rayonnement global).

Les rendements calculés sur les moyennes inter-annuelles de la production (station protégée) ou l'équivalent production (témoin) sont reportés dans le tableau 29'.

Unité de végétation	Rendement année				Rendement cycle			
	% RG		% RPU		% RG		% RPU	
	D	T	D	T	D	T	D	T
Ams	0,035	0,032	0,07	0,06	0,12	0,11	0,24	0,22
Cep	0,036	0,035	0,07	0,07	0,12	0,12	0,24	0,24
Ase	0,033	0,015	0,067	0,03	0,11	0,05	0,22	0,10
Sgl	0,014	0,008	0,03	0,017	0,05	0,028	0,1	0,057
Sgr	0,031	0,014	0,06	0,028	0,11	0,048	0,22	0,096
Spt	0,06	0,029	0,12	0,058	0,19	0,098	0,38	0,196
Moyenne	0,035	0,021	0,07	0,04	0,12	0,075	0,235	0,15

Tableau 29' - Rendement énergétique de la production primaire au niveau du Bassin Versant d'Oursi.

Comparés aux zones arides de Tunisie (FLORET et PONTANIER 1982) les rendements énergétiques obtenus à la Mare d'Oursi se situent dans la gamme des valeurs élevées. Ils sont par contre plutôt inférieurs aux résultats de SINGH et MISRA (1968) relatifs à l'Inde, et très nettement inférieurs au rendement énergétique des savanes du Nigéria où EJUNGOBI (1970) rapporte une valeur de 1,5 % avec un maximum de 6 % par rapport à l'énergie utilisable. Ils sont enfin tout à fait comparables aux données de BILLE (1977) concernant le Ferlo sénégalais si l'on tient compte de la production hypogée (chapitre IV).

L'examen du tableau 29¹ montre aussi une différence significative entre les rendements obtenus en parcelle protégée et ceux des parcelles pâturées, ce qui rejoint les résultats de PEARSON (1965).

Pour conclure nous dirons que les communautés végétales du bassin versant d'Oursi ont un rendement énergétique faible comme la plupart des végétations des zones arides. En fait la transformation de l'énergie largement excédentaire est limitée par des facteurs intrinsèques à la végétation (L.A.I, proportion des types photosynthétiques des espèces... FLORET et PONTANIER, 1982) et des conditions plus ou moins contraignantes liées au milieu, notamment l'eau et la fertilité (PENNING DE VRIES et DJITTEYE 1982).

2.2.2 - L'efficience en eau.

L'efficience en eau, exprimée en $\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ($10 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) est définie comme étant le rapport entre la production et les précipitations annuelles. Les précipitations considérées peuvent être soit les pluies totales et l'on a le RUE (rain use efficiency), soit les pluies infiltrées ou efficaces (nous reviendrons plus en détail sur cette notion au § 3.3.), c'est-à-dire à l'échelle de l'année, l'équivalent de l'ETR et l'on a le WUE (water use efficiency) développée par VIETS (1962). Ces deux notions discutées abondamment par LE HOUEROU (1984) sont très utiles en l'absence de données de l'ETR pour comparer les niveaux de production de différents types de végétation d'une même aire géographique ou des types de végétation similaires de différentes zones géographiques.

Les moyennes interannuelles de ces deux paramètres pour les stations protégées et les témoins sont tracées sur la figure 45. Pour les stations protégées, le RUE varie de $1,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (glacis Sgl) à $8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (bas-fond Spt). La moyenne générale des RUE des unités de végétation du bassin versant de la Mare d'Oursi est de $4,7 \pm 0,9$. Comparée à des zones dont les précipitations annuelles sont situées autour de 400 mm, cette valeur est proche des résultats de CORNET (1981 : RUE = 3) et de BILLE (1977 RUE = 3,50) sur les formations sahéliennes du Sénégal, identique à celle de BRAUN (1973 : RUE = 5 : SERENGETI) mais par contre légèrement

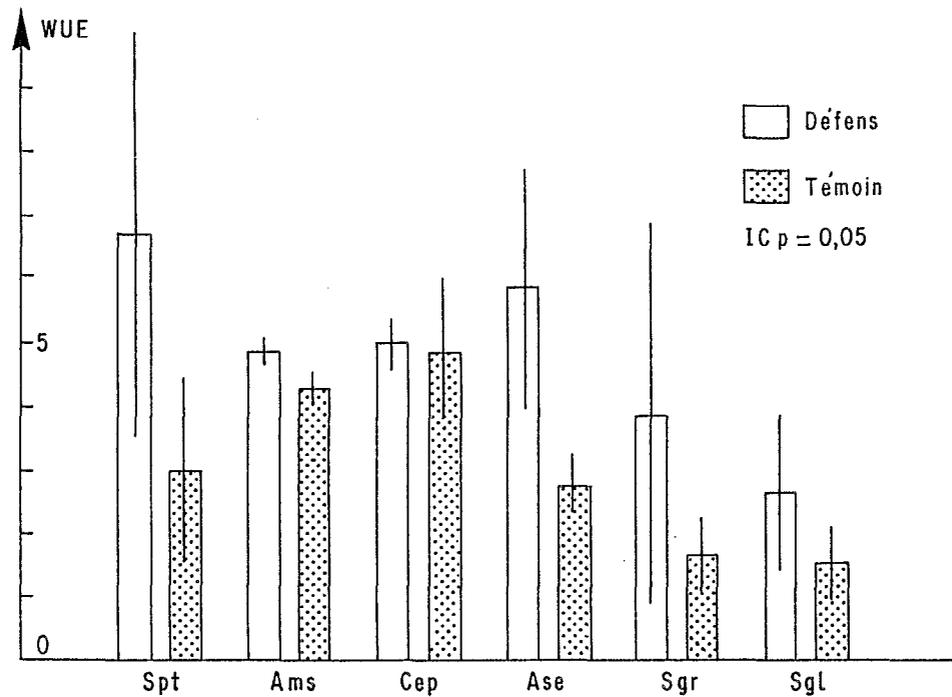
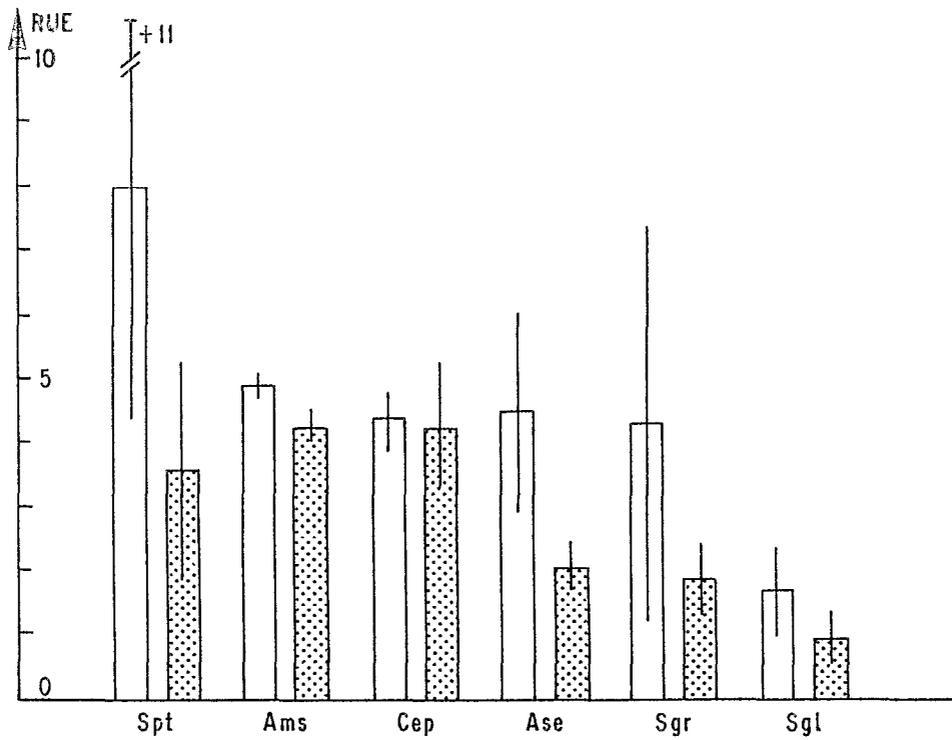


Fig. 45 - Moyennes interannuelles (1977-1981) des efficacités en eau des différentes unités de végétation exprimées en $\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ de pluie (45A) et en $\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ de pluie infiltrée (45 B).

supérieure à celle rapportée par PRAT et GWYNE (1977) in LE HOUEROU (1984). C'est donc une valeur qui se situe bien dans la gamme de celles retenues par LE HOUEROU (1984) comme caractéristiques des pâturages arides et semi-arides. L'examen plus détaillé de la figure 45 A révèle que le RUE varie avec les caractéristiques édaphiques (chapitre I partie III). Il n'est pas étonnant en effet de trouver un RUE élevé pour l'unité Spt puisqu'il est lié au milieu qui présente le potentiel édaphique le plus élevé si l'on se base sur les valeurs de la capacité d'échange, les taux de matière organique et d'N (tableau 16). Avec des potentiels équivalents les unités sur sables (Ams, Cep, Ase) présentent des efficacités en eau plus élevées (4,4) que les unités correspondant aux sols limono-argileux, sauf si ces dernières occupent des positions topographiques leur permettant de recueillir les eaux de ruissellement. A cet égard la différence entre la station de Sgr (RUE : 4) et Sgl (1,7) est significative. En effet avec des caractéristiques pédologiques quasi identiques le RUE de Sgr est environ 2,5 plus élevée tout simplement parce que le glacis de Bas Kolel bénéficie d'une partie des eaux de ruissellement évaluée annuellement en moyenne à 12,4 % (1976-1981) tandis que Kouni laisse échapper 36,3 % des précipitations par ruissellement (CHEVALLIER et al. 1985).

L'intérêt du WUE réside alors dans le fait qu'il intègre les fractions d'eau ruissellées. Ainsi on peut voir sur la figure 45 B que les valeurs de l'efficacité en eau diminuent pour les unités situées en bas de pente (Spt : 8 à 6,7), alors que celles des unités qui ruissent ont tendance à augmenter (Sgl : 1,7 à 2,7). Les unités situées sur des sols à texture sableuse et pour lesquelles le ruissellement est nul (Oursi : Ams) ou modéré (Kolel : Cep) ont des RUE et WUE identiques ou similaires.

La comparaison des valeurs observées dans les stations protégées et témoins montrent que l'efficacité en eau (RUE, WUE) dépend étroitement du stade évolutif de la végétation et accuse particulièrement l'impact des activités humaines sur l'écosystème. Toutes stations confondues le RUE des unités témoins du bassin versant d'Oursi est de $2,9 \pm 0,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$. Il nous faut de nouveau distinguer les unités sur sables (peu exploitées en saison des pluies) pour lesquelles les différences ne sont pas significatives (Cep) ou modérées (Ams) des autres unités où l'effet du pâturage est manifeste. Ces faits confirment les résultats de LE HOUEROU et al. 1974, FLORET et PONTANIER (1974) in LE HOUEROU (1984). Nous reviendrons sur ces aspects dans le chapitre V.

2.3 - Conclusions.

La variabilité observée au niveau de la phénologie et des cycles de production, imputable à la répartition pluviométrique, à la nature du sol et à l'hétérogénéité de la structure de la végétation nous a conduit à adopter des critères spécifiques de détermination des paramètres de la production végétale (stratification de l'échantillonnage, évaluation de la productivité et de la VRC sur les phases ascendantes, sommation des pics pour les phytomasses...).

La moyenne interannuelle de la productivité qui varie de 1,6 à 5 $g_{MS}.m^{-2}.j^{-1}$ est en moyenne de 2,8 $g_{MS}.m^{-2}.j^{-1}$ pour le bassin versant d'Oursi. La VRC moyenne des différentes unités s'élève à 0,07 $g_{MS}.g^{-1}.j^{-1}$. La production annuelle moyenne est de $158 \pm 30 g_{MS}.m^{-2}$, avec un maximum absolu de 340 $g_{MS}.m^{-2}$ observé dans l'unité de bas fond en 1980 et un minimum absolu de 44 $g_{MS}.m^{-2}$ obtenu en 1980 dans le glacis de Kouni.

La dégradation naturelle (pertes de phytomasse sans compter les prélèvements par les animaux domestiques) s'élève en moyenne pour l'ensemble des unités étudiées à 60 % entre Octobre et fin Mai soit $18 kg.ha^{-1}.mois^{-1}$. Les transformations de l'énergie, limitées par des facteurs tels que eau, fertilité, LAI expliquent les rendements énergétiques faibles.

L'efficacité en eau, exprimée par la quantité de matière sèche élaborée à partir d'un mm de pluie, est en moyenne de $4,7 kg.ha^{-1}.mm^{-1}$. Elle correspond bien aux valeurs caractéristiques des végétations arides et semi-arides.

Les résultats recueillis au niveau du bassin versant d'Oursi sont dans l'ensemble comparables à ceux des zones écologiques similaires d'autres pays d'Afrique (Mali, Sénégal, Niger, Tchad...). Ces résultats sont par ailleurs comparables aux valeurs obtenues dans des régions écologiques semblables de l'Amérique, de l'Afrique et de l'Inde (SINGH et al. 1983, LAUENROTH et WHITHMAN 1977, LAUENROTH 1979). Ils sont par contre inférieurs à celles déterminées dans les savanes plus humides. Ainsi FOURNIER (1982) rapporte des productivités de l'ordre de $4 g_{MS}.m^{-2}.j^{-1}$ pour des phytomasses maximales de 5 à 6 $t.ha^{-1}$ dans des régions du Nord de la Côte d'Ivoire recevant 1175 mm. CESAR et MENAUT (1974) donnent des phytomasses de 7 à 8

t.ha⁻¹ dans les savanes à Loudetia et les savanes herbeuses à Andropogonées de la région de Lamto (Côte d'Ivoire : 1250 mm). EJUNGOBI (1974) pour des savanes nord guinéennes du Nigéria (1200 mm) rapporte des valeurs nettement plus élevées : productivité 7 à 15 g_{MS}.m⁻².j⁻¹ pour 15,5 t.ha⁻¹ de phytomasse maximale.

3 - PRODUCTION REGIONALE - PRODUCTION ET CAPACITE DE CHARGE FREQUENTIELLES.

3.1 - Déterminisme écologique de la production.

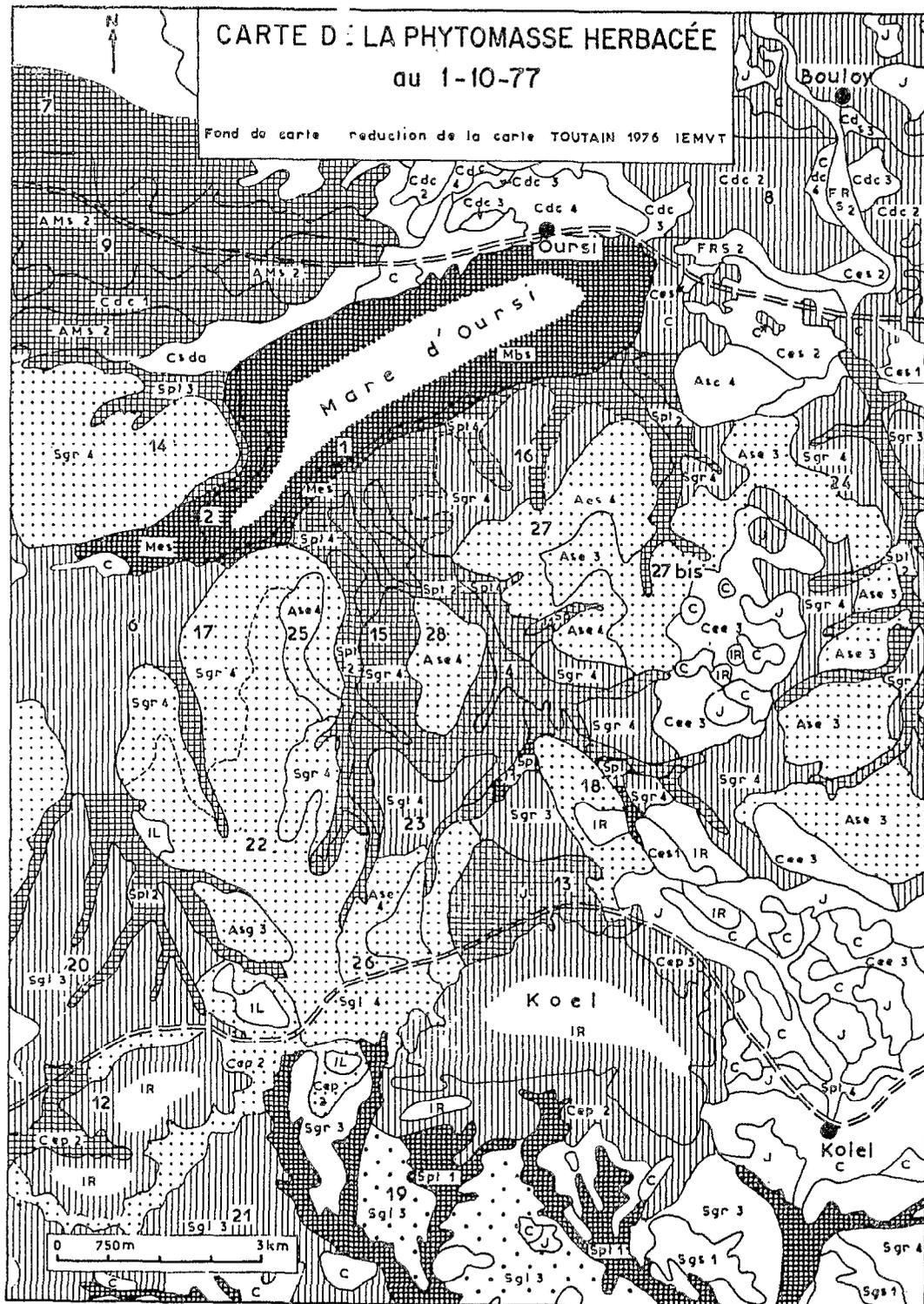
L'année 1977, qui présente le maximum de variabilité spatiale, a été retenue pour illustrer les liaisons production-facteurs écologiques au niveau du bassin versant. Cinq classes de phytomasse ont été reportées sur un secteur de la carte des ressources fourragères de TOUTAIN (1976) (fig.46). Cette synthèse cartographique permet de délimiter :

- des zones à phytomasse élevée (supérieure à 1,5 t.ha⁻¹) correspondant aux systèmes dunaires, aux bords de mares, talwegs et glacis en bordure de marigots ;

- des zones à phytomasse moyenne (1 à 1,5 t.ha⁻¹) correspondant à des glacis en situation d'impluvium ou bien à des dunes et des bas-fonds dégradés ;

- des zones à phytomasse faible (0,2 à 1 t.ha⁻¹) correspondant à des glacis très étendus.

L'examen de cette carte montre que des groupements floristiquement distincts appartiennent à la même classe de phytomasse (ex. : sites 13, 15, 9), et que des unités de végétation identiques ont des phytomasses différentes. La grande variabilité des rendements des glacis est imputable dans certains cas à leur position topographique. Bien que situé au pied du massif de Kolel, le site 19, qui a une biomasse de 0,4 t.ha⁻¹ ne bénéficie pas des eaux de ruissellement parce qu'un réseau dense de marigots les détourne. Par contre le site 18 est en situation d'impluvium très favorable surtout dans sa partie centrale où la biomasse est de 1,2 t.ha⁻¹. Tous les



200 à 500



150 à 200



100 à 150



50 à 100



20 à 50



g de mat. sèche m⁻²

Fig. 46

sites de glaciais à phytomasse plus élevée que la moyenne ($0,7 \text{ t.ha}^{-1}$) sont situés en bordure de marigots (ex. : sites 15, 16, 20, 23) ou en position d'impluvium (ex. : sites 18, 20, 21).

Cette approche cartographique renseigne déjà sur les liaisons entre production végétale et un certain nombre de facteurs écologiques (topographie, composition floristique, bilan hydrique, niveau de dégradation et utilisation...).

Une analyse plus détaillée du déterminisme écologique de la production a été faite en appliquant une analyse factorielle des correspondances entre l'ensemble des données de production observées sur le bassin versant de la Mare d'Oursi de 1977 à 1980 (108 individus répartis en 5 classes) et l'ensemble d'un certain nombre de "descripteurs aptes à traduire les variations possibles du milieu dans le temps et dans l'espace" (DAGET et GODRON 1982 : 7 variables réparties en 37 modalités). Cette méthode, largement utilisée en phytoécologie (ROUX et ROUX 1969, ROMANE 1972, LACOSTE et ROUX 1971, TELAHIGUE et al. 1987), permet d'étudier de manière plus objective les liaisons entre les éléments des deux ensembles.

Les variables retenues sont :

- la géomorphologie (JOLY et al. 1980) ;
- la texture exprimée par le pourcentage d'argile, et la teneur en matière organique de l'horizon de surface (LEPRUN 1977) ;
- l'indice d'hétérogénéité, qui est une expression du recouvrement (LEVANG et GROUZIS 1980) ;
- le groupement végétal et le niveau de dégradation (TOUTAIN 1976) ;
- la pluviométrie efficace (SICOT et GROUZIS 1981).

Les limites de classes et la signification des variables sont données dans le tableau de contingence multiple (Annexe IV). Les classes sont établies de manière à observer des effectifs égaux dans chaque classe.

Les valeurs portées dans le tableau 30 montrent que les axes 1 et 2 rendent compte respectivement de 68,9 % et de 22,3 % de la variabilité totale soit plus de 90 % pour le plan de ces deux axes.

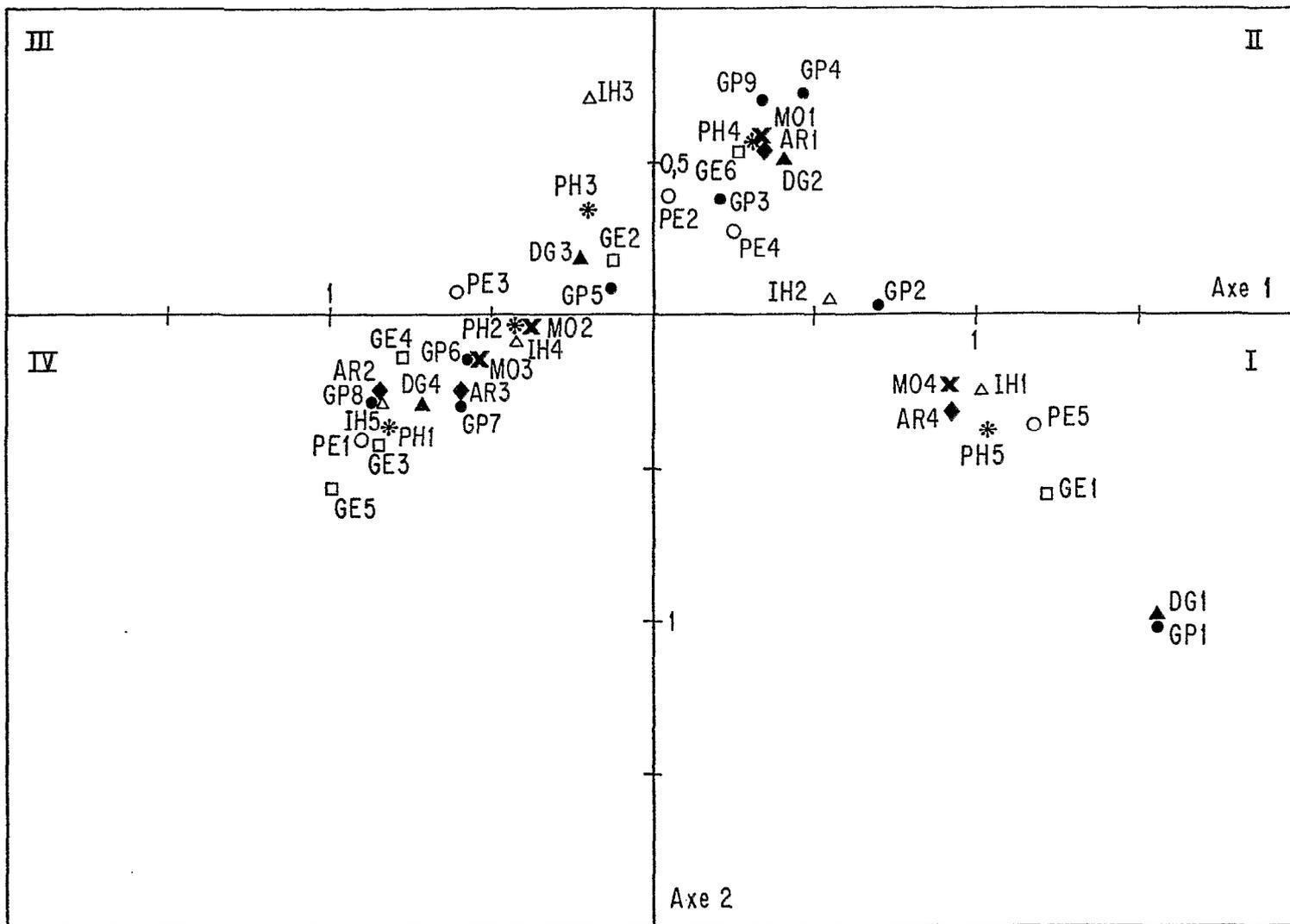


Fig. 47 - AFC : diagramme des classes de phytomasse et des états des variables dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse.

Facteur	Valeurs propres	% inertie	% cumulé
1	0,441	68,9	68,9
2	0,143	22,3	91,2
3	0,037	5,7	97,0
4	0,019	2,9	99,9

Tableau 30 - AFC : Valeurs propres.

La projection de l'ensemble des variables sur le plan des deux premiers axes est représentée sur la figure 47. Il apparaît nettement que variables et individus se répartissent suivant un arc de cercle traduisant un gradient élevé dans les données soumises au traitement (effet Gutman). Les classes de phytomasses paraissent régulièrement réparties le long de l'axe 1. Les variables responsables de la construction du premier facteur sont les pluies efficaces (16,7 %), le niveau de dégradation (15,4 %), l'indice d'hétérogénéité (15,2 %). Il peut être interprété comme un axe de production (structure de la végétation, eau). Sur l'axe 2 s'organisent par ordre décroissant des contributions absolues la dégradation (22 %), la géomorphologie (17,2), la nature du groupement végétal (16,6 %), le taux d'argile (14,6 %). La nature des groupements végétaux étant très liée à la géomorphologie et le classement des facteurs par ordre décroissant étant un peu biaisé par le nombre différent de modalité des variables nous autorisent à interpréter cet axe 2 comme représentant les caractéristiques du sol.

Le diagramme de la figure 47 permet de distinguer nettement quatre îlots représentatifs des niveaux de production et des variables écologiques qui leur sont associées.

Le premier situé dans le quadrat I représente les productions élevées (supérieures à $137 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) associées aux plaines alluviales et talwegs, de texture argileuse et riches en matière organique. Les unités de végétation à recouvrement continu (IH1), caractérisées par des espèces hygrophiles (*Oryza*, *Echinochloa*, *Panicum laetum*...) sont en bon état de conservation. Le bilan hydrique est favorable car ces milieux captent les eaux de ruissellement (PE5).

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Ams	1,38	4,1	0,99-1,93	5,7-2,9	6 284	8 672	1 520	2 126
Cdc	1,07	5,3	0,67-1,54	8,5-3,7	6 252	6 690	1 173	1 688
Ces	0,85	6,7	0,80-0,95	7,1-6,0	2 143	1 822	319	357
Cee	0,85	6,7	0,80-0,95	7,1-6,0	1 567	1 332	233	261
Cep	0,98	5,8	0,80-1,18	7,1-4,8	2 015	1 975	346	416
Csd	0,85	6,7	0,80-0,95	7,1-6,0	720	612	107	119
IR/IL	0,33	17,2	0,27-0,40	21,1-14	3 246	1 071	187	227
Sgl	0,73	7,8	0,51-1,06	11,1-5,3	5 196	3 793	665	965
Sgr	0,63	9,0	0,46-0,93	12,3-6,1	10 633	6 699	1 174	1 734
Spt1	2,15	2,6	1,99-2,34	2,8-2,4	448	963	168	183
Spt2-4	1,07	5,3	0,65-1,27	8,7-4,4	6 316	6 758	1 185	1 406
Asg	0,59	9,6	0,47-0,82	12,1-6,9	1 151	679	119	165
Asc	0,52	10,9	0,47-0,60	12,1-9,5	4 558	2 370	415	479
Ase	0,56	10,1	0,47-0,72	12,1-7,9	4 142	2 320	406	522
Asd-Fr	2,11	2,7	1,99-2,34	2,8-2,4	416	878	153	170
Mes-Mb	3,50	1,6	3,32-3,68	1,7-1,5	2 591	9 069	1 590	1 672
Res.ré	1,28	4,4	1,00-1,60	5,7-3,5	4 829	6 181	1 083	1 354
J.	1,13	5,0	0,86-1,60	6,6-3,5	1 775	2 006	351	498
Moyen. ou total colon.	1,11	6,75	-	-	64 282	63 890	11 194	14 342

Tableau 31 - Productivité, production et potentiel de charge du bassin versant de la Mare d'Oursi.

- A : Unités de végétation
- B : Productivité moyenne 1976-1980 ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$)
- C : Capacité de charge moyenne ($ha \cdot UBT^{-1} \cdot an^{-1}$)
- D : Etendue de variation de la productivité
- E : Etendue de variation de la capacité de charge
- F : Superficie Nord (ha)
- G : Production moyenne (t)
- H : Potentiel de charge (UBT)
- I : Potentiel de charge maximal de 1976 à 1980

Le deuxième îlot (quadrat II) caractérise les sables fixés des milieux dunaires à *Aristida mutabilis*, *Cenchrus biflorus*, *Zornia glochidiata*, *Schoenefeldia gracilis*... La dégradation commence à se manifester par un éclairci du tapis herbacé. La teneur en matière organique de l'horizon de surface est faible (M01) mais les productions restent élevées car les ruissellements négligeables favorisent l'infiltration des précipitations.

Le troisième groupe situé dans le quadrat IV correspond aux faibles productivités (inférieures à $73 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) des colluvions à *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*... La structure horizontale de la végétation est très discontinue (IH5 : alternance de plages couvertes et de plages nues) en raison du niveau de dégradation très avancé (DG4). Il en résulte un ruissellement élevé responsable du bilan hydrique très défavorable à la production (PE1). Le dernier amas (quadrat III) caractérise des piémonts et ensablements et constitue une transition entre les niveaux de faible production (colluvions) et de forte production des systèmes dunaires. La dégradation importante de la végétation (DG3) entraîne un début de discontinuité du tapis végétal.

La production ayant été explicitée par un certain nombre de variables, nous pouvons maintenant donner une évaluation de la production régionale du bassin versant et des capacités de charges qui en découlent.

3.2 - Production régionale - Potentiel de charge.

Le tableau 31 rassemble les productivités moyennes pondérées par la surface (cf. partie II § 3) et l'étendue de variation des observations effectuées de 1976 à 1980. Les capacités de charge et le potentiel de charge du périmètre (64000 ha) sont établis d'après les normes habituellement admises. On estime (BOUDET 1978) les besoins d'entretien d'un bovin adulte de 250 kg (Unité Bovin Tropical) à $2,5 \text{ kg} \cdot \text{j}^{-1}$ pour 100 kg de poids vif. La ration quotidienne d'un UBT représente donc 6,25 kg. En raison de la consommation primaire, de la dégradation par piétinement et de la décomposition partielle, la totalité de la production d'un pâturage n'est pas utilisée par le bétail. On estime généralement (TOUTAIN et DEWISPELAERE

1978, BOUDET 1978) que le 1/3 de la phytomasse peut être consommé sans compromettre le pâturage. Les pastoralistes américains (ANONYME 1967 in BOUDET 1978) évaluent ce coefficient d'utilisation à 40 - 60 %. TOUTAIN et LHOSTE (1978) dans une étude spécifique d'un périmètre sahélien ont estimé ce facteur à 35 % - 40 %. Pour le bassin versant d'Oursi, N'TIO (1981) montre que ce coefficient varie en fonction du type de pâturage, de la disponibilité fourragère et de la saison ; il obtient une valeur moyenne de 44 % au cours de la saison sèche. Afin d'approcher au mieux les valeurs relatives à la zone d'étude nous avons retenu un coefficient d'utilisation de 40 %.

L'examen du tableau 31 montre que les groupements situés aux bords des mares et dans les bas-fonds non dégradés avec une production moyenne supérieure à 2500 kg.ha^{-1} ont une capacité de charge moyenne variant de 1,6 à 2,6 $\text{ha.UBT}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Les unités sur sables et des bas-fonds dégradés sont caractérisées par une production moyenne annuelle de l'ordre de 1000 kg.ha^{-1} et une capacité de charge d'environ 6 $\text{ha.UBT}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Les unités liées aux glacis ont une production faible : 550 kg.ha^{-1} . Il en résulte une capacité de charge peu élevée : 10 $\text{ha.UBT}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

Les périmètres cultivés (surtout en *Pennisetum americanum*) ont une production moyenne de 1130 kg.ha^{-1} , soit une production équivalente à celle des ensablements (QUILFEN et MILLEVILLE 1981).

Notons aussi que les unités sur sables et celles liées aux glacis ont sensiblement la même importance sur le plan pastoral lorsque l'on compare les productions régionales.

Le tableau 31 donne aussi une idée de la variabilité interannuelle des capacités de charge pendant la période considérée. Il apparaît que celle-ci est relativement faible pour les unités de bords de mare et des bas-fonds peu dégradés, car ces milieux subissent assez peu les effets des contraintes hydriques. La variabilité est par contre élevée pour les ensablements et surtout les glacis (Sgr, Sgl) et les "bush" (Asc, Ase...) car ces milieux non tamponnés par les eaux de ruissellement reflètent assez étroitement les conditions pluviométriques.

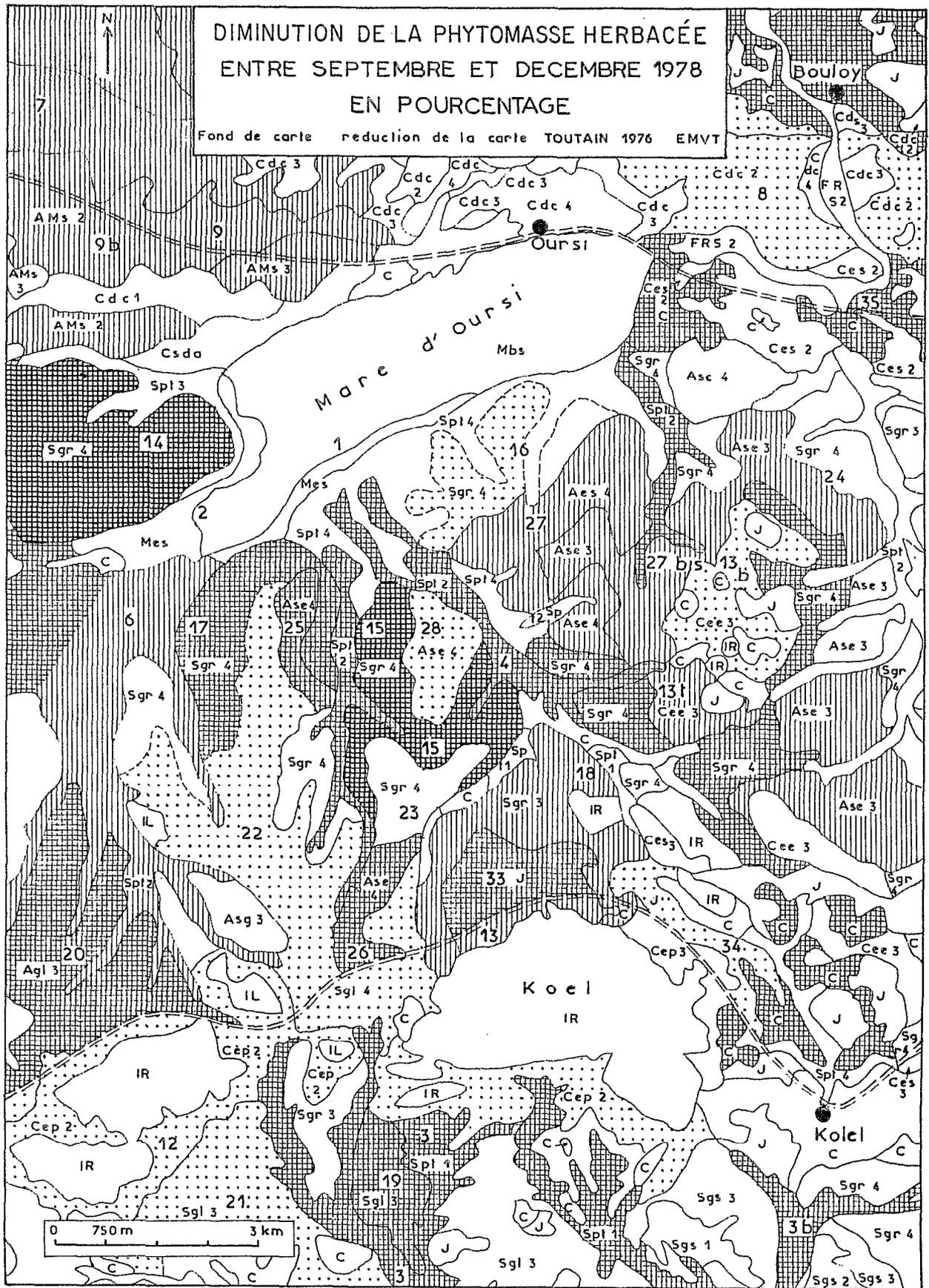
Ces résultats entrent dans la gamme des valeurs généralement donnée pour les pâturages sahéliens (TOUTAIN 1976, TOUTAIN et DEWISPELAERE 1978, GASTON et BOTTE 1971, GROUZIS 1984).

Sur le tableau 31 sont aussi reportées les valeurs du potentiel de charge de la zone qui s'élève en moyenne à 11.194 UBT et au maximum pendant la période d'observation à 14.342 UBT. Les dénombrements effectués au mois d'Avril 1976 par LHOSTE (1977) et au cours de la saison sèche 1980 par N'TIO (1981) donnent respectivement un effectif de 15.300 UBT et de 14.624 UBT. Il en résulte un excès de charge de 36 % à 30 % si l'on se base sur la production herbacée moyenne. L'équilibre est pratiquement atteint (excès de 2 % à 6 % en fonction des dénombrements) en considérant la production maximale obtenue. Il est nécessaire d'émettre certaines réserves sur ces bilans. En effet ceux-ci reposent tout d'abord sur la validité d'une valeur moyenne établie sur 5 ans. Il est évident que ces valeurs sont plus représentatives que celles établies sur 1 année et qui ont peu de signification compte tenu de la variabilité observée (BREMAN 1982). Le bilan repose par ailleurs sur la validité des dénombrements. Or le système n'est pas clos et il peut y avoir une surévaluation de l'effectif en raison des transhumances de saison sèche. Il faut enfin remarquer que ce bilan repose sur la validité des normes (HIERNAUX 1982, BREMAN 1982). Il suffit de peu pour transformer les résultats. Les observations très qualitatives que nous avons effectuées nous incitent à penser qu'il y a beaucoup à faire sur l'étude comportemental de l'animal en milieu naturel et sur sa physiologie. Il reste enfin à préciser la distribution de la production car l'utilisation de l'espace pastoral est en fait relativement hétérogène.

Sur la figure 48 sont représentées différentes classes d'utilisation de l'espace autour de la Mare d'Oursi au cours de l'année 1978. Ces classes sont établies d'après les valeurs de la diminution de la phytomasse herbacée entre le maximum observé (Septembre) et la phytomasse du mois de Décembre. Ce sont les bords de mare (Mes : d = 28 %) et les formations sur sables (Cdc, Àms, Cee : d = 26 %), réserves fourragères de saison sèche, qui présentent les plus faibles dégradations. A l'inverse les unités inféodées aux dépressions, pâturages de saison humide et qui

DIMINUTION DE LA PHYTOMASSE HERBACÉE
ENTRE SEPTEMBRE ET DECEMBRE 1978
EN POURCENTAGE

Fond de carte réduction de la carte TOUTAIN 1976 EMVT



> 75 %



50-75 %



25-50 %



< 25 %



g de mat sèche m-2

Fig. 48

constituent par ailleurs les lieux de récolte de la céréale mineure *Panicum laetum*, sont fortement dégradées (Spt : d = 55 %). Avec une diminution globale de 50 %, les glacis sont aussi fortement exploités. On observe dans ces unités une plus grande variabilité, en relation avec leur position géographique. En effet la proximité d'un campement (site 15, 19) ou d'un lieu de passage des animaux accélèrent la dégradation. Il en est de même de la proximité d'un point d'eau, puisqu'il est bien établi que les animaux en début de saison sèche exploitent préférentiellement les pâturages immédiats des points d'eaux. L'aire de pâture s'étend ensuite, au fur et à mesure que l'on s'avance dans la saison sèche. Il apparaît donc que l'hétérogénéité de la disponibilité des ressources fourragères implique non seulement de connaître et de raisonner sur la production globale et la valeur fourragère des unités de végétation, mais encore de localiser sa distribution spatiale pour en maximiser son exploitation.

3.3 - Expression de la phytomasse en fonction de la pluie - Estimation de la production et de la charge fréquentielles.

La production des herbages et par conséquent la capacité de charge sont très variables, puisqu'elles sont étroitement dépendantes des conditions spécifiques d'aridité, liées au caractère saisonnier et à la variabilité des précipitations. Compte tenu de cette variabilité, l'estimation des charges ne peut s'appuyer sur les mesures relatives à une seule année. Les observations sur de plus longue période sont souhaitables, mais celles-ci sont souvent difficiles à réaliser en raison de leur coût. C'est pourquoi nous avons tenté d'élaborer un modèle simple de production en fonction des précipitations, bien que la pluie ne soit pas le seul facteur intervenant dans le déterminisme de la production comme nous l'avons précédemment montré. Cependant dans la zone inventoriée, la pluie joue un rôle déterminant dans l'installation de la végétation annuelle, la recharge de la réserve hydrique après les nombreux mois de saison sèche, et par conséquent la disponibilité en eau pour la croissance.

De nombreux auteurs ont essayé de relier la production à la pluie. Plus de 77 références portant sur ce sujet ont été synthétisées par LE HOUEROU et al. 1984. L'analyse de certains travaux montre que les études sont menées à différents niveaux de perception et aboutissent à une formulation plus ou moins précise. On distingue :

- les travaux traitant de plusieurs pays (LE HOUEROU et HOSTE 1977, LAUENROTH 1979, DESHMUKH 1984) ou de différentes zones d'un même pays (BREMAN 1975, DIARRA et BREMAN 1975) ;

- ceux qui sont effectués à moyenne échelle, telle qu'une région d'un pays présentant une variation spatiale de la pluviométrie (BREMAN et KRUL 1982) ;

- et les recherches entreprises à grande échelle, dans lesquelles on ajuste pour un milieu déterminé, les données décennales, mensuelles ou annuelles de production aux relevés pluviométriques correspondants (FLORET et PONTANIER 1978, 1982, STRUGNELL et PIGOTT 1978, BILLE 1977, CORNET 1981 b, BOUDET 1983, HIERNAUX 1984...).

Les résultats présentés ici, portent sur cette dernière échelle.

3.3.1 - Définitions.

La pluie efficace est la hauteur d'eau infiltrée pendant une période déterminée. Elle s'exprime par la relation $P_e = P - K_r P$, dans laquelle P représente les précipitations et K_r le coefficient de ruissellement.

En fonction de la période considérée on distingue :

- la pluie efficace pendant la durée du cycle pluviométrique ;
- la pluie efficace du début de la saison des pluies (première pluie) jusqu'à la fin du cycle de végétation. En effet, l'eau infiltrée après la maturation de la strate herbacée n'est pas utilisée par celle-ci car la phase productive, exception faite de quelques espèces telles que *Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius*..., coïncide avec la phase végétative. Les observations sur la phénologie des différentes phytocoenoses nous permettent de considérer que les cycles sont réalisés pour les différentes unités à la date du 15 septembre ;

- la pluie efficace pendant la durée du cycle végétatif. Le début du cycle est défini par l'établissement de la végétation. Rappelons que ce moment correspond à environ 70 mm de précipitations et que la réserve utile du sol est alors positive.

Le dispositif de mesure de la pluviométrie correspond à celui mis en place par CHEVALLIER et al.(1985) pour l'étude hydrologique. Il comporte 70 appareils distribués sur les 7 bassins versants alimentant la mare. Si le site de mesure de phytomasse ne comporte pas de pluviomètre, la pluviométrie à son niveau est calculée par interpolation entre deux ou trois pluviomètres voisins.

Les coefficients de ruissellement établis au niveau des 7 bassins versants (CHEVALLIER et al. 1981) sont attribués aux sites de mesure de même nature (même type de sol, même unité de végétation). CHEVALLIER et al. (op. cit.) ont montré que la pluie réelle arrivant au sol est supérieure à celle mesurée dans les appareils normalisés à 1 m. Cet écart varie par exemple de 19 à 38 % suivant les stations pour une hauteur de pluie journalière de fréquence annuelle (45,7 mm).

L'utilisation de la pluie mesurée à 1 m conduit donc à obtenir des coefficients de ruissellement par excès. C'est pourquoi il a été tenu compte de ce biais dans l'étude de base de l'établissement des relations en utilisant le coefficient de ruissellement réel :

$$K_s = \frac{L_e}{aP} = \frac{K_r}{a} \quad \begin{array}{l} \text{(coefficient de ruissellement conventionnel)} \\ \text{coefficient de proportionnalité entre pluie} \\ \text{à 1 m et pluie au sol} \end{array}$$

qui se distingue du coefficient de ruissellement conventionnel

$$K_r = \frac{L_e}{P} \quad \begin{array}{l} \text{(Lame écoulee à la surface du sol)} \\ \text{pluie à 1 m (normes O.M.M.)} \end{array}$$

Les mesures de phytomasse au niveau du bassin versant ont été décrites dans la partie II § 3.

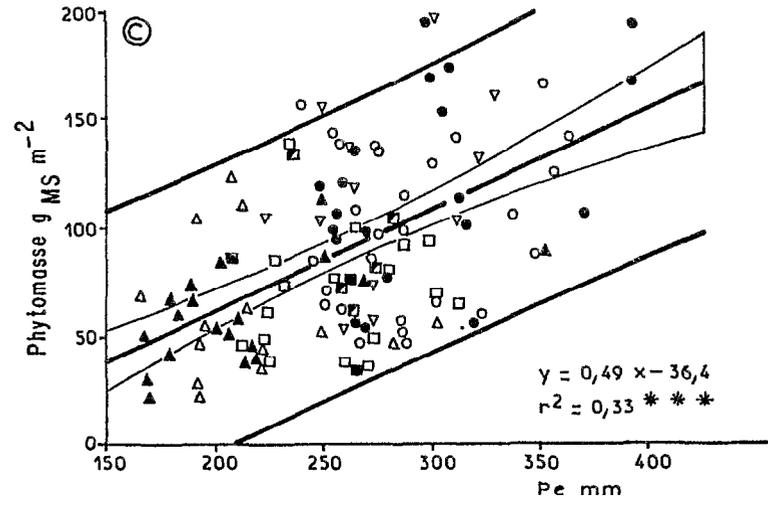
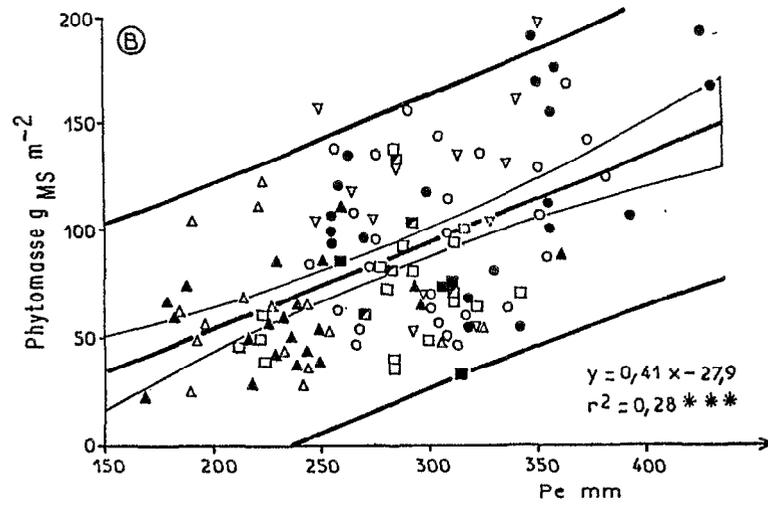
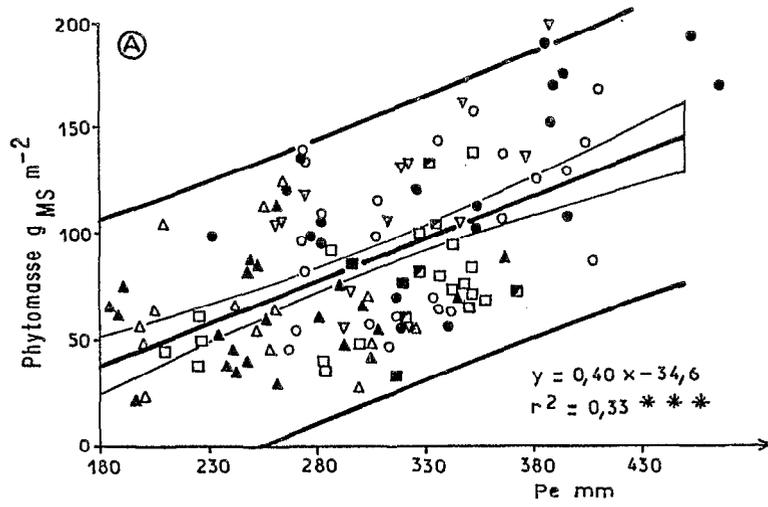


Fig. 49 - Relation pluriannuelle (1976-1980) entre phytomasse herbacée et eau infiltrée.
 Saison des pluies (A), début saison des pluies-fin du cycle (B), durant cycle végétatif (C).
 Voir signification des symboles en annexe 1.

Période		1976 - 1980		
Pluie efficace		A	B	C
Intervalle confiance de a	inf	0,30	0,29	0,36
	moy	0,40	0,41	0,47
	sup	0,50	0,53	0,61
Intervalle confiance de b	inf	-66,6	-66,6	-68,5
	moy	-34,6	-27,9	-31,9
	sup	-22,6	- 5,8	- 4,0
Coefficient de Student et signification	tâ	7,65	6,87	7,70
	sâ	***	***	***
	t \bar{b}	-2,14	-1,64	-2,23
	sb	*	NS	*

Tableau 32 - Constantes de la régression phytomasse/pluie efficace
 $y = aPe + b$ et signification statistique.

NS : non significatif, * significatif à 5 %, *** à 1 %

Pluie efficace : A : pendant la saison des pluies

B : début saison des pluies-fin du cycle
végétatif

C : durant le cycle végétatif

3.3.2 - Résultats.

La figure 49 rassemble les quatre années de mesures relatives aux liaisons phytomasse-pluie efficace pendant les différentes périodes considérées. Le tableau 32 donne les intervalles de variation et la signification statistique (test t de Student) des coefficients de régression.

Il apparaît que quelle que soit la quantité totale d'eau infiltrée dans le sol : pluviométrie efficace pendant la saison des pluies (A), pluviométrie efficace du début de la saison des pluies à la fin du cycle végétatif (B), pluviométrie efficace durant le cycle végétatif (C), il existe une liaison très hautement significative entre la phytomasse herbacée et l'eau infiltrée.

Les coefficients de détermination respectivement de 0,33, 0,28 et 0,33 pratiquement égaux n'autorisent aucune discrimination entre les trois types de liaisons.

Le choix se porte néanmoins sur la relation entre la phytomasse et la pluie efficace pendant la saison des pluies, d'équation :

$$y = 0,40 x - 34,6 \text{ (fig. 49 A)}$$

parce que les données de base nécessaires à son établissement sont réduites à la pluviométrie et au ruissellement annuels. La valeur des constantes a et b respectivement 0,4 - 34,6 résulte de l'utilisation de la pluviométrie à 1 m et du coefficient de ruissellement réel.

L'utilisation du coefficient de ruissellement conventionnel permet d'exprimer la phytomasse ($g_{MS} \cdot m^{-2}$) en fonction de la pluie efficace à 1 m (mm) par la relation :

$$y = 0,36 Pe - 14,2$$

$$\text{avec } r^2 = 0,35$$

Le coefficient de regression "a" représente l'efficience moyenne de l'eau. Dans notre cas 1 mm d'eau infiltrée permet donc la production d'environ $4 \text{ kg}_{MS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Cette valeur est difficilement comparable à celles présentées par d'autres auteurs car ils utilisent généralement la pluie et non l'eau infiltrée. On verra ultérieurement que cette efficience, exprimée en matière sèche produite par mm de pluie est tout à fait comparable aux résultats de divers auteurs.

L'utilisation de la formule est limitée dans la partie inférieure par la valeur $Pe = 150 \text{ mm}$. Par ailleurs la zone correspondante à l'effet optimal du bilan d'eau n'est pas explicitée dans la relation. En effet bien que l'on ait des précipitations efficaces supérieures à 450 mm, ce terme est mal contrôlé dans cette gamme de valeurs. C'est le cas des talwegs et certains bas-fonds où la détermination des précipitations efficaces est moins précise car une partie de l'eau ruissellée transite vers les points bas (la mare), tandis que qu'une autre fraction s'évapore à partir de la nappe d'eau libre non infiltrée à cause de l'imperméabilité du sol.

Notons aussi que le facteur eau, au-delà d'un certain seuil ne permet pas d'augmenter de façon très nette la production de la végétation (FLORET et PONTANIER 1978). En effet il perd son caractère limitant. D'autres, dont la fertilité deviennent alors déterminants. Certains auteurs (PENNING de VRIES et DJITTEYE 1982...) insistent plus particulièrement sur ce facteur. Ayant surtout considéré l'influence de l'eau en tant que facteur le plus important de la production, nous n'avons pas mis l'accent sur le rôle de la fertilité sur la végétation naturelle. Remarquons cependant que les limites données par BREMAN et KRUL (1982) placent le site d'Oursi dans une zone de transition (200 - 500 mm) où la fertilité n'est pas encore le facteur le plus important ; celle-ci ne devenant limitative que pour des précipitations supérieures à 500 mm.

Notons par ailleurs que pour ce niveau d'étude, l'effet de la répartition pluviométrique n'a pas été directement pris en compte dans l'élaboration de la fonction. Cependant, et en raison de la nature très différente de la répartition pluviométrique durant les quatre années d'observations, cette variable a été implicitement intégrée dans la relation pluriannuelle. Cette intégration se manifeste d'ailleurs par la diminution du coefficient de détermination qui passe de 0,64 pour la seule année 1976 (SICOT et GROUZIS 1981) à 0,33 pour la relation pluriannuelle.

La recherche d'une relation générale ne nous a pas incité à distinguer explicitement les variables liées au sol et à la végétation. Les différentes unités ont été traitées globalement dans l'établissement de la relation, et c'est ce qui explique la relative variabilité des résultats. Rappelons cependant que les unités présentent des efficacités différentes. C'est cette propriété qui a conduit BOUDET (1983) à définir des relations production-pluie infiltrée spécifique à la nature du groupement végétal.

3.3.3 - Application à l'estimation de la production et de la charge fréquentielles du bassin-versant d'Oursi.

L'estimation de la production fourragère annuelle du bassin au moyen de la relation ($y = 0,36 P_e - 14,2$) nécessite la connaissance de la

pluie efficace moyenne, c'est-à-dire de la pluviométrie moyenne et du ruissellement moyen pour l'ensemble du bassin. La pluviométrie moyenne du bassin s'obtient en faisant la moyenne des relevés pluviométriques pondérés par les coefficients de Thiessen alloués à chaque pluviomètre. La lame d'eau ruissellée moyenne Le , se calcule à partir du bilan hydrologique de la mare : le volume d'eau totale de remplissage majorée de l'évaporation de la nappe d'eau libre (formule de PENMAN pour une nappe d'eau libre) et minorée de la pluie reçue localement.

Les résultats de ces calculs publiés dans CHEVALLIER et al. (1985) permettent de formuler une liaison significative entre la pluie moyenne et la lame d'eau ruissellée :

$$Le = 0,43 Pm - 79,1 \quad r = 0,825^* \quad (n = 6 \quad 1976 \text{ à } 1981)$$

L'expression de la pluie efficace se réduit donc à :

$$Pe = Pm - Le = Pm - 0,43 Pm + 79,1$$

$$Pe = 0,57 Pm + 79,1$$

En remplaçant dans la relation $y = 0,36 Pe - 14,2$ Pe par sa valeur, on obtient une formulation de la phytomasse herbacée en fonction de la pluie moyenne :

$$y = 0,36 (0,57 Pm + 79,1) - 14,2$$

$$y = 0,21 Pm + 14,2$$

Il est nécessaire de noter que cette dernière relation n'est utilisable que pour le bassin versant de la Mare d'Oursi, mais elle offre l'avantage d'être très pratique puisque son utilisation ne demande que la connaissance de la pluviométrie moyenne annuelle. L'expression de la phytomasse en fonction de la pluie permet de comparer notre résultat à d'autres travaux. Les données reportées dans le tableau 33 montrent que les

* Cette relation diffère de celle publiée dans SICOT, GROUZIS (1981), GROUZIS (1984), car elle intègre des années non disponibles au moment des premières publications. Il en sera de même de toutes les relations dérivant de celle-ci.

valeurs de production globale de phytomasse herbacée par mm de pluie incidente en zone sahélienne sont très peu différentes les unes des autres. De plus les résultats obtenus au niveau du bassin versant (RUE:2,1) confirment bien ceux recueillis au niveau parcellaire où le RUE moyen pour l'ensemble des stations soumises à l'influence des activités humaines était de $2,9 \text{ kg}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ de pluie.

Auteurs	RUE
DIARRA, BREMAN (1975)	2,4
LE HOUEROU, HOSTE (1977)	2,58
CORNET (1981)	3,3
BILLE (1977)	3
Résultat moyen stations	2,9
Résultat bassin versant	2,1

Tableau 33 - Production ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) par mm de pluie en zone sahélienne.

L'application de la relation phytomasse/pluie à la chronique pluviométrique constituée pour Oursi (cf. §3, partie I) permet d'estimer les phytomasses herbacées non dépassées pour quelques fréquences remarquables (tableau 34).

Fré- quence	Recur- rence an	Phyto- masse ₂ $\text{g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$	charge UBT	Fré- quence	Recur- rence	Phyto- masse	charge
0,01	100	60,0	6 734	0,50	2	100,7	11 302
0,02	50	63,8	7 160	0,80	5 *	121,7	13 658
0,05	20	70,1	7 867	0,90	10 *	135,2	15 174
0,10	10	76	8 529	0,95	20 *	146,9	16 486
0,20	5	83,5	9 371	0,98	50 *	159,5	17 901

Tableau 34 - Phytomasse herbacée et charge fréquentielles du Bassin-versant d'Oursi (calculs sur 64 000 ha).

* charges surestimées, car pour des précipitations supérieures à 500 mm, la fertilité devient limitative.

Les charges maximales fréquentielles relatives aux disponibilités fourragères calculées par l'application stricte de la fonction de production sont aussi reportées au tableau 34. Les phytomasses herbacées ont été majorées de 10 % (correction de l'erreur systématique par défaut) et de 10 % pour tenir compte de la contribution de la strate ligneuse à la production (BILLE 1977, POUPON 1980 et CORNET 1981 b).

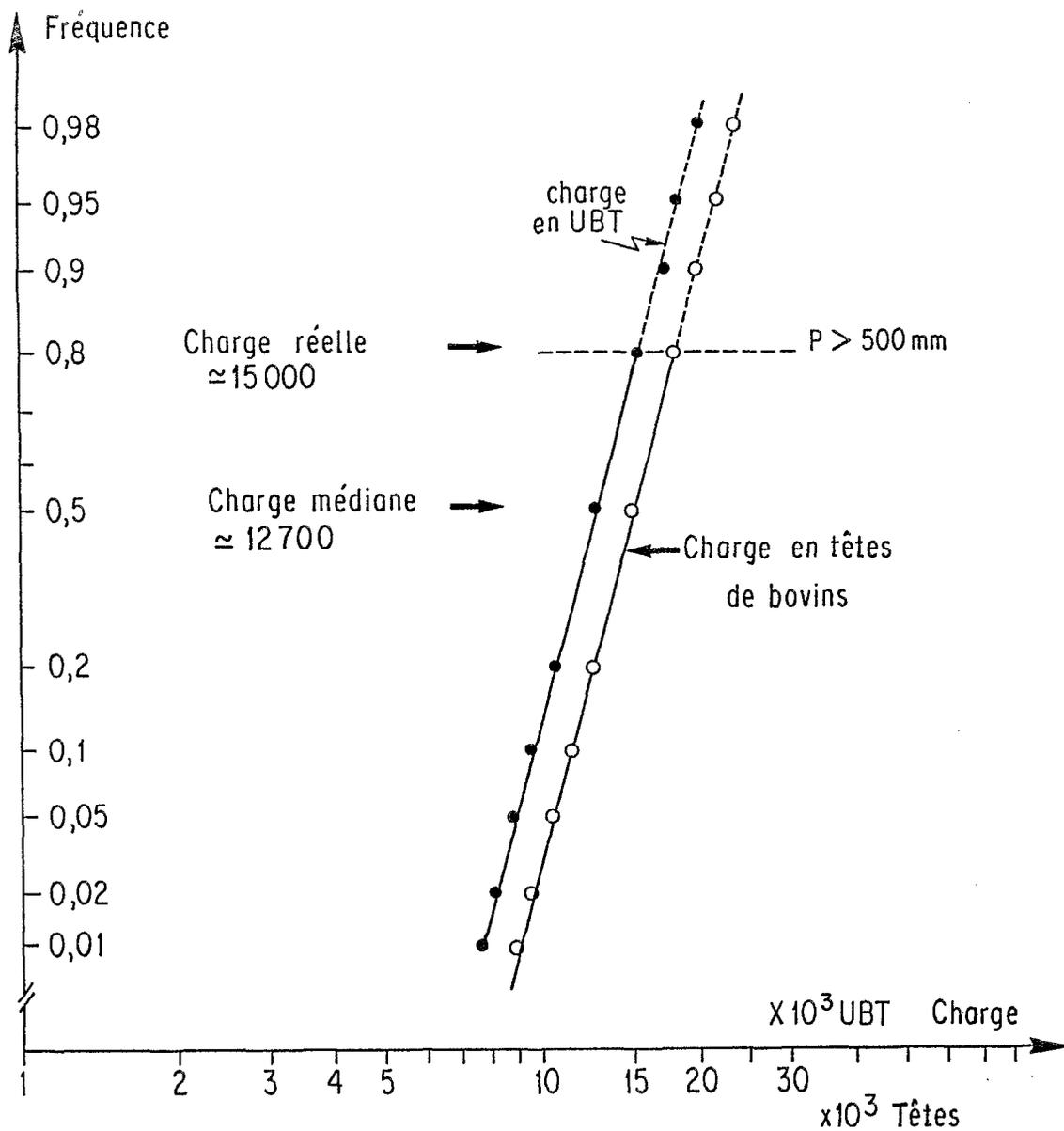


Fig. 50 - Charges fréquentielles du bassin versant d'Oursi.
 A partir de 500 mm de pluie, les prévisions sont en retrait
 et non sur la droite car la fertilité devient limitative.

Les charges fréquentielles relatives à ces disponibilités exprimées en UBT et en têtes de bovins (1 bovin moyen du bassin équivaut 0,85 UBT LHOSTE 1977) sont représentées sur la figure 50. Ces estimations permettent de comparer la charge actuelle aux potentialités pastorales de la zone. On constate ainsi que la production du bassin ne permet d'assurer les besoins du cheptel présent évalué à environ 15 000 UBT (LHOSTE 1977, N'TIO 1981), qu'une année sur 5. Par ailleurs il serait nécessaire de délester le bassin d'au moins 15 à 20 % de l'effectif actuel afin d'assurer la couverture des besoins d'entretien au moins une année sur deux.

La formulation permet par ailleurs de suivre les variations interannuelles de la production végétale, de la charge en bétail, et de prendre éventuellement dès la fin de la saison des pluies, les mesures (délestage de la zone par un recours à une transhumance élargie (BARRAL 1977), ou organisation de vente du bétail, complémentation...) nécessaires à l'ajustement de la charge aux ressources de l'année. Le tableau 35 rassemble les résultats relatifs à la période 1976-1984.

Année	Pluviométrie (1) moyenne du bassin (Pm)	Phytomasse estimée $g_{MS} \cdot m^{-2}$	UBT estimé 64 000 ha
1976	(400)	(98,2)	11 021
1977	424	103,2	11 582
1978	358	89,4	10 033
1979	322	81,8	9 181
1980	308	78,7	8 833
1981	337 *	85	9 540
1982	336 *	85	9 540
1983	179 *	52	5 836
1984	252 *	67	7 520

Tableau 35 - Variations interannuelles de la phytomasse du bassin versant de la Mare d'Oursi.

(1) CHEVALLIER et al. 1985

* Le réseau pluviométrique couvrant le bassin ayant été retiré les données relatives à ces années sont issues des mesures de la station météorologique de Jalafanka auxquelles a été appliqué un coefficient d'abattement moyen de 0,88 (moyenne 1976-1981).

On notera à la lecture du tableau 35, la très forte variabilité de la production herbacée (du simple au double). Les années 1983 et 1984 fortement déficitaires sur le plan pluviométrique ont enregistré les productions les plus faibles. La comparaison de l'année 1983, année exceptionnellement sèche, à la production fréquentielle permet de situer la production des herbages de cette année à des valeurs inférieures à la centennale défavorable ($P : 60 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$; UBT : 6734). Si l'on se réfère à la charge moyenne de la zone il y aurait en 1983 une surcharge d'environ 9000UBT.

Ces différentes estimations montrent que le bétail est largement excédentaire dans la zone du bassin versant de la Mare d'Oursi. Pour que se reproduise le système d'élevage il est primordial que la pression pastorale ne dépasse pas un seuil permettant le renouvellement des ressources.

3.4 - Conclusion.

Les observations réalisées à l'échelle du bassin versant permettent de confirmer les résultats établis à l'échelle de la station, notamment la variabilité spatiale et temporelle de la production. De plus l'efficience en eau (RUE) recueillie au niveau du secteur écologique recoupe étroitement celle relative aux zones témoins des stations écologiques.

Ce niveau d'étude a par ailleurs permis de préciser, au moyen de l'analyse factorielle des correspondances, les variables écologiques responsables de la production. Parmi celles-ci, les précipitations efficaces jouent un rôle déterminant.

Un modèle simple de production en fonction des précipitations efficaces a donc été proposé pour fournir les valeurs régionales de production qui, même si elles sont approximatives à cette échelle, aident à la prédiction des gammes de production et des capacités de charges et, à prendre les mesures éventuelles pour ajuster la demande à l'offre. Toutefois l'incertitude à la précision globale doit rappeler les limites de son utilisation.

CHAPITRE IV



LES SYSTEMES RACINAIRES

Contrairement à la fraction épigée, la fraction hypogée de la végétation sahélienne n'a pas fait l'objet de nombreuses investigations. Pour l'Afrique, les travaux les plus complets sont dus à BILLE (1977) et LEGRAND (1979) pour la zone sahélienne et à CESAR (1971), CESAR et MENAUT (1974) et FOURNIER (1982) pour la région soudanienne. C'est donc la pauvreté des résultats dans ce domaine de connaissance qui nous a conduit à mener une étude approfondie. De plus il était nécessaire d'estimer la production hypogée afin de déterminer la production totale des phytocénoses.

Les principaux objectifs de cette étude sont donc :

- la caractérisation du profil racinaire des principales unités de végétation de la région d'Oursi ;

- l'estimation de la production racinaire annuelle ;

- la détermination des rapports d'allométrie entre parties souterraines et aériennes, et l'étude de leur variation en fonction des facteurs écologiques notamment la pluviométrie et la texture du sol.

Compte tenu de la difficulté des manipulations et des coûts, les observations pluriannuelles n'ont été conduites que pour trois des six unités de végétation habituellement suivies au niveau de la station écologique. Cependant les unités correspondant à trois types de sol très contrastés (dune sableuse, glacis limono-sableux, bas-fond argileux) ont été retenues afin de cerner le maximum de variabilité. De plus cette étude ne concerne que les unités normalement exploitées et non les zones protégées, en raison de la nature destructrice des prélèvements.

Le premier point traite des modèles de distribution de l'enracinement en fonction de la profondeur. La production racinaire est ensuite abordée d'une part, en terme de phytomasse et d'autre part sous l'angle de la production nette. Pour cela l'accent sera mis sur l'estimation du reliquat racinaire antérieur à l'année de mesure.

1 - MODELE DE DISTRIBUTION DES RACINES - CARACTERISTIQUES DE L'ENRACINEMENT.

La figure 51 donne l'histogramme de répartition des phytomasses racinaires des différentes unités de végétation* en fonction de la profondeur. La distribution des racines s'ajuste bien à une fonction exponentielle. En effet la quantité de racines ($\text{mg} \cdot 1000 \text{ cm}^{-3}$) peut s'exprimer en fonction de la profondeur (p cm) par la relation :

$$R = ae^{bp}$$

* Les caractéristiques écologiques du milieu et la structure de la végétation de ces unités ont été décrites dans le chapitre I.

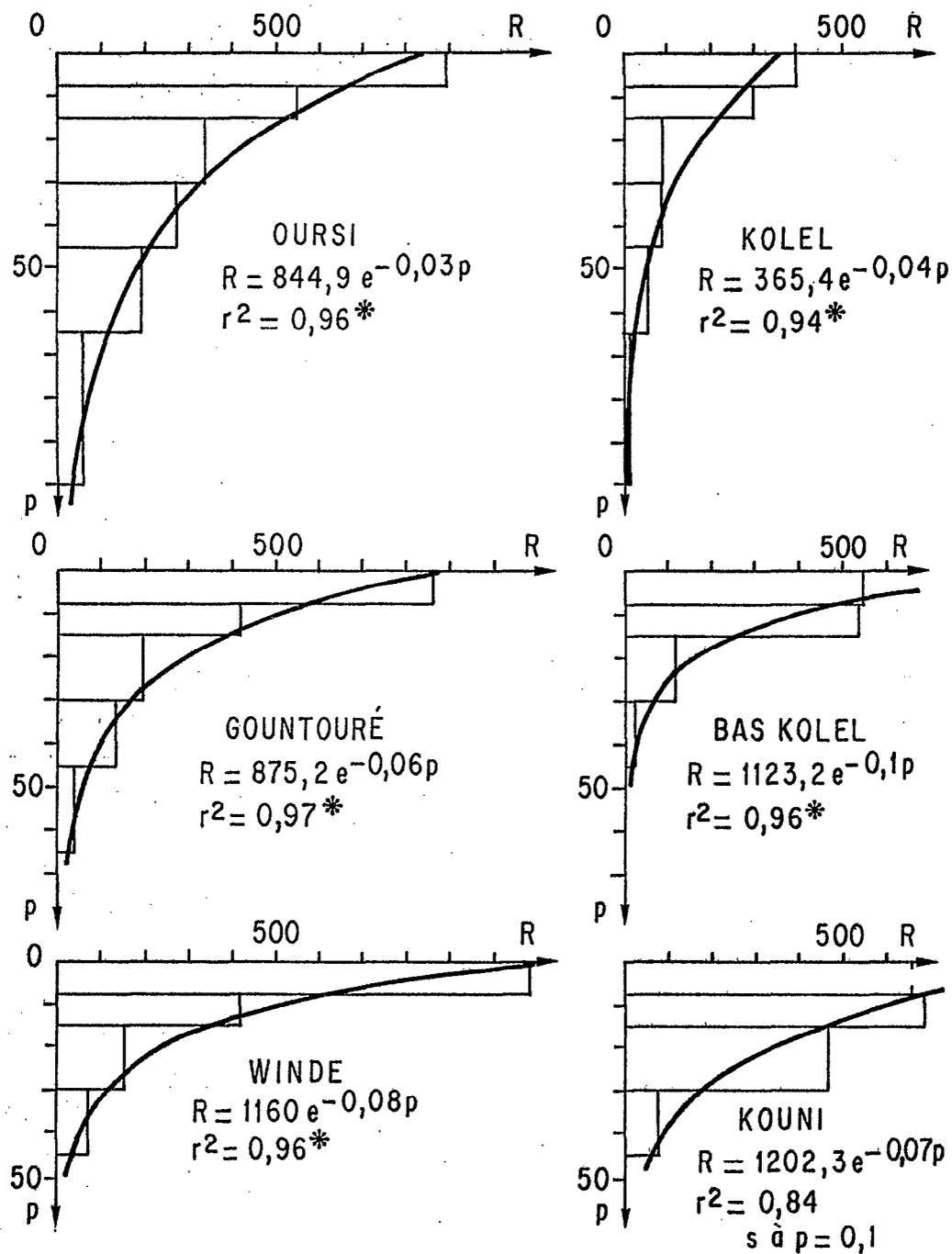


Fig. 51 - Distribution de la phytomasse racinaire (R en mg.1000 cm⁻³) en fonction de la profondeur (p en cm). Prélèvement d'août 1978.

Période Unité	AOÛT			SEPTEMBRE			OCTOBRE		
	a	b	r ²	a	b	r ²	a	b	r ²
OURSI (Ams)	844,9	-0,03	0,96	854	-0,02	0,94	454,9	-0,03	0,94
KOLEL (Cep)	365,4	-0,04	0,94	507,7	-0,03	0,79	432,7	-0,04	0,94
GOUNTOURE (Ase)	875,2	-0,06	0,96	982	-0,06	0,98	1043	-0,05	0,96
BAS KOLEL (Sgr)	1123	-0,1	0,96	-	-	-	-	-	-
KOUNI (Sgl)	1202,3	-0,07	0,85*	1199	-0,07	0,83*	632,7	-0,04	0,98
WINDE (Spt)	1160	-0,08	0,96	727,8	-0,06	0,77NS	645,5	-0,06	0,96

Tableau 36 - Paramètres d'ajustement à la fonction exponentielle ($R = ae^{bp}$) de la distribution racinaire en fonction de la profondeur pour différentes périodes du cycle végétatif.

Tous les coefficients de détermination sont significatifs à $p = 0,05$ sauf ceux repérés par un astérisque qui le sont à $p = 0,1$ ou ne le sont pas (NS).

Dans le tableau 36 sont consignées les valeurs des paramètres d'ajustements pour les différentes périodes du cycle végétatif. Ces valeurs montrent que le profil racinaire ne subit pas de modifications au cours du cycle. Les valeurs de b sont plus élevées pour les unités correspondant aux sols lourds (Sgr, Sgl, Spt : -0,1 à -0,04) que celles relatives aux unités établies sur sables (Ams, Cep, Ase : -0,04 à -0,02). Cela exprime une décroissance plus rapide de la quantité de racines en fonction de la profondeur pour le premier groupe d'unités. Ce résultat est lié à la forte quantité de racines dans le premier horizon de l'unité de bas fond (Spt) et au fait que le premier et le deuxième horizon des glacis de Kouni (Sgl) et de Bas Kolel (Sgr) ont des quantités comparables de racines.

Cet ajustement à une loi exponentielle de l'enracinement en fonction de la profondeur corrobore les résultats de DAHLMAN et KUCERA (1965) sur des prairies américaines. Par contre il s'écarte de ceux proposés par BILLE (1977) pour une végétation sahéenne du Sénégal et CESAR (1971) pour une végétation située en moyenne Côte d'Ivoire. En effet ces auteurs ajustent la répartition racinaire en fonction de la profondeur à une fonction puissance :

$$R = ap^b$$

Malgré la discordance relative entre ces deux résultats, il semble que les distributions soient tout à fait comparables. En effet l'ajustement de nos données à une fonction puissance (tableau 37) est acceptable mais les coefficients de corrélation sont dans l'ensemble plus faibles et pas toujours significatifs. De même, LEGRAND (1979) a montré qu'il est possible de retrouver la relation exponentielle à partir des données de BILLE (1977) sans altérer les coefficients de corrélation.

Unité Fonction		OURSI (Ams)	KOLEL (Cep)	GOUNTOURE (Ase)	BAS KOLEL (Sgr)	KOUNI (Sgl)	WINDE (Spt)
bp R=ae	a	844,9	365,4	875,2	1123	1202	1160
	b	-0,03	-0,04	-0,06	-0,1	-0,07	-0,08
	r ²	0,96	0,94	0,96	0,96	0,85*	0,96
b R=ap	a	3078	1933	4283	5556	2793	5746
	b	-0,76	-0,95	-1,05	-1,34	-0,79	-1,18
	r ²	0,86	0,88	0,92	0,76 NS	0,56 NS	0,98

Tableau 37 - Paramètres d'ajustements aux fonctions exponentielle et puissance de la distribution racinaire en fonction de la profondeur (prélèvements du mois d'Août).

Tous les coefficients de détermination sont significatifs à p = 0,05 sauf ceux reprérés par un astérisque qui le sont à p = 0,1 ou ne le sont pas (NS).

Ce dernier ajustement permet aussi de comparer l'enracinement de la végétation sahéenne à celui d'une végétation soudanienne. L'exposant

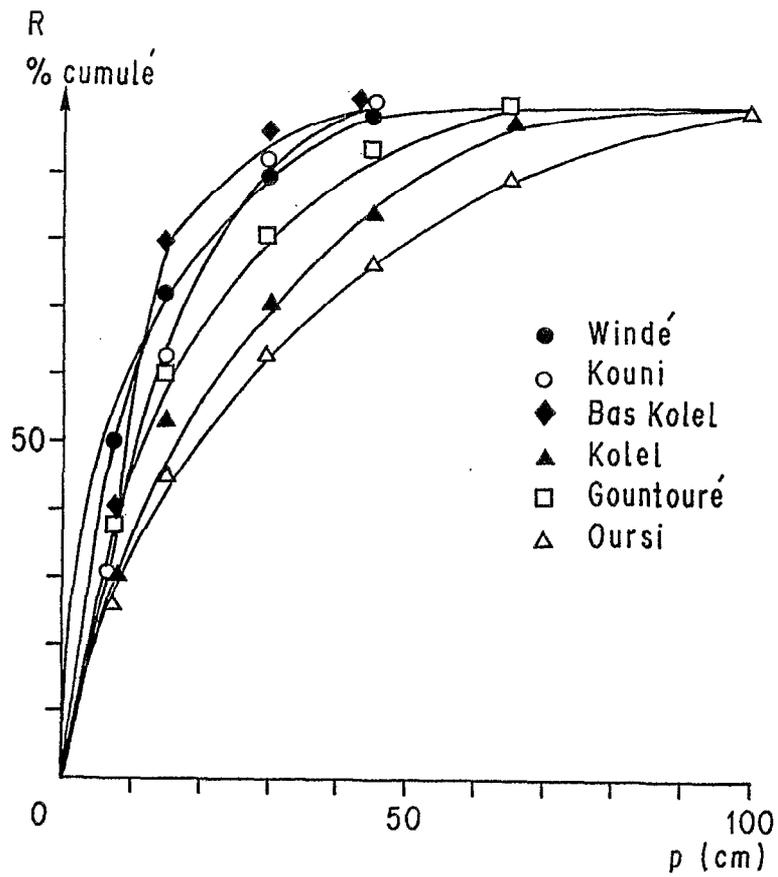


Fig. 52 - Variation du pourcentage cumulé des racines (R %) en fonction de la profondeur pour les différentes unités de végétation. Chaque point représente la moyenne des trois prélèvements répartis au cours du cycle 1978.

est en général beaucoup plus bas pour les formations soudaniennes (-1,9 à -1,55 CESAR, 1971). Cela signifie que la quantité de racines des horizons de surface dans les unités soudaniennes est encore plus élevée que pour les unités de végétation sahéliennes.

GERWITZ et PAGE (1974) ont proposé un modèle pour normaliser l'expression de l'enracinement en fonction de la profondeur. Ils montrent que le pourcentage de racines contenu dans une tranche de sol est relié à la profondeur par la relation générale :

$$R (\%) = 100 (1 - e^{-bp}).$$

Les courbes expérimentales correspondant à ce modèle et relatives aux différentes unités de végétation sont tracées sur la figure 52. Il y apparaît que 50 % des racines de l'unité Ams (Oursi), c'est-à-dire celle pour laquelle les racines descendent le plus profondement, se situent dans les vingt premiers centimètres. Cette même proportion s'établit dans les sept premiers centimètres pour l'unité Spt (Windé). Pour les autres unités la moitié des racines se développent entre 10 et 15 cm.

Ce caractère d'enracinement superficiel s'accorde parfaitement avec les résultats obtenus par SINGH et YADAVA (1974) qui trouvent plus de 50 % des racines dans les dix premiers centimètres, par BILLE (1977) qui observe 85 % des racines dans les cinquante premiers centimètres et par PENNING DE VRIES et DJITTEYE (1982) qui récoltent 80 % des racines dans 20 cm de sol. Il corrobore par ailleurs les résultats obtenus par CESAR (1971), FOURNIER (1982) pour les savanes africaines et SAN JOSE et MEDINA (1976) et SAN JOSE et al. 1982 pour les savanes américaines.

Les graphiques de la figure 52 montrent aussi que les trente premiers centimètres de sol renferment plus de 90 % du système racinaire des unités de végétation établies sur sols lourds (Sgl Kouni, Sgr Bas Kolel, Spt Windé). Cet enracinement très superficiel s'explique notamment par une forte proportion d'argile (cf. fig.25 chapitre I). En effet cette texture argileuse (près de 35 % d'argile pour les glacis et 50 % pour le bas fond de Windé) rend le sol compact ce qui ne favorise pas la pénétration des

racines. Par ailleurs les fronts d'humectation peu profonds (45-60 cm SICOT 1978) limitent le développement racinaire en profondeur pour les stations de Kouni, Bas Kolel et Windé. Les trente premiers centimètres des unités de végétation établis sur sables (Ams-Oursi, Cep-Kolel) contiennent moins de 70 % du système racinaire. Pour ces deux unités il faut atteindre 65 cm pour avoir plus de 90 % des racines. C'est la nature meuble du substrat (proportion de sable supérieure à 85 % en moyenne sur le profil, cf fig. 25) qui favorise un enracinement moins superficiel. Cette caractéristique texturale favorable est accompagnée d'une humectation plus profonde. Celle-ci atteint par exemple en 1977, 170 cm pour Oursi (SICOT 1978) c'est-à-dire un niveau qui n'a même pas été sondé. L'unité Ase de Gountouré présente une position intermédiaire entre ces deux groupes, puisque les trente premiers centimètres contiennent 80 % des racines. La quasi-totalité du système racinaire se trouve néanmoins dans les 45 cm de sol. L'interprétation de ce profil est plus délicate car le sol présente une texture moins homogène : complexe gravillonnaire lié par un ciment sableux en surface, argile sableuse à partir de 30 cm (cf. chapitre I, § 2). Sur le plan hydrique, la présence de nappes souterraines rend impossible toute recherche de relation entre enracinement et front d'humectation.

Cette étude descriptive du profil racinaire des différentes unités de végétation du bassin versant d'Oursi, montre que le meilleur ajustement de la répartition des racines en fonction de la profondeur est une loi exponentielle : $R = ae^{bp}$. Il ressort par ailleurs que l'enracinement est superficiel, puisque plus de 90 % des racines se situent dans les trente premiers centimètres pour les sols lourds et dans les soixante cinq premiers centimètres pour les sols légers. La décroissance rapide de la quantité de racines en fonction de la profondeur corrobore les résultats obtenus dans d'autres unités de végétation sahélienne et soudanienne.

2 - PHYTOMASSE HYPOGÉE.

On trouvera dans le tableau 38 les variations interannuelles de la phytomasse hypogée et celles du rapport de la phytomasse hypogée à celle de la phytomasse épigée. La moyenne interannuelle des phytomasses relatives

aux trois unités de végétation étudiées s'élève à $162 \pm 44 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$. Le minimum absolu au cours de la période considérée est observé pour le glacis de Kouni en 1981 ($93 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) tandis que le maximum est obtenu sur la dune d'Oursi ($310 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ en 1978).

Unité	Nature	1978	1979	1980	1981
OURSI (Ams)	Phytomasse	$310 \pm 15_{(1)}$	133 ± 27	157 ± 17	100 ± 12
	R/T	2,1	1,02	1,16	1,05
KOUNI (Sgl)	Phytomasse	$183 \pm 16_{(1)}$	107 ± 10	147 ± 13	93 ± 9
	R/T	5,1	2,12	3,34	3,37
WINDE (Spt)	Phytomasse	$146 \pm 24_{(1)}$	123 ± 30	148 ± 17	294 ± 44
	R/T	2,7	1,37	1,24	2,11

Tableau 38 - Variations interannuelles de la phytomasse racinaire ($\text{g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) et du rapport fraction hypogée/fraction épigée (R/T).
(1) Observations de LEGRAND (1979).

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles rapportées par BILLE (1977) pour les formations sahéliennes du Sénégal (126 à $330 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) et par PENNING DE VRIES et DJITTEYE (1982) pour les formations sahélo-soudaniennes du Mali ($130 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$). Elles sont par contre très nettement inférieures à celles observées dans les savanes de Lamto en Côte d'Ivoire (1000 à $1900 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$: CESAR et MENAUT 1974).

Les moyennes des phytomasses hypogées des unités de végétation établies sur sables (Ams-Oursi) et dans le bas-fond (Spt-Windé) sont comparables ($175 = 177 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) et sont plus élevées que celle relative au glacis de Kouni ($132 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$). Cet écart est cependant très atténué en comparaison de ce que l'on note pour les phytomasses épigées. Ce caractère se manifeste bien au niveau des rapports R/T qui atteignent des valeurs élevées dans le glacis (R/T : 2 à 5, tableau 38) contrairement à celles du bas-fond (R/T : 1,24 à 2,7) et de la dune (1,02 à 2,1). Cette valeur élevée du rapport R/T pour l'unité du glacis de Kouni peut être mise en relation avec une relative indisponibilité des nutriments (BOOTE 1976) et une plus grande xéricité des conditions écologiques (BRAY 1963).

Les valeurs de R/T qui se situent à 2,2 en moyenne pour l'ensemble des unités du bassin, sont légèrement supérieures aux résultats de BILLE (1977) pour le Ferlo (R/T : 0,98 à 1,68). Elles corroborent cependant les données de MENAUT et CESAR (1979) qui montrent que le rapport de la phytomasse racinaire à celle du maximum de la phytomasse aérienne varie de 1 à 3. Nos résultats se rapprochent aussi de ceux d'ELLENBROCK et WERGER (1986) relatifs à des formations herbacées hygrophiles, dominées par *Vosicia cuspidata* et *Echinochloa* (1,1 à 2,6) et de ceux de JOFFRE et al. (1987) qui se rapportent à des formations herbacées méditerranéennes à base de *Phalaris aquatica* (R/T : 2,5) et de *Vulpia* spp. (R/T : 2,1).

La variabilité interannuelle de la phytomasse racinaire est proportionnellement plus élevée que celle de la phytomasse aérienne. Pour l'unité Ams (Oursi) par exemple le rapport phytomasse maximum/phytomasse minimum est de 1,55 pour les parties aériennes et de 3,10 pour les parties souterraines. Pour l'unité Spt (Windé) ce même rapport est de 1,55 pour la fraction épigée et de 2,3 pour la fraction hypogée. Notons en particulier les valeurs de phytomasse racinaire globalement plus élevées au cours de l'année 1978. En effet la moyenne intersite de la phytomasse racinaire est la plus élevée pour cette année alors que celle des parties aériennes est la plus faible. La méthodologie (extraction, échantillonnage, période de mesure) utilisée par LEGRAND (1979) étant identique à la nôtre, on doit admettre que les phytomasses mesurées en septembre 1978 concernent non seulement la production de cette année mais encore une fraction de la production de l'année ou des années précédentes, non encore décomposée au moment des observations. Cela est d'autant plus probable que l'année 1977 a été une année favorable sur le plan de la production végétale.

Une des principales difficultés dans l'évaluation de la production hypogée réside dans la séparation de la matière produite l'année d'observation de celle produite les années antérieures. Avant d'avancer la discussion sur les variations de la quantité de racine produite, voyons comment la détermination du reliquat racinaire des années antérieures permet d'estimer la production racinaire.

3 - DETERMINATION DU RELIQUAT RACINAIRE - PRODUCTION HYPOGEE.

3.1 - Détermination du reliquat racinaire.

Afin d'empêcher l'établissement de la végétation, une aire de 10m sur 5m est traitée annuellement avec un désherbant total (HYRVAX à raison de 1 g.m^{-2}) peu de temps avant le début de la saison des pluies, c'est-à-dire en général au mois de Mai. Les variations de la phytomasse racinaire de cette zone "désherbée" sont comparées à celles d'une zone témoin voisine où la végétation s'est normalement installée.

Appelons $R \text{ (g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2})$ la phytomasse racinaire mesurée dans la zone "désherbée". Elle correspond au reliquat racinaire de la production de l'année a-1, et non encore décomposée au moment de la mesure. Si T représente la phytomasse racinaire observée dans la zone témoin, la production racinaire de l'année a est obtenue par la différence :

$$A_{\text{g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}} = T - R$$

Ces mesures ont été répétées trois années successives afin de prendre en compte la variabilité annuelle. La production de l'année 1980 (A) et la phytomasse totale (T) sont tracées pour les différents horizons du profil des trois unités de végétation sur la figure 53.

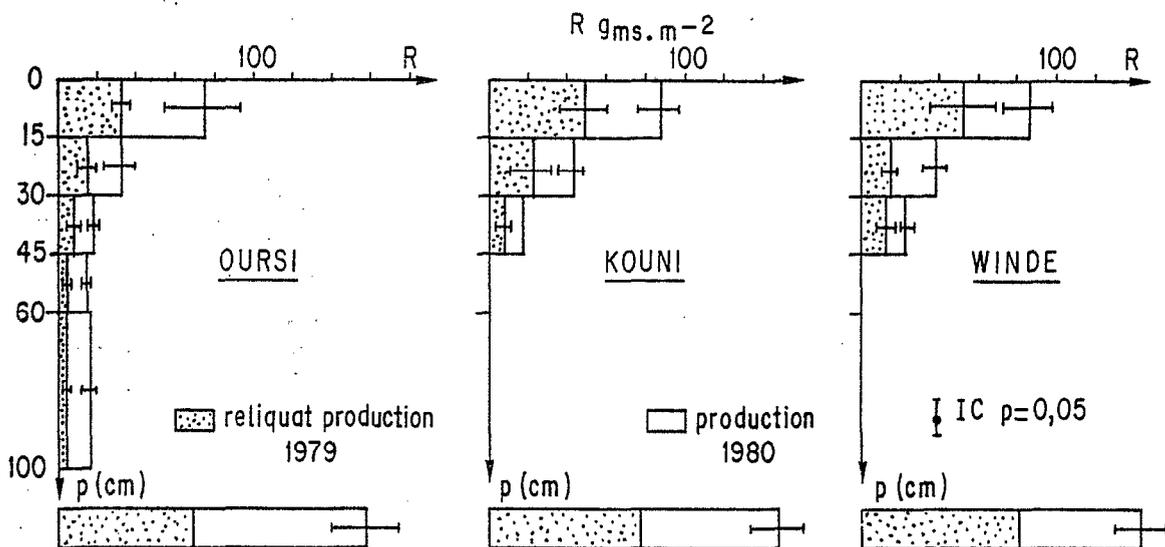


Fig. 53 - Estimation du reliquat racinaire de l'année 1979 (et antérieures) le long du profil des trois unités de végétation. (Prélèvement de septembre 1980).

Pour l'ensemble du profil le rapport A/T est plus élevé pour l'unité sur sable (Oursi : A/T : 0,58) que ceux relatifs aux sols lourds (Kouni : 0,47, Windé : 0,45). Ce caractère peut être relié à une décomposition racinaire plus importante dans le milieu sableux en raison de conditions plus favorables : meilleure porosité, bonne circulation de l'eau. L'examen de la figure 53 permet aussi d'observer que dans l'ensemble, le rapport A/T augmente avec la profondeur. Cette caractéristique peut être interprétée comme le résultat d'une décomposition plus lente dans les horizons supérieures due à l'existence de grosses racines et à l'occurrence de plus grandes variations d'humidité. Elle peut aussi être interprétée comme issue d'une mortalité et d'une décomposition plus rapide des radicelles de l'année dans les horizons de surface. ARES et SINGH (1974) ont en effet montré que le taux de disparition de jeunes racines peut être très élevé pendant la saison de croissance. Ceci pourrait aussi expliquer la faiblesse générale des valeurs des rapports production annuelle/phytomasse totale.

Le tableau 39 rassemble les variations interannuelles de ce rapport pour l'ensemble du profil.

année	Unité	OURSI (0 - 100 cm)	WINDE (0 - 45 cm)	KOUNI (0 - 45 cm)
1979		71	45	- 13 ?
1980		58	45	47
1981		49	45	33
Moyenne		59	45	40 (1980-1981)

Tableau 39 - Variations interannuelles du rapport production racinaire de l'année à la phytomasse totale (%) sur l'ensemble du profil des trois unités de végétation.

Ces résultats confirment ceux relatifs à la seule année 1980, c'est-à-dire une valeur du rapport plus élevée pour l'unité sur sable. On note par ailleurs une remarquable stabilité de ce rapport pour l'unité situé dans le bas-fond (Windé). La variabilité interannuelle est par contre plus grande pour l'unité sur sable (Oursi) et surtout pour l'unité du glacis de Kouni, où une valeur erronée a été obtenue pour l'année 1979. Ce résultat s'explique par la structure très hétérogène de la végétation dans ce milieu. Notons en particulier qu'on évite d'échantillonner dans les touffes de *Schoenefeldia gracilis* dans la zone témoin, alors que pour la zone desherbée (sol complètement nu) le prélèvement peut correspondre à cette situation d'où des valeurs très élevées de R. Pour le bassin versant d'Oursi la moyenne est de 0,48.

L'application de ces rapports aux valeurs de la phytomasse racinaire permet l'estimation de la production racinaire annuelle pour chaque unité de végétation et une expression du rapport fraction hypogée/fraction épigée en terme de production annuelle.

3.2 - Production annuelle.

La production moyenne pour les différentes unités étudiées du bassin versant s'élève à $80 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$. L'examen des variations interannuelles de la production (tableau 40) confirme les remarques relatives aux variations de la phytomasse, notamment la plus grande variabilité interannuelle de la production racinaire par rapport à celle de la production aérienne, et la plus grande production des unités établies sur substrat meuble. Ainsi la production moyenne de l'unité sur sable (Oursi) est en valeur absolue deux fois plus élevée que celle relative au glacis de Kouni. Le tableau 40 indique aussi que la moyenne de production hypogée est équivalente à la moyenne de production épigée (R/T : 1). Cependant l'unité du glacis de Kouni, qui correspond à des conditions hydriques plus défavorables produit plus de racines lorsque celle-ci est ramenée à l'unité de matériel épigée produit. La production hypogée exprimée en pourcentage de la production totale varie de 43 % à Oursi à 57 % à Kouni et présente une valeur moyenne d'environ 50 % .

Station/Année		1978	1979	1980	1981	Moyenne (1978-1981)
OURSI	Production annuelle	18,3±8,8 (1)	95±19	91±9,9	49,5±5,9	104,6
	R/T	1,23	0,72	0,67	0,52	0,79
	R/R+T	0,55	0,42	0,40	0,34	0,43
KOUNI	Production annuelle	73,5±6,4 (2)	43±4 (2)	69±6	30,7±2,9	54
	R/T	2,03	0,85	1,57	1,11	1,39
	R/R+T	0,67	0,46	0,61	0,53	0,57
WINDE	Production annuelle	66±10,8 (1)	55,4±13,5	66,6±7,7	132,3±19,8	80,1
	R/T	1,25	0,61	0,63	0,95	0,86
	R/R+T	0,56	0,38	0,39	0,49	0,46
Moyenne au niveau du bassin versant					Production annuelle	79,6
					R/T	1,01
					R/R+T	0,49

Tableau 40 - Variations interannuelles de la production racinaire annuelle ($g_{MS} \cdot m^{-2}$) et du rapport production annuelle hypogée/épigée. Calcul d'après la moyenne interannuelle 1979-1981 (1) et 1980-1981 (2) du reliquat racinaire.

Van KEULEN (1975) rapporte que les racines des annuelles des régions arides représentent environ 30 % de la phytomasse totale. FLORET et PONTANIER (1982) trouvent 45 % pour une steppe sableuse et 37,5 % pour une steppe gypseuse de Tunisie. Ils montrent que les racines des annuelles au printemps correspondent à 28 % de la production totale. Pour des formations végétales assez proches des nôtres, PENNING DEVRIES et DJITTEYE (1982) estiment que la biomasse des racines formées annuellement constitue 30 à 50 % de la biomasse totale des plantes en milieu naturel. Il apparaît donc que les résultats établis pour la végétation annuelle du bassin versant d'Oursi sont comparables à ceux généralement admis pour les zones arides et semi-arides.

4 - "TURN-OVER" DU SYSTEME RACINAIRE.

Le temps de renouvellement de la fraction hypogée indique la période de remplacement des parties souterraines c'est-à-dire qu'il représente pour une végétation annuelle, la période au cours de laquelle, toutes les racines produites une certaine année, ont entièrement disparu. Il est estimé par le rapport entre la production annuelle et la phytomasse maximale (DAHLMAN et KUCERA 1965, MONTANI et FERNANDEZ 1986).

La difficulté de détermination de la production annuelle explique la rareté des données concernant ce paramètre. Pour les unités étudiées, son estimation a été réalisée par une comparaison de l'évolution de la phytomasse d'une parcelle "désherbée" et d'une parcelle témoin.

A titre d'exemple la figure 54 reflète les variations de la phytomasse racinaire au cours de l'année 1981 à Windé. Remarquons que seuls les intervalles de confiance ($p = 0,05$) des échantillons d'effectif égal à 10-15 ont été tracés. En effet la précision des mesures pour des effectifs égaux à 5 (zone désherbée) sont tellement faibles (de l'ordre de 50 %) qu'elles perdent toute signification statistique. Ces mesures ont cependant été établies pour donner une idée qualitative de l'évolution. Le rapport de la production annuelle à la phytomasse maximale s'élève à 0,45, ce qui correspond à un taux de renouvellement de 2,2 ans.

On trouvera dans le tableau 41, les temps de renouvellement relatifs aux différentes unités. Il évolue en moyenne de 1,7 pour l'unité d'Oursi à 2,5 ans pour le glacis de Kouni. La moyenne générale pour les différentes unités de végétation s'établit à 2,1 ans.

Année	Unité	OURSI (Ams)	WINDE (Spt)	KOUNI (Sgl)
1979		1,41	2,22	-
1980		1,72	2,22	2,13
1981		2,04	2,22	3,03
Moyenne		1,69	2,22	2,5

Tableau 41 - Variations interannuelles du temps de renouvellement de la fraction hypogée.

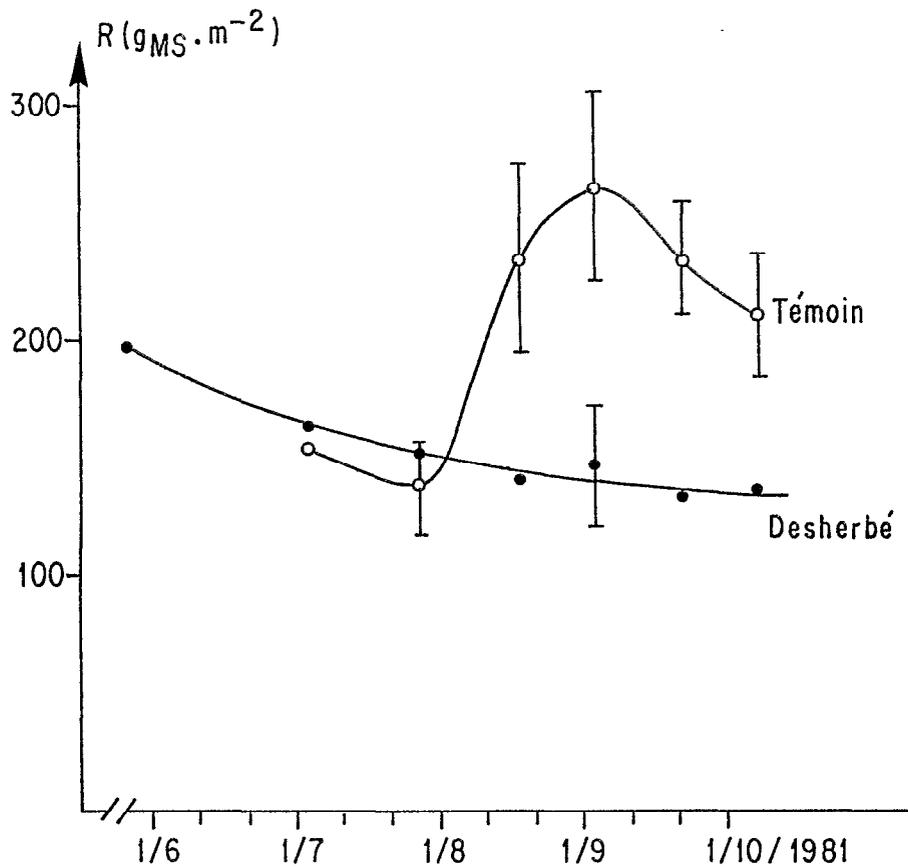


Fig. 54 - Evolution de la phytomasse racinaire totale (témoin) et de la phytomasse du reliquat racinaire des cycles précédents (desherbé) à Windé. Seuls les intervalles de confiance des points obtenus avec des échantillons d'effectif supérieur à 10 ont été tracés.

Avec un temps de renouvellement égal à 1,06 an, SAN JOSE et al. (1982) observent dans les savanes à *Trachypogon* du Nord de l'Amérique du Sud un relatif équilibre entre production annuelle et décomposition. Un résultat similaire est avancé par MENAUT et CESAR (1979) pour les savanes à Andropogonées (t.r = 0,9). Par contre ces mêmes auteurs calculent pour les savanes à *Loudetia simplex* un temps de renouvellement d'environ 2 ans. DAHLMAN et KUCERA (1965) ont obtenu un temps de renouvellement de 4 ans pour une prairie américaine du Missouri Central. Un résultat identique a été rapporté par FIALA (1979) pour une prairie à *Nardus stricta* et *Festuca capillata* d'une région tempérée de l'Europe Central. Pour des formations herbacées méditerranéennes PODLEJSKI (1982) obtient des taux de renouvellement de 2 à 3 ans. L'ensemble de ces résultats montrent que les données obtenues en milieu tropical et plus particulièrement ceux d'Oursi sont pratiquement deux fois moins élevées que celles relatives aux prairies tempérées.

5 - DISCUSSION-CONCLUSIONS.

Les systèmes racinaires des phytocénoses des milieux tropicaux sont beaucoup moins étudiés que les parties aériennes en raison notamment de l'orientation plus appliquée de la majorité des études et des difficultés d'observation. C'est pourquoi un effort particulier a été réalisé dans le cadre de cette étude pour une meilleure connaissance de la fraction racinaire.

Pour ce qui concerne le profil racinaire, nous avons montré que la fonction exponentielle est celle qui rend le mieux compte de la distribution des racines en fonction de la profondeur. L'enracinement des formations herbeuses sahéliennes est très superficiel. Il semble que c'est une caractéristique des phytocénoses des zones arides et semi-arides pour lesquelles non seulement le matériel, mais encore l'activité se concentrent près de la surface du sol (SORIANO et SALA 1983).

Pour la première fois en zone sahélienne le reliquat racinaire des cycles précédents à celui de la mesure a pu être estimé grâce à l'utilisation d'un desherbant qui a empêché l'installation de la végétation.

Sous réserve que ce desherbant n'affecte pas l'activité des micro-organismes et donc la décomposition racinaire, il est possible d'évaluer la production annuelle hypogée et en conséquence la production totale. L'intégration des valeurs de cette production racinaire augmente pratiquement la production de moitié. Ceci améliore nettement les rendements énergétiques et hydriques données dans le chapitre III. A titre d'exemple, l'efficience en eau : RUE ($\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) passe respectivement pour les unités Ams (Oursi), Sgl (Kouni) et Spt (Windé) de 4,3 à 7,7 de 1,1 à 2,6 et de 3,3 à 5,7 lorsque l'on considère l'équivalent production aérienne ou la production totale.

Les rapports fraction hypogée/fraction épigée (R/T) sont élevés quand ils sont calculés d'après la phytomasse. Cette caractéristique a conduit un certain nombre d'auteurs dont BOURLIERE (1978) à considérer cette masse racinaire comme une adaptation particulière à l'aridité. En fait lorsque le rapport est exprimé en terme de production annuelle on arrive à des valeurs voisines de l'unité, ce qui signifie que la production racinaire représente 50 % de la production totale. On peut alors admettre avec FLORET et PONTANIER (1982) qu'un rapport R/T élevé n'est pas forcément un caractère des zones arides. BOOTE (1976) pense même que les formations graminéennes tropicales dominées par des plantes en C4 ont un R/T plus bas que les prairies tempérées à base de C3, à cause d'une meilleure efficience en eau des premières. De même JOFFRE et al. (1987), en tenant compte des travaux de COUPLAND (1979 in JOFFRE op. cit.) rapportent que des R/T supérieures à 1, sont caractéristiques des formations herbacées des climats tempérés contrairement à celles se développant sous des climats tropicaux. L'interprétation de ce rapport exige la définition des paramètres utilisés pour son calcul. De plus, ce rapport est modifié par les conditions de sol, les types biologiques... Il est donc nécessaire de les préciser. JACKSON et ROY (1986) ont par exemple montré que les racines représentent 30 % de la biomasse totale chez les annuelles alors que les pérennes investissent plus 40 % dans les parties souterraines. Des résultats comparables ont été rapportés par FLORET et PONTANIER (1982) qui observent que les racines forment respectivement 28 % et 50 % de la phytomasse totale chez les annuelles et les pérennes.

Les temps de renouvellement des systèmes racinaires des formations herbeuses de la Mare d'Oursi s'élèvent en moyenne à 2 ans. Ils

sont nettement inférieurs à ceux obtenus pour les formations herbacées des milieux tempérés. Cette observation confirme les résultats montrant que le "turn-over" des savanes tropicales est plus rapide que celui des prairies tempérées (DAHLMAN et KUCERA 1965, TRIVEDI et MISHRA 1979). Ce caractère est à mettre en relation avec les conditions climatiques, l'activité microbienne, la composition floristique et la stabilité des écosystèmes (SAN JOSE et al. 1982).





DYNAMIQUE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES

La frange sahélienne du Burkina Faso et plus particulièrement le secteur du bassin versant de la Mare d'Oursi n'échappe pas au phénomène de désertification qui touche cette zone bioclimatique (BOUDET 1972, GROUZIS 1984...).

Certains auteurs imputent ces phénomènes de dégradation à la période de sécheresse qu'ils situent dans un processus de péjoration climatique tendant vers l'aridification (MICHEL 1984, TOUPET 1986). D'autres l'attribuent aux activités humaines qui accentuent les effets des conditions climatiques déjà défavorables (BOUDET 1972, LE HOUEROU 1979, GROUZIS et ALBERGEL 1987).

Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur les causes du phénomène, l'ensemble de la communauté scientifique reconnaît aujourd'hui la profonde dégradation des systèmes écologiques sahéliens. Les processus de dégradation

sont bien connus. Ils débutent par une diminution du couvert végétal ; le sol, moins protégé, est soumis suivant les saisons à l'action du vent et de la pluie. Pendant la longue saison sèche, les vents actifs mettent en mouvements les particules les plus fines du sol. En saison des pluies, le ruissellement augmente et différentes formes érosives s'installent (glaçage superficiel, érosion en nappes, rigoles, ravines...). Ces phénomènes érosifs se manifestent par une perte de terre et une baisse de fertilité en raison du transport sélectif des particules fines et du lessivage des éléments nutritifs (phénomène de lixiviation superficielle, ROOSE 1977). Il en résulte une diminution des réserves en eau du sol et une baisse de la productivité, entraînant de nouveau la régression de la couverture végétale; la désertification apparaît donc comme un processus en chaîne, difficile à maîtriser une fois amorcé. Toutefois, on peut se demander si cette évolution est irréversible, et quelles sont les capacités de régénération de ces systèmes écologiques.

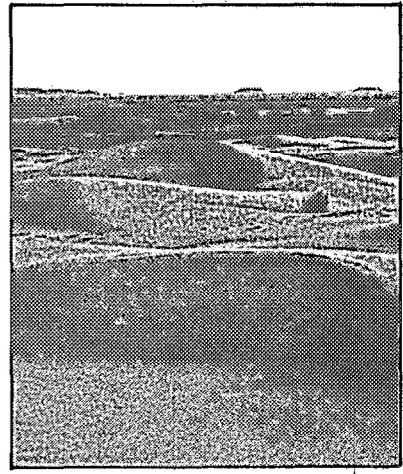
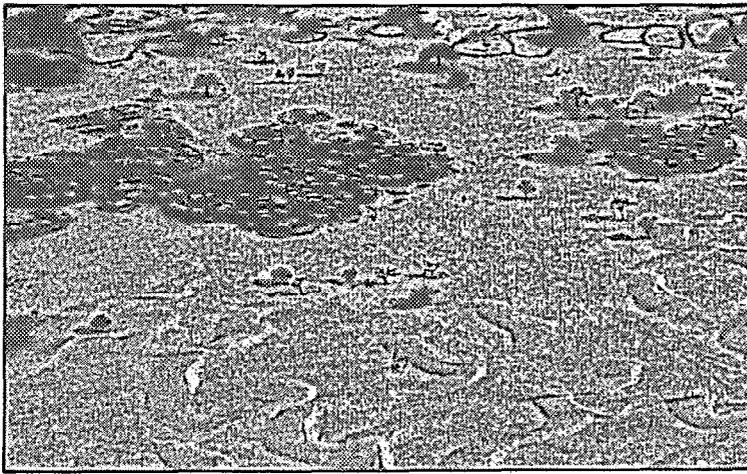
Après avoir rappelé les principales conditions de désertification et esquissé la répartition des zones de dégradation au Burkina Faso, ce chapitre rapportera essentiellement les résultats concernant les effets d'une mise en défens et d'aménagements sur l'évolution et le potentiel de régénération des principaux systèmes écologiques de la région.

1 - LES CONDITIONS DE LA DEGRADATION.

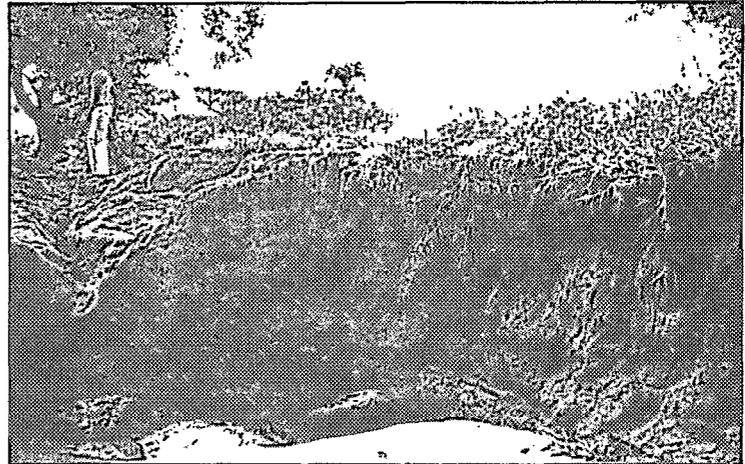
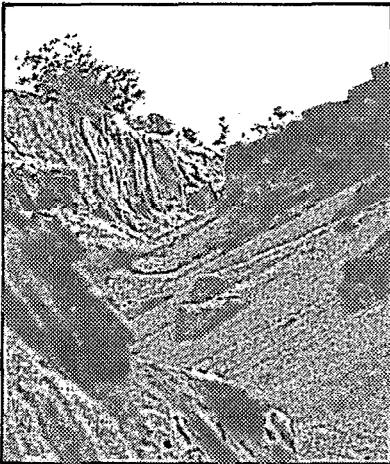
On distingue essentiellement les causes climatiques et les causes anthropiques.

1.1 - Le facteur climatique : la sécheresse.

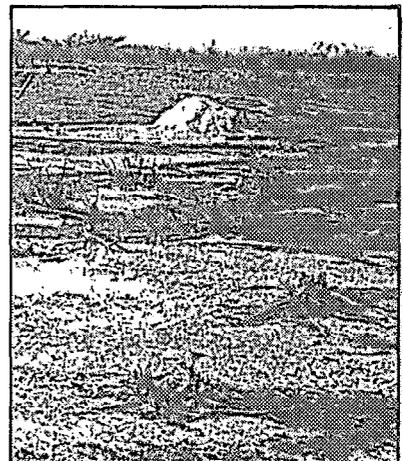
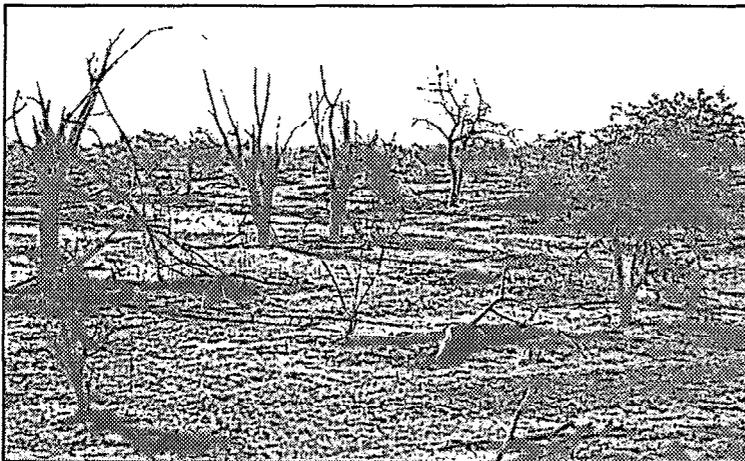
Le système écologique semi-aride du bassin versant de la Mare d'Oursi est caractérisé par une extrême variation de ses paramètres climatiques dans l'espace et dans le temps (cf. Partie 1 § 3). L'existence d'années de sécheresse, c'est-à-dire de périodes de déficit anormal en eau est donc tout à fait normale. On ne reviendra pas sur cette variabilité du climat qui occasionne des sécheresses erratiques, une des conditions d'équilibre des zones semi-arides, et pour laquelle les organismes vivants



Destruction totale de la végétation et remobilisation des sables



Ravinements



Destruction de la végétation sur glacié arénacé

ont développé des mécanismes d'adaptation et les hommes des systèmes d'exploitation appropriés. On étudiera ici les cas de successions d'années de déficit pluviométrique, les tendances climatiques à moyen terme, et l'éventualité d'une modification du climat dans le sens d'une aridification.

Le Sahel a suscité l'intérêt général à la suite des années de sécheresse exceptionnelle apparues au début de la décennie 1970. Il est vrai que cette période climatique défavorable a provoqué d'importantes difficultés sur le plan socio-économique, notamment dans le domaine de la sécurité alimentaire. De nombreux travaux (SIRCOULON 1976, NICHOLSON 1981, LAMB 1982, HARE 1983) ont alors été menés pour caractériser cette période de déficit exceptionnel. La légère rémission de la sécheresse observée dans certaines régions en 1975 et 1976, plaidait en faveur d'un retour à des périodes plus favorables. En fait, avec plus de dix ans de recul, on cerne mieux l'évènement et les années 1983-1984, qui représentent un épisode déficitaire le plus grave jamais mesuré (SIRCOULON 1984) permettent de se rendre compte de l'ampleur du phénomène en cause. De récentes études (CARBONNEL et HUBERT 1985, KATZ et GLANTZ 1986, NICHOLSON 1982 in HARE 1983) montrent que les pays de la zone soudano-sahélienne accusent depuis plus d'une quinzaine d'années des déficits hydropluviométriques particulièrement intenses.

Par l'analyse fréquentielle des totaux pluviométriques annuels de sept stations réparties dans les différentes zones écologiques du pays (GUINKO 1984) et observées depuis au moins 60 ans, ALBERGEL et al. (1985) mettent en évidence pour le Burkina Faso les faits suivants :

- une concentration des années de la période 1970-1984 dans les dix plus basses fréquences ;

- les courbes de fréquence en fonction des hauteurs pluviométriques présentent une forte déviation vers les valeurs les plus basses des séries.

Cette distribution des années sèches nous a conduits à rechercher à l'échelle du pays, un modèle permettant de mettre en évidence les grandes tendances climatiques.

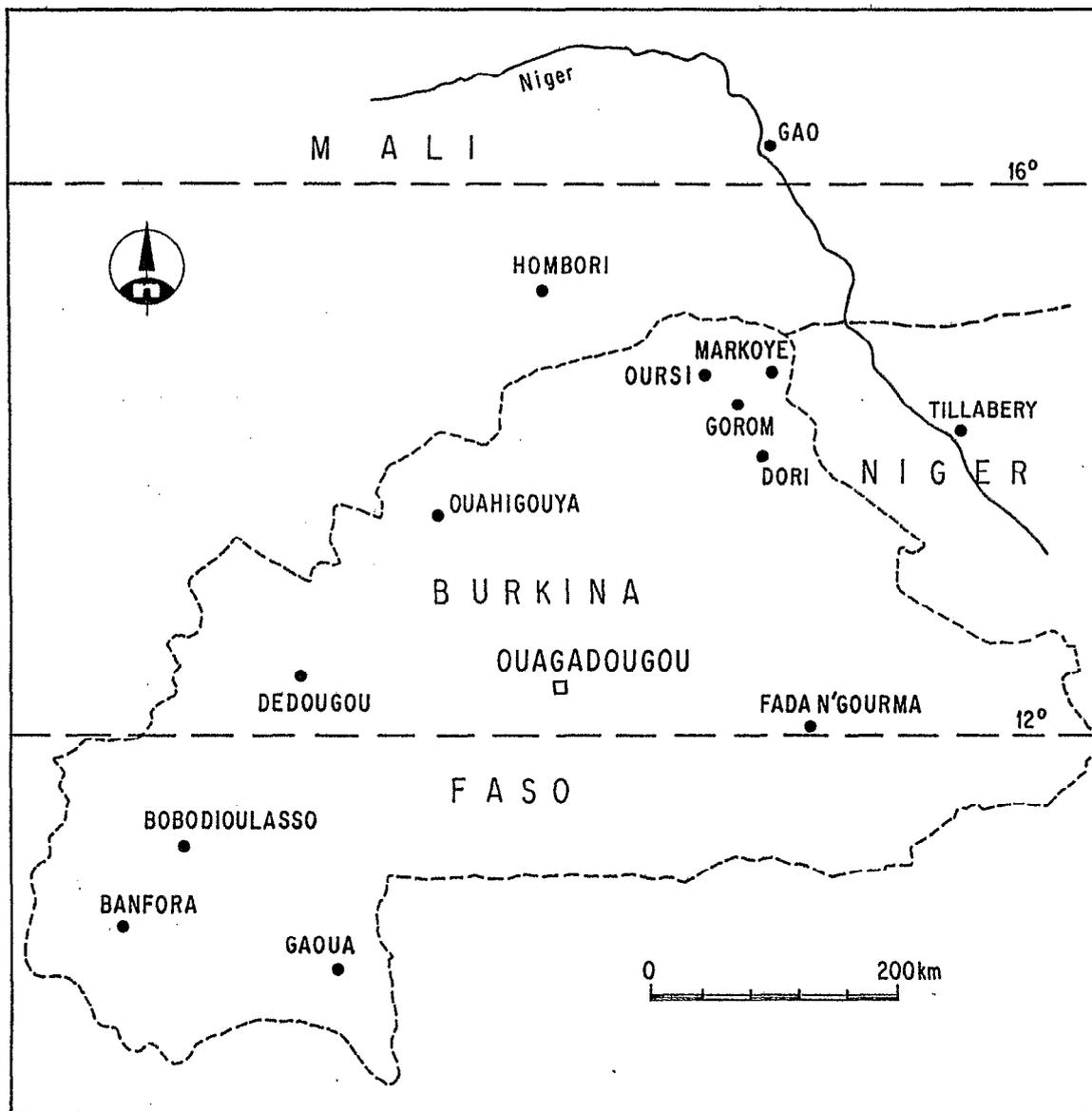


Fig. 55 - Répartition géographique des stations étudiées.

1.1.1 - Méthodes.

Pour analyser une tendance évolutive dans une chronique de données, on cherche à s'affranchir de la variabilité temporelle de la donnée pour mettre évidence, en l'exagérant peut être, sa variabilité à une échelle de temps plus grande. Pour cela, la méthode la plus simple est celle de la moyenne mobile arithmétique. Cependant, elle centre artificiellement des phénomènes qui ne sont pas forcément en coincidence avec les phénomènes observés et induit de fausses périodicités appelées "effet SLUTSKY". On lui préfère la méthode de la moyenne mobile pondérée qui utilise l'hypothèse selon laquelle, à l'échelle du pas de temps de la chronique, chaque donnée est liée aux précédentes par un processus markovien d'ordre 1,

$$X_n = Z_n + AX_{n-1}$$

Le terme Z_n traduit la variable aléatoire d'un processus markovien d'ordre 1 et le second terme AX_{n-1} la variable "persistance" fonction des observations antérieures.

Cette méthode a été utilisée avec succès par OLIVRY (1983) pour des séries hydropluviométriques de longues durées de la Sénégal. C'est pourquoi sa formulation et les valeurs de ses constantes ont été retenues. Ce sont :

$$P_j = \frac{1}{a} P_j + \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{j-1} P_i \cdot e^{-b(j-i)}$$

P_j : pluviométrie de l'année j

$$a = 2$$

$$b = 0,7$$

Cette méthode est appliquée aux séries pluviométriques des stations reportées sur la figure 55. Les stations dont la latitude est située entre 14° et 16° ont été retenues pour encadrer la station d'Oursi et représenter l'entité sahélienne. Celles dont la latitude est inférieure ou égale à 12° ont été sélectionnées pour voir si les phénomènes mis en évidence au niveau sahélien couvrent aussi des régions bioclimatiques plus méridionales.

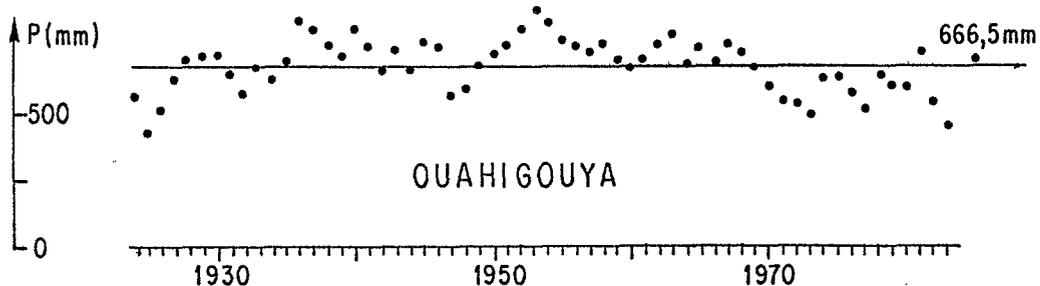
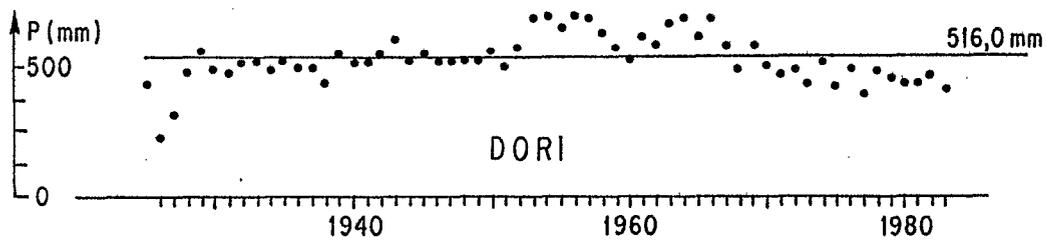
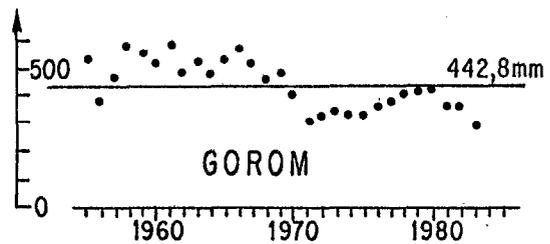
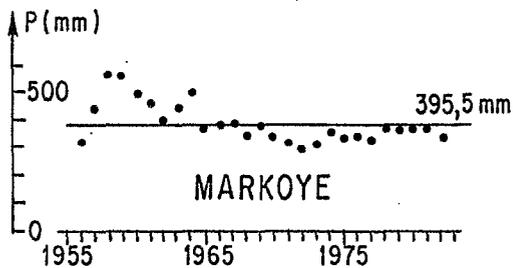
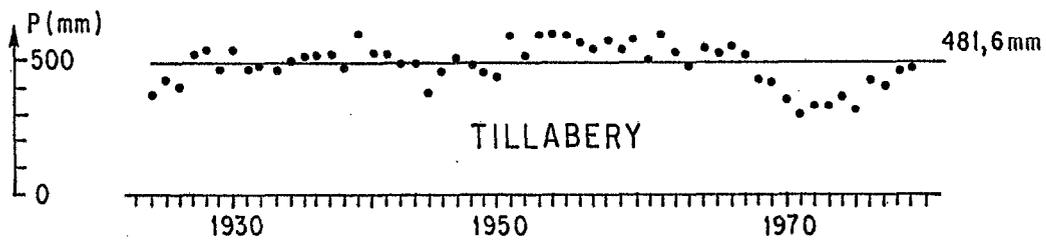
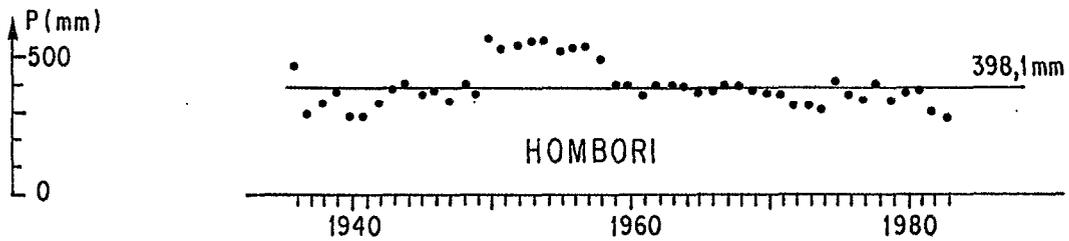
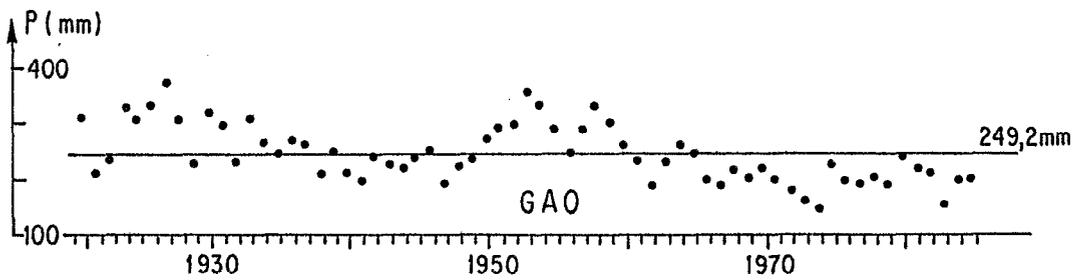


Fig. 56 - Moyennes mobiles pondérées des pluviosités annuelles des stations sahéliennes.

En plus de la pluie annuelle (P)^{*}, des fractions pluviométriques (P1, P2, P3) ont été utilisées. Celles-ci correspondent respectivement à la somme des pluies journalières - inférieures à 20 mm (P1)

- comprises entre 20 et 40 mm (P2)

- supérieures à 40 mm (P3).

En effet, ces fractions pluviométriques permettent de caractériser plus finement les transformations climatiques (CARBONNEL 1984).

1.1.2 - Résultats.

Les graphiques des figures 56 et 57 comparent les variations de la moyenne mobile pondérée à la moyenne interannuelle. En zone sahélienne (figure 56), on peut distinguer pour l'ensemble des stations étudiées trois périodes :

- la première s'étend du début des relevés jusqu'à l'année 1949; au cours de cette phase des trains d'années sèches et humides se succèdent sans règle apparente ;

- la deuxième qui s'étend de 1950 à 1967 est caractérisée par des années successives largement excédentaires ;

- une tendance générale vers un régime déficitaire caractérise la troisième période qui commence en 1968. Les données relatives aux zones plus méridionales (figure 57) offrent une évolution semblable. En effet à une période d'années excédentaires (1951-1969 environ) fait suite une période (1970-1983) de déficit persistant. La période allant du début des observations jusqu'à vers 1950 se caractérise par des années proche de la moyenne, plutôt excédentaire au début (1928-1939) et plutôt défavorable de 1940 à 1950. La différence fondamentale entre les deux zones climatiques concerne les années 1931-1933, période pendant laquelle les stations sahéliennes dans leur majorité ont accusé un déficit par rapport à la moyenne contrairement aux stations soudaniennes.

* Sources des données pluviométriques : ORSTOM-CIEH 1977, Relevées ASECNA. Les séries relatives au Mali, au Niger et les données récentes nous ont été communiquées par le laboratoire d'Hydrologie (ORSTOM) et le laboratoire d'Agroclimatologie (CIRAD/IRAT). A cet effet nous remercions Messieurs L'HOTE et HERVE et FOREST pour leur aimable collaboration.

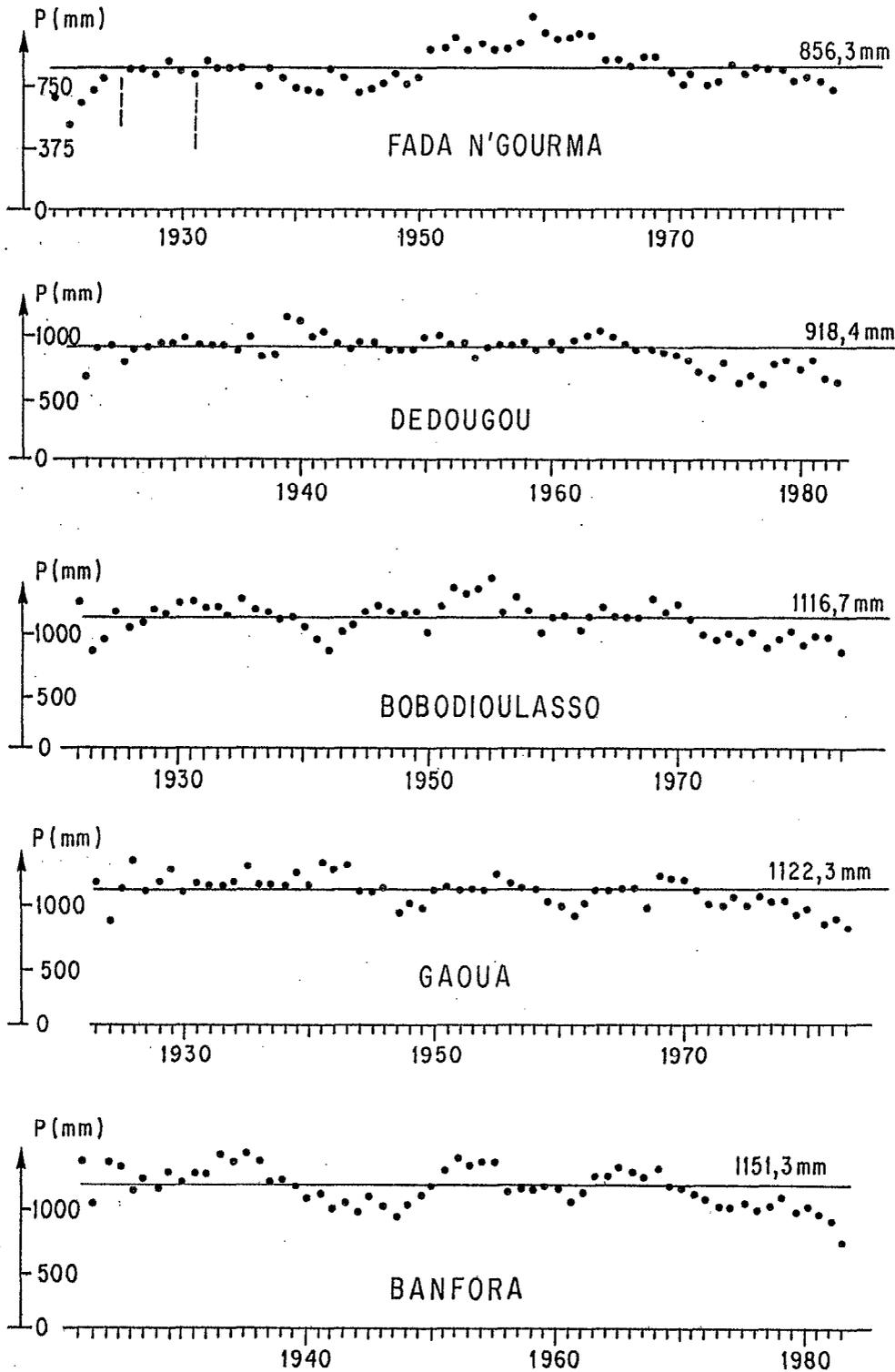


Fig. 57 - Moyennes mobiles pondérées des pluviosités annuelles des stations situées au voisinage et au Sud du 12^e parallèle.

Les tendances mises en évidence pour le Burkina Faso rejoignent étroitement celles décrites par OLIVRY (1983) pour la Sénégalie.

L'exceptionnelle durée des années sèches nous amène à nous interroger sur l'éventualité d'une modification climatique. En effet la probabilité d'avoir des réalisations consécutives inférieures à la moyenne dans le contexte sahélien est très faible : 10^{-6} pour 20 réalisations (HUBERT et CARBONNEL 1987), 10^{-3} pour 11 réalisations (GREGORY 1982). ALBERGEL (1986) a aussi montré que la probabilité pour observer 5 fois la décennale sèche en 16 ans est de $3,14 \cdot 10^{-6}$.

En appliquant le test de LEE et HEGHINIAN (1977) à 42 chroniques pluviométriques de la zone sahélienne HUBERT et CARBONNEL (1985, 1987) montrent que la série statistique des pluviométries annuelles n'est pas stationnaire et que la probabilité maximale d'avoir dans ces séries deux chronologies, dont les moyennes sont significativement différentes se situe entre 1969-1970 pour l'ensemble des chroniques.

La non-stationnarité du régime pluviométrique annuel est confirmée par SNIJDERS (1986). Cet auteur montre, à l'aide d'un indice pluviométrique régional, construit sur la base des données des 20 stations du centre et du nord du Burkina, que le régime des pluies de 1970 à 1983 est significativement différent de celui de la période 1953-1969. Il est d'autre part intéressant de constater que la probabilité de déviation est pratiquement nulle entre les deux premières périodes précédemment décrites alors qu'elle est maximale entre la deuxième et la troisième. Ce résultat confère un caractère de singularité à la sécheresse actuelle par son poids dans les séries pluviométriques observées.

Pour comparer le régime pluviométrique qui prévaut actuellement à celui décrit dans les années 1970, nous avons compté (GROUZIS et ALBERGEL 1987), pour quelques stations sahéliennes, le nombre d'années de la période 1970-1984 pour lesquelles le total pluviométrique est inférieur ou égal à la décennale sèche établie par RODIER (1975) sur la base des données de la période antérieure à la sécheresse.

Station	Gorom-Gorom	Dori	Ouahigouya	Kaya
Moyenne en mm	462	535	674	707
Décennale sèche RODIER (1975) en mm	320	361	522	542
Nombre d'années de 1970-84 où P est inférieure à la valeur de la décennale sèche	6	4	8	5

Tableau 36 - Comparaison des pluviométries de la période 1970-1984 à la décennale sèche établie par RODIER (1975).

Les résultats consignés dans le tableau 36 montrent qu'un risque de sécheresse qui avait une occurrence décennale dans la période antérieure à 1970, apparaît en moyenne 6 fois en 15 ans pour la période 1970-1984.

La phase sèche qui s'est installée vers la fin des années 1960 se singularise donc des autres périodes sèches connues (1913, 1931, 1939) par sa durée (plus de 18 ans dans certaines stations), son ampleur (fréquence élevée d'années exceptionnellement sèches) et son extension géographique.

Si l'étude des pluviométries annuelles met bien en évidence la tendance générale des variations climatiques récentes, l'analyse des fractions pluviométriques permet de décrire le phénomène en recherchant les paramètres qui ont varié de façon significative. CARBONNEL (1984), ALBERGEL et al. (1985) ont montré que les fractions pluviométriques P1 (>20 mm), P2 (entre 20 et 40 mm) et P3 (>40 mm) varient de façon indépendante : P1 reste constant dans le temps (sous forme d'une variable aléatoire à faible écart-type), P2 tend à diminuer à partir de 1965, et P3 diminue fortement jusqu'à s'annuler au cours de la dernière phase sèche. Les variations climatiques actuelles peuvent donc se traduire par :

$$\begin{aligned}
 P &= P_1 + P_2 + P_3 \\
 &= K \quad \searrow \quad \searrow 0
 \end{aligned}$$

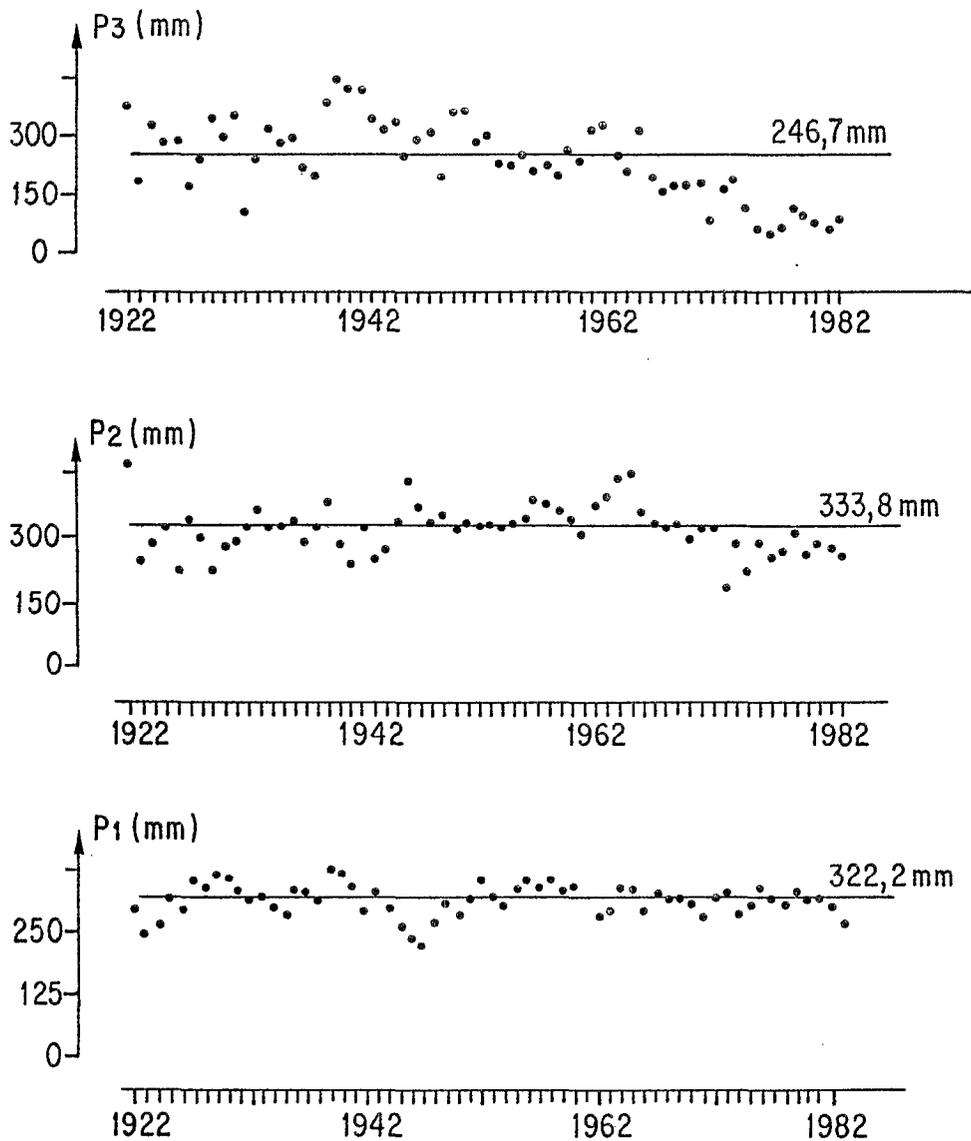


Fig. 58 - Moyennes mobiles pondérées des fractions pluviométriques de la station de Dédougou.

Pour mieux préciser la variabilité de ces trois fractions nous avons appliqué à chacune d'elles la méthode de la moyenne mobile, précédemment décrite. La figure 58 relative à la station de Dédougou permet de noter la régularité de cette moyenne mobile appliquée à la fraction P1, et sa décroissance continue pour les deux autres, surtout pour P3 qui, à elle seule, semble expliquer une bonne part de la variation climatique au niveau des précipitations annuelles.

Station	Nb. années	P3 moyen	P moyen	r
Dori	52	114,5	540,4	0,75
Ouahigouya	58	149,9	666,5	0,62
Dédougou	58	255,3	925,1	0,74
Banfora	57	343,3	1166,1	0,73

Tableau 37 - Coefficient de corrélation de la relation pluie annuelle (P) en fonction de la fraction pluviométrique journalière supérieure à 40 mm (P3).

Pour confirmer cette observation, les coefficients de corrélation entre P3 et P pour les stations de Dori, Ouahigouya, Dédougou et Banfora, ont été calculés (tableau 37). Ces coefficients sont significatifs et à l'exception de Ouahigouya (38 %), la fraction P3 explique plus de 50 % de la variabilité de la pluviométrie totale.

1.1.3 - Conclusions.

Au Sahel, un accord général se dégage sur les caractères de la sécheresse actuelle qui se singularise par sa durée, son intensité et sa généralisation géographique (CLAUDE 1986).

Des travaux récents ont démontré la non-stationnarité du régime pluviométrique et concluent à la mise en place, depuis le début des années 1970, d'une nouvelle période climatique (HUBERT et CARBONNEL 1987, SNIJDERS 1986).

En nous référant à l'ensemble des recherches relatives au Burkina Faso (CARBONNEL 1985, GALLE 1985, ALBERGEL et al. 1985, ALBERGEL 1986, SNIJDERS 1986, HUBERT et CARBONNEL 1987) on peut établir le modèle des

variations des principaux paramètres pluviométriques lors du passage de la période humide à la période sèche comme suit :

PERIODE HUMIDE

$$P = P1 + P2 + P3$$

avec $P1 = P2 = P3$

P/N élevé

≈ 1970

Réurrences d'années sèches plus fréquentes

PERIODE SECHE

$$P = P1 + P2 + P3$$

=k

P/N

- . quantité de pluie par jour de pluie diminue
- . fin de la saison des pluies plus précoce
- . modification de la distribution décadaire des pluies, notamment fort déficit en fin Juin et en Août.

Telle est donc la situation qui découle de l'analyse des séries pluviométriques. Notons toutefois qu'aucun élément de ces analyses statistiques ne permet de tirer des conclusions sur l'évolution à long terme du climat, en particulier de conclure à l'aridification du système (TOUPET 1986) ou de mettre en évidence des périodicités (FAURE et GAC 1981). En fait "l'homme moderne n'a guère plus de moyen que le pharaon de prévoir les plaies d'Egypte et les périodes de vaches maigres" (BERNUS 1984).

1.2 - Les facteurs anthropiques.

1.2.1 - Les facteurs anthropiques actuels.

Les zones sahéliennes sont actuellement caractérisées par une forte croissance démographique. Estimée à 35 millions d'habitants en 1984, la population atteindrait 70 millions d'ici 25 ans si les tendances

actuelles se maintiennent. On assiste de plus à une forte urbanisation (40 % de la population urbaine : ANONYME, 1984).

Pour faire face aux besoins de cette population en pleine expansion et de plus en plus déséquilibrée en raison de la forte urbanisation (4 consommateurs par producteur en 2010 au lieu de 3 actuellement : ANONYME, 1984), on développe des techniques extensives d'exploitation car les rendements évoluent peu (GROUZIS et ALBERGEL 1987). Les cultures s'étendent aux dépens des jachères, des bas-fonds et des zones d'aptitude culturale souvent marginales et sensibles à l'érosion. Ainsi DEWISPELAERE et TOUTAIN (1976 b) notent pour le Sahel burkinabe, entre 1955 et 1975, un accroissement des surfaces cultivées au rythme de 2,25 % par an, chiffre très voisin de la croissance démographique.

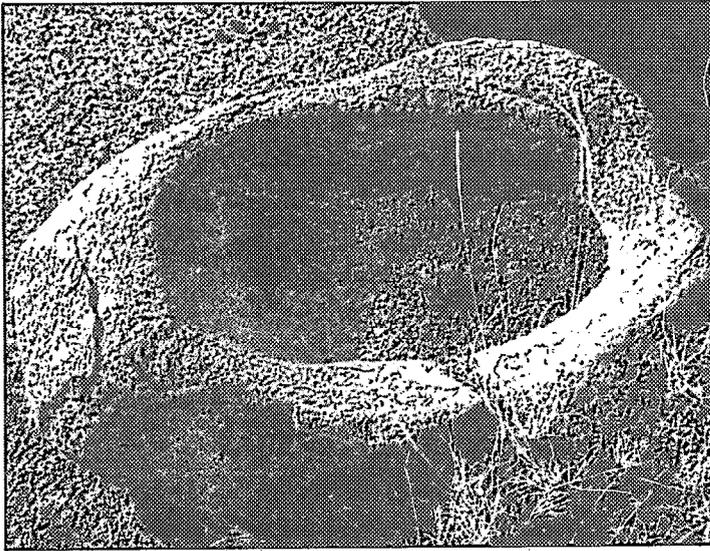
Sur le plan pastoral la logique est comparable. L'éleveur tend à augmenter l'effectif du cheptel pour accroître les chances de reconstitution du troupeau en cas d'accident climatique. De ce fait le milieu surexploité n'est plus en mesure de répondre aux besoins du bétail. DEWISPELAERE et TOUTAIN (1976 b) rapportent que les surfaces dégradées, définies par "un tapis herbacé très réduit ou disparu et de nombreux ligneux morts ou disparus" ont quadruplé de 1955 à 1975 dans la région sahélienne d'Oursi-Gorom. En conséquence la production fourragère a diminué de 20 à 25% entre 1955 et 1975 sur l'ensemble du sahel burkinabe (TOUTAIN et DEWISPELAERE 1978).

La strate ligneuse est particulièrement touchée par ses activités humaines. L'élimination ou la forte dégradation du couvert ligneux est due :

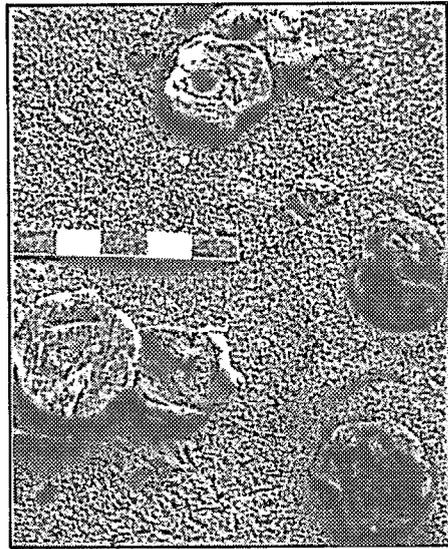
- à la préparation des champs (réduction de l'ombrage, lutte contre la nidification des oiseaux granivores, constitution des haies de protection contre les troupeaux) ;

- à l'émondage et à l'étêtage afin de mettre le feuillage à la disposition du bétail ;

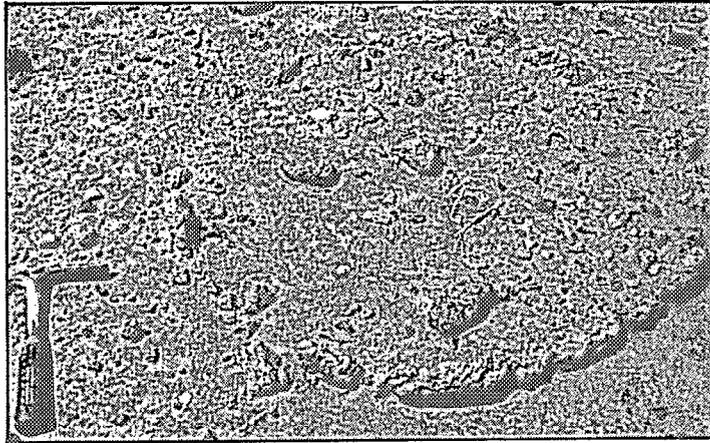
- au prélèvement pour couvrir la quasi-totalité des besoins énergétiques de la population.



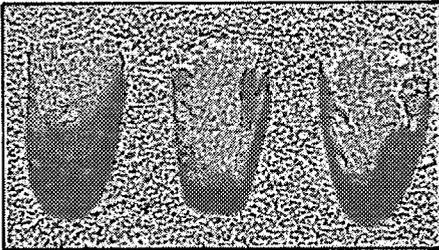
Meule dormante (Tunté)



Disques perforés (Totiri)



Fourneaux
(Polaka à gauche, Kolel 2 en haut)



Outils en pierre polie
(Oursi)



Base de grenier ? (Tunté)

VESTIGES D'OCCUPATION ANCIENNE

Ce système d'exploitation caractérisé par une consommation d'espace associé à la contrainte sécheresse induit globalement une dégradation du milieu. Celle-ci se manifeste notamment par la remobilisation des sables et l'extension des dunes vives. DEWISPELAERE et TOUTAIN (1976 a) indiquent par exemple que la surface de la dune vive d'Oursi a été multipliée par 12 entre 1955 et 1975. Ce phénomène, bien que localisé est néanmoins symptomatique. Sur les sols lourds les zones nues à forte réorganisation superficielle (pellicule de battance) s'étendent. Il en résulte une augmentation sensible du ruissellement (DEWISPELAERE et TOUTAIN 1981, ALBERGEL et al. 1985) ce qui diminue le bilan hydrique des sols.

1.2.2 - Les facteurs anthropiques historiques.

L'empreinte de l'homme sur le milieu peut aussi relever de l'histoire. Il existe en effet une relation étroite entre les milieux fortement dégradés (glacis dénudés, dune vive, piémonts érodés...) et les vestiges d'occupation humaine. Cette corrélation dégradation des sols/occupation ancienne, a aussi été signalée par MARCHAL (1978) pour le Yatenga et par DUPRE et GUILLAUD (1986) pour le pays d'Aribinda. Elle n'est donc pas spécifique de la région d'Oursi.

Face à l'abondance des sites d'occupation ancienne dans la région, il nous a semblé utile d'avoir le regard de spécialistes pour essayer de relier l'actuel au passé et consolider l'interprétation des données sur la dynamique des systèmes écologiques. Les résultats présentés ci-après sont les premiers éléments de la prospection effectuée par une équipe pluridisciplinaire (GROUZIS, PARIS, PERSON et SALIEGE 1985). Ils feront ultérieurement l'objet d'une étude plus approfondie où les points de vue des archéologues, géologues et écologues seront confrontés.

Les vestiges d'occupation ancienne reconnaissables dans la région peuvent être regroupés en cinq catégories. La répartition de ces sites, des activités associées, ainsi que les périodes d'occupation* sont représentées sur la figure 59.

* Les datations radiométriques (^{14}C) des charbons ont été réalisées au Laboratoire de Géologie dynamique de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

Remarquons que des activités se superposent sur certains sites.

Les tertres anthropiques se présentent sous la forme de buttes ellipsoïdales d'une vingtaine de mètres de long et de 1 à 2 m de haut. Ces tertres et les structures agraires qui leur sont associées s'étendent sur des surfaces de 2 à 3 ha (Tunté). On rencontre parfois (Oursi, Ondo-Tiere) des structures architecturales de terre cuite. La surface des tertres est parsemée de tessons de poterie. Certains permettent la restitution de la forme des récipients. La figure 60 donne une idée des formes, des tailles et des ornements des poteries trouvées à Tunte. De nombreux objets métalliques, des broyeurs, de multiples meules usagées accompagnent ces débris.

Les sites à activités lithiques sont essentiellement associés aux formations sableuses (Oursi, Totiri, Warga). La figure 61 donne un échantillon du matériel lithique provenant d'un ramassage de surface sur les sites interdunaires d'Oursi. On y reconnaît différentes formes d'armature de pointes de flèches biface (bords convergents convexes, bords convergents rectilignes, base convexe, base concave...) et des éclats aménagés en micrograttoirs, microperçoirs. Disques perforés (Totiri) hâche polie et herminette polie (Oursi, Warga) constituent d'autres éléments de matériel lithique.

Les nécropoles sont essentiellement représentées par des jarres cercueils ou urnes funéraires mises à nues dans les griffes d'érosion des principales buttes cuirassées (Dibissi, Kouni) et des microlithes (Tazawat).

Il n'existe pas au niveau du bassin versant d'Oursi de nombreux parcs à *Acacia albida* contrairement aux observations de MARCHALL (1978) qui voit une relation évidente entre la présence de cette espèce et les monticules domestiques. Les abords immédiats du village d'Oursi constituent une exception, mais il est hasardeux d'admettre la contemporanéité de ces populations ligneuses aux autres vestiges d'occupation en l'absence de leur datation. Or les datations des espèces liées aux milieux arides sont difficiles en raison des "cernes nuls ou de l'accumulation de cernes infimes" (MARIAUX 1975, POUPON 1980). Il existe toutefois de nombreuses autres manifestations d'activités agricoles. C'est notamment le cas de meules fixes sur bloc rocheux (Kolel) qu'il est nécessaire de distinguer des

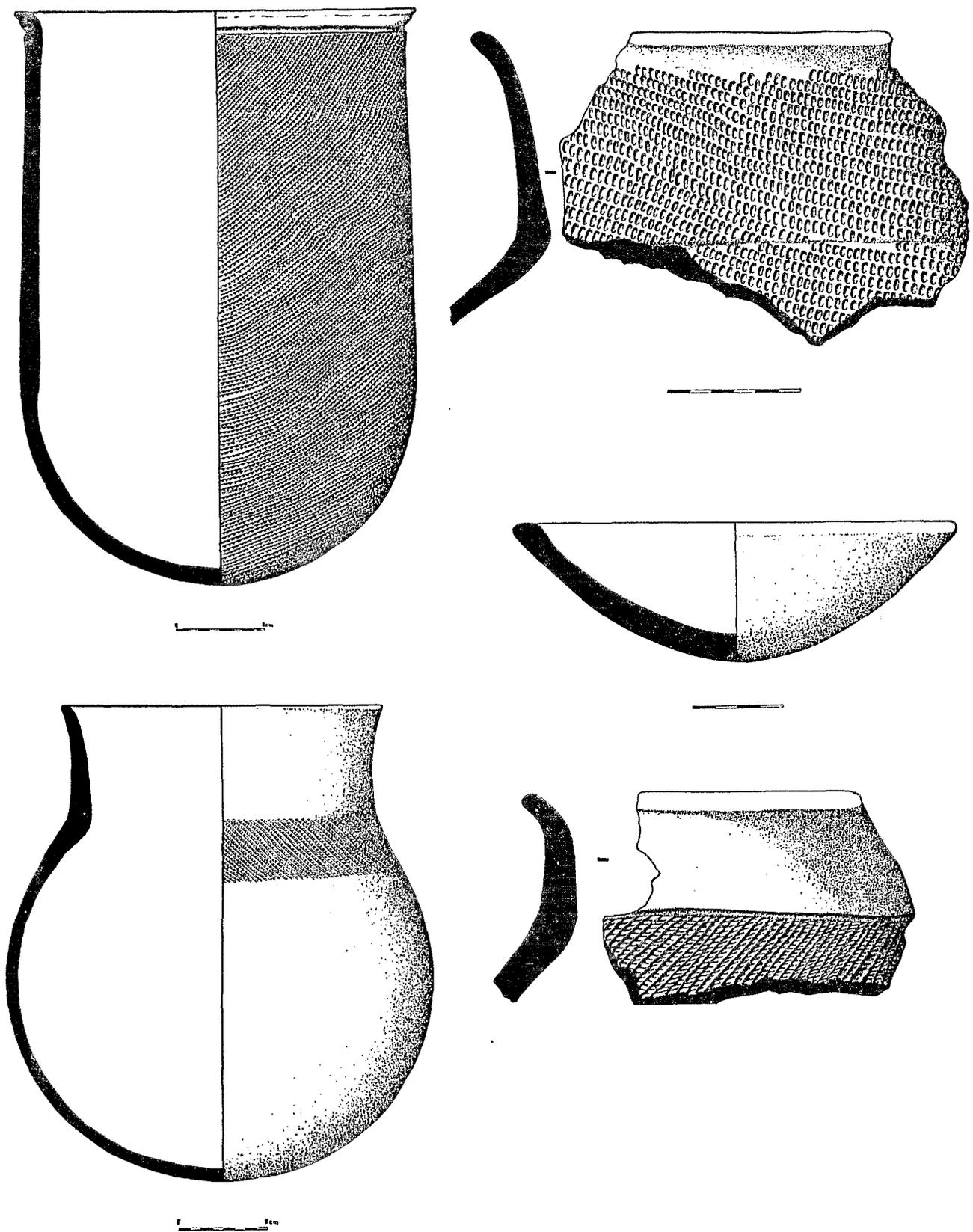


Fig. 60 - Reconstitution des différents types de vases d'après les tessons recueillis à Tunté. (Dessin B. CAFFE)

cupules d'affûtage (Massif de Totiri), et des meules mobiles que l'on trouve au niveau de tous les tertres et même sur les hauteurs (Kouni-Kouni). Citons aussi les bases de greniers. C'est enfin le cas des structures agraires qui sont de deux types :

- le premier (Tunté, Kolel) est associé aux buttes anthropiques. Il est constitué de traces d'épierrage qui délimitent des casiers de taille relativement modeste (une centaine de m²). DUPRE et GUILLAUD (1986) qui décrivent les mêmes structures en pays d'Aribinda, y reconnaissent plus des jardins que des champs ;

- le second se trouve en dehors des tertres (Tchalol, Polaka). Le sol décapé porte des traces d'épierrage perpendiculaires à la pente. Ces vestiges peuvent être interprétés comme des ouvrages anti-érosifs (DUPRE et GUILLAUD op.cit.). Pour MARCHAL (1978) ces traces "témoigneraient de l'obligation pour les populations de cultiver (déjà à cette époque) des sols à potentialités agronomiques faibles ou médiocres".

Les vestiges d'aménagements hydriques sont relativement peu abondants dans les environs immédiats de la Mare. Une seule citerne a pu être localisée au sud ouest de celle-ci. Rappelons que ces citernes sont des réservoirs creusés dans le sol et entourés de bourrelets de terre de 1 à 3m. Elles sont très abondantes dans le Gourma malien (REICHELT 1977) et dans le Yatenga (MARCHAL 1978). Par contre, on rencontre plus fréquemment dans les séries sédimentaires au nord de la Mare, des puits anciens avec cuvelage de pierre (BARRAL 1977).

L'activité métallurgique semble particulièrement caractéristique des sites de la région, probablement en raison de la proximité des gisements de minerai de fer (magnétite et cuirasse sur magnétite) et de l'abondance à cette époque de combustibles. Les emplacements correspondent à des lentilles de scories isolées (Jalafanka, Tchalol), à proximité d'habitat (Kolel2, Tunte), ou à des zones d'amas de scories (Kolel5, Polaka, Tamateltel). Notons que des différences notables (structure, nombre) apparaissent entre les fourneaux utilisées à Kolel2 et ceux observés à Polaka. Il est vrai que 5 siècles séparent ces deux types de fourneaux.

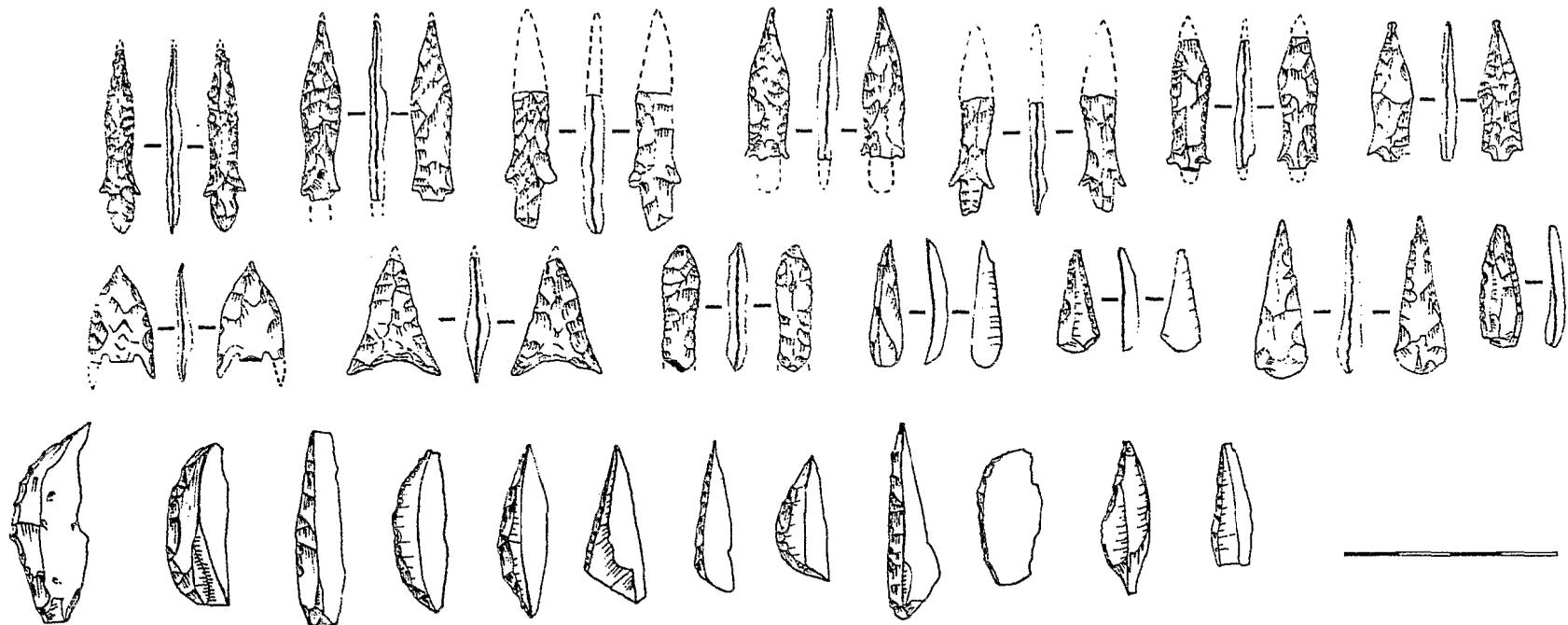


Fig. 61 - Matériel lithique caractéristique du site d'Oursi : armatures de pointes de flèches, micrograttoirs...
(Dessin B. CAFFE)

La grande période d'occupation concerne donc la première moitié du premier millénaire après J.C. (1900 à 1375 avant nos jours). D'après, les datations la durée d'occupation des sites s'étale dans l'espace considéré sur 10 siècles (figure 59). Sur les sites de Tunte et d'Oursi Ondo-Tieré, elle est respectivement de 2 et 5 siècles. Il est probable que plusieurs modes d'organisations sociales se sont succédés dans la région d'Oursi durant une telle période d'occupation. Néanmoins les vestiges témoignent pour une grande part, d'une occupation sédentaire relativement dense reposant sur une activité agricole. Les conditions de l'environnement permettaient alors une activité métallurgique importante.

Il est intéressant de signaler que les caractères de certains vestiges (tertres, structures agraires, citernes...) correspondent exactement à ceux décrits par MARCHAL (1978) pour le Yatenga et DUPRE et GUILLAUD (1986) pour le pays d'Aribinda situés au sud-ouest d'Oursi. Les auteurs attribuent ces vestiges respectivement à une population kibga (Dogon, du Xè-XIè siècle à la fin du XVè siècle) et à des Pote Samba (premiers gens, non identifiés). Y-a-t-il une relation entre ces populations ? Les populations de la région d'Oursi auraient-elles migré vers le sud-ouest suite à la période d'aridité qui a eu cours vers le milieu ou dans la seconde partie du XVè siècle (MALEY 1986) ? Par ailleurs la période de grande aridité du XVIIè siècle et de la première moitié du XVIIIè siècle, associée à la dégradation du milieu (épuisement sol, déforestation...) et à la razzia des Touaregs ne seraient-elles pas à l'origine de l'abandon de la région par ces populations sédentaires et leur remplacement par les populations nomades?.

Laissons aux archéologues et aux historiens le soin de retracer l'histoire de ces peuplements anciens. Retenons pour ce qui nous concerne, la part de ces sociétés anciennes dans la dynamique régressive de ces systèmes écologiques, car si les facteurs naturels étaient les seuls responsables de la marginalisation de ces milieux, les touaregs à la fin du XVIIIè siècle n'auraient pas trouvé "le pays entièrement recouvert d'une brousse épaisse (finta) où il y avait partout des éléphants" (BARRAL 1977).

1.3 - Essai de cartographie des états de dégradation du Burkina Faso.

La dégradation d'un territoire est la résultante des effets d'un ensemble de facteurs. C'est pourquoi nous avons considéré plusieurs d'entre eux dans un essai de délimitation des zones de dégradation du pays (GROUZIS 1984).

Les critères retenus sont le facteur climatique mesuré par la pluviométrie annuelle, la densité de population (ANONYME 1979), le taux d'occupation du sol (TERRIBLE 1978), et la densité des bovins et petits ruminants (PALLIER 1978).

La superposition de ces critères permet de délimiter des portions de territoire qui sont ensuite regroupées en quatre grandes classes sur la base de la considération suivante : l'état de dégradation est d'autant plus avancé que le climat est aride, que les densités de la population et du cheptel sont élevées et que le pourcentage de terre mise en culture est plus grand.

Sur la figure 62 on distingue très nettement le plateau central. Les conditions climatiques par rapport à l'ensemble du pays sont moyennes (600 à 1000 mm du Nord au Sud), mais le seuil de compatibilité de la densité de la population avec le maintien de la fertilité des sols est atteint ou largement dépassé ($d = 40 \text{ ha au km}^2$). Par ailleurs, les activités d'élevage sont importantes. C'est une zone gravement touchée où les seuils de rupture de l'équilibre écologique sont atteints en de nombreuses situations. C'est pourquoi elle constitue une zone de départ dans les mouvements migratoires.

Le Nord et le Centre-Ouest constituent les zones de forte dégradation. Les facteurs qui contribuent à cet état varient selon la situation géographique. Dans le Nord ce sont surtout l'aridité du climat et l'activité pastorale qui interviennent. Dans le Centre-Ouest, le facteur climatique est plus favorable, alors que la densité de population est plus élevée et que les activités d'élevage restent importantes.

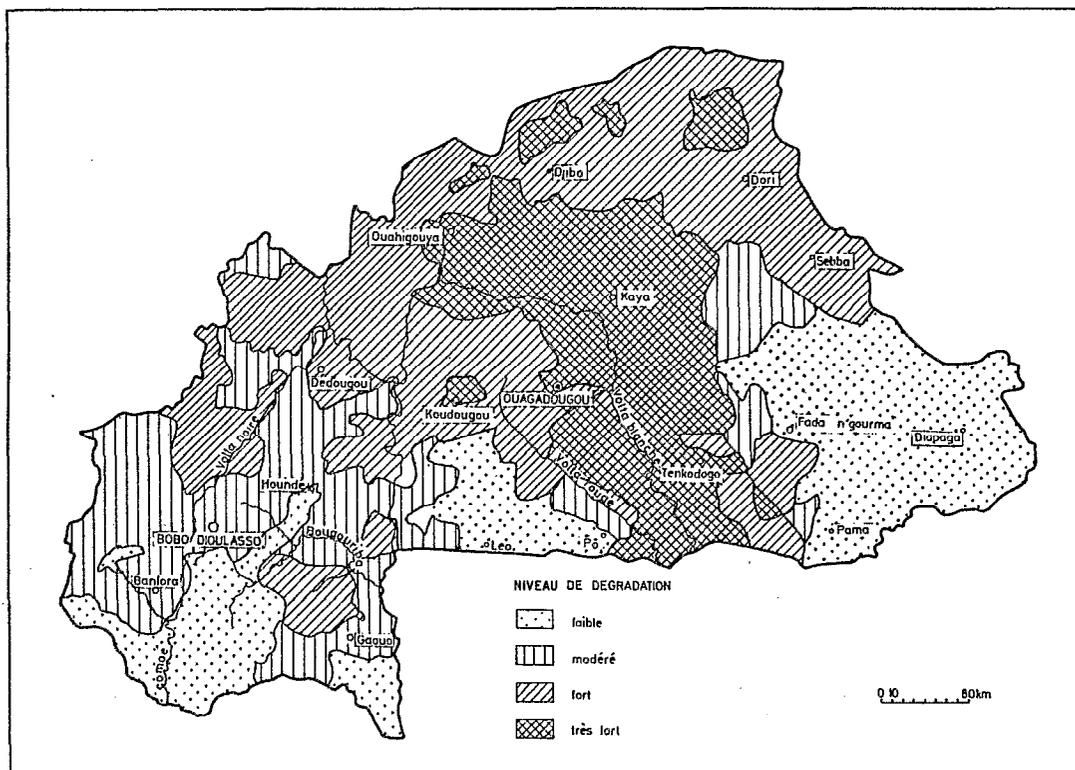


Fig. 62 - Les différentes zones de dégradation au Burkina Faso.

La zone de dégradation modérée est essentiellement située dans le sud-ouest. Les facteurs climatiques sont plus favorables ; la pression démographique est modérée et les activités liées à l'élevage sont contenues.

L'Est du pays et les Hauts-Bassins sont peu dégradés. Les facteurs climatiques y sont plus favorables et les pressions animale et humaine sont encore modérées.

Cette carte présente beaucoup plus l'état actuel de dégradation dans les différentes zones du pays que les risques. En effet, si on classe le territoire d'après sa sensibilité potentielle à la désertification, on obtiendra une autre image. Ce sont les zones actuellement classées à dégradation modérée et forte qui deviennent les plus sensibles et qui présentent les plus hauts risques.

En ce qui concerne la partie Ouest, ces risques sont liés à la forte attractivité intrinsèque du milieu naturel à l'implantation spontanée de nombreuses populations venant de régions plus dégradées. Pour ce qui est de la zone Nord, ces risques sont beaucoup plus liés à la fragilité et à la surexploitation des écosystèmes (pluviométrie faible, végétation clairsemée, sols légers très vulnérables à l'érosion éolienne...).

Cette évaluation succincte des phénomènes de désertification montre qu'une bonne partie du pays est affectée par différentes formes de dégradation dues notamment à la persistance d'années pluviométriquement déficitaires depuis la fin des années 1960 et aux techniques d'exploitation. Ces dernières sont en particulier responsables de la dégradation des structures : régression du couvert végétal, augmentation des phénomènes érosifs, chute du bilan d'eau, baisse de fertilité. Ces caractères liés au substrat édaphique deviennent de nouveaux facteurs contraignants non aléatoires et qui viennent exacerber les effets du risque sécheresse.

Dans ce contexte climatique plutôt défavorable, il est utile de connaître la dynamique des systèmes écologiques protégés des activités humaines et de définir leur potentiel de régénération.

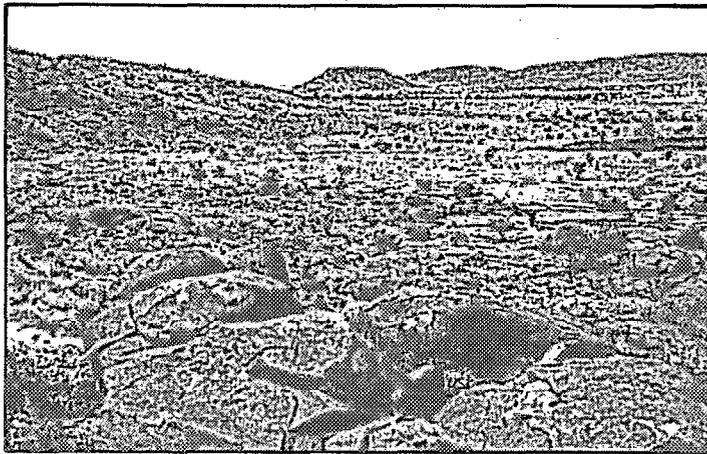
2 - LES CAPACITES DE REGENERATION DES SYSTEMES ECOLOGIQUES.

Pour répondre à ces questions deux axes de recherches ont été développés :

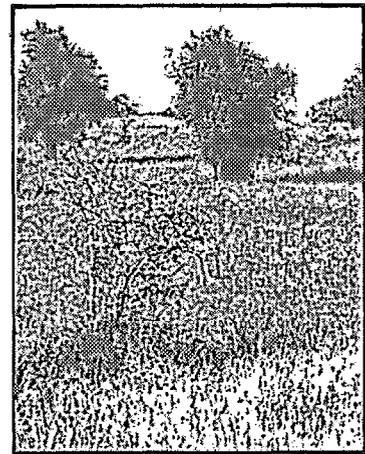
- l'étude des effets d'une mise en défens des systèmes écologiques afin de définir leur potentiel de régénération naturelle ;
- le suivi d'opération de réhabilitation (travail du sol, reboisement...) pour évaluer la réponse des systèmes écologiques fortement dégradés aux efforts de restauration.

2.1 - La régénération naturelle.

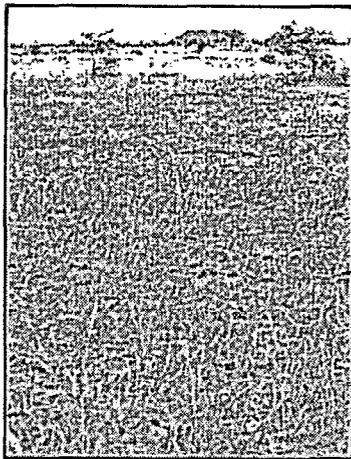
Elle est appréciée par l'évolution au cours du temps de la structure, de la flore, de la production de la strate herbeuse et de la



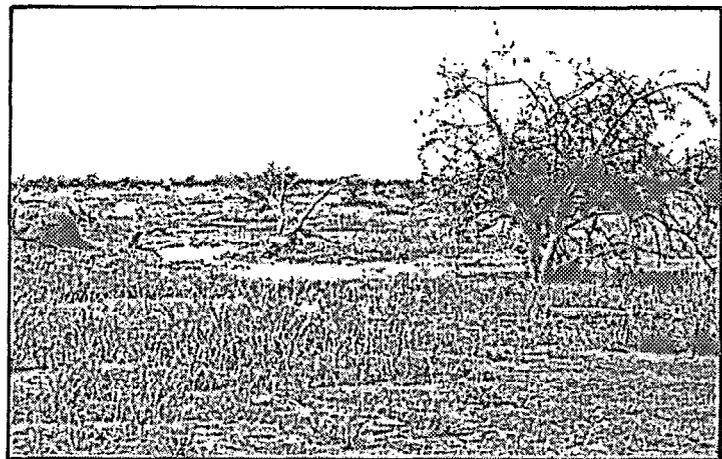
Piémont



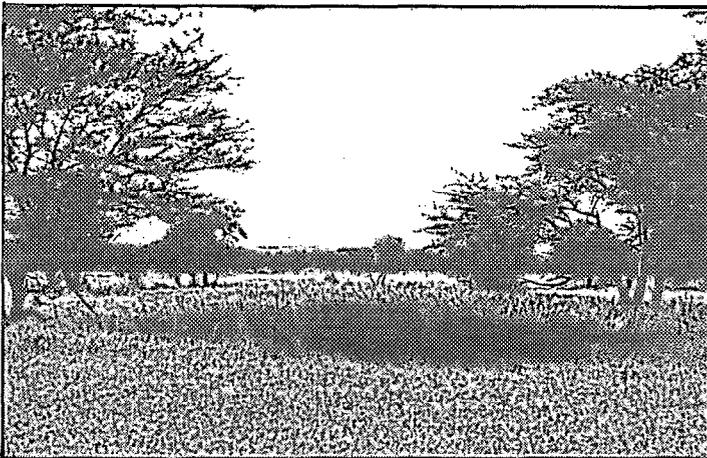
Dune



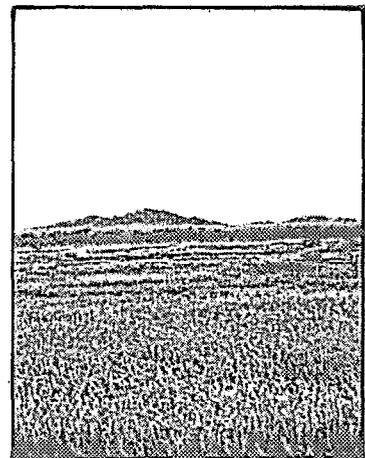
Glacis



Glacis arénacé



Bas-fond



Glacis de bas
de pente

DIVERSITE GEOMORPHOLOGIQUE ET UNITES DE VEGETATION ASSOCIEES

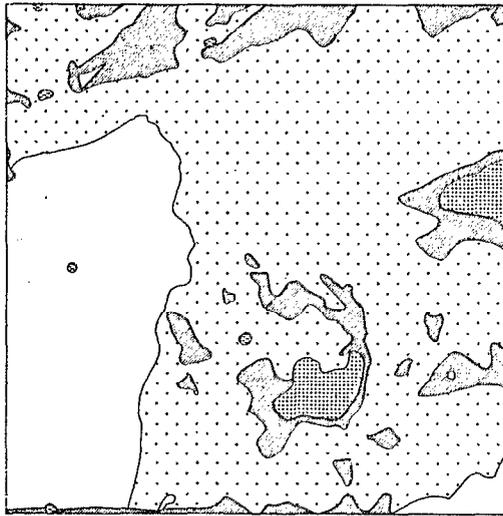
démographie de la strate ligneuse de différentes unités de végétation mises en défens.

Dans une zone phytionomiquement homogène de chacune des six unités retenues, une parcelle de un hectare est protégée de l'action du bétail par un grillage de type URSUS. Cette superficie est bien supérieure à l'aire minimale (64 à 128 m²) définie par DOS SANTOS (1981).

Notons toutefois la difficulté d'obtenir des mises en défens totales dans cette région fortement anthropisée. Seule la station de Windé a été protégée totalement d'avril 1977 à décembre 1981. Les parcelles de Bas Kolel, Kouni et Gountouré ont été partiellement parcourues au cours de la saison sèche 1980. Les parcelles d'Oursi et de Kolel situées sur les pâturages de saison sèche ont particulièrement souffert, surtout Kolel qui a été entièrement broutée au cours des quatre saisons sèches. La parcelle d'Oursi a dû être déplacée en octobre 1978 suite à un feu accidentel.

2.1.1 - Structure de la végétation.

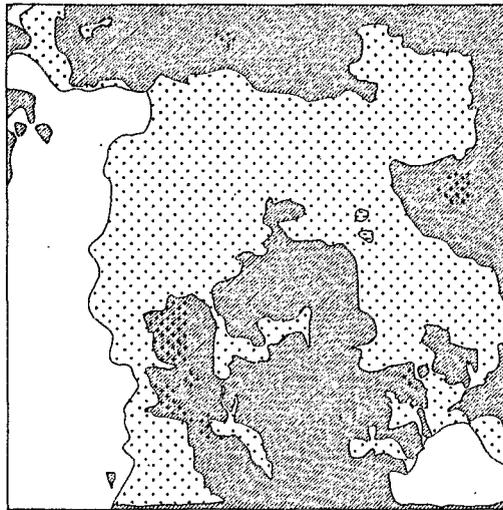
L'appréciation des modifications de structure repose sur le suivi des fluctuations des éléments de végétation. L'évolution de la structure de la végétation varie en fonction de l'unité étudiée. Les unités à recouvrement continu (Oursi, Windé) ne présentent pas de modifications structurales notables. Dans les unités de végétation à recouvrement discontinu (alternance de plages couvertes et de plages de sol nu) et à texture sableuse en surface (Gountouré, Kolel), on observe des modifications de la proportion des différents éléments (butte, dépression, sol nu) en particulier du sol nu qui tend à être colonisé. C'est dans les glacis de transit à sol lourd (Kouni, Bas Kolel) que l'évolution est la plus sensible. Celle-ci se manifeste par une nette augmentation de l'hétérogénéité (fig. 63). En effet, les différences entre la végétation haute et dense des zones favorables (microdépression avec un voile sableux en surface, zone d'accumulation d'eau), et la végétation basse et lâche des zones de glacis s'accroissent. Un effet cumulatif permet à ces éléments à fort recouvrement de s'étendre, car la paille constitue un obstacle au sable et aux diaspores. Pour la station de Bas Kolel par exemple (fig. 63) la superficie occupée par cet élément varie d'environ 15 % en 1977 à 40 et 31 % respectivement en 1979 et 1980.



ORGANISATION DE LA VEGETATION
(PARCELLE Sgr GLACIS KOLEL)

1977

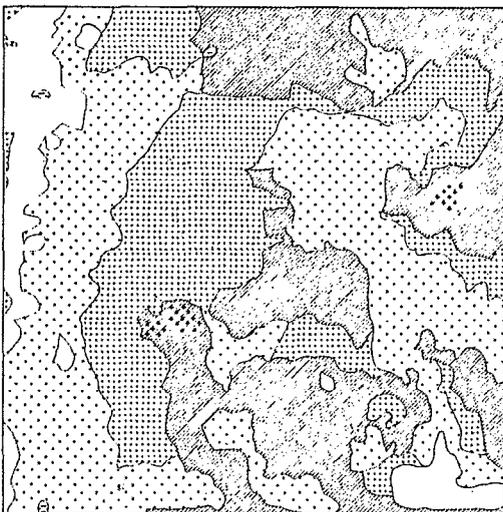
-  Groupement à *Scheuchzeria palustris* et *Arctostaphylos uva-ursi* 50,1%
-  Môme groupement, végétal plus haut et plus dense 52,7%
-  Groupement de sous-arbrisseaux à *Scheuchzeria palustris*, *Panicum latifolium* et *Arctostaphylos uva-ursi* 4,5%
-  Groupement scapula à *Arctostaphylos uva-ursi* 4,1%
-  Sol nu 52,8%



ORGANISATION DE LA VEGETATION
PARCELLE Sgr GLACIS KOLEL

1979

-  Groupement à *Scheuchzeria palustris* et *Arctostaphylos uva-ursi* 52,85%
-  Groupement à *Arctostaphylos uva-ursi*, *Scheuchzeria palustris* et *Arctostaphylos uva-ursi* en agrégats (c. = c.) avec *Panicum latifolium* et *Indigofera tinctoria* 52,97%
-  Groupement scapula à *Urtica dioica* et *Brachypodium pinnatifidum* 52,81%
-  Sol nu 52,07%



ORGANISATION DE LA VEGETATION
PARCELLE Sgr GLACIS KOLEL

1980

-  Groupement à *Scheuchzeria palustris* et *Arctostaphylos uva-ursi* 52,7%
-  Groupement à *Scheuchzeria palustris*, *Arctostaphylos uva-ursi* plus régulièrement réparti 52,8%
-  Groupement à *Arctostaphylos uva-ursi*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Panicum latifolium* et *Indigofera tinctoria* 52,8%
-  Groupement scapula à *Brachypodium pinnatifidum*, *Chenopodium album* 52,8%
-  Sol nu 52,8%

Fig. 63 - Evolution de la structure de la végétation à Bas Kolel.

L'hétérogénéité se manifeste aussi au niveau de la phénologie qui est avancée dans les zones à forte productivité. Nous avons vu (chapitre III, partie III) que ce phénomène était dû à une meilleure disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs et aux rapports entre photopériodisme et date de germination. Malgré ces caractères communs, l'évolution à plus long terme de la structure de la végétation de la station de Kouni diffère nettement de celle de Bas Kolel. A Bas Kolel, le recouvrement global augmente (sol nu : 26 % en 1977, 8 % en 1980) en raison de circonstances favorables (état initial de la végétation, possibilités de dépôts éoliens, situation de bas de pente privilégiant le bilan hydrique). A Kouni, l'évolution aboutit à la dénudation. En effet, en dehors de quelques dizaines de mètres carrés à très forte productivité où l'on trouve une grande diversité floristique, le reste de l'unité est occupé par un sol dénudé à glaçage superficiel. Une évolution semblable a été décrite par NOBLE (1977), FLORET (1981) et TOUTAIN et PIOT (1980) pour les unités sur sol lourd. Il semble que c'est l'absence de piétinement par le bétail qui soit à l'origine de ce résultat.

2.1.2 - Aspects floristiques.

Diversité floristique.

La diversité floristique est approchée par le nombre d'espèces présent sur l'hectare de référence. Ses variations interannuelles sont consignées dans le tableau 38.

Station/ Année	1977	1978	1979	1980	1981
Windé (Spt)	18	21	31	32	31
Bas Kolel (Sgr)	30	39	48	42	58
Kouni (Sgl)	36	29	44	39	36
Gountouré (Ase)	65	60	67	60	73
Kolel (Cep)	39	42	61	50	50
Oursi (Ams)	49	54	68	56	56

Tableau 38 - Evolution de la diversité floristique des différentes unités de végétation.

Il apparaît tout d'abord que la diversité floristique est plus élevée dans les unités établies sur sables (moyenne globale du nombre d'espèce de l'ordre de 56) que dans les unités correspondant aux sols lourds (nombre d'espèces voisin de 36).

On voit par ailleurs que les fluctuations interannuelles élevées masquent les tendances. L'année 1979 en particulier, en raison de la répartition pluviométrique (saison précoce, déficit marqué au cours de la 3ème décade de Juillet, reprise des précipitations) correspond à une augmentation sensible du nombre d'espèces dans toutes les unités. Si l'on excepte les données concernant les unités Ase (Gountouré) et Sgl (Kouni) pour lesquelles aucune conclusion ne peut être dégagée compte tenu de ces fluctuations, les valeurs relatives aux autres unités indiquent que la diversité floristique tend à augmenter au cours du temps. Ce résultat est net pour les unités Sgr et Spt.

La synthèse de l'évolution de la végétation à partir des variations spécifiques est difficile dans les peuplements plurispécifiques en raison du nombre élevé de taxons. Il serait par ailleurs regrettable de se limiter à l'analyse des tendances évolutives des espèces dominantes, car les variations de certaines espèces dominées, peuvent apporter une information significative. Deux méthodes complémentaires ont donc été utilisées : l'approche globale et l'approche analytique.

L'approche globale.

L'analyse globale repose sur le traitement au moyen de l'analyse factorielle des correspondances des ensembles espèces-relevés des différentes unités de végétation. Cette méthode permet une analyse diachronique des populations complexes (DAGET et TRANCHEFORT 1974, HUBERT 1978, OVALLE 1986, BALENT 1986).

Pour chaque unité, les relevés floristiques annuels des parcelles témoin et protégée sont donc soumis à l'AFC afin de mettre en évidence des différences entre traitement et de montrer une évolution éventuelle de la végétation dans chacun de ces traitements.

Les résultats consignés dans le tableau 39 montrent que les deux premiers axes absorbent, suivant l'unité de végétation considérée, 57 à 84 % de la variabilité totale. On peut donc limiter l'interprétation à l'étude du plan défini par ces deux axes.

Axe n°	Windé	Kouni	Bas Kolel	Oursi	Kolel	Gountouré
1	59,1	69,9	60,5	35,4	41,0	43,5
2	16,1	13,9	15,1	22,2	18,2	21,9
1 + 2	75,2 %	83,8 %	75,6 %	57,6 %	59,2 %	65,4 %

Tableau 39 - Pourcentage d'inertie absorbé par les deux premiers axes de l'AFC appliquée aux ensembles espèces/relevés.

Sur la figure 64a est tracé le "chronogramme" qui représente le diagramme des relevés. Le "cheminement" est la ligne qui relie les différentes dates et traduit les phases successives de l'évolution de la végétation.

DAGET et TRANCHEFORT (1974) définissent aussi le "cénogramme" (fig. 64 b), c'est-à-dire le diagramme des espèces qui matérialise leurs relations mutuelles.

L'examen du chronogramme relatif à Windé (fig. 64 Aa) montre que l'évolution de la végétation dans la parcelle protégée diffère nettement de celle du témoin. Dans cette dernière les points représentatifs de la végétation groupés autour de *Schoenefeldia gracilis* et de *Panicum laetum* se déplacent nettement vers le bas en 1978 (*Echinochloa colona*) et vers les ordonnées positives en 1980 (*Eragrostis pilosa*). Les oscillations autour d'un état moyen sont relativement élevées. Dès 1977, l'image de la végétation de la parcelle protégée s'écarte du témoin en s'approchant des abscisses positives, grâce à la forte participation de *Aeschynomene indica*. Puis les images successives se ressèrent suggérant qu'un état d'équilibre est atteint.

A Kouni (fig.64 Ba), les points représentatifs de la végétation de la zone témoin restent groupés, ce qui traduit une relative stabilité du système malgré les aléas climatiques. Ceci est à mettre en relation avec la

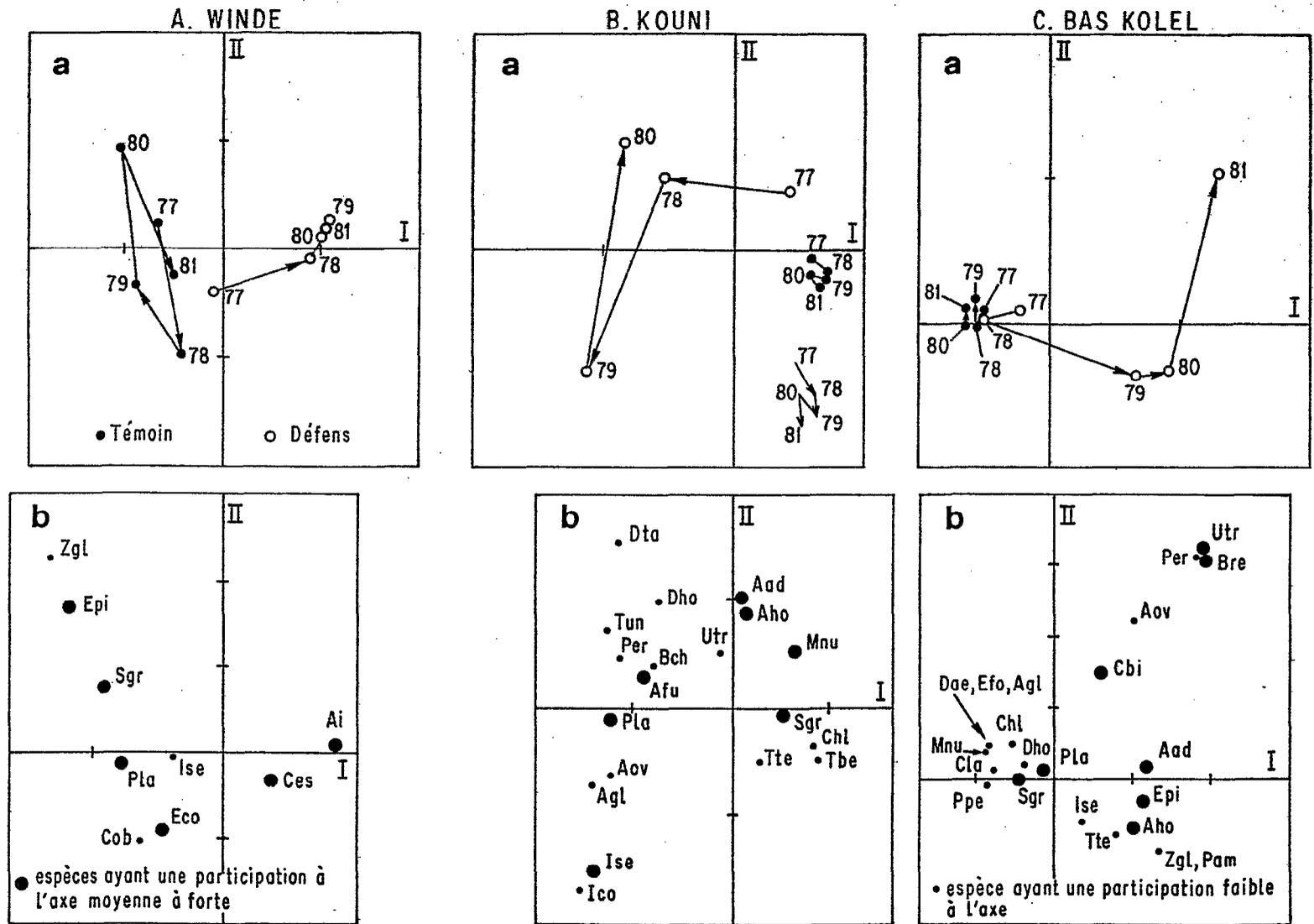


Fig. 64 - Analyse diachronique de la végétation.
 Chronogramme (a) et cénogramme (b) dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse des correspondances.

pauvreté de la flore et la nette dominance de *Schoenefeldia gracilis*. Pour l'unité protégée, l'image de l'année 1977 s'écarte de celles des témoins malgré la dominance de *Schoenefeldia gracilis* en raison de la forte participation de : *Aristida adscensionis*, *Aristida hordeacea* et *Mollugo nudicaulis*. Le cheminement se poursuit ensuite vers les abscisses négatives. Ce déplacement est dû en 1978 à la forte participation de *Panicum laetum*, en 1979 à *Indigofera senegalensis* et en 1980 à un groupe d'espèces à faible participation (*Tephrosia uniflora*, *Polygala erioptera*).

Dans la station de Bas Kolel (fig. 64 Ca) les images des témoins auxquelles s'ajoutent celles des années 1977 et 1978 des zones protégées restent groupées autour de *Schoenefeldia gracilis* et *Panicum laetum*. Puis on assiste à un déplacement vers les abscisses positives du point représentatif de la végétation protégée. Cette évolution correspond à un appauvrissement en *Schoenefeldia gracilis* et en un enrichissement en *Aristida adscensionis*, *Aristida hordeacea* et *Eragrostis pilosa*. Le cheminement vers des ordonnées positives s'explique notamment par la forte participation de *Urochloa trichopus*, *Boerhavia repens*, malgré leur faible recouvrement.

A partir de l'année 1978, les oscillations du point représentatif de la végétation témoin et protégée d'Oursi (fig. 65 Aa) sont relativement réduites. Les images s'organisent autour de *Zornia glochidiata*, *Heliotropium strigosum* et *Tribulus terrestris* pour la zone témoin et *Cenchrus biflorus*, *Brachiaria xantholeuca*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cyperus conglomeratus* et *Ipomeaea coscinosperma* pour la zone protégée. Seul le point représentatif de l'année 1977 s'écarte nettement des autres. Ce caractère est dû à la forte participation de *Alysicarpus ovalifolius*, et *Aristida mutabilis*.

A Kolel (fig. 65 Ba) les images de la végétation protégée en 1977 et 1978 et celles des témoins 1978-1979 s'ordonnent autour de trois espèces principales : *Alysicarpus ovalifolius*, *Cenchrus biflorus* et *Cenchrus prieurii*. Pour ce qui concerne la végétation protégée on assiste d'abord à un net déplacement vers le bas en raison essentiellement de la forte

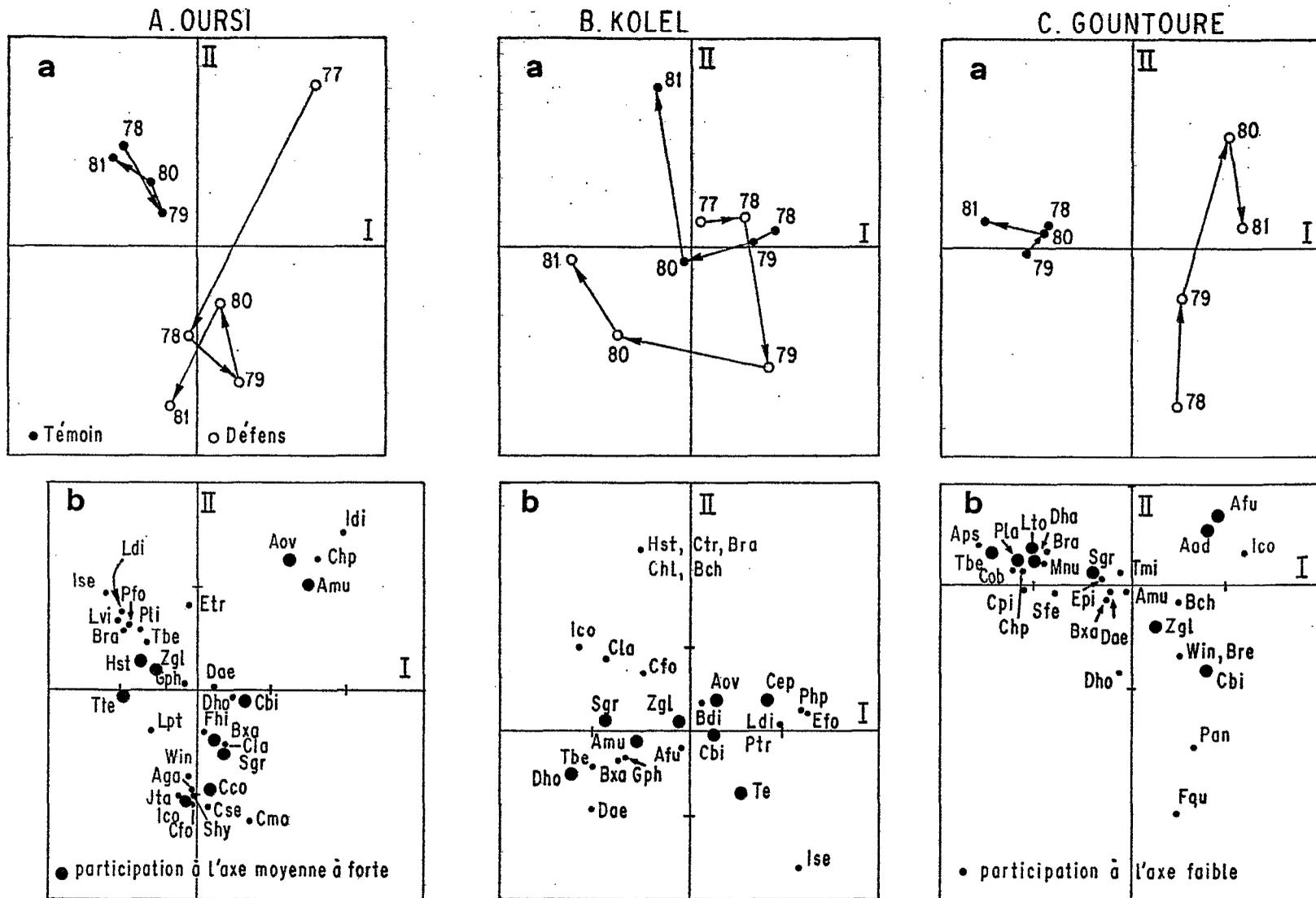


Fig. 65 - Analyse diachronique de la végétation.
 Chronogramme (a) et cénogramme (b) dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse des correspondances.

participation de *Tribulus terrestris*, puis vers la gauche, occasionné par une augmentation des contributions de *Schoenefeldia gracilis*, *Digitaria horizontalis* et *Aristida mutabilis*. Une évolution semblable est obtenue pour la zone témoin. Le déplacement très net de l'image de la végétation vers les ordonnées positives est dû à l'apparition d'espèce à faible contribution: *Heliotropium strigosum*, *Citrillus lanatus*, *Borreria chaetocephalla*...

Les cheminements dans les parcelles témoin et protégée de Gountouré (fig.65 Ca) sont très différents. Dans la zone témoin les images de la végétation sont le reflet des espèces : *Schoenefeldia gracilis*, *Panicum laetum*, *Diheteropogon hagerupii*, *Tragus berteronianus* et *Loudetia togoensis*. La zone protégée est caractérisée notamment par *Zornia glochidiata* et *Cenchrus biflorus*. *Pandiaka angustifolia* et *Fimbristylis hispidula* confèrent à l'image de la végétation sa position en 1978. Puis celle-ci évolue vers les ordonnées positives par une nette augmentation de la contribution de *Aristida funiculata* et *Aristida adscensionis*.

A l'exception de Kolel et de Windé, la zone d'oscillations des images représentatives de la végétation des zones témoins est réduite. Ce caractère sous-entend qu'un état d'équilibre existe entre la végétation et les conditions actuelles du milieu. Cet équilibre est défini par une flore peu diversifiée.

La suppression du pâturage, facteur déterminant de l'équilibre dans les zones témoins, permet l'extériorisation des potentialités de régénération de la végétation. Ceci se traduit dans les parcelles protégées par un cheminement très accidenté qui caractérise l'évolution du système vers une plus grande hétérogénéité et une plus grande diversité floristique.

Notons qu'un nouvel état d'équilibre a pu être observé dans la parcelle protégée de Windé. Le délai nécessaire à l'obtention de ce nouvel état d'équilibre est variable. A Windé (fig. 64 A), une différence s'observe dès la première saison de végétation (1977) entre le défens et le témoin. Le nouvel état d'équilibre peut être considéré comme atteint dès l'année 1979. Cette rapide évolution est à mettre en rapport avec l'action d'un autre facteur contraignant : la submersion et l'agressivité d'*Aeschynomene*

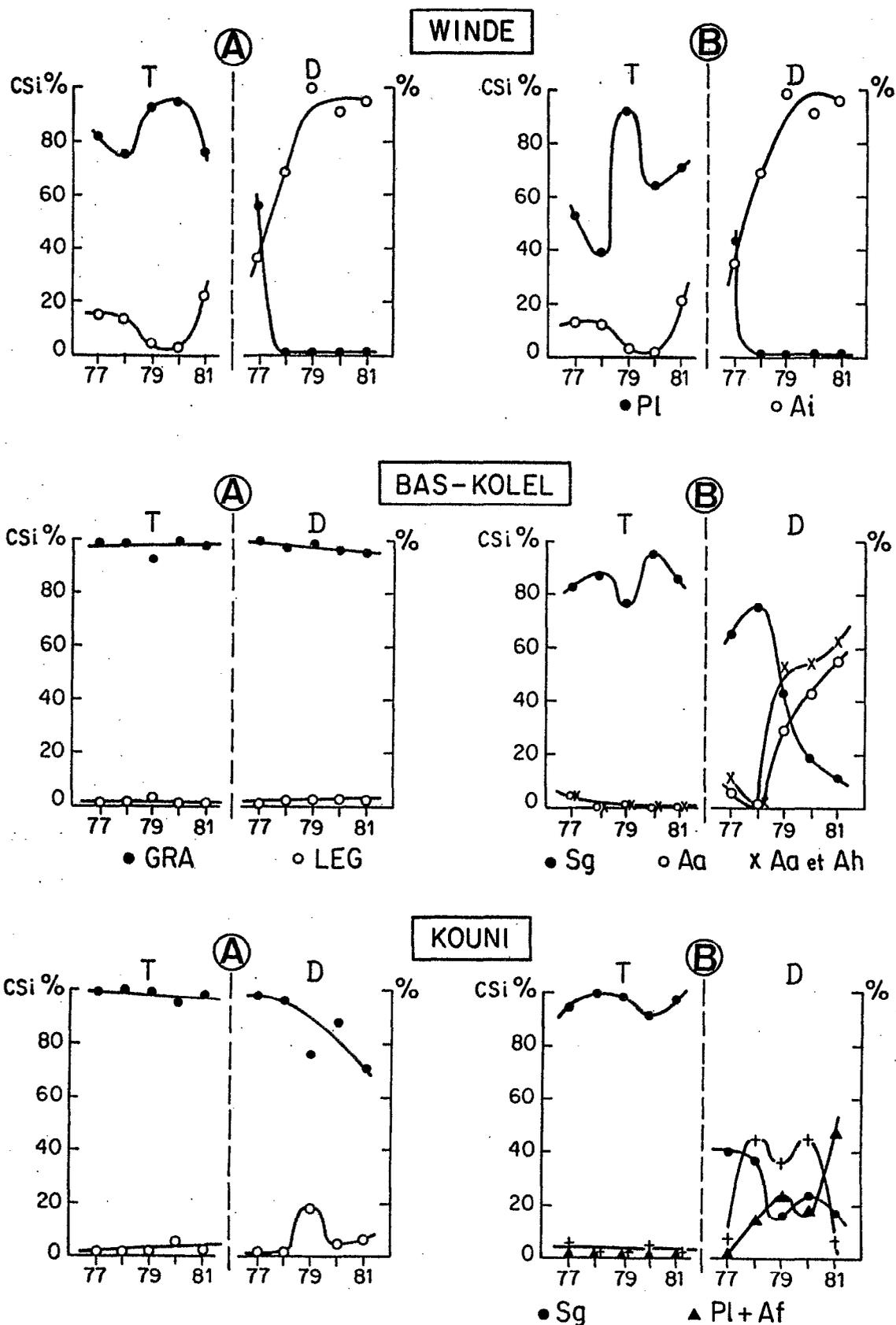


Fig. 66 - Variations interannuelles de la contribution spécifique (CSi %) des familles (A) et des espèces principales (B) dans les conditions actuelles (T) et de mise en défens (D). GRA, LEG : graminées, légumineuse, Pl : *Panicum laetum*, Ai : *Aeschynomene indica*, Sg : *Schoenefeldia gracilis*, Aa : *Aristida adscensionis*, Ah : *Aristida hordeacea*

indica. Une évolution semblable a été obtenue par DAGET et TRANCHEFORT (1974) en traitant une prairie avec de très fortes doses d' N_2 (240 unités d' N_2).

A Kouni et à Gountouré, bien qu'une différence s'observe dès la première année entre les images des défens et du témoin, le regroupement des points représentatifs de la zone protégée n'a pas lieu après 4 à 5 années de protection. A Kolel et à Bas Kolel, l'évolution est encore plus lente puisque les images de la végétation protégée ne s'éloignent significativement du témoin qu'en 1979. De plus l'aboutissement de l'évolution de la végétation est loin d'être atteint en 1981. Le cas de Bas Kolel (fig. 64 C) montre enfin qu'il faut attendre une bonne stabilisation du cheminement avant d'affirmer qu'un nouvel état d'équilibre est atteint. En effet si l'on avait arrêté les observations en 1980 on aurait mal conclu puisque le cheminement a repris et que les images obtenues en 1979/1980 et 1981 sont relativement espacées.

L'approche analytique.

Cette approche consiste à étudier les variations interannuelles des contributions spécifiques (CS). Les figures 66 et 67 présentent les résultats pour les grands groupes de famille et les espèces dominantes.

Malgré de grandes fluctuations interannuelles la CS des graminées de la parcelle témoin de Windé (fig. 66) se maintient à un niveau élevé (74 à 96 %) tandis que celle des légumineuses reste constamment bas (2 à 22 %). Dès la deuxième année de protection les graminées sont complètement inhibées par le développement des légumineuses. Au niveau spécifique cela se concrétise par le total remplacement de *Panicum laetum* par *Aeschynomene indica*. A noter que la faiblesse de la CS de *Panicum laetum* en 1978 s'explique par une submersion prolongée qui a avantagé une espèce plus hygrophile : *Echinochloa colona* (CS = 35 %).

Aucune différence ne s'observe dans les variations interannuelles des CS des graminées et des légumineuses des deux traitements de l'unité Sgr de Bas Kolel (fig. 66). Par contre au niveau spécifique, il apparaît que la CS de *Schoenefeldia gracilis*, qui se maintient entre 76 et

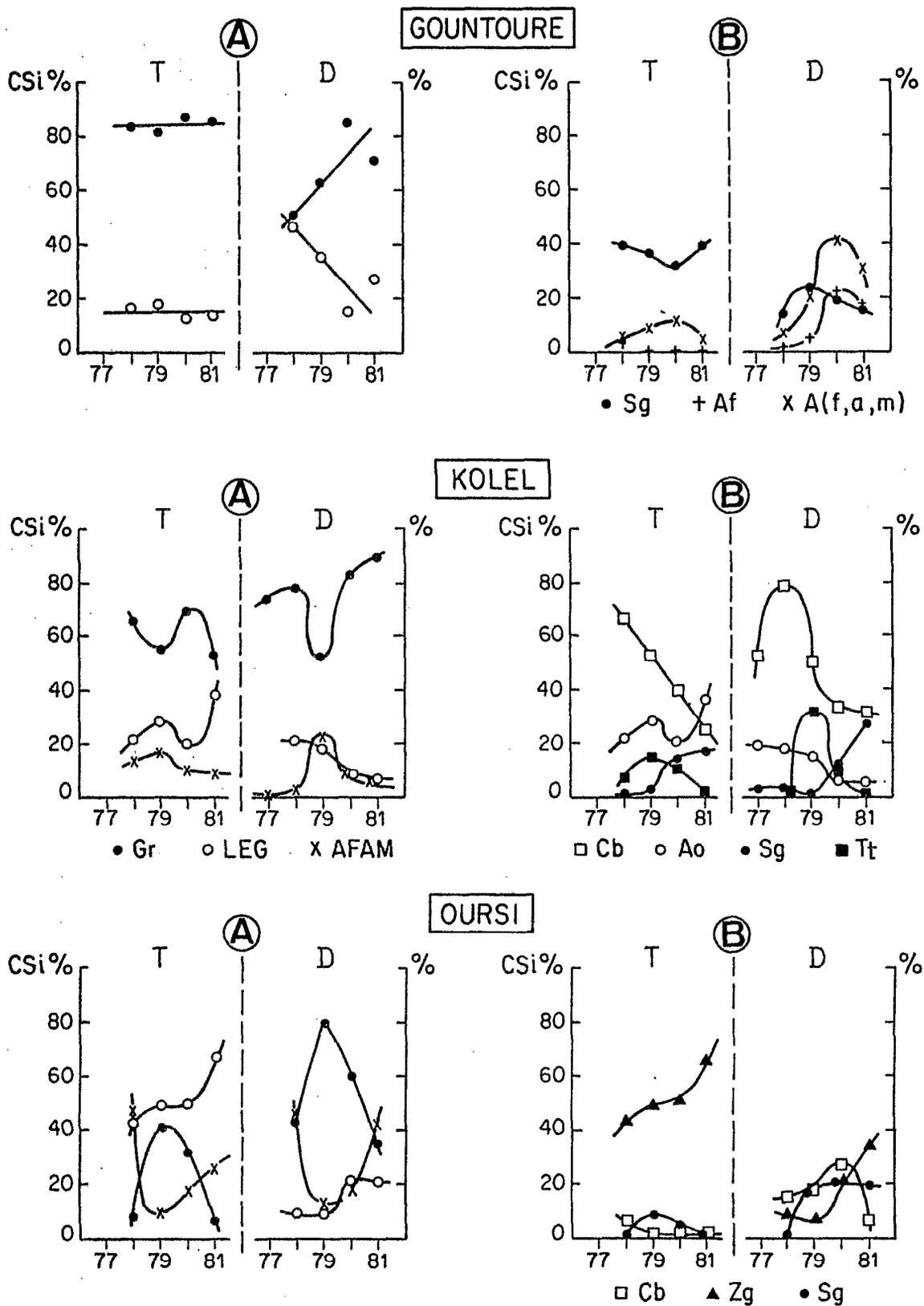


Fig. 67 - Variations interannuelles de la contribution spécifique (CSi %) des familles (A) et des espèces principales (B) dans les conditions actuelles (T) et de mise en défens (D). GR, LEG, AFAM : graminées, légumineuses, autres familles, Sg : *Schoenefeldia gracilis*, Af, Aa, Am : *Aristida funiculata*, *adscensionis*, *mutabilis*, Cb : *Cenchrus biflorus*, Ao : *Alysicarpus ovalifolius*, Tt : *Tribulus terrestris*, Zg : *Zornia glochidiata*

95 % dans le témoin, chute dès la 3^e année de protection au profit des *Aristida*, en particulier *Aristida adscensionis*.

Les CS des graminées et des légumineuses du témoin de l'unité Sgl (Kouni) sont stables. La CS des graminées de la parcelle protégée tout en restant supérieure à celle des légumineuses diminue au cours du temps. Cette évolution est à considérer avec réserve. En effet les résultats de l'année 1981 sont difficilement interprétables car ils ont été établis à partir de 17 contacts seulement en raison de la dénudation progressive de la station. Cette diminution se fait au profit des légumineuses en 1979, notamment *Indigofera senegalensis*, *Alysicarpus glumaceus* et des autres familles les années suivantes (*Heliotropium strigosum*, *Tribulus terrestris*). Au niveau spécifique, il apparaît qu' *Aristida funiculata* et *Panicum laetum* se substituent partiellement à *Schoenefeldia gracilis* dans la station protégée.

Dans la parcelle protégée de Gountouré (fig.67), la CS des graminées tend à augmenter au dépend des légumineuses contrairement au témoin où aucune variation interannuelle ne s'observe. La CS de *S. gracilis* du témoin varie peu annuellement ; elle est environ 2 fois plus élevée que dans la station protégée où il semble qu'une compétition s'exerce entre cette espèce et *A. funiculata*. Contrairement au témoin, il apparaît que l'ensemble des trois espèces d' *Aristida* domine *S. gracilis* dans la parcelle protégée.

Dans la mise en défens de Kolel, il est possible de noter une progression lente des graminées aux dépens des légumineuses, si l'on tient compte du fait que la répartition pluviométrique de l'année 1979 a favorisé notablement les autres familles généralement peu représentées. Pour cette unité, les variations de la CS des différentes espèces des deux traitements vont sensiblement dans le même sens : chute de *C. biflorus*, augmentation de *S. gracilis*, explosion de *Tribulus terrestris* en 1979. Seule *A. ovalifolius* régresse en défens et progresse dans la parcelle témoin.

Les variations interannuelles de la CS des principales familles des parcelles témoins et protégées sont similaires pour l'unité Ams d'Oursi (fig. 67). Notons cependant que la mise en défens avantage les graminées. Au

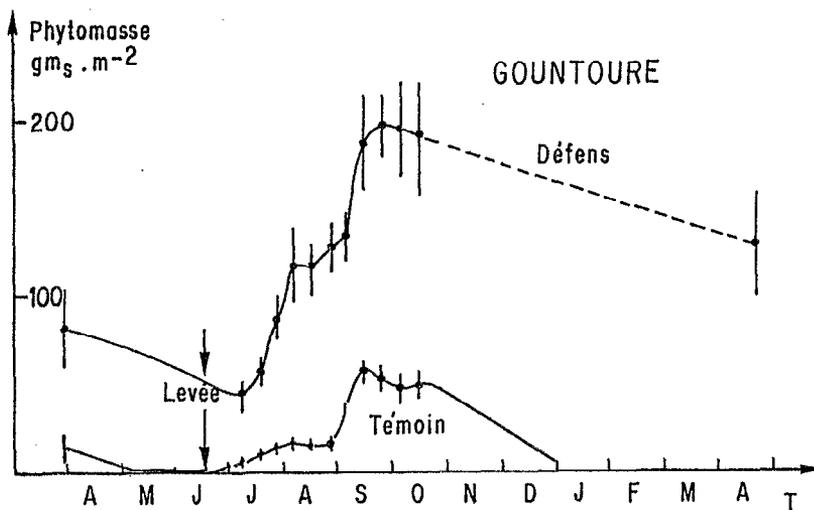
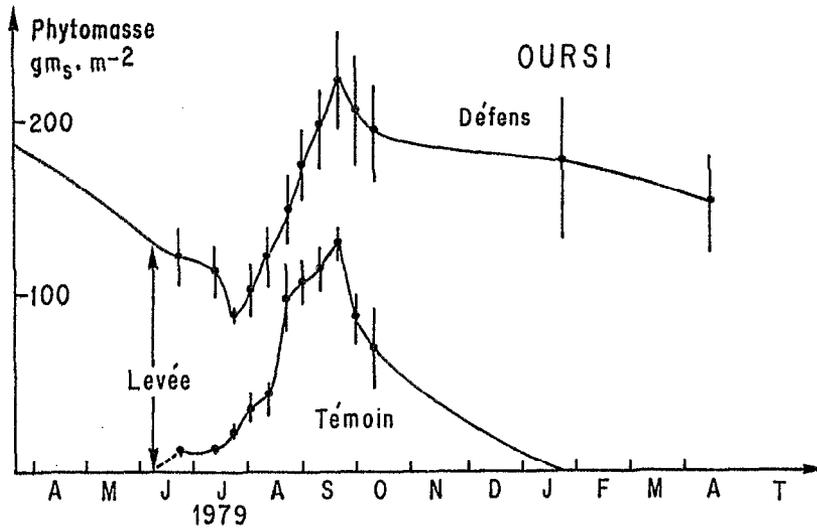
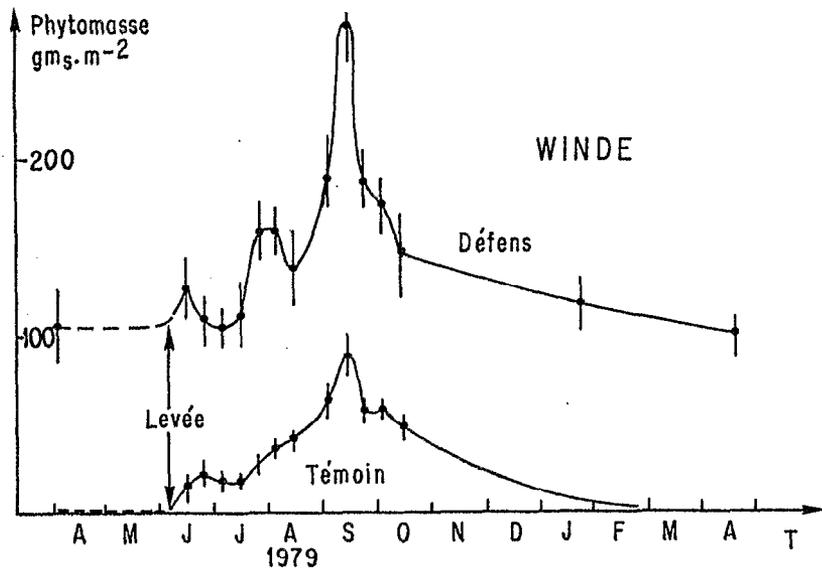


Fig. 68 - Evolution comparée des phytomasses de zones témoins et protégées de trois unités de végétation au cours d'un cycle annuel (1979).

niveau spécifique la protection favorise *S. gracilis* et *C. biflorus*. La chute de la CS de *C. biflorus* en 1981 s'explique par les conditions pluviométriques (arrêt précoce des pluies, déficit d'environ 25 % sur la dune par rapport à l'ensemble du bassin) et l'abondance de prédateurs (*Oedalus senegalensis*) qui ont été défavorables au développement de cette espèce (GROUZIS 1982). On observe par ailleurs une augmentation de la CS de *Z. glochidiata* dans les deux traitements.

2.1.3 - Effets de la protection sur la production.

L'influence de la protection de la végétation se répercute aussi très nettement sur le niveau de production. A titre d'exemple la figure 68 donne les variations saisonnières de la phytomasse de trois unités de végétation dont deux (Windé et Gountouré) sont exploitées pendant la saison des pluies et la troisième (Oursi) au cours de la saison sèche. A Oursi, les courbes de phytomasse évoluent plus ou moins parallèlement de Juillet à Septembre. Ce n'est que vers la fin de ce mois que les courbes divergent. L'évolution de la phytomasse de la parcelle témoin reflète non seulement la dégradation naturelle mais encore les effets de la consommation et du piétinement par les troupeaux. A Windé et Gountouré, les courbes de production des parcelles témoins accusent dès le début de la saison des pluies l'impact du bétail. Ces faits sont confirmés par les valeurs moyennes interannuelles de la productivité des stations protégées et témoins portées dans le tableau 40. Il y apparaît en effet que seules les valeurs relatives à Oursi (Ams) et Kolel (Cep) c'est-à-dire les parcours de saison sèche sont comparables.

Unités	Ams		Cep		Ase		Sgl		Sgr		Spt	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
Productivité	2,7	2,9	3,1	3,2	2,3	1,0	1,6	1,0	2,0	1,5	4,9	2,0

Tableau 40 - Moyennes interannuelles (1977-1981) de la productivité ($g_{MS} \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$) des unités protégées (D) et témoins (T).

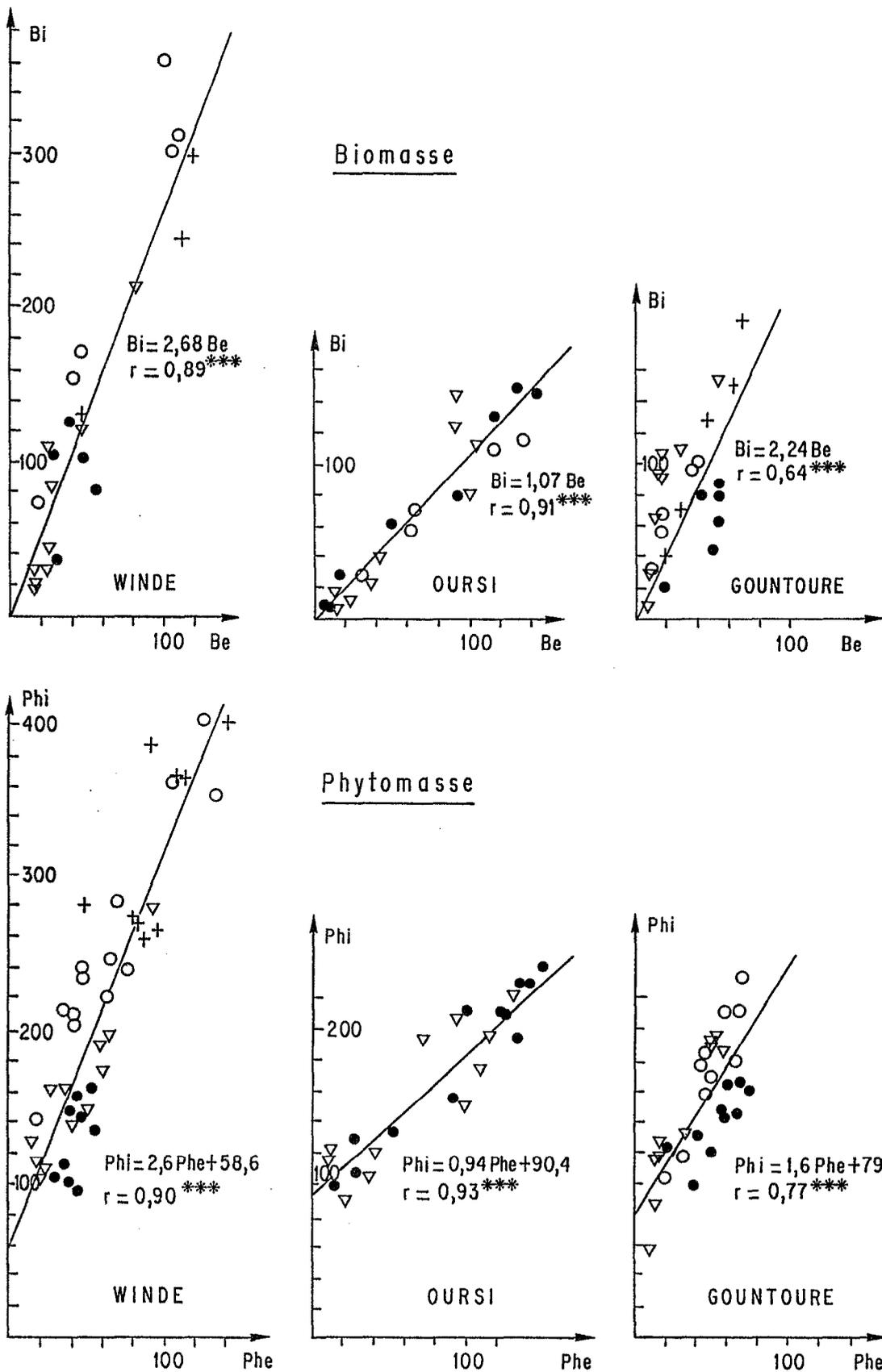


Fig. 69 - Variations interannuelles (1978-1981) de la production des parcelles protégées (i) en fonction de celle des témoins (e) pour trois unités de végétation différemment exploitées. Les figurés correspondent aux observations de chaque année.

L'examen de la figure 68 révèle aussi que la phytomasse des unités protégées est toujours largement supérieure à celle des témoins dont le sol est quasiment dénudé entre Janvier-Février et Juin. Cette situation favorise l'érosion éolienne et l'érosion hydrique.

Les rapports entre la production des traitements peuvent être appréciés en terme de biomasse, de phytomasse et d'efficience en eau. Les graphiques de la figure 69 représentent les variations de la biomasse des parcelles protégées en fonction de celle des témoins au cours de la saison de 1978 à 1981. Notons que l'année 1981 n'a pas été prise en compte pour l'établissement de ces relations pour la station d'Oursi en raison de la forte perturbation exercée par les criquets, comme nous l'avons déjà signalée. Les données concernent les couples observés à chaque décade du début de la saison de végétation jusqu'au maximum de biomasse. La relation $B_i = f(B_e)$ est en général très hautement significative. On distingue très aisément les unités de végétation pâturées en saison des pluies pour lesquelles la biomasse de la végétation des parcelles protégées est 2 à peu près de 3 fois plus élevée que celle des parcelles normalement exploitées. Ces caractères concernent les unités de Windé, Gountouré et Bas Kolel ($B_i = 1,89 B_e$, $r = 0,49$ significatif pour $p = 0,10$) non représentée sur la figure 69. Les points représentatifs des unités exploitées en saison sèche s'ordonnent autour de la première bissectrice (fig. 69, Oursi). Un résultat identique a été obtenu pour la station de Kolel dont l'équation est : $B_i = 0,96 B_e$, $r = 0,93^{***}$, indiquant qu'aucune différence ne s'observe entre les deux traitements pour ces unités.

L'expression des rapports de production en terme de phytomasse confirme les précédents résultats. C'est une translation par rapport à l'ordonnée à l'origine, qui constitue par ailleurs une estimation de la phytomasse protégeant le sol lorsque les parcelles témoins sont complètement dénudées. Suivant les unités de végétation considérées, la valeur de cette phytomasse varie de 60 à 100 $g_{MS} \cdot m^{-2}$.

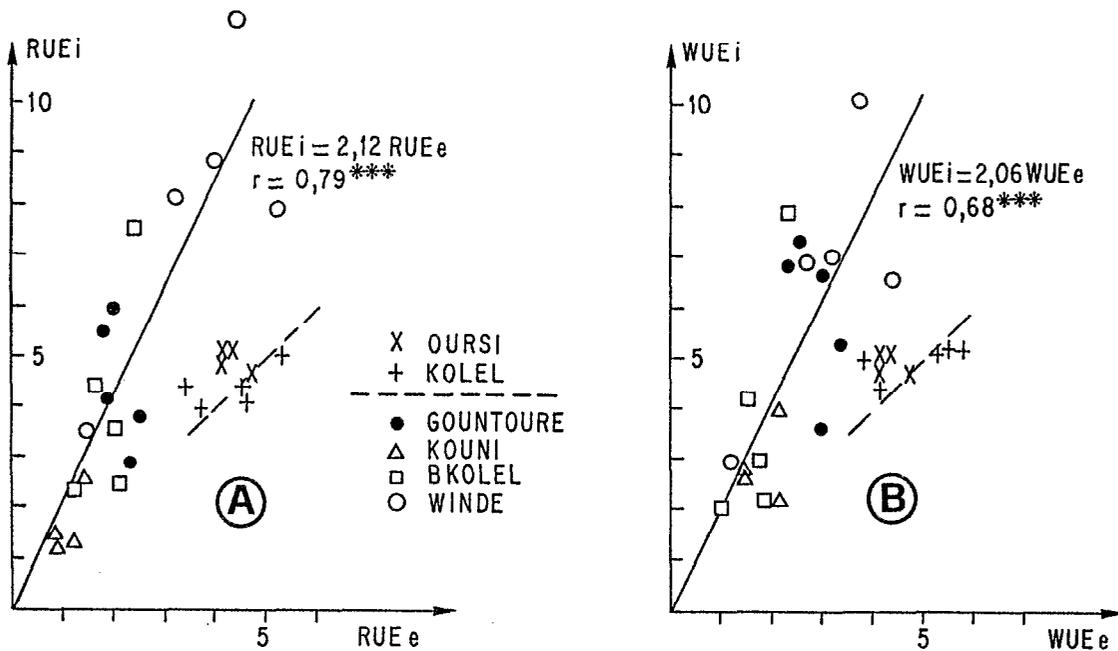


Fig. 70 - Relation de l'efficience en eau des parcelles protégées par rapport au témoin.
 $kg_{MS}.ha^{-1}.mm^{-1}$ de pluie (A) et de pluie infiltrée (B)

La figure 70 présente les variations de 1977 à 1981 de l'efficience en eau de la végétation des parcelles protégées en fonction de celle des témoins. Quel que soit le mode d'expression retenu (RUE par mm de pluie ou WUE par mm d'eau infiltrée) les unités pâturées pendant la saison de végétation se séparent nettement des unités exploitées pendant la saison sèche. Pour le premier groupe (Gountouré, Kouni, Bas Kolel et Windé) il est possible de calculer une droite de régression commune, significative à 1 % et montrant que l'efficience en eau de la végétation des parcelles protégées est environ 2 fois plus élevée que celle des parcelles témoins. Pour le deuxième groupe (Oursi, Kolel), la répartition des points représentatifs autour de la bissectrice suggère qu'aucune différence ne s'observe entre les deux traitements.

2.1.4 - Effet de la protection sur l'évolution de la strate ligneuse.

Les résultats relatifs aux variations de l'effectif des ligneux sur l'hectare de référence, ainsi que les taux d'accroissement par rapport au peuplement originel sont consignés dans le tableau 41.

Après cinq années de "protection", il n'apparaît que 4 espèces nouvelles : *Boscia angustifolia*, *Grewia tenax* à Gountouré, *Mærua crassifolia*, *Boscia angustifolia* à Bas Kolel. L'effectif des peuplements ligneux augmente au cours du temps à l'exception de celui de la station de Windé. Le plus fort accroissement est observé sur la dune d'Oursi (9 % par an environ). Celui-ci est dû notamment à *Mærua crassifolia*.

Unité	Oursi			Kolel			Gountouré			Bas Kolel			Windé		
	ni	nf	d	ni	nf	d	ni	nf	d	ni	nf	d	ni	nf	d
Effectif	94	123	29	78	95	17	636	759	123	59	63	4	484	453	-31
Variation en % ni	+30,9			+21,3			+19,3			+6,8			-6,4		

Tableau 41 - Influence de la mise en défens sur la régénération de la strate ligneuse.

ni : effectif au moment de la mise en place de la protection (Avril 1977 ou 1978 pour Oursi).

nf : effectif en Octobre 1980.

d : nf - ni

A Kolel et Gountouré, les taux d'accroissement (4 à 5 % par an) sont similaires. Les espèces favorisées par la mise en défens sont les *Acacia* et *Balanites*, *Commiphora africana* et *Combretum aculeatum*. Les variations de l'effectif sont faibles à Bas Kolel (1, 5 % par an). A Windé, l'effectif du peuplement ligneux diminue malgré une nette augmentation de la population de *Combretum aculeatum*. En fait cette régression est due à une pullulation de rats (*Arvicanthis niloticus*) qui, en trouvant dans la parcelle protégée un biotope favorable, se sont abattus sur le peuplement ligneux. Les arbres sont écorcés à la base ou sectionnés lorsqu'ils sont de

petite taille. L'attaque touche 24 % du peuplement et concerne plus particulièrement *Acacia séyal* dont l'écorce a une teneur en eau plus élevée (45 %) que celle de *Acacia adansonii* (37 %).

L'évolution de ce peuplement a été suivie jusqu'en 1984. On ne dénombrait plus alors que 262 individus. Ce peuplement a donc régressé de 6,6 % par an depuis le début de la protection. Une évolution semblable a été décrite par POULET et POUPON (1978) dans le Ferlo sénégalais.

L'effet de la protection de la végétation sur la strate ligneuse se manifeste aussi sur la croissance et le développement. Certaines espèces (*Maerua crassifolia*, *Combretum aculeatum*) que l'on trouve généralement abruties par le surpâturage font preuve de capacités de croissance exceptionnelles. De plus la floraison et la fructification sont favorisées ce qui augmente les chances de reproduction à long terme de ces espèces.

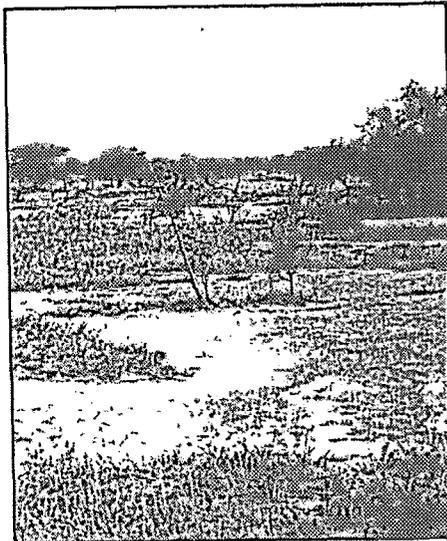
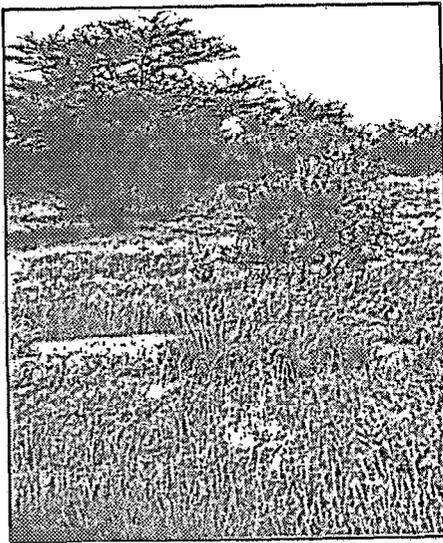
2.1.5 - Le potentiel de régénération naturelle.

Le potentiel de régénération naturelle a été apprécié par l'évolution de certains paramètres caractéristiques de la végétation d'unités protégées de l'exploitation par le bétail.

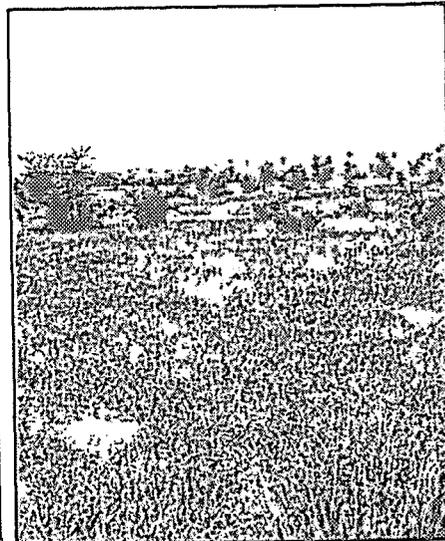
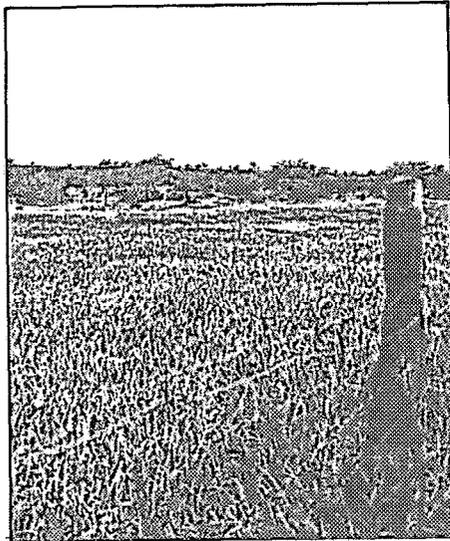
Les effets de la mise en défens, globalement positifs, se répercutent sur la structure de la végétation, la composition floristique, la production et la dynamique de la strate ligneuse.

Sur le plan structural, la protection engendre une augmentation de l'hétérogénéité et du recouvrement. L'unité correspondant au glacis de Kouni, au contraire, se caractérise par l'extension du sol nu. Ce résultat similaire à celui obtenu par de nombreux autres auteurs, semble être dû à l'absence de piétinement par le bétail.

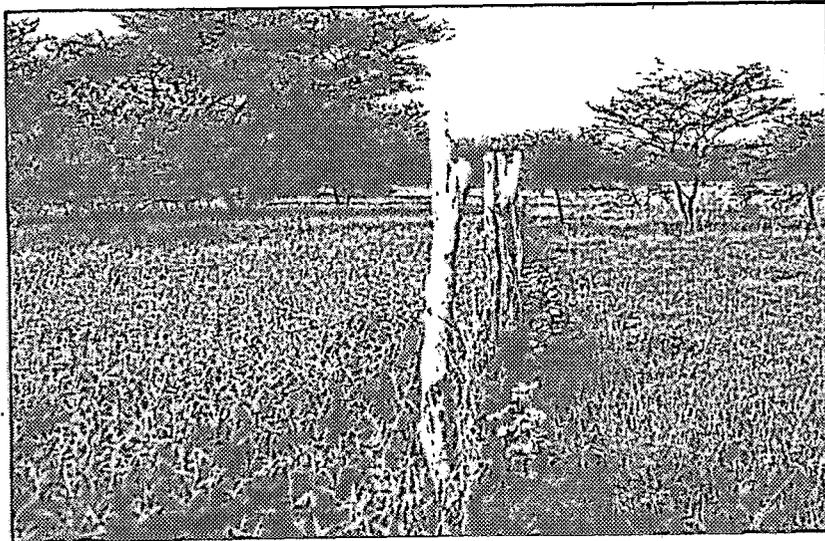
Sur le plan floristique, la protection se manifeste généralement par un accroissement de la diversité floristique. De plus la suppression du pâturage permet l'extériorisation de phénomènes de compétition interspécifique. Ainsi, les graminées sont généralement favorisées par la protection dans les unités établies sur sables (Oursi, Kolel, Gountouré),



Glacis arénacé (Gountouré Ase)



Dune d'Oursi (Ams)



Bas-fond de Windé (Spt)

EFFETS DE LA PROTECTION DE LA VEGETATION

alors que les légumineuses sont avantagées par la mise en défens dans les unités des sols lourds, en particulier dans l'unité Spt du bas-fond de Windé. Sur le plan spécifique les résultats montrent que *Schoenefeldia gracilis*, espèce ubiquiste de la région, a une nette tendance à être remplacée par d'autres espèces : *Aristida adscensionis*, *Aristida funiculata*, *Aristida hordeacea* et *Aeschynomene indica* qui élimine aussi *Panicum laetum*. Par contre, sur les formations sableuses (Oursi, Kolel), cette espèce est plutôt favorisée.

L'influence de la protection sur la production varie en fonction de l'unité de végétation considérée. Sur dune et piémont, c'est-à-dire sur les unités de végétation exploitées en saison sèche, les différences en terme de production annuelle ne sont pas significatives bien que la phytomasse des stations protégées soit largement supérieure à celle des parcelles témoins. Dans les unités de végétation qui constituent les pâturages de saison des pluies, la protection de la végétation favorise la croissance et entraîne une augmentation sensible de la production des parcelles protégées qui est 2 à 3 fois plus élevée que celle des parcelles témoins. Cette différence de production se retrouve au niveau des efficiences en eau. Ce résultat est dû à l'annulation du prélèvement par les animaux et à la baisse de la dégradation par piétinement.

Notons enfin que la mise en défens agit sur la strate ligneuse en favorisant sa croissance, son développement et sa régénération. Il n'y a que dans le bas-fond de Windé que la végétation ligneuse a régressé en raison d'une invasion de rats.

Ces faits soulignent la fragilité de l'équilibre des écosystèmes sahéliens, leur grande sensibilité aux interactions des différents facteurs et leurs capacités de régénération. Ils montrent que la végétation actuelle qui diffère de la végétation potentielle sur les plans de la floristique et de la productivité résulte de l'anthropisation. La pression humaine, très forte dans la région considérée, engendre des états d'équilibre très instables, caractérisés par une flore relativement pauvre et par des faibles niveaux de productivité.

2.2 - La réhabilitation.

2.2.1 - Effets sur la strate herbacée.

De nombreux travaux de réhabilitation des systèmes écologiques ont été réalisés dans la région sahélienne notamment par les organismes de développement et les organisations non gouvernementales. Les évaluations de ces opérations ont cependant été peu nombreuses. Pour le Burkina Faso nous ferons appel aux réalisations de l'IEMVT (TOUTAIN 1977, TOUTAIN et PIOT 1980) et du CIDR (LE MASSON 1980) pour la strate herbeuse et aux opérations de reboisement réalisées par l'Organisme Régional de Développement du Sahel dont le suivi nous a été confié*.

Les aménagements menés dans la région d'Oursi, de Gorom-Gorom et de Markoye par l'IEMVT et le CIDR consistent en une simple action mécanique par travail superficiel du sol ou sous-solage, et ont pour principal objectif d'augmenter la rugosité du sol, favoriser l'infiltration afin de permettre la fixation des semences, leur levée et leur développement. Les résultats obtenus par les auteurs précédemment cités montrent qu'un léger travail du sol autorise l'installation de la végétation herbacée à l'emplacement du passage des outils et une augmentation de production localisée allant de 20 à 100 $g_{MS} \cdot m^{-2}$. De plus, de nombreux ligneux (*Acacia*, *Ziziphus*, *Balanites*...) lèvent sur les lignes de sous-solage.

Des aménagements appropriés permettent donc à des systèmes écologiques mêmes très dégradés (la majorité des expérimentations réalisées par TOUTAIN (1977) et LEMASSON (1980) portent sur des milieux dénudés) de se reconstituer. Cette caractéristique suggère que le potentiel biologique existe et que l'amélioration de certains facteurs physiques suffit à sa manifestation. Les auteurs rapportent cependant qu'un certain nombre de mesures doivent être prises en compte dans ces aménagements. La première est

* Résultats des recherches menées dans le cadre d'accords conclus entre l'ORD du Sahel, le Fond Européen de Développement et l'ORSTOM.

d'éviter un labour trop serré afin de réduire les risques d'érosion. La seconde consiste à protéger pendant 2 à 3 ans les aménagements contre le pâturage afin de ne pas perdre le bénéfice des effets de la première année et de favoriser la régénération ligneuse.

2.2.2 - Effets sur la strate ligneuse.

L'expérimentation a été réalisée autour de Markoye aux lieux-dits Ziguiberi (18 ha) Bangel (9 ha) et à Zindoboum (18 ha). Trois espèces introduites (*Parkinsonia aculeata* L., *Leucaena leucocephalla* (Lam.) De Wit et *Prosopis juliflora* (Sw) DC.) et huit espèces locales (*Acacia* dans leur majorité, *Ziziphus mauritiana* et *Balanites aegyptiaca* ont été testées.

La préparation du sol se fait par sous-solage croisé (distance des raies 6 m, profondeur 20 cm). Les travaux ont été effectués à la fin de la saison sèche 1981 et les plantations à la fin Juillet. Les dénombrements ont lieu en octobre 1981 et en novembre 1982. On définit :

- le taux de reprise : $tp \% = \frac{\text{nombre individus vivants octobre 1981}}{\text{nombre individus plantés juillet 1981}}$

- le taux de réussite : $ts \% = \frac{\text{nombre individus vivants novembre 1982}}{\text{nombre individus plantés juillet 1981}}$

Le tableau 42 résume les résultats qui ont été présentés dans le détail dans GROUZIS (1986).

Station/ Date	Taux de reprise (oct. 81) %	Taux de réussite (nov. 82) %
Ziguiberi	79,4 ± 1,7 (2320)	57,8 ± 2,1 (2295)
Bangel	74,6 ± 1,8 (2449)	44,1 ± 2 (1243)
Zindoboum	90,6 ± 1,2 (2505)	82,3 ± 2,2 (1253)

Tableau 42 - Evaluation des aménagements (travail du sol et reboisement) dans la région de Markoye.

t % ± IC pour p = 0,05 (effectif échantillon)

Ils montrent que le taux de réussite des trois stations confondues se situe à environ 61 %. On observe cependant une assez grande variabilité puisque les résultats obtenus à Zindoboum sont largement supérieurs à ceux de Ziguiberi et surtout Bamgel. Ces différences sont notamment dues à la proportion des espèces qui ont un comportement particulier. On constate en effet que *Acacia seyal* (90,1 %) est plus performant que *Acacia adansonii* (83,6-85,5 %), *Prosopis juliflora* (72%), *Acacia senegal* (43,4 %), *Acacia raddiana* (48,9-26,8 %).

Dans l'ensemble les espèces allochtones peuvent être considérées comme moins performantes que les espèces autochtones, soit à cause de leur taux de mortalité plus élevé (30 % contre 13 % à Zindoboum, 95 % contre 53,4% à Bamgel), soit à cause de leur forte sensibilité à l'égard des prédateurs (rongeurs, criquets...).

Bien qu'il soit nécessaire d'assurer un suivi sur de plus nombreuses années avant de tirer des conclusions définitives, ces aménagements démontrent bien les possibilités de reconstitution du milieu : augmentation du recouvrement herbacé dans les raies de sous-solage, assez bonne réussite du reboisement. La pérennité de ces aménagements nécessite toutefois une protection vis-à-vis des troupeaux pendant les premières années de leur installation.

3 - DYNAMIQUE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES SAHELIENS.

Dans un contexte climatique plutôt défavorable et malgré des conditions de protection imparfaites, nous avons pu mettre en évidence dans la région considérée, de réelles capacités de régénération et une vitalité de la végétation qui se manifestent dès la première année de mise en défens.

Dans les systèmes écologiques fortement dégradés (recouvrement herbacé faible à nul, strate ligneuse pratiquement inexistante, sol érodé...) dans lesquels la régénération naturelle par protection ou mise en repos temporaire n'est plus possible en raison de la faiblesse du potentiel de régénération, il a été possible de montrer qu'un travail du sol associé

ou non à un reboisement permet de restaurer le milieu. La protection de l'aménagement de l'influence néfaste du bétail est toutefois nécessaire pendant les premiers stades de la réinstallation de la végétation pour assurer la pérennité du traitement. Tout comme les travaux d'ADAM 1967, BOUDET 1977, TOUTAIN et PIOT 1980, et BENOIT 1984, ces résultats montrent que la végétation sahélienne, placée dans des conditions particulières (charge faible à modérée, année pluviométriquement favorable...) a de réelles capacités de régénération. Des cas semblables de remontée biologique ont été rapportés par NOBLE (1977) dans les zones arides australiennes ou encore par FLORET (1981) dans les steppes du sud tunisien.

Pour ce qui concerne la zone sahélienne, ces capacités de régénération résident dans les caractères d'adaptation des espèces et des structures de végétation à la sécheresse et à la variabilité des conditions édapho-climatiques : dominance de thérophytes, d'espèces arido-passives, caractères physiologiques (propriétés germinatives des semences, forte proportion de plantes C_4 favorisant l'économie de l'eau), structure en mosaïque...

L'ensemble de ces caractères adaptatifs devraient permettre à ces phytocénoses de surmonter le risque climatique, si l'homme par sa pression actuelle et historique n'engendrait des contraintes permanentes (dégradation des structures) venant aggraver les effets d'une sécheresse persistante depuis deux décennies. Le modèle de la dynamique des systèmes écologiques sahéliens est représenté sur la figure 71.

Lorsque les facteurs qui agissent sur la dynamique d'une phytocénose ne répondent qu'à des fluctuations aléatoires, il s'établit entre la végétation et le milieu un état d'équilibre (E). Cet équilibre correspond à un état stationnaire qui se situe à un niveau élevé de l'échelle (e) et se traduit par une structure de la végétation (diversité floristique, organisation en mosaïque, niveau de production élevé...). Il existe peu ou pas d'exemple de cet état stationnaire car les milieux naturels au Sahel font défaut, mais des états comparables ont été décrits par BENOIT (1984) et BOUDET (1983) dans des régions faiblement anthropisées du Burkina Faso et de la Mauritanie. Le résultat issu de la mise en défens de la station de Windé s'en approcherait aussi.

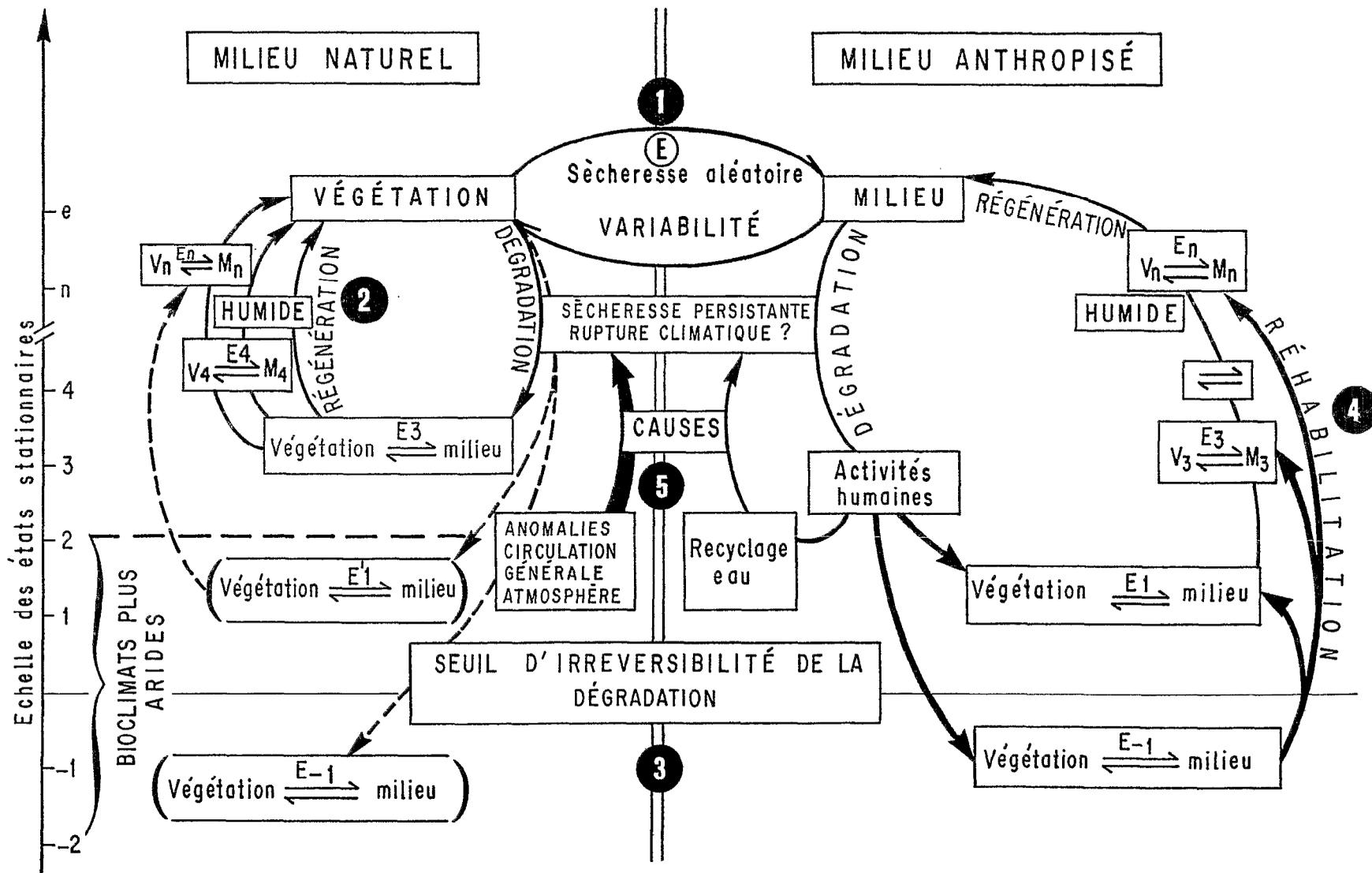


Fig. 71 - Modèle de la dynamique des systèmes écologiques sahéliens.

Les chiffres correspondent aux axes prioritaires de recherche définis dans la conclusion

Lorsque l'un des facteurs de l'équilibre subit une modification importante (perturbation climatique telle que la sécheresse persistante décrite au Sahel), l'équilibre est rompu et le système s'écarte de son état habituel. Après une période de transition de durée variable un nouvel équilibre (E3) se crée autour d'un nouvel état stationnaire correspondant à une autre structure de végétation. En milieu sahélien peu ou pas anthropisé, l'effet de la sécheresse se manifeste par exemple par une modification de l'organisation de la végétation. On observe une contraction des ligneux (COUREL 1985) traduisant une adaptation à des conditions hydriques plus défavorables.

Lorsque la pression cesse le retour à l'état initial (régénération) s'effectue avec une certaine inertie soit directement soit par des états stationnaires intermédiaires (E4, En...). Les étapes intermédiaires du cheminement des images de la végétation dans les expériences de mise en défens pourraient illustrer ces états.

En milieu anthropisé l'itinéraire est identique. Cependant le nouvel équilibre se situe à un niveau beaucoup plus bas de l'échelle des états stationnaires (E1), car aux effets de la contrainte naturelle (sécheresse) sont venus s'ajouter les effets aggravant des perturbations anthropiques. Les phytocénoses étudiées à Oursi se situent dans leur grande majorité à ce niveau qui est caractérisé par une relative pauvreté floristique et un faible niveau de productivité. Dans ces conditions le retour à l'état initial (régénération) nécessite un cheminement beaucoup plus long que dans le cas d'un milieu naturel, car les capacités de stabilisation du système (BLANDIN 1980) qui dépendent des espèces constituant la phytocénose, de leurs propriétés, de leur agencement et des disponibilités du milieu (énergie, éléments biogènes) sont moins élevées. De plus les risques de nouvelles perturbations au cours de ce long cheminement sont importants.

Remarquons que contrairement à la régénération, les étapes intermédiaires ne sont pas représentées sur la phase de dégradation de la figure 71 d'une part, pour en faciliter la lecture et d'autre part, pour rendre compte du fait que la phase de dégradation est en général beaucoup plus rapide que la phase de régénération.

Des conditions de dégradations intenses peuvent conduire à des niveaux (E-1) dépassant les seuils à partir desquels la régénération naturelle est impossible. Le retour à des états stationnaires plus favorables et à terme à l'état initial ne peut se réaliser que par des aménagements : amélioration des disponibilités du milieu (état de surface, bilan hydrique, fertilité...) et/ou amélioration du potentiel biologique (introduction d'espèces par semis, reboisement...).

Ces niveaux de dégradations sont très fréquents dans les milieux fortement anthropisés. Ils s'observent aussi en milieu naturel dans des bioclimats plus arides que ceux étudiés dans la région d'Oursi.

Bien que certains auteurs aient montré que la déforestation altère localement plusieurs paramètres climatiques (GORNITZ et al. 1984, MONTENY et ZELLER 1986) il reste à démontrer son impact sur la circulation régionale et les conséquences au niveau de la pluviosité. D'autres recherches (COUREL 1986) conduisent à penser que les activités humaines ne constituent pas le facteur déterminant de la sécheresse au Sahel contrairement aux conclusions de CHARNEY (1975). Les causes de la sécheresse relèvent davantage d'anomalies de la circulation générale de l'atmosphère. Par contre nier l'influence de l'homme sur les modifications ponctuelles de l'état de surface (COUREL 1986) constitue une position allant à l'encontre de la sensibilisation et de la responsabilisation des populations. L'homme par ses activités actuelles et historiques engendre au niveau du substrat édaphique des contraintes permanentes qui viennent accentuer les effets du risque sécheresse de plus en plus élevé ces dernières années, et qui amènent les systèmes écologiques à un niveau de dégradation tel que les mécanismes d'adaptation à l'aridité ne peuvent plus fonctionner. La régénération naturelle est alors rendue difficile, voire impossible.



CONCLUSIONS GENERALES

Ce travail s'insère dans le cadre d'un programme pluridisciplinaire mené dans une zone sahélienne du Burkina Faso : le bassin versant de la Mare d'Oursi.

L'inventaire des ressources de cette entité et leur évolution en relation avec les variations des facteurs écologiques et les conditions de leur exploitation par l'homme constituent les objectifs de ce vaste programme.

Nos recherches portent plus spécifiquement sur l'étude de la structure, la productivité et la dynamique des systèmes écologiques de cette zone d'endodromie. Elles visent à définir les processus d'établissement, certains aspects du fonctionnement et l'évolution des phytocénoses en relation avec les variations des facteurs écologiques en particulier les facteurs anthropique et climatique.

La réalisation de ces objectifs a nécessité (1) une analyse détaillée de la structure des unités de végétation et la détermination des caractéristiques écologiques (précipitation, précipitation efficace, caractéristiques édaphiques...) des milieux qui leur sont associés ; (2) une analyse approfondie des modalités de l'établissement (stock de semences, écophysologie de la germination) et des conditions de la mise en place du peuplement (quantité de pluie et humidité de surface du sol nécessaires à la levée, à l'installation, taux de mortalité...) ; (3) une analyse détaillée de certains aspects du fonctionnement notamment de la productivité non seulement de la fraction épigée mais encore de celle de la fraction hypogée pour laquelle peu de résultats sont disponibles. Pour cela, l'évolution saisonnière de la phytomasse d'unités de végétation correspondant à des conditions édaphiques contrastées a été suivie, les valeurs caractéristiques telles que production, productivité, vitesse relative de croissance, temps de renouvellement des racines ont été déterminées et reliées aux facteurs écologiques (énergie, pluie, pluie efficace, caractéristiques de sol, dégradation...). Ce parallèle a permis de préciser le déterminisme

écologique de la production et de compléter les valeurs caractéristiques des systèmes écologiques par les valeurs des rendements énergétiques, et de l'efficacité en eau (RUE, WUE) ; (4) une étude approfondie des effets de la protection de la végétation sur l'évolution de la flore, de la phytomasse, de l'efficacité en eau, la démographie des ligneux afin de définir les capacités de régénération de ces phytocénoses. Pour mesurer pleinement les effets de cette mise en défens, les conditions générales d'évolution (climatique, dynamique historique) ont été rappelées.

Parallèlement à ces observations, les variations spatio-temporelles de la production à l'échelle du bassin versant ont été déterminées afin de parvenir à l'estimation du stock fourrager à la fin de la saison des pluies, un des besoins prioritaires des responsables de l'élevage des régions sahéliennes.

Sur le plan méthodologique les investigations ont été réalisées à différentes échelles spatiales (station et secteur écologiques, région) et à différents niveaux d'intégration biologique (population, peuplement). Quel que soit le niveau de perception retenu, on s'est toujours heurté à l'hétérogénéité du milieu d'où l'importance accordée à la représentativité des données recueillies, à la précision des mesures, en d'autres termes aux problèmes d'échantillonnages. Aux méthodes classiques du diagnostic écologique nous avons ajouté une dimension expérimentale soit en milieu naturel (mise en défens) soit en conditions contrôlées (écophysiologie de la germination) pour aborder les aspects dynamiques des systèmes écologiques. Notons enfin sur le plan de la méthodologie que ce travail a été le cadre de la détermination des conditions d'utilisation des techniques récentes de mesure de la phytomasse (radiométrie) en milieu sahélien.

UN ENVIRONNEMENT ARIDE

Une des premières caractéristiques du système étudié est l'aridité de son environnement. En effet le bassin versant de la Mare d'Oursi appartient à un climat typiquement sahélien caractérisé par des conditions spécifiques d'aridité.

Le rayonnement global (moyenne interannuelle de $2375 \text{ J.cm}^{-2}.\text{j}^{-1}$) et les températures élevées (moyenne annuelle des températures maximales de 36° C et des températures minimales de 22° C) déterminent des niveaux d'évapotranspiration (2872 mm.an^{-1}) très défavorables au bilan hydrique climatique.

Les précipitations annuelles, qui s'élèvent en moyenne à 368 mm sont peu abondantes. Elles se répartissent en 39 jours de pluie seulement. Nous reviendrons ultérieurement sur la variabilité des précipitations, mais notons déjà qu'à ce caractère aléatoire des précipitations qui constitue le risque sécheresse vient s'ajouter une notion de contrainte sécheresse. Cette contrainte se situe d'une part, dans la forte saisonnalité des phénomènes puisqu'aux 3-4 mois de saison des pluies succèdent 8 à 9 mois de saison rigoureusement sèche et d'autre part, dans la forte récurrence d'années de déficit pluviométrique. Cette tendance générale vers un régime déficitaire des précipitations caractérise une sécheresse qui se singularise par sa durée, son intensité et sa généralisation géographique. Elle a conduit un certain nombre d'auteurs à parler de véritable aridification du système.

Ces conditions d'aridité climatique sont généralement aggravées par des conditions d'aridité édaphique engendrées notamment par un ruissellement diffus intense pouvant atteindre dans certains glacis jusqu'à près de 50 %. En conséquence l'infiltration est réduite et les réserves en eau précaires.

Le bassin versant d'Oursi présente donc des caractères marqués d'aridité.

UNE APPARENTE HOMOGENEITE

Le bassin versant d'Oursi offre à un certain niveau d'intégration une apparente homogénéité. Celle-ci se manifeste tout d'abord au niveau climatique par une grande unité régionale : températures élevées, longue saison sèche, régime des précipitations... Les sols carencés en azote, présentent généralement une bonne stabilité structurale. On observe une relative monotonie de la physionomie des types de végétation. Cette région est le domaine des steppes à épineux, c'est-à-dire une formation herbeuse ouverte dominée par les thérophytes et des phanérophytes. Les

graminées constituent une bonne part des espèces. Les peuplements ligneux sont en général non équilibrés. Sur le plan fonctionnel les unités de végétation du bassin versant d'Oursi sont caractérisées par des rendements énergétiques faibles. Cette relative homogénéité se retrouve aussi au niveau du mode de vie qui repose principalement sur le nomadisme, pratiqué par près de 75 % de la population totale.

UNE GRANDE VARIABILITE

Malgré cette apparente homogénéité, une des caractéristiques fondamentales des systèmes écologiques sahéliens est contenue dans sa variabilité. Cette variabilité se situe notamment au niveau des précipitations et se manifeste à la fois dans le temps et dans l'espace. Le coefficient de variation des précipitations annuelles de la zone s'élève à 22 %, ce qui traduit aussi l'aridité du climat. Les précipitations annuelles peuvent varier du simple au double d'une année sur l'autre ; par ailleurs des écarts pouvant atteindre 40 % des précipitations annuelles ont été enregistrés entre pluviomètres distants de 5 km. Cette variabilité spatiale concerne non seulement le total mais encore la répartition pluviométrique. Cette dernière, décrite par les valeurs des paramètres statistiques de l'histogramme de distribution des précipitations décadaires, offre en effet une assez grande variabilité.

Les reliefs cuirassés, les massifs rocheux, les systèmes dunaires, les glaciers et les dépressions et bords de mares rassemblés dans l'espace restreint du bassin versant d'Oursi constituent des éléments de la diversité du paysage. Ceux-ci associés à la variété de la nature des sols sont responsables de la redistribution de l'eau...

La combinaison de la variabilité climatique et édaphique détermine une diversité des conditions écologiques qui engendre des réponses biologiques et humaines variées. Sur le plan biologique, la variabilité se situe notamment au niveau de la production grainière des différents peuplements. Celle-ci varie de 4 à plus de $50 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ soit 6 à 30 % de la phytomasse maximale.

L'étude de la germination a permis de montrer une variabilité de comportement en fonction des espèces et à l'intérieur d'une même espèce en relation avec le polymorphisme des semences.

Si l'établissement, qui se caractérise par des vagues successives de levée offre une certaine homogénéité quant à la quantité de pluie provoquant la levée (10 à 30 mm) ou à celle permettant l'installation de la végétation (70 mm soit 20 % des précipitations annuelles) une certaine variabilité s'observe dans la période d'installation, c'est-à-dire dans le temps qui sépare la première levée de la mise en place du peuplement. Celle-ci est deux fois plus courte dans le bas-fond par rapport aux autres unités de végétation.

En réponse à la répartition des pluies, à la nature du substrat et à l'hétérogénéité de la structure spatiale de la végétation, on observe une grande variabilité des cycles de production de phytomasse et de la phénologie (levée, floraison et fructification des espèces dominantes).

La moyenne interannuelle de la productivité et de la production annuelle des unités de végétation protégées du bassin versant d'Oursi, s'élève respectivement à $2,8 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ et à $158 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$. On observe cependant une forte variabilité en fonction des unités de végétation. Ainsi la moyenne interannuelle de la productivité varie de 1,6 à $2 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ pour les unités des glacis à $5 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ pour la végétation du bas-fond, tandis que la moyenne interannuelle de la production s'étend de 60 à $140 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ (glacis) à $250 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$ (bas-fond).

L'efficacité en eau, c'est-à-dire la quantité de matière sèche élaborée à partir d'un millimètre de pluie est en moyenne de $4,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour les unités protégées. Tout comme la production ce paramètre présente une assez grande variabilité intersite puisqu'il varie en moyenne de $1,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (glacis) à $8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (bas-fond). La variabilité est moins accusée lorsque l'on considère le WUE c'est-à-dire l'efficacité par rapport à l'eau infiltrée. En effet il ne varie plus que de 2,7 à $6,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour les mêmes unités de végétation.

Alors que la distribution racinaire en fonction de la profondeur semble répondre au même modèle exponentiel, la production racinaire présente également des caractères de variabilité. La production racinaire moyenne de l'unité de végétation établie sur sable ($104 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$) est en effet deux fois plus élevée que celle relative au glaciis ($54 \text{ g}_{\text{MS}} \cdot \text{m}^{-2}$). La variabilité interannuelle des paramètres de production est dans l'ensemble forte mais notons que pour une même unité de végétation, la variabilité interannuelle de la phytomasse racinaire est proportionnellement plus élevée que celle de la phytomasse aérienne. Les mesures réalisées à l'échelle du bassin versant confirment les variabilités spatiale et temporelle de la production déterminées au niveau de la station écologique.

Sur le plan humain la diversité se situe au niveau des groupes ethniques et des systèmes de production puisque se pratiquent à la fois l'agriculture, l'élevage et des activités annexes telles que la cueillette. La coexistence de ces diverses activités constitue un facteur de régulation face aux larges fluctuations aléatoires du milieu.

En définitive il apparaît que ce sont les précipitations qui transmettent leur caractère aléatoire à l'ensemble des composantes de l'écosystème.

UNE BONNE ADAPTATION AU CARACTERE ARIDE ET FLUCTUANT DU MILIEU

Les espèces végétales présentent d'indéniables caractères d'adaptation aux conditions sahéliennes définies par l'aridité et le caractère aléatoire des précipitations.

Ces caractères adaptatifs se retrouvent dans l'hétérogénéité de la structure spatiale de la végétation dont les éléments, c'est-à-dire les unités floristiquement, écologiquement et physionomiquement différentes présentent un comportement phénologique distinct en relation avec les microvariations des conditions de milieu. Cette structure en mosaïque permet de tirer le meilleur profit des disponibilités des différentes niches (eau, éléments nutritifs, relations de voisinage), de parvenir à une bonne

occupation de l'espace et en conséquence d'assurer la perennité de la structure.

La forte proportion d'espèces arido-passives (78,5 %) constitue aussi une bonne réponse à la contrainte sécheresse, bien qu'il s'agisse plus d'un phénomène d'évitement. Les arido-actives présentent par contre un ensemble de caractères morphologiques, anatomiques et physiologiques favorisant l'économie de l'eau.

Les espèces annuelles qui constituent près des 2/3 des peuplements herbacés développent des adaptations à la sécheresse portant sur les mécanismes de la germination par une abondante production de diaspores, une durée de vie élevée des semences et des mécanismes physiologiques : inhibition tégumentaire ou due aux glumelles chez les graminées, dormance, post-maturation. Ces mécanismes permettent d'éviter ou de limiter les levées dans des conditions marginales et d'attendre les meilleures conditions de température et d'humidité pour assurer l'établissement. La tolérance d'un grand nombre d'espèces au stress hydrique au moment de la germination constitue aussi une bonne adaptation de ces taxons à la sécheresse. Les propriétés germinatives de certaines espèces (*Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Aeschynomene indica...*) peuvent varier en fonction du type morphologique de leurs semences. De telles différences de comportement constituent une excellente adaptation à la pluviométrie erratique de ces régions arides. Plus généralement c'est cette variabilité intra et interspécifique qui représente la meilleure stratégie d'adaptation aux caractères aléatoires du milieu car elle permet toujours à certains taxons d'assurer la perennité du peuplement.

Les systèmes agraires présentent aussi des caractères d'adaptation à l'aridité et à la variabilité des ressources. Ceux-ci résident notamment dans les pratiques diversifiées et complémentaires, l'ajustement des rythmes quotidiens et saisonniers à la distribution spatiale et temporelle des ressources.

Notons toutefois que la reproduction du système nécessite l'accès à un espace non saturé et le renouvellement des ressources. Or, ces conditions ne sont plus remplies en raison du déséquilibre entre les charges humaines et animales et les ressources naturelles.

L'INADEQUATION ENTRE LES CHARGES ET LES RESSOURCES

Avec une production moyenne d'environ 64 000 tonnes le bassin versant de la Mare d'Oursi peut assurer les besoins d'entretien d'une charge d'environ 12 000 UBT. Pendant la période d'observation la charge maximale s'élève à 14 000 UBT. Il en résulte un excès de charge d'environ 30 % si l'on se base sur la production herbacée moyenne et d'environ 2 % si l'on se réfère à la production maximale observée. Au cours d'année exceptionnellement sèche telle que l'année 1983, l'excès de charge qui atteint 9 000 UBT est énorme. L'utilisation du modèle simple de production en fonction des précipitations permet d'estimer les charges fréquentielles en relation avec les disponibilités fourragères de la zone. Il apparaît alors que la production du bassin versant ne permet d'assurer les besoins d'entretien du cheptel présent sur la zone qu'une année sur cinq. De plus, il serait nécessaire de délester le bassin d'au moins 15 à 20 % de l'effectif actuel afin de couvrir les besoins au moins une année sur deux. L'influence de cet excès de charge sur l'évolution des ressources apparaît d'ailleurs très nettement lorsque l'on compare l'évolution d'une végétation protégée à celle d'un milieu normalement exploitée par les troupeaux.

Les effets bénéfiques de la protection se manifestent à la fois sur la structure, la composition floristique, la production de la strate herbacée et la dynamique de la strate ligneuse. Sur le plan floristique, la mise en défens se concrétise par un accroissement de la diversité floristique. Des phénomènes de compétition interspécifiques apparaissent et indiquent la vitalité et les potentialités de certaines espèces inhibées par le surpâturage. L'influence de la protection se repercute très nettement sur le niveau de production des unités exploitées en saison des pluies. La biomasse des unités protégées est deux à trois fois plus élevée que celle des unités exploitées. Les rapports de phytomasse et d'efficience en eau sont similaires. On montre par ailleurs que la protection du sol contre l'érosion est nettement favorisée par la protection puisque une phytomasse de 60 à 100 $g_{MS} \cdot m^{-2}$ peut encore être mesurée dans les zones protégées lorsque le sol des milieux normalement exploités est pratiquement nu.

L'effectif des peuplements ligneux s'accroît en général de 1,5 à 9%. Ces faits soulignent que ces phytocénoses ont un potentiel de régénération élevé malgré des conditions climatiques plutôt défavorables, mais ce potentiel ne peut pas s'exprimer en raison des charges pastorales excessives. L'homme par sa pression actuelle et historique engendre des contraintes permanentes qui agissent en synergie avec la sécheresse et aboutissent à la rupture des équilibres écologiques.

Malgré une apparente homogénéité à petite échelle, les systèmes écologiques sahéliens, caractérisés par un environnement aride, offre une grande variabilité. Les organismes vivants notamment végétaux et les systèmes agraires sont adaptés à l'aridité et au caractère fluctuant du milieu. On assiste cependant à la rupture des équilibres écologiques en raison principalement de l'inadéquation entre les charges et les ressources.

DES AXES PRIORITAIRES POUR LA RECHERCHE

La flore sahélienne est bien connue et l'inventaire floristique peut être considéré comme achevé. L'orientation des recherches dans ce domaine devrait s'effectuer vers les aspects ethnobotaniques et la caractérisation du pool génique des plantes alimentaires notamment des céréales mineures (*Digitaria*, *Panicum*, *Cenchrus...*) en vue de leur amélioration.

La typologie et la cartographie de la végétation sont bien avancées. L'évolution rapide des milieux nécessite cependant leur actualisation. Le développement des techniques de télédétection constitue un sérieux atout dans ce domaine à condition de régler au préalable tous les aspects méthodologiques liés à l'outil.

Certains aspects du fonctionnement ont fait l'objet de recherches développées dans le cadre de différents programmes : Programme Biologique International, Production Primaire au Sahel, Programmes du Comité Lutte contre l'Aridité en Milieu Tropical (LAT). Bien que la variabilité caractéristique du milieu sahélien soit loin d'être cernée sur le plan fonctionnel, on peut admettre que les travaux sont bien avancés. Des modèles de production ont notamment été proposés.

Il nous semble par contre, que les recherches relatives aux aspects dynamiques des systèmes écologiques méritent d'être développées. Celles-ci doivent s'attacher à caractériser les mécanismes qui sous-tendent l'équilibre et la stabilité des systèmes écologiques. En conséquence les relations de compétition ou de complémentarité entre les strates ligneuse et herbacée dans l'utilisation des ressources, les modalités de la régénération naturelle, la détermination des seuils biologiques et trophiques permettant la régénération naturelle constituent des axes prioritaires de recherches.

Ces recherches doivent s'efforcer aussi de définir les moyens de réhabilitation des systèmes écologiques fortement dégradés d'une part, par l'évaluation de l'impact à moyen et long terme sur le milieu des opérations en cours (travail du sol, reboisement...) et d'autre part, par l'étude de la biologie des espèces utilisables dans l'enrichissement du potentiel biologique des systèmes écologiques. La détermination des caractéristiques écophysiologiques des espèces ligneuses autochtones (phénologie, résistance à la sécheresse...) en relation avec leurs propriétés améliorantes de la fertilité des sols (fixation d'azote...), ainsi que la détermination des potentialités de reproduction de certaines espèces herbacées, constituent des éléments essentiels à prendre en considération.

Sur le plan climatique enfin, élément déterminant de l'évolution des systèmes, les physiciens, océanographes et climatologues doivent chercher à préciser le déterminisme des sécheresses, en particulier l'influence de la déforestation sur le recyclage de l'eau.

PERSPECTIVES POUR LE DEVELOPPEMENT

Il ne s'agit pas ici d'énumérer des recettes mais de réunir quelques réflexions issues non seulement de notre propre travail mais aussi des discussions avec les autres chercheurs du programme, certains responsables du développement et des éléments de la population.

La diversité du milieu et des pratiques requérant des solutions variées il apparaît la nécessité de développer un ensemble d'actions d'ordre politique, sociologique et technique. Le principe de base qui doit guider la

mise en place de ces actions de développement est l'ajustement de la demande à la productivité à long terme du milieu. Cela nécessite le développement d'actions destinées à la préservation du milieu et à la réhabilitation des zones dégradées pour favoriser le renouvellement des ressources.

Limiter l'extension des surfaces cultivées dans les zones marginales sensibles à l'érosion, mettre en place des mises en défens judicieuses pour constituer des foyers de recolonisation, étendre les parcours différés, favoriser l'émondage raisonné des ligneux et l'utilisation des haies vives constituent des actions essentielles. Pour ce qui concerne la réhabilitation, développer les reboisements et les travaux de restauration des sols, limités dans un premier temps dans les espaces cultivés afin que les populations les mettent en place, les entretiennent et en tirent un bénéfice immédiat, répartir les charges en multipliant les points d'eau de petites dimensions dans l'espace pastoral (barrages collinaires dans les massifs les plus arrosés, citernes dans les glacis imperméables pour recueillir les quantités énormes d'eau de ruissellement...) constituent des actions prioritaires.

L'ajustement de la demande à l'offre passe aussi par la diminution des charges pastorales et humaines. Maitriser la croissance démographique, organiser les circuits de commercialisation pour favoriser la vente du bétail et l'achat des céréales représentent des opérations à mettre en oeuvre.

La réalisation de telles actions ne peut se faire sans la responsabilisation des populations. Il est donc nécessaire de rechercher les moyens (code rural, réforme foncière...) de convergence des stratégies individuelles et de l'intérêt de la collectivité actuellement souvent en opposition.

C'est au prix de ces actions et de la sensibilisation des populations à l'évolution régressive et à la lutte contre la désertification que les systèmes écologiques et à travers eux les civilisations agro-pastorales sahéliennes pourront se perpétuer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAM J.G., 1967. - Evolution de la végétation dans les sous-parcelles protégées de l'UNESCO-IFAN à Atar (Mauritanie), Bull. IFAN, XXIX, sér. A, 1, 92-106.
- ALBERGEL J., 1986. - Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso. Conférence CIEH, Ouagadougou 18 p. multigr.
- ALBERGEL J., CARBONNEL J.P., GROUZIS M., 1985. - Péjoration pluviométrique au Burkina Faso : incidences sur les ressources en eaux et les productions végétales. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, 1, 3-19.
- ANDERSON A.M., 1953. - The effects of the glumes of *Paspalum notatum* Flügge on germination. Proc. Assoc. Off. Seed Ann. Newsl., 27, 35-36.
- ANONYME 1967. - National handbook for range and related grazing lands. US Department of agriculture. Soil Conserv. Service : S.C.S. Range, 77 p.
- ANONYME 1975. - Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains. Actes du colloque. C.I.P.E.A., Bamako, 3-8 Mars 1975.
- ANONYME 1977. - Rapport annuel d'activités 1976, Agriculture-Elevage, C.I.D.R., GOROM-GOROM, multigr.
- ANONYME 1979. - Principaux résultats du rescencement de 1975. Institut National Statistique et Démographique, Ouagadougou, 27 p., + ann.
- ANONYME 1984. - Propositions pour une stratégie révisée en 1984 de lutte contre la sécheresse et de développement dans le sahel. OCDE, CILSS, Club du Sahel, Paris, 56 p.
- ARES J., SINGH J.S., 1974. - A model of the root biomass dynamics of a shortgrass prairie dominated by blue grama (*Bouteloua gracilis*). Journ. Appl. Ecol., 11, 727-743.
- AVEYARD J.M., 1968. - The effect of seven pre-sowing seed treatments on total germination and germination rate of six *Acacia* species. New South Wales Soils Conserv. Serv. J., 24, 43-54.
- BALENT G., 1986. - The influence of grazing on the evolution of botanical composition of previously cultivated fields. The example of the Pyrenees. 28-29 in JOSS P.J., LYNCH P.W., WILLIAMS O.B., Ed., "Rangelands : a resource under siege". Proceeding of the Second International Rangeland Congress. 634 p.
- BARRAL M., 1977. - Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. Tr. et Doc., ORSTOM, n°77, 119 p. + 8 cartes h.t., Paris.

- BARRAL H., et al., 1983. - Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. A.C.C. GRIZA (LAT). Ministère de la Recherche et de l'Industrie, GERDAT-ORSTOM, 172 p.
- BASKIN J.M., BASKIN C., 1976. - Germination dimorphism in *Heterotheca subaxillaris* var. *subaxillaris*. Bulletin of the Torrey Botanical Club, vol. 103, 5, 201-206.
- BENOIT M., 1984. - Le Seno-Mango ne doit pas mourir : pastoralisme, vie sauvage et protection au Sahel. Mémoires ORSTOM, n° 103, 143 p.
- BERGER A., 1985. - Seed dimorphism and germination behaviour in *Salicornia patula*. Vegetatio, 61, 137-143.
- BERNUS E., 1967. - Cueillette et exploitation des ressources spontanées du Sahel nigérien par les Kel Tamasheq. Cah. ORSTOM, sér, Sci. Hum., Vol. IV, n°1, 31-52.
- BERNUS E., 1986. - La sécheresse dans la tradition touareg. Colloque "Comparaison des sécheresses dans le Nordeste Brésilien et le Sahel Africain", IHEAL, CREDAL, ORSTOM, Paris 16-18 janvier 1986, 8 p.
- BEWLEY J.D., BLACK M., 1982. - Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination. Vol. 2 : Viability, dormancy, and environmental control. Springer-Verlag, Berlin, 375 p.
- BILLE J.C., 1972. - Graines et diaspores des plantes herbacées du Sahel. Description. ORSTOM, Dakar, 51 pages multigr.
- BILLE J.C., 1973. - Graines et diaspores des plantes herbacées du Sahel. Production et dynamique. ORSTOM, Dakar, 54 pages multigr.
- BILLE J.C., 1977. - Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 65, 81 pages.
- BILLE J.C., POUPON H., 1972. - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : biomasse végétale et production primaire nette. La Terre et la Vie, 26, (3), 366-382.
- BLANDIN P., 1980. - Evolution des écosystèmes et stratégies cénotiques. in "Recherches d'Ecologie théorique. Les stratégies adaptatives", R. BARBAULT, P. BLANDIN, J.A. MEYER. Ed., 221-234.
- BOHM W., 1979. - Methods of studying root systems. Ecological studies 33, Springer-Verlag, Berlin, 188 p.
- BOOTE K.J., 1976. - Root : Shoot relationships. Soil and Crop Science Society of Florida, 36, 15-23.
- BOUDET G., 1972. - Désertification de l'Afrique tropicale sèche. Adansonia, sér. 2, 12, (4), 505-524.

- BOUDET G., 1977. - Désertification ou remontée biologique au Sahel. Cah. ORSTOM., sér., Biol., vol. XII, (4), 293-300.
- BOUDET G., 1978. - Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères, IEMVT, Ministère de la Coopération, Paris, 254 p.
- BOUDET G., 1980. - Systèmes de production d'élevage au Sénégal : Etude du couvert herbacé. ACC-LAT, DGRST-IEMVT, Rapport multigr., 48 p.
- BOUDET G., 1983. - L'agropastoralisme en Mauritanie ; perspectives de recherches. IEMVT, Maisons Alfort, Rapp. multigr., 46 p.
- BOUDET 1983. - Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. Ministère de la Recherche et de l'Industrie, GERDAT-ORSTOM, Paris, 172 p.
- BOUDET G., 1984. - Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel. Bull. Soc., Languedocienne de Géographie, 18, (3-4), 167-177.
- BOUDET G., 1986. - Recherches pluridisciplinaires sur les pâturages, leur conservation et l'élevage en République Islamique de Mauritanie. Rapport multigr., IEMVT, 61 p.
- BOURLIERE F., 1978. - La savane sahélienne de Fété Olé, Sénégal, 187-229. in. Problème d'Ecologie : Structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres. Masson et Cie Ed., Paris.
- BOURLIERE F., HADLEY M., 1970. - The ecology of tropical savannas. Annu. Rev. Ecol. Syst., 1, 25-52.
- BOUXIN G., 1977. - Structure de la strate arborescente dans un site de la forêt de montagne du Rwanda (Afrique Centrale). Vegetatio, 33, (2-3), 65-78.
- BOYER J., GROUZIS M., 1977. - Etude écophysiological de la productivité de quelques graminées fourragères cultivées au Sénégal. I. Influence de certains facteurs du milieu sur le comportement hydrique et la croissance. Cah. ORSTOM, sér. Biol, XII, (4), 249-267.
- BRAUN M.H., 1973. - Primary production in the Serengeti. Ann. Université d'Abidjan, 6, (2), 171-188.
- BRAY J.R., 1963. - Root production and estimation of net productivity. Canadian Journal of Botany, 41, 65-72.
- BREMAN H., 1975. - La capacité de charge maximale des pâturages maliens. Actes du Colloque de Bamako (Mali) : Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains, 3-8 mars, 1975, 249-256.
- BREMAN H., 1982. - La capacité de charge des pâturages sahéliens pour les systèmes d'élevage de la région. CABO, Wageningen, 73 p.

- BREMAN H., 1982. - Signification de la capacité de charge théorique pour la pratique de l'élevage in "La capacité de charge des pâturages sahéliens dans les systèmes d'élevage de la région" Breman Ed. CABO, 58-72.
- BREMAN H., CISSE A.M, DJITTEYE M.A., ELBERSE W.TH., 1980. - Pasture dynamics and forage availability in the sahel. Is-J. of Botany, 28, 227-251.
- BREMAN H., CISSE A.M., DJITTEYE M.A., ELBERSE W. Jh., 1982. - Le potentiel botanique des pâturages. in PENNING DE VRIES F.W.T., et DJITTEYE M.A., 1982, "La productivité des pâturages sahéliens", CABO, Wageningen, 98-133.
- BREMAN H., KRUL J.M., 1982. - La pluviosité et la production de fourrage sur les pâturages naturels. in PENNING DE VRIES F.W.T., et DJITTEYE M.A., Ed., 1982, "La productivité des pâturages sahéliens", CABO, Wageningen, 304-322.
- BRUNET-MORET Y., 1968. - Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cah. ORSTOM, hydrol, VI, 3, 89 p.
- CANODE C.L., HIEBERT A.J., ROUSSEL T.S., LAW A.G., 1977. - Sampling technique for estimation of root production of Kentucky blue grass. Crop Sci., 17, 28-30.
- CARBONNEL J.P., 1984. - Evolution climatique récente en Haute-Volta. Notes et Documents voltaïques. 15, 1-2, 14-24.
- CARBONNEL J.P., 1985. - Analysis of the recent climatic evolution in Burkina Faso (Upper Volta). Nat. Res. Forum., New-York, 9, (1), 53-64.
- CARBONNEL J.P., HUBERT P., 1985. - Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso. C.R. Acad. Sci., Paris, 301, sér. II, 13, 941-944.
- CARNEGGIE D.M., DEGLORIA S.D. & COLWELL R.N., 1975. - Usefulness of Landsat data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland. NASA Earth Resources Survey Symposium Proc., Houston, Texas, vol. 1 A, 19-42.
- CESAR J., 1971. - Etude quantitative de la strate herbacée de la savane de Lamto. (Moyenne Côte d'Ivoire). Thèse doct. 3ème cycle, Faculté des Sciences de Paris, 95 p. + ann.
- CESAR J., MENAUT J.C., 1974. - Analyse d'un écosystème tropical humide : la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). II. Le peuplement végétal. Bulletin de liaison des chercheurs de Lamto. n° spécial, fasc. II, 161 p.
- CHARNEY J.G., 1975. - Dynamics of deserts and drought in the sahel. Quat. J. Roy. Meteor. Soc., 101, 193-202.
- CHAUSSAT R., 1977. - Comparaison des poids et des propriétés germinatives des semences de l'épillet de blé (*Triticum aestivum* L.) à celles de l'épillet d'*Aegilops ovata* L., C.R. Acad. Sc. Paris, t. 284, 1983-1986.

- CHAUSSAT R., BOUINOT D., 1975. - Hétérogénéité de la germination des grains de l'épi de blé (*Triticum aestivum* L.) C.R. Acad. SC., Paris, t. 281, sér. D, 527-530.
- CHAUSSAT R., LE DEUNF Y., 1975. - La germination des semences, Gauthier-Villars, 232 p.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A., 1985. - Pluies et crues au Sahel : Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso 1976-1981) Tr. et Doc. ORSTOM, Paris, n° 190, 251 p.
- CHOPART J.L., NICOU R., 1976. - Influence du labour sur le développement racinaire des différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. L'Agron. Trop., 1, 7-28.
- CISSE A., 1986. - Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone Sud sahélienne. PPS, CABO, 211 p.
- CLAUDE J., 1986. - Comparaison physique et écologique des sécheresses. Rapport Commission 1, Colloque "Comparaison des sécheresses dans le Nordeste Brésilien et le Sahel Africain", IHEAL, CREDAL, ORSTOM, Paris, 16-18 janvier 1986, 20 p. multigr.
- COCHEME J., FRANQUIN P., 1967. - Etude agroclimatologique de l'Afrique sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale. Rapport technique F.A.O. Rome, 325 p.
- COCHRAN W.G., 1963. - Sampling techniques. John Wiley and Son, Inc. New-York, 413 p.
- COLE A.N.H., 1977. - Effect of light, temperature and flooding on seed germination of the neotropical *Panicum laxum* Sw. Biotropica, 9 (3), 191-194.
- COLWELL J.E., 1973. - Bidirectional spectral reflectance of grass canopies for determination of aboveground standing biomass. Ph. D. Thesis, University of Michigan, University Microfilm, 75-15, 693, 174 p.
- COMBES J., 1984. - Enquête sur l'élevage et sa place dans les systèmes de production de l'Oudalan. ORD Sahel FED-ORSTOM, Ouagadougou, 50 p. multigr. tann.
- COME D., 1970. - Les obstacles à la germination. Ed. Masson et Cie, Paris, 162 pages.
- CORNET A., 1981a. - 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, Oecol. Plant., 2, 16, n° 3, 251-266.
- CORNET A., 1981b. - Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse Doc. Ingénieur, Université des Sc. et Tech. du Languedoc, 353p.

- CORNET A., POUPON H., 1978. - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. Bull. IFAN, 39, A, 2, 241-302.
- COULIBALY A., 1979. - Approche phyto-écologique et phytosociologique de pâturages sahéliens au Mali (région du Gourma) Thèse doct. 3ème cycle, Université de Nice, 150 p + ann et carte h.t.
- COULOMB J. SERRES H., TACHER G., 1980. - L'élevage en pays sahéliens. PUF, coll. "Techniques vivantes", 192 p.
- COUPLAND R.T., 1979. - Conclusion. In : Grassland ecosystems of the world. R.T. COUPLAND (Ed.), 335-355, IBP, 18, Cambridge University Press.
- COUREL M.F., 1985. - L'adaptation de la végétation sahélienne à la sécheresse récente : la contraction des ligneux. Photo interprétation, 1, 2, 9-15.
- COUREL M.F., 1986. - Variations de l'albedode surface dans le sahel et sécheresse. in Colloque "Comparaison des sécheresses dans le Nordeste Brésilien et le Sahel Africain", IHEAL, CREDAL, ORSTOM, Paris, 16-18 janvier 1986, 4 p.
- DAGET Ph., GODRON M., 1982. - Analyse de l'écologie des espèces dans les communautés. Masson ed., Paris, 163 p.
- DAGET Ph., TRANCHEFORT J., 1974. - Une méthode globale d'analyse diachronique de populations complexes (application au peuplement végétal d'une prairie permanente). in "Colloque international sur l'utilisation de l'informatique dans les sciences de l'environnement", Arlon 20-22 mai 1974, 18 p.
- DAHLMAN R.C., KUCERA C.L., 1965. - Root productivity and turnover in native prairie. Ecology, 6, 84-89.
- DANCETTE C., 1976. - Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. Agron. Trop. 31, (4), 321-338.
- DATTA S.C., EVENARI M., GUTTERMAN Y., 1970. - The heteroblasty of *Aegilops ovata* L., Israël Journal of Botany, vol. 19, 463-483.
- DELFOUR J., JEAMBRUN M., 1970. - Note explicative de la carte géologique au 1/200.000. (Oudalan), BRGM - Paris, 63 p. + carte h.t.
- DESHMUKH I.K., 1984. - A common relationship between precipitation and grassland peak biomass for East and Southern Africa. Afr. J. Ecol., 22, 185-186.
- DEVINEAU J.L., 1975. - Etude quantitative des forêts galeries de Lamto (moyenne Côte d'Ivoire). Thèse 3è cycle, Botanique Tropicale, Université Paris VI, 190 p.

- DEWISPELAERE G., NOEL J., PAIN M., 1983. - Application des données de simulation Spot à l'étude de la végétation sahéenne du Férlo Sénégalais. Région de Gueye KADAR. in "Methodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéens. Application au développement." Actes du Colloque de Dakar, 16-18 Novembre 1983, VAN PRAET ed., 333-350.
- DEWISPELAERE G., TOUTAIN B., 1976a. - Un exemple de dégradation du couvert végétal sur une dune continentale fixée dans le sahel voltaïque entre 1955 et 1975. Photo Interprétation, 3, 2, 1-7.
- DEWISPELAERE G., TOUTAIN B., 1976b. - Estimation de l'évolution du couvert végétal en 20 ans consécutivement à la sécheresse dans le sahel voltaïque. Photo Interprétation, n° 3, 2, 8-18.
- DEWISPELAERE G., TOUTAIN B., 1981. - Etude diachronique de quelques géosystèmes sahéens en Haute-Volta septentrionale. Photo Interprétation, n° 1, 3, 1-7.
- DIARRA L., BREMAN H., 1975. - Influence de la pluviosité sur la production des pâturages. Actes du Colloque de Bamako (Mali). Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains, 3-8 mars 1975, 171-174.
- DOORENBOS J., KASSAM A.H., 1979. - Yield responses to water. Irrigation and drainage paper, n°33, FAO, Rome, 193 p.
- DORIZE L., 1986. - La position du front intertropical en Afrique Occidentale sahéenne et les causes probables de sa mobilité. Colloque : Comparaison des sécheresses dans le nord-est brésilien et le sahel africain, 16-18 Janvier 1986, Paris, 7 p.
- DOWNTON W.J.S., 1975. - The occurrence of C₄ photosynthetic among plants. A review. Photosynthetica 9, (1), 96-105.
- DUCHAUFOR Ph., 1962. - Ecologie et pédologie. L'utilisation de la végétation pour la cartographie des stations en forêts. B.T.I., 172, 727-734.
- DUNN O J., CLARK V.A., 1974. - Applied statistics : analysis of variance and regression. In : Analysis of covariance, John Wiley and Sons, p. 307-333.
- DUPRE G., GUILLAUD D., 1986. - Archéologie et tradition orale : Contribution à l'histoire des espaces du pays d'Aribinda Province de Soum, Burkina Faso. Cah. ORSTOM, Sci. Hum., 22, 1, 5-48.
- DUVIGNEAUD P., 1974. - La synthèse écologique. Doin, Paris, 296 p.

- EJUNGOBI J.K., 1973. - Studies on the primary productivity of a regularly burnt tropical savanna. *Ann. Univ. Abidjan, E*, 6, (2), 157-169.
- EJUNGOBI J.K., 1974. - Dry matter, nitrogen and mineral element distribution in an unburnt savanna during the year. *Oecol. Plant.*, vol. 9, n° 1, 1-10.
- ELLENBROEK G.A., WERGER M.J.A., 1986. - Canopy structure and production of four floodplain grassland communities at Kafue, Zambia. in : *Rangelands : a resource under siege*. P.J. POSS, P.W. LYNCH, O.B. WILLIAMS (Ed.), 42-43, Australian Academy of Science, Canberra.
- EMBERGER L., 1966. - Reflexions sur le spectre biologique de Raunkiaer. *Mém. Soc. Bot. Fr.*, 149-156.
- EVENARI M., 1957. - Les problèmes physiologiques de la germination. *Bull. Soc. Fr. Physiol. vég.*, 3, 105-124.
- EVENARI M., 1985. - Adaptations of plants and animals to the desert environment, 79-82, in "Hot deserts and arid shrublands, A." M. EVENARI, I. NOY-MEIR, D.W. GOODALL Ed., ELSEVIER Amsterdam, 365 p.
- EVENARI M., SCHULZE E.D., KAPPEN L., BUSCHBOM V., LANGE O.L., 1975. - Adaptative mechanisms in desert plants. In : *Physiological adaptation to the Environments*, ed. F.J. Vernberg : New-York : Intext Educ. Publishers. 111-129.
- FAURE H., GAC J.Y., 1981. - Will the sahelian drought end in 1985 ? *Nature*, 291, n° 5815, 475-478.
- FIALA K., 1979. - Estimation of annual increment of underground plant biomass in grassland community (Polygalo Nardetum). *Folia Geobot., Phytotax.*, 14, 1-10.
- FLORET Ch., 1981. - The effects of protection on steppic vegetation in the Mediterranean arid zone of southern Tunisia. *Vegetatio* 46, 117-129.
- FLORET Ch., PONTANIER R., 1974. - Etude de trois formations végétales naturelles du Sud Tunisien : production, bilan hydrique des sols. INRA, Tunis, 80 p.
- FLORET Ch., PONTANIER R., 1978. - Relation climat-sol-végétation dans quelques formations végétales spontanées du Sud Tunisien. Production végétale et bilan hydrique des sols. PNUD, Ministère Agriculture Tunisie, Doc. Technique n° 1, 96 p. + ann.
- FLORET Ch., PONTANIER R., 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. climat, sol, végétation et aménagement. *Tr. et Doc. de l'ORSTOM*, n°150, 544 p.
- FONTES J., 1983. - Essais cartographiques de la végétation par télédétection. Quelques exemples pris en Haute-Volta. Thèse 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 179 p + ann.

- FOURNIER A., 1982. - Cycle saisonnier de la biomasse herbacée dans les savanes de Ouango-Fitini. Ann. Univ. Abidjan, Série E, 25, 63-94.
- FOURNIER A., LAMOTTE M., 1983. - Estimation de la production primaire des milieux herbacés tropicaux. Ann. Univ. Abidjan, sér. E (Ecologie), XVI, 7-38.
- FRIEDEL M.H., 1977. - The determination of an optimum sampling technique for biomass of herbaceous vegetation in a Central Australian Woodland. Aust. J. Ecology, 2, 429-433.
- GALLE Ch., 1985. - Structure temporelle des pluies de mousson en zone soudano-sahélienne. DEA Sciences de l'eau, Université Paris VI, 42 p., + ann.
- GASTON A., 1976. - Travaux phytocéologiques en relation avec la lutte contre Quela Quelea. Bilan de quatre années. Rapport final., IEMVT, 203 p., 2 cartes h.t.
- GASTON A., 1983. - Le couvert herbacé au Ferlo sénégalais. in L. VAN PRAET éd., "Méthodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens. Application au développement, 201-208.
- GASTON A., BOTTE F., 1971. - Etude agrostologique de la réserve de Tin Arkachen (République de Haute-Volta). IEMVT, Rapp. multigr. 146 p+ 1 carte 1/100 000 h.t.
- GAUTREAU J., 1966. - Recherches variétales sur la résistance de l'arachide à la sécheresse, Oléagineux, vol 7, 441-444.
- GERWITZ A., PAGE E.R., 1974. - An empirical mathematical model to describe plant root systems. J. Appl. Ecol., 11, 2, 773-781.
- GILET H., 1961. - Pâturages sahéliens : Le Ranch de l'Ouadi Rimé. J. d'Agriculture tropicale et de Botanique appliquée 8, 10-11, 210 pages.
- GILET H., 1967. - Essai d'évaluation de la biomasse végétale en zone sahélienne. JATBA, 14, (4-5), 125-158.
- GODRON M., 1966. - Une application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et de la structure de la végétation. CEPE/CNRS, Doc. 24, 67 p.
- GODRON M., 1968. - Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale. Oecol. Plant., 3, 185 - 212.
- GODRON M., et al., 1983. - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Principes et transcription sur cartes perforées. CNRS, Montpellier, 292 p.
- GODRON M., POISSONET J., POISSONET P., 1967. - Méthode d'étude des formations herbacées denses. Essai d'application à l'étude du dynamisme de la végétation. CEPE Montpellier, doc n° 35, 28 p.

- GOUNOT M., 1969. - Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Masson et Cie éd., Paris. 314 p.
- GRANIER P., CABANIS Y., 1974. - Etude de la germination de quelques graminées de savane et de ses rapports avec leur répartition. Rev. Elev. Méd. Vét. Pays trop., 27,3, 363-369.
- GRANIER P., CABANIS Y., 1975. - Note sur la phénologie des graminées de savane. Rev. Elev. Méd. Vét. Pays trop., 28 (1), 79-82.
- GREGORY S., 1982. - Spatial patterns of sahelian annual rainfall, 1961-1980. Arch. Met. Geoph. Biokl., sér. B, 31, 273-286.
- GROUZIS M., 1976. - Transpiration, potentiel hydrique et résistance à la circulation de l'eau chez trois graminées fourragères tropicales, ORSTOM Dakar, 27 p., multigr., + ann.
- GROUZIS M., 1979. - Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche de formations végétales sahéliennes (Mare d'Oursi, Haute-Volta), Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Action complémentaire coordonnée DGRST-ORSTOM, 59 p. 15 tabl; 17 fig. h.t.
- GROUZIS M., 1980. - Sur le *Pennisetum violaceum* sensu lato en Afrique de l'Ouest : formes, écologie et distribution géographique. Bull. IFAN, sér., A 41, A2, 1-14.
- GROUZIS M., 1982. - Restauration des pâturages sahéliens. Mise en défens et reboisement. ORSTOM., Ouagadougou, 37 p.
- GROUZIS M., 1984a. - Pâturages sahéliens du Nord du Burkina Faso. Capacité de charge, production fréquentielle et dynamique de la qualité fourragère. ORSTOM, Ouagadougou, Rapp. multigr., 35 p.
- GROUZIS M., 1984b. - Problèmes de désertification en Haute-Volta. Notes et documents voltaïques, 15, (1-2), 1-13.
- GROUZIS M., 1986. - Dynamique et tendances évolutives des phytocénoses sahéliennes du Burkina Faso. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens. Dakar (3-8 novembre 1986), 15 p.
- GROUZIS M., 1986. - Régénération des systèmes écologiques sahéliens. Travail du sol et reboisement. Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des systèmes pastoraux sahéliens. Dakar (3-8 novembre 1986), 10 p.
- GROUZIS M., NGARSARI M., 1981. - Herbar du Centre ORSTOM : liste des espèces. Rapp, multigr., ORSTOM Ouagadougou, 25 p. + ann.
- GROUZIS M., METHY M., 1983. - Détermination radiométrique de la phytomasse herbacée en milieu sahélien. Perspectives et limites. Acta Oecologica, Oecol. Plant., Vol. 4, (18), n°3, 241 - 257.

- GROUZIS M., PARIS F., PERSON A., SALIEGE J.F., 1985. - Prospection archéologique dans la région de la Mare d'Oursi (Province de l'Oudalan). ORSTOM Ouagadougou, Rapp. multigr. 7 p.
- GROUZIS M., LEGRAND E., PALE F., 1986. - Germination des semences des régions semi-arides du sahel. Actes du Colloque "Les végétaux en milieu aride" : TUNISIE (JERBA), 8-10 septembre 1986.
- GROUZIS M., ALBERGEL J., 1987. - Du risque climatique à la contrainte écologique : incidence de la sécheresse sur les productions végétales et le milieu au Burkina Faso. in ORSTOM Ed., "Le risque en agriculture", Tr. et Doc., ORSTOM (à paraître).
- GRUBB P.J., 1977. - The maintenance of species-richness in plant communities : the importance of the regeneration niche. Biol. Rev. 52, 107-145.
- GUILLAUMET J.-L., KOECHLIN J., 1971. - Contribution à la définition des types de végétation dans les régions tropicales (exemple de Madagascar). Candollea, 26 (2), 263-277.
- GUINKO S., 1984. - Végétation de la Haute-Volta. Thèse Doctorat es Sciences, Université de Bordeaux III, tome 1 et 2, 394 p.
- HARE F.K., 1983. - Climate and desertification. A revised analysis. World Meteorological Organisation, WCP, 44, 149 p.
- HARLAN J.R., DEWET J.M.W., PRINCE E.G., 1973. - Comparative evolution of cereals. Evolution, 27, 311-325.
- HARPER J.L., LOVELL P.H., MOORE K.G., 1970. - The shapes and sizes of seeds. Ann. Rev. Ecology and Systematics., 1, 327-356.
- HARTY R.L., 1972. - Germination requirements and dormancy effects in seeds of *Urochloa mosambicensis*. Trop. Grassl., 6, 17-24.
- HEIM G., 1974. - L'utilité du concept de valeur énergétique en écologie : une étude basée sur des mesures effectuées sur des plantes méditerranéennes. Oecol. Plant., 9, (3), 281-286.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. - Le profil cultural. Masson et Cie ed., Paris, 320 p.
- HIERNAUX P., 1982. - Méthode d'évaluation du potentiel fourrager des parcours sahéliens proposés par les chercheurs du CIPEA. in "La capacité de charge des pâturages sahéliens pour les systèmes d'élevage de la région", BREMAN Ed., CABO, Wageningen, 49-52.
- HIERNAUX P., 1984. - Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Premiers résultats acquis dans le sahel malien. CIPEA, Bamako, rapp. multigr., 46 p.

- HIEZ G., 1977. - L'homogénéité des données pluviométriques. Cah. ORSTOM, sér., Hydrol., Vol. XIV, n°2.
- HUBERT D., 1978. - Evaluation du rôle de la végétation des parcours dans le bilan écologique et agro-économique des causses. Thèse Doc. Ing., USTL, Montpellier, 247 p.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., 1987. - Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. (soumis pour publication J. of Hydrology) 11 p. 2 tab., 10 fig.
- IMAN M., 1979. - Seed germination and seedling emergence in systems analysis of Mediterranean desert ecosystems of northern Egypt. Sandene. Progress Report, n°5, 8 p.
- IMBAMBA S.K., PAPA G., 1979. - Distribution of the Kranz type anatomy of some dicotyledonous species families of Kenya. *Photosynthetica* 13, (3), 315-322.
- JACKSON L.E., ROY J., 1986. - Annual and perennial mediterranean grasses. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.*, vol. 7 (21), 2, 191-212.
- JAIN M.G., 1967. - Studies in the techniques of field trials in range lands. 1. Size, shape and arrangement of plots. *Ann. Arid Zone*, 6, 129-137.
- JENSEN A., 1980. - Seasonal changes in near infrared reflectance ratio and standing crop biomass in a salt marsh community dominated by *Halimione portulacoides* (L.) Aellen. *New Phytol.*, 86, 57-67.
- JOFFRE R., LEIVA MORALES M.J., RAMBAL S., FERNANDEZ ALES R., 1987. - Dynamique racinaire et extraction de l'eau du sol par des graminées perennes et annuelles méditerranéennes. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.*, vol. 8 (22), 2, 181-194.
- JOHNSON G.R., 1976. - Remote estimation of herbaceous biomass. M.S. thesis, Colorado State University, St. Collins, 120 p.
- JOLIVET E., 1978. - Les carboxylations photosynthétiques in COSTES C. Ed., *Photosynthèse et production végétale*, Gauthiers Villars, Paris, 88-126.
- JOLY F., DEWOLF Y., RIOU G., 1980. - Le bassin de la Mare d'Oursi. Etude géomorphologique et géodynamique. Contraintes naturelles. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-Université Paris VII, 65 p. + ann. et cartes h.t.
- JORDAN C.F., 1969. - Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.
- KAHLEM G., 1981. - La végétation de la forêt de Bandia. Evolution des populations végétales et de la production de graines pendant les années 1978-1979-1980. *Bulletin IFAN*, T. 43, sér. A, n°3-4, 232-252.

- KATZ R.W., GLANTZ M.H., 1986. - Anatomy of rainfall index. Monthly Weather Review, 114, 764-771.
- KIMES D.S., MARKHAM B.L., TUCKER C.J., MC MURTREY J.E., 1981. - Temporal relationships between spectral response and agronomic values of a corn canopy. Remote sensing of environment, vol. 11, 401-411.
- KLEIN H.D., KEITA I., MESNIL J.G., 1981. - Trois années d'activités agropastorales en République du Niger. Production et valorisation des pâturages sahéliens (Ranch d'EFRAFANE) et des fourrages irrigués (station de KIRKISSOYE). IEMVT, Maisons Alfort, Agro, 81-5, 290 p.
- KOECHLIN J., 1986. - Adaptation des systèmes agropastoraux aux milieux du NIGER et dans la PARAIBA. Colloque Nordeste-Sahel, 16-18 Janvier, Institut Hautes Etudes Amérique Latine, Paris, 9 p.
- KOECKLIN J., MENAUT J.C., 1981. - Phénologie et production primaire. in "Ecosystèmes pâturés tropicaux" UNESCO Ed., 119-145.
- KOUDA M., 1981. - Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute-Volta) par télédétection multispectrale. thèse doc. Ing., Université Paul Sabatier, Toulouse, 143 p.
- KREUTZER K., 1968. - The root system of the red alder (*Alnus glutinosa* Gärtn.) In "Methods of productivity studies in root systems and rhizosphere organisms. Int Symposium USSR, Academy of Sciences, Leningrad : Nauka", 114-119.
- KUMAR M. & MONTEITH J.L., 1981. - Remote sensing of crop growth. In : H. Smith (Ed.), Plants and the daylight spectrum. Proceedings of the First International Symposium of the British Photobiology Society, Academic Press, p. 133-144.
- LACOSTE A., ROUX M., 1971. - L'analyse multidimensionnelle en phytosociologie et en écologie. Application à des données de l'étage subalpin des Alpes Maritimes. I. L'analyse des données floristiques. Oecol. Plant., 6, 353-369.
- LAGERWEFF J.V., OGATA G., EAGLE H.E., 1961. - Control of osmotic pressure of culture solutions with Polyethylene glycol, Sci., 133 : 1486-1487.
- LAMB P.J., 1982. - Persistence of subsaharan drought, Nature, 299, 46-48.
- LANGLOIS M., 1983. - Les sociétés agro-pastorales de la région de la Mare d'Oursi, ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan DGRST-ORSTOM, Ouagadougou, 101 p. multigr. + notes, graph. et ann. h.t.
- LARCHER W., 1975. - Physiological Plant Ecology. Springer-Verlag, Berlin, 252 p.

- LAUENROTH W.K., 1979. - Grassland primary production : North american grasslands in perspective, in : Perspectives in Grassland Ecology, FRENCH N.R., Ed., Springer - Verlag, 204 p.
- LAUENROTH W.K., WHITMAN W.C., 1977. - Dynamics of dry matter production in a mixed grass prairie in Western North Dakota. *Oecologia*, 27, 339-351.
- LEBRUN J., 1966. - Les formes biologiques dans les végétations tropicales. *Mem. Soc. Bot. Fr.*, 164-175.
- LEE A.F.S., HEGHINIAN S.M., 1977. - A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables. A bayesian approach. *Technometrics*. Vol. 19, n° 4, 503-506.
- LEGRAND E., 1979. - Etude expérimentale des propriétés germinatives de quelques plantes sahéliennes. (Mare d'Oursi - Haute-Volta) ORSTOM, Ouagadougou, 39 p.
- LEGRAND Ph., 1979. - Biomasse racinaire de la strate herbacée de formations sahéliennes (Etude préliminaire). ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. DGRST-ORSTOM, Ouagadougou, rapp. multigr. 28 p.
- LE HOUEROU H.N., 1979. - Ecologie et désertification en Afrique. Tr. de l'Institut de Géographie de Reims, 39-40, 5-26.
- LE HOUEROU H.N., 1984. - Rain use efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 213-247.
- LE HOUEROU H.N., BINGHAM R.L., SKERBEK W., 1984. - Towards a probabilistic approach to rangeland development planing. Second International Rangeland Congress, Adelaïde, Australia, 13-18 May 1984, 34 p.
- LE HOUEROU H.N., CLAUDIN J., HAYWOOD M., 1974. - Etude phytoécologique du Hodna. 2 cartes couleurs. 1/200.000, FAO (Rome), 154 p.
- LE HOUEROU H.N., HOSTE C.H., 1977. - Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean Basin and in African Sahelo-sudanian zone. *Journal of Range Management*, 30, (3), 181-189.
- LE HOUEROU H.N., GRENOT C.J., 1987. - The grasslands of the sahel. in *Ecosystems of the world*, vol. n°8, R.T. COUPLAND, ed. (à paraître).
- LE HOUEROU H.N., POPOV G.F., 1981. - Au eco-climatic classification of intertropical africa. FAO, Plant production and protection paper, n°31, 40 p. + ann.
- LE MASSON A., 1980. - Situation de l'élevage bovin dans la sous-préfecture de l'Oudalan (Gorom-Gorom). Rapport d'activités 1977-1979. CIDR, n° 228, 177 p. multigr.
- LEPAGE M., 1972. - Données préliminaires sur l'écologie des termites. *Terre et vie*, 26, 383-409.

- LEPRUN J.C., 1977. - Esquisse pédologique au 1/50. 000 des alentours de la Mare d'Oursi avec notice et analyse des sols. Acc Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM, 53 p + carte h.t.
- LEVANG P., 1978. - Biomasse herbacée de formations sahéliennes : étude méthodologique et application au bassin versant de la Mare d'Oursi. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Action complémentaire coordonnée DGRST-ORSTOM, 34 p., figures, tableaux et carte h.t.
- LEVANG P., GROUZIS M., 1980. - Méthode d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes : application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta. Acta Oecologica, Oecol. Plant., Vol. 1, 15, n°3, 231-244.
- LHOSTE P., 1977. - Etude zootechnique, inventaire du cheptel. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-IEMVT, 49 p. multigr.
- LIETH H., 1968. - The determination of plant dry-matter production with special emphasis on the underground part. In "Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire". Actes du Colloque de Copenhague, UNESCO, 179-186.
- LOETSCH F., HALLER E., HENNING N., 1967. - Beitrag zur mathematischen Formulierung abnehmender stammzahlverteilung. 14ème Congrès IUFRO, Munich, Sect. 25, 168-181.
- LOMNICKI A., BANDOLA E., JANKOWSKA K., 1968. - Modification of the Wiegert-Evans Method for estimation of net primary production. Ecology, 49, (1), 147-149.
- LONG G., 1974. - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. I. Principes généraux et méthodes. Masson et Cie, Paris, 252 p.
- Mc KEON G.M., 1985. - Pasture seed dynamics in a dry monsoonal climate. II. The effect of water availability, light and temperature on germination speed and seedling survival of *Stylosanthes humilis* and *Digitaria ciliaris*. Aust. J. Ecol., 10, 149-163.
- Mc KEON G.M., ROOSE C.W., KALMA J.D., TORSELL B.W.R., 1985. - Pasture seed dynamics in a dry monsoonal environment. I. Germination and seedbed environment of *Stylosanthes humilis* and *Digitaria ciliaris*. Aust. J., Ecol. 10, 135-147.
- MAC NAUGHTON S.J., 1968. - Structure and function in California grasslands. Ecology, 49, 962-972.
- Mc WILLIAMS J.R., PHILIPPS P.J., 1971. - Effect of osmotic and matrix potentials on the availability of water for seed germination. Aust. J. Biol. Sci., 24, 423-431.
- MALEY J., 1986. - Modifications des environnements climatiques d'un domaine de mousson (Afrique de l'Ouest) au cours des 30 derniers millénaires. in "Climat et Développement", ORSTOM Ed., Paris, Coll. Colloques et séminaires, 195 p., 21-29.

- MALONE C. R., 1968. - Determination of peak standing crop biomass of herbaceous shoots by the harvest method. Amer. Midland Natur., 79, 429-435.
- MANGENOT G., 1969. - Réflexion sur les types biologiques des plantes vasculaires. Candollea 24, (2), 279-294.
- MANIL G., 1963. - Niveaux d'écosystèmes et hiérarchie des facteurs écologiques. Un exemple d'analyse dans les hêtraies ardennaises de Belgique. Bull. Chasse des Sc. Académie Royale de Belgique, 49, 6, 32 : 603-623.
- MANOHAR M.S., 1966. - Effet of osmotic systems on germination of peas (*Pisum sativum* L.), Planta, 71, 81-86.
- MANOHAR M.S., BHAN S., PRASAD R., 1968. - Germination in lower osmotic potentials as an index of drought resistance in crop plants : a review. Ann. Arid zone, 7, 82-92.
- MARCHAL J.Y., 1978. - Vestiges d'occupation ancienne au Yatenga (Haute-Volta). Une reconnaissance du pays Kibga. Cah. ORSTOM., sér., Sci. Hum., vol XV, 4, 449-484.
- MARIAUX A., 1975. - Essai de dendrochronologie en climat sahélien sur *Acacia raddiana*. Bois et Forêts des Tropiques, 163, 27-35.
- MAURYA A.N., AMBASHT R.S., 1972. - Significance of seed dimorphism in *Alysicarpus monolifer* D.C., J. Ecol., 61, 213-217.
- MENAUT J.C., 1977. - Analyse quantitative des ligneux dans une savane arbustive préforestière de Côte d'Ivoire. Geo-Eco-Trop., 1,2, 77-94.
- MENAUT J.C., CESAR J., 1979. - Structure and productivity of Lamto savannas, Ivory Coast. Ecology, 60, (6), 1197-1210.
- METHY M., 1977. - Estimation quantitative de la biomasse aérienne d'un peuplement de graminées par une méthode optique non destructive. Oecol. Plant., 12, 395-401.
- MICHEL P., 1984. - Les variations du climat au quaternaire récent dans le Sahel d'Afrique occidentale et leurs conséquences sur les formations superficielles, l'hydrographie et la pédogénèse. Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie, 18, (3-4), 125-146.
- MIEGE J., TCHOUME M., 1963. - Influence d'arrosages régulièrement répétés sur la germination des graines en saison sèche à Dakar (Sénégal). Annales Facultés Sciences Dakar, t. 9, 81-109.
- MILLEVILLE P., 1980. - Etude d'un système agro-pastoral sahélien de Haute-Volta. 1ère partie : le système de culture. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM. 64 p. multigr. + ann.

- MILLEVILLE P., COMBES J., MARCHAL J., 1982. - Systèmes d'élevage sahéliens de l'Oudalan. Etude de cas. ORSTOM, Ouagadougou, 127 p. multigr. + ann.
- MILLEVILLE P., 1985. - Sécheresse et évolution des systèmes agraires sahéliens. Le cas de l'Oudalan (nord du Burkina Faso) Les cahiers de la Recherche-Développement, 6, 11-13.
- MONOD Th., 1974. - Spectre de modes de dissémination dans l'Adrar Mauritanien (Sahara occidental). Candollea, 89, 401-425.
- MONOD Th., 1974. - Fruits et graines de Mauritanie, Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 3è sér., n°273, Ecologie générale 23, 29-115.
- MONOD Th., 1977. - Fruits et graines de Mauritanie Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 3è. série., n°461, Botanique 32, 73-127.
- MONOD Th., 1979. - Fruits et graines de Mauritanie Bull. Mus. natn. Hist. nat., Paris, 4è sér., n°1, Botanique 1, 3-51.
- MONTANI T., FERNANDEZ O.A., 1986. - A study of the productivity, death and decomposition of the root system in weeping love grass (*Eragrostis curvula* (Schrud) Nees). in : Rangelands : a resource under siege. P.J. POSS, P.W. LYNCH, O.B. WILLIAMS (Ed.), 468-469, Australian Academy of Science, Canberra.
- MONTENY B.A., ZELLER B., 1986. - Interactions végétation atmosphère et leurs impacts sur les caractéristiques climatiques. in "Climat et Développement" ORSTOM Ed., Paris, Coll. Colloques et Séminaires, 195 p., 157-166.
- MOTT J.J., 1974. - Factors affecting seed germination in three annual species from an arid region of western Australia. J. Ecol., 699-709.
- NICHOLSON S.E., 1981. - Rainfall and atmospheric circulation during drought and wetter periods in west Africa. Monthly Weather Review, 109, 2191-2208.
- NICHOLSON S.E., 1982. - A note on sub-saharan rainfall in the years 1976-1980. Worcester, Mass. Clark University, 17 p.
- NDIAYE P., 1986. - Méthode d'observation des diaspores et inventaire des germinations d'herbacées annuelles ; résultats d'études réalisées à Sangalkam (Sénégal). Séminaire régional sur la dynamique et l'évolution des écosystèmes pastoraux sahéliens. Dakar (3-8 novembre 1986), 18 p.
- NOBLE I.R., 1977. - Long term biomass dynamics in an arid chenopod shrub community at Koonamore South Australian. Aust. J. Bot., 25, 639-653.
- NONGONIERMA A., 1978. - Contribution à l'étude biosystématique du genre *Acacia* Miller (Mimosaceae) en Afrique Occidentale. Thèse doctorat Etat, Univ. de Dakar, 307-325.

- NOY-MEIR I., 1979/80. - Structure and function of desert ecosystems. Israel Journal of Botany, 28, 1-19.
- N'TIO N., 1981. - Disponibilités fourragères, charge en bétail, et modes de conduite des troupeaux dans un périmètre sahélien : le bassin versant de la Mare d'Oursi (Haute-Volta). ORSTOM, Ouagadougou, 27 p. + ann.
- OGDEN J., 1968. - Studies an reproductive strategy with particular reference to selected composites. Ph. D. Thesis. Univ. Wales.
- OLIVIERI I., BERGER A., 1985. - Seed dimorphism for dispersal : physiological, genetic and demographical aspects, 413-429. in "Genetic differentiation and dispersal in plants", P. JACQUARD, G. HEIM, J. ANTONOVICS Ed., NATO ASI Series, vol G5, Springer-Verlag, Berlin, 453 p.
- OLIVRY J.C., 1983. - Le point en 1982 sur la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cah. ORSTOM, sér. hydrol., XX, 1, 47-69.
- ORDIN K., APPLE WHITE I.H., BONNER J., 1956. - Auxin induced water uptake by *Avena* coleoptile sections. Plant Physiol., 31, 44-53.
- OVALLE C., 1986. - Etude du système écologique sylvo-pastoral à *Acacia caven* (Mol.) Hook. et Arn. Applications à la gestion des ressources renouvelables dans l'aire climatique méditerranéenne humide et sub-humide du Chili. CNRS, Montpellier, 224 p.
- PALE F., 1982. - Etude expérimentale de la germination des semences sahéliennes. Influence du potentiel hydrique. DEA, Université P. et M. Curie, 33 p.
- PALLIER, G., 1981. - Géographie générale de la Haute Volta. 2e éd., UER Lettres et Sc. humaines, Université Limoges, CNRS, 241 p.
- PANEBIANCO R., WILLEMSSEN R.W., 1976. - Seed germination of *Hieracium pratense*, a successional perennial. Bot. Gaz. 137, 3, 255-261.
- PAPADAKIS J., 1966. - Climates of the world and their agricultural potentialities. Bueno Aires, 170 p.
- PARMAR M.T., MOORE R.P., 1968. - Carbonax 6000, mannitol and sodium chloride for simulating drought conditions in germination of *Medicago tribuloides*. DSP. Aust. J. Agr. Res. 14, 646-653.
- PEARSON R.L., MILLER L.D. & TUCKER C.J., 1976. - Hand-held spectral radiometer to estimate gramineous biomass. Applied optics, 15, 416-418.

- PENNING DE VRIES F.W.T., DJITTEYE, M.A., 1982. - La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 525 p.
- PERETTI M., 1976. - Projet de mise en place de l'ORD du Sahel. Situation actuelle de l'ORD. Ministère de Développement Rural, Ouagadougou, 2 tomes.
- PICARD D., 1969. - Comparaison de deux techniques de prélèvements d'échantillons de racines. Cah. ORSTOM, sér., Biol., 9, 19-31.
- PIOT J., NEBOUT J.P., NANOT R., TOUTAIN B., 1980. - Utilisation des ligneux sahéliens pour les herbivores domestiques. CTFT-IEMVT, rapport multigr.
- PODLEJSKI V., 1982. - Phenology and seasonal aboveground biomass in two *Scirpus maritimus* marshes in the Camargue. Folia Geobot. Phytotax., 17, 225-236.
- POISSONET J., 1968. - Recherches sur les lois générales d'équilibre dans la composition floristique des formations herbacées denses. CEPE Montpellier, 18 p., multigr.
- POISSONET J., CESAR J., 1972. - Structure spécifique de la strate herbacée dans la savane à palmier ronier de Lamto (Côte d'Ivoire) Ann. Univ. Abidjan, sér., E, 5, 577-601.
- POISSONET P., POISSONET J., 1969. - Essai de comparaison de méthodes d'analyses phytosociologiques et agronomiques des formations herbacées denses permanentes. CEPE, Montpellier, doc. n°50, 120 p.
- POUPON H., 1980. - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. Thèse Doctorat, Université Paris Sud, 317 p. + ann.
- POUPON H., BILLE J.C., 1974. - Influence de la sécheresse de l'année 1972-1973 sur la strate ligneuse à Fété-Ole. La Terre et la Vie, 28, 1, 49-75.
- PRATT D.J., GWYNNE M.D. Eds., 1977. - Rangeland management and Ecology in East Africa. London, Hodder and Stoughton, 310 p.
- QUEIROZ O., 1975. - Voies de fixation du CO₂ externe et leur signification adaptative et physiologique. In photosynthèse et production de matières organiques, Table Ronde CNRS, Gif-sur-Yvette, 1-7.
- QUILFEN J.P., MILLEVILLE P., 1983. - Résidus de culture et fumure animale : un aspect des relations agriculture-élevage dans le Nord de la Haute-Volta. Agron. Trop., 38, 3, 206-212.
- RAUNKIAER C., 1905. - Types biologiques pour la géographie botanique. Bull. Acad. R. Sc., Danemark, 5, 347-437.

- REICHELT R., 1977. - Sur les aménagements hydrauliques anciens et récents dans le Gourma, Sahel Tropical, République du Mali. Sci. Géol., Bull., 30, 1, 19-31.
- RENARD C., CAPELLE P., 1976. - Seed germination in Ruzizi Grass (*Brachiaria ruziziensis* Germain et Evrard). Austr. Journ. Bot., 24, 437-446.
- RIOU C., 1975. - La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. Mém. ORSTOM, Paris, n°80, 236 p.
- RIOU C., 1980. - Aspects climatiques de la sécheresse de part et d'autre du Sahara (de l'Afrique centrale sèche à la Tunisie) Cah. ORSTOM, sér. biol., n°42, 43-51.
- RODIER J., 1975. - L'hydrologie des régions sahéliennes et la sécheresse 1968-1973. Etudes Scientifiques, 49 p.
- RODIER J.A., 1975. - Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, 121 p.
- ROLLET B., 1979. - Application de diverses méthodes d'analyse de données à des inventaires forestiers détaillés levés en forêt tropicale. Oecol. Plant., 14, 3, 319-344.
- ROMANE F., 1972. - Un exemple d'utilisation de l'analyse factorielle des correspondances en écologie végétale. in "GRUNDFRAGEN UND METHODEN IN DER PFLANZENSOZIOLOGIE, VANDER MAAREL TUXEN Eds", VERLAG Dr. W. JUNK N.V., DEN HANG, 151-167.
- ROOSE E., 1977. - Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Tr. et Doc., ORSTOM., Paris, n° 78, 108 p.
- ROST T.L., 1975. - The morphology of germination in *Setaria lutescens* (Gramineae) : The effects of covering structures and chemical inhibitors on dormant and non-dormant florets. Ann. Bot., 39, 159, 21-29.
- ROUSSEL D., 1978. - Recherche sur l'hétérogénéité de la germination des semences du petit mil (*Pennisetum americanum* (L.) K. Schum). DEA de Physiologie Végétale. Université Pierre et Marie Curie, 56 p.
- ROUX G., ROUX M., 1967. - A propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie. Revue de statistiques appliquées 15, (2), 59-72.
- SAINT CLAIR P.M., 1976. - Germination of *Sorghum bicolor* under polyethylene glycol - induced stress. Can J., Plant. Sc., 56, 21-24.
- SAINT CLAIR P.M., 1980. - La germination du mil exposé à la contrainte hydrique développée par le polyéthylène glycol. Comparaison avec le Sorgho grain - Agro. Trop. XXXV, 2, 178-182.

- SAN JOSE J.J., MEDINA E., 1976. - Organic matter production in the Trachypogon savana at Calaboro, Venezuela, Trop. Ecol., 17 (2), 113-124.
- SAN JOSE J.J., BERRADE F., RAMIREZ J., 1982. - Seasonal changes of growth, mortality and disappearance of belowground root biomass in the Trachypogon savanna grass. Acta Oecologica, Oecol. Plant., vol. 3 (17), 4, 347-358.
- SANTOS A. DOS., 1981. - Etude phyto-écologique sur la végétation du Sahel de la Haute-Volta (Bassin versant de la Mare d'Oursi). Thèse 3ème cycle, Ecologie Générale et Appliquée, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 370 p. + ann.
- SCHOLTES P., RENARD Ch., 1983. - Etude de la germination chez *Setaria splendida*. Stapf., Bull. Soc. Roy. Bot. Belg., 116, 3-10.
- SCHURMAN J.J., GOEDEWAGEN, M.A.J., 1971. - Methods for the examination of root systems and roots. Centre for Agric. Publ. Doc., Wageningen, 86 p.
- SCHWARTZ D., 1969. - Méthodes statistiques à l'usage des médecins et biologistes. 3e édition. Flammarion. Médecine. Sciences.
- SHARMA M.L., 1973. - Simulation of drought and its effect on germination of five pasture species. Agronomy Journal, 65, 982 - 987.
- SHAYBANI B., ROUHANI I., 1976. - Effect of pre-sowing treatments and temperatures on seed germination of *Acacia cyanophylla* Lindl. Hort. Science, 11, 4, 381-383.
- SICOT M., 1976. - Evaluation de la production fourragère herbacée. ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM Ouagadougou, 45 p., multigr., + ann.
- SICOT M., 1978. - Cycle de l'eau et bilan hydrique dans les écosystèmes type du bassin versant de la Mare d'Oursi. Analyse préliminaire des données recueillies en 1977 : critiques des principes de base du bilan hydrique en milieu sahélien. ACC lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM, Ouagadougou, 76 p. multigr., + ann.
- SICOT M., 1982. - Cycle de l'eau et bilan hydrique annuel des sols. Rapport de synthèse à l'échelle du bassin ORSTOM, Ouagadougou, Rapp. multigr., 22 p. + ann h.t.
- SICOT M., 1983. - Variabilité de la teneur en eau et de la réserve hydrique du sol en milieu sahélien. I. Dispersion spatiale et rationalisation du réseau de mesure. Bull. G.F.H.N., 4, 73-94.
- SICOT M., GROUZIS M., 1981. - Pluviométrie et production des pâturages naturels sahéliens. Etude méthodologique et application à l'estimation de la production fréquentielle du bassin versant de la Mare d'Oursi. Haute-Volta. rapport multigr., ORSTOM, Ouagadougou, 33 p.

- SINGH J.S., LAUENROTH W.K., STEINHORST R.K., 1975. - Review and assesement of various techniques for estimating net aeriell primary production in grasslands from harvest data. *The Botanical Review*, 41, 2, 181-232.
- SINGH J.S., MISRA R., 1968. - Efficiency of energy capture by grasslang vegetation at Varanasi. *Current Science*, 37, (22), 636-637.
- SINGH J.S., YADAVA P.S., 1974. - Seasonal variation in composition, plant biomass and net primary productivity of a tropical grassland at Kurukshetra, India. *Ecological Monographs*, 44, 351-376.
- SIRCOULON J., 1976. - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, série Hydrologie*, XIII, (2), 75-174.
- SIRCOULON J., 1984. - Quinze années de sécheresse au Sahel. Impact sur les ressources et moyens de lutte. in *Proceedings of the 5th International Conference on water resources and management "water in the year 2000"*, Athènes, 1-4 octobre 1984, 3-15.
- SMITH R.L., 1979. - Seed dormancy in *Panicum maximum* Jacq., *Trop. Agric.*, 56, 3, 233-239.
- SNIJDERS T.A.B., 1986. - Interstation correlation and non stationarity of Burkina Faso rainfall. *Journal of Climate and applied meteorology*, 25, 524-531.
- SODTER F., 1980. - Enquête démographique sur la zone de la Mare d'Oursi ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, DGRST-ORSTOM, Ouagadougou, 53p. multigr. + 3 annexes.
- SORIANO A., SALA O., 1983. - Ecological strategies in a Patagonian arid steppe. *Vegetatio* 56, 9-15.
- STRUGNELL R.G., PIGOTT C.D., 1978. - Biomass, shoot production and grazing of two grasslands in the Rwenzori National Park, Uganda. *Journal of Ecology*, 66, 73-96.
- TELAHIGUE T., FLORET Ch., LE FLOC'H E., 1987. - Succession post-culturale en zone aride de Tunisie. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.*, 8, (22), 1, 45-58.
- TERRIBLE M., 1978. - Végétation de la Haute-Volta au millionième. Carte et notice provisoire, 40 p.
- THALEN D.C.P., LEEABURG J.A. & BECK R., 1980. - Estimating aerial biomass in semi-natural vegetation from spectral reflectance measurements. 1. Preliminary experiences. *Acta Bot. Neerl.*, 29, 565-578.
- THIMANN K.V., LOOS, G.M., SAMUEL, E.W., 1960. - Penetration of mannitol into potato discs. *Plant Physiol.*, 35, 848-853.
- THORNTHWAITE C.W., 1948. - An approach toward a rational classification of climate. *The geographical review*, 38, 1, 55-94.

- TOTHILL J.C., 1977. - Seed germination studies with *Heteropogon contorta*. Australian journal of Ecology, 2, 477-484.
- TOUPET C., 1986. - Comparaison des sécheresses historiques et de la sécheresse actuelle au Sahel : essai de définition de la sécheresse et de l'aridification. Colloque Nordeste-Sahel. IHEAL-CREDAL-ORSTOM, 16-18 janvier. Paris, 10 p.
- TOUTAIN B., 1976. - Notice de la carte des ressources fourragères au 1/50.000. ACC. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. IEMVT, Maisons-Alfort, 61 p.
- TOUTAIN B., 1977. - Pâturages de l'ORD du Sahel et de la zone de délestage du Nord-Est de FADA N'GOURMA (Haute-Volta). Tome II : Les plantes, écologie, noms vernaculaires, intérêt fourrager. IEMVT, Maisons-Alfort, Rapp. multigr. 119 p + ann.
- TOUTAIN B., 1977. - Essais de régénération mécanique de quelques parcours sahéliens dégradés. Rev. Elev. Méd., Vét., Pays trop., 30, (2), 191-198.
- TOUTAIN B., 1978. - Etude des effets de la mise en repos temporaire de quelques formations végétales sahéliennes dégradées sur leur évolution, DGRST-IEMVT, 67 p. multigr.
- TOUTAIN B., DEWISPELAERE G., 1978. - Etude et cartographie des pâturages de l'ORD du Sahel et de la zone de delestage au Nord-Est de Fada N'Gourma (Haute-Volta). IEMVT, Maisons-Alfort, n° 51, 3 tomes.
- TOUTAIN B., LHOSTE Ph., 1978. - Essai d'estimation du coefficient d'utilisation de la biomasse herbacée par le bétail dans un périmètre sahélien. Rev. Elev. Med. Vét. Pays trop., 30 (1), 95-101.
- TOUTAIN B., PIOT J., 1980. - Mises en défens et possibilités de régénération des ressources fourragères sahéliennes. Etude expérimentale dans le bassin de la Mare d'Oursi (Haute-Volta), IEMVT-CTFT, Maisons-Alfort, 156 p.
- TOUTAIN B., BORTOLI L., DULIEU D., FORGIARNI G., MENAUT J.C., PIOT J., 1983.- Espèces ligneuses et herbacées dans les écosystèmes pâturés sahéliens de Haute-Volta. ACC GRIZA (LAT), GERDAT, 124 p.
- TRIVEDI B.K., MISHRA G.P., 1979. - Seasonal variations in species composition, plant biomass and net community productivity of two grasslands in sehima-Dichanthium cover type. Trop. Ecol., 20, 1, 114-125.
- TROCHAIN J.L., 1957. - Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. Bull. I.E.C., nouv. sér., Brazzaville, 13-14, 55-93.
- TUCKER C.J., VAN PRAET C.L., BOERWINKELE E., GASTON A., 1983. Satellite remote sensing of total dry-matter production in the senegalense Sahel. Remote sensing of Environment, vol. 13, 416-474.

- VAN DYNE G.M., VOGEL W.G. & FISSER H.G., 1963. - Influence of small plot size and shape on range herbage production estimates. *Ecology*, 44, 746-759.
- VAN KEULEN 1975. - Simulation of water use and herbage growth in arid regions. CABO, Wageningen, 176 p.
- VAN PRAET L., 1983. - Méthodes d'inventaire et de surveillance continue des écosystèmes pastoraux sahéliens. Application au développement. Actes du Colloque de Dakar - 16-18 Novembre 1983 - ISRA - FAO, PNUE.
- VIETS F.G., 1962. - Fertilizers and efficient use of water. *Agronomy*, 14, 223-265.
- WALLACE A., BAMBERG S.A., CHA J.W., 1974. - Quantitative studies of roots of perennial plants in the Mojave deserts. *Ecology*, 55, 1160-1162.
- WALLENTINUS H.G., 1973. - Aboveground primary production of *Juncetum gerardii* on a Baltic sea-shore meadow. *Oikos*, 24, 200-219.
- WENT F.W., 1955. - The ecology of desert plants. *Scientific american*, 192, 68-75.
- WENT F.W., 1979. - Germination and seedling behavior of desert plant, 477-489, in "Arid land ecosystems : structure, functioning and management, vol. 1, D.W. GOODAL, R.A. PERRY Ed., Cambridge University Press, 881 p.
- WESTMAN W.E., ROGERS R.W., 1977. - Biomass and structure of a subtropical Eucalypt forest North Stradbroke Island. *Aust. J. Bot.*, 25, 171-191.
- WHITTAKER R.H., NIERING W.A., 1975. - Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona. V. Biomass, production and diversity along the elevation gradient. *Ecology*, 56, 4, 771-790.
- WIEGERT R.G., 1962. - The selection of an optimum quadrat size for sampling the standing crop of grasses and forbs. *Ecology*, 43, 1, 125-129.
- WIEGERT G.R., EVANS C.F., 1964. - Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in the southeastern Michigan. *Ecology*, 45, (1), 49-63.
- WILLIAM MC, J.R., HARPER J.L., 1965. - Seed polymorphism and germination. I : The influences of nitrates and low temperatures on the germination of *Chenopodium album*. *Weed. Res.* 5, 141-150.
- WILLIAM Mc J.R., PHILLIPS P.F., 1971. - Effect of osmotic and matric potentials on the availability of water for seed germination. *Aust. J. Biol. Sci.*, 24, 423-431.
- ZIEGLER H., BATANOUNY K.H., SANKLA N., VIAS O.P., STICHLER W., 1981. - The photosynthetic pathway types of some desert plants from India, Saudi Arabia, Egypt and Irak. *Oecologia*, 48, 93-99.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

ABSTRACT

RESUME

INTRODUCTION 1

PREMIERE PARTIE : LES HOMMES ET LEUR MILIEU. CARACTERES GENERAUX.

1 - LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE	7
2 - LES HOMMES ET LEURS ACTIVITES	9
2.1 - <u>Caractéristiques de la population</u>	9
2.2 - <u>Les activités</u>	9
2.2.1 - L'agriculture	10
2.2.2 - L'élevage	11
2.2.3 - La cueillette	14
3 - LE MILIEU NATUREL	16
3.1 - <u>Les traits généraux du climat</u>	16
3.1.1 - Les mécanismes atmosphériques	16
3.1.2 - Les facteurs du climat	16
La température	16
L'humidité relative	20
Les vents	20
Le rayonnement global	22
L'évapotranspiration potentielle	22
La pluviométrie	24
3.1.3 - Saisons et période de végétation	28
3.2 - <u>Traits généraux du substrat édaphique</u>	32
3.2.1 - Reliefs, collines, affleurements	32

3.2.2 - Ensablements de piémonts	32
3.2.3 - Pédiplaines, glacis	34
3.2.4 - Dépressions, bords de mares	35
3.2.5 - Systèmes dunaires	35
3.3 - <u>La végétation</u>	36
3.3.1 - Caractères généraux	36
3.3.2 - Les unités de végétation	39
Les unités de végétation liées aux dunes et ensablements	40
Les unités de végétation liées aux cui- rasses ferrugineuses	40
Les unités de végétation liées aux af- fleurements rocheux	41
Les formations inondables	41
4 - LES CONDITIONS SAHELIENNES DE LA MARE D'OURSIS	41
 DEUXIEME PARTIE : <u>METHODOLOGIE</u>	
1 - LES DIFFERENTS NIVEAUX D'ETUDES	45
1.1 - <u>La station écologique</u>	45
1.2 - <u>Le secteur écologique</u>	47
1.3 - <u>La région</u>	47
2 - ANALYSE FLORISTIQUE : RECOUVREMENT ET CONTRIBUTION SPECIFIQUE	49
2.1 - <u>Principe de la mesure et définitions</u>	49
2.2 - <u>Effectif de l'échantillonnage et précision</u>	50
3 - PHYTOMASSE EPIGEE	51
3.1 - <u>Généralités</u>	51
3.2 - <u>Détermination de la phytomasse épigée par la méthode de la récolte intégrale</u>	52
3.2.1 - Matériel et méthodes	52
3.2.2 - Résultats	55

Loi de distribution de la phytomasse ..	55
Choix du couple. Surface, effectif	55
Répartition de l'échantillonnage	59
Conclusion	59
3.3 - <u>Détermination radiométrique de la phytomasse</u>	61
3.3.1 - Principe, matériel et protocole	62
Principe physique de la méthode	62
Caractéristiques de la végétation	63
Protocole de mesure	69
3.3.2 - Résultats	69
Effet de la hauteur angulaire du soleil sur le rapport R	69
Effet de la structure de la végétation.	71
Effet du stade phénologique	73
Comparaison des résultats	75
3.3.3 - Conclusion	77
4 - <u>PHYTOMASSE HYPOGEE</u>	79
4.1 - <u>Méthodes utilisées, choix</u>	80
4.2 - <u>Matériel et méthodes</u>	83
4.2.1 - La sonde	83
4.2.2 - Unités de végétation étudiées	83
4.2.3 - Echantillonnage et traitement des échantillons	84
4.2.4 - Erreur relative sur les mesures	86
4.3 - <u>Résultats</u>	86
4.3.1 - Loi de distribution de la phytomasse racinaire	86
4.3.2 - Précision sur la moyenne	88
4.3.3 - Conclusions	88

TROISIEME PARTIE : RESULTATS.

<u>CHAPITRE I</u> : LES UNITES ETUDIEES : PLUVIOMETRIE, SUBSTRAT EDAPHIQUE, STRUCTURE DE LA VEGETATION	93
1 - CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES	94
1.1 - <u>Méthodes</u>	94
1.2 - <u>Résultats</u>	95
2 - CARACTERISTIQUES EDAPHIQUES	98
2.1 - <u>Texture</u>	99
2.2 - <u>Propriétés hydrodynamiques</u>	101
2.3 - <u>Propriétés chimiques</u>	101
2.4 - <u>Matières organiques</u>	103
2.5 - <u>Conclusion</u>	103
3 - STRUCTURE DE LA VEGETATION	103
3.1 - <u>Spectre biologique</u>	103
3.2 - <u>La strate herbacée</u>	105
3.2.1 - Spectre et diversité floristiques	105
3.2.2 - Variabilité interannuelle de la composition floristique	106
3.3 - <u>La strate ligneuse</u>	109
3.3.1 - Caractéristiques de densité	109
3.3.2 - Structure démographique	113
4 - CONCLUSION	119
<u>CHAPITRE II</u> : LA MISE EN PLACE DU PEUPEMENT	123
1 - PRODUCTION DE SEMENCES ET RECONSTITUTION DES PEUPEMENTS HERBACES.	124
1.1 - <u>Production de semences</u>	124
1.2 - <u>Reconstitution du peuplement : le facteur semence est-il limitant ?</u>	126
2 - L'ETABLISSEMENT	129

2.1 - <u>Acquis et méthodes d'études</u>	129
2.2 - <u>Résultats</u>	130
2.2.1 - L'établissement sur sols sableux	130
2.2.2 - L'établissement sur sols lourds	133
2.2.3 - L'établissement sur glaciis	136
2.3 - <u>Conclusion</u>	136
3 - <u>ETUDE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES GERMINATIVES DES SEMENCES SAHE- LIENNES</u>	139
3.1 - <u>Matériel - méthodes - définitions</u>	139
3.1.1 - Les espèces : choix, écologie, morpho- logie	139
3.1.2 - Les conditions expérimentales	142
3.1.3 - Définitions	143
3.2 - <u>Polymorphisme et germination</u>	143
3.3 - <u>Température et germination</u>	145
3.4 - <u>Inhibition et dormance</u>	147
3.4.1 - Influence des prétraitements	147
3.4.2 - Post-maturation	151
3.4.3 - Discussion	153
3.5 - <u>Sécheresse simulée et germination</u>	153
3.5.1 - Conditions expérimentales	154
3.5.2 - Influence du stress hydrique sur la germination	155
3.5.3 - Discussion	159
4 - <u>ADAPTATION DES ESPECES AUX CONDITIONS SAHELIENNES DE SEMI-ARIDITE..</u>	160
<u>CHAPITRE III : PRODUCTION DES SYSTEMES ECOLOGIQUES</u>	163
1 - <u>DEFINITIONS ET METHODES D'ETUDES</u>	164
2 - <u>CARACTERES DES CYCLES DE PRODUCTION A L'ECHELLE DE LA STATION ECO- LOGIQUE</u>	166

2.1 - <u>Les cycles de production, phénologie</u>	166
2.1.1 - Les cycles et leur variabilité	166
2.1.2 - Valeurs caractéristiques des différentes phases	175
2.2 - <u>Production et facteurs écologiques</u>	179
2.2.1 - Rendement énergétique	179
2.2.2 - Efficacités en eau	181
2.3 - <u>Conclusions</u>	184
3 - PRODUCTION REGIONALE. PRODUCTION ET CAPACITE DE CHARGE FREQUEN- TIELLES	185
3.1 - <u>Déterminisme écologique de la production</u>	185
3.2 - <u>Production régionale - potentiel de charge</u>	191
3.3 - <u>Expression de la phytomasse en fonction de la pluie</u> <u>Estimation de la production et de la charge fréquen-</u> <u>tielles</u>	195
3.3.1 - Définitions	196
3.3.2 - Résultats	199
3.3.3 - Application pastorale	201
3.4 - <u>Conclusions</u>	206
 <u>CHAPITRE IV : LES SYSTEMES RACINAIRES</u>	 207
1 - MODELE DE DISTRIBUTION DES RACINES - CARACTERISTIQUES DE L'ENRACI- NEMENT	207
2 - PHYTOMASSE HYPOGEE	214
3 - DETERMINATION DU RELIQUAT RACINAIRE - PRODUCTION HYPOGEE	217
3.1 - <u>Détermination du reliquat racinaire</u>	217
3.2 - <u>Production annuelle</u>	219
4 - TURN-OVER DU SYSTEME RACINAIRE	221
5 - DISCUSSION - CONCLUSIONS	223

CHAPITRE V : DYNAMIQUE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES	227
1 - LES CONDITIONS DE LA DEGRADATION	228
1.1 - <u>Le facteur climatique : la sécheresse</u>	228
1.1.1 - Méthodes	232
1.1.2 - Résultats	234
1.1.3 - Conclusions	239
1.2 - <u>Les facteurs anthropiques</u>	240
1.2.1 - Les facteurs anthropiques actuels	240
1.2.2 - Les facteurs anthropiques historiques..	243
1.3 - <u>Essai de cartographie des états de dégradation du</u> <u>Burkina Faso</u>	250
2 - LES CAPACITES DE REGENERATION DES SYSTEMES ECOLOGIQUES	252
2.1 - <u>La régénération naturelle</u>	252
2.1.1 - Structure de la végétation	254
2.1.2 - Aspects floristiques	256
Diversité floristique	256
L'approche globale	257
L'approche analytique	264
2.1.3 - Effets de la protection sur la produ- ction	268
2.1.4 - Effets de la protection sur l'évolu- tion de la strate ligneuse	272
2.1.5 - Le potentiel de régénération naturelle.	273
2.2 - <u>La réhabilitation</u>	276
2.2.1 - Effets sur la strate herbacée	276
2.2.2 - Effets sur la strate ligneuse	277
3 - DYNAMIQUE DES SYSTEMES ECOLOGIQUES SAHELIENS	278
CONCLUSIONS GENERALES	283

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	295
TABLE DES MATIERES	319
ANNEXE I : Espèces dominantes des unités de végétation définies par par TOUTAIN (1976)	327
ANNEXE II : Liste floristique des différentes unités de végétation ...	328
ANNEXE III : Variations interannuelles de la fréquence centésimale (FC ‰) et de la contribution spécifique (CS ‰) au stade floraison- fructification	332
ANNEXE IV : Tableau de contingence multiple dans l'AFC appliquée aux mesures de phytomasse/variables écologiques	336

Annexe I - Espèces dominantes des unités de végétation définies par TOUTAIN (1976)

(Extrait de la notice de la carte).

Symboles	Désignation des parcours	Strate herbacée	Strate ligneuse	Etat *
FORMATIONS DES DUNES ET DES ENSABLEMENTS				
Ahs	Pénéplaines dunaires du Nord-Ouest de l'Oudalan	Aristida mutabilis et Schoenefeldia gracilis	Guiera senegalensis et Acacia senegal	2 3
Gd	Cordons dunaires	Cenchrus biflorus	Combretum glutinosum	
O	Faciès du Centre de l'Oudalan	+ Aristida longiflora		1 2 3
	Faciès du Sud de l'Oudalan	+ Andropogon gayanus	Balanites aegyptiaca et Acacia albida	3 4
	Faciès de crête au Nord d'Oursi	+ Schoenefeldia gracilis	+ Acacia raddiana	
Ce	Ensablements peu épais	Cenchrus biflorus	Acacia raddiana	
O	Faciès des bas de pentes dunaires et des pénéplaines interdunaires	+ Aristida mutabilis et Schoenefeldia gracilis		2 3
		+ Eragrostis tremula et Andropogon gayanus	+ Ptilostigma reticulatum et Acacia adansonii	2 3
O	Faciès des ensablements éoliens et anciens cordons dunaires arasés	+ Schoenefeldia gracilis et Aristida mutabilis	+ Acacia adansonii et Combretum glutinosum	2 3
●	Creux interdunaire	Schoenefeldia gracilis et Chloris pilosa	Bauhinia rufescens	1 2
	(Csda) Faciès anthropique		+ Acacia albida	
FORMATION RIPICOLE ARBOREE				
FRS	Talweg important	Echinochloa colona et Panicum anabaptistum	Anogeissus leincarpus Ptilostigma reticulatum	1 2
FORMATIONS INONDABLES				
MES	Mare à inondation de faible durée	Echinochloa colona et Oryza barthii	Nitragyna inermis ou Acacia seyal	
MVs	Mare inondée en début de saison sèche	Vetiveria nigriflora	Acacia nilotica	
MBS	Mare à inondation prolongée	Oryza longistaminata et Echinochloa stagnina	sans	
FORMATIONS LIEES AUX CUIRASSES FERRUGINEUSES				
IL	Bowé et Inselberg latéritique	Aristida adscensionis	Combretum micranthum et Pterocarpus lucens	
AS	Bush	Aristida adscensionis et Schoenefeldia gracilis	Pterocarpus lucens et Combretum micranthum	
■ ASg	Faciès sur pentes gravillonnaires	+ Schizachyrium exile	+ Acacia laeta et Boscia senegalensis	3
■ ASc	Faciès sur sol colluvionné	+ Panicum laetum et Pennisetum pedicellatum	+ Commiphora africana Acacia laeta et Grewia bicolor	2 3 4
□ ASE	Faciès sur sol plus ou moins sableux	+ Eragrostis tremula et Panicum laetum	+ Ziziphus mauritiana et Acacia raddiana	2 3 4
ASd	Faciès des bas de pentes et des dépressions	+ Brachiaria lata Pennisetum pedicellatum et Panicum laetum	+ Grewia bicolor et Acacia laeta	1 2
FORMATIONS LIEES AUX AFFLEUREMENTS ROCHEUX				
IR	Affleurements et Inselberg	Aristida adscensionis et Aristida funiculata	Variable	
Sg	Glacis	Schoenefeldia gracilis	Acacia spp.	
▲ Sgl	Faciès sur glacis pierreux	+ Urochloa trichopus	Acacia laeta	3 4
▲ Sgs	Faciès sur glacis pierreux	+ Panicum laetum	Acacia seyal	1 2
Sgr	Faciès des glacis colluvionnés sur sol halomorphe	+ Aristida adscensionis Panicum laetum	Acacia raddiana	3 4
Spt	Dépressions et Talwegs	Panicum laetum et Schoenefeldia gracilis	Acacia seyal Acacia adansonii	1 2 3 4

* Indique que la composition floristique du faciès s'additionne à celle du groupement général.

L'état de la végétation est exprimé selon la classification suivante :

- 1 Bon état du tapis herbacé et de la strate ligneuse
- 2 Début de dégradation : tapis herbacé éclairci, strate ligneuse stable
- 3 Dégradation importante, tapis herbacé très discontinu, mort de quelques ligneux
- 4 Dégradation très avancée : tapis herbacé très réduit ou disparu, nombreux ligneux morts ou disparus.

Annexe II - Liste floristique des différentes unités de végétation

(Relevé du cycle 1977)

ESPECES	FAMILLES	Ams	Cep	Ase	Sgr	Sgl	Spt
ESPECES HERBACEES							
Achyranthes argentea Lam.	Amaranthaceae	+		+	+		
Aeschynomene indica L.	Fabaceae						*
Alysicarpus glumaceus (Vahl.) DC.	Fabaceae						*
Alysicarpus ovalifolius (Schum. et Thonn.) J. Léon	Fabaceae = Papilionaceae	+	+	+	+	+	
Amaranthus graecizans L.	Amaranthaceae			+		+	
Andropogon gayanus Kunth.	Poaceae=Gramineae			+	+		
Aristida adscensionis L.	Poaceae			+	+	+	
Aristida funiculata Trin. et Rupr.	Poaceae	+	+	+	+	+	
Aristida hordeacea Kunth.	Poaceae			+	+	+	
Aristida mutabilis Trin. et Rupr.	Poaceae	+	+	+			
Boehavia repens L.	Nyctaginaceae		+	+	+		
Borreria chaetocephalla (DC.) Hepper	Rubiaceae			+	+	+	
Borreria radiata D.C.	Rubiaceae	*					
Brachiaria lata (Schumach.) Hubb.	Poaceae			+	+	+	
Brachiaria ramosa (L.) stapf.	Poaceae	*					
Brachiaria xantholeuca (Hack. ex Schinz) Stapf.	Poaceae	+	+	+			
Bulbostylis barbata (Rottb.) C.B. Cl.	Cyperaceae			*			
Cassia italica (Mill.) Lam. ex F.W. Andr.	Gaesalpinaceae	*					
Cassia mimosoides L.	Gaesalpinaceae	+					+
Cassia nigricans Vahl.	Gaesalpinaceae		+	+			
Cassia obtusifolia L.	Gaesalpinaceae	+	+	+	+	+	+
Cenchrus biflorus Roxb.	Poaceae	+	+	+	+	+	
Cenchrus prieurii (Kunth) Maire	Poaceae	+		+	+	+	
Ceratotheca sesamoides Endl.	Pedaliaceae	+	+	+			
Chloris lamproparia Stapf.	Poaceae			+	+	+	
Chloris prieurii Kunth	Poaceae	+		+	+	+	
Chloris virgata SW	Poaceae						*
Chloris pilosa Schum et Thonn.	Poaceae			*			
Cienfugosia digitata Cav.	Malvaceae			*			
Citrillus lanatus (Thunb.) Mats et Nakai	Cucurbitaceae	+	+	+	+		
Cleome gynandra L.	Capparidaceae	+	+				
Cleome monophylla L.	Capparidaceae	+		+			
Crinum ornatum (Ait.) Bury	Amaryllidaceae			*			

<i>Pancratium trianthum</i> Herb.	Amaryllidaceae	+ +		
<i>Pandiaka angustifolia</i> (Vahl) Hepper	Amaranthaceae		*	
<i>Pennisetum pedicellatum</i> Trin.	Poaceae	+ + + +		
<i>Peristrophe bicalyculata</i> (Retz.) Nees	Acanthaceae		*	
<i>Phyllanthus pentandrus</i> Schum et Thon.	Euphorbiaceae		*	
<i>Polycarpaea corymbosa</i> (L.) Lam.	Caryophyllaceae			*
<i>Polycarpaea corymbosa</i> (L.) Lam. var.				
<i>pseudolinearifolia</i> Berth.	Caryophyllaceae	+	+	
<i>Polycarpaea eriantha</i> Hochst. ex Rich.	Caryophyllaceae		*	
<i>Polycarpaea linearifolia</i> (DC.) DC.	Caryophyllaceae	+ +		
<i>Polygala erioptera</i> DC.	Polygalaceae		+ +	
<i>Portulaca foliosa</i> Ker. Gawl.	Portulacaceae		*	
<i>Portulaca oleracea</i> L.	Portulacaceae			+ +
<i>Pupalia lappacea</i> (L.) Juss.	Amaranthaceae		*	
<i>Rhynchosia minima</i> (L. DC. var <i>memnonia</i>				
(Del.) Cooke	Fabaceae		+ +	
<i>Schoenefeldia gracilis</i> Kunth	Poaceae	+ + + + +	+ +	+ +
<i>Sesamum alatum</i> Thon.	Pedaliaceae	+ +		
<i>Sida alba</i> L.	Malvaceae	+		+
<i>Sida ovata</i> Forsk.	Malvaceae	+ +		+
<i>Sporobolus festivus</i> Hochst. ex A. Rich.	Poaceae		*	
<i>Stylochiton hypogaeus</i> Lepr.	Araceae	*		
<i>Tephrosia linearis</i> (Willd.) Pers	Fabaceae	*		
<i>Tephrosia purpurea</i> (L.) Pers. subsp.				
<i>leptostachya</i> var.	Fabaceae	*		
<i>Tephrosia uniflora</i> Pers.	Fabaceae	+ + + +		
<i>Tragus berteronianus</i> Schult.	Poaceae	+ + +		
<i>Tragus racemosus</i> (L.) All.	Poaceae			*
<i>Tribulus terrestris</i> L.	Zygophyllaceae	+ + + + +		
<i>Tripogon minimus</i> (A. Rich.) Hochst.				
ex Steud.	Poaceae		*	
<i>Urginea indica</i> (Roxb.) Kunth.	Alliaceae			*
<i>Urochloa trichopus</i> (Hochst.) Stapf.	Poaceae		+ + +	
<i>Walteria indica</i> L.	Sterculiaceae	+ + +		+
<i>Zaleya pentendra</i> (L.) Jeffrey.	Aizoaceae	+		
<i>Zornia glochidiata</i> DC.	Fabaceae.	+ + +		+

ESPECES LIGNEUSES								
Acacia nilotica var adansonii								
(Guill. et Perr.) O. Ktze	Mimosaceae		+	+	+			+
Acacia laeta R. Br. ex Benth	Mimosaceae		+	+	+	+	+	+
Acacia raddiana Savi	Mimosaceae		+	+	+	+	+	+
Acacia senegal L. Willd	Mimosaceae	+	+	+				
Acacia seyal Del.	Mimosaceae		+	+	+	+	+	+
Balanites aegyptiaca(L.) Del.	Zygophyllaceae	+	+	+	+			
Bauhinia rufescens Lam.	Caesalpiaceae	+	+	+				
Boscia salicifolia Oliv.	Capparidaceae			*				
Gadaba farinosa Forsk.	Capparidaceae			*				
Calotropis procera (Ait.) Ait. f.	Asclepiadaceae		+	+				
Combretum aculeatum Vent.	Combretaceae	+	+	+	+			+
Combretum glutinosum Perr. ex D.C.	Combretaceae	+		+				
Commiphora africana (A. Rich.) Engl.	Burseraceae	+		+				
Dalbergia melanoxylon Guill. et Perr.	Fabaceae			+				+
Dicrostachys cinerea (L.) Wight. et Arn.	Mimosaceae			*				
Entada africana Guill. et Perr.	Mimosaceae	*						
Grewia bicolor Juss.	Tiliaceae			+				+
Grewia flavescens Juss.	Tiliaceae			*				
Grewia villosa Willd.	Tiliaceae			*				
Guiera senegalensis J.F. Gmel.	Combretaceae	+	+	+				
Leptadenia hastata (Pers.) Decne	Asclepiadaceae	+	+	+	+			
Leptadenia pyrotechnica (Forsk.) Decne	Asclepiadaceae		+	+				
Maerua crassifolia Forsk.	Capparidaceae	+	+	+				+
Maerua angolensis DC.	Capparidaceae			*				
Piliostigma reticulatum (DC.)Hoch.	Caesalpiaceae			*				
Ziziphus mauritiana Lam.	Rhamnaceae		+	+	+			+

+ présence

* espèce exclusive à l'unité étudiée

Annexe III (suite)

2. Unité "Cep" : Kolel

Espèces	1978		1979		1980		1981	
	FC	Csi	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi
Sol nu	40		32,4		31,5		32,4	
Cenchrus biflorus	39,6	65,1	41,2	52,3	32,5	38,9	18	24
Alysicarpus ovalifolius	12,8	21,1	22,4	28,5	16,5	19,8	27,6	36,7
Zornia glochidiata					0,5	0,6	1,2	1,6
Cenchrus prieurii								
Schoenefeldia gracilis			1,6	2	11,5	13,8	12,8	17,0
Tribulus terrestris	4,4	7,2	10,8	13,7	8,5	10,1	0,4	0,5
Brachiaria xantholeuca			0,8	1,0	1,5	1,8	2,4	3,2
Phyllanthus pentandrus	3,6	5,9						
Digitaria horizontalis							0,4	0,5
Aristida mutabilis					9,0	10,7	5,2	6,9
Euphorbia forkalii	0,4	0,7						
Citrillus lanatus			0,8	1			2,4	3,2
Lineum diffusum			0,4	0,5				
Commelina forskalaei			0,4	0,5			0,4	0,5
Pancratium trianthum			0,4	0,5				
Dactyloctenium aegyptium					0,5	0,6		
Tragus berteronianus					2,5	3,0	0,4	0,5
Aristida funiculata					0,5	0,6		
Heliotropium strigosum							1,2	1,6
Ipomoea coscosperma							1,2	1,6
Borreria chaetocephalla							0,4	0,5
Borreria radiata							0,4	0,5
Chloris lamproparia							0,4	0,5
Corchorus tridens							0,4	0,5

Annexe III (suite)

3. Unité "Ase" : Gountouré

Espèces	1978		1979		1980		1981	
	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi
Sol nu	28,4		39,6		22,5		18,5	
Schoenefeldia gracilis	33,5	39,3	26,8	35,8	25,2	31,5	27	39,4
Aristida funiculata	2,8	3,3						
Aristida mutabilis	2	2,3	6,4	8,6	8,4	10,5	2,5	3,6
Brachiaria xantholeuca	1,6	1,9			0,8	1		
Zornia glochidiata	14	16,4	11,6	15,5	8,8	11	8,0	11,7
Dactyloctenium aegyptium	1,2	1,4	1,2	1,6	2	2,5		
Tripogon minimus	19,2	22,4	14,8	19,9	20,4	25,5	14,0	20,4
Sporobolus festivus	1,2	1,4	3,6	4,8	2,8	3,5	1,5	2,2
Eragrostis pilosa	1,2	1,4	1,2	1,6	4,8	6	2,5	3,6
Loudetia togoensis	2	2,3					0,5	0,7
Borreria radiata	0,4	0,5						
Diheteropogon hagerupii	3,6	4,2	0,8	1,0	0,4	0,5	0,5	0,7
Panicum laetum	2	2,3	2	2,7	2,8	3,5	3	4,4
Pennisetum pedicellatum	0,4	0,5						
Chloris prieurii	0,4	0,5	1,2	1,6	0,4	0,5	0,5	0,7
Aristida adscensionis			0,8	1,0	1,6	2		
Chloris pilosa			0,4	0,5				
Cassia obtusifolia			2,4	3,2	1,2	1,5	1,5	2,2
Digitaria horizontalis			0,8	1,0			0,5	0,7
Tragus berteronianus			0,8	1,0			3,5	5,1
Mollugo nudicaulis					0,4	0,5		
Borreria chaetocephala							0,5	0,7
Dactyloctenium aegyptium							1	1,5
Andropogon pseudapricus							1	1,4
Sporobolus helvolus							0,5	0,7

Annexe III (suite et fin)

5. Unité "Sgr" : Bas Kolel

Espèces	1977		1978		1979		1980		1981	
	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi	FC	CSi
Sol nu	48,5		51,3		57,6		49,6		68,4	
Schoenefeldia gracilis	50	81,9	42,4	87,2	28,4	76,4	48,4	95,3	27,2	85
Aristida adscensionis	2,5	4,0			0,4	1,0				
Panicum laetum	6	9,8	6,4	11,8	5,2	13,8	2	3,9	2,8	8,8
Eragrostis pilosa	0,5	0,8								
Chloris lamproparia	2	3,2							1,2	3,8
Indigofera senegalensis			0,3	0,3	0,4	1				
Pennisetum pedicellatum			0,2	0,2						
Tribulus terrestris			0,3	0,5						
Mollugo nudicaulis					1,2	3,3			0,8	2,5
Alysicarpus glumaceus					0,4	1				
Dactyloctenium aegyptium					0,4	1				
Euphorbia forskalii					0,4	1				
Alysicarpus ovalifolius					0,4	1				
Sporobolus festivus							0,4	0,8		

6. Unité "Spt" : Winde

Espèces	1977		1978		1979		1980		1981	
	FC	CSi								
Sol nu	10		48,8		27,2		18		11,6	
Panicum laetum	78	53,1	13,6	39,5	71,6	92,3	47,6	63,3	52	69,8
Schoenefeldia gracilis	25	17					3,6	4,8		0,4
Aeschynomene indica	19	12,9	4	11,6	2	2,6	1,2	1,6	16	21,2
Echinochloa colona	9	6,1	12	34,9	0,8	1	1,2	1,6		5,2
Cyperus esculentus	5	3,4	4,4	12,8	2	2,6	1,6	2,1		1,2
Eragrostis pilosa	8	5,4					19,6	26,1		0,8
Indigofera senegalensis	3	2								0,8
Cassia obtusifolia			0,4	1,2	1,2	1,5				0,4
Zornia glochidiata							0,4	0,5		

ORSTOM Editeur
Dépôt légal : septembre 1988
Impression
ORSTOM BONDY

ABSTRACT

The study deals with the structure, some aspects of the functioning and the dynamics of natural vegetation types of sahelian shortgrassland in the north of Burkina Faso.

Sahelian ecological conditions (i.e. climatic and edaphic aridity, variability, seasonality...) are first described. The problem of imbalance between human needs and limited natural resources is addressed.

In a second part methodological aspects relating to sampling and accuracy of measurements in aboveground or belowground phytomass evaluation, either by the traditional method of hand clipping or by remote sensing method are discussed.

Results for the 1976-1984 period at different scales (ecological site, basin, and region) are related to :

(1) vegetation structure (biological and floristic spectrum of the herbaceous layer, density and demographic structure of lignous plants), (2) the establishment of vegetation : seed production seed germination under experimental conditions, seedling establishment of vegetation, (3) the phenology and productivity of aboveground and underground vegetation. Annual variation in herbaceous phytomass can be expressed as a function of rainfall, a relation used for evaluating productivity and carrying capacity on a frequential basis, (4) the conditions of desertification and regeneration capability of sahelian vegetation (as defined by the effects of exposure on flora, phytomass, rain use efficiency, tree density and by the effects of management : tillage, afforestation...).

These structural features and present day dynamic characteristics as well as some aspects of past dynamics (climatic evolution ancient landuse...) avail the design of a sahelian ecological system dynamics model. This model shows that, in spite of conspicuous homogeneity, this system has a large floristic, structural, fonctionnal and dynamic diversity.

As a result of persistent drought and human degradation this ecological system evolves towards desertisation.

Some priorities in research programmes (process of establishing equilibrium in sahelian ecosystem, limits of its upsetting process of regeneration and rehabilitation conditions...) are then proposed.

Keywords : Burkina Faso - Sahel - Ecosystems - Vegetation structure - Establishment - Productivity - Rain use efficiency - Carrying capacity - Climatic evolution - Ancient landuse - Ecological equilibrium.

ISSN : 0767-2888

ISBN : 2-7099-0927-8

Editions de l'ORSTOM

70 route d'Aulnay F-93140 BONDY