

Fidèle G. HIEN

**La régénération de l'espace sylvo-pastoral
au Sahel**

**Une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux
et des sols au Burkina Faso**

Utrecht

23 FEB. 1995

UB-CARDEX

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0611 3605

40957

Promotor:

dr.ir. L. Stroosnijder
hoogleraar in de cultuurtechniek
van de regenafhankelijke landbouw.

UNO8201, 1903

Fidèle G. HIEN

**La régénération de l'espace sylvo-pastoral
au Sahel**

**Une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux
et des sols au Burkina Faso**

Proefschrift
ter verkrijging van de graad van
doctor in de landbouw en milieuwetenschappen
op gezag van de rector magnificus,
dr. C.M. Karssen,
in het openbaar te verdedigen
op maandag 6 maart 1995
des namiddags te vier uur in de Aula
van de Landbouwuniversiteit te Wageningen

1 sn 90 4391

BIBLIOTHEEK
LANDBOUWUNIVERSITEIT
WAGENINGEN

Stellingen

1. La théorie des "domaines d'attraction" et de la "résilience" (Holling, 1973) suggère que, quel que soit leur état d'évolution, les écosystèmes naturels conservent toujours une stabilité et une capacité naturelle de régénération dont l'expression dépend du mode et du niveau d'utilisation de leurs ressources renouvelables. Cette approche théorique caractérise bien la dynamique de systèmes naturels soumis aux seules lois de la nature. Au Sahel, l'environnement est si marqué de l'empreinte de l'homme, qu'il semble bien exister dans la dégradation actuelle des écosystèmes naturels, un seuil de rupture des équilibres internes qui déterminent cette résilience. Au-delà de ce seuil, les seules modifications des modes et du niveau d'exploitation des ressources renouvelables sont insuffisantes pour maintenir ou rétablir les rapports internes entre les composantes de ces écosystèmes et permettre leur régénération.
2. Les difficultés de régénération spontanée des sols dénudés dans les espaces sylvo-pastoraux sahéliens ne sont pas nécessairement liées à un épuisement minéral; elles sont le résultat d'un dysfonctionnement de leur régime hydrique suite à une dégradation physique qui a pour origine la réduction excessive de la couverture végétale. Ces sols conservent en effet, malgré cet état, un potentiel productif parfois élevé que les modifications (artificielles) des conditions hydrodynamiques peuvent révéler de façon spectaculaire.
3. L'histoire des projets de développement agricole et de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso montre que ce sont les préoccupations immédiates de sécurité alimentaire qui conduisent les populations rurales et les projets eux-mêmes à concentrer d'abord leurs interventions sur les terres cultivées, au détriment de l'espace sylvo-pastoral. Cependant, lorsqu'on considère les inter-actions entre les deux types d'espaces, la dégradation actuelle de l'espace sylvo-pastoral sous l'effet de la surexploitation est une source de préoccupation plus importante pour l'avenir des systèmes de production rurale dans leur ensemble.
4. La réalisation tous azimuts de diguettes anti-érosives apparaît aujourd'hui au Burkina Faso comme une solution généralisable aux problèmes de dégradation des sols et de baisse de la pluviométrie. L'expérience montre cependant que ces dispositifs d'absorption ou de freinage du ruissellement comportent des risques de contre-performances pour la production agricole en année pluviométrique normale ou humide. En revanche, ces mesures semblent les mieux indiquées dans les espaces sylvo-pastoraux pour stimuler la régénération des végétations pérennes.
5. Contrairement aux végétations des zones sahéliennes (pluviométrie inférieure à 600 mm), 30 à 40 placettes de récolte de 1 m² (Levang et Grouzis, 1980) constituent souvent un échantillon trop petit pour une estimation suffisamment précise de la biomasse aérienne herbacée dans des formations soudaniennes: la diversité plus élevée de ces végétations et la variabilité des contributions spécifiques massiques des espèces qui les composent explique cette situation.

6. L'évolution des communautés végétales comme indicateur de la réhabilitation des écosystèmes sylvo-pastoraux montre que, dans les conditions hydriques les plus favorables, c'est seulement après 10 ans qu'intervient une stabilisation progressive des équilibres écologiques dans les espaces en régénération. En revanche, en l'absence de mesures permettant d'accroître l'infiltration sur les sols dégradés, l'évolution de la structure et de la composition des végétations traduit encore, après 10 ans de mise en défens totale, une instabilité caractéristique des systèmes en pleine mutation.

7. De nombreux travaux ont montré que l'Azote constituait du nord vers le sud du Sahel, l'élément le plus limitant de la production primaire des pâturages naturels (Penning de Vries et Djitéye, 1989, Breman et de Ridder, 1991). Les aménagements anti-érosifs de freinage ou d'absorption du ruissellement en milieu soudanien, illustrent de façon encore plus dramatique cette réalité: A proximité des ouvrages anti-érosifs, l'importance des pertes par lixiviation ainsi que les difficultés d'absorption par les végétations dues au régime hydrique au cours de la croissance ont comme conséquence que le taux de N dans la biomasse herbacée à la floraison devient rapidement inférieur à la valeur de 0,5%, considérée comme seuil d'une limitation complète de la production par cet élément.

8. Une attitude apparemment propre aux cadres de l'Agriculture (au sens large du terme) dans les pays du Sahel est l'insuffisance d'analyse quantitative dans la conduite des projets de gestion des ressources naturelles en général et d'agriculture en particulier. Même lorsqu'elle ne traduit pas fidèlement la réalité, l'analyse quantitative jette assez d'éclairage sur l'impact des projets de développement et permet, au moins, de savoir que... l'on s'est trompé.

9. La dévaluation du Franc CFA pourrait se révéler un échec pour l'économie des pays d'Afrique concernés, en raison du faible niveau de conscience des opérateurs économiques: ceux qui ont les idées sur les investissements les plus porteurs à l'heure de la dévaluation n'ont généralement pas d'argent. En revanche, ceux qui possèdent les ressources financières ont non seulement peur des idées et des risques, mais ont davantage confiance aux appuis politiques qui garantissent des intérêts à court terme.

10. C. Debbasch (*in "Jeune Afrique" No 1757, 8-14 sept. 1994*) constate que les économies des pays anglophones d'Afrique s'en tirent mieux que leurs concurrentes du monde francophone. Cependant, contrairement à l'auteur qui "craint un virage anglophone du continent africain si la France ne prend pas conscience que dans le monde contemporain il n'est plus de situation acquise", il faut, pour notre part, souhaiter un tel "virage". Car, comme il le dit si bien, "la francophonie n'est pas un don (ni une conquête); elle se mérite".

Cette thèse est aussi publiée dans la série
Documents sur la Gestion des Ressources Tropicales N. 7
Université Agronomique de Wageningen,
Wageningen, Les Pays-Bas.

DEDICACE

Cette thèse est dédiée à mon épouse Marie Thérèse, à nos enfants
Dekoumwin Thierry et Yirdon Edwige, à ma mère et mon père.

Table des matières

Avant Propos	i
Résumé	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Liste de photos	xii
Liste des abbréviations	xiii
1 Introduction générale	1
2 Les écosystèmes sylvo-pastoraux	4
2.1 Introduction	4
2.2 Les espaces sylvo-pastoraux au Burkina Faso	5
2.2.1 Définitions et concepts	5
2.2.2 Les fonctions des espaces sylvo-pastoraux	6
2.3 L'utilisation des e.s.p. au plateau central	6
2.3.1 La région du plateau central	6
2.3.2 L'utilisation des espaces sylvo-pastoraux	7
2.3.3 Les problèmes de gestion des espaces sylvo-pastoraux	8
2.4 La dynamique des paysages	9
2.4.1 Evolution de l'occupation des terres	9
2.4.2 Evolution des formations végétales	10
2.5 La dégradation des espaces sylvo-pastoraux	11
2.6 Conclusions	12
3 Concepts et processus de régénération	13
3.1 Introduction	13
3.2 Les concepts écologiques	13
3.2.1 Notion de capacité de charge	13
3.2.2 Stabilité et résilience	18
3.3 Les processus physiques et chimiques	20
3.4 Les processus biologiques	22
3.5 Les aspects socio-économiques	23
3.6 Conclusions	23
4 Les expériences de régénération des espaces sylvo-pastoraux	25
4.1 Introduction	25
4.2 Historique et évolution	26
4.3 Les expériences dans le plateau central	28
4.3.1 Objectifs spécifiques et répartition géographique	28
4.3.2 Les dispositifs et leur efficacité	29
4.3.3 Les mesures de gestion	40
4.4 Les conditions optimales d'efficacité des mesures de régénération	43
4.5 Les conclusions de l'inventaire	45

5	Les sites expérimentaux	46
5.1	Introduction	46
5.2	Le site de Yabo	47
5.2.1	Localisation	47
5.2.2	Le climat	48
5.2.3	Les paysages et les sols	48
5.2.4	Les mesures de C.E.S. déployées	56
5.2.5	Les bases du protocole expérimental	56
5.3	Le site de Bissiga	58
5.3.1	Localisation	58
5.3.2	Le climat	58
5.3.3	Les paysages et les sols	58
5.3.4	Les mesures de C.E.S utilisées	59
5.3.5	Les bases du dispositif expérimental	60
6	Le bilan d'eau	61
6.1	Introduction	61
6.2	Les paramètres et les méthodes de mesure	63
6.2.1	Les précipitations	63
6.2.2	Le ruissellement et l'infiltration	64
6.2.3	L'humidité et le stock d'eau du sol	65
6.2.4	L'évapotranspiration et le drainage	68
6.3	Les résultats	70
6.3.1	La pluviométrie	70
6.3.2	Le ruissellement et l'infiltration	72
6.3.3	Le régime hydrique du sol	76
6.3.4	Evapotranspiration et drainage	88
6.3.5	Le bilan d'eau	94
6.4	Conclusions	98
7	La dynamique des végétations	100
7.1	Introduction	100
7.2	Paramètres et méthodes de mesure dans la végétation herbacée	100
7.2.1	Germination et installation des herbacées	100
7.2.2	Structure et composition floristique	101
7.2.3	La production primaire	103
7.3	Dynamique des végétations herbacées	108
7.3.1	Germination et installation	108
7.3.2	Structure et composition des végétations herbacées	111
7.3.3	La production primaire	118
7.4	Paramètres et méthodes d'étude dans la végétation ligneuse	128
7.4.1	Germination et installation	128
7.4.2	Structure, composition et croissance	128
7.5	Dynamique des végétations ligneuses	129
7.5.1	Germination et installation des ligneux	129
7.5.2	Structure, composition et croissance des végétations ligneuses	131
7.6	Conclusions	136

8	Le bilan des éléments nutritifs	138
8.1	Introduction	138
8.2	Les méthodes	139
8.2.1	Les réserves totales des sols	139
8.2.2	L'absorption par la végétation	140
8.2.3	Les pertes d'éléments nutritifs	140
8.2.4	Les apports extérieurs d'éléments nutritifs	141
8.3	Les résultats des processus chimiques	141
8.3.1	Les réserves minérales du sol	141
8.3.2	L'absorption par la végétation	143
8.3.3	La disponibilité des éléments nutritifs dans le sol	151
8.3.4	Les pertes	154
8.3.5	Les apports	158
8.4	Le bilan	162
8.4.1	Le bilan d'azote	163
8.4.2	Bilan d'azote et conditions d'équilibre	165
8.4.3	Le bilan de phosphore	169
8.5	Conclusions	170
9	conclusions et recommandations	172
9.1	Les conclusions essentielles de l'étude	173
9.1.1	Sur le plan physique et hydrodynamique	173
9.1.2	Sur le plan biologique	175
9.1.3	En ce qui concerne les processus chimiques	177
9.2	Recommandations	179
9.2.1	Recommandation d'ordre technique	179
9.2.2	Recommandation à la recherche et la vulgarisation	181
9.2.3	Recommandation de politique générale	182
10	Bibliographie	183
	Samenvatting (résumé en Néerlandais)	190
Annexe 1	Tableaux détaillés du bilan hydrique dans les différents traitements de la station de Yabo pendant les saisons des pluies 1991 et 1992.	194
Annexe 2	Tables des relevés floristiques indiquant les contributions spécifiques des espèces dans la végétation herbacée sur les stations des forêts classées de Yabo (1991 et 1993) et Bissiga (1991)	216
	Index alphabétique	217
	Au sujet de l'auteur	223

Avant Propos

Il m'est agréable, à la fin de ce travail, d'exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont cru et contribué à son aboutissement.

A l'Université Agronomique de Wageningen (UAW) pour l'assistance financière sous forme de "sandwich" qui a permis de couvrir tous les travaux et séjours aux Pays-Bas en 1990 puis en 1994 ainsi que la publication de ce travail. En particulier, je voudrais exprimer ma reconnaissance au "Committee for the Admission of Graduates from Universities outside the Netherlands, acting on behalf of and answerable to the Executive Board of Wageningen Agricultural University" pour la confiance qui m'a été faite en m'admettant dans le programme PH.D. Cette décision, je l'ai considérée comme une chance personnelle d'étudier à Wageningen.

Au Ministère de l'Environnement et du Tourisme (MET) du Burkina Faso pour m'avoir accordé, pendant quatre années, les facilités administratives et le soutien institutionnel indispensables à la conduite de ces travaux.

Au programme d'appui à la foresterie villageoise financement néerlandais (PAFV) du MET, à M. M. van Dorst son CTP d'alors, et à l'Association Néerlandaise d'Assistance au Développement (SNV), je dois l'appui matériel et financier considérable consenti pendant trois ans pour l'exécution des recherches au Burkina Faso. Mon objectif était que ce travail soit utile aux cadres forestiers du MET dans les programmes duquel j'ai voulu le situer. C'est d'abord une recherche pour le développement et j'espère qu'il servira à quelque chose dans ce sens.

A l'Antenne sahéenne de l'Université de Wageningen et de l'Université de Ouagadougou, je dis merci pour l'hospitalité, l'appui logistique, matériel et financier d'appoint qui ont garanti la continuité des recherches sur le terrain et leur conduite à terme.

Je voudrais surtout exprimer ma gratitude au Prof. Dr.Ir. Leo Stroosnijder du département Irrigation et Conservation des Eaux et des Sols de l'Université Agronomique de Wageningen et au Dr. Issiaka Zoungrana de l'Institut du Développement Rural de l'Université de Ouagadougou, pour l'encadrement scientifique et l'assistance personnelle qu'ils m'ont apportés tout au long de ces années. Je voudrais rassurer le professeur Stroosnijder, qui a pris le "risque" de m'admettre comme l'un de ses premiers étudiants PH.D, que j'ai été très fier de travailler sous sa direction. J'ai surtout été flatté de l'intérêt qu'il a toujours porté à ma personne et à ma famille. Je souhaite qu'il trouve ici le couronnement de tants d'efforts.

Je saisis l'occasion pour remercier les chercheurs et enseignants du département Irrigation et Conservation des Eaux et des Sols de l'UAW. Au staff de ce département, je suis reconnaissant pour toutes les facilités dont j'ai bénéficié pendant tous mes séjours aux Pays-Bas.

Au Dr. Henk Breman du AB-DLO, je voudrais dire que j'ai été touché par le vif intérêt porté à ce projet de recherches et par sa permanente disponibilité à mon égard chaque fois que j'ai eu besoin de son expérience et de son impressionnante documentation sur le Sahel.

Ce projet a vu le jour grâce à tous ces amis Néerlandais avec lesquels j'ai travaillé au Burkina Faso au cours des dix dernières années, et qui m'ont encouragé et soutenu moralement et matériellement durant mes passages aux Pays-Bas. Je voudrais en particulier remercier pour cela Mme Martha Bloemberg "ma mère de Wageningen", Jeannet Stroosnijder, Els et Kees Bognetteau, Hein Dielissen, Chris Geerling, Steven de Bie et Jan Joost Kessler pour toute cette attention qui m'est allé droit au coeur.

Enfin, à mon épouse et à mes enfants Thierry et Edwige, j'ai imposé des absences souvent difficiles au cours desquelles ils se sont parfois demandé si je ne leur reviendrais pas "les cheveux tous gris". C'est dans leur soutien constant que j'ai puisé la volonté d'aller jusqu'au bout.

Résumé

C'est dans le souci de répondre à un besoin immédiat de sécurité alimentaire que les populations rurales du Burkina Faso, tout comme les projets de développement agricole, ont concentré jusqu'ici les actions de conservation des sols dans les seuls espaces cultivés. Cette situation est davantage favorisée par le statut actuel des espaces sylvo-pastoraux qui en fait un lieu de conflits d'intérêts dans l'utilisation des terres. Les rares investissements fonciers rencontrés dans la "brousse" sont généralement le fait de quelques projets forestiers ou d'ONG. D'envergure trop réduite pour avoir un impact suffisant, ces aménagements de régénération des sols sylvo-pastoraux, à caractère démonstratif, sont généralement mal suivis et leurs résultats presque jamais quantifiés. Pourtant, la dégradation des terres sylvo-pastorales dans le plateau central du pays évolue à un rythme exponentiel depuis 35 ans.

Les recherches dont les résultats sont exposés ici ont été entreprises à partir de 1990 dans le plateau central du Burkina. Elles visent d'une part à apprécier l'importance réelle des mesures de conservation des sols dans les espaces sylvo-pastoraux et d'autre part à étudier les processus résultant de la mise en oeuvre des mesures de régénération, tels qu'ils déterminent les résultats, et d'améliorer ainsi la connaissance des relations échec/succès des dispositifs de C.E.S. A partir d'un inventaire dans dix provinces de la zone d'étude, une analyse préliminaire des résultats a permis de constater que l'efficacité des mesures de régénération tenait en une combinaison de facteurs dont la concentration de l'eau et des semences pour déclencher les processus biologiques, le maintien sur le terrain d'une biomasse minimale pour entretenir les fonctions physiques et biologiques et le développement d'une végétation ligneuse comme indicateur de stabilité et stade ultime de la régénération. Sur cette base, deux sites aménagés au cours des dix précédentes années (dans les forêts classées de Yabo et Bissiga) et présentant le plus grand nombre des conditions d'efficacité ci-dessus ont été sélectionnés, en vue d'y conduire une étude écologique quantitative. Le bilan de l'eau, la dynamique des végétations, et les flux d'éléments nutritifs (N,P et K) tels qu'ils résultent de l'application de ces dispositifs de C.E.S., principalement de type isohypse, ont été mesurés et suivis pendant deux à trois saisons de végétation.

La mise en place de dispositifs de C.E.S. basés sur des diguettes isohypses crée une hétérogénéité à la surface du sol qui détermine le mouvement de l'eau et l'évolution des processus de régénération. Schématiquement on distingue dans ce genre d'aménagement trois situations spatiales dans lesquelles les processus hydrodynamiques, biologiques ou chimiques évoluent de manière assez différente: l'amont immédiat de chaque diguette (AM) qui absorbe plus ou moins totalement le ruissellement, l'aval immédiat (AV) des diguettes et l'espace inter-diguettes (IN) dont le ruissellement alimente l'amont. Les résultats de ces mesures ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes.

En ce qui concerne le bilan de l'eau.

La recherche démontre que la cause principale des sols dénudés est d'origine physique plutôt que chimique. Les observations faites dans la zone d'étude montrent que le problème majeur des sols dénudés est moins le résultat d'un épuisement minéral que celui d'un dysfonctionnement total de leur régime hydrique suite à une dégradation physique avancée, favorisée par une réduction excessive de leur couverture biologique. Sur les sols nus, le ruissellement annuel moyen varie de 60 à 80% selon les états de surface, avec une pluie

d'imbibition allant de seulement 1 mm sur des croûtes d'érosion à 5 mm sur les croûtes de ruissellement. C'est la hauteur totale d'eau tombée qui détermine l'importance du ruissellement, même si c'est l'intensité de la pluie qui en conditionne les délais d'apparition. En concentrant l'eau par un procédé quelconque, on déclenche à nouveau le fonctionnement hydrologique du système qui déterminera la suite des processus physiques, biologiques et chimiques. Dans les aménagements du type étudié, la situation évolue comme suit.

L'Amont des diguettes anti-érosives, en absorbant le ruissellement, offre en premier les conditions de naissance de la végétation et se positionne comme le "nid de la régénération". Les quantités totales infiltrées peuvent être supérieures à 8 fois la pluviométrie annuelle (P) sur des sols initialement nus. Sur les sols profonds, le profil d'humidité atteint plusieurs mètres dès les premières pluies. L'évapotranspiration (ETR) est constamment élevée, d'autant plus que la végétation est abondante. ETR cumulée au cours de la première saison de végétation suivant l'aménagement représentait 70% de P et 8% de l'infiltration cumulée. Elle reste cependant peu élevée par rapport au drainage total (D). Le drainage au delà de 1,55 m était estimé au cours de la même saison à 94% de l'infiltration cumulée, soit 7,5 fois P, contre respectivement 90% et 6,5P en amont de diguettes semblables plantées d'une haie arbustive de 7 ans. Le bilan hydrique, largement excédentaire, est plutôt excessif pour les besoins des espèces annuelles qui constituent l'essentiel de la végétation au début du processus de régénération.

L'Aval des diguettes est surtout caractérisé par l'importance des redistributions latérales profondes dont il bénéficie de l'amont des diguettes. Ce processus de redistribution concerne les horizons inférieurs à 80 cm, tandis que les couches supérieures demeurent influencées par les flux hydriques de surface. Il se manifeste le plus au cours de la période dite des "grandes pluies" (20 juillet-début septembre). La réserve totale du sol enregistre alors un accroissement brusque, pouvant conduire à la saturation du profil et à l'apparition de percolations profondes. ETR cumulée au cours de la première saison des pluies suivant les aménagements est estimée de 50 à 60% de P selon l'écartement entre les ouvrages, contre 75% de P à l'aval de diguettes le long desquelles est plantée une haie vive de 7 ans. Le drainage devient significatif (≥ 100 mm) lorsque l'infiltration de surface est favorisée par la présence de végétation ou d'un fossé pratiqué lors des aménagements: il est dans ce cas de 4 à 8 fois plus important que dans les espaces sans fossé. Au départ donc, le bilan hydrique y est surtout favorable aux végétations à enracinement profond.

L'espace inter-diguettes. De l'accroissement de l'infiltration dans cet espace dépendent à la fois l'installation du couvert végétal et la réduction des excédents hydriques enregistrés en amont des ouvrages d'absorption. Un paillage par exemple a permis de doubler le taux d'infiltration au cours de la saison des pluies suivante: 75% de P contre 34% de P dans les espaces non paillés. L'effet du paillage s'estompe cependant après le premier hivernage, pour être relayé par la végétation qui s'installe plus abondamment que dans les espaces non traités.

Concernant la dynamique des végétations

L'importance de la germination et le nombre d'espèces qui apparaissent, dès la première saison des pluies sur des sols initialement nus, traduisent une disponibilité insoupçonnée des semences au début de l'hivernage mais surtout une grande capacité de dissémination. La germination démarre en amont des diguettes où l'humidité quasi-permanente favorise un processus prolongé en plusieurs vagues qui influence la composition finale de la strate herbacée. Entre les diguettes, le paillage initial, au delà des apports directs de spores,

améliore tout aussi bien la germination des herbacées dont la durée reste cependant plus courte qu'en amont: la première année suivant le paillage, 37 espèces apparaissent ainsi contre 19 dans les espaces sans paille et 37 à 47 espèces en amont des diguettes selon les traitements.

L'évolution du couvert végétal est intimement liée au régime hydrique des sols. En amont des diguettes, le taux de recouvrement atteint 100% dès la seconde saison de végétation tandis que la largeur de la bande ainsi créée évolue en fonction des mesures spatiales prises entre les ouvrages pour améliorer l'infiltration: sans mesure particulière, elle atteint en moyenne 4 m de large après deux saisons de végétation, pour une production de biomasse aérienne de 5000 à 7000 kg de M.S./ha selon les parcelles. Entre les diguettes, le paillage du sol a un effet de démarrage fulgurant sur le développement de la végétation: le taux de recouvrement moyen atteint 55% l'année du paillage contre 23% dans les espaces sans paille. Il évolue respectivement à 73% et 35% l'année suivante. Sans paillage, et sous une protection plus ou moins efficace, le couvert végétal semble cependant se stabiliser autour de 50%, même 10 ans après l'aménagement. La production de biomasse aérienne atteint en moyenne, au cours de la deuxième saison de croissance, 3200 kg de M.S/ha dans les espaces paillés contre 1300 kg/ha sans paillage; il est au même moment de 5800 kg/ha dans un espace sous-solé 5 ans auparavant. Cependant, le maintien d'un régime hydrique excédentaire en amont des ouvrages finit par influencer négativement la production de la strate herbacée. Après trois saisons des pluies consécutives, plus humides que la moyenne des 30 dernières années, la production primaire aérienne nette en amont des ouvrages est inférieure de 20% en moyenne à celle mesurée, en condition de recouvrement initial semblable, entre les diguettes.

Une analyse factorielle des correspondances, entre les contributions spécifiques des espèces en présence et les relevés floristiques dont l'âge varie de 1 à 11 ans, montre que ces dix premières années sont caractérisées par d'importants processus de colonisation et de remaniements floristiques dans la strate herbacée. Le nombre d'espèces diminue avec l'âge tandis que les espèces annuelles pionnières (*Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Cassia tora*) sont progressivement étouffées et remplacées par des pérennes ou autres espèces annuelles caractéristiques des savanes peu perturbées (*Andropogon gayanus*, *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*). La variabilité spatiale du régime hydrique des sols se traduit par l'installation, en amont des ouvrages d'absorption, d'espèces caractéristiques de milieux humides (*Vetiveria nigritana*, *Cyperus spp.*) ou d'espèces sensibles à la disponibilité de l'eau comme *Andropogon gayanus*.

Ces conditions hydriques favorisent en même temps le développement d'une végétation ligneuse spontanée dont la densité et la diversité sont liées à la présence, dans les environs immédiats, de semenciers adultes. Les espèces à grande capacité de propagation paraissent les mieux favorisées. Sur les sols argileux et profonds de Yabo et Bissiga, la situation a spécialement favorisé l'explosion d'une espèce comme *Acacia seyal* dont la densité du semis naturel a pu atteindre 2500 plantules/m². Après 2 à 3 ans, on dénombre en moyenne 1200 arbustes/ha dans les parcelles aménagées avec paillage, pour une production de biomasse foliaire atteignant 470 kg M.S./ha en amont des diguettes.

Les flux et le bilan des éléments nutritifs

Les mesures effectuées pour l'horizon 0-30 cm montrent qu'il existe 2000 à 3000 kg/ha de N total et 600 kg/ha environ de P total dans cette couche superficielle, même sur des sols

nus. Au cours de la deuxième saison de croissance suivant les aménagements, la végétation herbacée n'a absorbé cependant que 1,4% des réserves totales de N en amont des diguettes et 25% des réserves assimilables de P. Cette situation qui traduit une faible disponibilité de N est liée au régime hydrique. Avec 3000 à 4000 mm de drainage par an, les risques de lessivage de N sont très élevés, surtout en début d'hivernage où les fortes minéralisations coïncident avec de grandes quantités de drainage et un faible développement de la végétation herbacée. De même, l'excès d'eau en ces points entraîne des pourrissements foliaires, et des problèmes d'absorption de N au cours de la croissance. Une fertilisation phosphatée effectuée la même année tend en effet à montrer que la disponibilité réelle de N serait de 1,6% en amont des diguettes et de 2,2% dans l'espace IN. Une fertilisation au NPK, à dose très élevée de N (400 kg/ha) sous forme d'urée, permet d'enregistrer un taux de récupération, par les végétations herbacées, de près de 40% ainsi que des pertes aussi élevées (41%) en une saison de croissance. L'azote dans la biomasse à la floraison est dilué en amont des diguettes: 0,67% en AM contre 0,92% en IN sans fertilisation au cours de la deuxième année, respectivement 1,45% et 1,64% avec la fertilisation au NPK. Maintenu pendant trois saisons de croissance successives, ce régime hydrique a conduit à une limitation importante de la production de la strate herbacée par l'azote. Au cours de la saison de croissance 1993, le taux de N dans la biomasse à la floraison (qui survient autour du 15 septembre) est de 0,35% en amont des ouvrages anti-érosifs contre 0,65% entre les diguettes. Cette valeur (0,35%) est inférieure à celle de 0,50% considérée comme traduisant une limitation complète de la production par N. Cette faible disponibilité de l'azote explique le faible niveau d'absorption de P.

En analysant les flux de N et P entre les espaces IN et les espaces AM d'une part, et entre ces espaces et l'extérieur d'autre part, on a tenté d'approcher un bilan annuel de ces flux à la fin de la deuxième saison de croissance, et de mesurer le fossé qui sépare la situation des différents traitements d'un équilibre azoté théorique. Il ressort de l'exercice, effectué pour l'horizon 0-30 cm, que les flux et le bilan annuel de N et P dans ces espaces aménagés, entièrement protégés de l'exploitation et du feu, sont essentiellement influencés par deux phénomènes: en amont des diguettes, c'est l'importance des pertes par lixiviation qui constitue le facteur limitant d'une stabilisation du bilan d'azote, malgré l'accumulation annuelle de 35 à 40 kg/ha d'azote total en provenance des espaces IN. Dans ces derniers espaces par contre, l'équilibre des flux de N et P est largement conditionné par une réduction des pertes par érosion et ruissellement. Ainsi, le paillage réalisé deux années auparavant a conduit à une amélioration du bilan d'azote de 22% par rapport à l'espace aménagé sans paille, même si le bilan global dans chaque parcelle demeurerait théoriquement négatif.

Le développement du couvert végétal dans l'espace inter-diguettes apparaît donc comme le paramètre essentiel d'un écrêtage des excédents hydriques en AM et d'une stabilisation des pertes minérales (tant en IN qu'en AM), conditions d'une évolution durable des processus de régénération. Une analyse globale de la situation montre une évolution significative des processus de régénération de la première à la seconde saison des pluies suivant l'aménagement. Les écarts entre les espaces IN et AM se sont en effet amoindris entre 1991 et 1992. Avec un volume pluviométrique comparable, l'infiltration dans les espaces IN et le niveau d'utilisation de l'eau par les plantes (illustré par l'ETR) se sont en effet améliorés en 1992 de 10 à 40% selon les traitements. En même temps, le développement spectaculaire de la strate ligneuse en amont des diguettes a entraîné une augmentation de 25% de l'ETR malgré une infiltration totale en réduction de 20%. Le drainage a en conséquence été réduit de 22% en moyenne.

Liste des tableaux

- Tableau 2.1** Evolution de l'occupation agropastorale des terres dans la zone de Bissiga-Nakambé entre 1955 et 1990.
- Tableau 2.2** Evolution des différentes formations végétales entre 1955 et 1990 dans la zone de Bissiga-Nakambé.
- Tableau 4.1** Répartition par province et selon le but initial des sites de régénération des sols visités au cours de l'inventaire de 1990 et 1992.
- Tableau 4.2** Les combinaisons de mesures de C.E.S utilisées pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux. Nombre de cas rencontrés dans 27 sites décrits.
- Tableau 6.1** Tableau récapitulatif des relations entre le ruissellement R et la hauteur de pluie P d'une part et l'intensité maximale en 30 min I_{30} (mm/h) d'autre part. Valeurs mesurées en 1991.
- Tableau 7.1** La germination des espèces herbacées en début de saison pluvieuse 1992. Résultats d'observations en Amont et dans l'espace Inter-diguettes
- Tableau 7.2** Le recouvrement de la strate herbacée et son évolution dans des parcelles nouvellement aménagées et de vieilles parcelles. Forêt classée de Yabo.
- Tableau 7.3** Valeurs calculées des indices de diversité (H et E) et d'équitabilité (IS et ES) dans les stations de relevés floristiques de Yabo et Bissiga.
- Tableau 7.4** Evolution de la biomasse aérienne, de la nécromasse accumulée, la litière totale, la litière résiduelle 1992 et la production primaire aérienne nette au cours de la saison 1993 à Yabo.
- Tableau 7.5** La production de biomasse aérienne au "standing crop" maximal dans les différentes parcelles et traitements des stations de Yabo et Bissiga, entre 1991 et 1993.
- Tableau 7.6** Répartition de la biomasse racinaire herbacée à la floraison, par couches de sol en amont (AM) et entre les diguettes isohypses (IN). Yabo, 1992.
- Tableau 7.7** Densité des plantules de *Acacia seyal*, son évolution au cours de la période 8/91-6/92 et le taux de survie (TS) observé au bout d'un an, selon la position du point d'observation par rapport aux diguettes isohypses.
- Tableau 7.8** Densité de la régénération ligneuse et intensité des aménagements de C.E.S.

- Tableau 7.9** Les espèces ligneuses et leur importance dans les aménagements de deux à trois ans.
- Tableau 7.10** Biomasse foliaire totale de la strate ligneuse au cours de la saison 1992/93.
- Tableau 8.1** Caractéristiques chimiques des sols nus de la station de YABO, avant le début du processus de régénération: avril 1991.
- Tableau 8.2** Réserves minérales dans l'horizon superficiel du sol (0-30 cm) à la période de la biomasse maximale, en amont des diguettes et entre les diguettes, sur terrains non fertilisés (Tem) et sur terrains fertilisés au NPK. Yabo 1992.
- Tableau 8.3** Taux de N, P et K dans la biomasse sans légumineuses, rapport P/N et immobilisations correspondantes à la floraison. Saison de croissance 1992.
- Tableau 8.4** Evolution de la biomasse sur pied, du taux de N, P et K et du rapport P/N dans la biomasse herbacée au cours de la saison de croissance 1993
- Tableau 8.5** N, P et K dans les légumineuses et la végétation environnante à la floraison sur terrains fertilisés et non fertilisés, selon le régime hydrique: Yabo, 1992.
- Tableau 8.6** Pertes chimiques par érosion et ruissellement mesurées sur différents états de surface au cours de l'hivernage 1992.
- Tableau 8.7** Mobilisations de N, P et K par l'érosion et le ruissellement dans la station de Yabo au cour de l'hivernage 1992.
- Tableau 8.8** Réserves totales de N, P et K du sol à différentes profondeurs, dans des parcelles fertilisées (au NPK) et des parcelles témoins voisines (T), selon le régime hydrique.
- Tableau 8.9** Biomasse foliaire et absorption de N, P et K par les feuilles de la végétation ligneuse spontanée dans les parcelles en régénération de 2 ans. Yabo 1992.
- Tableau 8.10** Le bilan d'azote entre l'amont et les espaces inter-diguettes pour la période octobre 1991-octobre 1992 à la station de Yabo.
- Tableau 8.11** Données utilisées dans l'équation d'équilibre de l'azote.
- Tableau 8.12** Bilan d'azote et conditions d'équilibre. Valeurs des pertes de N ($f \times N_b$) pour lesquelles la situation des différents traitements serait en équilibre dans leur régime actuel de gestion. Yabo, fin de la saison de croissance 1992.
- Tableau 8.13** Le bilan de phosphore pour la période octobre 1991- octobre 1992 à la station de Yabo.

Liste des figures

- Figure 2.1** Les domaines phyto-géographiques au Burkina Faso,
- Figure 3.1** La capacité de charge selon la courbe théorique de croissance d'une population animale et selon le modèle d'équilibre de Dempster et Polard.
- Figure 3.2** Sous-exploitation et sur-exploitation des ressources naturelles renouvelables dans les systèmes d'utilisation des terres des régions soudano-sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, d'après de Bie et Geerling.
- Figure 3.3** Stabilisation et régénération des systèmes sylvo-pastoraux, d'après de Bie et Geerling.
- Figure 3.4** Hypothèse, sur l'évolution du couvert végétal en fonction des conditions d'exploitation, applicable aux espaces sylvo-pastoraux soudano-sahéliens du plateau central du Burkina.
- Figure 4.1** Carte de localisation des aménagements de C.E.S. pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux dans le plateau central.
- Figure 4.2** Dispositif utilisé en sous-solage croisé à You-Ansolma (Yatenga).
- Figure 5.1** Localisation des sites d'étude des forêts classées de Yabo et Bissiga
- Figure 5.2** Evolution de la pluviométrie moyenne annuelle à la station de Mané entre 1962 et 1992.
- Figure 5.3** Les principaux paysages et types de sols de la forêt de Yabo, d'après un transect SE-NO
- Figure 5.4** Occupation des sols et évolution du couvert végétal autour de la forêt classée de Yabo entre 1956 et 1980.
- Figure 5.5** Site anti-érosif de la forêt de Yabo: Carte de sondage pédologique.
- Figure 5.6** Site anti-érosif de la forêt de Yabo: carte des états de surface un an après l'aménagement.
- Figure 5.7** Dispositif expérimental de base et emplacements de mesure du ruissellement et du stock d'eau du sol. Station de la forêt classée de Yabo.
- Figure 6.1** Modèle du fonctionnement hydrologique du système d'absorption du ruissellement (diguettes en terre) et base schématique d'évaluation des processus de régénération.

- Figure 6.2** Les droites de la régression $H_v = f(N/N_0)$, de la sonde à neutrons pour les sols du site anti-érosif de Yabo.
- Figure 6.3** Répartition décadaire de la pluviométrie en 1991, 1992 et 1993 dans la forêt de Yabo.
- Figure 6.4** Relations entre Ruissellement et Pluviométrie dans trois classes de parcelles définies selon le recouvrement, Saison des pluies 1991, forêt classée de Yabo.
- Figure 6.5** Evolution des profils d'humidité en Amont des diguettes anti-érosives, dans l'espace inter-diguettes sans paillage et avec paillage au cours de la saison des pluies 1991, forêt classée de Yabo.
- Figure 6.6** Evolution des profils d'humidité à l'Aval des diguettes sans fossé, avec fossé et avec une haie vive arbustive de 7 ans. Saison des pluies 1991, forêt classée de Yabo.
- Figure 6.7** Evolution du stock d'eau du sol dans l'espace "IN" au cours de la saison des pluies 1991 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.8** Evolution du stock d'eau du sol dans l'espace "IN" au cours de la saison des pluies 1992 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.9** Evolution du stock d'eau du sol en amont des diguettes au cours de la saison des pluies 1991 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt de Yabo.
- Figure 6.10** Evolution du stock d'eau du sol en amont des diguettes au cours de la saison des pluies 1992 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt de Yabo.
- Figure 6.11** Evolution du stock d'eau du sol en aval des diguettes au cours de la saison des pluies 1991 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt de Yabo.
- Figure 6.12** Evolution du stock d'eau du sol en aval des diguettes au cours de la saison des pluies 1992 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Forêt de Yabo.
- Figure 6.13** L'Evapotranspiration cumulée dans les espaces "IN" au cours des saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.14** ETR journalière et ETR cumulée en amont des diguettes: Yabo, saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.15** Drainage cumulé en Amont des diguettes pendant les saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.16** ETR journalière et ETR cumulée en aval des diguettes sans fossé (--AVs) et de diguettes plantées d'une haie vive de 7-8 ans (82/AV). Yabo, saisons des pluies 1991 et 1992.

- Figure 6.17** Drainage cumulé en aval des diguettes; saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.
- Figure 6.18** Approche schématique du bilan de l'eau dans les aménagements de C.E.S. de type isohypsés au cours de la 2ème saison des pluies suivant l'aménagement. Forêt classée de Yabo 1992.
- Figure 7.1** Les différents états de la production primaire des herbacées au stade de la biomasse aérienne maximale au Sahel.
- Figure 7.2** Répartition de la pluviométrie et vagues de germination des espèces herbacées en début d'hivernage 1992 dans la forêt classée de Yabo.
- Figure 7.3** Analyse Factorielle des correspondances de 12 relevés d'âge variable et 81 espèces herbacées de la forêt de Yabo. Représentation dans le plan des axes 1 et 2.
- Figure 7.4** La production primaire aérienne nette (PPN), la biomasse maximale, la nécromasse accumulée et l'évolution de la litière totale au cours de l'hivernage 1993 à Yabo.
- Figure 7.5** Répartition selon la profondeur, de la biomasse racinaire moyenne, de celle de trois formations non fertilisées sous deux régimes hydriques différents et de formations à *Pennisetum pedicellatum* sous trois traitements différents. Forêt classée de Yabo, 1992.
- Figure 7.6** Relation entre la hauteur totale et le diamètre à la base d'un peuplement de *Acacia seyal* selon l'âge des individus. Forêt classée de Yabo, 1993
- Figure 8.1** Evolution de Nb, Pb et Kb dans la biomasse au cours de la saison de végétation 1993, forêt classée de Yabo.
- Figure 8.2** Evolution du rapport P/N dans la biomasse au cours de la saison 1993 à Yabo.
- Figure 8.3** Immobilisations de N, P et K au cours de la saison de végétation, en fonction du régime hydrique. Forêt classée de Yabo, 1993.
- Figure 8.4** Cycle de la biomasse entre octobre 1992 et octobre 1993, dans la forêt classée de Yabo.

Liste des photos

- Photo 4.1** Les diguettes isohypses concentrent l'eau et les semences et créent de meilleures conditions de germination. Yabo, 1991.
- Photo 4.2** Le colmatage de cordons pierreux peut les transformer en banquettes déversantes: Tagala (Sanmatenga) 1992.
- Photo 4.3** Les haies vives plantées sur les courbes de niveau forment un obstacle anti-érosif sous lequel peut se développer une végétation herbacée: Koussougou 1992.
- Photo 4.4** Micro-bassins ou demi-lunes. Elles accompagnent toujours un reboisement: plantations de *Acacia nilotica* dans la forêt de Bissiga, 1992.
- Photo 4.5** Le sous-solage à sec avec une dent à traction animale n'a pas été suffisant pour stimuler l'installation de la végétation: You dans le Yatenga, 1992.
- Photo 4.6** Le sous-solage sur sols superficiels, même motorisé, offre peu d'intérêt. A You-Ansolma (Yatenga) après 6 ans, quelques touffes d'herbes sur les lignes de sous-solage. 1992
- Photo 4.7** L'épandage de fumier de petits ruminants après un labour du sol est un procédé de régénération des ligneux: des jeunes pousses d'*Acacia spp.* issues des graines ingérées et rejetées par les animaux. m.e.d. de Djibo (Soum), 1992
- Photo 4.8** Les haies vives d'arbustes sont plantées le long des diguettes pour stabiliser celles qui sont en terre. Vue d'une haie de *Acacia seyal* de 4 ans issue de semis direct à Bissiga, 1991.
- Photo 4.9** La coupe périodique des haies vives peut fournir du paillis (mulch) pour la régénération des espaces demeurés nus: Yabo, 1992.
- Photo 4.10** La régénération assistée des ligneux dans des parcelles temporairement mises en culture: l'agriculture au service de la régénération des pâturages, Djibo, 1992.
- Photo 6.1** Vue d'une placette de mesure du ruissellement en tôle de 1m² (0,80m x1,25m)

Liste des abréviations

"6S"	Se Servir de la Saison Sèche en Savane et au Sahel (ONG internationale basée au Burkina Faso)
ADRK	Association pour le Développement de la Région de Kaya (ONG Burkinabè basée à Kaya)
AFVP	Association Française des Volontaires du Progrès (ONG française opérant au Burkina Faso)
AFC	Analyse Factorielle des Correspondances
AM	Espace situé en amont immédiat d'une diguette isohypse
AV	Espace situé en aval immédiat d'une diguette isohypse
AVs	Espace AV sans fossé
AVf	Espace AV avec un fossé pratiqué lors de la confection de la diguette
BEF	Sol brun eutrophe ferruginisé
BUNASOL	Bureau national des sols du Burkina Faso
CSi	Contribution spécifique de l'espèce i dans un groupement floristique
CSIM	Contribution spécifique massique de l'espèce i (à la biomasse totale du groupement végétal)
CTFT	Centre Technique Forestier Tropical (aujourd'hui CIRAD-Forêts)
D	Drainage total
DA	Densité apparente sèche du sol (g/cm^3)
DI	Drainage latéral ou oblique
Dr	Drainage (ou percolation) profond
dS	Variation du stock d'eau du sol entre deux mesures
E	Indice d'équitabilité de Shannon-Weaver
EAP	Espaces agro-pastoraux
ES	Indice d'équitabilité de Simpson
ESP(e.s.p.)	Espaces sylvo-pastoraux
f	Fraction de N dans la biomasse aérienne de la strate herbacée qui se perd annuellement.
FTL	Sol ferrugineux tropical lessivé
FTLC	Sol ferrugineux tropical lessivé à concrétions
FSi	Fréquence spécifique de l'espèce végétale i dans un relevé floristique
H	Indice de diversité de Shannon-Weaver
Hv	Teneur en eau du sol (en % du volume de sol)
Hp	Teneur en eau d'un sol (en % du poids de sol)
I	Infiltration (en mm)
IEMVT	Institut d'Etudes et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux
Im	Intensité moyenne de la pluie (mm/heure)
IN	Espace situé entre deux diguettes successives, excluant l'amont et l'aval
I ₃₀	Intensité maximale de pluie enregistrée en 30 minutes (mm/heure)
IS	Indice de diversité de Simpson
Kb	Taux de potassium dans la biomasse (%)
Kc	Koefficient cultural
KR	Taux (ou coefficient) de ruissellement (en %P)

KRM	Taux de ruissellement moyen annuel (en %P)
LPI	Line-point intercept
LVIA	Association des Volontaires Laïcs d'Italie: ONG italienne opérant au Burkina Faso
M.E.D(m.e.d)	Mise-en-défens
M.S.	Matière sèche
M.O (m.o.)	Matière organique (du sol)
Nb	Taux d'azote dans la biomasse (%)
NB	Quantité totale de N immobilisée dans la biomasse aérienne herbacée à la floraison.
NA	Quantités totales de N annuellement apportées au système écologique étudié.
N _{LH}	Quantités de N immobilisées dans la biomasse aérienne herbacée à la floraison et dans la biomasse foliaire des ligneux d'un système écologique.
Nleg	Taux d'azote dans la biomasse des légumineuses (%)
ORSTOM	Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.
P	Pluviométrie (mm)
P ₀	Pluie d'imbibition (mm)
PAE	Projet Agro-Ecologie: Projet conduit par une ONG allemande au Burkina Faso
PPN	Production primaire aérienne nette de la strate herbacée
Pb	Taux de phosphore dans la biomasse (%)
PCQ	Point centered quarter
Pleg	Taux de phosphore dans la biomasse des légumineuses (%)
P/N	Rapport du taux de P au taux de N dans la biomasse
PPI	Plan de Parrainage International: ONG internationale opérant au Burkina Faso.
R	Ruissellement (mm)
RAF	Réorganisation agraire et foncière (au Burkina Faso)
TPE	Sol tropical peu évolué

1 Introduction générale

Les caractéristiques principales de la région sahélienne sont la faible pluviométrie et sa variabilité extrême dans le temps et l'espace, la forte concentration des pluies dans le temps et leur répartition irrégulière pendant cette période, le niveau élevé de l'évapotranspiration et l'hétérogénéité du substrat qui se traduit dans une végétation dont la physionomie reflète la redistribution des eaux de pluie. Mais, au-delà du Sahel typique, la savane soudanienne, où la pluviométrie est supérieure à 600 mm, connaît aussi depuis les années 1980 le problème de la désertification. Le phénomène n'est pas seulement illustré par les dunes vives qui se développent dans la partie septentrionale de la région. La désertification a lieu partout où la dégradation physique ou chimique du sol, causé par l'homme, enlève à l'écosystème une partie de l'énergie dont il a besoin pour récupérer après de longues ou courtes périodes de sécheresse et/ou de surexploitation (Stroosnijder, 1992).

Sur le plan écologique, les perturbations climatiques influencent la dynamique des écosystèmes et surtout la qualité des rapports entre l'homme et son milieu. La pluviosité a globalement subi une baisse sans qu'il ne soit possible de dire s'il s'agit d'un phénomène exceptionnel ou d'une période naturelle de sécheresse prolongée, en raison de l'absence de données antérieures aux 100 dernières années. Les équilibres dynamiques des végétations, longtemps conservés face aux changements climatiques, sont aujourd'hui perturbés par une nouvelle donne: le niveau élevé de la pression humaine. Il apparaît ainsi clairement une réduction globale du couvert végétal et des modifications à caractère durable dans la composition des végétations et, en général, dans la diversité biologique des écosystèmes naturels.

Au plan socio-économique, le niveau actuel de la pression humaine sur les ressources naturelles renouvelables n'a jamais été atteint auparavant. Dans certaines parties de la région, l'intensité d'exploitation des ressources renouvelables a dépassé leur capacité naturelle de renouvellement. Ce qui, conjugué aux effets des perturbations climatiques, compromet la durabilité des systèmes actuels d'utilisation des terres et fait peser de graves menaces sur la sécurité alimentaire des populations. Dans le Sahel typique (200 à 400 mm/an), l'agriculture est aléatoire car la pluviométrie est le facteur limitant. L'élevage qui est l'activité principale est étroitement dépendant des quantités et de la qualité du fourrage et de l'eau disponible. Plus au sud, la savane reçoit relativement plus d'eau qui permet l'agriculture. C'est là aussi cependant que les densités de population et les pressions exercées sur les ressources naturelles sont les plus élevées. Il y a donc plus d'eau pour la production agricole mais celle-ci devient à son tour limitée par la nature et la qualité du substrat en particulier la fertilité des sols.

Sur le plateau central du Burkina Faso, la dégradation des terres, si elle est liée aux facteurs climatiques, est surtout favorisée par l'action de l'homme. L'eau est devenue à la fois un facteur de production et une cause de dégradation des terres, en raison de l'importance de la déforestation et de l'érosion qu'elle engendre. Ainsi entre 1987 et 1991 les superficies mises en culture ont connu une régression de 1,7% par an dans le centre-nord du pays (provinces du *Sanmatenga*, du *Bam* et du *Namentenga*) pour cause de dégradation poussée des sols. Dans le même intervalle de temps, la région du nord-ouest ou "*Boucle du Mouhoun*" (provinces du *Sourou*, *Mouhoun* et *Kossi*) enregistrait chaque année une expansion des superficies défrichées de 47.000 ha, soit 10% de la superficie totale de la région

(Clappers, 1993). La région du centre-nord connaît au même moment un mouvement migratoire continu en direction, entre autres régions, de l'ouest, de l'est, du sud-ouest et du nord-ouest. L'agriculture est ainsi devenue au Burkina le premier facteur de déforestation et de dégradation des sols.

L'élevage, confronté aux ressources fourragères incertaines dans le Nord, a définitivement rompu avec la traditionnelle transhumance saisonnière: la plupart des éleveurs ont définitivement migré vers les zones de savane où le fourrage et l'eau sont plus disponibles, au moins en quantité, depuis que ces zones sont libérées de la trypanosomiase animale.

Dans la zone de transition soudano-sahélienne, l'élevage est devenu l'épargne de l'agriculteur et son assurance contre les mauvaises récoltes. C'est cependant aussi dans cette zone que la dégradation des sols touche à la fois aussi fortement les terres agricoles que les espaces sylvo-pastoraux: les superficies dénudées connaissent un développement exponentiel. De sorte que les systèmes de production rurale sont dans leur ensemble à la croisée des chemins: ils doivent opérer des changements jamais réalisés et consentir des investissements difficiles sans lesquels l'avenir se trouverait dans l'exode permanent vers d'hypothétiques contrées plus hospitalières. Dans les choix à opérer, les populations mais aussi les organismes d'appui au développement, semblent généralement opter de parer au plus urgent: garantir une production minimale autosuffisante. Les programmes de conservation des eaux et des sols (C.E.S.) se sont multipliés dans la région centrale du pays au cours des dix dernières années. Le mouvement s'étend même dans les zones dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 800 et 1000 mm. Ces programmes concernent quasi exclusivement les espaces agricoles où les dispositifs utilisés visent à contrôler le ruissellement et accroître la disponibilité de l'eau pour les cultures. Lorsque l'eau ainsi collectée n'est plus limitante, la production souffre alors de la pauvreté minérale des sols. Et à défaut de produire assez de matière organique ou de disposer d'engrais minéraux trop chers, les nouveaux défrichements restent la seule possibilité du système; d'où les terres marginales de plus en plus mises en culture, même pour quelques années. Les mesures de C.E.S. apparaissent donc aujourd'hui comme une panacée face aux problèmes d'épuisement des terres; elles permettent d'obtenir des résultats à court terme, mais ces bénéfices sont obtenus au prix de l'érosion et du ruissellement dans les terrains situés dans les espaces formant le bassin versant (Kessler et Laban, 1994). Ces espaces, essentiellement constitués par les terres sylvo-pastorales incultes ou non encore défrichées, sont très peu concernés par les mesures de réhabilitation ou de protection.

De son côté, la Recherche Agricole a suivi le mouvement: les travaux destinés à conserver et améliorer les conditions physico-chimiques des sols sont généralement concentrés dans les espaces agricoles où sont testées les normes d'efficacité et décidés les choix technologiques en matière de C.E.S. et de gestion de la fertilité des sols. Très peu de travaux sont effectués en amont, visant une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes dans leur ensemble (Pieri et al., 1994). L'évolution de l'environnement écologique et, plus récemment encore celle des conditions socio-économiques de la production agricole dans la plupart des pays du Sahel, semblent cependant placer la réhabilitation des terres en général, et la gestion de la fertilité des terres agricoles en particulier, sous l'angle de la maîtrise des transferts organiques et minéraux entre les différents compartiments des terroirs, voire des paysages. Dès lors, la place de la "brousse" devient plus qu'importante, en tant que principale source de matière organique pour les sols, de fourrage pour les animaux et de combustible ligneux pour les populations. La recherche devrait donc aller au-delà des travaux adaptatifs pour embrasser, peut-être plus que jamais, une vision stratégique. Car les équilibres durables, autant qu'ils soient possibles, ne sont

envisageables dans les systèmes de production actuels, basés sur la capacité de charge naturelle des agrosystèmes, qu'en les considérant dans les équilibres globaux d'ensembles fonctionnels agro-sylvo-pastoraux.

Le travail dont les résultats sont discutés ci-après n'a pas la prétention d'être un modèle de recherche stratégique. Il n'est qu'une partie d'un programme de recherche plus vaste, portant sur l'aménagement et la gestion de l'espace sylvo-pastoral dans la région soudano-sahélienne. Ce programme lui-même vise en partie à comprendre et, pourquoi pas, attirer davantage l'attention des planificateurs du développement sur le rôle des espaces sylvo-pastoraux dans l'utilisation durable des terres dans la région. Nos recherches, conduites de 1990 à 1993, sont concentrées sur l'étude des processus physico-chimiques et biologiques qui accompagnent la mise en oeuvre des mesures de C.E.S. prises dans le but de réhabiliter des espaces soustraits depuis longtemps à l'agriculture (ou jamais défrichés) et affectés par une dégradation biologique et physique avancée. Elles visent à comprendre dans quelle mesure ces écosystèmes naturels, remis dans des conditions de fonctionnement favorables, sont susceptibles de se régénérer de manière durable. La quantification des flux et bilans de l'eau, de la matière organique et des éléments nutritifs résultant de ces mesures de C.E.S. peuvent renseigner sur la qualité des processus, leurs limites et les conditions de leur durabilité. En définitive, nous espérons ouvrir une fenêtre supplémentaire sur la connaissance des possibilités réelles et supposées des espaces sylvo-pastoraux à assurer, dans les conditions des zones soudano-sahéliennes, les fonctions de production sylvo-pastorale et d'appui à la production agro-pastorale.

Le rapport présente d'abord un point sur la dynamique des écosystèmes sylvo-pastoraux dans la région d'étude et au Burkina en général (Chapitre 2). Après un aperçu sur les concepts et les processus qui caractérisent cette dynamique, les expériences en matière de régénération des espaces sylvo-pastoraux dans la région sont ensuite inventoriées et analysées selon les critères qui déterminent le plus leur efficacité (Chapitres 3 et 4). A partir des résultats de 3 années de mesures dans deux zones aménagées entre 1982 et 1990 par les services forestiers (Chapitre 5), une étude quantitative des processus de la régénération a enfin été tentée. On a tour à tour analysé les paramètres du bilan hydrique (Chapitre 6), la dynamique des végétations herbacées et ligneuses (Chapitre 7) et les flux des éléments nutritifs majeurs, N, P, K (Chapitre 8), tels qu'ils sont influencés dans l'espace et le temps par des mesures de C.E.S. d'intensité et d'âge variables. En termes pratiques, l'étude devrait déboucher sur la mise au point de méthodes simples pour évaluer, à partir de paramètres simples, l'évolution des terrains en régénération et juger de l'efficacité des mesures prises à cet effet. Elle devrait enfin permettre de mieux comprendre les relations échec/succès des mesures de régénération.

2 Les écosystèmes sylvo-pastoraux

2.1 Introduction

Le Burkina Faso, au coeur de l'Afrique de l'Ouest, est, comme les autres pays de la région sahélienne, caractérisé par l'existence d'une saison sèche marquée, alternant avec une saison des pluies plus ou moins longue. Les variations en volume et en durée des pluies déterminent ainsi un gradient d'aridité du sud vers le nord. Cette situation est à l'origine d'une zonation des différentes formations naturelles. Du nord vers le sud, on passe ainsi des steppes sahéliennes aux savanes à herbacées annuelles puis aux savanes à herbacées pérennes. Du point de vue du couvert végétal, Guinko (1984) distingue (Figure 2.1):

Un domaine sahélien au Nord qui comprend

- **un secteur sahélien:** pluviométrie (P) < 600 mm/an pour 8 à 9 mois secs, et des steppes herbeuses et arbustives;
- **un secteur subsahélien:** P compris entre 600 et 750 mm/an pour 7 à 8 mois secs; caractérisé par une steppe arbustive à arborée où se mélangent des espèces soudaniennes et sahéliennes des genres *Acacia*, *Capparis*, *Bauhinia*, *Pterocarpus*, et parcourue par quelques forêts galeries.

Le domaine sahélien est la zone d'élevage par excellence où les conditions climatiques rendent l'agriculture plutôt aléatoire et où domine un élevage essentiellement transhumant.

Un domaine soudanien au Sud avec aussi deux secteurs.

- **Un secteur soudanien septentrional:** P compris entre 750 et 1000 mm pour 6 à 7 mois secs, caractérisé par des savanes arbustives et arborées claires. C'est le domaine par excellence des parcs arborés dominés par *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Lannea microcarpa*, *Tamarindus indica* et parcourus de forêts galeries à *Mitragyna inermis* et *Daniellia oliveri*. Ce secteur inclut avec le secteur sub-sahélien, l'essentiel du plateau central.
- **Un secteur soudanien méridional** où la pluviométrie annuelle est comprise entre 1000 et 1400 mm pour 4 à 6 mois secs. Il est caractérisé par des savanes boisées et des forêts claires dont l'élément caractéristique est la présence de *Isoberlinia doka*. Les galeries forestières sont dominées par des espèces comme *Antiaris africana*, *Antidesma venosum* (liés aux cours d'eau permanents), ou *Borassus aethiopum*, *Khaya senegalensis*, *Daniellia oliveri*, *Anogeisus leiocarpus*.

Cette zone, encore relativement sous-peuplée, est parcourue chaque année par les feux de brousse; elle accueille depuis deux décennies déjà un important mouvement migratoire en provenance du Nord et du Centre du pays.

2.2 Les espaces sylvo-pastoraux au Burkina Faso

2.2.1 Définitions et concepts

Dans les systèmes traditionnels d'utilisation des terres de la région, on distingue globalement deux grandes unités spatiales: les terres agricoles et "la brousse". Dans cette dernière, on retrouve les jachères et les terres en friche, communément appelées pâturages ou forêts naturelles. En termes d'utilisation réelle, ces unités correspondent à deux ensembles:

les espaces agro-pastoraux (EAP) dans lesquels l'agriculture pluviale est le système de production dominant. La dynamique temporelle de leur utilisation permet cependant d'y inclure les jachères de courte et moyenne durée (jusqu'à 10 ans). Au cours de la saison sèche, le bétail y pâture les résidus de récoltes et fume ainsi les champs.

les espaces sylvo-pastoraux (ESP) où l'agriculture est quasi inexistante et dont les priorités d'utilisation sont le pâturage, l'exploitation sylvicole, la cueillette. La législation forestière distingue dans ces espaces, deux domaines: le domaine classé, géré par le Service forestier représentant l'Etat et où des droits d'usage sont reconnus et règlementés pour les populations riveraines et le domaine protégé, librement accessible aux utilisateurs.

Graaf, v.d. (1992) distingue dans ce dernier domaine (protégé) deux catégories: **les terroirs sylvo-pastoraux villageois** qui représentent la brousse située autour des villages (essentiellement dans le secteur soudanien ou sub-sahélien) et **les parcours sylvopastoraux** constitués essentiellement de domaines d'élevage (notamment dans le nord et le sud du Sahel). Dans la présente étude, le concept d'ESP représente donc cet ensemble des terres, incluant les terrains dégradés ou abandonnés par l'agriculture pour cause d'épuisement des sols.

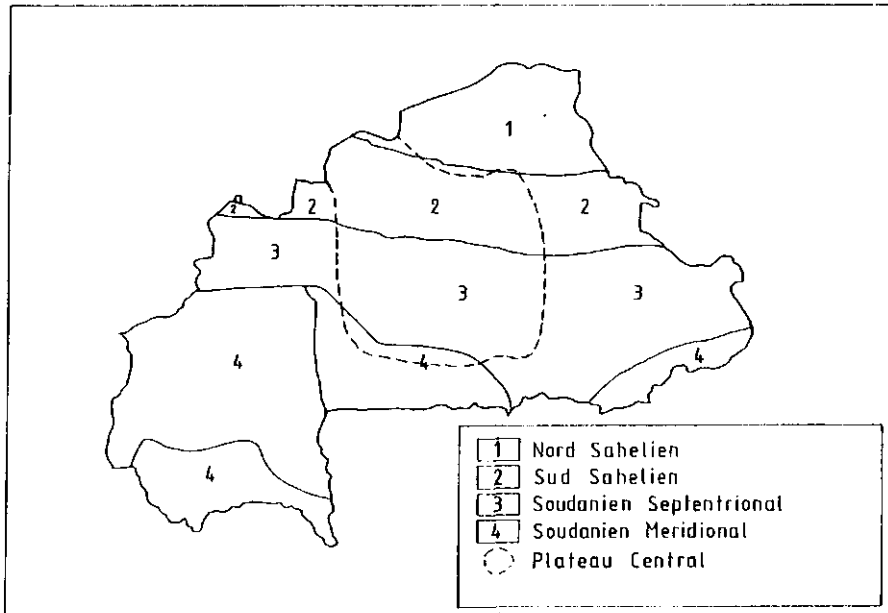


Figure 2.1 Les domaines phyto-géographiques au Burkina Faso, d'après Guinko, 1984.

2.2.2 Les fonctions des espaces sylvo-pastoraux

Les ESP assument dans la région sahélienne une triple fonction. Ils jouent le rôle de pâturage pour le bétail, fournissent le bois de feu et de service, les fruits et autres produits non ligneux nécessaires aux populations d'éleveurs ou d'agro-pasteurs. Ils constituent aussi la réserve de terres cultivables dans la zone soudanienne ainsi que la principale source de matière organique pour les champs. Ils assument enfin la régulation des équilibres hydrologiques des terroirs.

Au Burkina Faso, la quantité et la qualité des ressources naturelles, liées aux conditions climatiques et surtout le niveau de la pression humaine et animale sur ces ressources, sont les facteurs qui déterminent le plus leur situation actuelle et future. En effet, face à une extension accélérée des terres agricoles pour nourrir une population sans cesse croissante, l'espace sylvo-pastoral est de plus en plus morcelé; il se rétrécit progressivement, ne laissant dans certaines zones, comme véritables aires de pâturage, que les domaines classés.

2.3 L'utilisation des e.s.p. au plateau central

2.3.1 Le région du plateau central

Le plateau central s'inscrit entre 11°30' à 14° Nord et 0° à 3° Ouest, et couvre environ 23 % de la superficie du pays avec 63.000 km² (Figure 2.1). Il abritait en 1985, 48 % de la population nationale pour une densité comprise entre 50 et 90 (ou plus) habitants/km²; la moyenne nationale était de 29 habitants/km². C'est une des régions les plus plates du pays avec une altitude moyenne de 300 m (Kessler & Boni, 1991), excepté le centre-nord parcouru par un réseau collinaire dont l'altitude peut atteindre 500 m. Il fait partie, sur le plan géologique, du bouclier africain constitué d'un socle cristallin et de formations birrimiennes du précambrien, sédimentaires, volcaniques ou plutoniques (Vlaar & Mosselmans, 1989).

Soumise à de fortes variabilités inter-annuelles de la pluviométrie - 20 à 30 % selon Sivakumar et Gnoumou, 1987 - la région connaît des fluctuations climatiques qui se traduisent par des périodes sèches assez régulières.

La nature des sols est liée aux formations géologiques et à la géomorphologie: sur les plateaux, des sols peu profonds de type ferrugineux induré. Sur les glacis, les sols sont gravillonnaires, sableux ou sablo-limoneux, souvent encroûtés ou compactés, à infiltrabilité limitée. Les bas-fonds sont caractérisés par des sols hydromorphes sablo-limoneux, limoneux ou argileux, plus profonds et généralement plus riches, qui offrent les meilleures possibilités agronomiques. La végétation est celle qui caractérise les secteurs subsahélien et soudanien septentrional (cf. 2.1).

2.3.2 L'utilisation des espaces sylvo-pastoraux

Le plateau central Burkinabe est considéré comme une région où le déséquilibre entre capacité de charge des écosystèmes naturels et leur niveau d'exploitation est fortement accusé. (Kessler & Boni, 1981, Zoungrana & Zoungrana, 1992, Hoek v.d & al., 1993). On peut en effet constater que:

le bilan du bois de chauffe et de service est négatif.

Des estimations de la consommation de bois de chauffe faites à l'échelle nationale montrent que la quasi-totalité des provinces de la région connaît un déficit (Marchal, 1983, Parkan, 1986, Paré (1988) cité par Kessler et Boni, 1991). Ce déficit est aggravé par la forte demande des centres urbains (la région abrite 3 des 5 plus grandes agglomérations du pays) qui constituent de véritables "pompes à bois": la consommation en bois de chauffe y est deux fois supérieure à celle des zones rurales; elle atteindrait 600 kg/habitant/an. Pendant ce temps, l'importance des plantations de production et des économies espérées par l'utilisation de foyers améliorés demeure insignifiante. En conséquence, les forêts naturelles constitueront encore pendant longtemps la principale source d'énergie domestique.

Sur le plan des ressources fourragères, la situation n'est guère meilleure. La situation générale du cheptel et des ressources, telle qu'elle ressort des estimations faites en 1986 par Breman et Traoré (1986), se présente comme suit: la source principale d'alimentation du bétail est constituée pour 90% par les herbages naturels et la strate ligneuse. Pour une production primaire totale estimée à $8,6 \times 10^6$ tonnes pour la région qui nous concerne, la fraction ligneuse représente 22%, contre 13% pour les sous-produits agricoles (résidus de récolte supposés disponibles entièrement pour le bétail). Cependant, la majeure partie de ce fourrage est de qualité médiocre, surtout en saison sèche: les herbages, lorsqu'ils sont disponibles, n'offrent plus que des teneurs en azote d'environ 0,6%. Seuls les ligneux et une fraction restreinte des sous-produits agricoles constituent en cette période un fourrage relativement riche (> 2% d'azote). Quant à la situation des ressources en eau, elle serait globalement satisfaisante pour les besoins du cheptel.

La capacité de charge calculée à partir des ressources disponibles, en tenant compte des exigences de qualité, et sur la base d'une exploitation sédentaire en année sèche, était de 7 ha/UBT pour cette région. Elle aurait été de 3 ha/UBT pour un troupeau mixte (idéal, composé de 25 % de petits ruminants) utilisant pleinement le fourrage ligneux, et de 11 ha/UBT pour un troupeau de bovins dont l'utilisation des ligneux est négligeable. Sur la base de la capacité de charge ci-dessus, le plateau central peut abriter 484.000 UBT, alors que les effectifs sont estimés (effectifs de 1989) à 1.459.000 UBT pour douze provinces de la région. Comme on le constate, l'effectif du moment (1989) représentait déjà près du triple de la capacité de charge maximale de la région. Bien entendu, cette situation globale pour le plateau central masque l'importance des disparités entre la partie sud de la région et sa partie nord. Ainsi au Sanmatenga (centre-nord), les écarts entre les disponibilités et les besoins sont encore plus impressionnants: -23% par an pour la quantité totale de matière sèche et -49% par an pour les matières azotées digestibles (MAD) (Hoek v.d. & al., 1993). Le fourrage ligneux qui fournit l'essentiel des MAD est surexploité pendant la saison sèche, en raison de la non-disponibilité ou de la mauvaise qualité des herbacées utilisées aussi à d'autres besoins. Cette surexploitation de la strate ligneuse atteindrait 200% des disponibilités. Quant aux résidus de récolte, ils servent largement comme combustible ou source de potasse. Tout ceci

ne permet pas la reconstitution de la matière organique des sols dont le niveau de dégradation est très élevé.

En ce qui concerne le bilan de la matière organique, les ESP apparaissent comme le "réservoir" de terres cultivables et de matière organique: l'accroissement démographique accéléré (3,5% /an) entraîne proportionnellement une extension des superficies défrichées. On estimait déjà en 1983 que 45% des terres du plateau central étaient cultivées pour une superficie de 30% jugée apte pour l'agriculture (Anonyme, 1983). Dans le Sanmatenga, si 40% des superficies totales sont considérées cultivables (variant de 19 à 74% selon les départements), seulement 23% pourraient être considérées comme non dégradées (Commission provinciale A.T.V, 1990 & 1991, Hoek v.d. & al., 1993); ce qui réduit la proportion des terres réellement aptes pour l'agriculture.

Le système de production agro-pastoral, essentiellement extensif, bénéficie de peu ou pas d'intrants extérieurs. Les transferts (encore mal quantifiés) d'éléments nutritifs des ESP vers les champs, sous forme de biomasse végétale en l'état (paille et mulch) ou transformée (fumier, compost, cendres domestiques), auraient pu constituer la seule voie d'intensification actuellement accessible aux populations. Malheureusement, en mettant en balance le niveau de production des ESP et les exportations minérales des espaces cultivés (par les résidus de récolte, l'érosion, la lixiviation), le bilan actuel est on ne peut plus déséquilibré. Au Sanmatenga par exemple, les besoins en matière organique pour maintenir la fertilité des terres cultivées ont été estimés à 2,7 tonnes/ha/an, pour des apports actuels de 1,3 tonnes/ha/an (Hoek, v.d. & al., 1993). Dans cette proportion, la végétation naturelle provenant des espaces non cultivés (jachères) contribuerait pour 210 kg/ha. Au regard de la productivité actuelle des ESP, de leur niveau d'exploitation et du système d'élevage en vigueur, il faudrait donc 5 à 6 ha de formations naturelles pour maintenir la fertilité de 1 ha de terres cultivées; Breman et Traoré (1986) estiment en effet cette superficie à 6 ha pour la région sahélienne. Toutes choses que le niveau d'occupation actuel des terres ne peut permettre (voir aussi 2.4). Or la faible capacité financière des agro-pasteurs et les coûts actuels des intrants extérieurs excluent toute utilisation, même partielle, d'engrais chimiques dans un système pluvial tourné essentiellement vers la subsistance.

La conséquence de tout cela est que la région est installée dans une spirale de dégradation des ressources naturelles et de pauvreté sans issue immédiate. L'insécurité alimentaire et l'épuisement des terres alimentent depuis plus d'une décennie un mouvement migratoire sans précédent.

2.3.3 Les problèmes de gestion des espaces sylvo-pastoraux

Depuis les années 1960, l'évolution des systèmes de gestion des ressources naturelles en général et des ESP en particulier contribue à expliquer leur état actuel. En effet, jusqu'en 1984, tous les textes réglementant la gestion foncière (décrets de 1932, lois de 1960 et 1963) rendaient l'Etat propriétaire de toutes les terres non immatriculées du domaine privé ainsi que les terres "peu peuplées" ayant fait l'objet d'aménagements spéciaux (vallées des fleuves libérées de l'onchocercose, périmètres irrigués). Mais, en dépit de ces textes, l'essentiel des terres rurales continuait à être géré selon les règles foncières traditionnelles. Au plateau central (ou plateau mossi), la terre est un bien commun qui "appartient" au souverain mais qui est géré par la communauté villageoise selon un système de délégation de pouvoirs dans

lequel sont pris en compte le caractère physique et métaphysique (sacré) de la terre. Si les espaces cultivés et les jachères étaient considérés comme attribués aux premiers occupants, l'espace sylvo-pastoral est, par contre, généralement la "propriété" collective gérée par la communauté villageoise selon les mécanismes édictés par les règles traditionnelles (Coulibaly, 1994).

La réorganisation agraire et foncière (RAF) intervenue en 1984 a marqué un tournant important dans l'évolution des législations officielles et des comportements en matière de gestion des ressources naturelles. Malgré un niveau d'application plutôt faible, en ce qui concerne les terres rurales, la RAF a eu un impact psychologique notable sur les comportements des utilisateurs, en raison de la nature et de l'agitation entretenue autour des structures de gestion mises en place. La relecture en 1991 de la RAF qui a réintroduit la notion de propriété privée (supprimée en 1984) n'a pas influencé ces comportements, tant il est vrai que les nouvelles dispositions n'ont pas fait l'objet de la même publicité. Ainsi, la RAF a réduit dans une certaine mesure l'influence des responsables et du système traditionnels sur le comportement des individus, particulièrement en ce qui concerne la gestion des ressources sylvo-pastorales. De "ressources de gestion communes" qu'ils étaient, les ESP sont devenus des "ressources d'accès libre" (Bognetteau-Verlinden & al., 1992). L'expansion libre des terres cultivées et l'utilisation anarchique des pâturages par les éleveurs, transhumants ou non, ont entraîné leur dégradation. Dans le même temps, la gestion du domaine classé est demeurée pour l'essentiel orientée vers une simple protection et la répression des abus des droits d'usage. Face à l'insuffisance des Services forestiers affectés à ces tâches, toutes les forêts classées de la zone sont aujourd'hui très fortement dégradées sous la pression du bétail et de l'exploitation clandestine du bois. Malgré un certain nombre d'études réalisées en vue de leur aménagement, aucune forêt classée n'a encore un plan d'aménagement officiel.

2.4 La dynamique des paysages

L'évolution du couvert végétal au cours des dernières décennies illustre le mieux la dynamique des paysages sylvo-pastoraux sur le plateau central. Nous nous limiterons, pour illustrer cette situation, à une étude que nous avons menée dans la région de Bissiga-Nakambé, à cheval entre les provinces d'Oubritenga et du Sanmatenga (Coulibaly, 1994). Ce travail a révélé la nature et l'importance des évolutions qui caractérisent les paysages de cette région. La zone d'étude couvre 29640 ha dont 5200 ha constitués par les forêts classées de Bissiga (3200 ha) et Nakabé (2000ha).

2.4.1 Evolution de l'occupation des terres

Elle est résumée par le tableau 2.1. En 35 ans, les superficies cultivées ont plus que doublé (x 2,3 fois) tandis que les jachères ont été réduites de moitié. Si on considère qu'entre 1985 et 1990, 59 % de la population de la zone avait moins de 20 ans, l'accroissement des superficies cultivées ne pourra que s'accroître dans les années à venir. De plus, si 45% des terres sont mises en culture en 1990, le recul important des jachères traduit déjà une

saturation des espaces cultivables; situation que les populations elles-mêmes reconnaissent à travers les défrichements de terres marginales: les critères d'identification des terres à défricher ont radicalement évolué.

Type d'utilisation	superficie 1955 (%)	superficie 1990 (%)	Bilan (%)
Champs	16,5 (20,0)	36,7 (44,5)	+ 122,8
Jachère récente (< 5ans)	1,6 (2,0)	0,9 (1,0)	- 45,1
Jachère ancienne	1,5 (1,8)	0,8 (1,0)	- 46,0
Total	19,6 (23,8)	38,4 (46,5)	+ 96,0

Tableau 2.1 Evolution (en % de la superficie totale) de l'occupation agro-pastorale des terres dans la région de Bissiga-Nakambé entre 1955 et 1990, basée sur une photo-interprétation diachronique. Les valeurs entre () sont les rapports obtenus en excluant les 5200 ha de forêt classée théoriquement soustraits à l'agriculture.

2.4.2 Evolution des formations végétales

Selon les données résumées au tableau 2.2, on note que les 35 dernières années ont été caractérisées par une régression considérable des formations ligneuses denses (-37%) _en raison de l'accroissement des superficies cultivées_ au profit des formations claires. Le plus remarquable est l'accroissement des formations arbustives claires caractéristiques des jachères et des zones sylvo-pastorales dégradées (+147%), des savanes herbeuses (+482%) ainsi que la régression des savanes arborées denses (-48%). L'importance de la dégradation des sols suite à la réduction du couvert végétal est illustrée par le développement des zones dénudées ("zipellé" en langue locale): leur superficie est passée de 1% à près de 4% de la superficie totale en 35 ans, soit une progression de 7,7% l'an. La même progression a été observée dans la forêt de Yabo (Zombré et al., 1993) (voir aussi Chapitre 5). Ces zones dénudées existent un peu partout dans le plateau central mais prennent plus d'importance le long des cours d'eau et davantage dans la partie septentrionale de la région.

Si de manière générale la végétation des zones habitées est plus dégradée que celles des forêts classées, il apparait aussi clairement que ces espaces protégés sont soumis à des pressions supérieures à leur capacité de régénération naturelle. Les espaces nus ont connu une progression de 17%/an dans la forêt classée de Nakabé et de 21%/an dans celle de Bissiga au cours des 35 années. La population riveraine de ces forêts croît effectivement au rythme de 3,5% l'an tandis que la charge animale dépasse le double (0,28 UBT/ha) de la charge admissible (0,13 UBT/ha) (Geerling & de Bie, 1987).

Sur le plan qualitatif, les formations végétales naturelles sont caractérisées par une régression très sensible des herbacées pérennes tel *Andropogon gayanus*, au profit d'annuelles comme *Andropogon pseudapricus* et *Loudetia togoensis*. Seules les pérennes qui offrent peu

d'intérêt persistant (*Cymbopogon schoenanthus*). Cette situation a entraîné le développement de la "culture de *Andropogon gayanus*" dans les champs où il est aussi utilisé dans les dispositifs anti-érosifs (cf. Chapitre 4).

Formations végétales	Superf. en 1955 (%)	Superf. en 1990 (%)	Evolution (%)
Formations ligneuses denses	48,0	30,2	-36,9
- arborées	33,9	19,8	-47,5
- arbustives	10,1	6,0	-40,2
- forêts galleries	4,0	4,4	+10,0
Formations ligneuses claires	50,0	62,0	+24,0
- arborées	43,4	45,7	+5,2
- arbustives	6,6	16,3	+147,2
Savanes herbeuses	0,68	3,94	+482,3
Zones dénudées ("zipelles")	1,00	3,70	+270,0
Autres (plans d'eau)	0,41	0,20	-51,5

Tableau 2.2 Evolution (en % de la superficie totale) des différentes formations végétales entre 1955 et 1990 dans la zone de Bissiga-Nakambé d'après une interprétation de photographies aériennes.

2.5 La dégradation des espaces sylvo-pastoraux

Les processus qui conduisent à la dégradation des végétations et des sols au Sahel sont largement documentés (Roose, 1981, Penning de Vries & Djitéye, 1982, Marchal, 1983, Hoogmoed & Stroosnijder, 1984, Marchal, 1986, Mietton, 1986, Breman, 1987, de Bie & Geerling, 1987, Cassenave & Valentin, 1989, Kessler & Boni, 1991, Stroosnijder, 1992). Toutes ces études font ressortir plus ou moins clairement que la végétation joue un rôle primordial dans la stabilité des écosystèmes agro-sylvo-pastoraux, et que la réduction de la couverture végétale est à la base du processus de dégradation. Due à la péjoration du climat (réduction des précipitations totales) et/ou à l'action de l'homme (défrichements, surpâturage), la diminution de la couverture biologique du sol expose celui-ci aux agents de dégradation que constituent l'intensité des pluies, le ruissellement et les vents. Cette réduction du couvert végétal réduit également la capacité de renouvellement de la matière organique du sol, qui signifie à son tour baisse permanente des éléments nutritifs nécessaires à la production de la biomasse; ce qui influence négativement l'état physique du sol.

Ainsi donc, encroûtement, érosion et compactage de l'horizon superficiel finissent par altérer la capacité d'infiltration des sols mis à nu. De proche en proche, la mortalité des végétations ligneuses s'accroît en même temps que la strate herbacée s'appauvrit. A partir de cet instant, les relations de cause à effet sont si imbriquées qu'on parle d'une spirale de

dégradation (voir Chapitre 3). Au stade de dégradation avancé, aucune installation ni aucun développement de la végétation ne semblent plus possibles, même avec une mise en défens totale. Selon les zones, 5 à 40% des espaces sylvo-pastoraux dans le plateau central sont malheureusement dans cette situation.

2.6 Conclusions

L'utilisation des écosystèmes naturels dans le plateau central ne correspond, au regard de tout ce qui a été dit, à aucune logique de gestion durable. Les systèmes de gestion traditionnels sont basés sur une vision à court terme dans l'objectif d'assurer tout au plus la subsistance.

D'un côté, les systèmes de production reposent sur l'exploitation des potentialités naturelles (eau, matière organique et éléments nutritifs) des écosystèmes. Le rythme d'accroissement actuel de la population et le niveau d'exploitation de ces ressources, en termes d'intensité et de superficies, qui en découle dépassent largement la capacité de régénération de celles-ci et entraîne une diminution constante du niveau de la production elle-même. A ce stade, seuls des apports de fertilisants extérieurs accompagnés d'une réduction drastique de l'intensité d'exploitation pourrait permettre de maintenir la capacité productive des écosystèmes naturels. Les conditions socio-économiques des populations ne permettent cependant à court terme ni l'un ni l'autre.

De l'autre côté, les politiques et les interventions actuelles de l'Etat et de ses démembrements sont non seulement insignifiantes par rapport à l'ampleur du problème, mais semblent le plus souvent conçues sur la base d'une maîtrise insuffisante de la nature, de la complexité et de la dynamique réelles des processus de dégradation. Dans les régions périphériques du pays (Sud, Sud-ouest, Est), les équilibres entre les ressources naturelles et leur niveau d'exploitation subsistent encore; ce qui voudrait suggérer que le maximum soit fait pour en assurer la protection et la gestion durable. Dans la moitié Nord en revanche la situation a, dans de nombreuses zones, largement dépassé le stade critique des déséquilibres écologiques; ce qui peut justifier l'importance et la concentration actuelles des programmes de conservation (ou de restauration) des ressources naturelles dans cette région. Cependant, la concentration de toutes ces interventions dans l'espace agricole, au delà de la seule justification d'un besoin de sécurité alimentaire à court terme, semble ignorer la nature et l'importance des relations entre cet espace et les espaces sylvo-pastoraux.

Au plateau central comme ailleurs au Burkina et au Sahel, la lutte contre la désertification est, avant tout, liée à l'intensification des systèmes de production agro-pastorale; ce qui suppose que la production de la biomasse actuelle de l'ensemble des systèmes agro-sylvo-pastoraux soit accrue. Cela passe nécessairement par la régénération des espaces sylvo-pastoraux, particulièrement dans le plateau central dont les caractéristiques socio-démographiques sont telles que les perspectives de nouvelles migrations massives sont difficilement envisageables.

3 Concepts et processus de régénération

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, l'analyse a montré que les processus de dégradation qui ont cours dans le plateau central, et en général dans la zone soudanienne du Burkina menacent la stabilité des systèmes sociaux eux-mêmes. Parmi les solutions avancées on retiendra non seulement la nécessité de réduire considérablement l'intensité d'exploitation actuelle de ces systèmes, mais surtout celle d'y investir en vue d'accroître leur capacité de charge, puis leur productivité. Indépendamment du caractère possible ou non des solutions préconisées dans le contexte socio-économique actuel, il apparaît utile de savoir, dans chaque situation, à quel stade de dégradation ou de régénération on se trouve, en vue de déterminer quand et comment agir. Cependant, comme on l'a aussi souligné par ailleurs, les processus de la régénération sont complexes. Non seulement ils ne sont pas toujours prévisibles dans le temps, mais peuvent aussi se dérouler différemment selon le contexte physique et socio-économique local (Rietkerk et Hien, 1992).

En vue d'améliorer la compréhension de ces processus, les écologistes font appel de plus en plus à des concepts théoriques pour les expliquer ou les prévoir. Cette compréhension, ainsi qu'une connaissance des processus physiques, biologiques et socio-économiques qui déterminent ou conditionnent l'évolution des systèmes naturels, permettent une meilleure identification non seulement de la nature et du niveau des mesures à prendre, mais aussi des paramètres de quantification et de qualification de ces processus. Dans ce chapitre, nous discuterons donc tour à tour de ces concepts écologiques applicables à la dynamique des systèmes sylvo-pastoraux dans les zones soudano-sahéliennes et des processus de dégradation et de régénération qui les caractérisent.

3.2 Les concepts écologiques

Les processus de dégradation et de régénération des sols et des végétations font généralement appel aux concepts de **capacité de charge**, de **stabilité** et de **résilience** des systèmes écologiques naturels qui sont les plus discutés en ce moment.

3.1.1 Notion de capacité de charge

Le concept de capacité de charge serait l'un des concepts dans la gestion des écosystèmes naturels qui a conduit à un grand nombre de confusions, en raison de son utilisation dans de trop nombreuses autres disciplines scientifiques (de Bie, 1991). Pendant longtemps, la capacité de charge a été rattachée au processus de développement d'une population animale (par exemple des herbivores) qui évoluerait dans un milieu dont les ressources sont limitées

(par exemple l'herbe). Polard (1981), en se basant sur la courbe théorique de croissance de la population animale dans une telle situation, définit la capacité de charge comme "la limite supérieure que le nombre d'animaux peut approcher dans le temps"; cette limite constitue donc l'asymptote de la courbe. C'est le modèle dit "du plafond" cf. Figure 3.1-I.

Toutefois, si la croissance de la population animale est considérée comme un processus dynamique, la capacité de charge (dans le sens d'une gestion durable) serait le nombre d'animaux qui permette un équilibre entre la consommation et la production des moyens d'existence (dans notre exemple l'herbe). C'est le modèle dit "d'équilibre" (Dempster et Polard (1981) (Figure 3.1-II).

Geerling et de Bie (1986) ont formulé, quant à eux, une définition de la capacité de charge qui correspondrait davantage à la réalité des systèmes écologiques soudano-sahéliens: dans un système écologique, la capacité de charge est un niveau d'équilibre entre la disponibilité et le niveau d'exploitation d'un élément du système qui est limitant dans le cadre d'une certaine utilisation de ce système. Dans cette approche, les notions de **disponibilité** et d'**exploitation** d'un élément, ainsi que le **caractère limitant** de cet élément pour le mode d'utilisation donné constituent des paramètres clés.

Ainsi, dans le système sylvo-pastoral, les objectifs d'utilisation sont, outre l'exploitation du bétail, la production primaire (bois de chauffe, produits forestiers non ligneux...). L'élément limitant pour la production animale se référerait ici par exemple à l'herbe (y compris le fourrage ligneux) ou à l'eau. Pour la production primaire, le facteur limitant serait par exemple les éléments nutritifs en général et N et P en particulier.

Décrivant les systèmes traditionnels d'utilisation des terres dans la région soudano-sahélienne, de Bie et Geerling (1987) constatent qu'ils reposent sur les seules potentialités naturelles des écosystèmes qui sont soumis à un niveau de production élevé avec une technologie rudimentaire. Dans ces conditions, le niveau d'exploitation approche celui de la capacité optimale de la **charge d'exploitation**. Ces systèmes connaissent en conséquence une certaine **stabilité** tant que les conditions démographiques sont "supportables". Les tendances auxquelles ils sont soumis sont schématisées en trois phases (Figure 3.2):

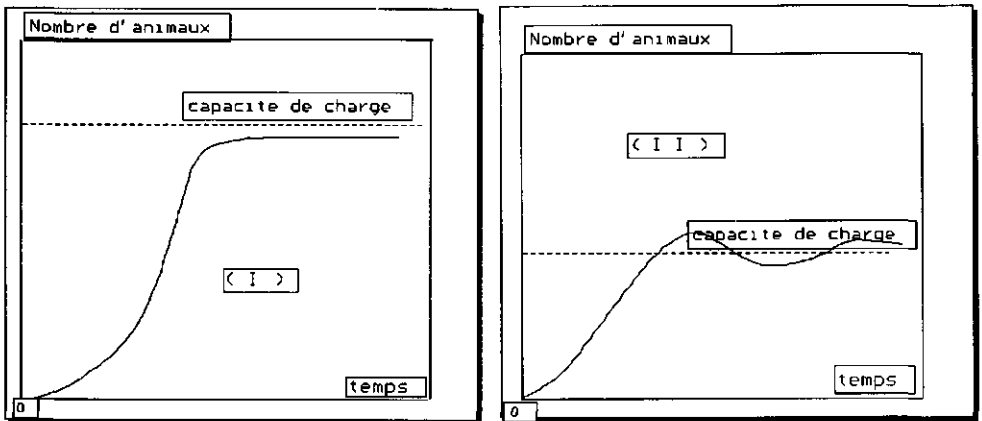


Figure 3.1 La capacité de charge selon la courbe théorique de croissance d'une population animale (I) d'après Polard, 1981 et le Modèle d'équilibre (II) d'après Dempster & Polard, 1981.

- a. une phase d'exploitation soutenue, caractérisée par un **équilibre** entre niveau d'exploitation réelle et capacité de charge des écosystèmes;
- b. lorsque les besoins augmentent, en raison d'un accroissement de la population, le niveau d'exploitation croît conséquemment et finit par dépasser la capacité de charge. La détérioration des conditions climatiques s'ajoutant, la stabilité du système diminue;
- c. si la pression sur les ressources continue de croître, les principaux éléments limitants du système diminuent, entraînant avec eux la chute des productions. Cette chute des productions est généralement suivie par celle des investissements dans les systèmes de production eux-mêmes avec, pour conséquence, une dégradation accélérée de l'ensemble de l'écosystème, du système de production et du système social. A ce stade, ajoutent-ils, les préoccupations individuelles et à court terme dominent les décisions en matière d'exploitation des ressources naturelles.

La description de la situation au plateau central du Burkina (cf. Chapitre 2) montre qu'elle semble bien se situer dans la phase "c" du schéma ci-dessus.

Pour Stroosnijder (1994) cependant, le concept de capacité de charge, s'il peut encore être employé en ce qui concerne les systèmes sylvo-pastoraux, devient très insuffisant et même dépassé lorsqu'on raisonne en termes de systèmes d'utilisation des terres en général et d'agriculture durable en particulier. L'auteur estime en effet que le concept de capacité de charge, tel que défini, peut être considéré comme une propriété potentielle des seuls écosystèmes, indépendamment de la technologie de production employée. Pour lui, on ne devrait pas conclure, à partir des seuls signes de surexploitation, que la densité de population actuelle dans la région sahélienne est au-dessus de la capacité de charge des systèmes car, après tout, la capacité de charge est une valeur potentielle ne reflétant pas les pertes en eau et d'éléments nutritifs qui, en raison de la particularité du climat sahélien, sont somme toutes normales.

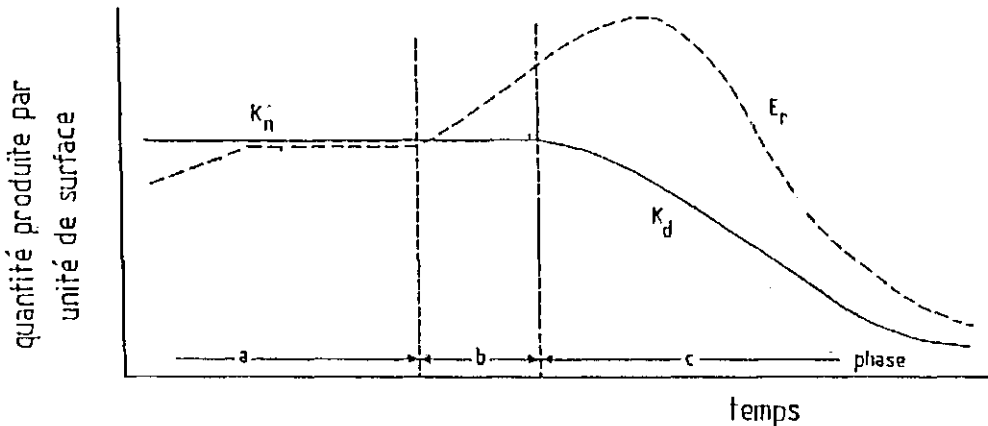


Figure 3.2 Sous-exploitation et sur-exploitation des ressources naturelles renouvelables dans les systèmes d'utilisation des terres dans les régions soudano-sahéliennes d'Afrique de l'Ouest selon de Bie et Geerling, 1987. K_n = capacité de charge du système non dégradé; K_d la capacité de charge du système dégradé, E_r = niveau d'exploitation réelle. Les trois phases correspondent respectivement aux niveaux d'exploitation "optimale et soutenue" (a), "qui entame les réserves" (b) et "exploitation épuisante entamant le capital et entraînant la dégradation du système" (c).

A partir des deux principaux systèmes d'utilisation des terres au Sahel (l'élevage strictement pastoral et transhumant d'une part et le système mixte agro-pastoral d'autre part), l'auteur constate que le concept de capacité de charge est beaucoup plus utilisable pour les écosystèmes naturels; par contre il estime que ce concept ne peut pas être appliqué de façon satisfaisante, en termes de perspectives de développement, pour l'utilisation agricole des terres. Trois raisons à cela:

- La capacité de charge ne se réfère qu'aux ressources renouvelables: elles sont si réduites au Sahel que seulement de faibles densités de populations peuvent y être maintenues; densités largement dépassées par les situations actuelles qui supposeraient alors une surexploitation des ressources renouvelables. "Ce n'est pas surprenant, dit-il, car nulle part dans le monde on n'a basé durablement l'agriculture sur les seules ressources renouvelables!"
- Le concept de capacité de charge se réfère à une valeur potentielle hypothétique; et le fossé entre capacité de charge réelle et capacité de charge potentielle ne peut être amoindri que par l'application de technologies agraires. Si avec de simples techniques de C.E.S. locales on peut réduire considérablement les pertes en eau et en éléments nutritifs de façon à accroître la capacité de charge réelle, la capacité de charge potentielle pourrait donc apparaître comme de peu d'intérêt! Aussi, estime-t-il mieux de toujours corrélérer la production durable d'un agro-système avec le type de technologie utilisé.
- Enfin, l'auteur pense que l'emploi du concept de capacité de charge suppose que la population sahélienne actuelle surexploite ses ressources naturelles et croît trop vite. De telles conclusions intégreraient, selon lui, un blâme caché à ces populations qui ne serait pas juste car, nulle part dans le monde aujourd'hui, les populations ne sont capables de maintenir leur niveau de vie en le basant uniquement sur l'utilisation durable des ressources naturelles renouvelables.

Il conclut que la propension actuelle à appliquer le concept de capacité de charge à l'agriculture sahélienne ne se justifie plus car tout agro-système utilise, en plus des ressources naturelles, des moyens de production tels la force de travail, le capital et les connaissances techniques. Ainsi, le niveau de production qui peut être atteint et le nombre de personnes que cette production peut nourrir (sans détruire les ressources de base) est, partout, plus une fonction de la technologie de production que des seules ressources naturelles.

Ce débat traduit, pour notre part, une seule réalité: la fragilité du développement rural en Afrique sahélienne. Il est en effet un fait que les ressources naturelles de cette région du globe sont limitées et que le rythme actuel de leur utilisation n'a aucune commune mesure avec leur productivité naturelle. Tout le monde semble bien d'avis à ce propos. Le concept de capacité de charge est donc une référence pour caractériser les limites naturelles de ces écosystèmes, agro-sylvo-pastoraux ou sylvo-pastoraux; en d'autres termes ce concept est une base de réflexion pour tout écosystème. Il permet d'attirer l'attention des utilisateurs, et des planificateurs du développement en particulier, sur les exigences d'utilisation durable de ces ressources dans les systèmes de production actuels. Cependant, il est tout aussi vrai qu'aucun développement durable n'est envisageable dans cette région sur la seule base des potentialités naturelles des agrosystèmes. S'appuyer sur le seul concept de la capacité de charge naturelle des écosystèmes pour planifier le développement rural au Sahel serait faire preuve, à la fois, de peu de rigueur scientifique et de naïveté politique. C'est, il nous semble, ce que veut dénoncer Stroosnijder.

Geerling et Kessler, (1991) affirment en effet que cet équilibre entre la disponibilité et le niveau d'exploitation en ce qui concerne les systèmes sylvo-pastoraux est dynamique pour deux raisons : la variabilité des facteurs opérationnels (telle que la pluviosité) et l'inter-action entre la végétation et les herbivores par exemple. En insistant sur le fait que la capacité de charge est déterminée non seulement par les ressources naturelles mais aussi par le niveau technologique et les intrants externes, ils lèvent l'équivoque du débat: "si la capacité de charge actuelle diminue à la suite de la dégradation des ressources naturelles, elle peut également être augmentée en apportant des intrants et en appliquant des mesures de C.E.S." (Kessler et Geerling, 1991 p.27).

Pour restaurer les équilibres, de Bie et Geerling (1987) suggèrent pour les systèmes traditionnels d'utilisation des terres: (i) de réduire le niveau d'exploitation jusqu'en dessous de la capacité de charge atteinte par les écosystèmes, en vue de permettre une stabilisation de celle-ci; (ii) d'investir dans les éléments limitants de ces écosystèmes en vue d'accélérer la stabilisation puis la régénération de la capacité de production en maintenant, pendant tout le processus, le niveau d'exploitation en dessous de la capacité de charge; (iii) de procéder à l'intensification des types d'utilisation une fois le système régénéré, par des investissements supplémentaires, (Figure 3.3).

Comme on peut le constater, la réalisation d'une telle démarche, en particulier dans sa première étape, est globalement utopique pour la région soudano-sahélienne, du moins dans les conditions politiques et socio-économiques actuelles. Cependant, cette démarche devrait être possible à mettre en oeuvre ou à tester localement et à des échelles maîtrisables, et plus encore dans des conditions expérimentales précises. C'est en partie ce à quoi notre travail a voulu s'atteler sur des terrains sylvo-pastoraux dégradés du plateau central Burkinabe.

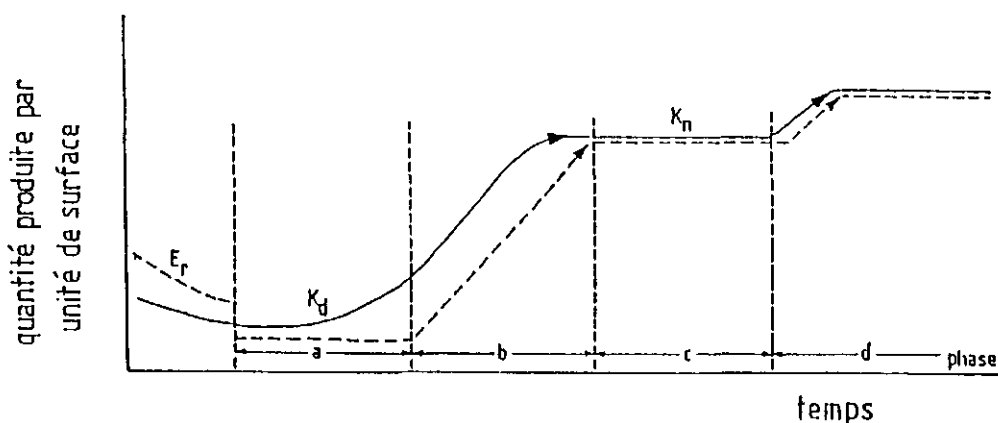


Figure 3.3 Stabilisation et régénération des systèmes sylvo-pastoraux. D'après de Bie et Geerling, 1987. K_n = capacité de charge du système non dégradé, K_d = capacité de charge du système dégradé, E_r = niveau d'exploitation; a = phase de réduction de l'exploitation, b = phase des investissements pour stabiliser et régénérer la capacité de charge, c = système d'utilisation régénéré et d = phase d'intensification.

3.1.2 Stabilité et résilience

Les débats sur les concepts de capacité de charge des écosystèmes en général et des agrosystèmes en particulier ne sont pas les seuls en cours: pour les espaces sylvo-pastoraux semi-arides d'autres propriétés sont discutées ("modalité", "discontinuité", "divergences", "hystérésis"). Ces débats ont ainsi redonné de l'intérêt à des théories (la théorie "catastrophique" de Thom (1978) par exemple) qui se réfèrent aux notions de **stabilité** et de **résilience** des écosystèmes (Stroosnijder, 1994).

Les notions de stabilité et de résilience ont été décrites, pour les écosystèmes sylvo-pastoraux soudano-sahéliens, par Geerling (comm.pers.) à l'aide d'une hypothèse qui met en rapport l'évolution du couvert végétal (recouvrement mais aussi production) et le niveau d'exploitation de cette végétation (Figure 3.4). Dans cette hypothèse, si le niveau d'exploitation est inférieur à la capacité de charge du système (E2), le couvert végétal (ou la biomasse) est maintenu à un niveau d'équilibre élevé (palier supérieur). Un accroissement du niveau d'exploitation entraîne une réduction du couvert végétal jusqu'à une limite d'équilibre avec sa capacité de régénération naturelle. Une réduction de la charge en ce moment redonne le dessus au processus de régénération du couvert végétal. Si par contre l'exploitation est accentuée au delà de ce "seuil d'équilibre", le couvert végétal et la production chutent à un niveau plus bas (pallier inférieur de la courbe) où ils peuvent être maintenus dans les conditions nouvelles de survie des végétations. L'exploitation ne peut plus dépasser le niveau atteint, en raison même de la réduction de la production. Un nouvel "équilibre" s'établit donc entre les deux: aucun accroissement du couvert végétal n'est cependant plus possible sans une réduction importante voire totale de la charge, au moins pendant un certain temps.

Cette hypothèse se rapproche d'une certaine manière de la théorie des "**domaines d'attraction**" de Holling (1973). Cet auteur estime en effet que les systèmes écologiques naturels évoluent selon des domaines d'attraction au sein desquels des équilibres plus ou moins stables s'entretiennent, influencés par des fluctuations ou des tendances ("driving forces") plus ou moins importantes.

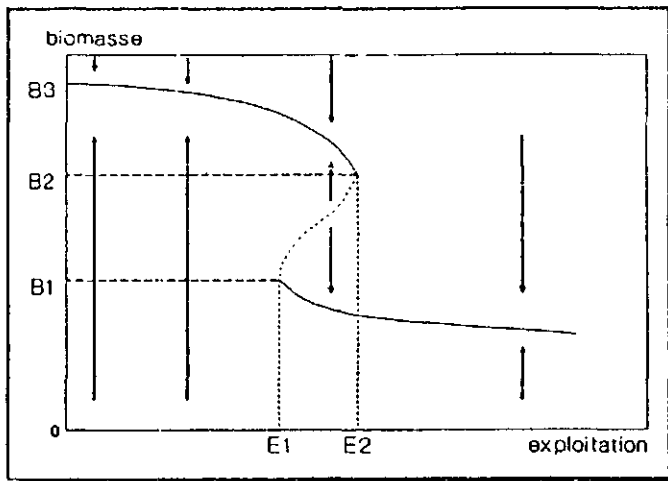


Figure 3.4 Hypothèse, sur l'évolution du couvert végétal en fonction des conditions d'exploitation, applicable aux espaces sylvo-pastoraux soudano-sahéliens du plateau central du Burkina.

Dans le cas des écosystèmes sylvo-pastoraux, les deux paliers de la figure 3.4 traduiraient deux domaines d'attraction répondant chacun à des conditions de stabilité précises qui, elles, dépendent, entre autres, des modes et du niveau d'exploitation des ressources renouvelables. L'évolution en termes de diversité floristique et de production d'une savane arborée dense en une savane arbustive ou herbeuse sous l'effet des feux de brousse par exemple ainsi que le processus contraire renforcent, selon l'auteur, l'idée de l'existence des domaines d'attraction. Chaque situation connaît une certaine stabilité dans des conditions d'utilisation (et d'évolution) données, et peut basculer vers l'autre situation, à la faveur de changements intervenus sous l'effet de facteurs extérieurs prévisibles ou non.

Pour Holling la capacité d'un système à retourner à un état d'équilibre après une perturbation temporaire traduit la **stabilité** du système ; plus rapidement le système retrouve l'équilibre (c'est-à-dire moins il fluctue), plus il serait stable. De même, il définit la **résilience** comme étant la mesure de la persistance d'un système et sa capacité à absorber les changements et les perturbations, tout en conservant les mêmes rapports (internes) entre ses composantes. Dans cette définition, la résilience serait la caractéristique (la propriété à demeurer ou à disparaître) du système et la persistance (ou la probabilité de disparition) le résultat. Un système peut donc être "résilient" et fluctuer de façon importante, c'est-à-dire avoir une faible stabilité. Mieux, l'auteur pense que l'instabilité, dans le sens de grandes fluctuations, peut introduire dans un système une résilience et une capacité à persister. La vision "stabilité" s'appuie donc sur la notion d'équilibre qui veut qu'on exploite le supplément de production de l'écosystème avec des marges les plus faibles possibles (voir capacité de charge). La vision "résilience" elle, s'appuie sur le principe des domaines d'attraction et la **nécessaire persistance** des systèmes naturels; elle se veut considérer l'évolution des événements dans un contexte plutôt global et insister sur l'hétérogénéité, à la limite normale, des situations qui caractérisent les régions soudano-sahéliennes. L'auteur estime en effet que l'approche d'une production maximale et soutenue d'une ressource naturelle renouvelable devrait briser les conceptions déterministes qui veulent que la résilience des systèmes naturels puisse être perdue ou réduite au point qu'un événement exceptionnel quelconque --que le système concerné aurait absorbé en conditions normales-- provoque un changement dramatique de celui-ci ainsi que la perte de son intégrité structurale.

En d'autres termes, on devrait s'appuyer sur le principe que les écosystèmes naturels conservent toujours une capacité de régénération quel que soit l'état dans lequel ils se trouvent. Dans ce sens, Stroosnijder (1992) constate que la végétation naturelle de la zone sahélienne a fait preuve d'une résilience considérable par rapport aux changements climatiques, puisqu'un équilibre dynamique y a existé pendant des dizaines voire des centaines d'années. L'auteur ajoute qu'on peut craindre toutefois qu'un certain nombre d'interférences compromettent cet équilibre et provoquent des changements irréversibles.

Pour notre part, nous insisterons sur l'importance de ces **interférences** qui aujourd'hui, peut-être plus qu'avant, sont capables de compromettre les équilibres naturels dans la région soudano-sahélienne. En effet, l'approche théorique développée par Holling semble caractériser on ne peut mieux le fonctionnement et la dynamique des systèmes naturels soumis aux lois aléatoires de l'environnement: la dynamique des végétations sous l'effet des feux (et de la faune sauvage) en atteste. Par contre, la situation actuelle dans la région soudano-sahélienne montre que de telles conditions d'évolution des écosystèmes ont pratiquement disparu.

La durée plus longue que jamais des perturbations climatiques, conjuguée avec un niveau d'utilisation jamais atteint des ressources naturelles par une population jamais aussi

nombreuse, ont entraîné non seulement une réduction visible et à grande échelle du couvert végétal (cf. Chapitre 2.3) mais aussi des pertes parfois dramatiques de la diversité biologique. La plupart des éléments constituant des systèmes (eau, éléments nutritifs en particulier) sont devenus limitants, de sorte que des modifications importantes de l'un peuvent perturber les équilibres internes de ces systèmes, c'est-à-dire leur résilience.

A ce stade comme le souligne Stroosnijder (1992) "il est plus difficile de dire si c'est l'énergie de résilience qui a diminué ou si c'est l'efficacité même de cette énergie qui est en cause". La longueur des processus de régénération est en effet devenue tellement supérieure à la vitesse des processus de dégradation physique, chimique et biologique des écosystèmes, que de nombreuses portions de terrain ne peuvent même plus être réhabilités par la seule suppression totale de l'exploitation: une intervention artificielle dans le sens de modifier ces processus physico-chimiques devient alors indispensable.

3.3 Les processus physiques et chimiques

La description des processus de dégradation des écosystèmes sylvo-pastoraux sahéliens par différents auteurs donne quelquefois l'impression de phénomènes contradictoires: Kessler et Boni (1991) raisonnent que la diminution de la couverture végétale peut entraîner l'érosion par l'eau (et le vent). Cette érosion a comme conséquence une perte du sol et des matières organiques. Stroosnijder (1991) estime, quant à lui, que la destruction ou l'exportation de la biomasse entraîne une diminution des taux de matière organique (m.o.) et de l'activité biologique du sol; ce qui a pour résultat une dégradation physique et chimique du sol. D'autres encore supposent que l'hétérogénéité de la végétation sahélienne est due à des dégradations physiques localisées du sol.

Ces approches qui paraissent différentes sont en réalité l'expression d'une même réalité: les processus de dégradation évoluent sous forme d'une spirale et peuvent différer d'un endroit à l'autre. La façon de les approcher dépend donc du point à partir duquel chacun "entre" dans la spirale. Selon Kessler & Boni (1991), les processus de dégradation des sols sont inter-actifs dans le processus plus global de la désertification. C'est-à-dire qu'ils s'influencent mutuellement.

L'érosion hydrique naît des suites de la diminution du recouvrement du sol par les végétations. Elle entraîne des pertes plus ou moins importantes de sol et d'éléments nutritifs qui généralement se concentrent ailleurs (bas-fonds ou zones non dégradées). De ce point de vue, on estime que l'érosion est un des facteurs qui contribuent à la formation des hétérogénéités au sahel (Stroosnijder, 1982). Au plateau central burkinabe (région de Saria), et à titre indicatif, les pertes de terre dues à l'érosion hydrique en 1981 étaient estimées à 0,51 tonnes/ha sous végétation naturelle contre 7,3 tonnes/ha sous une culture de sorgho (Roose, 1981). Sur des sols nus, l'érosion peut entraîner des pertes annuelles supérieures à 25 tonnes/ha.

L'érosion éolienne est moins importante dans la région soudanienne du Burkina, en raison des caractéristiques des sols même dénudés (texture moins sableuse: présence de croûte, compacité); cependant lorsqu'il a emprise sur le sol, le vent provoque la perte des éléments fins du sol dont les matières organiques.

La dégradation physique. Sous ce terme on retrouve trois phénomènes majeurs: *l'encroûtement*, la *dislocation structurale* et le *compactage*. La formation des croûtes est due à l'action mécanique des gouttes de pluies sur le sol (Hoogmoed & Stroosnijder, 1984, Cassenave & Valentin, 1989): l'énergie cinétique des gouttes de pluie disperse les particules de sol dont les plus fines, entraînées par l'eau d'infiltration, forment un film qui limite en retour la même infiltration; de même le ruissellement en nappe, en transportant les particules fines du sol, peut créer une surface de plus en plus imperméable. La conséquence de l'encroûtement est la réduction de l'infiltration et l'accroissement des pertes d'eau utile pour la production. La dislocation structurale, elle, est liée à la diminution du taux de m.o. du sol qui peut provoquer un effondrement des agrégats argilo-humiques. Elle concerne plus fréquemment les sols cultivés où les labours réguliers et la minéralisation de la m.o. sans compensations extérieures suffisantes constituent des facteurs favorables. Une conséquence de ce phénomène est le compactage des sols qui se traduit par une réduction de la porosité et rend l'enracinement difficile.

La dégradation chimique est le résultat de l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs, suite à l'exploitation sans apports de fertilisants ou amendements organiques, sources des éléments minéraux. L'appauvrissement chimique des sols dans la région soudano-sahélienne est généralement plus rapide en ce qui concerne les éléments nutritifs majeurs (N et P), en raison du caractère extensif des systèmes de production eux-mêmes; ce qui explique la baisse rapide de la production après quelques années d'exploitation. Cependant, l'utilisation massive d'engrais minéraux (dans leurs formules actuelles) peut entraîner aussi un appauvrissement des sols, en bases (acidification) et en m.o., qui se traduit particulièrement par une déficience en potassium et une toxicité en aluminium (INERA 1994, de Boer & Kessler, 1994).

Stroosnijder (1994) a modélisé le processus de dégradation à partir de données quantitatives collectées sur une longue période dans la région. Il montre ainsi que le processus de dégradation se déclenche suite à la destruction ou l'enlèvement de trop de biomasse du sol. Ceci entraîne une diminution du taux de m.o. et de l'activité biologique du sol. Les conséquences sont non seulement l'appauvrissement chimique ou une surexploitation des éléments nutritifs, mais aussi la dégradation physique: sur des sols dont la majorité est susceptible à l'encroûtement la capacité d'infiltration diminue, entraînant la perte des eaux de pluies par un ruissellement de plus en plus important. La production primaire est négativement influencée; ce qui peut être à la base de la spirale négative évoquée plus haut, si les mêmes conditions d'exploitation sont maintenues. La situation se dégrade davantage chaque année, conduisant à ce qu'il appelle une dégradation totale du sol. En définitive, il aboutit à la conclusion que la surexploitation du couvert végétal fragilise d'autant plus les écosystèmes sylvo-pastoraux que la pluviosité annuelle est inférieure à la normale (années "sèches").

3.4 Les processus biologiques

Les nombreux points de vue développés sur les processus de dégradation et de régénération des écosystèmes sylvo-pastoraux dans la zone soudano-sahélienne confirment à quel point la végétation joue un rôle prépondérant dans la stabilité de ces systèmes. Il apparaît que c'est la quantité totale de biomasse disponible qui constitue le facteur biologique essentiel de cette stabilité car c'est d'elle que dépend la teneur en m.o. des sols. L'accroissement de la biomasse produite par unité de surface peut donc être considéré comme l'objectif premier dans un processus de régénération. Quelques années d'exploitation suffisent pour anéantir le couvert végétal et le taux de m.o. d'un système naturel; par contre, les processus biologiques qui déterminent la reconstitution de ce système sont, comparativement, beaucoup plus longs et progressifs: il faut 20 ans pour faire passer la teneur en m.o. d'un sol de 1% à 1,5% avec un apport annuel de plus de 10 tonnes de biomasse par ha (Stroosnijder, 1992).

Dans le cycle de la matière organique le rôle important joué par la macro-faune du sol, et les termites en particulier, retient de plus en plus l'attention des écologistes dans la région soudano-sahélienne. Dans les espaces sylvo-pastoraux, ils peuvent constituer des alliés efficaces non seulement pour la décomposition de la biomasse mais aussi pour restaurer certains paramètres physiques du sol essentiels à l'amélioration de l'infiltration (Mando, 1991 & 1992). De même l'évolution de la structure (en termes d'occupation spatiale horizontale et verticale) et la composition des végétations sont des éléments d'appréciation à la fois qualitatifs et quantitatifs des processus de régénération. En effet les études sur l'évolution des communautés végétales dans les savanes soudanaises montrent que les processus de régénération des terrains dégradés sont caractérisés par des remaniements floristiques qui peuvent durer 30 ans avant d'aboutir à une stabilisation des milieux écologiques (Zoungrana, 1991 & 1992). Dans ces processus, la strate herbacée joue un rôle de pionnier en tant que premier paramètre de protection du sol et fournisseur essentiel de biomasse. Si la dégradation se traduit par une disparition plus ou moins rapide des herbacées pérennes au profit des annuelles, la régénération, elle, est une succession dynamique et longue des communautés végétales qui démarre avec le développement d'espèces dites "pionnières" (Penning de Vries & Djitèye, 1982, v.d. Poel & Kaya, 1990, Zoungrana, 1992). Ces espèces sont progressivement étouffées et remplacées par des espèces pérennes ou annuelles caractéristiques des milieux non dégradés ou peu perturbés.

Quant aux végétations ligneuses, Le Houerou (1989) considère leur dégradation comme plus catastrophique que celle de la strate herbacée. Elles constituent en effet la plus importante source de minéraux et de protéine pour le bétail pendant la saison sèche (Breman & Traoré, 1986, v.d. Hoek & al., 1993, de Boer & Kessler, 1994, Breman & Kessler, 1994) mais contribuent aussi, selon les situations, à la stabilité des systèmes et à l'accroissement de leur production primaire. En même temps leur régénération, contrairement aux herbacées, prend plusieurs années; ce qui pose encore le problème de réhabilitation des systèmes sylvo-pastoraux en termes de délais par rapport à la rapidité de leur dégradation.

3.5 Les aspects socio-économiques

Toute considération technique concernant la problématique de la dégradation et de la régénération des espaces sylvo-pastoraux au Sahel est seulement viable si on admet par ailleurs que les facteurs socio-économiques et politiques y jouent aussi un rôle déterminant. Aussi bien les causes de la dégradation des sols, ses conséquences que les raisons des difficultés actuelles de régénération sont, pour une large part, de nature socio-économique. La diversité des acteurs (des décideurs politiques aux paysans) et la diversité, voire le caractère contradictoire, des enjeux et intérêts à ces différents niveaux font que la problématique de la dégradation et de la réhabilitation des terres en général dans les régions semi-arides d'Afrique est complexe. On peut se référer à ce sujet, par exemple, à Kessler et Ohler (1983), Blaikie, (1989), Rochette (1989), Bognetteau-verlinden et al. (1992) qui en dressent les contours essentiels.

La diminution de la sécurité d'existence tout court, la pauvreté, les politiques économiques et celle des prix en particulier, la décentralisation économique et la répartition des responsabilités dans la gestion foncière, la notion de propriété, les institutions, sont autant de facteurs importants dans la procédure de décision des acteurs lorsqu'il s'agit de prendre des mesures ou de participer à des actions dans le sens d'une gestion durable des ressources naturelles.

3.6 Conclusions

Beaucoup de gens s'accordent aujourd'hui pour reconnaître que la complexité des processus de dégradation et leur rapidité les assimilent à une spirale négative ou à un cercle vicieux dans lequel le couvert végétal (en termes de recouvrement, de structure, de composition et surtout de biomasse produite) joue un rôle clé. Les concepts écologiques tels la capacité de charge, la stabilité et la résilience des écosystèmes naturels fournissent une compréhension suffisante de la problématique mais traduisent en même temps cette complexité.

En s'appuyant sur la notion de capacité de charge, on montre à quel point la situation actuelle des équilibres entre les ressources naturelles renouvelables et leur niveau d'exploitation est critique, voire désespérante. En même temps, ces discussions fournissent assez d'éléments pour indiquer que les solutions existent pour réhabiliter ces équilibres: les processus qui caractérisent la dégradation et la régénération des sols et des végétations sont globalement connus; de sorte qu'il n'est techniquement plus difficile d'arrêter localement le processus de dégradation, parfois à l'aide de moyens simples et, à la suite, de relancer celui de la régénération. L'objectif premier devrait être d'accroître la quantité de biomasse par unité de surface. Cependant, il est aussi certain que les mesures techniques les plus prometteuses ne constituent pas la panacée; tant il est vrai que, en termes d'utilisation durable des ressources reconstituées, leur efficacité dépend de la pertinence des hypothèses concernant les processus physico-chimiques et biologiques qui la déterminent. Cette étude voudrait en particulier contribuer à donner plus d'éléments pour la construction de ces hypothèses en ce qui concerne les systèmes sylvo-pastoraux.

Le type et l'intensité d'une mesure de régénération ou de gestion doivent donc être adaptés aux conditions physiques et socio-économiques locales, à partir du moment où son efficacité ne dépend pas seulement de sa nature et de son intensité. La variabilité des conditions physiques locales, le système d'utilisation des terres, la disponibilité des ressources financières et des technologies jouent un rôle tout aussi important. Ces considérations socio-économiques, mais aussi politiques, prennent encore plus d'importance lorsque la question de réhabilitation des systèmes sylvo-pastoraux, et de manière générale la gestion des ressources naturelles, sont abordées dans les perspectives d'un développement durable. A cet égard, les expériences en cours dans le plateau central du Burkina, malgré leurs limites spatiales et leur faible impact actuels, méritent plus d'attention en tant que technologies locales.

4 Les expériences de régénération des espaces sylvo-pastoraux

4.1 Introduction

Dans la recherche d'une meilleure connaissance des processus qui caractérisent l'évolution des espaces sylvo-pastoraux et leur place dans les systèmes d'utilisation des terres au Sahel, des programmes de recherche inter-disciplinaires ont été mis en œuvre en Afrique de l'Ouest. Au nombre de ceux-ci, le programme "Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan" (Mare d'Oursi au Burkina Faso, 1976-1980) et le programme "Productivité des Pâturages Soudano-sahéliens" (PPS, Mali, 1978-1982). Ces programmes, qui ont fourni un éclairage très significatif sur la dynamique des ressources naturelles et de leur utilisation dans la partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, ont renforcé la nécessité de poursuivre de telles études en direction des savanes soudano-sahéliennes et soudaniennes qui sont aujourd'hui au cœur de la spirale de dégradation.

Les mesures de restauration du potentiel productif des terres connaissent aussi dans cette zone des résultats variables, pour des investissements quelquefois élevés, en raison de l'hétérogénéité des milieux naturels et des conditions socio-économiques particulières (cf. Chapitres 2.3 et 3.4). Il importe donc de déterminer les facteurs dont les combinaisons optimales seront susceptibles de fournir les meilleurs résultats dans les conditions physiques et socio-économiques locales.

C'est pourquoi il a été entrepris dans cette partie soudano-sahélienne du Burkina Faso et en particulier dans ce qu'on appelle le plateau central (ou plateau Mossi), d'inventorier les mesures de régénération des sols dégradés, prises dans un objectif sylvo-pastoral. Cet inventaire, dont la finalité est de faire l'état des lieux en matière de régénération des espaces sylvo-pastoraux, vient à la suite des travaux comme Rochette et al. (1989), Vlaar (1992); il veut donner un éclairage particulier à cet espace où tout le monde s'accorde à dire que très peu d'investissements fonciers sont réalisés à ce jour. De façon spécifique, l'inventaire s'est fixé pour objectifs:

- de décrire les mesures de régénération rencontrées et les résultats obtenus;
- d'analyser leurs conditions de succès ou d'échec, en vue d'identifier les critères essentiels de leur efficacité;
- d'esquisser des méthodes de recherche pour une évaluation des processus qui déterminent cette efficacité.

4.2 Historique et évolution

La lutte contre la dégradation des sols au Burkina Faso date des années 1960 avec le projet "GERES-Volta", conçu par le Service des Eaux et Forêts dans la région du Yatenga (Nord-Ouest du pays). Initié en 1961, ce projet est parti du constat de dégradation continue des terres cultivées et sylvo-pastorales et du caractère "dérisoire" des pratiques traditionnelles de C.E.S. par rapport à l'ampleur du problème. En 1960, Savonnet (cité par Mietton, 1986) constatait que ces pratiques, essentiellement concentrées sur quelques portions de terres cultivables, n'avaient aucune envergure capable d'influencer significativement les tendances. L'objectif de ce projet, tel que le rapporte Marchal (1986), était donc de "mettre au point une méthode efficace de lutte contre l'érosion des sols et créer ainsi un choc psychologique qui détermine l'adhésion des populations aux méthodes préconisées, au vu du résultat". Ainsi, de 1962 à 1965, 120.000 ha de terrain furent traités à l'aide d'un réseau de banquettes anti-érosives en terre, et 35.000 km de fossés de diversion sur les hauts de pente et de fossés d'infiltration sur les bas de pente. Le projet, exécuté en régie, a mis en oeuvre d'importants moyens humains, logistiques et techniques, dont 1500 manoeuvres, 85 topographes et 15 bulldozers (Marchal, op cit). Au cours de la dernière campagne, il est entrepris la plantation d'arbres et d'*Andropogoneae* le long des ados de fossés des banquettes, en faisant cette fois appel à la participation populaire. Les besoins d'entretien de tous ces ouvrages étaient énormes devant les capacités tout aussi dérisoires des paysans auxquels il est fait appel en fin de projet: les banquettes disparaissent progressivement et l'érosion s'accroît.

Il faut attendre les années 1975 pour que des actions de lutte anti-érosive soient initiées à nouveau à l'échelle des bassins versants qui dépassent l'exploitation familiale. Ces actions sont d'abord le fait d'organismes publics: l'Autorité de l'Aménagement des Vallées des Volta (AVV, aujourd'hui Office National d'Aménagement des Terroirs ONAT), dans l'aménagement des terres neuves, introduit le système des bandes d'arrêt constituées d'une dizaine de mètres de végétation naturelle qui sépare les parcelles cultivées défrichées perpendiculairement à la pente. En 1976, le Fonds de Développement Rural (FDR), aujourd'hui Fonds de l'Eau et de l'Équipement Rural (FEER), lance dans les terroirs villageois du plateau central un programme de défense et restauration des sols (DRS) basé sur la réalisation de banquettes en terre de dimensions plus modestes (50 cm de haut) dont la confection est assurée par les paysans, après un sous-solage mécanisé selon les courbes de niveau. La particularité de ce programme de DRS est qu'il est en priorité destiné aux espaces agricoles où les aménagements (de 25 à 100 ha par terroir et par an) sont exécutés par des structures communautaires (groupements villageois). Dans les espaces sylvo-pastoraux, le programme propose des reboisements collectifs de 1 à 2 ha isolés, réalisés par les groupements villageois, et généralement implantés sur des sols marginaux et les cuirasses.

Avec 70 à 100 ha/an et un taux de réussite souvent inférieur à 50%, ce programme a connu un semi-échec par manque d'entretien des ouvrages anti-érosifs: la dégradation continue des terres sylvo-pastorales non aménagées accroît le ruissellement qui accélère la dégradation des dispositifs situés en aval dans les espaces agricoles. Mietton (1986) a ainsi observé que 7% des banquettes étaient demeurées en bon état après 2 ans dans une localité du Yatenga (Nord), pendant que 10 % des dispositifs avaient perdu leur efficacité entre 1978 et 1982 dans la région de Saponé dans le centre Sud.

L'action du FEER est relayée dans les années 1980 par d'autres projets du type "projets de développement intégré" dont l'activité principale demeure la C.E.S. Si l'approche initiale des

acteurs est peu différente, les technologies proposées, elles, ont tiré leçon des insuffisances techniques des actions du FEER; les ouvrages anti-érosifs utilisent des blocs de cuirasse ferrugineuse: cordons pierreux ou diguettes en pierres, digues filtrantes dans les bas-fonds... Ici encore, la priorité demeure l'espace agricole. Concentrés dans le centre-nord du pays, ce type de projets s'étendra progressivement aux régions de l'Est, du Centre-sud et même de l'Ouest.

Au même moment, de nombreuses ONG se sont intéressées à la conservation des eaux et des sols: leurs interventions inspireront techniquement de nombreux organismes et projets étatiques. Elles sont généralement conduites à titre expérimental et à des échelles ponctuelles, en relation avec des paysans, en espérant un effet d'entraînement ultérieur (Mietton, op cit). On retrouve dans ce groupe, des ONG telles que Euro-Action Accord, le Projet Agro-Ecologie (PAE), OXFAM/PAF (Projet Agro-Forestier), ADRK, PPI, AFVP, "6S", LVIA. Leurs techniques sont très diversifiées et ont en commun d'exiger moins de ressources logistiques et d'expertise extérieure. Leur conception est généralement liée au type de matériau disponible, à la capacité d'exécution physique et de maîtrise technique des bénéficiaires et aux priorités de ceux-ci. Si leur efficacité éprouvée a inspiré d'autres projets, leurs limites demeurent souvent, cependant, l'échelle de l'effet d'entraînement souhaité au niveau des acteurs individuels ou regroupés en petites communautés: contrairement aux programmes des projets et organismes publics, ce groupe d'opérateurs a favorisé la multiplication des actions "individuelles" de régénération des sols observées dans le plateau central. On les retrouve aussi associés dans bon nombre des initiatives et actions collectives de régénération touchant l'espace sylvo-pastoral et dont les premières sont apparues dans les années 1980.

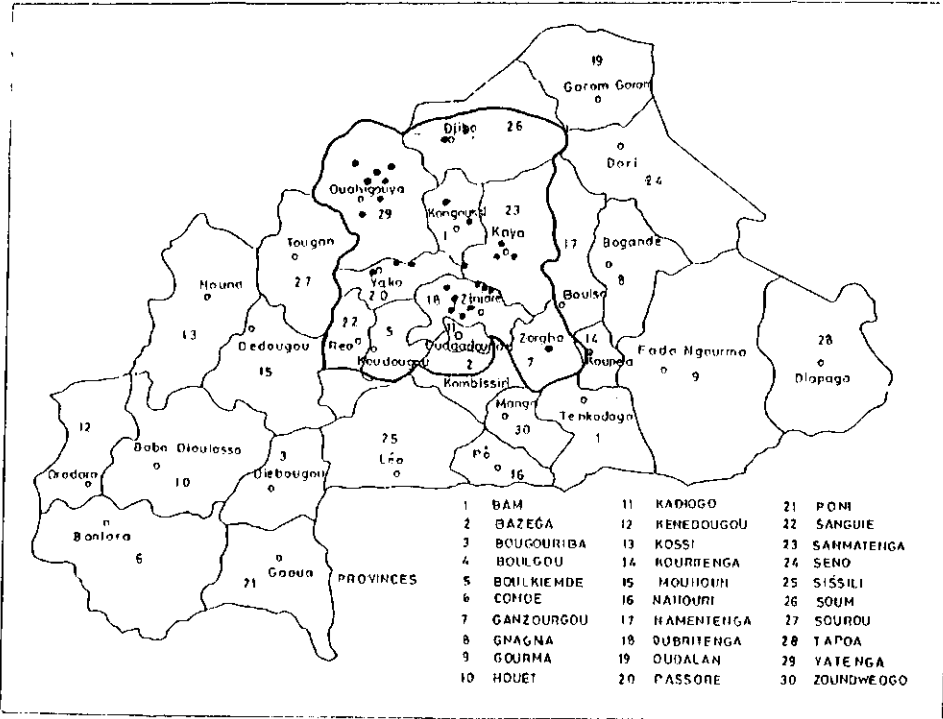


Figure 4.1 Carte de localisation des aménagements de C.E.S. pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux dans le plateau central du Burkina Faso.

L'histoire de la lutte anti-érosive, les particularités des acteurs ainsi que leurs priorités, les conditions du milieu expliquent donc assez largement la concentration géographique des activités de régénération des sols dégradés en général, et des terres sylvo-pastorales en particulier: les provinces du centre, du centre-nord et du nord sont les zones où ce type d'actions sont les plus nombreuses, même si en terme de superficies elles demeurent très peu significatives: Oubritenga, Sanmatenga, Yatenga, Passoré, Bam, Soum. La pression élevée sur les terres agricoles et leur état de dégradation ont conduit dans la plupart de ces provinces, à la remise en culture de sols marginaux. Les travaux de restauration des sols sont en conséquence en priorité destinés à des usages agricoles; les expériences de régénération de terrains sylvo-pastoraux ont quant à eux un caractère expérimental et une envergure spatiale limitée.

4.3 Les expériences dans le plateau central

4.3.1 Objectifs spécifiques et répartition géographique

L'inventaire effectué en 1990 puis en 1992 dans 10 provinces a permis de visiter au total, 40 sites de régénération des sols dégradés répartis dans 7 provinces (sur les 10), soit 36 villages (Figure 4.1). Ces sites représentent probablement la plus importante partie des aménagements de C.E.S. en zone sylvo-pastorale. Malgré les précautions prises en vue de nous limiter aux objectifs de l'inventaire, 13 sites aménagés sur les 40 visités avaient un but initial agricole (Tableau 4.1); ces 13 sites ont donc été exclus de la suite des analyses.

Province	Nbre Sites	But agricole	Aménagements Sylvo-pastoraux					
			Total	< 10 ha	10-20 ha	20-50 ha	50-100 ha	> 100 ha
Sanmatenga	11	7	4	2	1	1		
Yatenga	9	2	7	3		1	1	1
Passoré	6	3	3	2				
Soum	2	0	2					2
Bam	3	1	2			1		1
Oubritenga	8	0	8	5	1	2		
Ganzourgou	1	0	1	1				
Sanguié	0							
Bulkiemdé	0							
Bazèga	0							
Total	40	13	27	13	2	5	1	4

Tableau 4.1 Répartition par province et selon le but initial des sites de régénération des sols visités au cours de l'inventaire.

4.3.2 Les dispositifs et leur efficacité

A défaut de faire une description détaillée des dispositifs et techniques utilisés, nous faisons ici une synthèse des types de mesures prises, des conditions de réalisation et des résultats observés. Les dispositifs utilisés peuvent être regroupés en deux grandes catégories (**physiques et biologiques**), basées sur le matériau utilisé et le mode d'action (Tableau 4.2). A ces deux grandes catégories de dispositifs s'ajoutent des mesures de gestion consistant essentiellement à la mise en défens des espaces à régénérer. Les dispositifs physiques utilisent essentiellement des ouvrages mécaniques agissant sur les caractères physiques et particulièrement hydrodynamiques (états de surface, porosité) des sols à régénérer: obstacles matériels, travail du sol. Ce type de dispositifs sont rencontrés dans 98% des combinaisons de techniques utilisées. Les dispositifs biologiques utilisent du matériau végétal ou organique pour induire, soit directement soit par des processus biologiques, des modifications des caractères physiques ou biologiques des sols concernés. Ils sont généralement associés aux dispositifs physiques (dans 82% des combinaisons rencontrées). Du point de vue de leur disposition sur le terrain, les mesures de C.E.S., physiques ou biologiques, sont soit **linéaires** soit **spatiales**, en combinaisons plus ou moins complexes. Sur 27 sites retenus, nous avons pu décrire 61 cas de combinaisons se répartissant de la manière suivante: 23 cas de combinaisons à 1 seul dispositif technique, 27 cas de combinaisons à 2 dispositifs, 7 cas de combinaisons de 3 dispositifs, 3 cas de 4 dispositifs combinés et 1 cas de 5 dispositifs combinés. Le Tableau 4.2 rend compte partiellement de cette complexité. Nous essayons d'en analyser ci-après l'efficacité, sur la base des observations faites au cours de l'inventaire.

Les dispositifs physiques linéaires

1 - 3: les ouvrages isohypses

On regroupe sous ce vocable les diguettes en terre (1), les cordons pierreux et autres diguettes en pierres (2) et les diguettes de bois mort (3). Ces ouvrages sont généralement établis sur courbes de niveau. Pour cela, ils exigent des utilisateurs des connaissances techniques pour le lever des courbes de niveau. On les rencontre dans 62% des sites décrits et ils représentent 75% des dispositifs linéaires recensés. Les matériaux utilisés sont ceux qui sont les plus disponibles sur ou à proximité des lieux: terre, blocs de latérite, bois et, plus rarement, de la paille sous forme de fascines. L'objectif de ce type d'ouvrages est de **concentrer l'eau** par absorption ou par ralentissement du ruissellement, ainsi que les sédiments et les semences transportés. Le résultat se traduit généralement par l'apparition d'une végétation spontanée: toutes les observations montrent en effet que l'humidité du sol est plus élevée à coté des ouvrages qu'ailleurs pendant l'hivernage; ce qui favorise la germination des semences qui y sont concentrées (Photo 4.1). Cette bande de végétation est généralement plus large en amont qu'en aval des diguettes: les ouvrages filtrants (en pierres ou en bois) sont plus favorables à la naissance d'une végétation en aval; cependant à Nionigo et Tagala, le colmatage des cordons pierreux par les dépôts sédimentaires les ont rendus imperméables et transformés en banquettes déversantes (Photo 4.2). La bande de végétation, qui s'élargit de la diguette vers l'amont, progresse au rythme de la sédimentation; cependant elle a tendance à stagner rapidement après 2 à 3 ans si l'espace inter-ouvrages ne fait pas l'objet de mesures particulières. Sa largeur peut même se stabiliser à un moment donné: à Yabo (aménagement 1982), Bissiga et Koussougou (1987) par exemple, elle se situait entre 2 et 5 m en octobre 1992. Pour cette raison, ce type de dispositifs est **utilisé seul** dans seulement 13% des combinaisons recensées. Le plus souvent, ils sont combinés à d'autres dispositifs spatiaux, physiques ou biologiques.



Photo 4.1 *Les ouvrages isohypses concentrent l'eau et les semences et créent de meilleures conditions de germination. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso, 1991.*

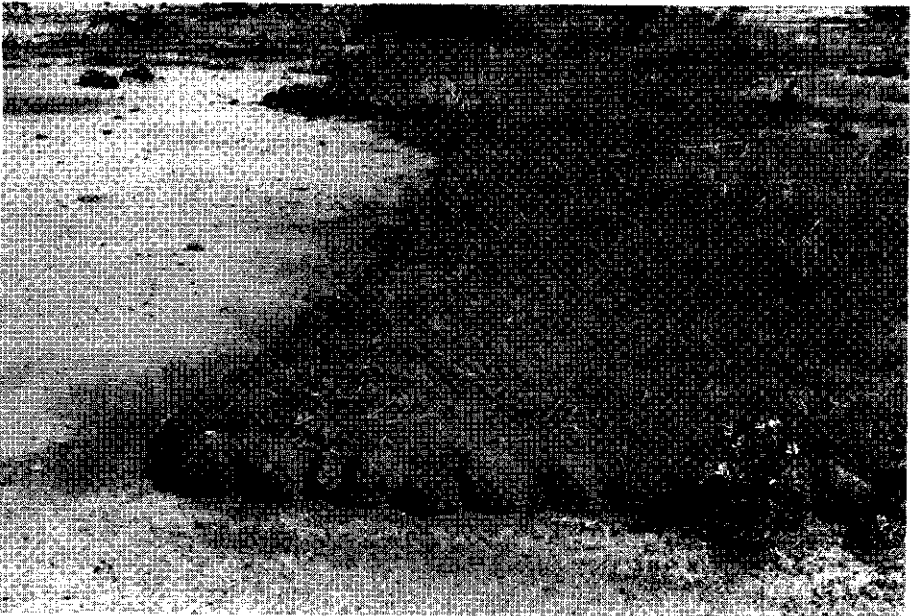


Photo 4.2 *Le colmatage de cordons pierreux peut les transformer en banquettes déversantes. Tagala, province du Sanmatenga, 1992.*

		EN COMBINAISON AVEC																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
PHYSIQUES	DISPOSITIFS	LINEAIRES	1. Diguelettes en terre	3	1				2	1	2	4	1	5	2	1	1	
			2. Cordons pierreux	5					1	2	4	2	2	6	1			
			3. Diguelettes en bois mort			1												
			4. Bandes sous-solées				1					3				2		
			5. Fossés d'infiltration					1							1			
	SPATIAUX	LINEAIRES	6. Micro-bassins							1			7	1				
			7. Sous-solage										1					
			8. Scarifiage/labour							2			1	3		2		
			9. Haies vives								2							
			10. Lignes d'Andropogon									1						
BIOLOGIQUES	SPATIAUX	11. Reboisement									3							
		12. Régénération assistée										3						
		13. Semis d'herbacées																
		14. Paillage/Mulching														2		

Tableau 4.2 Les combinaisons de dispositifs de C.E.S utilisées pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux. Nombre de cas rencontrés dans 27 sites décrits. Un même site peut comporter plusieurs combinaisons allant de la plus simple (1 dispositif technique) à la plus complexe (5 dispositifs combinés).

4: Les bandes sous-solées

Travaillées perpendiculairement à la pente (Bissiga, Tagala, Djibo, Donsé), elles visent à créer des zones d'infiltration préférentielle où se développera une bande de végétation spontanée, capable d'assumer un rôle anti-érosif vis-à-vis de l'espace situé en aval. Elles sont réalisées généralement à la machine et ont une largeur de 2 à 3 m. A l'intérieur de chaque bande, les lignes de sous-solage sont distantes de 50 cm environ. Les résultats observés sont plutôt décevants: seules ou ensemencées d'herbacées, ces bandes ont rarement donné des résultats durables (Bissiga, Tagala, Donsé); il naît une végétation herbacée composée d'annuelles, qui disparaît après 2 à 3 ans si des mesures additionnelles ne sont pas prises. Aucun des sites aménagés de la sorte n'a été protégé pour permettre d'apprécier l'effet de mise en défens. Quelquefois, lorsque des espèces ligneuses sont plantées dans les bandes travaillées (sous forme de haies vives par exemple), elles forment un obstacle sous lequel peut être conservée une maigre végétation herbacée (Photo 4.3).

5: Les fossés de diversion ou d'infiltration

On les a rencontrés sur un seul site (Silmouougou). Peu de choses peuvent être dites à leur sujet, en dehors du fait qu'ils coûtent cher et qu'ils sont rapidement comblés par l'érosion.

Les dispositifs physiques spatiaux.

On les retrouve aussi dans 97% des combinaisons décrites. Il s'agit des micro-bassins ou demi-lunes, du sous-solage et du scarifiage ou labour léger.



Photo 4.3 Les haies vives plantées sur les courbes de niveau forment un obstacle anti-érosif sous lequel peut se développer une végétation herbacée. Site anti-érosif de Koussougou (Donsé), 1992.

6: Les micro-bassins ou demi-lunes (Photo 4.4).

Ouvrages d'absorption du ruissellement de capacité limitée par leurs dimensions, ils sont généralement utilisés pour concentrer l'eau autour d'arbres individuels, plantés ou de régénération spontanée. Utilisés seuls (3 cas sur 8), ils sont aussi associés à d'autres mesures physiques, en particulier entre des ouvrages isohypses (5 cas sur 8). Ils utilisent comme matériau, la terre excavée du bassin d'absorption (Louda par exemple) et sont quelquefois renforcés avec ou simplement constitués de blocs de latérite disposés en demi-cercle à l'aval de l'excavation. En termes de résultats, les micro-bassins accumulent aussi les semences et concentrent ainsi des touffes de végétation herbacée qui demeurent, même en cas d'échec des arbres plantés. Pour cela, on les utilise seuls dans d'autres localités (régions de Tera et Tahoua au Niger) pour régénérer le tapis herbacé. Non entretenus, les micro-massins sont rapidement comblés par les sédiments qu'ils concentrent en même temps que l'eau. Les délais de comblement sont cependant suffisants pour que les arbustes plantés s'affranchissent.

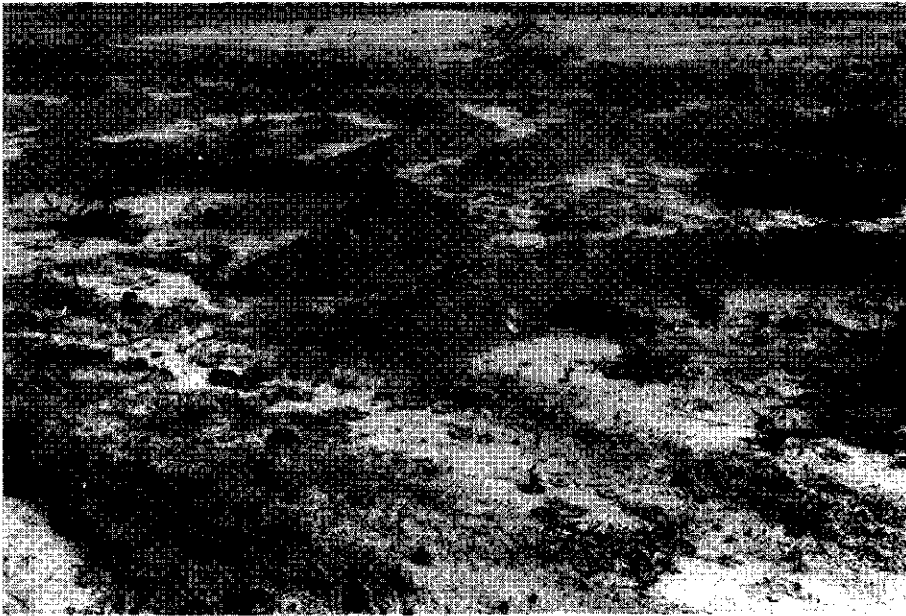


Photo 4.4 *Micro-bassins ou demi-lunes. Elles accompagnent généralement un reboisement comme ici des plantations de *Acacia nilotica* dans la forêt de Bissiga, 1992.*

7: Le sous-solage

Il est réalisé à l'aide d'une ou plusieurs dents tractées par une machine ou un animal; ce qui détermine la profondeur de travail du sol. On distingue deux types: le sous-solage en plein et le sous-solage croisé. Dans le sous-solage en plein les écartements sont généralement réguliers (40 à 50 cm). La technique du sous-solage vise plus à éclater le sol en profondeur en vue de stimuler de manière durable l'infiltration; de ce point de vue, elle se distingue du scarifiage. En raison de son coût de réalisation élevé le sous-solage est rarement utilisé seul: l'ensemencement d'herbacées, la plantation d'espèces ligneuses et des ouvrages anti-érosifs constituent les mesures qui sont couramment associées à la technique.

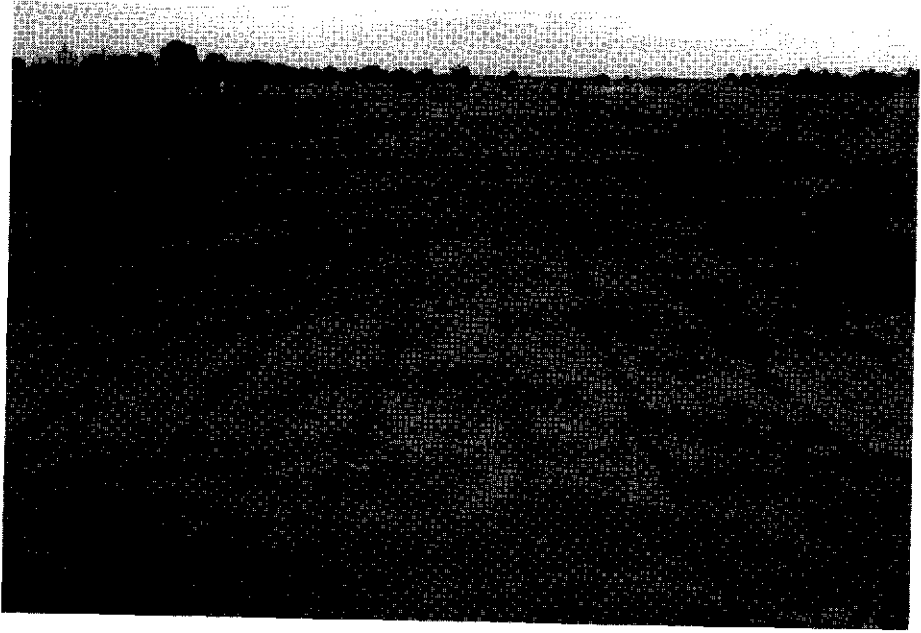


Photo 4.5 *Le sous-solage à sec avec une dent à traction animale n'a pas été suffisant pour stimuler l'installation de la végétation. Comme ici à You dans le Yatenga, 1992.*



Photo 4.6 *Le sous-solage sur sols superficiels, même motorisé, offre peu d'intérêt. Ici, à You-Ansolma (Yatenga) après 6 ans (1992), quelques touffes d'herbes sur les lignes de sous-solage.*

L'effet du sous-solage est plus ou moins durable selon la profondeur de travail et les mesures d'accompagnement prises: à Bissiga (1987), un sous-solage mécanisé (30 à 40 cm de profondeur) entre des banquettes isohypses, ensemencé de *Stryloxanthes erecta* et planté d'essences ligneuses a donné, quatre ans après, 5800 kg M.S./ha. pour un taux de recouvrement de 95%. A You (Yatenga) en revanche, les traces d'un sous-solage à la dent à traction asine, réalisé entre des diguettes en pierres et ensemencé d'*Andropogon gayanus* demeurent encore toutes visibles sur un sol toujours nu à la fin de la saison des pluies (Photo 4.5).

Le sous-solage croisé quant à lui est représenté par un seul cas: You-Ansolma dans le Yatenga (1986). L'outil utilisé est une dent de Ripper tractée par une machine (profondeur de travail de 30 à 40 cm). La méthode est utilisée seule ou en association avec des cordons pierreux, en fonction de l'importance du ruissellement: il s'agissait de créer autour d'un espace dénudé une infiltration préférentielle par le sous-solage croisé d'une bande de quelques mètres de largeur (Figure 4.2). La végétation spontanée qui naît dans cette bande doit évoluer de façon centripète jusqu'à couvrir le carré central non travaillé. Les résultats observés en 1990 puis en 1992, après 4 et 6 ans de protection, montrent que sur sols gravillonnaires moyennement profonds, la régénération est abondante, avec l'apparition d'herbacées pérennes dominées par *Andropogon gayanus* et une production estimée entre 5000 et 6000 kg/ ha de M.S. Les carrés initialement dénudés sont recouverts à 80 % de végétation. En revanche, sur les sols superficiels sur cuirasse, la présence de cordons pierreux, en plus du sous-solage, n'a pas toujours eu d'effet significatif: les traces du sous-solage sont encore quelquefois visibles, pendant qu'un maigre tapis herbacé est concentré le long des diguettes ou dispersé sur les lignes de travail du sol (Photo 4.6).

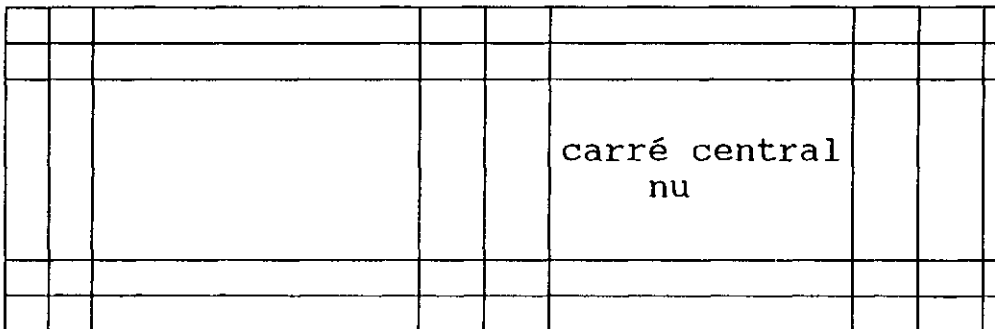


Figure 4.2 Dispositif utilisé en sous-solage à You-Ansolma. Les traits représentent les lignes de sous-solage qui délimitent des carrés nus.

8: Le scarifiage/ billonnage/ labour léger

A l'opposé du sous-solage, les outils utilisés ici sont manuels, ou tractés par des animaux: l'objectif est surtout de briser la croûte superficielle du sol et favoriser l'infiltration. La méthode est utilisée seule (dans 2 cas) ou associée à des ouvrages anti-érosifs (1 cas) ou à des mesures biologiques (4 cas de combinaisons): semis d'herbacées, paillage, épandage de fumier de petits ruminants pour stimuler la germination de semences de ligneux (Djibo et Se-Ganoua). Les résultats du scarifiage sont très variables selon les situations.

- Avec ou sans ouvrages anti-érosifs, le scarifiage simple a rarement donné des résultats durables. En raison des caractéristiques générales des sols étudiés (taux de limon assez élevé), casser superficiellement la croûte n'empêche pas sa reconstitution après 2 ou 3 pluies: l'humidité accumulée dans le sol est alors insuffisante pour générer et surtout entretenir un couvert végétal spontané; le ruissellement reprend ses droits: exemples de Tagala, Zanamogho, Se-Ganoua...

- Même accompagné d'un semis d'herbacées, le scarifiage est généralement trop léger pour créer les conditions d'humidité durables qui permettent la croissance d'espèces pérennes tel *Andropogon gayanus*, contrairement au sous-solage par exemple (You village).

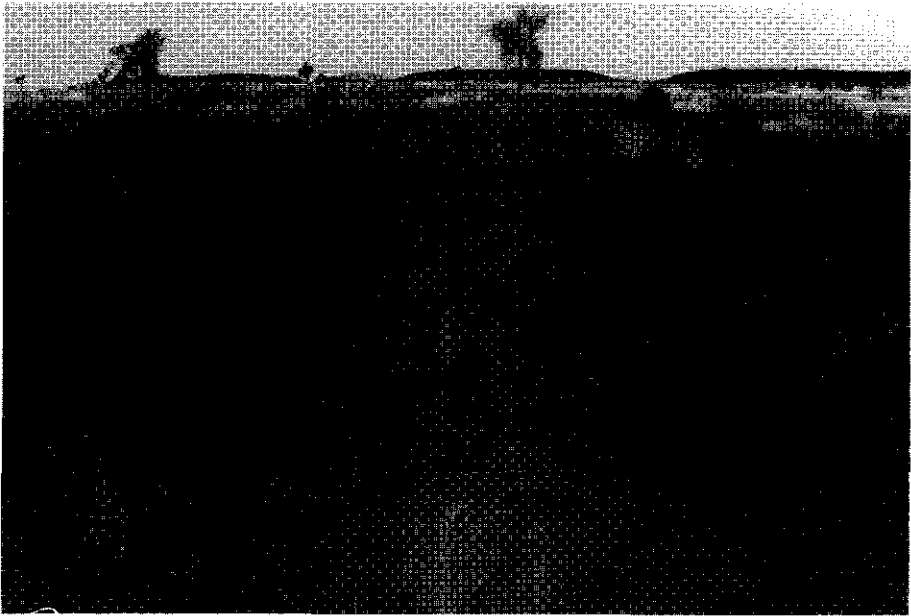


Photo 4.7 L'épandage du fumier de petits ruminants après un labour du sol est un procédé de régénération des ligneux. Ici des jeunes pousses d'*Acacia* spp. issues des graines ingérées et rejetées par les animaux. Djibo (Soum), 1992.

- Sous forme de micro-billons, le labour de surface est utilisé pour piéger le sable, l'eau et les semences et donner lieu à la naissance d'un couvert herbacé assez important: Se-Ganoua, Djibo. Dans ces deux localités, le procédé est largement employé pour régénérer les espèces ligneuses dont les semences sont contenues dans le fumier des petits ruminants (Photo 4.7). A Tougou (Yatenga), le billonnage cloisonné d'un espace inter-diguettes a favorisé la régénération spontanée d'espèces pérennes comme *Acacia holocericca* (planté en haies vives le long des banquettes) dont on observe rarement la régénération naturelle dans les conditions du plateau central.

Les dispositifs biologiques linéaires

Utilisés dans 85% des combinaisons rencontrées, les dispositifs biologiques sont très peu employés seuls dans la régénération des espaces sylvo-pastoraux, contrairement aux parcelles agricoles. En dehors d'un seul cas (Touroum au Sanmatenga) où *Andropogon gayanus* est repiqué en lignes perpendiculaires à la pente, tous les dispositifs biologiques linéaires (dans les espaces sylvo-pastoraux) accompagnent généralement des dispositifs physiques.

9: Les haies vives de ligneux

On les dénombre dans 8 sites sur les 27 décrits. Les haies sont mises en place par plantation de jeunes arbustes ou par semis direct de graines le long de diguettes anti-érosives (7 sites sur 8). L'objectif affiché des haies vives est de stabiliser les ouvrages mécaniques. C'est pourquoi elles sont plantées en aval immédiat des bourrelets, quelquefois en amont, ou semées sur le corps des digues en terre (Photo 4.8). Les résultats semblent bien confirmer cet effet de stabilisation sur les banquettes en terre (Bissiga, Yabo, Koussougou), même si la végétation herbacée apparaît comme le meilleur outil en la matière: les diguettes en terre avec une haie vive connaissent en moyenne des cassures moins nombreuses que celles qui n'en sont pas accompagnées.

Quelquefois, on plante les haies vives dans les bandes sous-solées (Koussougou, Bissiga-3), pour jouer un rôle anti-érosif et favoriser le maintien d'une végétation herbacée sous les arbustes. Au-delà du rôle anti-érosif, on taille parfois les haies vives pour servir comme paillis sur les surfaces demeurées nues (Photo 4.9).

10: Les lignes d'*Andropogoneae*

Très répandu dans les espaces agricoles du plateau central où il est traditionnellement planté seul ou associé à des diguettes anti-érosives, *Andropogon gayanus* est aussi utilisé en association avec des ouvrages isohypses pour la régénération des sols sylvo-pastoraux: You, Ziga, Tougou (Yatenga). Il joue, dans les cas répertoriés, un rôle de stabilisateur biologique des ouvrages et, comme dans les champs, il a aussi une fonction de production de fourrage et fournit surtout la paille nécessaire aux nombreux usages domestiques.

Les dispositifs biologiques spatiaux.

On les rencontre dans 60% des combinaisons décrites. Généralement, ces mesures accompagnent des dispositifs anti-érosifs linéaires et ont pour finalité d'accélérer l'installation du couvert végétal sur les espaces inter-ouvrages. Dans certains cas, elles sont même utilisées seules pour cet objectif.

11: Les reboisements "en plein"

Ils interviennent dans 33 % des combinaisons rencontrées et consistent en des plantations d'espèces ligneuses à écartements réguliers (2 à 4 m entre les arbres). Dans certains cas, les arbres sont plantés dans des micro-bassins en vue d'améliorer le taux de reprise et la croissance (voir dispositif 6). Lorsqu'elles sont associées à des ouvrages isohypses, les plantations d'espèces ligneuses intéressent généralement l'espace inter-ouvrages ou l'amont de ceux-ci. Leur finalité semble être d'accélérer l'implantation d'une composante ligneuse généralement considérée comme une étape significative de la régénération.



Photo 4.8 *Les haies vives d'arbustes sont plantées le long des diguettes pour stabiliser celles qui sont en terre. Ici, une haie de Acacia seyal issue de semis direct. Elle a 4 ans. Bissiga, Burkina Faso, 1991.*



Photo 4.9 *La coupe périodique des haies vives peut fournir du matériau (mulch) pour la régénération des espaces demeurés nus. Forêt classée de Yabo (Burkina Faso), 1992.*

12: La régénération naturelle spontanée ou assistée de ligneux

Lorsqu'elle n'est pas plantée, la composante ligneuse est tantôt stimulée dans sa régénération spontanée (Yabo, Bissiga), tantôt assistée en provoquant la germination et en facilitant la croissance des jeunes plantules: semis direct, épandage de fumier contenant des semences de ligneux... Dans les mise-en-défens de Djibo et Se-Ganoua, la mise en culture de parcelles a même servi de méthode de régénération de la strate ligneuse dans des espaces à vocation pastorale : les plantules, issues des déjections des animaux qui pâturent dans ces parcelles, sont protégées et soignées jusqu'à constituer de véritables bosquets denses (photo 4.10).



Photo 4.10 La régénération naturelle assistée des ligneux (à droite) dans des parcelles temporairement mises en culture. L'agriculture pour régénérer les pâturages. Mise en défens de Djibo, Burkina Faso, 1992.

13: Le semis d'herbacées

On l'a rencontré dans un seul cas (Bissiga-1, 1987) où il est utilisé pour valoriser un sous-solage mécanisé d'une superficie de 2 ha environ. Le choix a alors porté sur des espèces fourragères cultivées: *Dolichos lab lab*, *Styloxanthes erecta* et *Macroptilium artropurpureum* (*Siratro*). Les résultats ont été concluants, sous protection, dès la première année: un couvert végétal abondant dominé par *Styloxanthes erecta* s'est installé. Avec le temps, les espèces spontanées ont progressivement dominé la végétation où seul *Styloxanthes* représentait encore 22% de la strate herbacée en 1991.

Cependant, ce choix se révélera par la suite préjudiciable à l'évolution normale des processus de régénération, en raison de l'attraction massive et permanente exercée par ces espèces fourragères sur le bétail qui force ainsi la clôture posée.

14: Le paillage ou mulching

L'objectif affiché du paillage est de réduire l'impact des pluies sur le sol et, en stimulant l'activité de la macro-faune, celle des termites en particulier, d'améliorer l'infiltration. Le paillage utilise des matériaux herbacés ou ligneux (branchages morts ou phytomasse provenant de la coupe de haies), seuls ou sous forme de mélanges. Les cas de paillage ont été rencontrés dans 5 sites sur les 27 décrits, alors que la méthode est largement utilisée dans les parcelles agricoles de la zone d'inventaire.

Une remarque générale est que la surface de sol effectivement en contact avec le matériau végétal servant de paillis et la qualité physique (et minérale) de ce matériau sont des critères déterminants du résultat. En effet la paille herbacée, plus en contact avec le sol, retient davantage les sédiments et les semences et entretient une humidité plus favorable à la germination d'une végétation spontanée dès la première saison pluvieuse. C'est ainsi qu'à Yabo (1991) le paillage entre des diguettes en terre a développé en une saison des pluies un couvert végétal voisinant 60 % alors que les parties non paillées étaient couvertes à moins de 25%. Dans le même temps à Zanamogho, après 2 ans, un paillis de branches mortes n'a pas donné de résultat significatif. En revanche, un mélange de paille d'herbacées (aliment tendre) et de branchages séchés (aliment dur) semble stimuler davantage l'activité des termites par rapport aux seuls branchages secs: cette situation s'expliquerait par la diversité des espèces de termites rencontrées dans la zone et de leurs habitudes alimentaires. (Mando, 1992).

L'un des problèmes posés par le paillage est le transport du matériau végétal par l'eau de ruissellement ou le vent (observation faite à Yabo en 1991). Ce procédé semble donc le plus efficace lorsqu'il est combiné avec des mesures de freinage du ruissellement: diguettes isohypses, travail du sol. Par rapport aux résultats qu'il peut générer et à son coût d'utilisation, le paillage semble être une des mesures biologiques les plus efficaces et les plus économiques pour la régénération des sols dégradés. Ceci explique son usage quasi généralisé dans le plateau central, pour la remise en culture des glacis dénudés ou pour améliorer la levée des semis en début de saison.

4.3.3 Les mesures de gestion

Dans 17 sites sur les 27 décrits (soit 63%), les dispositifs de C.E.S. sont accompagnés de mesures particulières de gestion des espaces à régénérer. Les objectifs de régénération des ressources naturelles dans ces espaces supposent en effet l'application de mesures restreignant l'utilisation simultanée de ces ressources, au moins pendant la phase de reconstitution. Dans ces cas, on a eu recours à la protection à l'aide de clôture de grillage (9 cas sur 17), ou à une surveillance organisée (8 cas) soit par les bénéficiaires potentiels, soit par des gardiens rémunérés par l'initiateur de l'aménagement; cette dernière option est rencontrée dans 2 cas sur les 8. Dans d'autres cas, la protection sous forme de mise en défens constitue la seule mesure de régénération prise: ces sites très nombreux dans la zone d'inventaire, n'ont pas été spécialement pris en compte en raison de l'absence de mesures particulières destinées à stimuler les processus physiques et biologiques. Cependant, leur rôle sans cesse croissant dans les programmes et projets de réhabilitation des espaces sylvo-pastoraux mérite qu'on s'y penche.

La mise en défens

Le système de mise en défens (m.e.d.) est une idée qui se développe de plus en plus largement au Burkina Faso depuis 1985. Partie de la moitié Nord du pays sous l'incitation des Services forestiers, la m.e.d. des formations naturelles est aujourd'hui connue dans l'ensemble des régions du pays. Prenant aussi le nom de forêt villageoise, le système vise à soustraire l'espace concerné à toute exploitation, en vue de reconstituer les ressources végétales, en particulier forestières et fourragères. La superficie concernée, les méthodes de m.e.d. et sa durée sont déterminés par de nombreux facteurs dont la disponibilité relative des terres et des ressources végétales dans la zone, la motivation personnelle et le niveau d'organisation des populations potentiellement bénéficiaires ainsi que les moyens de protection mis en oeuvre.

Une des constantes de la zone d'inventaire est que les terres marginales sont de plus en plus défrichées pour les besoins agricoles, au détriment de l'E.S.P. Les priorités affichées par les populations dans la récupération des terres dégradées est leur remise en culture immédiate. Dans ces conditions trouver un espace à soustraire de toute utilisation, même temporaire et dont la superficie atteint 50 à 100 ha, est souvent impossible. De même, le statut traditionnel, tout comme la réalité foncière moderne des E.S.P. constituent des freins à une motivation réelle et durable des populations autour d'une mise en défens (Chapitre 2). Cette motivation a le plus souvent besoin d'être créée par des incitations extérieures. Les projets de développement publics ou conduits par des organismes non gouvernementaux (ONG) sont donc à la base de la plupart des m.e.d. au Burkina. Ceux-ci, en plus des incitations morales aux acteurs, doivent souvent créer des bases matérielles de motivation pour maintenir la participation paysanne, à condition cependant que la "philosophie" du projet (c'est-à-dire celle du bailleur de fonds) le permette.

La nature et la disponibilité des moyens de protection déterminent aussi les superficies mises en défens et l'efficacité du système. Deux méthodes sont les plus communément utilisées: le grillage métallique et la protection collective organisée.

Le grillage, dont le coût est généralement hors de portée des populations concernées, est le plus souvent fourni par le projet ou l'organisme d'appui. Les superficies protégées sont en conséquence limitées à quelques hectares: 1 à 30 ha selon les observations faites au cours de l'inventaire. L'autre inconvénient majeur de cette forme de protection est que le grillage fait l'objet de convoitises particulières pour des usages plus lucratifs. Les vols de grillage sont à cet effet courants. Si pour la raison des coûts élevés du grillage le système n'est pas reproductible par les seuls groupements organisés, il fait de plus en plus l'objet d'initiatives individuelles et privées (exemple de la région de Pissila dans le Sanmatenga), pour peu que les promoteurs se procurent du grillage, par un moyen quelconque. En revanche, ce genre de m.e.d. offre des conditions avantageuses pour les recherches et expérimentations en milieu contrôlé, lorsque leurs superficies sont adaptées.

La surveillance collective, comme méthode de mise en défens, est de plus en plus utilisée, en particulier dans la partie septentrionale du pays où les ressources fourragères sont devenues, aux yeux du paysan, aussi importantes que l'agriculture est aléatoire (Djibo, Seganoua, Zanamogho). Les superficies en jeu sont beaucoup plus importantes (de quelques centaines à quelques milliers d'hectares). Le système de surveillance collective met généralement en action une organisation plus ou moins complexe du ou des villages dont la m.e.d. touche aux terroirs traditionnels et dont les populations sont les bénéficiaires réels ou potentiels des ressources naturelles régénérées. C'est cette organisation qui édicte les règles de gestion pendant la phase de réhabilitation, veille à leur respect et détermine les possibilités et les conditions d'une exploitation éventuelle. En raison de sa nature collective, le système

doit en revanche faire face aux divergences d'intérêts entre les objectifs individuels à court terme de certains utilisateurs et ceux à long terme de réhabilitation du potentiel productif de ces espaces. Le caractère bénévole de la participation des acteurs et le statut commun de l'espace rendent sa gestion encore plus difficile, d'autant plus qu'aucune législation ne protège ce genre d'entreprise ni n'en garantit réellement l'usufruit par les initiateurs.

En termes d'efficacité, la protection apparaît comme une mesure d'accompagnement indispensable à la consolidation des processus biologiques de la régénération: sur 2 sites aménagés la même année (1987), avec les mêmes paquets techniques, les résultats observés après 5 hivernages montrent, pour le site protégé au grillage (Bissiga-1), une biomasse herbacée de 4000 à 5000 kg/ha de M.S disponible et un couvert végétal de 75 à 80%; sur le site non protégé (Kousougou), seules les haies vives le long des diguettes, malgré le broutage, ont connu un développement remarquable; le tapis herbacé, quant à lui, est réduit à l'amont des ouvrages sous les haies et à quelques poches de sédimentation entre les diguettes: la biomasse disponible était estimée entre 200 et 400 kg/ha de M.S. (Hien, 1994). Le premier site (Bissiga), dont la clôture a été enlevée au cours de l'année 1993, présentait en fin d'hivernage de la même année, une phytomasse totale inférieure à 800 kg/ha. Il n'était pas prévu de gérer cet espace de façon particulière après le retrait de la clôture; il n'était pas non plus déterminé d'indicateurs pouvant permettre d'apprécier le stade de régénération atteint et les possibilités réelles qu'offre l'espace aménagé.

L'entretien des aménagements

L'autre mesure de gestion des espaces en régénération est l'entretien des dispositifs de C.E.S. mis en place. Sur ce plan, le constat général est que rien n'est entrepris dans ce sens. Ce genre de coûts récurrents ne sont généralement pas prévus dans le projet initial: ils exigent des investissements (en main d'oeuvre) dont la mobilisation n'est pas toujours assurée au regard de la diversité des intérêts en jeu. La conséquence est une dégradation possible des ouvrages de C.E.S., comme par exemple la rupture des diguettes en terre et le comblement des fossés par les sédiments lorsque l'évolution du couvert végétal reste insuffisant. Dans ces conditions, et sans protection particulière, de nombreux aménagements de régénération d'espaces dégradés apparaissent parfois comme des investissements à perte.

La gestion après régénération

Au-delà de la protection pendant la régénération la gestion des espaces après régénération n'est pas toujours une préoccupation des initiateurs ou des bénéficiaires, comme ce fut le cas pendant longtemps des "bois de villages". Le caractère expérimental ou démonstratif des aménagements de régénération a rarement inclus les conditions de leur utilisation ultérieure: en l'absence de suivi quantitatif ou qualitatif du processus, il n'est pas possible de définir des normes pour une exploitation éventuelle soutenue. En plus de cela, l'échelle des aménagements n'offre pas assez d'intérêt pour les populations dont les besoins s'expriment en termes d'espaces extensifs et dont les priorités seraient de remettre en culture ces portions de terrain réhabilitées. C'est pourquoi, les rares fois que des mesures de gestion sont appliquées (Djibo et Se-Ganoua), elles entraînent souvent des choix douloureux et imposent des restrictions aux différents utilisateurs actuels ou potentiels de l'espace. Malheureusement, la question demeure tout aussi relativement "marginalisée" que le sont les activités de régénération des espaces sylvo-pastoraux elles-mêmes.

4.4 Les conditions optimales d'efficacité des mesures de régénération

L'inventaire des mesures de C.E.S. pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux était basé sur des observations et une description rapides des dispositifs utilisés et des résultats obtenus. En l'absence de données écrites, les analyses qui sont faites de ces résultats ne peuvent être qu'indicatives. Ce travail devrait être complété par une évaluation technique plus consistante des différentes mesures inventoriées. Les résultats observés au cours de l'inventaire, ont permis cependant d'identifier un certain nombre de conditions dont la réunion plus ou moins complète a pu déterminer l'efficacité des mesures de régénération. Réunir le minimum de ces conditions serait donc indispensable pour déclencher les processus physico-chimiques et biologiques de la régénération tandis que leur association optimale garantirait la durabilité de ces processus.

1. Le constat général est que les dispositifs utilisés sont constitués en toile de fond par des mesures visant à concentrer l'eau d'abord, mais aussi les sédiments et les semences: 89% des sites décrits ont été aménagés entièrement ou partiellement à l'aide d'ouvrages d'absorption ou de freinage du ruissellement: banquettes, cordons pierreux, micro-bassins, sous-solage en bandes isohypses. Or la principale caractéristique des terrains sylvo-pastoraux concernés est l'insuffisance d'infiltration qui permettrait le redémarrage et le développement des processus biologiques nécessaires à leur régénération. Ces ouvrages ont montré qu'ils constituaient la zone de concentration de l'activité biologique: le couvert végétal naît en amont et évolue plus ou moins rapidement en fonction des mesures d'accompagnement prises dans les espaces inter-ouvrages. **Concentrer l'eau, les ressources biologiques (semences), mais aussi les éléments nutritifs, serait donc une première condition pour déclencher la régénération des terrains dénudés.**

2. Dans 44% des sites visités, les dispositifs linéaires sont accompagnés de mesures spatiales destinées à accroître l'infiltration entre les ouvrages: scarifiage, labour, sous-solage, paillage, semis d'herbacées. Les résultats ont montré que l'évolution du couvert végétal et du volume de phytomasse produite est intimement dépendante de ces mesures: pendant qu'il atteint 95% en quelques saisons dans un espace sous-solé, le couvert herbacé demeure, même après 10 ans, inférieur à 50% en l'absence de mesures spatiales et dans les mêmes conditions de gestion. Par rapport aux aménagements isohypses simples, un simple paillis a triplé la production de biomasse après 2 ans (Yabo); elle est multipliée par 7 après 4 ans, par rapport aux espaces non traités, par une combinaison sous-solage + semis d'herbacées, "toutes autres conditions étant par ailleurs semblables" (Bissiga-1). **Les mesures spatiales apparaissent donc tout aussi nécessaires que les dispositifs linéaires; en augmentant et en régulant l'infiltration, elles accroissent et accélèrent l'efficacité spatiale des mesures de régénération.**

3. Le premier indicateur de la régénération est l'apparition de la végétation, quantifiable en termes de phytomasse ou de biomasse. Si elle constitue pour les espaces sylvo-pastoraux une finalité des mesures de régénération, la phytomasse produite par les végétations est en même temps un outil (ou un maillon) du processus: les mesures spatiales de type biologique et les résultats qu'elles produisent sont convaincants à ce sujet. Cependant, cet outil n'est efficace

que s'il est disponible en quantité minimale suffisante qui lui permette de remplir ses fonctions physiques et biologiques dans le processus (cf 3.2.2). Une observation a en effet été faite dans ce sens entre 1990 et 1992 à Yabo: une portion de terrain ayant fait l'objet d'un paillage simple en 1990 a généré un couvert herbacé de 40 à 50% pour une biomasse maximale de 300 à 500 kg/ha; le couvert végétal a connu une réduction progressive à 20-30% en 1991 puis à moins de 12% en 1992, malgré une protection intégrale contre les animaux et le feu. Le ruissellement a progressivement repris ses droits sur la parcelle qui n'a pas fait l'objet d'aménagements physiques particuliers.

Conserver sur les sols à régénérer une biomasse résiduelle minimale semble donc nécessaire à (ou stimulerait) l'évolution normale des processus de la régénération. L'évolution des aménagements non protégés et fortement pâturés renforce cette hypothèse. En d'autres termes, **l'évolution positive de la régénération est aussi liée à une quantité de biomasse minimale accumulée au cours des premières saisons de production. Dans ces conditions, la quantité de la phytomasse serait plus déterminante que sa composition, pour remplir les fonctions biologiques et physiques attendues.**

4. Dans 23 sites sur 27 décrits, l'introduction ou la conservation d'une composante ligneuse est une mesure principale ou additionnelle des aménagements. Le reboisement ou la régénération naturelle, spontanée ou assistée, constituent des mesures de régénération à part entière des espaces sylvo-pastoraux dans 9 sites sur 23. Le rôle joué par cette composante est, faut-il le rappeler, de stabiliser des ouvrages linéaires ou accélérer l'installation et le développement de la strate ligneuse considérée comme indicateur de l'étape ultime de régénération et comme facteur essentiel de la production de ces espaces.

Les observations montrent en outre que dans les espaces non protégés et fortement pâturés, la présence d'un couvert ligneux favorise le maintien sous les arbres d'une végétation herbacée. Ces arbres assument donc une fonction anti-érosive non négligeable, même si un accroissement de la densité de la strate ligneuse se fait généralement au détriment de la végétation herbacée.

Enfin, de nombreux auteurs soulignent le rôle déterminant des arbres dans les équilibres minéraux des systèmes sylvo-pastoraux: par leur système racinaire plus profond, les arbres permettent de recycler en surface les éléments nutritifs lessivés ou stockés dans les couches inaccessibles aux végétations herbacées; ils enrichissent ainsi la couche superficielle et peuvent contribuer à équilibrer les pertes par exploitation. **La composante ligneuse servirait donc à accélérer puis à stabiliser les processus de la régénération.**

5. La protection, une condition utile à la dynamique de la régénération.

Dans un milieu où le système d'élevage est caractérisé par la divagation du bétail et par des ressources fourragères limitées, la protection des espaces mis en régénération apparaît comme le moyen de conserver le capital minimum de phytomasse nécessaire à l'entretien des processus physico-biologiques sans lesquels la régénération pourrait régresser. En regard des investissements en termes de mesures techniques déployées pour la régénération, le manque à gagner ou les risques d'échec liés à l'absence de protection sont souvent disproportionnés. Cependant, il demeure impensable de régénérer l'espace sylvo-pastoral grâce à des clôtures de grillage dont le coût est tout aussi disproportionné par rapport aux résultats espérés et à l'ampleur des besoins. De même, il serait tout aussi vain de vouloir régénérer les espaces sylvo-pastoraux si les priorités actuelles des populations qui les exploitent ne peuvent être renversées, grâce à une intensification des systèmes de production agro-pastoraux.

4.5 Les conclusions de l'inventaire

L'inventaire des mesures de régénération des espaces sylvo-pastoraux dans le plateau central laisse apparaître les constats suivants: une large gamme de mesures de C.E.S. sont utilisées pour la régénération des sols dégradés: les aménagements sont constitués en général de combinaisons plus ou moins complexes de 1 à 5 mesures physiques et biologiques. Elles visent dans leur majorité à accroître la disponibilité de l'eau et la concentration des semences pour stimuler la naissance et le développement d'un couvert végétal. Ces expériences ont en commun les caractéristiques suivantes:

- **des informations de base peu disponibles:** très peu de données écrites sont disponibles sur les conditions initiales des terrains et sur la description technique des mesures prises en vue de leur régénération. Dans les rares cas où elles existent, ces données sont dispersées dans des sources ou documents d'origine et de destination diverses.
- **Une absence de suivi des processus et de leurs résultats** et une manque d'intérêt apparent des initiateurs ou des bénéficiaires potentiels: réalisés sous forme d'essais démonstratifs, ces aménagements ne répondent pas à un besoin de recherche qui aurait justifié un suivi ou une évaluation scientifique et technique de leur efficacité. Dès lors, les résultats sont exceptionnellement quantifiés ou décrits.
- **Très peu d'aménagements sont entretenus ou renouvelés.** Le statut de ces aménagements, la responsabilité non ou peu engagée des bénéficiaires potentiels ou des initiateurs dans la gestion des sites, expliquent l'absence d'entretien des dispositifs mis en place qui se dégradent: quelquefois, la clôture des aménagements est frauduleusement soustraite pour des besoins plus lucratifs (jardins maraîchers).
- **Une envergure spatiale insuffisante pour assurer un impact significatif:** les mesures prises concernent rarement une unité fonctionnelle (bassin versant ou sous bassin versant): 18% des sites décrits ou évalués ont une superficie > 50 ha tandis que 48% sont plus petits que 10 ha. Dans certains cas, la taille réduite et la localisation de la parcelle ont même provoqué une perturbation du fonctionnement hydrologique du sous-bassin dans lequel elle a été aménagée: exemple de Tagala. Cette échelle permet tout aussi difficilement de tirer des conclusions scientifiques représentatives de ce type d'espaces.

A la suite de l'inventaire, l'étude détaillée des processus de la régénération a été conduite sur deux sites traités par les Services forestiers au cours des dix dernières années. Les dispositifs de base utilisés sont des diguettes en terre qu'on retrouve dans près de 30% des combinaisons techniques recensées. En plus de la superficie minimale aménagée (5 à 30 ha), ces sites offrent les conditions de protection et de sécurité les plus avantageuses pour des recherches en milieu contrôlé. Malgré les problèmes d'entretien que ce genre d'aménagements pose, leur importance relative dans l'ensemble des mesures de régénération utilisées s'explique par une double considération. D'abord, le statut "communal" des e.s.p. et l'importance des besoins de régénération dans ce domaine font que le mode d'intervention le plus réaliste consiste, en dehors des mise-en-défens simples, à privilégier l'emploi des matériaux les plus disponibles sur place, en l'occurrence la terre, pour la confection des ouvrages anti-érosifs. Ensuite, les coûts de réalisation des diguettes en terre sont en moyenne plus modestes (la collecte et le transport des blocs de latérite reste le maillon le plus cher des aménagements actuels de cordons pierreux), en même temps qu'il est possible de traiter des superficies plus importantes, au besoin en utilisant des moyens mécanisés (voir 4.2).

5 Les sites expérimentaux

5.1 Introduction

L'inventaire des mesures de C.E.S. utilisées pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux et l'analyse qui en a été faite ont abouti à l'identification sommaire de cinq conditions dont la réunion constituerait le moyen optimal de parvenir aux résultats les plus durables. L'étape suivante consiste à mesurer de façon détaillée, dans des sites qui répondent le plus à ces conditions, les paramètres essentiels des processus de la régénération. Ce travail d'évaluation a été conduit dans deux sites représentatifs des espaces sylvo-pastoraux du plateau central et des types de mesures de C.E.S. les plus fréquemment rencontrés au cours de l'inventaire. Au-delà des critères de représentativité, ces deux sites ont été identifiés pour répondre à deux préoccupations. (i) Prendre en compte les dix dernières années comme période d'évaluation: les aménagements de C.E.S. réalisés au cours des dix dernières années permettent d'avoir le recul nécessaire pour apprécier l'efficacité des mesures prises; (ii) permettre une vision évolutive des processus de régénération: compte tenu de l'insuffisance de données initiales sur les mesures inventoriées, une étude synchronique d'aménagements d'âge croissant peut permettre d'illustrer les tendances des espaces en régénération.

Ainsi, les sites de Yabo et de Bissiga ont été choisis à la suite de l'inventaire effectué en septembre 1990, sur la base des caractéristiques et similitudes suivantes:

- Similitude des conditions environnementales: deux forêts classées; tous les terrains aménagés sont situés en bordure d'un cours d'eau, le Nakambé (ex Volta Blanche) ou ses affluents. Ils présentent les mêmes types de dégradation et sont soumis à des pressions humaines et animales semblables.
- Similitude des mesures de C.E.S. déployées pour la régénération de ces terrains, avec des intensités variables dans chaque cas et d'un cas à l'autre. (cf. 5.2.4 et 5.3.4)
- Différence d'âge croissante dans les aménagements réalisés, d'une station à l'autre, permettant au début des travaux d'évaluation (1991), de disposer de parcelles de 1, 4 et 9 ans.
- Existence, dans chaque cas, de terrains dégradés non encore aménagés, tenant lieu de témoin.
- En 1987, les deux forêts classées ont fait l'objet de projets de plans d'aménagement qui ont défini des unités d'aménagement incluant les parcelles qui nous intéressent et pour lesquelles un même type de gestion a été proposé: "régénération des sols".

5.2 Le site de Yabo

5.2.1 Localisation (Figure 5.1)

La forêt classée de Yabo est située à 70 km au nord de Ouagadougou, sur l'axe routier Ouagadougou-Kongoussi. Ses coordonnées sont: 12° 58' - 13° nord; 1° 27' - 1° 34' ouest. La forêt a été classée en 1936. D'une superficie initiale de 1585 ha, elle inclut deux enclaves: Yabo et Malou. Comme pour la plupart des forêts domaniales à l'époque, le classement visait d'une part à "créer des réserves forestières" susceptibles de répondre aux besoins énergétiques d'un chemin de fer en pleine construction et d'autre part à "préserver un minimum d'équilibres écologiques" dans les zones concernées. Dans l'*arrêté de classement* de 1936, des droits d'usages portant sur la cueillette et le pâturage sont reconnus aux communautés villageoises voisines de la forêt. Les villages des enclaves de la forêt de Yabo ont été peuplés entre le 16^{ème} et le 17^{ème} siècle par des agriculteurs sédentaires Mossi. Avec le tracé de la route Ouaga-Kongoussi, et plus récemment la construction d'un barrage sur le fleuve Nakambé, la région a vu se développer une intense activité commerciale (bois de feu et pêcheries) et pastorale: le lac de barrage constitue le seul plan d'eau permanent de la zone.

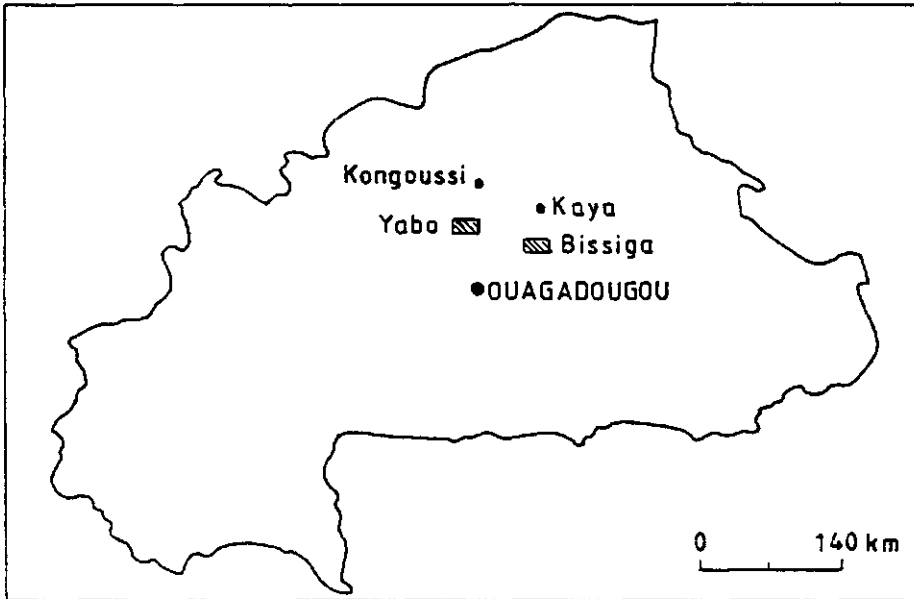


Figure 5.1 Localisation des sites d'étude des forêts classées de Yabo et Bissiga

5.2.2 Le climat

Le climat est de type Nord-soudanien avec 4 à 5 mois de saison pluvieuse (mai à septembre) pour des précipitations annuelles moyennes de 643 mm (1962-1992). Le régime pluviométrique de la station de Mané (20 km à l'est, à la même latitude que Yabo), comme l'ensemble de la zone nord-soudanienne, est caractérisé par de fortes variations inter-annuelles. A Mané, on a observé en effet une tendance décroissante des totaux annuels et du nombre de jours de pluie entre 1962 et 1986 (Figure 5.2). On assiste toutefois depuis 1986, à une remontée sensible des précipitations annuelles:

- de 620 à 670 mm entre 1986 et 1990 à la station de Mané.
- en 1991, 1992 et 1993, le site expérimental de la forêt classée de Yabo a enregistré respectivement 717,9 mm en 44 jours, 701,4 mm en 58 jours et 717,2 mm en 46 jours.

La température moyenne minima pendant la période sèche et froide (décembre à février) est de 15° C, tandis que les maxima pendant les périodes chaudes (mars à juin) sont en moyenne de 39° C. L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint 2000 mm/an. (Zombré et al., 1993).

5.2.3 Les paysages et les sols

Les paysages de la forêt classée (Figure 5.3)

Une étude des paysages et des sols qui les caractérisent a été réalisée selon un transect situé sur une toposéquence sud-est→nord-ouest ; ce transect est reporté à la figure 5.4. L'étude révèle trois types de paysages:

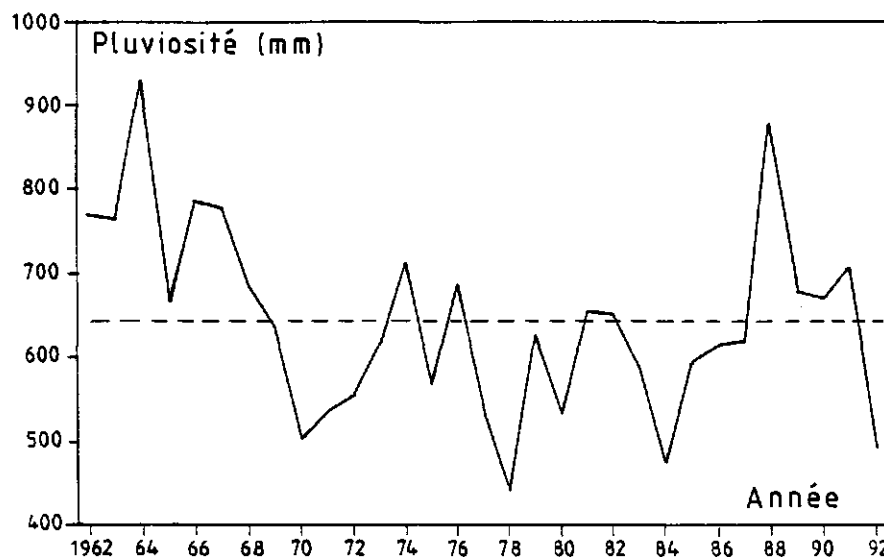


Figure 5.2 Evolution de la pluviométrie annuelle moyenne à la station de Mané, entre 1962 et 1992.

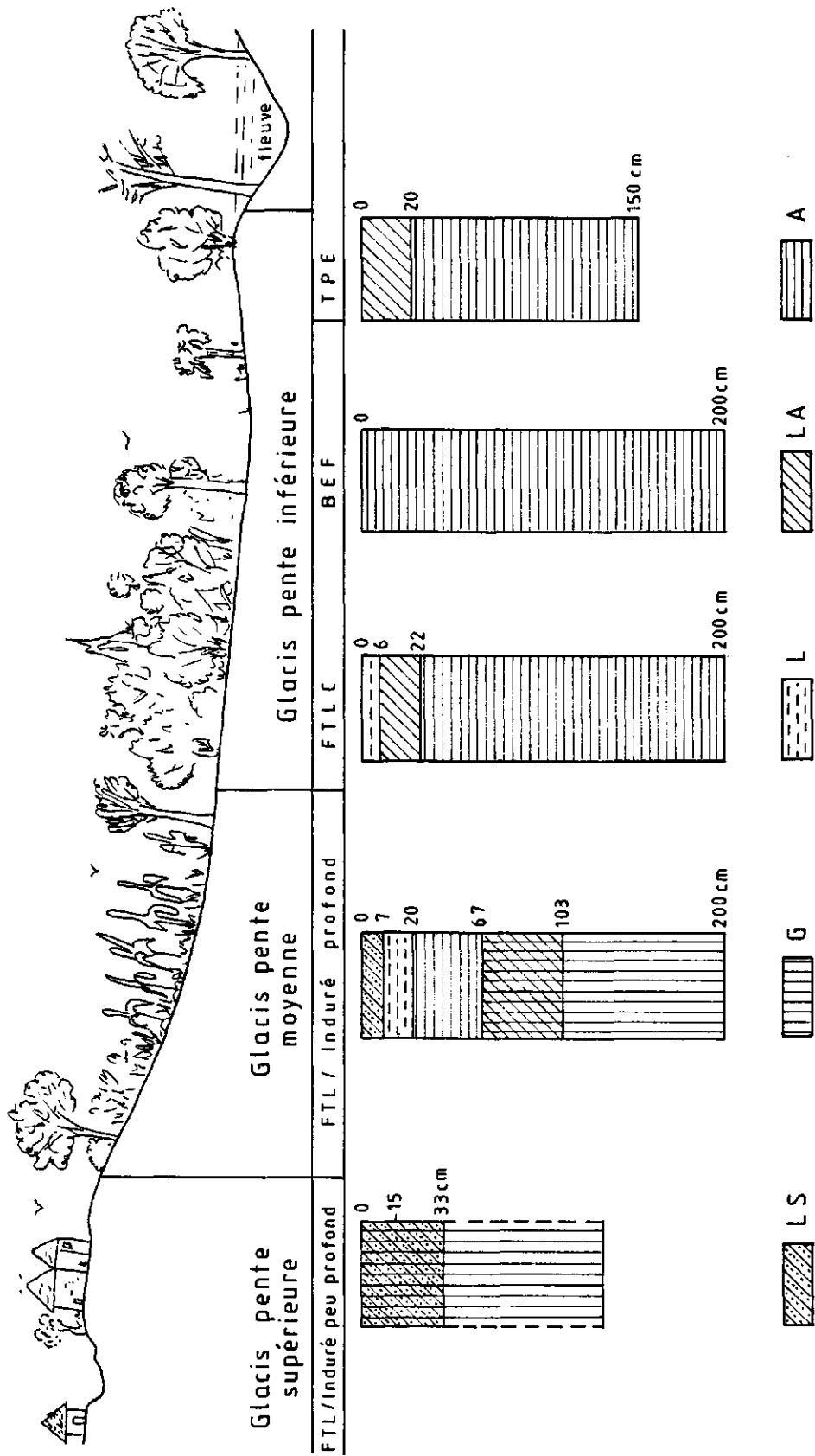


Figure 5.3 Les principaux paysages et types de sols de la forêt classée de Yabo, d'après un transect SE-NO. Les différentes textures des sols sont mentionnées par: LS pour "limono-sableux", LA pour "limono-argileux", L pour "limoneux", A pour "argileux" et G pour "teneur élevée en éléments grossiers ou horizon induré".

Un glacis pente supérieure

Il est caractérisé par un sol ferrugineux tropical lessivé (FTL) induré peu profond (Classification CPCPS, 1967). Le Profil comporte une cuirasse ferrugineuse à 30 cm environ de profondeur. Les deux horizons sus-jacents sont graveleux et ont une texture limono-sableuse. La structure demeure développée, polyédrique subangulaire, de la surface à l'horizon induré. De faible capacité d'échange cationique, le profil est moyennement à fortement désaturé. Le PH est acide (5,9 entre 0 et 15 cm). Ces sols sont rarement exploités en raison de leurs caractéristiques; ils sont colonisés par une maigre végétation herbacée composée d'annuelles (*Loudetia togoensis*, *Borreria radiata* et *Zornia glochidiata*). La végétation ligneuse est composée de reliques de fourrés à *Balanites aegyptiaca*. Quelquefois habitée, cette partie du paysage a aussi servi, en cas de besoin, de zone d'emprunt de latérite pour la construction des routes.

Un glacis pente moyenne

On y rencontre un sol ferrugineux tropical lessivé, induré profond. Par rapport à la position antérieure, la couche supérieure du sol est plus profonde. Celui-ci est caractérisé par un fort taux d'éléments grossiers, par d'abondantes taches (30-40%) brun olive clair et rouges, et par une induration à partir de 60-70 cm de profondeur. Sur toute l'épaisseur du profil, la texture est moyenne à fine et la structure faiblement à moyennement développée, polyédrique subangulaire. Le pH (eau) y est neutre et le complexe absorbant faiblement à moyennement désaturé. Ces sols sont occupés (dans l'enclave de Malou en particulier) par des champs de case où des cultures mixtes (céréales, tabac, Calebasses) sont pratiquées, simultanément ou successivement, au cours de la saison pluvieuse.

Un glacis pente inférieure

C'est la zone qui comprend une partie de l'enclave de Malou et conduit, à travers la forêt classée, au fleuve Nakambé. Ce sont généralement des sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions (FTLC). Le profil à texture fine a une structure faiblement à moyennement développée, devenant plus fortement développée en profondeur. L'horizon supérieur, limoneux et massif, est progressivement érodé, résultant en des profils tronqués à texture plus argileuse. Des taches et graviers ferrugineux ou ferromanganifères apparaissent autour de 50 cm et augmentent en nombre avec la profondeur. Ces sols sont généralement acides jusqu'à 90-100 cm. Il y a aussi des sols bruns eutrophes ferruginisés (BEF) profonds dont les horizons sont argileux, à structure moyennement à fortement développée sur toute son épaisseur. On en rencontre un faciès alcalisé dans le site expérimental aménagé en novembre 1990. Plus près des berges du fleuve, on rencontre des sols tropicaux peu évolués (TPE). De texture limono-argilo-sableuse en surface et plus argileuse en profondeur, le profil présente une structure massive sur toute sa profondeur. Lorsqu'ils ne sont pas nus, ces sols sont colonisés par des végétations plus ou moins denses à *Acacia seyal*.

La végétation et l'évolution du couvert végétal

La végétation de la forêt classée

Elle résulte des variations observées au niveau des caractères édaphiques, en particulier la profondeur utile, le taux de gravillonnement et la réserve en eau utile. Ainsi elle évolue des glacis herbeux dégradés à *Loudetia togoensis* aux galeries forestières marécageuses à *Mitragyna inermis* et *Anogeisus leiocarpus*, en passant par des savanes arborées dégradées à *Butyrospermum paradoxum* (dans les jachères des enclaves) et des savanes arbustives plus

ou moins dégradées à *Combretum spp*, *Guiera senegalensis*, *Loudetia togoensis* et *Andropogon pseudapricus* dans la forêt classée.

L'évolution du couvert végétal

La pression humaine et animale sur les formations naturelles de la zone en général, et de la forêt classée en particulier, n'a cessé de croître au cours des 20 dernières années. Il s'en est suivi une dégradation accélérée de la végétation et des sols, illustrée par les observations suivantes effectuées dans la partie gauche de la forêt qui contient le site expérimental et qui est délimitée par les axes Malou-Kongoussi, Malou-Yako et le fleuve Nakambé (Figure 5.4). Sur une superficie d'environ 175 ha, on notait:

- en 1956, 12,5 ha de sols nus (ou "zipellés" en langue locale), soit 7% de la superficie de la partie concernée;
- en 1980, 24 ans après, c'était 55 ha qui étaient nus représentant 30% du total;
- enfin en 1988, 70 ha étaient des "zipellés", soit 40% de la surface initiale.

De 1956 à 1980 il y a donc eu une augmentation de 23% des surfaces dénudées. Pire, en 8 ans, c'est à dire de 1980 à 1988, il y avait 10% de sols nus en plus. La dégradation des sols a donc une allure exponentielle; et tant que des mesures ne sont pas prises pour l'arrêter c'est l'ensemble des écosystèmes locaux qui se trouvent menacés. Ainsi, selon le projet de plan d'aménagement de 1987, le site expérimental est inclus dans les unités qualifiées de "sols quasiment nus et érodés" pour lesquelles le type de gestion préconisé est la "régénération des sols".

Les sols du site expérimental

Le site expérimental est situé à l'extrémité ouest de la forêt, dans le glacis pente inférieure, le long du fleuve Nakambé où la dégradation des sols est la plus accentuée. Une étude pédologique effectuée en avril 1991 sur ces espaces nus révèle la présence de trois types de sols (cf Figure 5.5):

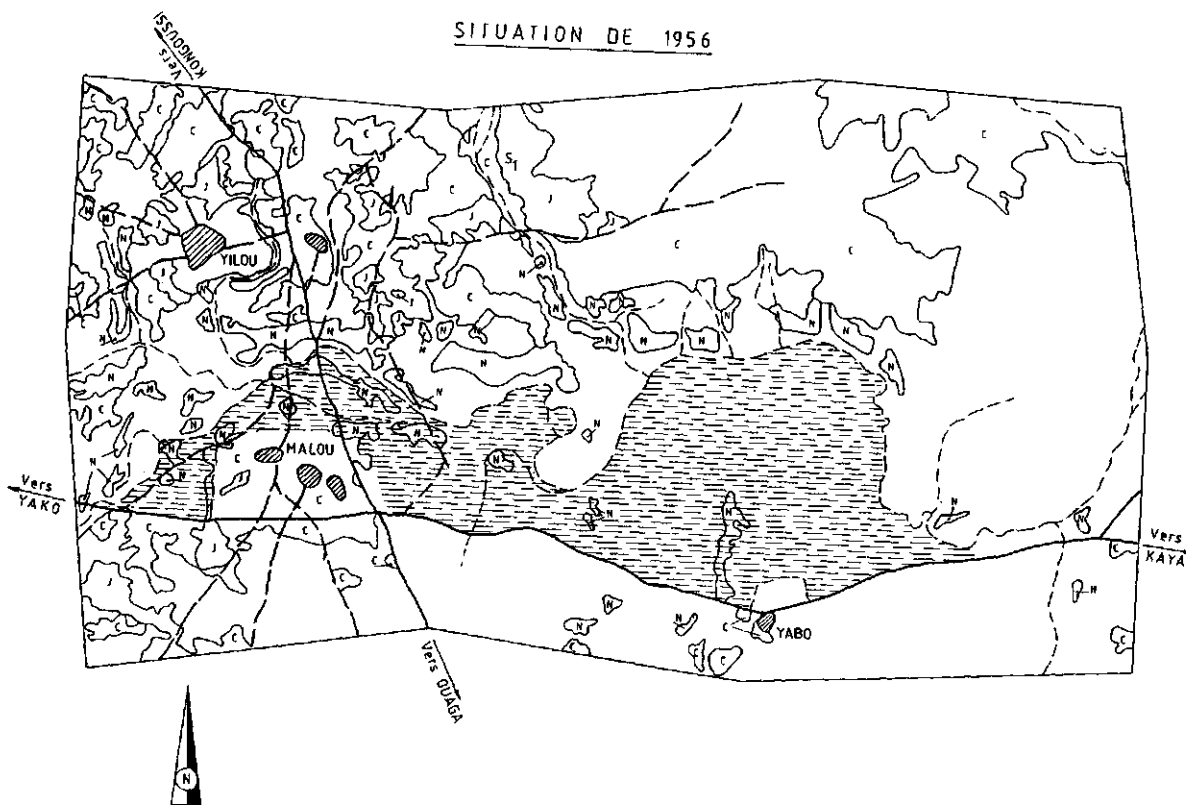
- des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions (FTLC) qui représentent 23% de la superficie du site;
- des sols bruns eutrophes ferruginisés (BEF) représentant 71 % de la surface du site;
- des sols tropicaux peu évolués (TPE), situés à proximité de la rivière, qui couvrent 6% de la superficie du site aménagé.

Seuls les deux premiers types ont fait l'objet d'une description détaillée. On a ainsi relevé les caractéristiques suivantes:

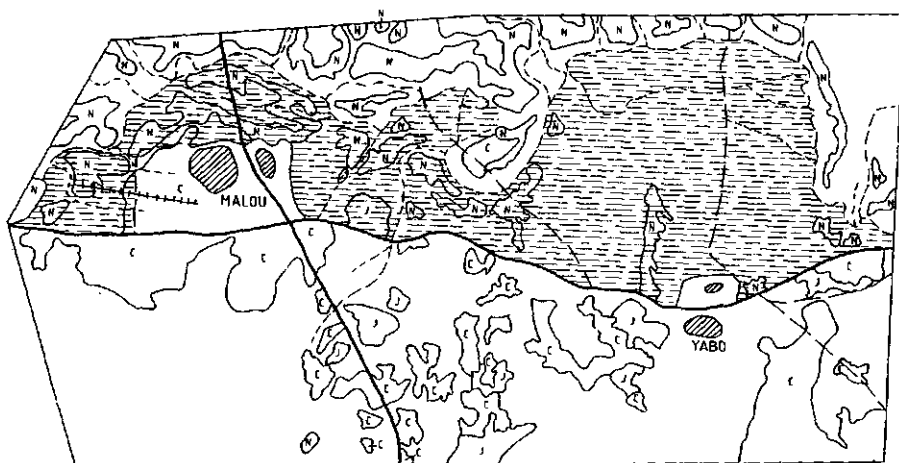
Sur le plan physique

Les sols bruns eutrophes ferruginisés (BEF) sont de texture argilo-limoneuse, avec une teneur en argile généralement supérieure à 40% (43% en moyenne) qui augmente avec la profondeur, environ 31% de limon dont la teneur diminue en profondeur et 26% de sable; le taux de sable grossier s'accroît en profondeur. Généralement caractérisés par des surfaces érodées, ces sols ont une densité apparente de 1,6 g/cm³ en surface et $\geq 1,8$ g/cm³ au-delà de 50 cm de profondeur. La réserve utile en eau est de 18% (en volume) en surface et n'est plus que de 12% à 1,50 m de profondeur. La structure est moyennement à fortement développée. Le coefficient de ruissellement annuel moyen mesuré sur ces surfaces nues est de 60%, pour des pertes en terre pouvant atteindre 28 t/ha/an.

SITUATION DE 1956



SITUATION DE 1980



LEGENDE :

- | | | |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| C : Champ de culture | +++++ : Transect d'étude | : Village |
| J : Jachère | — : Route | : Domaine de la forêt |
| N : Zone dénudée | - - - : Piste | |
| : Végétation naturelle | - · - · - : Cours d'eau | |

Echelle 0 1 km

Figure 5.4 Occupation des sols et évolution du couvert végétal autour de la forêt classée de Yabo entre 1956 et 1980.

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions (FTLC) présentent, par rapport aux sols bruns, une texture plus limoneuse en surface, avec 35 à 40% de limon, 32 à 38% de sable et 26 à 29% d'argile. Le taux d'argile augmente sensiblement en profondeur avec des valeurs de 47 à 49% après 50 cm. La prédominance du limon et du sable prédispose ces sols à la battance et à la formation de surfaces compactes caractérisées par des croûtes structurales ou d'érosion, quelquefois recouvertes d'algues noires. La densité apparente sèche est voisine de 1,5 g/cm³ en surface (20 premiers cm) et peut atteindre aussi 1,8 g/cm³ à 1,50 m de profondeur. L'horizon de surface a une structure massive à polyédrique sub-angulaire, moyennement développée, tandis qu'elle est nettement plus développée en profondeur. Le coefficient de ruissellement annuel moyen est de 70%, pour des pertes en terre de 13 à 20 tonnes/ha/an. Il peut cependant atteindre 80% sur certaines surfaces d'érosion.

Les états de surface (figure 5.6)

Au moment de la mise en place des aménagements de CES, les sols du site expérimental étaient caractérisés par trois types de croûtes (Cassenave et Valentin 1989), Figure 5.6:

- les croûtes d'Erosion (ERO), essentiellement remarquables sur les sols ferrugineux situés en amont, les sols du centre de la zone aménagée, et sur les sols peu évolués. Elles représentent 58% de la surface totale de l'aménagement;
- les croûtes de ruissellement (RUI), issues du décapage par érosion de la couche humifère (précédemment ERO). Elles forment 40% de la superficie des parcelles aménagées et sont surtout caractéristiques des sols bruns eutrophes ferruginisés;
- des croûtes grossières (G) sont caractéristiques d'un faciès anthropique localisé de sols bruns ferruginisés. La présence de nombreux tessons de poteries laisse penser qu'il s'agit d'une ancienne habitation. Extrêmement compacte, cette partie des sols bruns est par ailleurs alcalisée (pH 8,3 à 8,9), ce qui pose des problèmes pour la régénération naturelle de la végétation.

Sur le plan chimique et biologique

Après plusieurs années d'inactivité biologique notable, les teneurs en matière organique (m.o.) varient en fonction du type de sol et des états de surface. Le taux de matière organique est faible en profondeur ($\leq 0,2\%$ après 50 cm). Par contre, les analyses faites dans l'horizon 0-20 cm montrent que la teneur en m.o. varie de 0,5 à 1,2% selon les cas; les croûtes ERO contiennent plus de m.o. que les croûtes RUI, quel que soit le type de sol. Pour un même type de croûte (ERO ou RUI), le taux de m.o. est plus élevé lorsque cette croûte est formée sur sols ferrugineux que sur sols bruns eutrophes ferruginisés.

Du point de vue de la fertilité chimique, ces sols nus contiennent 300 à 600 mg/kg d'azote total et 100 à 300 mg/kg de Phosphore total dans les 20 premiers cm. Ces teneurs diminuent sensiblement avec la profondeur.

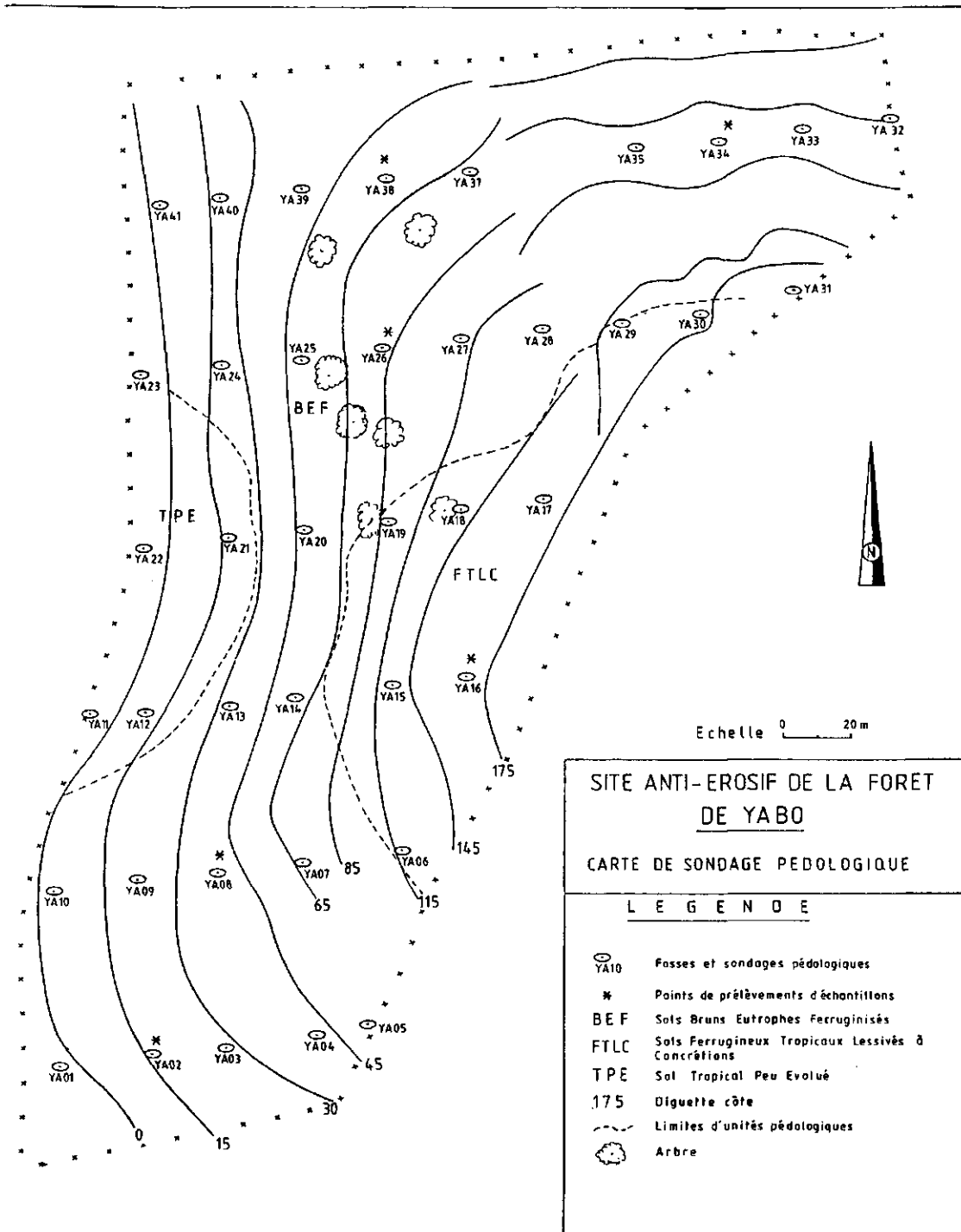


Figure 5.5 Forêt classée de Yabo. Aménagement d'un site anti-érosif en terre pour la régénération des sols dégradés (4,5 ha). Carte de sondage pédologique.

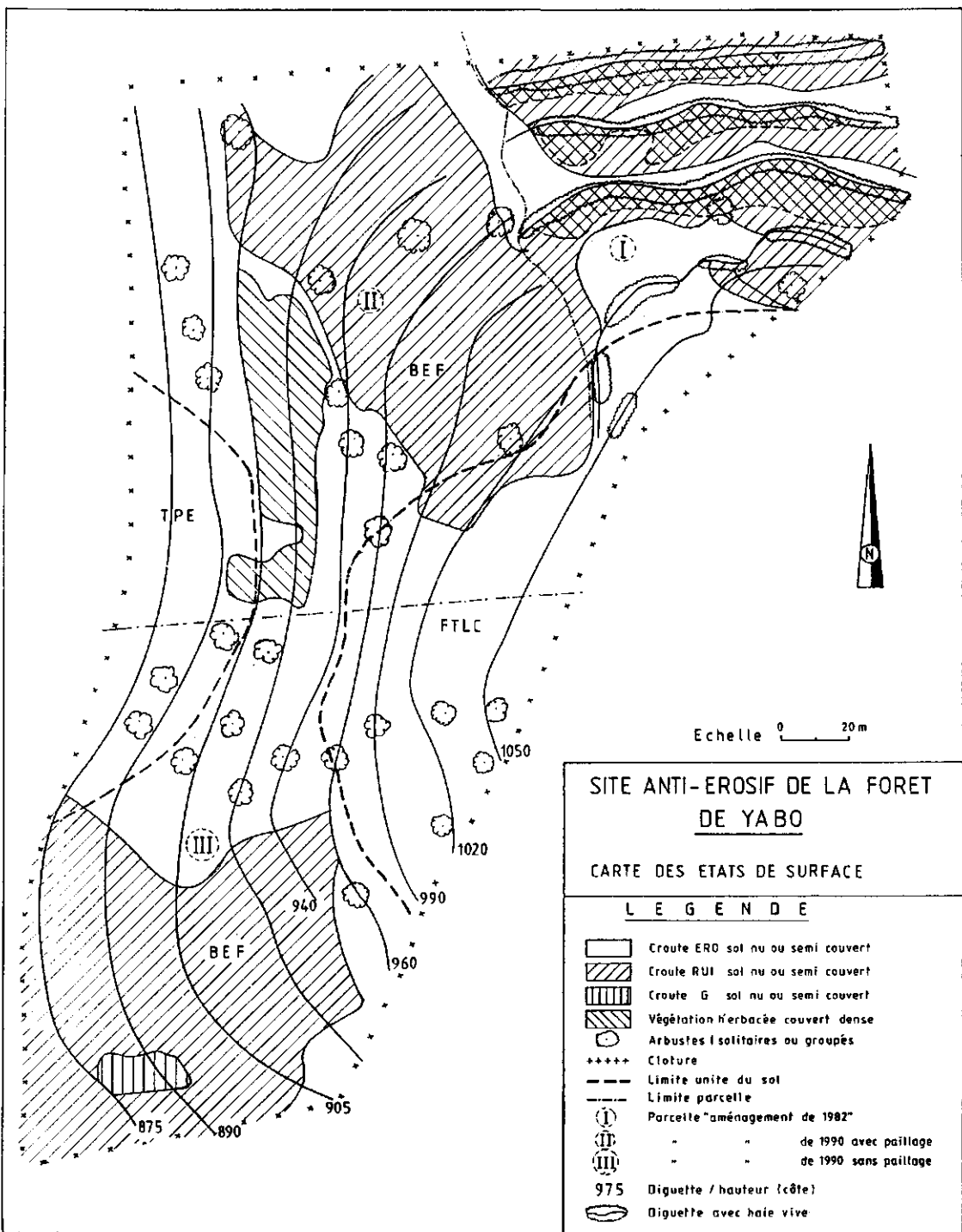


Figure 5.6 Aménagement anti-érosif en terre pour la régénération des sols dégradés dans la Forêt classée de Yabo. Carte des états de surface un an après l'aménagement (juin 1992).

5.2.4 Les mesures de c.e.s. déployées

Les aménagements qui ont été exécutés sur ces sols nus datent de 1982 (Van Staveren, 1986) et 1990, et ont certainement été à la base des types de gestion proposés dans le projet de plan d'aménagement de la forêt.

Sur une superficie de plus de deux hectares traitée en 1982

- Des diguettes en terre isohypses de 30 cm de hauteur, avec fossé en amont, à raison de 550 m/ha, ont été construites à la main.
- En 1984, une clôture a été posée autour d'une superficie de 1 ha environ et des plantations expérimentales de haies vives réalisées en aval des diguettes (Hien et Zigani, 1987). En plus, des plantations d'essences locales en micro-bassins individuels ont été exécutées aux écartements de 4 m x 4 m entre les diguettes.

Sur un espace de 3,5 ha environ traité en novembre 1990

- Des diguettes en terre isohypses d'environ 35 cm de haut, avec fossé en amont, ont été réalisées à la main, à raison de 600 m/ha environ.
- Un épandage de paille de graminées récoltée dans la végétation avoisinante a été effectué sur une portion de 1,75 ha environ. L'autre portion de 1,75 ha est restée sans paille.
- Une clôture de grillage métallique a été posée aussitôt après l'aménagement, incluant la parcelle de 1 ha de l'aménagement 1982/84.

5.2.5 Les bases du protocole expérimental (Figure 5.7)

Les différences d'âge et d'intensité dans les aménagements réalisés permettent de considérer que la station de Yabo comporte trois parcelles expérimentales ou traitements:

- la parcelle de 1 ha aménagée en 1982 (dénommée "82") et clôturée en 1984: diguettes isohypses en terre avec plantation ou semis direct d'arbustes sous forme de haies vives en aval des diguettes et plantations intercalaires d'essences ligneuses en micro-bassins individuels;
- la parcelle aménagée en novembre 1990 à l'aide de diguettes isohypses en terre simples (appelée "90"): 1,75 ha environ;
- la parcelle aménagée en novembre 1990 à l'aide des diguettes isohypses en terre, avec un paillage systématique de l'espace inter-diguettes (dénommée "90P"): 1,75 ha environ.

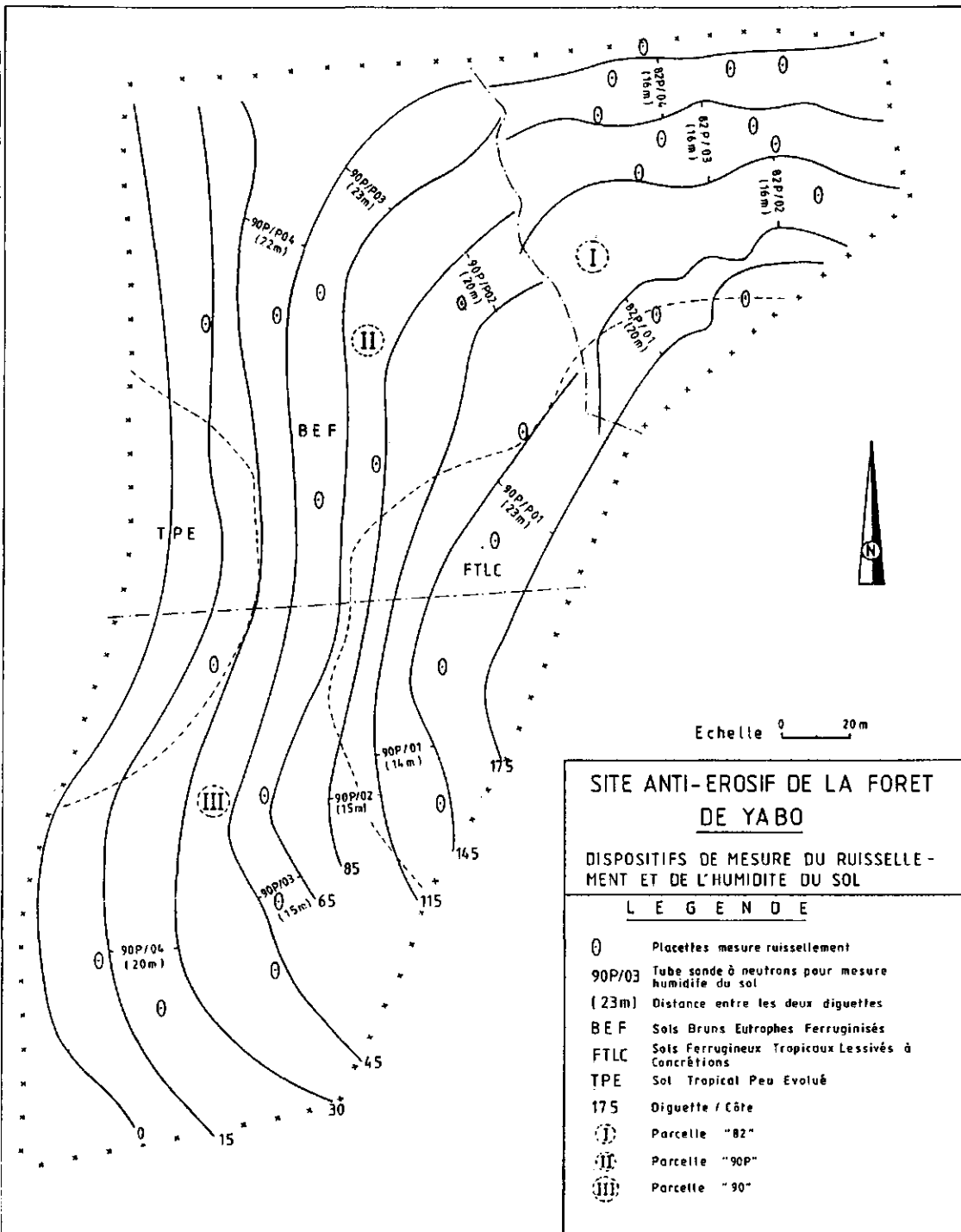


Figure 5.7 Dispositif expérimental de base et emplacements des points de mesure du ruissellement et du stock d'eau du sol à la station de la forêt classée de Yabo.

5.3 Le site de Bissiga

5.3.1 Localisation

Le site expérimental est inclus dans la forêt classée de Bissiga, située à 55 km au nord-est de Ouagadougou sur la route de Kaya. Ses coordonnées sont: 12° 43' nord et 1° 11' ouest (figure 5.1). Ici comme à Yabo, le site de recherche de 30,5 ha de superficie est situé en bordure d'un affluent du fleuve Nakambé. La forêt de Bissiga a été classée elle aussi en 1936, dans les mêmes circonstances que celle de Yabo, puis agrandie en 1941; elle a une superficie de 3200 ha et forme avec la forêt dite de Nakabe (2000 ha), un "massif forestier" à cheval sur le fleuve et entouré de 16 villages dont deux villages d'éleveurs. La zone est parcourue par un important réseau hydrographique constitué du Nakambé et ses affluents. La pression humaine et animale est forte autour des deux forêts (davantage autour de celle de Bissiga) qui forment les seules réserves naturelles de la région: la population dans la zone atteint 58 habitants/km² avec un accroissement annuel de 3,5% (1985); quant au bétail, il était estimé en 1987 à l'équivalent de 5000 à 8000 UBT (voir aussi Chapitre 2.4).

5.3.2 Le climat

Le climat est du même type qu'à Yabo: une pluviométrie moyenne de 660 mm/an (1964-1990). En 1991 et 1992, on a enregistré respectivement 589 mm et 809 mm dans la station de la forêt classée.

5.3.3 Les paysages et les sols

Les sols.

Selon un sondage effectué en 1991 sur le site expérimental, les sols sont du type ferrugineux tropical lessivé ou colluvial avec, à proximité de la rivière, des sols peu évolués. L'occupation humaine qui a caractérisé cette zone jusqu'au 18^{ème} ou 19^{ème} siècle a laissé des traces sous la forme de plages de sols anthropiques peu évolués à faciès ferruginisés ou de sols ferrugineux modaux. De texture limono-sablo-argileuse à argilo-limoneuse en surface, ils sont surtout argileux et très compacts en profondeur: la densité apparente varie de 1,6 g/cm³ en surface (0-20 cm) à plus de 1,8 g/cm³ à 130 cm, avec une réserve en eau utile variant de 14% à 15 cm à 6% à 130 cm de profondeur.

Sur le plan chimique, des analyses effectuées en 1991 indiquent un pH légèrement acide à neutre dans les 50 premiers cm. Le taux de matière organique varie de 0,4 à 0,9% dans les 20 premiers cm sur les sols nus, pour 200 à 360 mg/kg d'azote total et 20 à 35 mg/kg de Phosphore assimilable (P-OLSEN).

La végétation et l'évolution du couvert végétal

La végétation de la forêt de Bissiga est dominée par une savane arbustive dense à *combretacées*, fortement dégradée le long du réseau hydrographique. On rencontre encore quelques formations arborées denses à *Khaya senegalensis*, *Adansonia digitata* et *Lannea spp.* Dans les plaines inondables, la végétation est constituée de galeries forestières à *Mitragyna inermis*, *Daniellia oliveri* et *Anogeissus leiocarpus*, tandis que les cuvettes d'inondation temporaires sont colonisées par des formations arbustives denses à *Acacia spp.*

Les pressions humaines et animales exercées sur les terres ainsi que la péjoration des conditions climatiques ont eu pour conséquences entre 1956 et 1990 (34 ans):

- un accroissement de 123% des superficies cultivées de la zone de Bissiga-Nakambe (soit 3,5% /an);
- une réduction de 46% de la superficie des jachères;
- un accroissement des zones dénudées de 266% (7,7% l'an), en particulier le long des cours d'eau;
- dans la forêt de Bissiga, la progression des zones dénudées a atteint 21% /an au cours de cette période: elles occupaient 180 ha en 1990 soit 5,6% de la forêt, contre 22 ha soit 0,7% de la forêt en 1956.

Qualifiés de zones "non régénérables" (Kaboré, 1987), ces sols nus ont été classés dans l'unité de gestion "régénération des sols" du projet de plan d'aménagement.

C'est dans ce cadre donc qu'en 1986/87, des mesures de CES ont été prises pour la réhabilitation de certaines parties dénudées de la forêt.

5.3.4 Les mesures de c.e.s. utilisées

La zone qui a fait l'objet de nos travaux a une superficie de 30,5 ha. Elle est située en bordure de la route de Kaya, le long des berges d'un affluent du Nakambé. Les aménagements exécutés en 1986 et 1987 par le Service des Eaux et Forêts d'Oubritenga avec l'appui de l'ONG "LVIA" comportent:

- des diguettes anti-érosives en terre à raison de 220 m/ha, avec des exutoires renforcés par des cailloux;
- des plantations de haies vives en amont des ouvrages isohypses sur une partie des aménagements et un semis direct d'espèces arbustives sur les bourrelets des diguettes sur le reste. Entre les diguettes on a planté, en micro-bassins individuels, des espèces ligneuses aux écartements de 4 m x 4 m.
- dans la partie située en haut de pente, l'espace inter-diguettes, sur une superficie de 2 ha environ, a fait l'objet d'un sous-solage mécanisé de 30 à 40 cm de profondeur, en sillons parallèles distants de 50 cm.

Cette partie a été ensemencée d'herbacées fourragères: *Dolichos lab lab* (dolioue), *Stylosanthes erecta* et *Macropitium arthropurpureum* (siratro); enfin, on y a aussi planté des espèces ligneuses aux écartements de 4m x4m.

- une clôture en grillage métallique a été posée à l'issue des aménagements.

5.3.5 Les bases du dispositif expérimental

Trois traitements ont été considérés sur la base de l'intensité des mesures de C.E.S. et de l'homogénéité apparente de la végétation.

- Un traitement comportant les diguettes en terre avec plantation de haies vives en amont, sous-solage de l'espace inter-diguettes sur une profondeur de 30 à 40 cm accompagné de semis d'herbacées fourragères et de plantation d'espèces ligneuses dans le même espace. Située en haut de la toposéquence et désignée par "BS", cette parcelle est considérée comme traitement unique, sur la base de l'homogénéité du couvert végétal qui la caractérise.
- Une parcelle comportant les diguettes en terre avec plantation ou semis de haies vives d'arbustes le long des ouvrages et plantations intercalaires d'espèces ligneuses en micro-bassins individuels entre les diguettes. Elle est située dans la toposéquence en aval de la parcelle "BS". Elle est subdivisée en deux sous-parcelles, sur la base des caractéristiques des végétations herbacées et ligneuses: la partie située sur la pente moyenne, à la suite immédiate de "BS" (sous-parcelle "BH") dont la végétation reflète l'intensité des mesures de C.E.S. qui y sont déployées et la partie située en bas de pente (sous-parcelle "BB") qui est influencée par la rivière et dont la composition et la structure des végétations reflètent cette influence.

Les sites expérimentaux de Yabo et de Bissiga, au delà des similitudes et des différences d'intensité dans les aménagements de CES utilisés, ont été plus ou moins efficacement protégés au grillage; ce qui a permis d'assurer une relative continuité des processus physico-chimiques et surtout biologiques de la régénération. Cependant, en raison de certaines considérations techniques, on a limité à la seule station de Yabo l'analyse d'une partie des données collectées pendant les trois années de mesures. En effet, la différence des outils de mesures du stock d'eau du sol entre Yabo (humidimètre à neutrons) et Bissiga (blocs poreux en gypse) d'une part, le faible niveau de précision et la mauvaise qualité des données relatives au bilan hydrique et aux flux d'éléments nutritifs dans la station de Bissiga d'autre part nous ont amené à ne prendre en considération, pour cette dernière station, que les informations relatives à la dynamique des végétations. Cette restriction ne remet toutefois pas en cause la compréhension des processus de la régénération, tels qu'induits par les mesures de C.E.S. des types utilisés dans ces deux forêts.

6 Le bilan d'eau

6.1 Introduction

L'analyse des critères d'efficacité des mesures de C.E.S. utilisées pour la réhabilitation des espaces sylvo-pastoraux dégradés montre que la concentration des eaux de pluie, créée par les dispositifs physiques notamment, est une condition essentielle au déclenchement du processus de régénération. Collecter et infiltrer l'eau de pluie suffisent en général à relancer l'activité biologique des sols dégradés. Dans le cas des dispositifs linéaires et spatiaux utilisés à Yabo ou ailleurs (Bissiga notamment), l'objectif premier était de modifier le mouvement et le bilan de l'eau dans l'espace aménagé, en vue de favoriser un processus global de remontée biologique. Ce chapitre tente donc d'approcher le bilan de l'eau tel qu'il résulte des mesures de régénération déployées sur la station de Yabo, au cours des années 1991 et 1992. En premier lieu, nous décrivons le modèle du bilan hydrique défini par des ouvrages d'absorption du ruissellement. Après une brève description des méthodes de mesure des différents paramètres, les résultats sont discutés. Les précipitations qui constituent les seules sources d'entrée, le ruissellement, ses relations avec la pluviométrie et les mesures de C.E.S., le régime hydrique du sol qui permet de calculer les pertes par évapotranspiration et drainage, sont tour à tour abordés. Le bilan hydrique est décrit en tant que résultante de ces entrées et sorties, avec un aperçu de ses répercussions sur le développement des végétations et l'alimentation de la nappe.

Approche théorique du bilan d'eau

Les mesures de CES utilisées dans les stations expérimentales sont basées sur des dispositifs linéaires d'absorption du ruissellement; ces dispositifs créent ainsi à la surface du sol une hétérogénéité marquée schématiquement par l'apparition de trois situations qui sont liées au mouvement de l'eau: l'**amont (AM)**, l'**aval (AV)** des ouvrages anti-érosifs et l'**espace interdiguettes (IN)** (Figure 6.1).

L'amont des ouvrages ("AM")

C'est l'espace situé jusqu'à 1 m de part et d'autre du niveau minimal du fossé amont de chaque diguette; sa caractéristique principale est qu'elle constitue la zone d'accumulation des eaux de ruissellement provenant de la portion d'espace qui sépare l'ouvrage concerné de celui situé immédiatement avant lui dans le sens d'écoulement des eaux. Ce point est donc le lieu où les conditions d'humidité sont en principe les plus favorables, au moins pendant la saison pluvieuse; il connaît régulièrement un excédent hydrique et accumule les sédiments et les semences véhiculés par le ruissellement. Il offre en premier les conditions pour la germination des semences en début d'hivernage et peut par conséquent être considéré comme le "**nid de la régénération**", à partir duquel le processus de régénération biologique est initié (cf. Chapitre 8).

En termes de bilan de l'eau, on peut y distinguer:

- les entrées (en mm de lame d'eau) constituées par la **pluviométrie (P)**, le **ruissellement** provenant de l'espace inter-diguettes (R);
- les "pertes" qui comprennent l'**évapotranspiration (ETR)**, le **Drainage (D)** consécutif aux excédents temporaires et les **crues des ouvrages** liés à l'accumulation du ruissellement.

L'équation du bilan hydrique pourrait donc s'écrire:

$$dS = P + \alpha R - ETR - D ,$$

où dS est la variation du stock d'eau dans la couche de sol étudiée, $P + \alpha R$ représente la lame d'eau accumulée, dans les limites de la capacité de stockage des ouvrages concernés et $\alpha = L/l$ (Figure 6.1).

L'aval des ouvrages ("AV")

Situé immédiatement en aval des diguettes anti-érosives (jusqu'à 2 m de l'ouvrage), cet espace est soumis à un ruissellement qui peut être accentué par l'érosion progressive du corps de la diguette en terre lorsque le couvert végétal est insuffisamment développé. Il apparaît comme le lieu le moins favorisé, tout au moins en surface. Cependant, l'accumulation importante d'eau en amont permet aux points "AV" de bénéficier des écoulements hypodermiques liés à la redistribution latérale ou drainage oblique (DI).

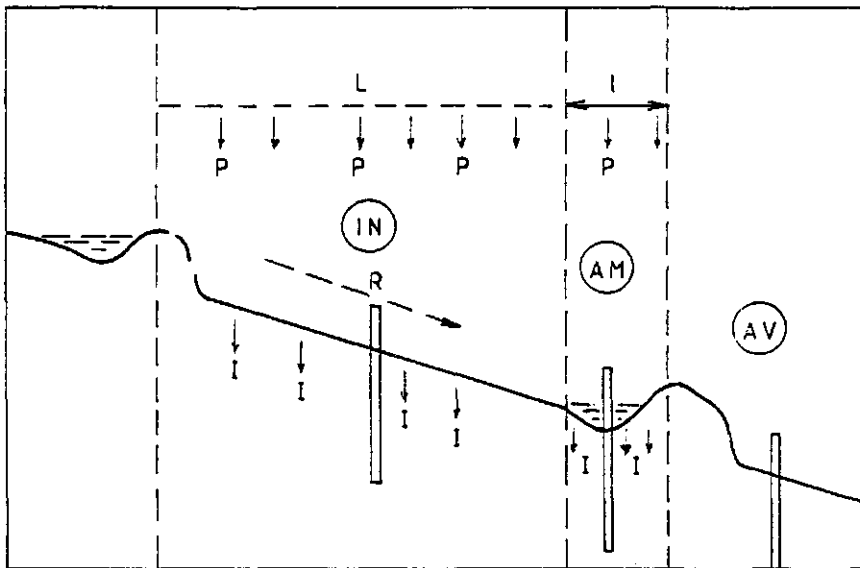


Figure 6.1 Modèle du fonctionnement hydrologique du système d'absorption du ruissellement (diguette en terre) et base schématique d'évaluation des processus de régénération. **P** représente les précipitations, **R** le ruissellement et **I** l'infiltration.

Ainsi, le bilan hydrique en ce point pourrait être traduit par l'équation

$$dS = P-R+DI-ETR-Dr$$

où DI représente la portion du drainage hypodermique oblique enregistré en direction de l'aval des diguettes (DI est une portion du drainage total) en AM et Dr le drainage profond par ailleurs désigné par percolation.

L'espace inter-ouvrages ("IN").

L'espace entre deux diguettes successives constitue la portion la plus étendue des parcelles aménagées, ce d'autant plus que l'espacement entre les ouvrages est grand. Il fonctionne essentiellement comme un impluvium qui alimente la zone "AM".

En fonction de l'état de surface du sol et de la pente, cet espace est soumis à un ruissellement et à une érosion plus ou moins importants qui alimentent en eau et en sédiments l'amont de la diguette. Selon la période de l'année, l'eau de ruissellement transporte aussi les semences qui permettent l'installation de la végétation. Cependant, lorsque la surface du sol (végétation, micro-relief) favorise l'infiltration des eaux de pluie, l'espace inter-ouvrages peut devenir le siège d'une activité biologique intense. A ce niveau, les phénomènes de surface (ruissellement et évapotranspiration) sont les plus déterminants pour le bilan de l'eau qui pourrait être traduit par l'équation $dS = P-R-ETR-D$,

où R est le ruissellement moyen mesuré et D le drainage total éventuel. Dans les conditions des sites aménagés de Yabo, le front d'humidité varie considérablement dans l'espace inter-ouvrages selon l'état de surface : sol nu, paillage, végétation naturelle. En fonction de la distance à la diguette, certains points de cet espace peuvent en effet subir en profondeur, et de façon ponctuelle, les effets de la remontée des eaux accumulées en amont des ouvrages.

6.2 Les paramètres et méthodes de mesure

Le bilan hydrique a été approché à partir des mesures des précipitations, du ruissellement et du calcul de l'infiltration, ainsi que le suivi du stock d'eau par des mesures d'humidité du sol pendant deux saisons pluvieuses (1991, 1992) et une saison sèche (1991/92).

6.2.1 Les précipitations

On a mesuré les précipitations en 1991 et 1992 à l'aide d'un pluviomètre enregistreur (ou pluviographe) de type "HELMAN" dont le tambour à révolution journalière permet d'enregistrer la hauteur d'eau tombée, la durée de la pluie et de calculer ainsi l'intensité (hauteur d'eau/temps). Le pluviographe a été fixé à 1 mètre au-dessus du sol, au milieu du périmètre expérimental. En 1993 les mesures ont été poursuivies, à titre indicatif cette fois, à l'aide d'un pluviomètre à lecture directe.

6.2.2 Le ruissellement et l'infiltration

On a mesuré le ruissellement en 1991 et en 1992 à l'aide de placettes individuelles de 1 m² (1,25m x 0,80m). Ces placettes en tôle forgée ont été enfoncées à 10 cm avec une hauteur de 10 cm au-dessus du sol, délimitant ainsi l'espace de mesure. Elles permettent de collecter l'eau de ruissellement dans un fût placé dans une fosse pratiquée en aval. (Photo 6.1). Après chaque pluie, l'eau collectée est vidée, à l'aide d'une pompe manuelle, et mesurée. Le taux de ruissellement (KR) est calculé; l'infiltration est instantanément déduite du ruissellement. Ainsi, on divise chaque pluie en ruissellement (R) d'une part et en infiltration (I) de l'autre.

Le dispositif comporte des placettes de mesure en aval des diguettes anti-érosives (AV) et dans les espaces inter-ouvrages (IN) à raison de quatre répétitions par emplacement (AV, IN) et par traitement (voir Figure 5.7). Deux placettes témoins ont été utilisées hors des parcelles expérimentales, sur des sols nus ("Tnu") dont l'une sur croûte de type "ERO" et l'autre sur une croûte de type "RUI". En raison de dommages causés par le bétail, ces placettes n'ont servi que la première année (1991).



Photo 6.1 Vue d'une placette de mesure du ruissellement en tôle de 1m² (0,80mx1,25m). Le ruissellement est collecté dans un fût de 65 l qui est vidangé à l'aide d'une pompe manuelle après chaque pluie.

Les calculs d'infiltration

Les quantités d'eau infiltrées sont calculées de la manière suivante:

- dans l'espace inter-diguettes et en aval, l'infiltration est déduite du ruissellement par la formule $I = P - R$ (mm).
- En amont immédiat des ouvrages, le calcul d'infiltration est basé sur le modèle de la figure 6.1: les volumes infiltrés sont constitués des apports directs sur le bassin de réception (l'amont immédiat des diguettes) et du report de ruissellement sur le micro-bassin versant formant l'impluvium (espace inter-diguettes). Pour une longueur de diguette égale à l'unité et en considérant $l = 1$, les volumes infiltrés sont obtenus par la formule $I = P + L \times R$ (en mm) (Schmitt, 1992). Compte tenu de la hauteur moyenne des diguettes anti érosives (30 cm pour le traitement "82" et 35 cm pour les traitements "90" et "90P"), et de la pente moyenne (1,2%), la lame d'eau retenue en amont, au cours d'une même pluie, est au plus égale respectivement à 300 et 350 mm. Les pluies occasionnant une accumulation supérieure à cette capacité de stockage entraîneront donc théoriquement des crues correspondant aux excédents.

6.2.3 L'humidité et le stock d'eau du sol

L'humidité du sol a été mesurée en des points fixes au cours des deux saisons pluvieuses 1991 et 1992 (cf. Figure 5.7). On a employé pour cela une sonde à neutrons de type "CPN Corporation, Modèle 503 DR" utilisant des tubes en aluminium de 43 mm de diamètre.

La sonde à neutrons: fonctionnement et étalonnage

La sonde à neutrons fonctionne selon le principe nucléaire de la diffusion élastique (Luc, 1978). Lorsqu'un neutron rapide pénètre dans le sol, il est ralenti par les chocs successifs (transfert d'énergie cinétique) avec les noyaux constitutifs de la matière, en particulier les noyaux d'hydrogène dont la masse est proche de celle du neutron. Les noyaux rapides sont émis par une source radio-active composée, pour le modèle de sonde utilisé, d'un mélange d'Américium-Beryllium. Les neutrons ainsi ralentis sont absorbés par un noyau situé dans un détecteur qui émet, pour chaque neutron, une particule; celle-ci crée une impulsion électrique enregistrée par un compteur. La quantité de neutrons lents absorbés par le détecteur étant liée à la concentration du sol en atomes d'hydrogène, elle-même fonction de la teneur en eau du sol, une relation de type linéaire existe entre le rapport N/N_0 et l'humidité du sol: $Hv = a \times N/N_0 + b$, où N_0 est le comptage standard ("standard count") enregistré par l'appareil dans son étui, et N le comptage enregistré dans le sol; Hv est le taux d'humidité volumique tandis que a et b sont des constantes du sol déterminées par l'étalonnage. La sphère d'influence de la source émettrice varie entre 20 et 50 cm de diamètre; elle croît avec les humidités décroissantes.

L'étalonnage de la sonde à neutrons a été effectué sur le terrain en fin d'hivernage, à partir de prélèvements d'échantillons non perturbés à 15 cm autour des tubes d'accès aussitôt après lecture du rapport N/N_0 affiché par l'appareil. On obtient ainsi pour chaque tube d'accès une série de couples $(N/N_0; H_p)$ après passage des échantillons à l'étuve à 110 °C jusqu'à poids constant; où H_p est l'humidité pondérale de l'échantillon. La densité apparente (DA) calculée après le passage à l'étuve permet de déterminer le taux d'humidité volumique

(Hv) de chaque échantillon: $Hv = DA \times Hp$. A partir de chaque série de couples (N/N_0 ; Hv), l'équation d'étalonnage est calculée par régression linéaire. Dans l'équation de régression ci-dessus, les paramètres **a** et **b** seraient particulièrement dépendants de la texture du sol (Henin, 1977); ces valeurs varieraient donc non seulement selon les types de sol (Bruns ferruginisés ou Ferrugineux lessivés dans notre cas) mais aussi selon la profondeur de mesure. Sur cette base, l'étalonnage à la station de Yabo a été effectué à partir d'une combinaison type de sol / horizon à texture homogène. Ainsi, trois horizons ont été identifiés dans chaque unité pédologique: < 20 cm; 20 à 60 cm et 60 à 155 cm. Les couples de valeurs (N/N_0 ;Hv) obtenus dans un même horizon, autour de tous les tubes situés dans une unité pédologique donnée, constituent la série de la régression.

Pour pallier le nombre réduit de couples et améliorer la forme du nuage de points, les échantillons ont été prélevés à des taux d'humidité variant de "sec" à "très humide", au besoin grâce à un apport d'eau autour des tubes. Dans une deuxième étape, des rapprochements ont été effectués entre les horizons identiques des différentes unités pédologiques: le résultat a montré plus de similitudes dans les horizons pédologiques (c'est-à-dire la texture) que de différences dans les types de sols. Ainsi, on a obtenu pour les différents horizons (correspondant à différentes textures), les équations de régression suivantes, indépendamment du type de sol (Figure 6.2):

- Horizon < 20 cm : $Hv = 20,17 \times N/N_0 - 7,94$ $r = 0,96$ (n = 30)
- Horizon 20-60 cm : $Hv = 21,08 \times N/N_0 - 11,09$ $r = 0,92$ (n = 49)
- Horizon 60-155 cm: $Hv = 19,60 \times N/N_0 - 9,86$ $r = 0,94$ (n = 51),

où n représente le nombre de couples de la régression.

Le dispositif de mesure

Pour chacun des trois traitements ou parcelles expérimentales, les tubes d'accès ont été placés jusqu'à 1,55 m de profondeur aux emplacements suivants (Figure 6.1):

- au point le plus bas du fossé amont (AM) d'une diguette;
- à 1 m en aval (AV) de la même diguette;
- à 7,5m en amont de cette diguette, dans le prolongement de l'axe formé par les deux premiers tubes (position "IN"); l'écartement moyen entre les diguettes de l'ensemble de l'aménagement est de 15m.

Ce triplet de tubes est répété quatre (4) fois, du haut vers le bas de la toposéquence, dans chaque parcelle. Dans les parcelles "90" et "90P" cependant, deux des quatre tubes d'accès situés en aval sont placés dans un fossé pratiqué lors de la construction des diguettes (sous-traitement AVf), pendant que les deux autres se trouvent dans les conditions "normales" (sous-traitement AVs). Deux tubes témoins ont été placés hors du périmètre aménagé, l'un (TFN) dans la forêt naturelle non dégradée (savane arbustive dense), l'autre (Tnu) sur sol nu encroûté (croûte de type "ERO"). Dans les parcelles expérimentales, les tubes en position "AM" ont été isolés des écoulements latéraux de surface par deux diguettes perpendiculaires à l'ouvrage isohypse et situées à cinq mètres de part et d'autre de chaque tube.

Les mesures d'humidité ont été effectuées tous les 10 cm jusqu'à 30 cm, puis tous les 20 cm jusqu'à 145cm, soit 9 profondeurs: 10, 20, 30, 50, 70, 90, 110, 125 et 145 cm. Toutefois, la sonde à neutrons étant surtout performante en profondeur et en l'absence de réflecteur à neutrons, les mesures faites à 10 cm l'ont été à titre indicatif. Le temps de lecture du rapport N/N_0 était de 16 secondes et la périodicité des mesures de 3 jours indépendamment

de la fréquence des pluies; ceci en raison de problèmes logistiques. Pour chaque position (AV, AM ou IN), un profil d'humidité moyen est établi à partir des valeurs du taux d'humidité mesurées aux quatre points fixes ou répétitions (deux pour les traitements 90/AV et 90P/AV).

Le stock d'eau du sol.

La détermination du stock d'eau du sol, exprimée en hauteur d'eau (mm) est effectuée par intégration des profils d'humidité entre 0 et 155 cm de profondeur:

$$S = \int_0^z Hv.dz$$

où z est la profondeur (côte) de mesure. L'intégration est faite selon la méthode dite "des trapèzes" (Schmitt, 1992).

Ainsi, le stock d'eau a été calculé pour les couches de 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. Les caractéristiques des profils d'humidité dans les espaces inter-diguettes montrent en effet que c'est la couche 0-80 cm qui est soumise aux plus grandes variations de stock d'eau: c'est la zone de concentration racinaire des végétations herbacées. Tout comme pour les profils d'humidité, les valeurs de stock d'eau utilisées dans la suite de ce rapport sont la moyenne des quatre points de mesure par position "IN", "AM" ou "AV" (deux pour les sous-traitements "90/AVs", "90/AVf", "90P/AVs" et "90P/AVf").

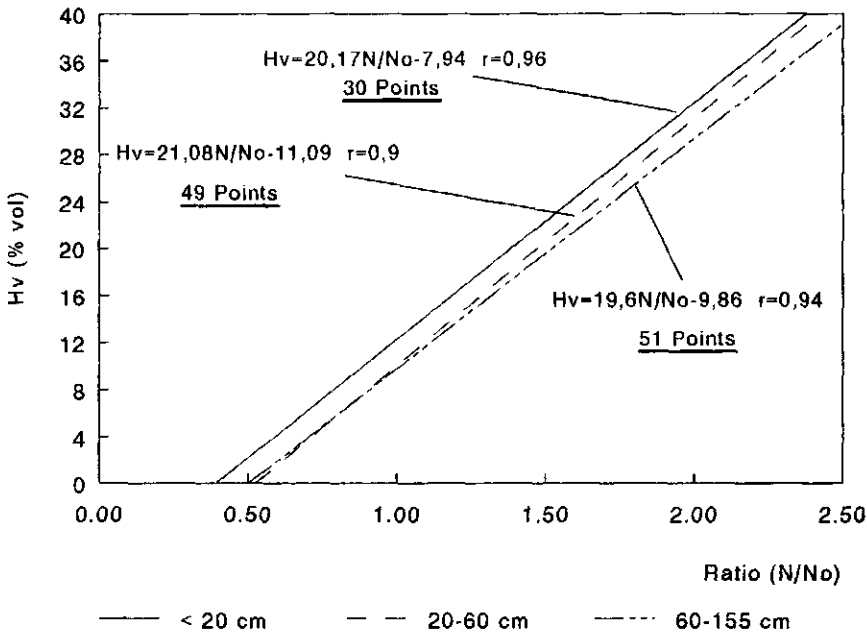


Figure 6.2 Les droites de régression $H_v = f(N/N_o)$, de la sonde à neutrons pour les sols de YABO.

6.2.4 L'évapotranspiration et le drainage

A défaut de mesures exhaustives sur l'évaporation des sols et la transpiration des plantes, l'évapotranspiration réelle (ETR) a été déterminée selon le principe des variations de stocks.

Dans les espaces inter-diguettes, le front d'humidité est demeuré généralement limité aux premiers 155 cm au cours des deux saisons de mesure. Le drainage profond étant dans ces conditions limité ou nul, les variations du stock d'eau du sol entre deux dates de mesure successives sont essentiellement la résultante de l'infiltration (I) d'une part, et de l'évapotranspiration réelle (ETR) de l'autre: $dS = I - ETR$ d'où $ETR = I - dS$. Des percolations profondes apparaissent cependant lorsque $I - dS > ETP$. Nous y reviendrons plus en détail dans les calculs concernant l'aval des diguettes. Dans le même temps, des mesures d'évaporation sur sol nu ont été conduites sur une période de 10 jours en juillet/ août 1993 à Yabo à l'aide de micro-lysimètres. Les données obtenues permettent d'estimer l'importance de la transpiration dans le calcul de l'ETR.

En amont des diguettes, l'humidité du sol est constamment élevée pendant l'hivernage sur l'ensemble du profil étudié et le stock d'eau est près du double de celui observé entre les ouvrages anti-érosifs, avec un drainage important. La végétation y est couvrante pendant la majeure partie de la saison de croissance. L'évapotranspiration réelle (ETR) en ce point peut donc être considérée comme maximale pendant la majeure partie de la saison de croissance. L'évapotranspiration (ETR) d'une culture étant liée à ETP par la relation $ETR = Kc \times ETP$ (où Kc est le coefficient cultural de la culture concernée), elle peut être inférieure ou supérieure à ETP selon le stade de développement de la culture et les conditions environnementales de croissance, (lorsque Kc est différent de 1). Les données disponibles (FAO, 1977) concernant certaines cultures telles le mil ou le sorgho indiquent qu'en pleine saison de croissance (Humidité Relative de l'air $> 70\%$), Kc varie entre 1 et 1,05. En l'absence de données fiables sur les valeurs de Kc pour les végétations naturelles comme celles de Yabo, nous avons considéré $Kc = 1$ pendant la majeure partie de la saison de croissance et en particulier pendant les grandes pluies où $I - dS > ETP$. Dans ces conditions, ETR est considérée égale à ETP. Dans les autres cas de figure, ETR est déterminée par $I - dS$. Les valeurs de ETP (Penman) de la station de Ouagadougou, située à 70 km au sud de Yabo, ont été utilisées pour ces calculs.

En aval des diguettes le principe de calcul de ETR et du drainage (D), à partir des variations du stock d'eau, apparaît plus complexe en raison de la complexité même du mouvement de l'eau dans le sol en ce point. Influencées par la redistribution en profondeur des eaux accumulées en amont, les variations de stock sont la résultante de

- l'infiltration de surface (I),
- les apports par redistribution latérale (DI)
- une évapotranspiration et un drainage profond nécessairement différents des valeurs observées en amont et entre les diguettes, en raison des différences de stock en jeu et de l'importance des végétations ligneuses dont le développement y est plus favorisé par la proximité de l'Amont: $dS = I + (DI+) - ETR - Dr$.

C'est pourquoi il est apparu plus important de déterminer les quantités d'eau transférées de l'amont par redistribution latérale, en vue d'avoir une estimation plus pertinente de l'ETR et du drainage. Ainsi, la valeur $I - dS$ est déterminée à partir des mesures d'humidité du sol et de ruissellement (voir 6.2.2 et 6.2.3). Deux cas peuvent se présenter:

- a) Si $I-dS > 0$, DI est considéré nul; ETR est estimé à partir des valeurs de $I-dS$ et de ETP :
- si $I-dS > ETP$, alors $ETR = ETP$ et $Dr = I-dS-ETR$
 - si par contre $I-dS < ETP$, Dr est considéré nul et $ETR = I-dS$.
- b) Si $I-dS < 0$, cela signifie que $I < dS$; il y a eu des apports réels supérieurs à l'infiltration calculée qui ont contribué à l'accroissement du stock d'eau: c'est le résultat de la redistribution latérale (DI) en provenance de l'amont des diguettes. Dans ces conditions, ETR est considérée égale à ETP et Dr nul (condition nécessaire au calcul de DI). DI est alors calculé à partir de la variation de stock théorique qui résulterait de l'infiltration et de l' ETR ($I-ETR$) d'une part, et de la variation de stock effectivement mesurée d'autre part: $DI = dS$ (mesuré)- dS (théorique).

Cet exercice comporte, à n'en pas douter, certaines limites dans la mesure où la détermination de DI suppose un drainage profond nul, ce qui n'est pas toujours vérifié. De plus, la durée de trois jours entre les mesures d'humidité ne permet pas de suivre les processus réels de redistribution des eaux d'infiltration, en particulier celles accumulées en amont des ouvrages anti-érosifs. L'exercice illustre en réalité un processus d'échanges où les apports latéraux, quantitativement plus importants, masquent, en aval des diguettes, les phénomènes de diffusion profonde ou latérale. Il permet, néanmoins d'approcher de manière assez satisfaisante les flux hydriques en aval des ouvrages anti-érosifs et d'en comprendre la dynamique du bilan.

Le "choix" d'une formule aussi compliquée pour l'établissement du bilan d'eau a été dicté d'une part par les difficultés de mesure du drainage dans un environnement où l'équipement scientifique pose des problèmes: pour des sols très argileux et compacts en profondeur (Taux d'Argile $> 42\%$ pour une $DA = 1,8 \text{ g/cm}^3$), la mesure des valeurs de la conductivité hydraulique (K saturé) n'a pas donné les résultats escomptés. D'autre part, les mesures de tensiométrie sont confrontées aux variations de température importantes du sol qui en altèrent la précision.

6.3 Les résultats

6.3.1 La pluviométrie

Le régime pluviométrique de la station de Yabo, comme l'ensemble de la zone Nord-soudanaïenne, est caractérisé par de fortes variations inter-annuelles avec une tendance décroissante au cours des trente dernières années. Les données de la station de Mané (20 km à l'est à la même latitude) montrent en effet entre 1962 et 1992, une tendance décroissante des moyennes annuelles et du nombre de jours de pluie. (Figure 5.2). La moyenne sur la période est de 643 mm. On assiste toutefois depuis 1986, à une remontée sensible des précipitations annuelles: de 620 à 670 mm entre 1986 et 1990. En 1991, 1992 et 1993, le site expérimental de la forêt classée de Yabo a enregistré respectivement 717,9 mm en 44 jours, 701,4 mm en 58 jours et 717,2 mm en 46 jours.

Les pluies tombées se répartissent selon les classes de hauteur suivantes, en proportion de la pluviosité totale de l'année:

<u>Classe de hauteur</u>	<u>1991</u>	<u>1992</u>	<u>1993</u>
0,1 - 5 mm	4,3 %	12,0 %	5,0 %
5,1 - 10 mm	9,0 %	9,6 %	10,7 %
10,1 - 20 mm	17,5 %	20,8 %	16,3 %
20,1 - 30 mm	17,4 %	25,0 %	19,1 %
Plus de 30 mm	52,0 %	32,7 %	49,0 %

En 1991 comme en 1992, on a enregistré 2 pluies de plus de 50 mm, soit respectivement 16,6 % et 16,2 % des hauteurs d'eau totales. En 1993 il n'y avait qu'une pluie > 50 mm, soit 9 % de la pluviométrie totale. La répartition décadaire des précipitations est donnée par la Figure 6.3. Cette répartition, ainsi que l'analyse des fréquences des pluies permettent de distinguer schématiquement trois grandes périodes au cours de chaque saison pluvieuse (Stroosnijder & Koné, *dans* Penning de Vries et Djitèye, 1982):

- a) une période "d'installation de la saison", comprise ici entre **mai et mi-juillet**, caractérisée par une fréquence irrégulière des pluies. On a enregistré une pluie en moyenne tous les 4 jours pendant les trois années et des précipitations largement en dessous de la demande évaporative potentielle de la période (selon Penman, 6 mm/j): 4 mm/jour en 1991, 3 mm/jour en 1992 et 2,1 mm/jour en 1993;
- b) une période dite "des grandes pluies" qui se situe entre le **20 juillet et début septembre**. Cette période est caractérisée par une fréquence rapprochée des pluies (2 jours en moyenne en 1991, 1992 et 2,5 jours en 1993) et des précipitations moyennes journalières supérieures à la demande évaporative (3,5 à 4,5 mm/j): 9,3mm/jour en 1991, 8,5 mm/jour en 1992 et 7,4 mm/jour en 1993). En 1992 toutefois, cette période a connu une perturbation notable ayant eu des répercussions sur le cycle de la végétation herbacée: de 11mm/j entre le 21/7 et le 10/8, les précipitations journalières sont passées à 1mm/j du 13 au 28/8, pour remonter à 22,3mm/j entre le 28/8 et le 2/9.

c) Une période de "fin d'hivernage" comprise entre début septembre et la mi-octobre. Elle est caractérisée par le retour des pluies irrégulières et espacées (respectivement en moyenne 6 jours en 1991 et 1993 et 4 jours en 1992.) et des précipitations moyennes journalières en dessous de la demande évaporative: 0,8mm/jour en 1991, 1,8mm/jour en 1992 et 3,5 mm/jour en 1993.

L'intensité des pluies

L'intensité moyenne (I_m) des pluies est relativement faible (6,4 mm/h en 1991 et 8,5 mm/h en 1992), avec de grands écarts entre les pluies: I_m varie de 0,2 à 71,5 mm/h en 1992 ! Dans le même temps en 1991, seulement 18% des pluies avaient une intensité moyenne supérieure à 10 mm/h; cette proportion était de 33% en 1992. L'intensité maximale observée en 30 minutes (I_{30}), elle, est généralement élevée: en moyenne 26,9 mm/h et 29,7 mm/h respectivement en 1991 et 1992 pour les pluies supérieures à 5 mm. Cette valeur qui traduit la violence des orages dans la région présente aussi de grands écarts autour de sa moyenne: 4,5 à 73 mm/h en 1991 et 8,5 à 108 mm/h en 1992 pour les pluies supérieures à 5 mm.

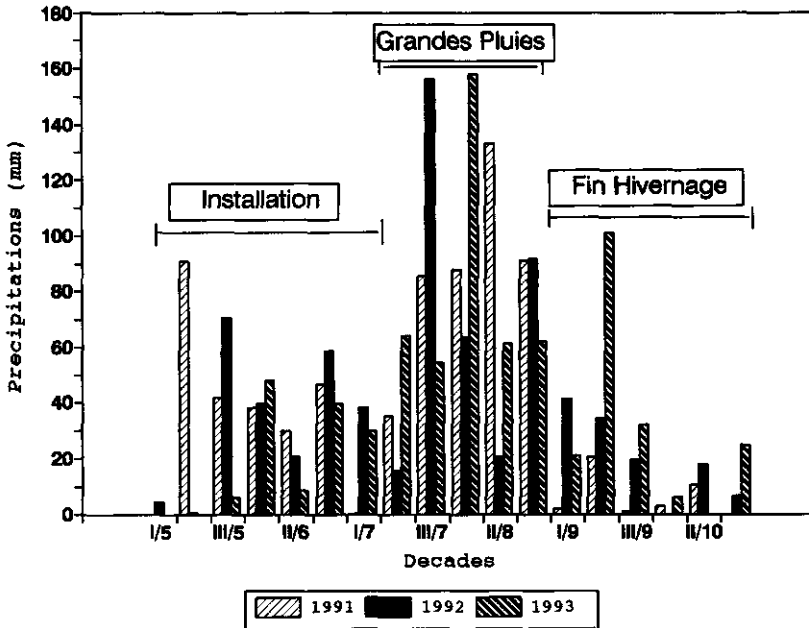


Figure 6.3 La pluviométrie décadaire en 1991, 1992 et 1993 dans la forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

S'il n'a pu être établi une corrélation significative entre I_m et P (la hauteur de pluie), il apparaît par contre une corrélation linéaire entre I_{30} (mm/h) et P (mm). Toutes pluies confondues on a:

$$I_{30} = 1,20 \times P + 2,04 ; r^2 = 0,91 \text{ en } 1991 \text{ et}$$

$$I_{30} = 1,23 \times P + 3,16 ; r^2 = 0,80 \text{ en } 1992.$$

Il apparaît au vu de ces données que les trois années 1991, 1992 et 1993 peuvent être considérées comme humides par rapport à la moyenne de la décennie 1980-90; elles le demeurent même lorsqu'on les compare à la moyenne de la période 1962-1992 (643 mm).

6.3.2 Le ruissellement et l'infiltration

Les données de ruissellement obtenues concernent respectivement 16 et 21 pluies en 1991 et 1992: en 1991, les délais d'installation des dispositifs de mesure ont retardé la collecte des données. Le taux de ruissellement calculé sur chacune des quatre placettes de mesure permet de déterminer, après chaque pluie, un taux moyen pour chaque position (AV ou IN) puis pour chaque parcelle. Un taux de ruissellement moyen annuel **KRM** (en % de P) est calculé pour chaque traitement à partir du nombre de pluies pour lesquelles les mesures ont été effectuées. Les résultats obtenus montrent que:

- le ruissellement est très élevé sur les surfaces concernées: $KRM \geq 60\%$; l'importance du ruissellement est fonction de l'état de surface: type de croûte ou couvert végétal, paillage... Ainsi en 1991, le calcul du taux de ruissellement moyen annuel à partir de six placettes de mesure sur sols nus a donné 70% pour les surfaces de type "ERO", variant jusqu'à 80%, et 60% pour les croûtes de ruissellement ("RUI"). L'effet du paillage sur les sols nus (couverture à 100%) s'est traduit par une réduction du ruissellement dont le taux moyen annuel passe à moins de 30%. De même, dans les espaces couverts de végétation herbacée (parcelle "82"), le taux de ruissellement annuel calculé est de 27% et 39% respectivement pour un recouvrement du sol de 100% et 50% environ.
- Entre 1991 et 1992, les valeurs moyennes du ruissellement ont connu des modifications notables en raison surtout de l'évolution des conditions de surface et, dans une moindre mesure, de l'érosion constatée dans certaines placettes de mesure. Ainsi, la réduction ou la disparition de la couverture de paille a entraîné pour le traitement "90P" (diguettes en terres + paillage inter-ouvrages), un accroissement global du ruissellement dont le taux annuel moyen est passé de moins de 30% en 1991 à 50% en 1992 malgré un début d'installation de la végétation herbacée. Cette tendance est confirmée par les mesures du ruissellement effectuées en 1991 dans la même station sur une parcelle ayant fait l'objet d'un paillage en juin 1990: en l'absence de végétation, le taux de ruissellement moyen calculé pour la saison 1991 est resté de 64%.
- Dans les espaces initialement nus en 1991 (parcelle "90" avec diguettes simples), le taux de ruissellement moyen calculé est passé de 65% à 57% en 1992. A ce niveau on a observé la naissance d'un faible couvert herbacé ainsi qu'une érosion des placettes qui a provoqué en quelques points des modifications de la pente; nous y reviendrons.

Ruissellement et pluviosité.

En vue de déterminer la relation entre la pluie et le ruissellement, les données enregistrées sur l'ensemble des placettes de mesure ont été analysées en rapport avec deux paramètres: la hauteur de chaque pluie (P) et l'intensité maximale en 30 min (I_{30}). L'ajustement graphique a été réalisé à partir des n couples [P(mm),R(mm)] ou [I_{30} (mm/h),R(mm)] obtenus en faisant la moyenne R des p placettes d'un même traitement au cours des n pluies P.

Les mêmes ajustements ont été réalisés entre P(mm) et KR (%) d'une part et I_{30} (mm/h) et KR (%) d'autre part. Les résultats suivants ont été obtenus au seuil de confiance de 95%.

i. La relation entre R (mm) et P (mm) est généralement du type $R = a \times P - b$. Elle confirme ce que d'autres auteurs ont établi dans les conditions semi-arides (Masse, 1992, Janssen, 1993, Trouwborst, 1994, Boers, 1994). Cette équation permet de déterminer pour un traitement donné la hauteur de pluie minimale ou **pluie d'imbibition** ($P_0 = b/a$) au-delà de laquelle naît le ruissellement: pour $0 < P < P_0$, $R = 0$ et pour $P > P_0$, $R = a(P - P_0)$ (Boers, 1994). Le tableau 6.1 présente les équations d'ajustement graphique $R = f(P)$ et $R = f(I_{30})$ de quelques traitements pour la saison des pluies 1991. Ainsi en 1991, P_0 varie de 5 mm pour les sols nus à 10 mm pour les sols couverts de paille; elle atteint 11 mm pour les parcelles sous végétation herbacée dense (82/AV). Une analyse plus détaillée selon le type de croûte dominante, sur les sols nus, fait apparaître que les valeurs de P_0 vont même de 1 mm sur les croûtes d'érosion (ERO) à 5,3 mm sur les croûtes de ruissellement (RUI).

Traitement	$R(\text{mm}) = f(P)$	r^2	$R(\text{mm}) = f(I_{30})$	r^2
90/AV	$0,90 \times P - 4,61$	0,99	$0,71 \times I_{30} - 1,70$	0,64
90/IN	$0,92 \times P - 5,29$	0,99	$0,73 \times I_{30} - 2,60$	0,65
90P/AV	$0,51 \times P - 3,88$	0,93	$0,41 \times I_{30} - 2,76$	0,65
90P/IN	$0,46 \times P - 4,61$	0,87	$0,43 \times I_{30} - 5,32$	0,79
82/AV	$0,59 \times P - 6,59$	0,92	$0,50 \times I_{30} - 5,64$	0,68
82/Iv	$0,66 \times P - 5,06$	0,94	$0,54 \times I_{30} - 3,40$	0,65
82/In	$0,95 \times P - 5,11$	0,98	$0,76 \times I_{30} - 2,57$	0,66
Temoin/nu	$0,84 \times P - 4,87$	0,98	$0,66 \times I_{30} - 2,10$	0,63

Tableau 6.1 Tableau récapitulatif des relations entre le ruissellement R (en mm) et la hauteur de pluie P (mm) d'une part et l'intensité maximale en 30 minutes I_{30} (mm/h) d'autre part. L'ajustement graphique est basé sur les valeurs moyennes obtenues dans chaque traitement pour chaque pluie individuelle. Dans la parcelle "82/IN", on a distingué les espaces couverts de végétation (82/Iv) et les espaces demeurés nus (82/In). Forêt classée de Yabo, 1991.

Sur la base de la relation entre R et P, il se dégage trois classes de parcelles (Figure 6.4):

Classe I: les parcelles à recouvrement "faible à nul" caractérisées par un ruissellement moyen annuel élevé (65 %) et la relation $R(\text{mm}) = 0,93 \times P - 5,06$ avec $r^2 = 0,98$.

Classe II: les parcelles à recouvrement moyen où le taux de ruissellement annuel moyen est de 40 % et pour lesquelles la relation entre ruissellement et pluviométrie est $R = 0,66 \times P - 5,04$ avec $r^2 = 0,94$.

Classe III: les parcelles densément couvertes dont le taux de ruissellement moyen annuel est faible (26 à 27 %) avec une relation $R = 0,52 \times P - 4,95$ pour $r^2 = 0,89$.

ii. De même, la relation entre KR et P (ou I_{30}) a été analysée. Elle est du type $KR = (a \times X + b)^2$, où X est une fonction linéaire de P ou de I_{30} (Figure 6.4).

iii La relation entre le Ruissellement et la hauteur de la Pluie est nettement meilleure à celle entre Ruissellement et Intensité de la pluie. En d'autres termes, c'est la hauteur totale d'eau tombée qui détermine le plus l'importance du ruissellement, même si c'est l'intensité maximale en 30 minutes qui en conditionne le délai d'apparition.

iv. Le coefficient de détermination (r^2) de la relation entre R ou KR d'une part et P ou I_{30} d'autre part est d'autant plus élevé que la parcelle considérée est nue: l'existence de végétation ou de tout autre couvert biologique (paille par exemple) réduit la qualité de la relation entre le ruissellement et la seule pluviométrie; d'autres paramètres, telle l'humidité résiduelle entretenue par le couvert végétal, influencent la naissance et l'importance du ruissellement. Les cas des traitements "90/IN" (nu) "90P/IN" (couvert dense de paille) et "82/AV" (couvert herbacé dense sur pied) illustrent bien ce constat (Tableau 6.1). Ceci confirmerait la nécessité de prendre en compte dans le calcul de la relation R (ou KR) = $f(P)$, un **indice de couverture végétale** (Thebe & Pontanier, 1989 cités par Masse, 1992).

v. Tout comme les valeurs moyennes, l'analyse graphique des relations entre R et P a montré une évolution notable entre 1991 et 1992, même si globalement les tendances observées la première année ont été confirmées l'année suivante. Ainsi, la relation linéaire entre le ruissellement R (mm) et la hauteur de pluie s'est considérablement détériorée ($r^2 < 0,80$). Cependant pour le taux de ruissellement KR (%P), la corrélation est demeurée relativement bonne avec la hauteur de pluie et l'intensité maximale en 30 minutes, seulement pour les parcelles qui sont restées nues et intactes ("90/AM"); en revanche, les modifications du couvert biologique ainsi que l'érosion apparue dans des placettes de mesure ont contribué à détériorer la qualité de la relation $KR = f(P)$: traitements "90/IN", "90P/AV" et "90P/IN". Plus particulièrement, ces modifications intervenues à la surface du sol ont entraîné de grandes variations dans le comportement des placettes de mesure au cours des petites pluies: les relations $KR = f(P)$ deviennent de type exponentiel. La conséquence est que pour les pluies de hauteur moyenne (comprises entre 10 et 40 mm), les valeurs calculées du taux de ruissellement sont comparables aux moyennes mesurées. Par contre, ces valeurs deviennent supérieures à celles observées lorsque la pluie est supérieure à 40 mm; en même temps il devient plus difficile de déterminer avec précision la pluie d'imbibition.

Il semble donc que les dispositifs utilisés pour la mesure du ruissellement (placettes élémentaires de 1m^2) sont surtout efficaces pendant la première saison suivant leur installation, pour traduire les phénomènes au niveau du sous-bassin versant; ils gagneraient à être redéployés chaque fois qu'une seconde saison de mesures est envisagée.

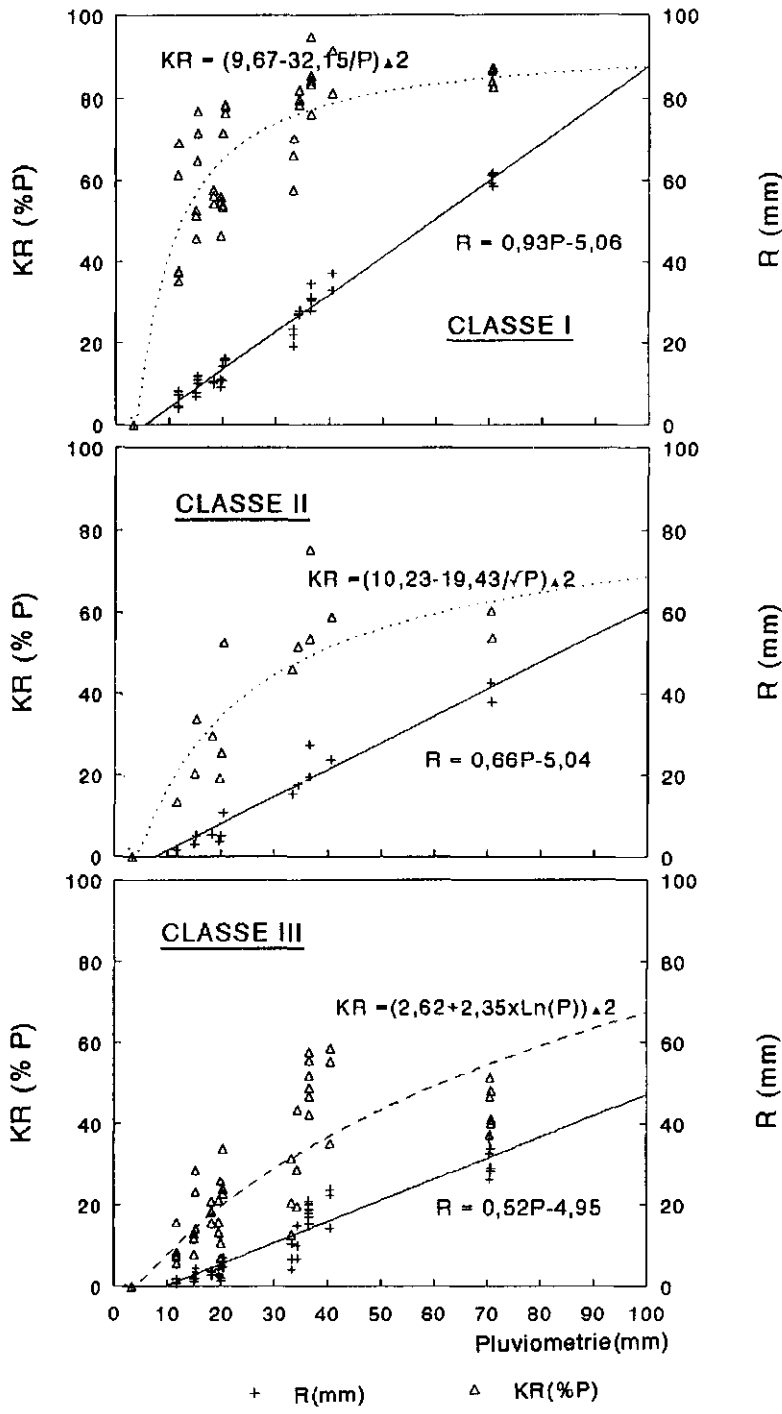


Figure 6.4 Relations entre Pluviométrie, Ruissellement (en mm) et taux de ruissellement (en %) dans trois classes de parcelles définies selon le recouvrement: Classe I = recouvrement faible à nul; Classe II = recouvrement moyen; Classe III = parcelles densément couvertes. Forêt classée se Yabo, Saison des pluies 1991.

6.3.3 Le régime hydrique du sol

La caractérisation du régime hydrique au cours de la saison de croissance peut être faite à travers deux paramètres:

- les profils d'humidité et
- la réserve (ou stock) en eau du sol.

L'évolution des profils d'humidité (Figures 6.5 et 6.6)

Comme observé au paragraphe 6.3.2, c'est la nature des états de surface qui détermine l'importance de l'infiltration dans les espaces inter-diguettes et conditionne les quantités d'eau accumulées en amont des ouvrages au cours d'une pluie. Si dès les premières pluies le front d'humidité dépasse largement 1,55 m de profondeur en amont des diguettes, il atteint à peine 60 cm pendant toute la saison des pluies sur les sols nus encroûtés (90/IN). L'effet du paillage a résulté en une évolution progressive du front d'humidité qui a dépassé 1,55 m pendant les grandes pluies; il en est de même du traitement 82/IN où les tubes de mesure d'humidité sont situés pour la plupart dans des espaces relativement couverts de végétation. Mieux, les mesures et sondages effectués dans la forêt naturelle témoin (TFN), constituée d'une savane arbustive dense, ont révélé, tout comme en amont des diguettes, une saturation totale du profil au-delà de 2 m pendant la période des grandes pluies.

L'accumulation d'eau en amont influence considérablement l'évolution des profils d'humidité en aval des diguettes. En effet l'eau accumulée en amont semble d'abord s'infiltrer verticalement en début d'hivernage lorsque les sols sont secs, jusqu'à saturation: au 19/7/91 les profils 90/AM et 90P/AM sont humides au-delà de 1,55 m, alors qu'en aval sans fossé ("AVs"), ils demeurent presque totalement secs. Seul le fossé pratiqué en aval ("AVf") modifie significativement l'humidité du profil dans les 50 premiers cm (Figure 6.6). Pendant les grandes pluies, les processus de redistribution latérale s'intensifient en direction de l'aval des diguettes dont le profil d'humidité évolue à son tour jusqu'à saturation. A partir de la troisième période de l'hivernage (fin de saison pluvieuse), les profils d'humidité "régressent" jusqu'en fin de saison sèche (avril): cette régression est d'abord plus sensible dans les 80 premiers cm, puis atteint les couches plus profondes. Elle est d'autant plus spectaculaire que la végétation pérenne à enracinement profond est importante (82/AV).

Au cours de l'hivernage 1992, la régularité des profils d'humidité a été influencée par les travaux d'étalonnage de la sonde à neutrons effectués en Octobre 1991: les perturbations sur l'ensemble des profils autour des tubes d'accès, liées aux travaux d'étalonnage, ont entraîné des modifications texturales provenant des transports en profondeur de matériau de surface moins argileux. A raison de 2 à 3 trous de tarière autour de chaque tube, la fidélité des mesures à la sonde a pu être perturbée. L'évolution des profils dans le temps demeure cependant semblable à celle observée en 1991. Toutefois, on observe que l'amont et l'aval des diguettes ont conservé, en début d'hivernage 1992, une humidité résiduelle supérieure à celle de 1991. Nous y reviendrons.

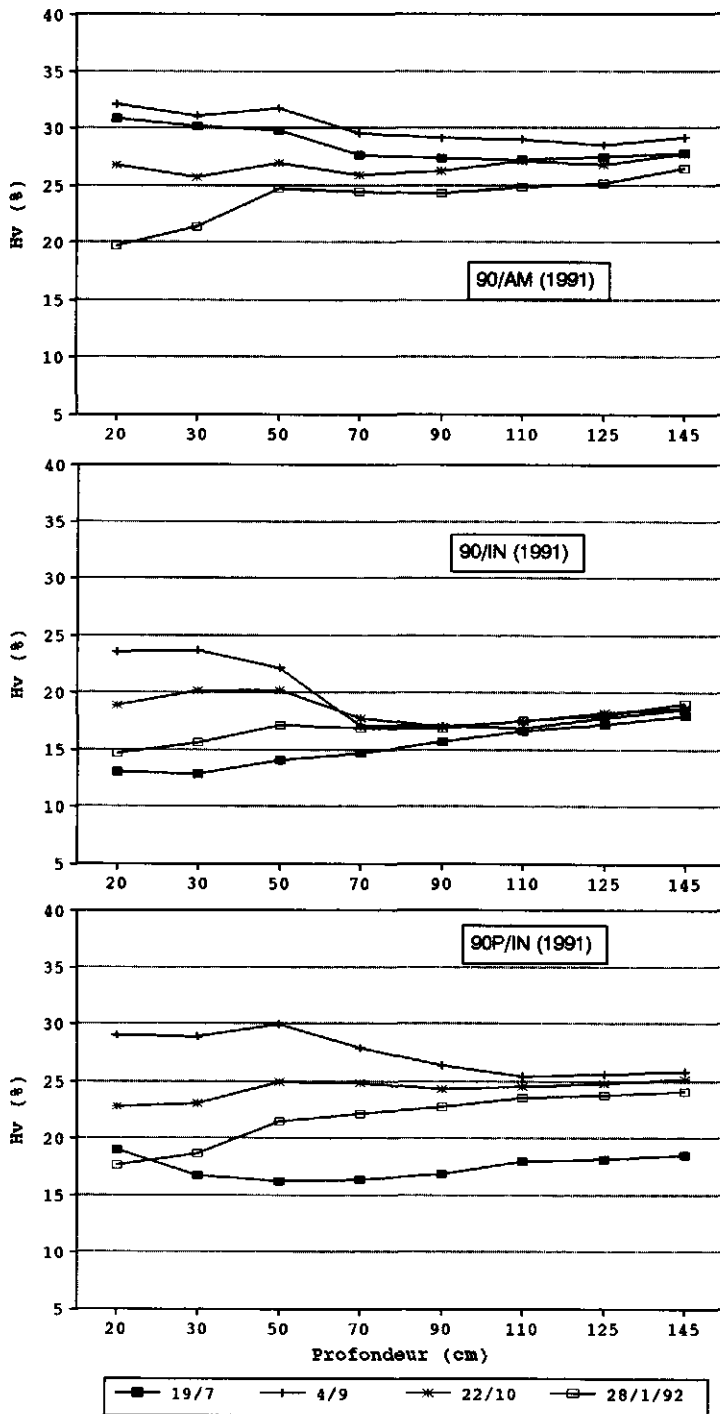


Figure 6.5 Evolution des profils d'humidité en Amont des diguettes anti-érosives (90/AM), dans l'espace inter-diguettes sans paillage (90/IN) et avec paillage (90P/IN) entre le début des grandes pluies (19/7), le stock d'eau d'eau maximum observé (4/9), la fin de l'hivernage 1991 (22/10) et la saison sèche suivante 1991/92 (28/1/92). Forêt classée de Yabo.

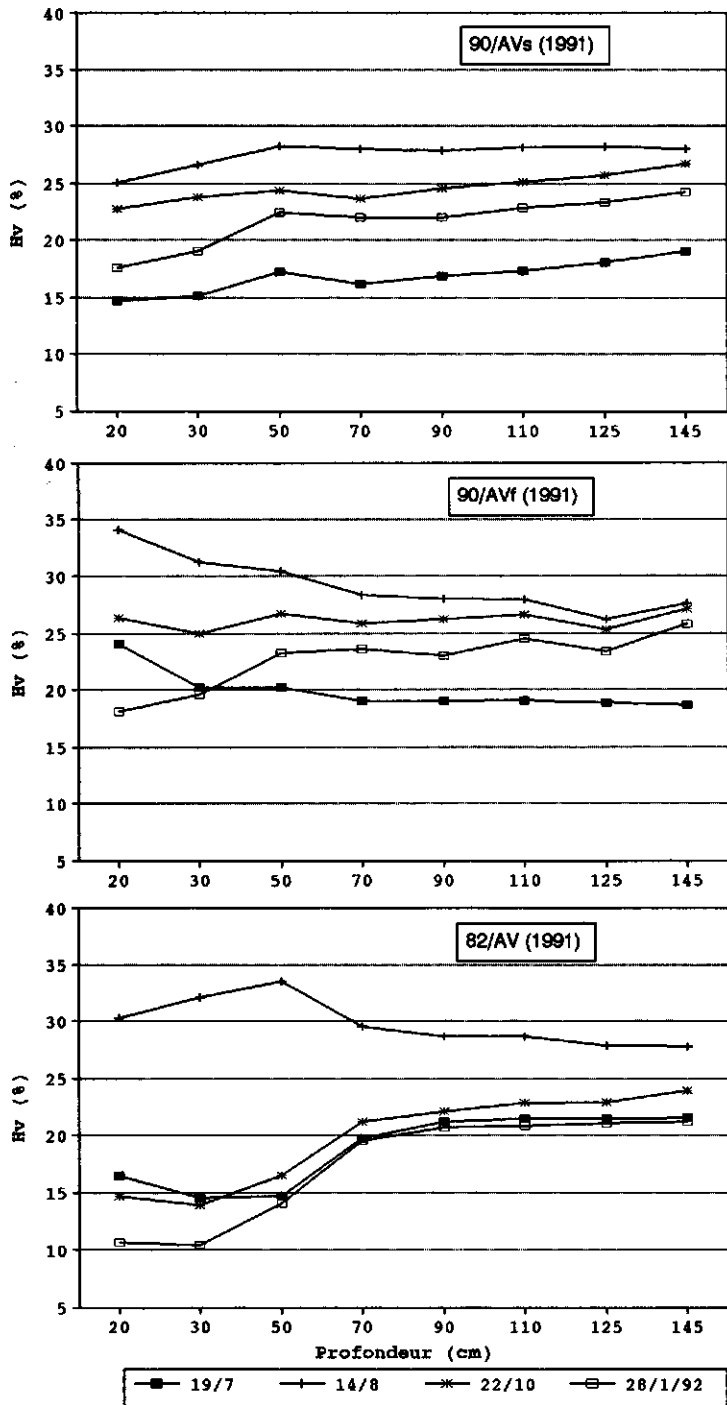


Figure 6.6 Evolution des profils d'humidité à l'Aval des diguettes sans fossé (90/AVs), avec fossé (90/AVf) et avec une haie vive arbustive de 7 ans (82/AV), entre le début des grandes pluies (19/7), le stock d'eau maximal observé (14/8 ou 4/9), la fin de l'hivernage 1991 (22/10) et la saison sèche suivante 1991/92 (28/1/92). Forêt classée de Yabo.

L'évolution du stock d'eau du sol (Figures 6.7 à 6.12)

Mieux que les profils d'humidité, l'évolution du stock d'eau illustre de manière quantitative le régime hydrique du sol et l'influence des mesures de C.E.S. . En raison de la nature et de l'intensité variables des mesures de régénération prises, l'évolution des réserves en eau a été schématisée sur l'ensemble du profil étudié (0-155 cm) d'une part, et d'autre part selon les deux horizons 0-80 cm et 80-155 cm. Ceci permet de préciser davantage l'étendue spatiale des relations eau-sol-plante, et de mieux expliquer la dynamique des végétations. L'examen des courbes d'évolution du stock d'eau entre le 19/7/91 et le 28/1/92 révèlent que:

dans les espaces inter-diguettes (Figure 6.7 et 6.8), la réserve en eau évolue naturellement selon le régime pluviométrique: elle est généralement réduite au cours de la période d'installation des pluies (mai à mi-juillet); elle augmente brusquement avec les "grandes pluies" pour atteindre une valeur maximale en début septembre puis décroît avec la raréfaction des pluies pour atteindre à nouveau son niveau minimal en fin de saison sèche. Si la réserve en eau est globalement influencée par l'importance de l'infiltration, son évolution dans le temps est surtout remarquable dans les 80 premiers cm, en particulier dans les sols à couvert végétal faible à nul (par exemple 90/IN et Témoin nu). Dans ces espaces nus en effet, la réserve en eau est demeurée inchangée dans l'horizon 80-155 cm, les variations liées au régime pluviométrique n'étant sensibles que dans les couches supérieures où se limite le front d'humidité. Par contre, le paillage (90P/IN) a entraîné une infiltration et un stock d'eau accrus, plus élevés que dans le traitement 82/IN; cette différence est cependant plus importante dans l'horizon 0-80 cm où l'épuisement rapide de la réserve hydrique en fin d'hivernage illustre la profondeur d'enracinement des plantes et l'importance de l'évapotranspiration.

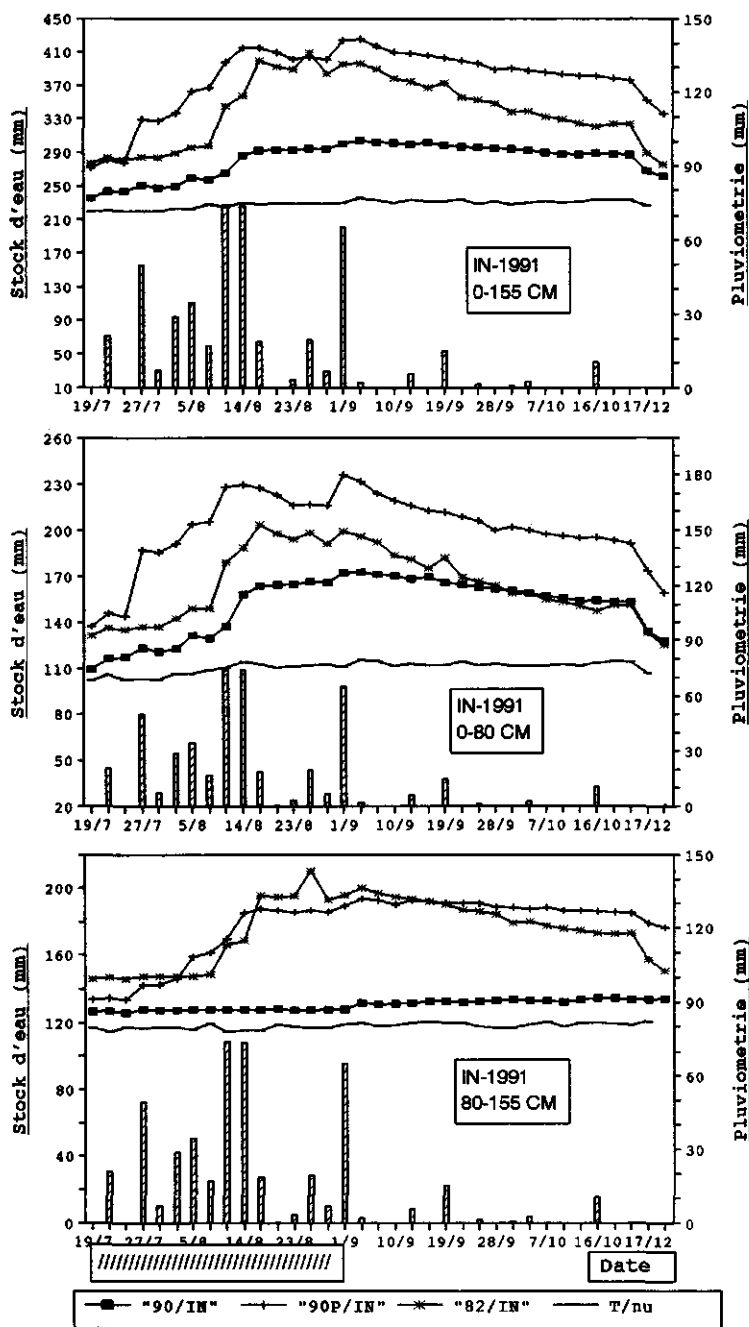


Figure 6.7 Evolution du stock d'eau du sol dans l'espace "IN" au cours de la saison des pluies 1991 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (/////). Forêt classée de Yabo.

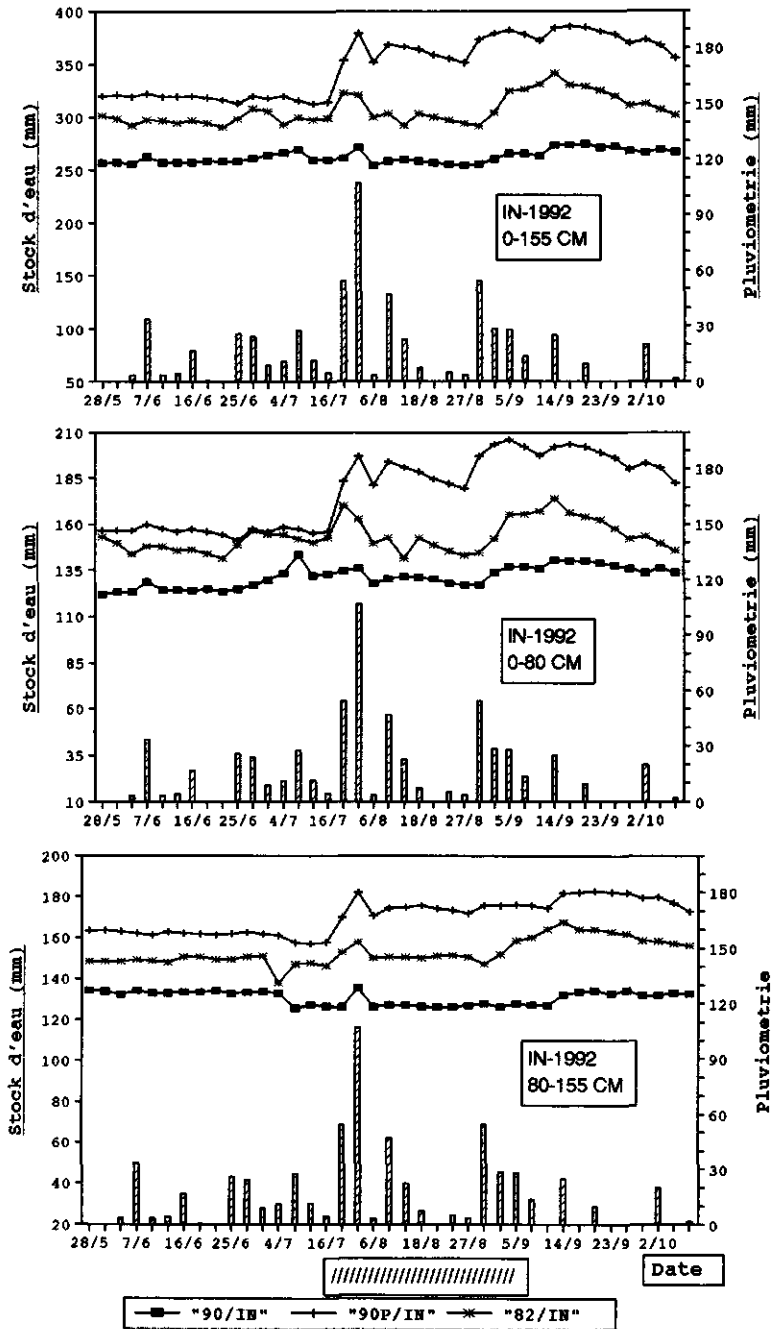


Figure 6.8 Evolution du stock d'eau du sol dans l'espace "IN" au cours de la saison des pluies 1992 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (////). Forêt classée de Yabo.

En amont des diguettes anti-érosives (Figures 6.9 et 6.10), les réserves en eau sont déjà élevées dès le début de l'hivernage; elles subissent en conséquence une faible évolution pour atteindre le niveau de saturation des sols et ce, malgré l'accroissement brusque des quantités infiltrées: il en résulte donc un drainage important. Au cours de la dernière partie de l'hivernage, le dessèchement du profil est graduel, plus lent que dans l'espace "IN". Cependant, lorsque la végétation ligneuse est abondante (82/AM et TFN), la saturation du profil est atteinte seulement après l'installation des "grandes pluies"; elle est suivie en fin d'hivernage d'une chute brutale des réserves liée à l'importance de l'évapotranspiration. Ici comme en "IN", les 80 premiers cm sont les plus affectés.

En aval des ouvrages d'absorption (Figures 6.11 et 6.12), l'accroissement significatif du stock d'eau survient seulement après le début des "grandes pluies", lorsqu'après saturation du profil en amont s'intensifie le phénomène de redistribution latérale (Figure 6.11). L'existence d'un fossé en aval des diguettes (AVf) accroît plus rapidement les réserves hydriques par rapport aux profils sans fossé (AVs). Le stock d'eau maximal du sol est observé en effet le 14 août dans le premier cas (90/Avf, 90P/AVf et 82/AV) et le 4 septembre dans le second cas (90/AVs et 90P/AVs). Leur évolution demeure par la suite identique au cours de la saison si elle n'est pas influencée par la végétation pérenne. En effet l'existence, en aval des diguettes de la parcelle "82", d'une haie vive d'arbustes âgée de 7 ans en 1991 a contribué à ramener dès fin Octobre les réserves totales à leur niveau du début d'hivernage. Dans les parcelles où la végétation pérenne est plus jeune ou peu abondante par contre ("90" et "90P"), les réserves atteignent encore en fin janvier, leur niveau du début des grandes pluies. A cet égard, la baisse des réserves hydriques à partir de la fin des "grandes pluies" est apparue encore plus lente en aval qu'en amont lorsque la végétation ligneuse est jeune ou peu abondante.

En 1992, au cours de la seconde saison des pluies, l'évolution du stock d'eau a été marquée par deux observations majeures:

- Les réserves totales mesurées en "IN" (Figure 6.8) et en "AV" (Figure 6.12) dès le début de l'hivernage 1992 (fin mai, pluviométrie cumulée = 75 mm) sont en moyenne supérieures de 12% (respectivement de 18 à 27 %), à celles observées le 20 juillet de l'année précédente (P cumulée = 264 mm).

- Malgré une pluviométrie totale comparable à celle de 1991 (701,4 mm en 1992 contre 718 mm en 1991) les valeurs maximales du stock d'eau observées en 1992 dans l'horizon 0-155 cm ont enregistré une baisse moyenne de 6% en "AM" à 12 % en "IN" par rapport à celles de l'année précédente.

Cette situation tiendrait en deux facteurs essentiels. Premièrement, l'apparition de la végétation au cours de l'hivernage 1991/92 a entraîné une amélioration moyenne des états de surface et de l'infiltration dans l'espace "IN" (en particulier dans les parcelles sans paillage). Ainsi, après une première saison de régénération, 75 mm de pluie ont suffi en 1992 pour refaire un niveau de réserve en eau que 264 mm n'avaient pas permis d'atteindre, en 1991, sur des sols encroûtés depuis des décennies. Les percolations profondes (à caractère non saturé) ont naturellement connu, dans cet espace, un accroissement sensible en 1992: entre le 20 juillet et le 10 octobre, les percolations cumulées (au-delà de 155 cm) étaient de 0 mm en 1991 contre 33 mm en 1992 pour le traitement "90/IN", respectivement 32mm contre 57 mm pour le traitement "82/IN".

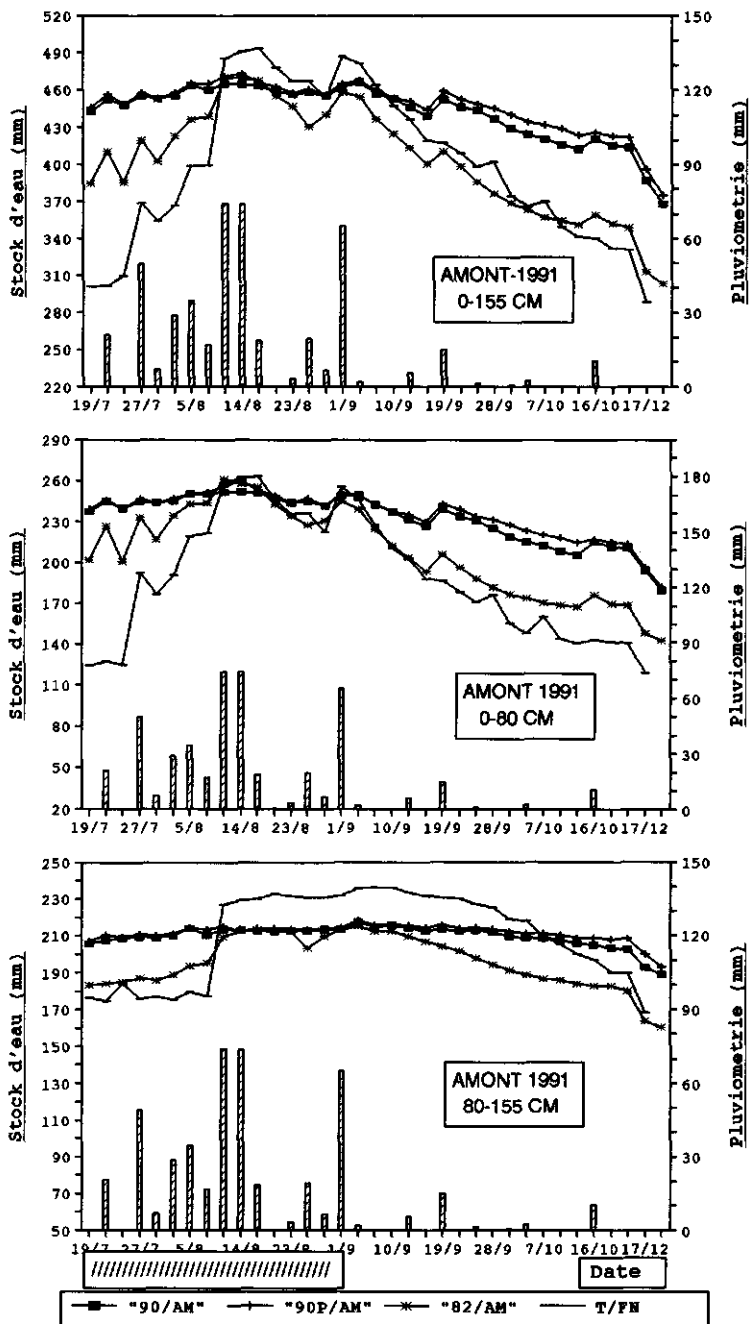


Figure 6.9 Evolution du stock d'eau du sol en amont des diguettes au cours de la saison des pluies 1991 dans les horizons 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (////). Forêt classée de Yabo.

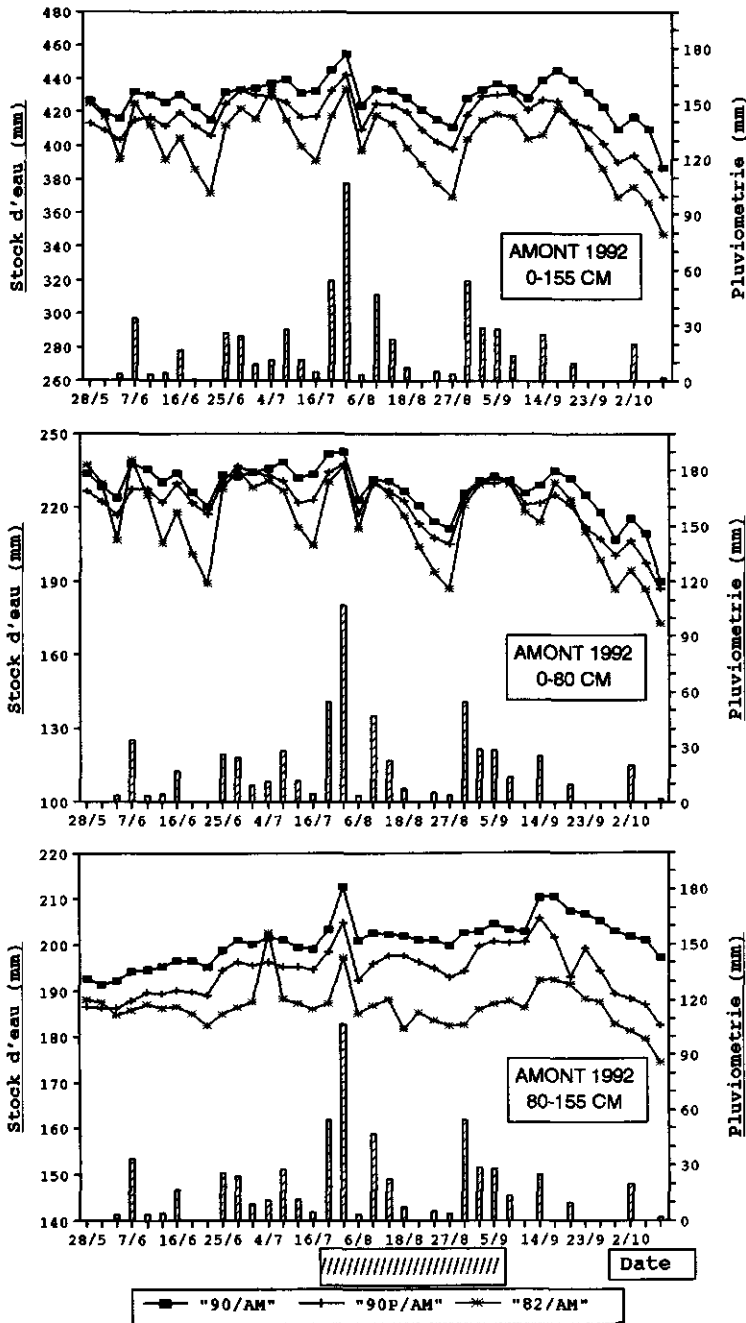


Figure 6.10 Evolution du stock d'eau du sol en amont des diguettes au cours de la saison des pluies 1992 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (////). Forêt classée de Yabo.

En même temps l'accroissement du couvert végétal dans ces espaces, au cours de cette deuxième saison de croissance, augmente le niveau de ETR: les valeurs cumulées de ETR ont globalement augmenté de 10 à 40% selon les traitements. Pour le traitement 90P/IN cependant, on enregistre une réduction des percolations liée à la réduction de l'effet de couverture direct du paillage; toutefois, cette réduction est aussi accompagnée par un accroissement de l'ETR dû à l'accroissement du couvert végétal. Ceci explique que les réserves maximales observées en "IN" en 1992 soient globalement inférieures à celles de 1991 (voir aussi paragraphe 6.3.4).

Deuxièmement, la répartition des pluies au cours de ces deux saisons a connu des différences notables, en particulier pendant la période dite des "grandes pluies" au cours de laquelle le stock d'eau du sol atteint sa valeur maximale. Du 20 juillet au 1er septembre 1992, on a enregistré 332 mm dont seulement 112 mm pour les deux dernières décades d'août. En 1991 on enregistrait pendant les mêmes périodes respectivement 397 mm et 224 mm. La deuxième décade d'août en particulier a enregistré 20,6 mm en 1992 contre 133,3 mm en 1991. Or l'accroissement du stock d'eau intervient de façon décisive pendant cette période. On peut donc supposer que le volume d'eau tombé et sa répartition temporelle au cours de ladite période influencent ces valeurs maximales.

En d'autres termes, la répartition plus étalée des pluies en 1992 a entraîné, pendant la période cruciale des "grandes pluies", plus d'infiltration entre les ouvrages (en particulier sur les sols peu couverts) et moins d'accumulation en amont. Le couvert végétal plus important en amont des diguettes, et en particulier l'apparition d'une végétation ligneuse au développement remarquable, a provoqué aussi une évapotranspiration plus élevée et un drainage moins important en ces points. Le drainage cumulé était en moyenne de 511 mm dans les deux premières décades d'août 1992 pour les traitements "90/AM" et "90P/AM"), soit environ 5 fois la pluviométrie totale de la période. En revanche, la concentration en 1991 de 31% des pluies au cours de ces deux décades avait accru les quantités accumulées en amont, accéléré la saturation du sol et entraîné un drainage beaucoup plus élevé: en moyenne 2228 mm cumulés pour les mêmes traitements, soit 10 fois la pluviométrie totale de la période (cf.paragraphe 6.3.4).

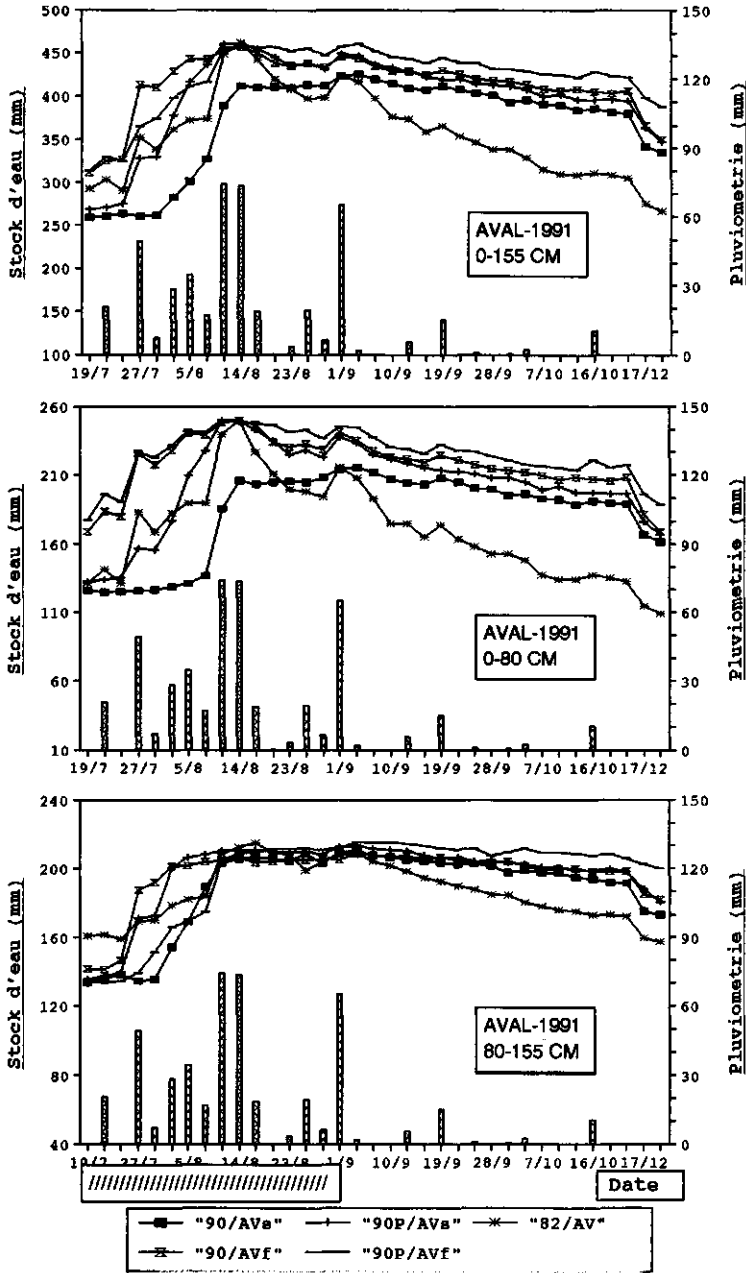


Figure 6.11 Evolution du stock d'eau du sol en aval des diguettes au cours de la saison des pluies 1991 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (////). Forêt classée de Yabo.

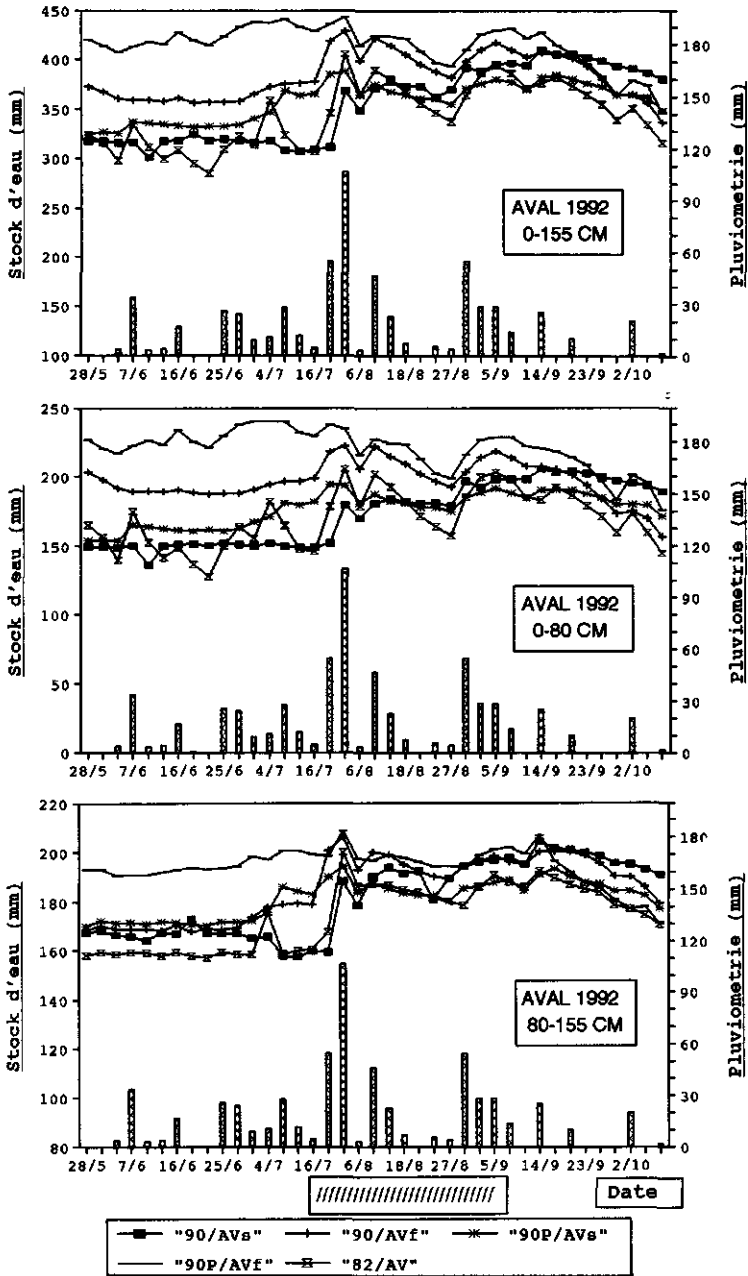


Figure 6.12 Evolution du stock d'eau du sol en aval des diguettes au cours de la saison des pluies 1992 dans l'horizon 0-155 cm, 0-80 cm et 80-155 cm. La période des "grandes pluies" est hachurée (////). Forêt classée de Yabo.

6.3.4 Evapotranspiration et drainage

En utilisant le procédé décrit au paragraphe 6.2.4 pour l'estimation de l'ETR, nous avons dressé les tableaux qui rendent compte de l'ensemble des paramètres du bilan hydrique dans différentes situations au cours des saisons de croissance 1991 et 1992 (Annexe 1).

Dans l'espace inter-diguettes (Figure 6.13)

L'ETR est calculé à partir des variations du stock d'eau. En l'absence de percolations au-delà de 1,55 m, les variations du stock d'eau (dS) résulteraient exclusivement de l'infiltration (I) et de l'ETR: $ETR = I - dS$. Cependant, les valeurs de I-dS sont quelquefois supérieures à ETP au cours de la période des "grandes pluies". Ceci traduit l'existence de percolations au-delà de l'horizon étudié (0-155 cm) qui contribuent aux variations du stock d'eau.

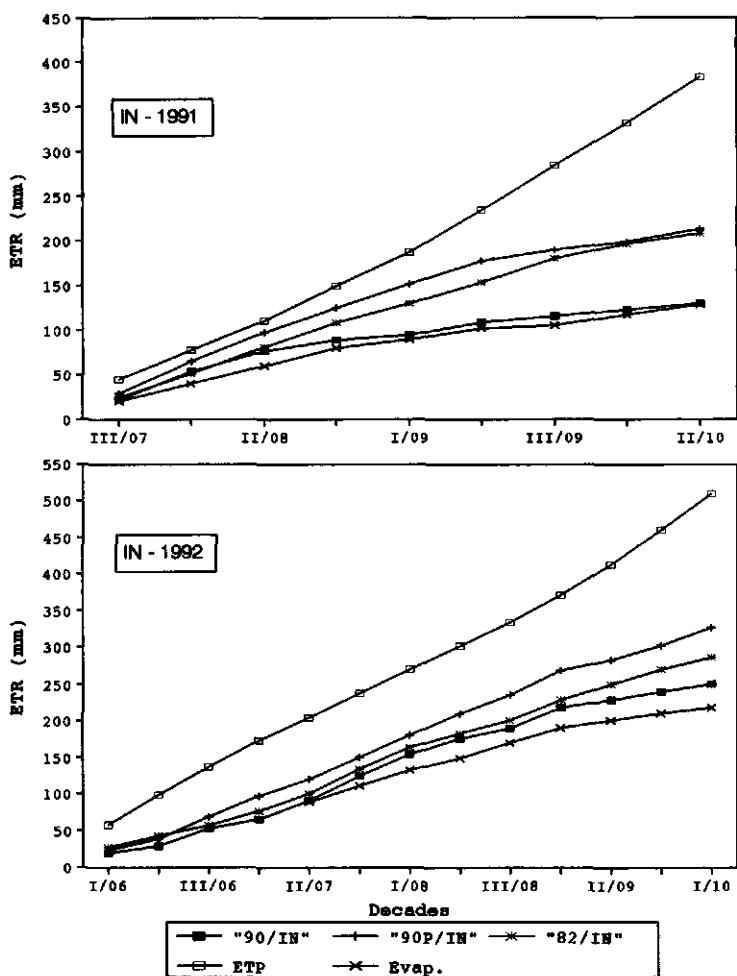


Figure 6.13 L'Evapotranspiration cumulée dans les espaces "IN" au cours des saisons des pluies 1991 et 1992. L'évaporation cumulée calculée à partir des mesures effectuées sur sols nus permet de visualiser la part de transpiration des végétaux. Forêt classée de Yabo.

Des mesures de l'évaporation sur sol nus effectuées en 1991 et 1993 indiquent qu'elle est en moyenne de 2 mm/jour (1,96 mm/jour en 1991 et 1,93 mm/jour en 1993) pendant la période "des grandes pluies". L'évapotranspiration calculée montre alors que la part de transpiration variait de 0 mm/jour en 1991 sur les sols nus du traitement 90/IN à 1 mm/jour dans le traitement 90P/IN en 1992. Une comparaison de la courbe d'évolution de ETR cumulée du 20/7 au 20/10/1991 et du 1/6 au 10/10/1992, laisse apparaître que (Figure 6.13):

- au cours des deux années, $ETR(90P/IN) > ETR(82/IN) > ETR(90/IN)$, ce qui traduit bien la logique d'évolution des profils d'humidité et des réserves hydriques dans ces parcelles. L'évolution des profils d'humidité (Figure 6.5) et des réserves hydriques dans l'horizon 80-155 cm (Figure 6.7) confirment cette probabilité. Elle montre aussi que les sols n'ont pas été saturés pendant la saison pluvieuse et que les percolations enregistrées résultent surtout des écoulements non saturés à l'intérieur de l'horizon étudié.
- En 1992, ETR cumulée calculée entre le 20/7 et le 10/10 est globalement supérieure, de 10 à 40% selon les traitements, aux valeurs obtenues pendant la même période de 1991. Au-delà de la répartition temporelle des pluies en 1992, le couvert herbacé et ligneux s'est en effet accru dans les espaces "IN": +52% pour "90/IN", +33% pour "90P/IN" et +20% pour "82/IN". Ceci a contribué autant à améliorer l'infiltration qu'à accroître proportionnellement les prélèvements par les végétations: ainsi par exemple, la part de transpiration dans l'ETR est passée de 0 mm/jour en 1991 à 0,7 mm/jour en 1992 dans la parcelle aménagée sans paille (90/IN).

En amont des ouvrages anti-érosifs

Le phénomène le plus remarquable est l'importance du drainage consécutif à l'accumulation des eaux de ruissellement. En partant du principe de calcul de ETR décrit au point 6.2.4, l'évolution des courbes d'évapotranspiration cumulée montre en 1991 et 1992 une nette supériorité du traitement "82/AM" sur les autres. L'existence, dans ce traitement, d'une haie vive de huit ans le long des diguettes, influence considérablement les variations du stock d'eau et place objectivement les valeurs de ETR au dessus des autres traitements où la composante ligneuse est beaucoup plus jeune. Dans ce traitement en effet, ETR est quasiment égale à ETP du début de l'hivernage jusqu'à la fin des "grandes pluies" (1^{ère} ou 2^{ème} décade de septembre); les valeurs diminuent ensuite, provoquant une inflexion de la courbe par rapport à ETP cumulée: Figure 6.14.

Le drainage évolue inversement par rapport à ETR: il est le plus faible pour le traitement "82/AM": Figure 6.15. La courbe du drainage cumulé traduit fidèlement la fréquence et l'importance des pluies: elle croît jusqu'à la fin de la période des "grandes pluies" pour se stabiliser lorsque les précipitations se raréfient. De 6,5 à 7,8 fois la pluviométrie totale en 1991, le drainage cumulé ne représentait plus que 4,7 à 6 fois la pluviométrie totale en 1992.

En aval des diguettes

Au paragraphe 6.3.3, on a observé qu'un accroissement significatif du stock d'eau survenait en aval des diguettes seulement après le début des "grandes pluies". L'évapotranspiration est inférieure à ETP jusqu'au début des grandes pluies, sauf pour le traitement "82/AV": Figure 6.16. Pour ce traitement en effet, ETR est égale ou proche de ETP pendant toute la durée de l'hivernage. Avec la présence de haies vives de 7-8 ans, ETR est en réalité supérieure à

ETP pendant cette période, tant en amont qu'en aval des diguettes. Les calculs de ETR sont ici limités par le choix du coefficient $K_c = 1$ (voir 6.2.4).

Stoosnijder et de Wit (1993) rapportent en effet, pour cette même station, que le coefficient de transpiration foliaire d'arbustes d'*Acacia seyal* de 1 à 2 ans (octobre 1992), placés en amont des diguettes, est de 50 grammes d'eau/gramme de feuilles. Pour une biomasse foliaire estimée au même moment à 470 kg/ha en amont des diguettes (chapitre 7.2.2), et sur la base d'un indice foliaire spécifique ("specific leaf area") de 1,20 g/m² (Breman et de Ridder, 1991), le jeune peuplement d'*Acacia seyal* transpire au moins 2,5 mm/jour; ceci correspond déjà à une ETR de 4,5 mm/jour pendant l'hivernage alors que ETP à la même période est de 3,3 mm/jour. Pour les autres traitements (90/AVs et 90P/AVs), ETR atteint les valeurs maximales (3,6 mm/jour en 1991) pendant la période où la fréquence des pluies est la plus élevée.

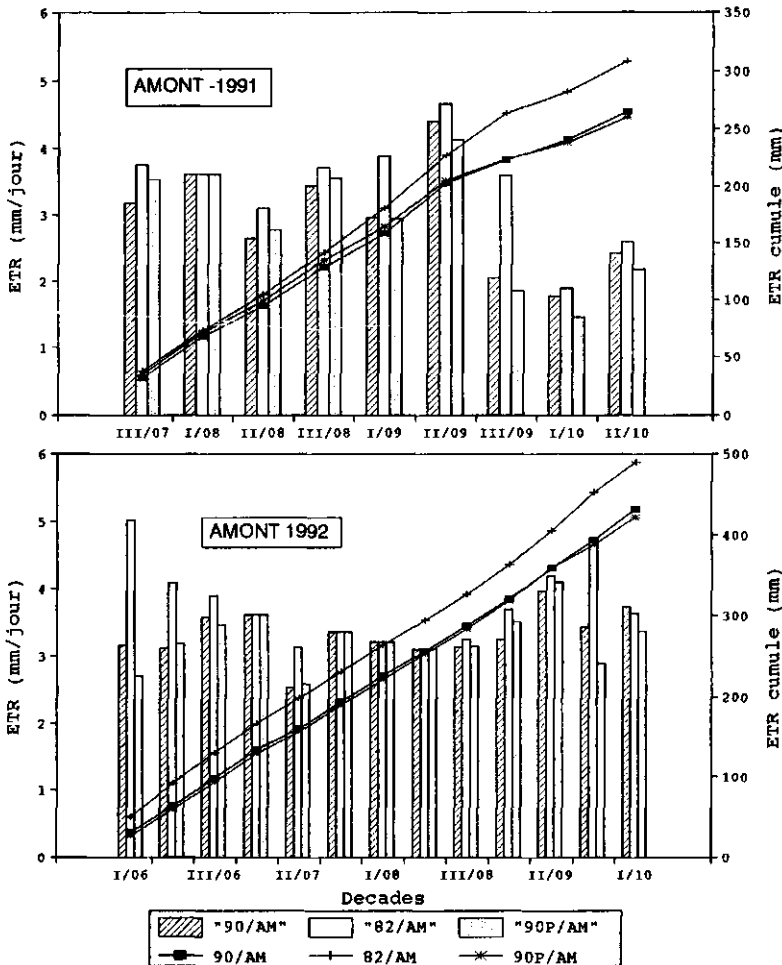


Figure 6.14 ETR journalière (Histogramme) et ETR cumulée (lignes) en amont des diguettes: Forêt classée de Yabo, saisons des pluies 1991 et 1992. Le traitement 82/AM est planté de haies vives en aval immédiat des diguettes depuis 1984.

A partir de cet instant (Figure 6.17), le drainage latéral (DI) en provenance de l'amont des ouvrages est enregistré de façon plus régulière et conduit progressivement à la saturation du profil hydrique (stock d'eau maximal) en aval. Le volume de DI est directement lié à la fréquence et au volume des pluies. C'est pendant cette période qu'apparaissent les percolations profondes pour un traitement comme "82/AV" planté d'une haie vive de 7 à 8 ans. Pour les autres traitements en aval, le drainage profond est enregistré seulement lorsque la saturation du sol intervient pendant que le régime pluviométrique est toujours régulier.

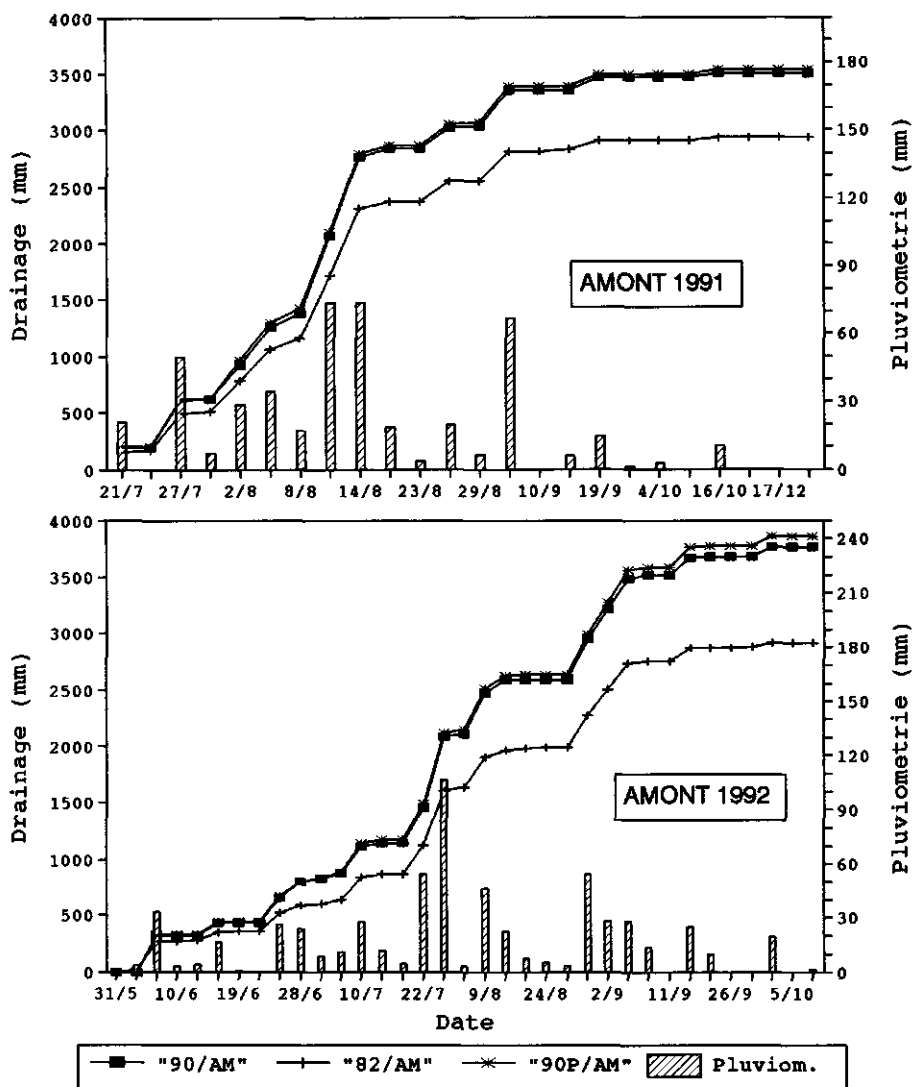


Figure 6.15 Drainage cumulé en Amont des diguettes pendant les saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.

Ainsi, le traitement "90P/AVs" ayant atteint le point de saturation avant la fin des "grandes pluies" (1ere decade d'Août 91), le drainage a été enregistré jusqu'à la fin de cette période (1ere decade de Septembre); en revanche, le stock d'eau maximal a été observé à la fin des "grandes pluies" pour le traitement "90/AVs": les percolations profondes n'ont pas été enregistrées ou ont été masquées par l'importance des transferts latéraux en provenance de l'amont des diguettes.

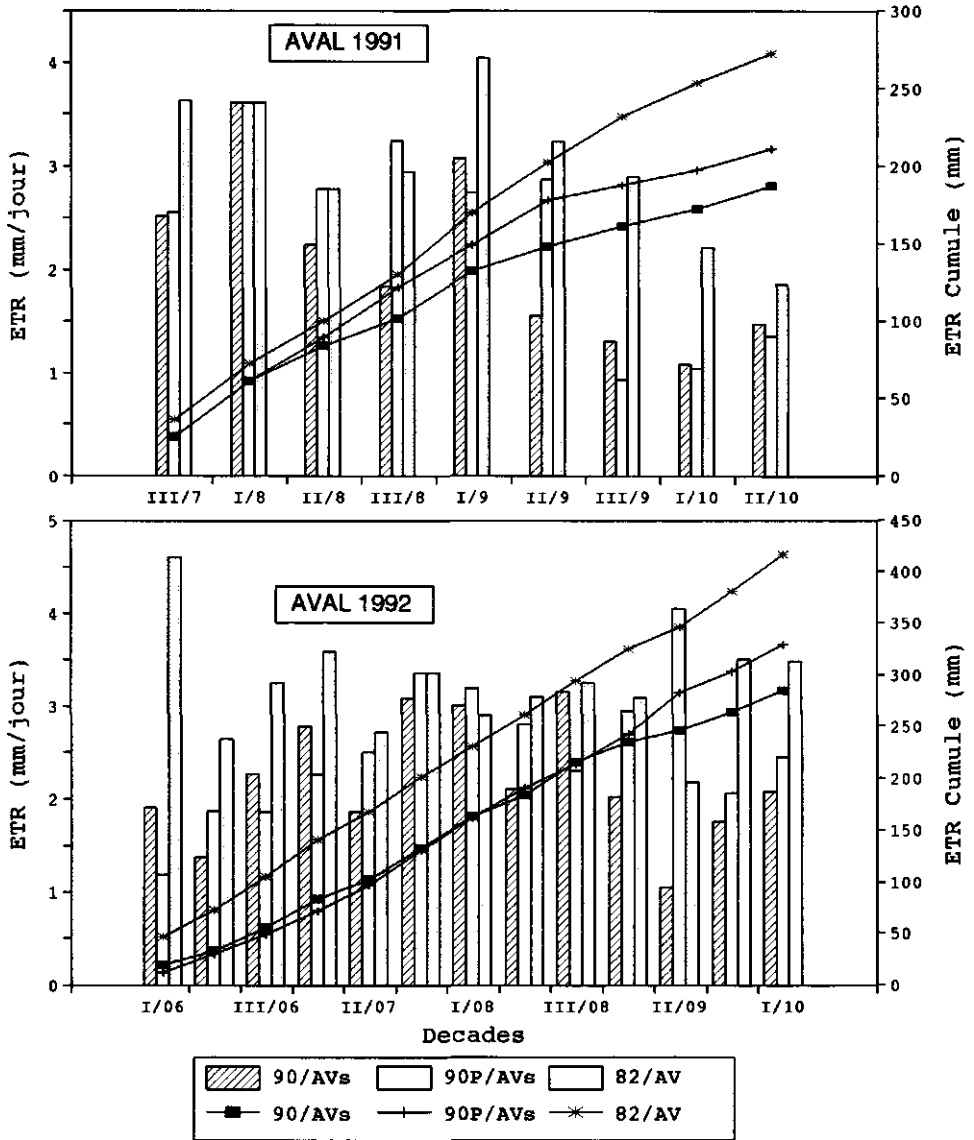


Figure 6.16 ETR journalière (histogramme) et ETR cumulée (lignes) en aval des diguettes sans fossé (90/AVs) et de diguettes plantées d'une haie vive de 7-8 ans (82/AV). Forêt classée de Yabo, saisons des pluies 1991 et 1992.

La présence d'un fossé ou le paillage, en favorisant une infiltration plus importante en aval, se traduit par des valeurs moyennes de ETR plus élevées. Le stock d'eau atteint plus rapidement la valeur maximale; les apports de l'amont par diffusion latérale s'en trouvent réduits ou masqués alors que le drainage profond augmente.

Au cours de la saison 1992, le régime pluviométrique, caractérisé par une fréquence et des quantités plus irrégulières pendant la période des "grandes pluies" ainsi que les changements qualitatifs intervenus dans l'espace "IN" ont aussi influencé la redistribution des eaux d'infiltration entre l'amont et l'aval.

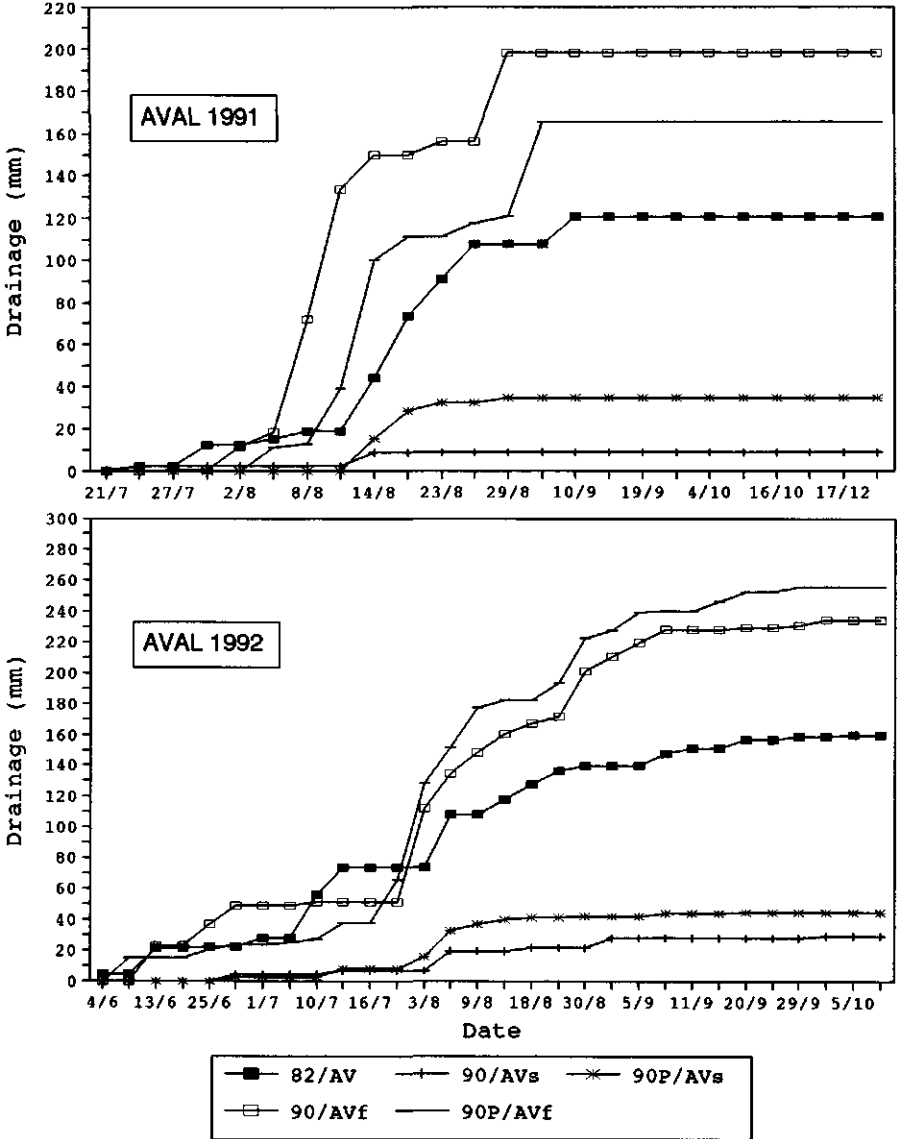


Figure 6.17 Drainage cumulé en aval des diguettes; saisons des pluies 1991 et 1992. Forêt classée de Yabo.

6.3.5 Le bilan d'eau (Figure 6.18)

Dans les conditions pédo-climatiques où la pluie constitue la principale source d'eau pour la croissance des végétations, le régime pluviométrique est une donnée essentielle du bilan hydrique. Cependant, lorsque les sols sont dans un état de dégradation physique avancé, c'est moins le régime des pluies que les quantités d'eau effectivement infiltrées qui limitent la croissance de la végétation et sa production. En agissant comme ouvrages d'absorption du ruissellement, les diguettes en terre modifient de façon fondamentale le régime hydrique des sols encroûtés et influencent les processus biologiques qui en découlent. On constate en effet que ces mesures de C.E.S. créent une hétérogénéité spatiale qui modifie les comportements hydrodynamiques, le bilan de l'eau et influence la dynamique des végétations. Trois situations schématiques caractérisent les terrains ainsi aménagés: l'amont des diguettes, l'aval des diguettes et l'espace inter-diguettes (paragraphe 6.1). Pendant deux saisons de croissance considérées comme humides par rapport à la moyenne des trente dernières années, le bilan hydrique a été caractérisé par l'évolution suivante:

L'amont des diguettes

C'est le point d'accumulation du ruissellement enregistré dans les espaces inter-diguettes. C'est aussi le point d'accumulation des semences transportées par l'eau de ruissellement. Dès les premières pluies le front d'humidité atteint plusieurs mètres de profondeur; ce qui offre les conditions favorables à une germination abondante des végétations herbacées. Il constitue de ce point de vue le "**nid de la régénération**" où naissent les processus biologiques en début d'hivernage. Absorbant la quasi-totalité du ruissellement (par exemple pour toute pluie ≤ 35 mm en 1991), l'amont des diguettes présente un bilan hydrique largement excédentaire caractérisé par:

- des quantités infiltrées pouvant atteindre 7 à 8 fois la pluviométrie annuelle totale et de 10 à 15 fois celles infiltrées dans les espaces inter-diguettes. En conséquence, les réserves en eau sont très élevées pendant toute la saison de croissance. Cette situation a favorisé la germination et le développement d'une importante végétation pérenne, ligneuse et herbacée, dominée par *Acacia seyal* et *Andropogon gayanus*. La production primaire des herbacées, élevée la première année, subit cependant, avec le temps, l'effet de cet "excès d'eau" (Chapitres 7 et 8).

- Les flux hydriques sont à la mesure des réserves du sol: l'évapotranspiration est constamment proche de ou égale à ETP pendant toute la saison de croissance; elle l'est d'autant plus que la végétation en général est abondante et la strate ligneuse en particulier développée. L'amont constitue aussi le point de départ d'une importante redistribution, profonde d'abord et latérale ensuite, des stocks d'eau accumulés qui influencent positivement les zones situées plusieurs mètres en aval des diguettes. Ces échanges atteignent leur niveau maximal au cours de la période dite des "grandes pluies" (mi-juillet à début septembre); leur volume est surtout fonction du régime des pluies au cours de cette période mais aussi du dimensionnement des ouvrages d'absorption (écartement et hauteur des diguettes). Ainsi, les calculs effectués au cours de la deuxième saison des pluies (1992) montrent que les percolations profondes (au delà de 1,55 m) ont atteint 6,0, 6,2 et 4,7 fois la pluviométrie totale, respectivement pour les traitements 90/AM, 90P/AM et 82/AM (Figure 6.18). Comparées aux valeurs de l'année précédente, elles enregistrent une baisse de 21 à 28% selon les traitements, alors que l'évapotranspiration connaît une hausse de 25 à 35% selon les traitements, illustrant de la sorte une évolution importante du couvert végétal.

A la fin de la saison des pluies, le dessèchement du sol est plus graduel qu'ailleurs, prolongeant ainsi la durée de vie des végétations herbacées. Toutefois lorsque la végétation ligneuse y est suffisamment développée, la fin de l'hivernage est marquée par une chute brutale des réserves en eau et une réduction importante de l'évapotranspiration réelle (cas du traitement 82/AM).

L'aval des diguettes

L'infiltration de surface, faible en conditions ordinaires, s'améliore lorsqu'un couvert végétal se développe en aval des diguettes. Le phénomène le plus remarquable demeure cependant l'importance des apports d'eau provenant de la redistribution latérale des stocks accumulés en amont. Ces flux bénéfiques n'apparaissent que lorsque le sol est saturé en amont des diguettes, c'est-à-dire au cours de la période des "grandes pluies". Ils concernent les horizons profonds (> 80 cm), alors que le régime hydrique des couches supérieures est surtout influencé par l'infiltration de surface.

Les sols enregistrent à leur tour un accroissement brusque du stock d'eau pouvant conduire à la saturation. L'ETR atteint en ce moment les valeurs les plus élevées, pendant que les processus de redistribution et de drainage apparaissent plus importants. Les percolations profondes au-delà de 1,55 m étaient en 1992 estimées à 5% de la pluviométrie totale dans l'aménagement "90" et à 7,4% pour "90P"; elles atteignaient 26,5% dans le traitement "82/AV" planté de haies vives de 8 ans, où l'infiltration de surface est supérieure à 60 % de la pluviométrie (Figure 6.18). Lorsque l'aménagement a créé une dépression (fossé) en aval des ouvrages isohypses, le niveau de saturation est plus rapidement atteint et le volume des redistributions profondes et latérales plus important.

La fin de l'hivernage est caractérisée, comme en amont, par un dessèchement graduel du sol: quand les végétations pérennes sont jeunes, les réserves hydriques atteignent en pleine saison sèche un niveau encore favorable à leur développement.

L'espace inter-diguettes

Il représente la portion la plus grande (environ 90 %) des terrains aménagés dont le ruissellement alimente l'amont et l'aval des ouvrages anti-érosifs. Le régime et le bilan de l'eau y sont fortement liés à l'intensité des mesures spatiales de C.E.S. et au niveau de régénération atteint.

Dans les espaces où aucune mesure particulière n'est prise et où le sol reste nu, le ruissellement est généralement élevé (55 à 80% selon la nature de la croûte). La pluie d'imbibition est plutôt faible (5 mm en moyenne) et l'infiltration limitée aux 50 premiers cm de profondeur pendant la saison de croissance. L'importance de l'évaporation (en moyenne 2 mm/jour) ne permet guère le maintien d'une humidité suffisante à la germination des semences. Le ruissellement entraîne une érosion intense (> 20 t/ha/an) dont les sédiments s'accumulent en amont des diguettes (Chapitre.7). Sans mesure particulière tendant à accroître l'infiltration dans cet espace, l'évolution de la bande de végétation créée en amont connaît très tôt une progression limitée en même temps que celle du couvert végétal entre les diguettes (exemple parcelle "82"). Seule l'installation progressive de la végétation permet d'atténuer le ruissellement. Ainsi, au cours de la saison des pluies 1992, on a constaté dans le traitement 90/IN par exemple, dont le couvert végétal est passé de 23% en 1991 à 35% en 1992, que les percolations profondes cumulées (au-delà de 1,55 m) sont aussi passées de 0 mm à 43 mm, soit 7% de la pluviométrie totale, tandis que ETR cumulé augmentait de 40% au cours de la période de juillet à octobre (Figure 6.18).

En revanche, lorsque dans ces espaces des mesures sont simultanément prises pour favoriser l'infiltration, le régime et le bilan de l'eau sont considérablement modifiés. Le paillage, effectué en 1991 sur une portion de l'aménagement avec diguettes isohypses, a permis de constater en effet que:

- le ruissellement connaît une réduction très importante: le taux moyen annuel (KRM) diminue de 65% à moins de 30%; il remonte cependant à 50% l'année suivante lorsque s'estompe l'effet direct de couverture du sol exercé par la paille;
- le taux d'humidité des sols croît rapidement dans les 80 premiers cm et favorise la germination des semences piégées par la paille. Le front d'humidité dépasse 1,55m au cours de la période dite des "grandes pluies";
- les réserves d'eau du sol augmentent (+40% par rapport aux sols nus) et, avec elles, l'évapotranspiration qui atteint les valeurs maximales au cours des "grandes pluies" (traitement 90P/IN, 1991);
- les processus de redistribution profonde apparaissent plus importants: les percolations au-delà de 1,55 m étaient estimées à environ 12,4% de la pluviométrie totale en 1991 (année du paillage). Elles diminuent à 6,3% en 1992 en raison d'un accroissement de l'ETR consécutif au développement du couvert végétal (Figure 6.18).
- Les conditions du bilan d'eau deviennent ainsi plus favorables au développement des espèces pérennes.

En fin de saison des pluies, le sol se dessèche plus rapidement en surface (0-80 cm), pendant que les couches profondes conservent encore des réserves en eau utilisables par les végétations ligneuses.

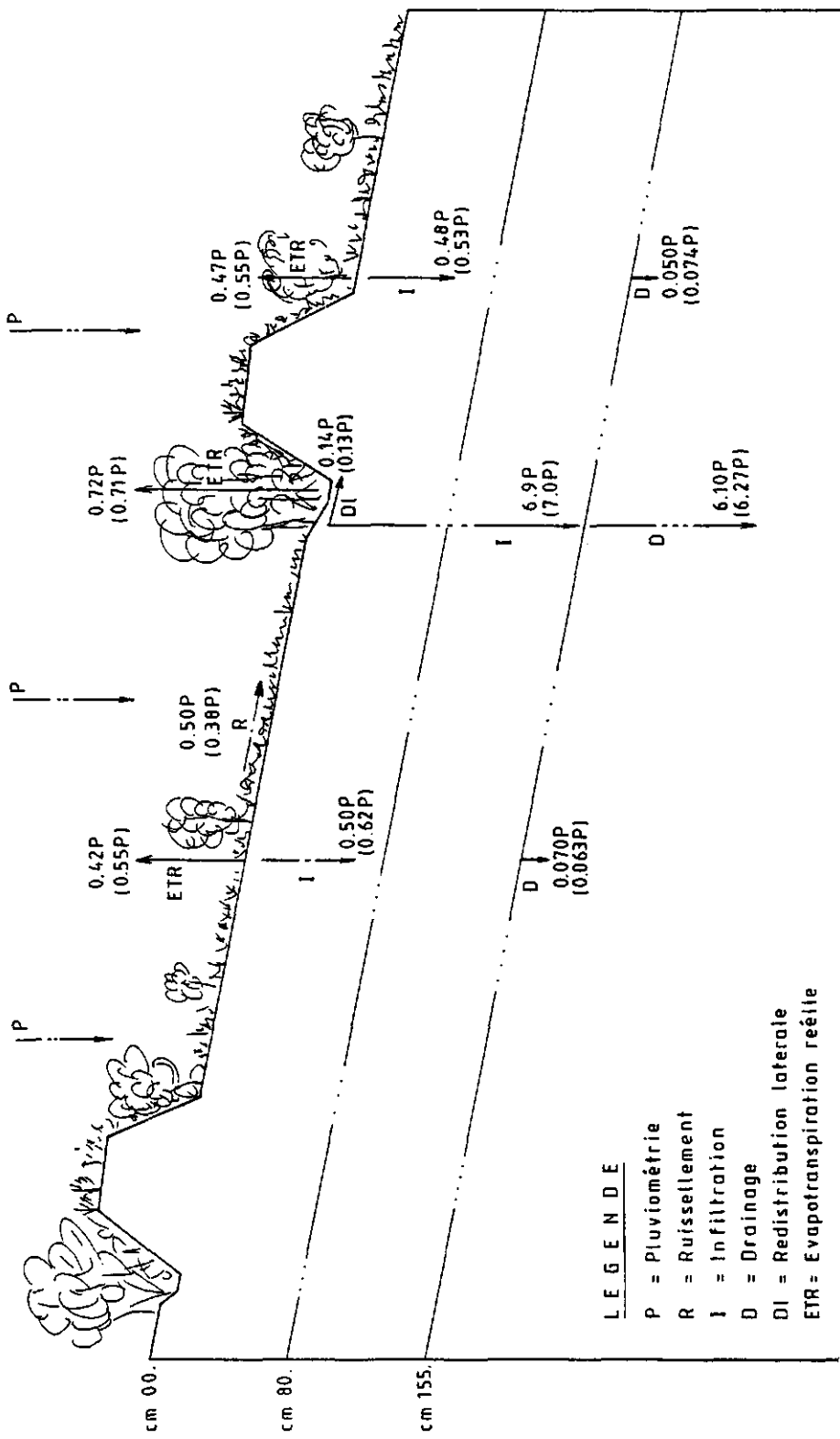


Figure. 6.18 Approche schématique du bilan de l'eau dans les aménagements de C.E.S. de type isohypses au cours de la 2eme saison des pluies suivant l'aménagement (parcelle "90"). Entre () les valeurs pour une parcelle aménagée avec paillage inter-ouvrages (90P). Le bilan couvre la période mai-Octobre 1992. Forêt classée de Yabo.

6.4 Conclusions

L'objectif essentiel des mesures de C.E.S. prises dans la forêt de Yabo est, il faut le rappeler, de capter l'eau de ruissellement en vue d'accroître l'infiltration. Ces mesures partent de l'hypothèse que l'eau constitue le premier facteur limitant de la régénération des sols dégradés et de la production végétale. Infiltrer l'eau, par quelque procédé que ce soit, suffirait à déclencher les processus de remontée biologique nécessaires à la régénération de ces écosystèmes. Les mesures prises consistent en des ouvrages isohypses d'absorption du ruissellement (diguettes en terre) avec ou sans mesures d'accompagnement biologiques, donnant ainsi lieu à plusieurs variantes dans l'intensité des aménagements. L'étude des facteurs du bilan hydrique au cours de deux saisons de croissance (1991 et 1992) a permis de parvenir aux constatations suivantes:

- i. La dégradation physique qui affecte l'horizon superficiel du sol se traduit par un non-fonctionnement permanent du complexe eau-sol-végétation lié simplement à une réduction extrême de l'infiltration par ruissellement pouvant dépasser 80% de la pluviométrie annuelle.
- ii. Les mesures de C.E.S. de type isohypse (diguettes "impermeables") apparaissent très efficaces pour l'accumulation et la redistribution de l'eau dans le sol. Elles offrent les meilleures conditions pour la germination et le développement de nombreuses espèces annuelles et pérennes, ligneuses et herbacées. En effet, l'accroissement du stock d'eau du sol, particulièrement en amont et en aval des ouvrages, est tel qu'il subsiste pendant la saison sèche des réserves hydriques profitables aux végétations ligneuses. Pour une zone sous influence des ouvrages d'absorption qui représente 10 à 12% des superficies aménagées, les percolations moyennes au-delà de 1,55 m ont été estimées, au cours de la deuxième saison suivant l'aménagement (1992), entre 240 et 310 mm selon les écartements entre les ouvrages et le couvert végétal; soit 35 à 45% de la pluviométrie annuelle totale. Ceci est sans doute d'une importance significative pour la recharge des nappes souterraines, lorsqu'on sait que dans la zone d'étude l'alimentation de la nappe (située à 15 m de profondeur sur le glaci) est surtout indirecte, c'est-à-dire assurée par la concentration des eaux dans les bas-fonds et les marigots: c'est seulement dans ces conditions que la recharge est estimée supérieure à 100 mm/an. Ailleurs, elle est jugée insignifiante (DEP-M/Eau B.F., 1993). Lorsqu'ils sont accompagnés de mesures "spatiales" visant à augmenter de façon homogène l'infiltration entre les ouvrages, les aménagements isohypses ont un effet plus étendu et plus durable sur le bilan hydrique et le développement des végétations annuelles et pérennes. Dans une telle perspective, les mesures biologiques (paillage, mulching notamment) apparaissent comme les plus économiques.
- iii. En amont des diguettes isohypses, l'absorption plus ou moins totale du ruissellement apparaît comme un facteur essentiel du niveau de production atteint au cours des premières années de régénération. L'influence de la redistribution profonde de l'eau dans la zone située en aval se traduit par des conditions d'humidité presque aussi intéressantes pour les végétations pérennes. Cependant, ce régime hydrique résulte souvent en un bilan largement excédentaire par rapport aux besoins des plantes herbacées en général, et des annuelles en particulier, qui constituent l'essentiel de la végétation de ces écosystèmes au démarrage du processus de régénération. Dans ces conditions, l'eau n'apparaît plus

comme un facteur limitant la production; elle pourrait au contraire entraîner des effets dépressifs sur le développement des végétations herbacées qui sera discuté dans le chapitre suivant.

- iv. De même, en tenant compte de la fertilité naturelle des sols en régénération, les tendances des processus en termes de production à moyen et long termes seront déterminées, dans les conditions de bilan hydrique qui prévalent en amont des diguettes, par la disponibilité des éléments nutritifs, objet du chapitre 8.
- v. Néanmoins, on a noté que l'évolution globale du processus de la régénération apparaît déjà significative entre 1991 et 1992. La différence entre les espaces "IN" et "AM/AV" était en effet extrême au cours de la première saison des pluies (1991). Le ruissellement élevé en "IN" a entraîné une accumulation des eaux en "AM" et un drainage très élevé (94% des quantités totales infiltrées selon les parcelles), alors qu'il est parfois nul en "IN". Au cours de la seconde année, la régénération se manifeste par une réduction des différences entre les deux espaces: la végétation s'installe en "IN", l'infiltration s'améliore (de 10 à 42% dans les parcelles sans paille) et, avec elles, l'ETR (et la production) augmente. Au même moment en "AM", la réduction des quantités d'eau accumulées d'une part et l'augmentation de l'ETR (+22 à +25% selon les parcelles) suite au développement remarquable d'une végétation ligneuse d'autre part, contribuent à une réduction du drainage profond qui ne représente plus que 90% à 91% des quantités totales infiltrées.

7 La dynamique des végétations

7.1 Introduction

L'objectif poursuivi par les mesures de régénération des sols dégradés est de recréer les conditions d'implantation et de développement d'un couvert végétal susceptible de remplir les fonctions de protection et de production escomptées. Dans ce chapitre, nous étudions la dynamique des végétations telle qu'elle est influencée par les mesures de C.E.S. dont les effets sur le bilan hydrique ont déjà été discutés dans le chapitre précédent. L'étude des végétations concerne les strates herbacée et ligneuse dans lesquelles sont tour à tour évalués des paramètres quantitatifs servant à mesurer le potentiel de production des sols en régénération (recouvrement, densité, production primaire), et des paramètres qualitatifs permettant de suivre dans l'espace et dans le temps, les inter-actions eau-sol-végétation: composition floristique, dynamique des groupements végétaux.

Contrairement à l'étude du bilan d'eau, les résultats portant sur la dynamique des végétations prennent en compte les mesures effectuées dans les deux stations situées respectivement dans les forêts classées de Yabo et Bissiga. Ces deux stations présentent, sur des types de sols semblables, les mêmes types d'aménagements à des intensités variables (cf. Chapitre 5).

7.2 Paramètres et méthodes de mesure dans la végétation herbacée

7.2.1 Germination et installation des herbacées

L'accumulation des eaux de ruissellement en amont des ouvrages anti-érosifs offrirait les conditions favorables à une germination abondante des semences. Telle est l'hypothèse qui a motivé le suivi de la germination de la strate herbacée au cours de l'hivernage 1992 à la station de Yabo. Du 24 mai au 30 juin, les observations ont été effectuées sur 12 placettes de 1m x 10m dont 6 en amont des diguettes (AM) et 6 autres dans les espaces inter-diguettes (IN) de la parcelle "90P". Ces observations ont consisté à relever, au fur et à mesure de la germination, les nouvelles plantules apparues et à noter les espèces correspondantes. Elles ont débuté le 24 mai après la première grande pluie de la saison (44 mm) et se sont poursuivies jusqu'au 30 juin 1992. Les relevés sont effectués chaque jour durant toute la période où le sol demeure humide après une pluie; ils reprennent au lendemain de la pluie suivante.

7.2.2 Structure et composition floristique

Dans le chapitre précédent, nous avons abouti au constat que l'homogénéité (en termes de continuité spatiale) du couvert végétal traduisait l'efficacité des mesures de régénération et qu'elle jouait par ailleurs un rôle important dans la régulation du régime hydrique, en particulier dans les espaces inter-diguettes. De ce point de vue, le recouvrement peut être considéré comme un indicateur de l'évolution spatiale et de l'homogénéité du couvert végétal. Par ailleurs, de nombreux travaux montrent que dans les savanes soudaniennes les processus de régénération des sols dégradés, y compris les jachères, sont caractérisés dans le temps par des remaniements floristiques au sein de la strate herbacée notamment, conduisant à plus ou moins longue échéance à des équilibres caractéristiques de milieux non dégradés ou peu perturbés (Daget et Poissonnet, 1971, Toutain, 1978, Zoungrana, 1992). Ces remaniements, qui aboutissent à des stades d'évolution plus ou moins stables caractérisés par des espèces particulières, traduisent une certaine évolution des conditions pédologiques et hydrodynamiques des milieux considérés. Les relevés floristiques dans la végétation herbacée devraient donc permettre de caractériser les liens entre les dispositifs de C.E.S. utilisés pour la régénération des sols et les différentes phases d'évolution.

Dans les aménagements évalués, on observe un gradient d'hétérogénéité de la végétation lié à celui du régime hydrique dont la variabilité dépend surtout des ouvrages isohypses en place. Aussi le protocole expérimental pour l'étude des végétations en général, et l'inventaire floristique en particulier, s'appuie-t-il sur les mêmes critères de zones utilisés dans l'étude du bilan hydrique:

- l'amont des diguettes (AM) où la végétation est plus homogène dès le démarrage;
 - les espaces inter-diguettes (IN) dont la végétation est plus hétérogène.
- Au niveau de la station de Yabo nous avons trois (3) parcelles expérimentales comportant six traitements: 90/AM, 90/IN, 90P/AM, 90P/IN, 82/AM et 82/IN (Figures 5.7 et 6.1). L'inventaire floristique a été réalisé en 1991 et 1993.

Dans la station de Bissiga, l'inventaire a été effectué seulement en 1991 et a distingué les parcelles et traitements suivants (voir aussi Chapitre 5.3.5):

- la parcelle "BS": cette parcelle est située en haut de pente dans la toposéquence et est considérée comme traitement unique sur la base de l'homogénéité apparente du couvert végétal;
- la parcelle "BH": diguettes isohypses simples avec plantation ou semis direct de ligneux en haies vives; située sur le glacis moyen;
- la parcelle "BB": qui est située en bas de pente et influencée par les crues de la rivière. Les deux dernières parcelles sont subdivisées en deux traitements (AM et IN), donnant au total cinq (5) traitements pour cette station: BS, BH/AM, BH/IN, BB/AM, BB/IN.

En tenant compte de la date d'aménagement des parcelles et de la date de l'inventaire, on aboutit à la répartition suivante:

- deux parcelles de 1 an ("90" et "90P" de Yabo), avec les traitements AM et IN chacune, inventoriées en 1991;
- deux parcelles de 3 ans: les parcelles ci-dessus inventoriées en 1993;
- trois parcelles de 5 ans: "BS", "BH" et "BB" (Bissiga, inventaire de 1991) avec les traitements AM et IN pour les deux dernières;
- une parcelle de 9 ans: la parcelle "82" (Yabo, inventaire de 1991) avec les traitements AM et IN;

- une parcelle de 11 ans: la parcelle de 9 ans inventoriée deux années après, en 1993, avec les mêmes traitements;

Pour chaque traitement, on a adopté la méthode des points quadrats alignés (Daget et Poissonnet, 1971, Boudet, 1978): des lignes de 10 mètres de long sont disposées parallèlement aux diguettes isohypses, tant en "AM" qu'en "IN", et des points de lecture placés tous les 20 cm, soit 50 points par ligne (Grouzis, 1979). Ceci permet une meilleure distribution spatiale de l'échantillon dans la formation étudiée. A chaque point, les contacts (une par espèce) sont notés avec, outre les espèces herbacées, les ligneux très jeunes et la litière au sol; à défaut de tout contact avec un organe végétal, on note les sols nus. On calcule le recouvrement pour chaque espèce i par la formule $R_i = (F_{si}/N) \times 100$, où F_{si} est le nombre total des contacts de l'espèce i (ou *fréquence spécifique*) enregistrés sur l'ensemble des lignes de mesure et N le nombre total de points échantillonnés. Le recouvrement global pour un traitement est obtenu en tenant compte de la proportion de sols nus.

De la même façon, on calcule pour chaque espèce, la *contribution spécifique* (C_{si}) qui traduit l'importance relative de l'espèce dans le groupement étudié: $C_{si} = [F_{si}/(\sum F_{si})] \times 100$, pour i variant de 1 à n , n étant le nombre total des espèces recensées.

Dans chaque traitement les lignes de points sont disposées, à partir d'un premier emplacement choisi au hasard, de façon à couvrir régulièrement la parcelle étudiée. Le nombre de lignes inventoriées est déterminé par la précision ou intervalle de confiance (I_c) calculée à partir de l'effectif cumulé, ligne par ligne, des contacts de l'espèce dominante, selon la formule $I_c = \pm 2\sqrt{n(N-n)/N^3} \leq 0,05$ où n désigne, cette fois, la F_{si} cumulée de l'espèce dominante et N l'effectif cumulé des contacts de l'ensemble des espèces; la précision choisie étant $\geq 95\%$.

L'âge des aménagements, le régime hydrique et l'intensité des mesures de C.E.S. ont été considérés comme les facteurs qui déterminent la composition floristique de la strate herbacée ainsi que son évolution dans le temps. Les indices classiques de diversité et d'équitabilité ont été utilisés pour mesurer le niveau d'organisation et l'évolution des communautés végétales: il s'agit des indices de diversité de Shannon-Weaver (H) et de Simpson (IS), des indices d'équitabilité de Shannon-Weaver (E) et de Simpson (ES). (Zougrana, 1992).

Indice de diversité $H = -\sum (q_i/\Sigma q_i) \times \log_2(q_i/\Sigma q_i)$

Indice de diversité $IS = 1/\sum (q_i/\Sigma q_i)^2$

Indice d'équitabilité $E = H/\log_2(n)$ et

Indice d'équitabilité $ES = (IS-1)/(n-1)$ pour i variant de 1 à n ,

où q_i est la fréquence spécifique de l'espèce i et n le nombre d'espèces de la station.

Des valeurs élevées de diversité impliqueraient une grande égalité des contributions individuelles et traduiraient une faible organisation du système. En revanche, une faible diversité indiquerait en général un système plus organisé, sauf dans le cas de peuplements monospécifiques ou fortement dominés par une seule espèce. En particulier, il est généralement admis que l'indice de diversité de Shannon-Weaver (H) atteint la valeur la plus élevée lorsque toutes les espèces sont équiprobables (Zougrana, 1992).

Une faible équitabilité traduirait, quant à elle, une répartition irrégulière des effectifs entre les espèces et soulignerait donc des phénomènes de forte dominance (Daget 1980, Devineau et al., 1984, cités par Zougrana, 1992).

De même, nous avons effectué une analyse factorielle des correspondances (AFC) sur les contributions spécifiques (CSi) des espèces rencontrées dans les différents relevés floristiques des deux stations. Cette analyse a pour but de tester l'hypothèse de travail sur les facteurs qui déterminent les variations dans la composition floristique et l'évolution des communautés herbacées. L'AFC permet de décrire la dépendance ou la correspondance entre deux ensembles de caractères (Dervin, 1992): ici l'importance relative des différentes espèces dans chaque relevé, représentée par leur CSi d'une part et les facteurs du milieu (régime hydrique, âge ou intensité des aménagements de C.E.S.) d'autre part.

7.2.3 La production primaire

L'objectif visé par la mesure de la biomasse est de quantifier la production réelle et potentielle des végétations, en rapport avec les mesures de régénération déployées et l'âge des aménagements. Elle part de l'hypothèse que c'est le total de phytomasse produite et sa répartition dans l'espace au démarrage du processus de régénération qui déterminent pour une large part l'évolution de ce processus (cf. Chapitre 4). Il importe, dans ces conditions, d'arriver à une estimation aussi complète que possible de la phytomasse totale produite au cours d'une saison de croissance, à la fois par les parties aériennes (Phytomasse aérienne) que souterraine (Phytomasse ou biomasse racinaire).

La production primaire aérienne

Le reproche principal fait à la méthode dite de la "biomasse maximale", pour l'estimation de la production primaire aérienne des végétations herbacées, est qu'elle sous-estime généralement la production réelle. La récolte simultanée, à la date de la biomasse maximale, d'une série de placettes formant l'échantillon, présenterait en effet deux types d'erreurs possibles (Fournier et Lamotte, 1983):

- les mortalités et la disparition par décomposition ou consommation d'organes végétatifs (feuilles en particulier), entre le stade de la biomasse minimale (germination) et celui de la biomasse maximale (fructification), ne sont pas comptabilisées. Il y a sous-estimation de la production réelle;
- l'influence du matériel végétal résiduel de la saison précédente, si elle n'est pas éliminée par un tri préalable, conduit aussi à une surestimation de la phytomasse produite pendant la saison en cours.

La plupart des travaux sur la production réelle des pâturages sahéliens ne se sont pas toujours intéressés à cet aspect de la question pour des raisons diverses. Penning de Vries et Van Keulen (1982) constatent que, dans la littérature, la biomasse est souvent déterminée "à la fin de la saison pluvieuse" et, qu'en ce moment, des pertes considérables ont pu se produire déjà. Pertes qui, si elles ne sont pas prises en compte, sous-estiment la production. Cependant ce sont les pertes de biomasse (et de N dans la biomasse) enregistrées à partir de la fin de la saison pluvieuse qui ont le plus retenu l'attention, en raison de leur incidence sur la qualité des pâturages.

Il faut rappeler qu'un des objectifs de notre étude est, au-delà de l'utilisation pastorale des espaces en régénération, d'analyser sur le plan écologique la durabilité de la régénération en cours des sols dénudés. Cela exige une quantification aussi complète que possible de la production primaire aérienne de la strate herbacée, en tant qu'élément majeur du bilan bio-géo-chimique. C'est pourquoi au cours de la saison de croissance 1993, nous avons décidé de mesurer la production primaire aérienne nette de la strate herbacée, en fonction du régime hydrique induit par les mesures de C.E.S.; ceci, en vue de la comparer aux estimations de biomasse aérienne faites par la méthode de récolte au stade de la biomasse maximale. La production primaire nette est définie comme la quantité totale de matière produite par les végétaux chlorophylliens, moins les pertes par respiration. Rapportée à un intervalle de temps, elle traduit la somme des variations de matériel vivant (biomasse), de matériel mort (nécromasse ou litière) et des quantités de matière disparue dans l'intervalle (Milner & Hugues cités par Cornet, 1981).

Pour ce faire, la méthode utilisée est celle des "parcelles appariées" de Wiegert & Evans (1964) modifiée (Lomnicki et al., 1968), décrite et utilisée par Cornet (1981) pour des groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. La méthode a consisté dans notre cas, à identifier huit (8) séries de parcelles appariées en amont des diguettes et huit autres séries dans l'espace "IN". Chaque série comporte huit parcelles contiguës de 0,25 m² chacune, identiques du point de vue du recouvrement de la végétation sur pied et de la litière au sol. Elles sont disposées en deux rangées de quatre, soit une superficie totale de 2 m² par série. Le nombre de 8 parcelles par série a été dicté par le nombre de mesures possibles au cours de l'expérience: celles-ci ont débuté le 15 juillet, ont été effectuées tous les 15 jours jusqu'au 30 octobre, soit 8 dates (t₀ à t₇). Elles ont concerné les valeurs suivantes dans chaque série:

- | | | |
|----------------------------|-----------------|--|
| à la date t ₀ : | - parcelle 1: | biomasse (B ₀) |
| | | litière totale (L ₀) |
| | - parcelle 2: | litière totale (L ₀) |
| à la date t ₁ : | - parcelle 2: | biomasse (B ₁) |
| | | nécromasse accumulée (N ₁) |
| | - parcelle 3: | litière totale (L ₁) |
| à la date t _i : | - parcelle i+1: | biomasse (B _i) |
| | | nécromasse accumulée (N _i) |
| | - parcelle i+2: | litière totale (L _i). |

Ainsi de suite, sont calculés dans chaque intervalle de temps (t_i - t_{i-1}), c'est-à-dire 15 jours, (i) la matière morte (nécromasse ou litière) accumulée provenant de la mortalité d'organes végétatifs (N_i), (ii) le taux de disparition de la litière (δL_i) et (iii) la production primaire aérienne nette (PPN): $PPN = B_i - B_{i-1} + N_i$

Le taux de disparition de la litière δL est calculé par la formule suivante (Cornet, 1981):

$$\delta L_i = - \text{Log}[(L_i - N_i)/L_{i-1}] \times 1/(t_i - t_{i-1}).$$

Comme on le constate, l'une des exigences de cette méthode est "l'homogénéité absolue" du couvert végétal sur la superficie de chaque série de parcelles appariées. Cette exigence constitue, comme on le verra plus loin, la limite principale à son utilisation dans des savanes soudanaises du type étudié. La figure 7.1 explique les différents compartiments de la

production végétale à un stade donné de la croissance ainsi que la terminologie correspondante utilisée dans ce rapport.

La biomasse aérienne

La mesure de la biomasse aérienne intervient donc à la fin de la période de croissance appelée période de la **biomasse sur pied** (en Anglais "standing crop") **maximale**. Cette période est déterminée par la floraison-fructification des espèces dominantes des formations étudiées. La méthode est adaptée de celle utilisée par de nombreux chercheurs dans les formations soudano-sahéliennes (Levang, 1978, Grouzis, 1979, Penning de Vries et Djitéye, 1982, Zoungrana et Zoungrana, 1992): fauchage sur des placettes de 1 m² à ras de sol, avec séparation de la litière de la saison précédente. La biomasse est séchée au soleil jusqu'à poids constant (10 à 13 jours au mois de septembre). Chaque placette étant traitée de bout en bout, les légumineuses sont triées et séchées séparément en vue de déterminer leur contribution à la biomasse totale. La taille de l'échantillon et la précision des mesures est fonction de la nature et de l'homogénéité de la formation étudiée (Levang, 1978, Grouzis, 1979): 30 à 60 placettes ont été utilisées selon les traitements au cours des deux ou trois années de récolte; ceci en vue de mesurer l'incidence de la taille de l'échantillon sur l'intervalle de confiance des estimations. Le dispositif expérimental est basé sur les mêmes critères utilisés pour l'inventaire floristique: "AM" et "IN" pour les critères d'hétérogénéité, dans les mêmes parcelles de Yabo et Bissiga.

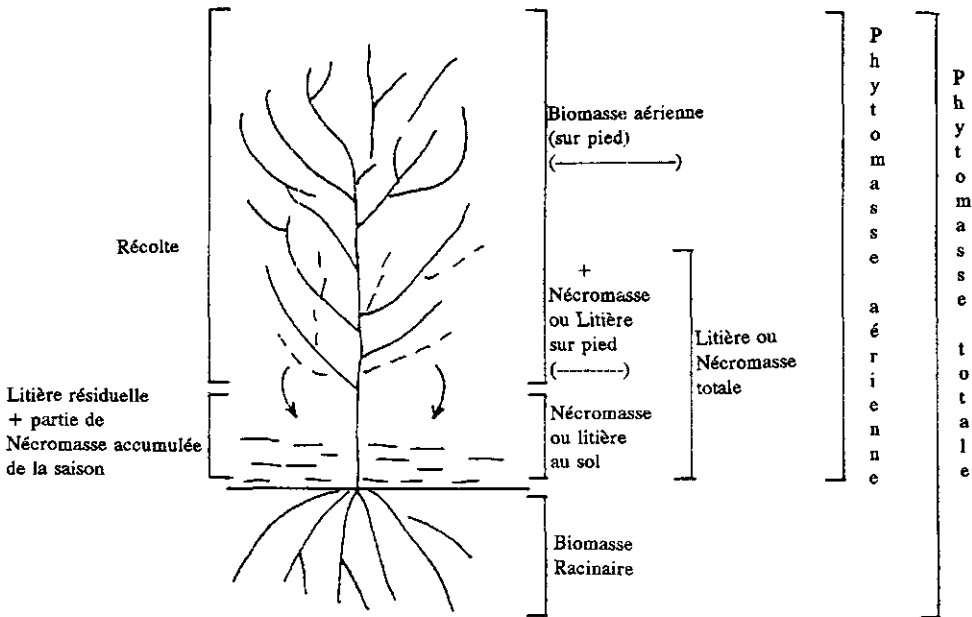


Figure 7.1 Les différents états de la production primaire des herbacées au stade de la biomasse aérienne maximale: autour du 15 septembre dans la région sahélienne.

L'échantillonnage a été effectué de façon systématique dans chaque parcelle: le long de lignes de transects parallèles à la ligne de plus grande pente, les placettes de récolte sont disposées alternativement en amont pour le traitement AM et au milieu des espaces inter-diguettes pour le traitement IN. On évite de récolter des échantillons situés sous les grands arbres. Les récoltes ont été effectuées en 1991 et 1992 à Bissiga et en 1991, 1992 et 1993 pour Yabo.

La production aérienne potentielle

Au-delà de la biomasse aérienne réelle, nous avons voulu mesurer la **production potentielle de biomasse aérienne**, c'est-à-dire la production de biomasse aérienne des végétations étudiées lorsque l'eau et les éléments nutritifs ne sont pas limitatifs. Nous avons, pour cela, procédé au cours de la saison de croissance 1992 à des essais de fertilisation: six placettes de 16 m² chacune situées en AM et six autres en IN ont été identifiées dans des conditions de végétation homogène et couvrante en début d'hivernage. On a apporté à la volée l'équivalent de 400 kg/ha de N sous forme d'urée, 100 kg/ha de P₂O₅ sous forme de TSP et 100 kg/ha de K₂O sous forme de sulfate de potassium. Ces quantités sont jugées assez élevées pour permettre une disponibilité non limitative d'Azote de Phosphore et de Potassium pendant la saison de croissance.

Il importe d'insister ici sur le changement d'échelle opéré sur le terrain lors des mesures de la production aérienne potentielle et la production aérienne nette. L'estimation de la production primaire réelle est basée sur la structure actuelle de la végétation à l'échelle de la **parcelle**: contrairement à l'espace "AM", le recouvrement de la végétation est plus ou moins hétérogène dans les espaces "IN" selon la nature et l'intensité des dispositifs de C.E.S. utilisés; la biomasse aérienne estimée à partir de 30 à 60 placettes de récolte régulièrement disposées dans chaque parcelle rend compte de cette hétérogénéité. Par contre, la définition de la production potentielle suppose des conditions de croissance non limitatives, pour un couvert végétal considéré comme normal dans les conditions du milieu. Les placettes fertilisées ont en conséquence été choisies tant en "AM" qu'en "IN" dans des **endroits** où la végétation est couvrante. Dans les espaces inter-diguettes, la production potentielle de biomasse n'est donc pas logiquement comparable à la production réelle estimée mais à la production en conditions non fertilisées d'un espace semblable dont la végétation initiale serait couvrante. Une telle situation se rapprocherait plus du "Témoin forêt naturelle" (TFN) dont la production réelle a été aussi estimée en 1991.

De même, l'étude de la production primaire nette exige une homogénéité du couvert végétal; d'où le choix, dans chaque situation topographique (ou espace AM et IN), de micro-parcelles (endroits) généralement couvertes de végétation. La comparaison entre production aérienne nette et biomasse aérienne estimée au "standing crop" maximal se fait donc, elle aussi, dans les limites de l'échelle des huit micro-parcelles étudiées. Ainsi ce changement d'échelle serait illustré par le passage de la **parcelle** (échelle minimale de 1 ha) à l'**espace** (IN = 15 à 20 m de large parallèlement aux diguettes et AM = 2 à 3 m de large le long en amont des diguettes isohypses) et à l'**endroit** (quelques m² de superficie dans un espace).

La biomasse racinaire

Elle a été mesurée au cours de la seule année 1992 à la faveur de l'essai de fertilisation ci-dessus. L'objectif étant d'estimer l'importance de cette partie de la phytomasse herbacée selon les principaux groupements végétaux en place, les mesures ont concerné les parcelles "82" et "90P" de la seule station de Yabo. Elles ont été faites à la période de biomasse maximale sur des placettes de 4 m² préalablement fauchées: trois carrés de 0,25 m² (0,5m x 0,5m) sont disposés en croix autour d'une fosse centrale de 1m x 1m creusée jusqu'à 1 mètre de profondeur. Chaque carré de 0,25 m² est découpé, à partir de la surface, en couches de 10 cm d'épaisseur, soit 25 dm³ de terre évacuée par couche et par carré. Cette terre recueillie est lavée à grande eau sur un tamis fin pour récupérer les racines (généralement vivantes); elles sont triées, à la taille et à la couleur, en vue de séparer éventuellement les racines des ligneux. Chaque profil est ainsi traité jusqu'à ce que les quantités recueillies soient considérées comme insignifiantes ou que le tri soit rendu impossible, à la seule vue, par la dominance excessive des racines ligneuses. Les échantillons ainsi obtenus sont séchés au soleil jusqu'à poids constant. La moyenne des trois carrés de 0,25 m² fournit pour chaque horizon de mesure la valeur de la biomasse racinaire de la placette.

En raison de contraintes pratiques, les mesures ont été limitées à cinq répétitions par traitement (AM et IN) dont deux fertilisées au NPK et trois non fertilisées, soit au total 10 fosses d'échantillonnage. En amont des diguettes, la végétation représentative est dominée par *Andropogon gayanus*, *Pennisetum pedicellatum* et *Andropogon pseudapricus* en formations denses, pures ou mixtes. Dans l'espace "IN", il s'agit de formations denses à éparsees, pures ou mixtes, dominées par *Andropogon pseudapricus*, *Pennisetum pedicellatum* et *Loudetia togoensis*.

7.3 Dynamique des végétations herbacées

7.3.1 Germination et installation

Les observations faites du 24 mai au 30 juin 1992 ont permis d'enregistrer quatre (4) périodes d'humidité susceptibles de donner lieu à des vagues de germination (Figure 7.2):

- du 25 au 30 mai : 70,6 mm de pluie en 3 jours
- du 8 au 12 juin : 36,5 mm en 2 jours (7 et 9 juin)
- du 14 au 18 juin: 20,6 mm en 2 jours (13 et 15 juin)
- du 24 au 30 juin: 50 mm en 3 jours (24, 27 et 28 juin)

La première vague de germinations a débuté 4 jours après la première pluie de 44 mm; elle s'est arrêtée 5 jours après la dernière pluie de cette période d'humidité. Toutes les espèces herbacées (15 au total) recensées au cours des vagues de germination suivantes sont déjà apparues au cours de la première vague, sauf *Corchorus sp.* qui n'a germé qu'à la fin de la deuxième vague (Tableau 7.1).

En amont des diguettes, la germination est plus longuement étalée sur les 4 périodes ou vagues: seulement 1/3 des espèces recensées ont vu leur germination limitée à la première vague; parmi elles, les plus remarquables sont *Andropogon pseudapricus* (et/ou *Andropogon fastigiatus*), *Brachiaria spp.* et *Loudetia togoensis*. *Borreria spp.*, *Zornia glochidiata*, *Cassia tora* et *Schoenefeldia gracilis* ont, quant à eux, été observés au cours des quatre vagues de germination.

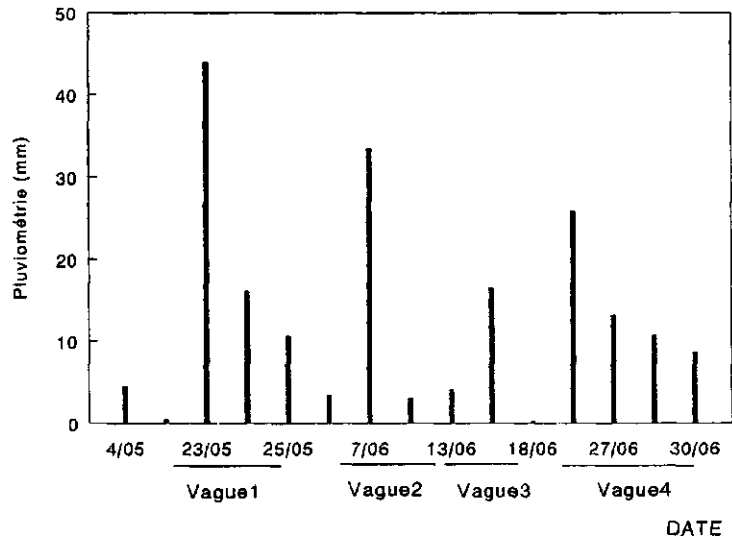


Figure 7.2 Répartition de la pluviométrie et vagues de germination des espèces herbacées au début de l'hivernage 1992. Forêt classée de Yabo.

Dans l'espace inter-diguettes, plus de 70% des espèces recensées ont germé au cours de la seule première vague; *Zornia glochidiata*, *Schoenefeldia gracilis*, *Borreria spp* et *Cassia tora* ont aussi germé de façon continue et prolongée mais plus limitée qu'en amont (3 vagues sur 4). On notera aussi que *Acacia seyal* n'a pas arrêté de germer depuis la première vague; nous y reviendrons. L'évolution du nombre d'espèces germées au cours des quatre vagues se présente comme suit:

Traitement	1e Vague	2e Vague	3e Vague	4e Vague
Amont/digues	15	11	8	6
Inter-digues	15	4	4	0

Les données de la littérature (Breman et al., 1982, Cissé, 1986, Breman & de Ridder, 1991) indiquent en effet que des espèces telles *Cassia tora*, *Zornia glochidiata*, *Schoenefeldia gracilis*, *Cassia mimosoïdes*, *Pennisetum pedicellatum*, *Loudetia togoensis* et *Andropogon pseudapricus* ont une vitesse de germination plus rapide que d'autres comme *Borreria spp.* dont la vitesse de germination serait retardée par la dureté de la graine. Cependant, ces données indiquent aussi que des espèces comme *Cassia tora*, *Zornia glochidiata* et *Cassia mimosoïdes*, malgré une vitesse de germination rapide, présentent des semences très hétérogènes qui contribuent à retarder la germination et à l'étaler ainsi sur plusieurs vagues successives. De même, les enveloppes des semences de *Schoenefeldia gracilis* seraient un facteur qui ralentirait et limiterait sa germination (Cissé, 1986).

En raison du paillage, les pluies enregistrées en début de l'hivernage (70,6 mm en 3 jours, successivement) ont suffi à créer des conditions de germination aussi bonnes entre les diguettes qu'en amont de celles-ci: 15 espèces ont été recensées de part et d'autre au cours des 6 jours suivant la première pluie (44 mm). Ceci confirme que le paillage est surtout utilisé par les paysans pour conserver l'humidité des sols et améliorer la levée des semis. L'importance des vagues de germination successives enregistrées par la suite montre, en revanche, que l'amont des diguettes offre mieux les conditions d'une germination prolongée des espèces herbacées. L'absence de comptage des plantules dans les placettes étudiées ne permet cependant pas de se prononcer sur l'abondance relative du phénomène.

Un des aspects de ce processus qui mérite cependant d'être mentionné est le nombre élevé d'espèces qui ont germé ainsi que la quantité de semences disponibles sur des sols initialement nus. Les aménagements de C.E.S. ont été effectués en début de saison sèche (fin novembre), après la chute des semences et le dessèchement de la quasi-totalité des végétations herbacées. La première saison des pluies (1991) voit cependant s'installer 19 espèces herbacées dans les espaces "IN" sans paillage (90/IN). Le traitement 82/IN (aménagement de 9 ans sans paillage) en comptait 22. L'apport de paille dans la parcelle 90P/IN a permis d'enregistrer 37 espèces au cours de cette première saison de végétation. En amont des diguettes, on a recensé 37 espèces dans les traitements 90/AM et 82/AM et 47 dans le traitement 90P/AM. Pendant les trois premières années du processus, on a enregistré la présence de 81 espèces herbacées au total dans la station de la forêt de Yabo. Ceci traduit non seulement une disponibilité quasi-permanente des semences mais surtout leur énorme capacité de dispersion par l'eau et le vent.

Phase	27.03/5/92	8/6	9/6	10/6	12/6	14/6	16/6	18/6	25/6	27/6	29/6
AM 1	: <i>Acacia seyal</i>		X	X	X	X		X	X	X	X
	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>					Borrer. sp.	Borrer. sp.				
	: <i>Cassia tora</i>	X	X		X						X
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>				X						
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>				X		X				
: <i>Zornia glochidiata</i>						X					
AM 2	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>						X				
	: <i>Hibiscus saser</i>										
	: <i>Loudelia togoensis</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>				X		X	X			
	: <i>Stachytaricta angustifolia</i>										
	: <i>Walteria indica</i>									X	X
: <i>Zornia glochidiata</i>							X				
AM 3	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Borreria spp.</i>						X				
	: <i>Cassia mimoides</i>				X		X				
	: <i>Cassia tora</i>		X	X	X		X		X		
	: <i>Cucumis sp.</i>					Corechorus sp.					
	: <i>Hibiscus saser</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>				X			X			
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>										
	: <i>Stachytaricta angustifolia</i>				X						
	: <i>Walteria indica</i>										
: <i>Zornia glochidiata</i>		X	X	X							
AM 4	: <i>Borreria spp.</i>		X		X	X	X		X		
	: <i>Cassia mimoides</i>										
	: <i>Cassia tora</i>		X	X	X				X		X
	: <i>Iporhoa sp.</i>		X		X						
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>				X			X			
	: <i>Stachytaricta angustifolia</i>										
	: <i>Bracharia sp.</i>										
: <i>Zornia glochidiata</i>					X						
AM 5	: <i>Acacia seyal</i>		X	X							X
	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia mim.</i>								Cassia mim.		
	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Borreria spp.</i>				X		X	X	X	X	X
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>				X						
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>									X	
	: <i>Stachytaricta angustifolia</i>										
: <i>Zornia glochidiata</i>	X	X		X		X	X			X	
AM 6	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>	X	X								
	: <i>Borreria spp.</i>				X					X	X
	: <i>Loudelia togoensis</i>						X				
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
	: <i>Stachytaricta angustifolia</i>										X
	: <i>Zornia glochidiata</i>	X	X		X			X			
IN 1	: Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant	Neant
IN 2	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Corechorus sp.</i>										
	: <i>Cucumis sp.</i>										
	: <i>Euphorbia hirta</i>										
	: <i>Bracharia sp.</i>										
	: <i>Loudelia togoensis</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>				X		X				
: <i>Sida alba</i>											
: <i>Zornia glochidiata</i>								X			
IN 3	: <i>Borreria spp.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Cassia mimoides</i>										
	: <i>Bracharia sp.</i>										
	: <i>Loudelia togoensis</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
	: <i>Schoenefeldia gracilis</i>										
: <i>Stachytaricta angustifolia</i>											
: <i>Zornia glochidiata</i>											
IN 4	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Loudelia togoensis</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
: <i>Zornia glochidiata</i>											
IN 5	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Borreria sp.</i>		X	X	X						
	: <i>Bracharia sp.</i>										
	: <i>Loudelia togoensis</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
: <i>Zornia glochidiata</i>	X	X	X	X							
IN 6	: <i>Andropogon pseud. /flavig.</i>										
	: <i>Cassia tora</i>										
	: <i>Iporhoa sp.</i>										
	: <i>Pennisetum pedicellatum</i>										
: <i>Schoenefeldia gracilis</i>											
Pluies	: 23/5 : 44 mm	33,5mm	3,00 mm								
	: 24/5 : 16,1 mm					4,1mm	16,5mm		25,9mm	13,2mm	10,8mm
	: 25/5 : 10,5 mm										

Tableau 7.1 La germination des espèces herbacées au début de la saison pluvieuse 1992. Résultats d'observations en Amont et dans l'espace Inter-diguettes. Forêt classée de Yabo.

On peut comprendre, au regard de ce qui précède, que l'installation des végétations herbacées dans les parcelles étudiées est conditionnée à la fois par le régime pluviométrique, les états de surface des sols ou la position par rapport aux diguettes, qui favorisent une infiltration plus ou moins importante. La durée plus grande des périodes d'humidité en amont des diguettes est déterminante dans les observations de germinations en vagues prolongées favorables, au-delà des espèces à germination rapide, aux espèces à semences hétérogènes ou à germination lente. Dans les espaces inter-diguettes par contre, l'installation des herbacées peut être limitée dans le temps par la durée plus courte des périodes humides. Ceci favorise en conséquence les espèces à germination rapide. Cette différence du régime hydrique, indépendamment des transferts vers l'amont des diguettes des semences par le ruissellement, pourrait expliquer la différence de composition et de structure des végétations entre l'amont et l'espace inter-diguettes dans ce type d'aménagements.

7.3.2 Structure et composition des végétations herbacées

Les données relatives à la composition et à la structure des végétations herbacées ont été analysées selon deux axes:

- une analyse synchronique (en 1991) de parcelles d'âge croissant, de 1, 5 et 9 ans, appartenant aux deux stations de Yabo et Bissiga;
- une analyse diachronique (1991 et 1993) des parcelles aménagées en 1990 à Yabo.

Dans les deux cas, le régime hydrique et l'intensité des mesures de C.E.S. sont supposés être des facteurs déterminants pour l'évolution des paramètres mesurés.

Le recouvrement

Les mesures de recouvrement effectuées en 1991, 1992 et 1993 dans les stations de Yabo et Bissiga ont donné les résultats du Tableau 7.2. Ce tableau révèle:

en amont des diguettes, une végétation assez homogène: le recouvrement, très élevé dès la première saison suivant l'aménagement, tend à se stabiliser rapidement autour de 100%;

dans les espaces inter-diguettes, une forte influence de l'intensité des dispositifs de C.E.S., en particulier des mesures "spatiales" prises en vue d'accroître et homogénéiser l'infiltration: le paillage effectué à Yabo en 1990 (traitement 90P/IN) crée dès la première année un niveau de couverture végétale plus de deux fois supérieur à celui des espaces non traitées (+ 139% par rapport au traitement 90/IN); cet écart est réduit à 109% dès la seconde saison pluvieuse et à 32% la troisième année. Cependant, dans la parcelle vieille de 9 ans (82/IN), le niveau du couvert végétal semblait s'être "stabilisé" autour de 50%: il était estimé à 45% en 1991; l'accroissement constaté en 1992 et 1993 est surtout le résultat de mesures additionnelles de paillage effectué à partir de matériau ligneux provenant de la coupe de haies vives.

A Bissiga, le sous-solage et l'ensemencement de l'espace "BS" avec une herbacée fourragère (*Stylosanthes erecta*) a permis à la végétation de le recoloniser presque entièrement, à l'exception de quelques plages de bordure demeurées nues: le recouvrement atteint 95%.

Traitement / Station	Année Aménagement	1991	1992	1993
YABO				
90/AM	1990	91	93	99
90/IN	1990	23	35	59
Moyenne parcelle "90"		32	42	64
90P/AM	1990	93	95	100
90P/IN	1990	55	73	78
Moyenne parcelle "90P"		60	76	81
82/AM	1982	96	96	96
82/IN	1982	45	54	62
Moyenne parcelle "82"		51	59	67
BISSIGA				
"BS"	1986	95		
"BH/AM"	1986	97		
"BH/IN"	1986	43		
Moyenne parcelle "BH"		50		
"BB/AM"	1986	99		
"BB/IN"	1986	50		
Moyenne parcelle "BB"		57		

Tableau 7.2 *Le recouvrement (en %) de la strate herbacée et son évolution dans des parcelles nouvellement aménagées et de vieilles parcelles, en fonction du régime hydrique. Dans le traitement "82/IN", des mesures nouvelles consistant en l'épandage de branchages et d'herbes ont été prises à titre expérimental en 1992 et 1993: elles ont contribué à accroître le couvert végétal demeuré à 45% 9 ans après l'aménagement. Forêt classée de Yabo.*

Après 5 ans de mise en défens, les zones non travaillées demeurent à moitié nues: 43 à 50% de recouvrement selon la position physiographique de la parcelle; ce qui confirme quelque peu l'hypothèse de la "stabilisation" (autour de 50%) du couvert végétal observé dans la parcelle "82" à Yabo. Tout cela suggère que l'absence de mesures particulières, visant à accroître l'infiltration entre les diguettes, se traduise par une évolution lente du processus de revégétation, en raison du ruissellement qui y demeure élevé (cf. Chapitre 6). Cette situation pourrait même conduire à une "stagnation" du processus que seules des mesures nouvelles sont à même de débloquent.

De même, l'effet du seul paillage obtenu en 3 ans entre les diguettes (80% de surface régénérée), en comparaison des coûts et des résultats d'un sous-solage mécanisé (BS), atteste que les mesures biologiques sont certainement aussi efficaces mais moins coûteuses pour ce genre d'objectif. Elles le sont d'autant plus que le matériau végétal produit en amont des diguettes au cours des premières saisons peut servir à récupérer les espaces restés nus entre les ouvrages.

L'évolution des communautés végétales.

Les résultats des calculs des indices de diversité et d'équitabilité sont reportés dans le tableau 7.3. Une comparaison des indices de diversité dans la station de Yabo (1, 3, 9 et 11 ans), montre qu'ils évoluent différemment selon le régime hydrique et l'intensité des mesures de régénération.

En amont des diguettes (avec ou sans paillage), IS croît de 1 an jusqu'à 9 ans. Il en est globalement de même pour les valeurs de H. Ceci indiquerait que l'évolution des communautés végétales est marquée par des remaniements floristiques au cours de ces 10 premières années; leur organisation s'améliorerait après 10 ans avec l'installation d'une structure et d'une composition floristique plus stables.

		YABO								BISSIGA		
Age		1	3	9	11	1	3	9	11	5	5	5
TRTM		90	90	82	82	90P	90P	82	82	BS	BH	BB
A M	Nb Esp	37	29	37	27	47	30	37	27	31	31	41
	H	3,45	3,40	3,68	3,22	3,70	3,50	3,68	3,22	3,72	3,57	3,64
	IS	5,80	6,90	7,83	6,21	7,60	7,65	7,83	6,21	9,01	8,71	7,77
	E	0,66	0,69	0,71	0,68	0,67	0,71	0,71	0,68	0,75	0,72	0,68
	ES	0,13	0,21	0,20	0,20	0,14	0,23	0,19	0,20	0,27	0,26	0,17
I N	Nb Esp	19	31	22	29	31	27	22	29		28	32
	H	3,35	3,70	3,19	3,57*	3,70	3,33	3,19	3,57*		3,57	3,62
	IS	6,48	8,72	5,15	7,50*	9,24	7,34	5,15	7,50*		8,35	8,07
	E	0,79	0,75	0,71	0,73*	0,75	0,70	0,71	0,73*		0,74	0,72
	ES	0,30	0,26	0,20	0,23*	0,27	0,24	0,20	0,23*		0,23	0,28

*: Des mesures nouvelles (mulching) ont été prises au cours de la 9ème et 10ème années pour relancer la végétation sur les espaces demeurés nus.

Tableau 7.3 Valeurs calculées des indices de diversité (H et E) et d'équitabilité (IS et ES) dans les stations de relevés floristiques de Yabo et Bissiga.

Dans l'espace inter-diguettes, l'influence de l'intensité des mesures de régénération, en particulier le paillage, apparaît assez distinctement.

Sans le paillage, la diversité croît entre 1 et 3 ans; les valeurs de **IS** et **H** tombent plus ou moins fortement à 9 ans. Ceci indique que les remaniements floristiques sont aussi les plus importants dans cet espace au cours des premières années; l'absence de relevé entre 4 et 8 ans ne permet pas d'identifier précisément les conditions dans lesquelles la diversité évolue au cours de ces premières années. Elle se "stabilise" vers 9-10 ans. Il s'agit cependant d'un "équilibre instable" caractérisé par une structure spatiale hétérogène de la végétation dont le recouvrement stagne autour de 50%. Le "mulching" de branchages et de paille effectué au cours des 10^{ème} et 11^{ème} années y ont relancé en effet les processus d'évolution des communautés végétales qui se sont traduit la 11^{ème} année par un accroissement du nombre d'espèces et des indices de diversité.

Avec le paillage, les deux premières années apparaissent en tout cas très actives: les indices de diversité sont plus bas à 3 ans, avec un nombre d'espèces plus réduit. Cependant les mesures n'ayant pu être poursuivies au-delà de 3 ans, il est difficile d'en tirer une conclusion formelle. La suite des travaux permettrait d'en savoir plus. Toutefois ces observations traduisent l'effet artificiel et spectaculaire du paillage sur la régénération de la végétation herbacée au cours de la première année; effet qui s'estompe progressivement suite à la stabilisation des inter-actions entre les espèces et leur milieu.

L'introduction, dans l'analyse, des relevés de 5 ans de la station de Bissiga confirme les tendances évolutives de l'indice de diversité de Shannon-Weaver. Cependant, le traitement "BS" apparaît comme un cas particulier qui n'intègre pas cette logique; ce qui peut bien s'expliquer par le fait qu'il présente un régime hydrique et une flore assez particuliers. Pour l'indice de diversité de Simpson, ce sont les traitements "BS" et "BH/AM" qui se singularisent. Cette particularité des parcelles de Bissiga, au delà du traitement "BS", ne surprend pas a priori pour deux raisons:

- il existe une différence entre l'environnement micro-climatique et micro-édaphique des deux stations, même si les sols sont considérés globalement comme du même type; l'influence de la rivière y est plus sensible sur la végétation dans la parcelle "BB" en particulier.
- les deux relevés ci-dessus (BS et BH/AM) connaissent encore, à cinq ans, d'importants remaniements dûs à l'influence, artificiellement créée par l'ensemencement au moment des aménagements, de *Stylosanthes erecta*: ils sont caractérisés par les indices d'équitabilité les plus élevés.

Globalement, ces indices d'équitabilité (**E** et **ES**) évoluent dans le même sens que **H** et **IS** dans les traitements n'ayant pas fait l'objet de paillage ou de sous-solage; ils traduisent donc les mêmes phénomènes.

Ces interprétations synthétiques doivent néanmoins être perçues avec toute la relativité due au nombre élevé des variables qui ont présidé à l'évolution des groupements végétaux comparés. L'analyse factorielle des correspondances effectuée sur l'ensemble des relevés de Yabo et Bissiga confirme en particulier la différence entre les deux groupes de relevés (Yabo et Bissiga).

L'analyse factorielle des correspondances

En procédant d'abord à une classification ascendante hiérarchique⁽¹⁾ des 18 relevés (en 6 classes) sur les valeurs des CSI des espèces rencontrées, trois premières classes apparaissent, indépendamment du régime hydrique; elles regroupent:

Classe 1: tous les relevés sur traitements de 1 an (Yabo), avec comme espèces dominantes: *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Schizachyrium exile* et comme espèces secondaires *Cassia tora*, *Pennisetum pedicellatum*, *Zornia glochidiata* et *Andropogon fastigiatus*.

Classe 2: tous les relevés sur les traitements de 3 ans (Yabo) et 2 relevés de 5 ans situés en haut de pente dans la station de Bissiga (BHA et BHI). Cette classe est caractérisée par *Pennisetum pedicellatum*, *Andropogon fastigiatus*, *Chloris gayana* et secondairement par *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*, *Zornia glochidiata*, *Elionorus elegans* et *Rhytachne triaristata*.

Classe 3: tous les relevés de 9 et 11 ans (Yabo), dominés par *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Loudetia togoensis*, accompagnées de *Pennisetum pedicellatum*, *Borreria spp*, *Setaria pallidifusca*, *Indigofera spp.*

Les relevés de Bissiga (BS, BBA et BBI) quant à eux constituent, chacun, une classe bien distincte. L'analyse factorielle des correspondances (AFC), effectuée sur les contributions spécifiques (CSI) des espèces rencontrées dans les 18 relevés, a d'ailleurs mis en exergue la particularité des 5 relevés de Bissiga, même utilisés comme variables supplémentaires, avec leur espèce caractéristique, *Stylosanthes erecta*. L'analyse a en conséquence été poursuivie avec les 12 relevés de la forêt de Yabo. Ces relevés correspondent à douze combinaisons de variables liées à l'âge (1,3,9 et 11 ans), au régime hydrique (Amont et Inter-digues) et à l'intensité des aménagements de C.E.S. (paillage et sans paillage). Les variables de l'analyse correspondent donc aux traitements ci-après définis dans le protocole expérimental général. Pour ces 12 variables, le nombre total d'observations (espèces) est de 81.

<u>Age</u>	<u>Relevé</u>	<u>Traitement</u>	<u>Date du relevé</u>
1an	1AM	90/AM	1991
	1PAM	90P/AM	"
	1IN	90/IN	"
	1PIN	90P/IN	"
3ans	3AM	90/AM	1993
	3PAM	90P/AM	"
	3IN	90/IN	"
	3PIN	90P/IN	"
9ans	9AM	82/AM	1991
	9IN	82/IN	"
11ans	11AM	82/AM	1993
	11IN	82/IN	"

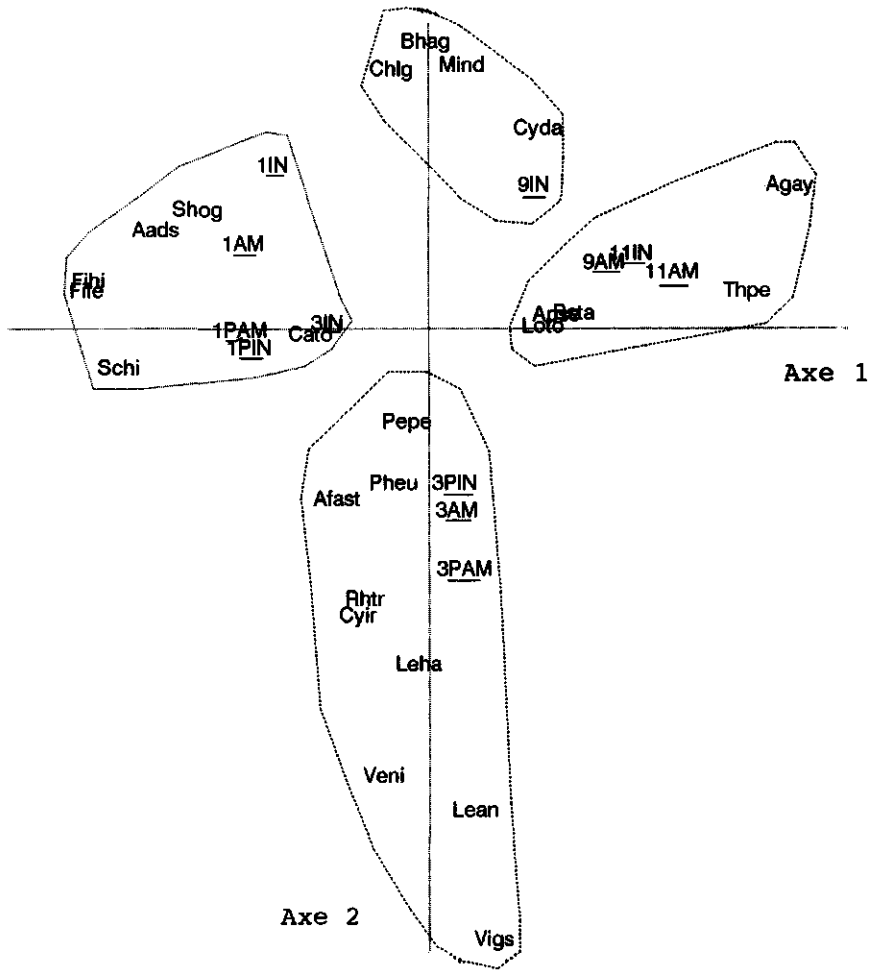
¹ La classification ascendante hiérarchique est basée sur la distance du KHi-2 et utilise comme critère de classement, la moyenne des distances pondérées entre les relevés.

Les résultats de l'AFC montrent que les deux premiers axes expliquent à eux seuls 53% des variations du nuage de points, dont 34,5% pour le premier axe; un troisième axe expliquant 11,7% de l'inertie totale.

La représentation simultanée des observations et des variables est fournie par la figure 7.2. Elle montre que l'axe principal (axe 1) de variation de l'importance relative des espèces oppose les relevés les plus âgés (9 et 11 ans: 11AM, 11IN et 9AM) à l'ensemble des relevés les plus jeunes (1 an). Le facteur principal de variation apparaît donc comme étant l'âge. A cet axe sont associées des espèces comme *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Cassia tora*, *Schizachyrium exile* et *Fimbristylis spp.* du côté des relevés les plus jeunes; *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Loudetia togoensis*, *Borreria stachydea* mais aussi *Thephrosia pedicellata* sont associés aux relevés les plus âgés. *Andropogon gayanus* et *Andropogon pseudapricus* en particulier s'identifient exclusivement à cet axe.

L'axe 2 quant à lui oppose les relevés 3P/AM et 3/AM (tous situés en amont de diguettes) aux relevés 1/IN et 9/IN situés entre des diguettes sans mesure spatiale particulière. La répartition des espèces sur l'axe montre d'un côté, correspondant aux relevés situés en "AM", *Andropogon fastigiatus*, *Pennisetum pedicellatum*, *Leptadenia hastata*, de même que les espèces comme *Vetiveria nigriflora*, *Vigna sp.* et *Cyperus iria* qui s'identifient exclusivement à cette partie de l'axe. De l'autre côté (côté positif) de l'axe, on retrouve les espèces comme *Chloris gayana*, *Microchloa indica* et *Brachiaria hagerupii* et dans une certaine mesure *Cynodon dactylon* et *Schoenefeldia gracilis*. Ceci suggère que l'axe 2 soit surtout caractérisé par la différence du régime hydrique: d'un côté les relevés situés dans les conditions d'humidité les plus élevées avec des espèces qui s'adaptent le plus aux milieux humides ou des espèces pérennes (*Leptadenia hastata* pousse surtout sur le talus des diguettes); de l'autre côté les relevés effectués dans les espaces dont le régime hydrique est le plus sec de l'ensemble de la station, avec des espèces xérophiles ou résistantes à la sécheresse. L'identification quasi exclusive du relevé 3P/IN au côté négatif de cet axe semble bien confirmer l'hypothèse du régime hydrique: les caractéristiques du bilan hydrique dans cet espace (90P/IN, relevé 1993) au cours des deux saisons des pluies suivant l'aménagement (Chapitre 6.3) montre déjà en 1992 un accroissement considérable des quantités infiltrées qui s'oppose aux situations observées dans les parcelles "82/IN" et "90/IN" en 1991, situations représentées respectivement par les relevés 9/IN et 1/IN.

L'explication de l'axe 3 apparaît moins évidente: il oppose exclusivement des relevés de la parcelle la plus anciennement aménagée (1982) où les haies vives ont été plantées le long des diguettes. Du côté négatif, on a le relevé 9/AM avec tout le groupe d'espèces annuelles généralement rencontrées sous l'étage des herbacées hautes ou des ligneux: *Cassia mimosoides*, *Setaria pallidifusca*, *Indigofera pulchra*, *Pennisetum pedicellatum*. Du côté positif de l'axe se trouve le relevé 11/IN avec des espèces comme *Loudetia togoensis*, *Thephrosia pedicellata* et *Microchloa indica*. Ces observations rendraient mieux compte d'une répartition des espèces selon un gradient d'intensité lumineuse. Tous les relevés qui caractérisent cet axe sont en effet parmi les plus âgés de la série analysée; et une stabilisation avec le temps des autres conditions du milieu pourrait permettre une expression plus remarquable de l'influence de la lumière sur la répartition des espèces. La poursuite des observations au cours des années à venir permettraient d'éclaircir davantage cette hypothèse.



Légende des espèces

Apse: *A. pseudapricus*

Agay: *A. gayanus*

Afast: *A. fastigiatus*

Aads: *Aristida adscensionis*

Bsta: *Borreria stachydea*

Bhag: *Brachiaria hagerupii*

Cato: *Cassia tora*

CHlg: *Chloris gayana*

Cyda: *Cynodon dactylon*

Cyir: *Cyperus iria*

Fife: *Fimbristylis ferruginea*

Fihi: *Fimbristylis hispida*

Lean: *Lepidagatis anobrya*

Leha: *Leptadenia hastata*

Loto: *Loudetia togoensis*

Mind: *Microchloa indica*

Pepe: *P. pedicellatum*

Pheu: *Pandiaka heudolotii*

Rhtr: *Rhytachne triaristata*

Shog: *Schoenefeldia gracilis*

Thpe: *Thephrosia pedicellata*

Veni: *Vetiveria nigriflora*

Vigs: *Vigna* sp.

Schi: *Schizachyrium exile*

Figure 7.3 Analyse factorielle des correspondances de 12 relevés d'âge variable et 81 espèces herbacées de la forêt classée de Yabo. Représentation dans le plan des axes 1 et 2 des variables et des observations les plus significatives.

L'ensemble de ces observations confirme que la régénération des sols dénudés est caractérisée dans le temps par des remaniements floristiques importants dans la strate herbacée. Ce processus est ainsi successivement marqué par les phénomènes suivants:

- dès le début de la revégétation, les espaces aménagés sont colonisés par des annuelles à grande capacité de dispersion en général, et particulièrement par des espèces pionnières dont les plus importantes à Yabo sont: *Schoenefeldia gracilis*, *Schizachyrium exile*, *Aristida adscensionis*, *Cassia tora*.
- Ces espèces sont progressivement étouffées et remplacées par des espèces pérennes ou des annuelles caractéristiques des savanes soudaniennes peu perturbées: *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Loudetia togoensis* dominent ces formations. Sous ces espèces hautes, se développe une importante flore d'annuelles à cycle court dominées par *Borreria spp.*, *Setaria pallidifusca*, *Cassia mimosoides*, *Indigofera spp.* C'est le stade de régénération le plus avancé observé au cours de cette étude (9-11 ans).
- Entre les deux extrêmes, les communautés végétales passent par une étape intermédiaire, plus ou moins longue selon l'intensité des mesures de régénération mises en oeuvre. Cette étape est caractérisée par un dynamisme accru des inter-actions des espèces entre elles et avec le milieu. Elle a vu apparaître, pour le cas de Yabo, des espèces comme *Andropogon fastigiatus*, *Pennisetum pedicellatum*, *Leptadenia hastata*, *Rhytachne triaristata*, *Chloris gayana*.

En l'absence de mesures particulières tendant à accroître l'infiltration dans les espaces inter-diguettes, l'évolution floristique des végétations se trouverait-elle encore à ce stade, même après 9 ans ? C'est en tout cas ce que suggère la situation des relevés 9IN (traitement 82/IN) sur l'axe 2 et 3/IN (90/IN relevé 1993) sur l'axe 1 du plan de l'analyse des correspondances (Figure 7.2). Une évolution assez semblable dans le temps a été observée dans la régénération des végétations herbacées de jachères soudaniennes dans la région de Gampèla (Zoungrana, 1992). Ces jachères sont caractérisées par d'intenses remaniements floristiques jusqu'au stade de 10 ans qui correspondrait à une sorte de saturation des niches écologiques. Ces remaniements diminuent progressivement jusqu'au stade de 30 ans, correspondant à la stabilisation des milieux. La poursuite des observations, en particulier dans la forêt de Yabo, et une analyse plus détaillée des relevés des deux stations permettraient de mieux sérier et rapprocher les critères d'évolution des communautés herbacées dans les deux zones étudiées.

7.3.3 La production primaire

Développement de la biomasse aérienne

Le suivi du développement de la biomasse a été effectué dans le cadre de l'étude de la production primaire aérienne nette. Il importe de rappeler le caractère expérimental de ce travail et l'échelle à laquelle il s'est déroulé: la parcelle "90P" avec 8 séries (répétitions) de micro-parcelles appariées. L'objectif était surtout d'apprécier l'importance de la sous-estimation de la production aérienne, liée à l'application de la méthode de la biomasse aérienne maximale. Le tableau 7.4 résume l'ensemble des résultats des mesures qui sont les moyennes des huit répétitions.

		DATE OU PERIODE DE MESURE: 1993							
TRTM		15/7	30/7	15/8	30/8	15/9	30/9	15/10	23/10
BIOMAS AERIEN- NE	AM	1390	1830	3160	3780	4900	4140	3650	3340
	IN	1250	1930	3690	4490	5500	3890	3650	2630
NECROM ACCUM.	AM		310	830	680	1010	2490	2640	
	IN		220	580	420	1620	3370	3550	
LITIERE TOTALE	AM	3740	3330	3210	3080	2550	3890	3960	
	IN	5900	4260	4050	3390	2990	4720	4830	
LITIERE RESIDLE	AM	3740	3020	2400	2380	1540	1390	1320	
	IN	5900	4040	3470	2970	1370	1350	1290	
P.P.AER. NETTE	AM	1390	2140	3990	4460	5910	6630	6290	
	IN	1250	2150	4270	4910	7120	7260	7200	
TAUX DISPAR. LITIERE	AM		0,21	0,34	0,29	0,69	0,61		
	IN		0,38	0,20	0,31	0,91	0,79		

Tableau 7.4 Evolution de la biomasse aérienne, de la nécromasse accumulée, la litière totale, la litière résiduelle 1992 et la production primaire aérienne nette (en kg de M.S/ha) des formations herbacées, en AMont et dans les espaces INter-diguettes de la station de la forêt classée de Yabo, au cours de la saison de végétation 1993. La valeur de nécromasse inscrite en face d'une date D_i correspond aux quantités accumulées au cours de la période D_i-D_{i-1} . Il en est de même des valeurs du taux de disparition de la litière qui sont exprimées en kg/kg.ha.15j.

La biomasse aérienne

Son évolution au cours de la saison est illustrée par la figure 7.4-A. A recouvrement initial semblable, la production maximale de biomasse aérienne est supérieure dans l'espace "IN" à celle observée en "AM". La date de maturité des végétations étudiées étant surtout déterminée par le photopériodisme des espèces qui les composent, la biomasse aérienne maximale a été observé le 15 septembre, indépendamment du régime hydrique des sols. Ceci confirme le caractère judicieux du choix de cette date pour les récoltes de biomasse aérienne et racinaire.

La chute de poids de la biomasse aérienne, liée principalement à la chute des semences, est plus rapide et plus spectaculaire dans l'espace "IN" qu'en amont des diguettes. En "AM" en effet, la végétation est demeurée verte plus longtemps après la floraison, en raison de la persistance des conditions d'humidité au cours de la dernière période de la saison pluvieuse.

La production et l'accumulation de nécromasse

Elle est illustrée par la figure 7.3-B. La production de nécromasse par les végétations sur pied évolue significativement à partir de la floraison. Entre le 15 juillet et le 30 août, période de croissance active des herbacées, la mortalité des organes végétatifs est limitée mais demeure fortement conditionnée par le régime pluviométrique: deux "trous pluviométriques" de 6 jours, enregistrés respectivement du 5 au 10 et du 11 au 16 août, ont provoqué entre le 30/7 et le 15/8 une production de nécromasse de 22% supérieure à celle observée la quinzaine suivante (15-30/8). Le 30 août apparaît comme la fin de la période de croissance et le début de la floraison de la majeure partie des espèces présentes. C'est aussi à partir de cette date que la production de nécromasse connaît un "essor" considérable; cette tendance se poursuit au-delà de la période de biomasse maximale (15/9) jusqu'au 30 septembre, date à laquelle s'illustre l'importante chute des semences (figure 7.4-A). A partir de ce moment, le processus de dessèchement général des plantes rend difficile la distinction d'une "production active de nécromasse".

Le phénomène reste cependant influencé quantitativement par la différence du régime hydrique: au cours de la période de croissance active (jusqu'au 30 Août) on observe en effet que, malgré une production de biomasse plus élevée en "IN", la nécromasse accumulée est plus importante en "AM"; il y a donc plus de mortalité d'organes végétatifs en amont des diguettes. Le phénomène est le plus remarquable entre le 30 juillet et le 30 août; cette période est la plus pluvieuse de la saison avec 302 mm (42% de la pluviométrie annuelle totale); soit en moyenne 10 mm chaque jour. Au cours de cette période on a observé, en amont des diguettes, d'importantes mortalités foliaires (1510 kg/ha de nécromasse contre 1000 kg/ha en "IN") apparemment dues à des pourrissements liés à l'excès d'eau.

La décomposition de la litière.

Le suivi de l'évolution de la litière totale, de la litière formée en cours de croissance (nécromasse accumulée) et de la litière résiduelle de la saison précédente a permis de constater que, pendant la saison des pluies, la litière totale diminue tandis que la biomasse augmente jusqu'au stade de biomasse aérienne maximale. La production de nécromasse liée à la mortalité des organes végétatifs, bien que croissante, demeure très inférieure au taux de décomposition de la litière résiduelle et de celle immédiatement accumulée (Figure 7.4-B). A partir du stade de la biomasse aérienne maximale, la mortalité foliaire devient plus importante que la décomposition de la litière dont la courbe d'évolution, avec la raréfaction des pluies, se présente pratiquement en plateau (Figure 7.4-C). Le bilan s'établit alors en faveur de la nécromasse totale qui s'accroît à nouveau pour atteindre les valeurs maximales en début de saison sèche (Figure 7.4-B).

Le bilan: la production primaire aérienne nette.

C'est la somme de la biomasse aérienne produite et de la nécromasse formée par mortalité d'organes végétatifs pendant le développement des plantes. Illustrée par la figure 7.4-A, la production primaire aérienne nette (PPN) est constamment supérieure à la seule biomasse aérienne, à partir du moment où apparaissent les mortalités foliaires par sénescence. Au stade de la biomasse maximale la PPN est en moyenne de 25 % supérieure à la biomasse sur pied (21% en "AM" et 29% en "IN"). On constate cependant que le stade de biomasse maximale (15 Septembre) n'est pas celui de la PPN maximale: celui-ci intervient quelques temps après, comme tend à le montrer la même figure. En effet, la somme de la biomasse sur pied et de la nécromasse disponible (non compris la litière résiduelle) atteint sa valeur maximale le 30 septembre, tant en amont qu'entre les diguettes.

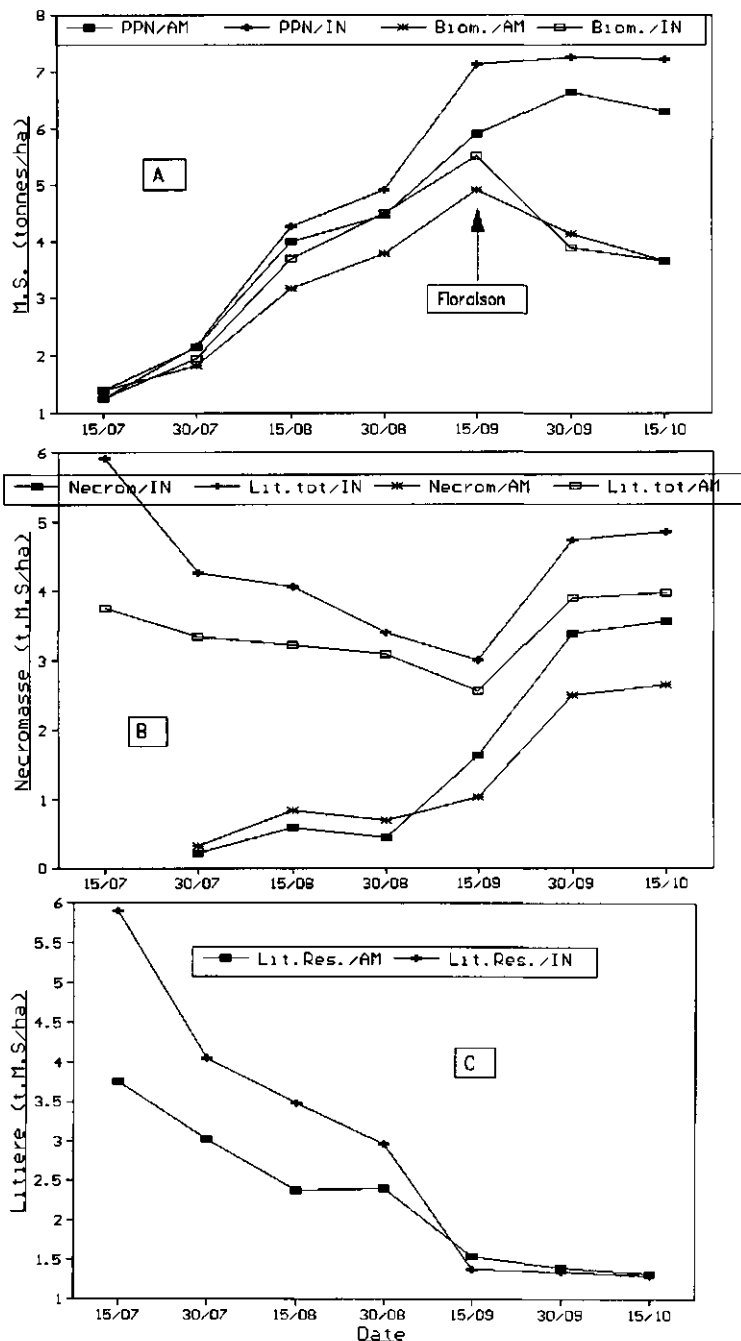


Figure 7.4 La production primaire aérienne nette (PPN) est plus élevée que la biomasse sur pied (A). Elle est la somme de cette biomasse et de la nécromasse accumulée au cours de la saison de croissance (B). Cette dernière contribue à l'accroissement de la litière totale dont la décomposition intervient surtout au cours de l'hivernage suivant (C). Aperçu de ces processus en amont et entre les diguettes pendant la saison des pluies 1993, f.c. de Yabo.

Ceci suggère qu'à cette date (30/9) les pertes de poids de la biomasse sur pied, liées à la chute des semences, ne soient pas encore assez importantes pour infléchir la valeur totale de la phytomasse dont une bonne partie est constituée par la nécromasse de la saison.

En prenant en compte une telle observation, la sous-estimation de la production primaire ne serait pas seulement due au principe de récolte au stade de biomasse maximale; elle proviendrait aussi, et en plus, du choix de cette date ("biomasse maximale") comme étant celle de la phytomasse maximale sur pied. Le cumul de ces deux sources de sous-estimation accroîtrait davantage l'écart entre l'estimation faite "à la biomasse maximale" et la production aérienne nette (PPN). Bien que le nombre limité des observations faites à Yabo donne à cette hypothèse une valeur tout aussi limitée, elle demeure un sujet d'investigation ultérieure à partir d'observations plus nombreuses, plus rapprochées dans le temps et certainement aussi dans des conditions plus diversifiées.

La biomasse aérienne maximale

La production de biomasse aérienne maximale des végétations herbacées, mesurée en 1991, 1992 et 1993 se présente ainsi qu'il suit (tableau 7.5). A travers ces chiffres, il apparaît nettement que le régime hydrique est l'un des premiers facteurs de différence dans le niveau atteint par la production primaire au cours des premières années. Cependant, au-delà du régime hydrique, c'est surtout le recouvrement initial de la végétation dans l'espace échantillonné qui détermine la différence de production. En amont des diguettes, le couvert végétal est homogène à l'installation, contrairement à l'espace "IN" où le recouvrement et la densité de la végétation sont fonction de l'intensité des dispositifs de C.E.S.. En conséquence la production moyenne, estimée en termes de biomasse (kg de M.S./ha) à l'échelle de la parcelle, est affectée par l'existence de plages nues ou à faible densité de végétation (Paragraphe 7.2). Cette hétérogénéité du couvert végétal est illustrée par le coefficient de variation (**cv**) de l'échantillon ou encore par la précision de l'estimation de la production (Levang, 1978, Grouzis, 1979): la précision (**p**) est liée au "cv" par la relation $p = (t/\sqrt{n}) \times cv$, où **n** est le nombre de placettes de l'échantillon et **t** la valeur du "t" de Student au niveau de probabilité choisi (ici, 0,975).

A Yabo on observe en effet, tant en "AM" qu'en "IN", que l'homogénéité des formations herbacées s'accroît avec l'âge de l'aménagement. Avec un échantillon de taille identique (40 placettes), la précision de l'estimation de la production est globalement meilleure dans la parcelle 82/AM à celles des parcelles aménagées en 1990. De même dans les espaces "IN", la production a augmenté constamment entre 1991 et 1993 dans les parcelles nouvellement aménagées ("90" et "90P"), en même temps que la précision dans l'estimation s'est améliorée. Cette observation est conforme à l'évolution globale du couvert végétal dans ces espaces (cf. Tableau 7.2). Le couvert végétal plus important dans le traitement "90P/IN" est traduit par une production aussi importante.

Un troisième facteur explique les variations observées au sein des traitements et entre eux: l'hétérogénéité floristique des formations étudiées. La diversité des espèces, les différences dans leur répartition spatiale (selon le régime hydrique en particulier) et surtout les différences dans la contribution de chacune à la phytomasse totale sont autant de facteurs de variation des valeurs obtenues.

Traitement	1991				1992				1993				
	Echant (n)	Pn Réel. (kg/ha)	C.V (%)	préc (%)	Echant (n)	Pn Réel. (kg/ha)	C.V (%)	préc (%)	Pn Potent (kg/ha)	Echant (n)	Pn Réel. (kg/ha)	C.V (%)	préc. (%)
YABO													
90/AM	40	7730	76	24	30	6500	72	27		35	6850**	51	18
90P/AM	45	5520	65	20	30	5900	55	20		35	6570**	60	21
82/AM	40	5650	33	11	30	5250	42	16		35	3600*	56	19
Moyenne AM		6300				5900			12800		5670		
90/IN	40	920	222	71	40	1300	194	62		40	1540	199	63
90P/IN	40	1500	152	49	40	3200	148	47		40	3900	99	32
82/IN	40	1050	150	48	40	2400	130	42		40	1600*	144	46
Moyenne IN		1160				2300			12500				
TFN	40	4900	38	12									
BISSIGA													
B-S	40	5800		11	30	3700		17					
B-H/MA	40	5400		16	30	4200		14					
B-B/AM	40	5400		17	30	4800		14					
Moyenne AM		5530											
B-H/IN	62	840		40	40	720		50					
B-B/IN	56	2050		32	40	1250		41					
Moyenne IN		1450											
TFN	40	3400		15	30	2900		14					

Tableau 7.5 La production de biomasse aérienne herbacée au "standing crop" maximal dans les différentes parcelles et traitements des stations de Yabo et Bissiga, entre 1991 et 1993. Les mesures faites en 1993 ont souffert de certaines erreurs d'échantillonnage qui ont entraîné une sous-estimation (*) ou une surestimation (**) de la production.

Ce cas de figure est le mieux illustré par le traitement 90/AM dans lequel *Pennisetum pedicellatum* à forte contribution spécifique massique (CSiM) domine la végétation avec *Schoenefeldia gracilis* dont la CSiM est plutôt faible. La même observation pourrait être valable pour le traitement 90P/AM où c'est *Pennisetum pedicellatum* qui a contribué le plus à la production totale au cours des deux premières années.

Enfin, certaines insuffisances, liées à l'échantillonnage même, ont pu aussi influencer les estimations de la production et le niveau de précision des résultats. Elles proviennent essentiellement de la répartition de l'échantillon dans la formation étudiée: malgré une disposition systématique des placettes de récolte il peut arriver que le résultat final ne soit pas représentatif de la physionomie ou de la structure des végétations étudiées. En raison de la taille limitée de l'échantillon, les valeurs estimées sont alors assez différentes de la production réelle de l'espace considéré, pendant que la précision de l'estimation se détériore. Ce type d'insuffisance est illustré par l'estimation de la production en 1993, particulièrement pour les traitements 82/AM, 82/IN et 90P/AM. En effet, malgré un échantillon égal ou légèrement plus grand, la précision de l'estimation de la production de la parcelle "82" est moins bonne en 1993 qu'en 1992; pendant ce temps, les valeurs estimées de la production sont visiblement très basses (pour 82/AM et 82/IN) ou hautes (pour 90P/AM) par rapport aux caractéristiques de la végétation au "standing crop" maximal (Tableau 7.5). Pour le traitement 90P/AM, l'emplacement de certaines placettes de récolte, en aval des ouvrages où la végétation est plus importante en lieu et place de l'amont, a contribué à surestimer la production de 1993 en "AM" et à altérer la précision de l'estimation.

Enfin, il faut retenir que, dans une approche quantitative des processus de la régénération, la biomasse aérienne maximale est une valeur sous-estimée de la production primaire aérienne réelle. Celle-ci est représentée par les quantités de phytomasse effectivement impliquées dans le cycle sol-plante, tandis que la biomasse maximale donne une idée de la phytomasse disponible pour les besoins d'une exploitation éventuelle.

La biomasse aérienne potentielle

La fertilisation au NPK a permis d'obtenir les valeurs de la production potentielle de biomasse mesurable au stade de la biomasse maximale: 12800 kg M.S./ha en amont des diguettes et 12500 kg M.S./ha entre les diguettes. Ces valeurs sont la moyenne de six (6) placettes réparties dans les parcelles "90P" et "82" qui offraient les conditions pour l'essai de fertilisation (voir paragraphe 7.2.3). Comme on peut le constater, la production potentielle ainsi estimée est environ le double de la production réelle. Si en amont des diguettes les conditions d'alimentation en eau des plantes peuvent être considérées comme non limitatives pendant la saison de croissance, la différence observée avec le traitement "IN" n'est pas significative (<3%). La pluviométrie de l'année 1992, tout comme pour les deux autres années de mesure, est celle d'une année considérée comme humide en regard de la moyenne des trois dernières décennies pour la région. Une analyse plus détaillée de ces essais de fertilisation est faite au chapitre 8.

La biomasse racinaire

Le tableau 7.6 présente les résultats moyens obtenus dans les 5 placettes échantillonnées par traitement. Plus de 85% de la biomasse racinaire est concentrée dans les 30 premiers cm, quelles que soient la structure et la composition de la végétation. Seules les espèces pérennes tel *Andropogon gyanus* développent significativement (par rapport à la méthode

d'estimation) leur système racinaire au-delà de 70 cm. La biomasse racinaire totale varie considérablement selon la structure et la composition de la végétation: *Pennisetum pedicellatum* présente le système racinaire le plus dense et les racines parmi les plus fines, dont 95% sont concentrées dans la couche superficielle (0-30 cm). La figure 7.4 montre la distribution de la biomasse racinaire en fonction de la profondeur pour des formations denses, non fertilisées et dominées par trois espèces: *Andropogon gayanus*, *A. pseudapricus* et *Pennisetum pedicellatum*. Le nombre de placettes sondées ne permet pas d'établir de relation formelle entre biomasse racinaire, régime hydrique et fertilisation. La figure 7.4 montre en effet que la répartition de la biomasse racinaire moyenne (A) et celle de trois formations dominées par *Pennisetum pedicellatum* (C), obtenues dans des conditions d'alimentation en eau et de fertilisation différentes, ne correspondent à aucune logique du traitement. En réalité, il semble bien que la fertilisation n'influence de façon significative ni la quantité de biomasse racinaire ni sa répartition en profondeur (Penning de Vries & Djitéye, 1982 p.173-178).

A la décharge des résultats ci-dessus, il faut rappeler la méthode d'estimation qui n'a pas permis de réaliser des mesures précises au-delà de 60 cm. L'importance relative de la biomasse racinaire dans les 30 premiers cm du sol explique néanmoins la sensibilité au stress hydrique observée au cours de la deuxième moitié d'août 1992 chez les espèces comme *Pennisetum pedicellatum* ou *Loudetia togoensis*, même en amont des diguettes (voir Paragraphe 6.3.1).

Enfin, la trop grande variabilité et le nombre réduit de nos observations ne permettent pas d'établir un rapport constant entre biomasse racinaire et biomasse aérienne. On relèvera cependant que, en raison du fait que la biomasse racinaire moyenne demeure au même niveau (environ 2700 kg M.S/ha) avec ou sans fertilisation alors que la fertilisation stimule en revanche la production aérienne, ce rapport est plus faible pour les parcelles fertilisées au NPK: la biomasse racinaire représente en moyenne 18% de la biomasse totale, contre 37% en conditions de production réelle (moyennes basées sur 4 observations avec fertilisation et 6 sans fertilisation).

Pour les raisons déjà évoquées, il est difficile d'établir des comparaisons systématiques avec d'autres résultats obtenus dans des conditions expérimentales différentes. Cependant, ceux observés à Yabo ne contredisent pas les valeurs généralement admises pour les végétations des zones semi-arides: ils se situent entre les valeurs rapportées pour des formations sahéliennes par Bille, 1977, Penning de Vries et Djitéye, 1982, Grouzis, 1988 (1000 à 3000 kg/ha), et celles observées dans des savanes humides de Côte d'Ivoire: 5000 à 11000 kg/ha (Fournier & Lamotte, 1983, Mitja, 1992,).

T R A I T E M E N T S										
Horizon (cm)	NPK AM1	NPK AM2	NPK IN1	NPK IN2	Temoin AM1	Temoin AM2	Temoin AM3	Temoin IN1	Temoin IN2	Temoin IN3
00-10	1292	1156	624	5220	650	2603	3841	676	351	2030
10-20	547	244	32	567	119	965	674	93	72	1094
20-30	230	200	14	241	47	570	268	31	24	798
30-40	113	85	7	148	36	229	105	23	9	126
40-50	93	59	-	116	29	159	76	11	5	92
50-60	56	49	-	27	-	88	40	8	-	38
60-70	48	-	-	-	-	33	-	-	-	18
70-80	20	-	-	-	-	21	-	-	-	-
Total	2400	1793	677	6319	881	4667	5004	842	461	4195
0-30 cm	2070	1600	670	6028	815	4138	4783	800	447	3922
% total	86	89	99	95	93	89	96	95	97	94
Type de végétation	Androp. gonyonius dense	Pennis. ped. + Androp. pseudap dense	Loudei tog. + Androp. pseud. dense	Pennis. pedicel Androp. pseudap dense	Androp. pseudap dense	Androp. gonyonius dense	Pennis. pedicel + Schoef gracil. moy. dense	Androp. pseudap peu dense	Androp. pseudap épars	Androp. pseudap dense

Tableau 7.6 Répartition de la biomasse racinaire par couches de sol en amont (AM) et entre les diguettes isohypses (IN) pour des végétations herbacées à la floraison, fertilisées ou non au NPK (400 kg/ha de N + 100 kg/ha de P₂O₅ + 100 kg/ha de K₂O). Les espèces dominantes et la structure horizontale de la végétation sont les principaux critères de choix des placettes de mesure pour un régime hydrique donné. La biomasse totale pour l'horizon échantillonné ainsi que la biomasse contenue dans les 30 premiers cm du sol et son rapport (%) avec le total sont indiqués. Forêt classé de Yabo, 1992.

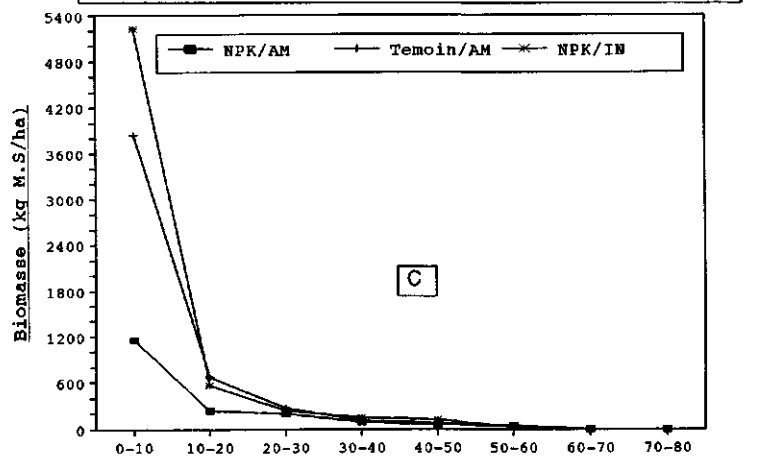
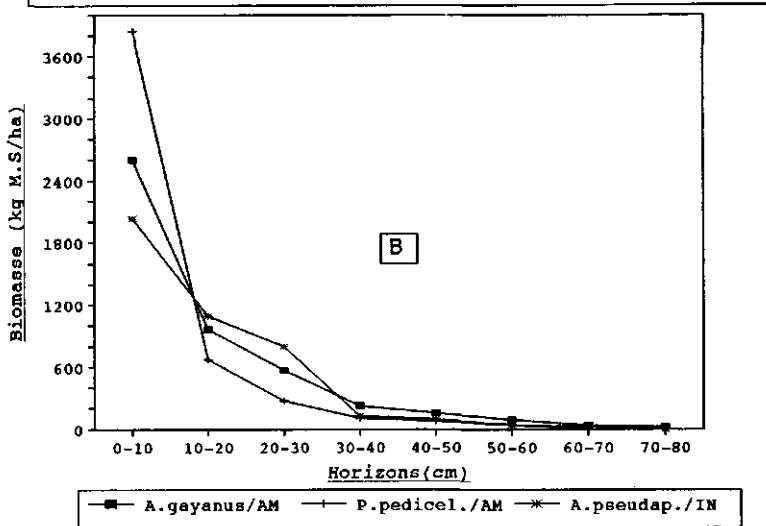
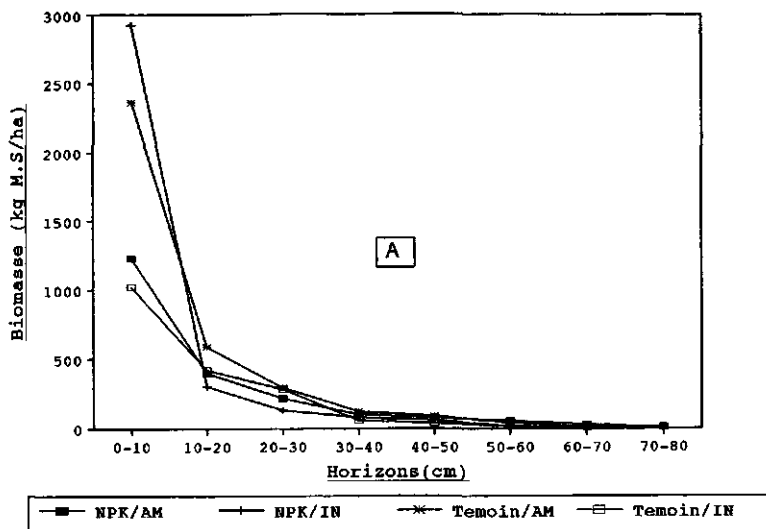


Figure 7.5 Répartition selon la profondeur de la biomasse racinaire moyenne herbacée par traitement (A), de celle de trois formations non fertilisées sous deux régimes hydriques différents (B) et de formations à *Pennisetum pedicellatum* sous trois traitements différents (C). Forêt classée de Yabo, 1992.

7.4 Paramètres et méthodes d'étude dans la végétation ligneuse

Dans l'analyse des conditions d'efficacité des mesures de C.E.S. en milieu sylvo-pastoral, la végétation ligneuse est apparue comme un élément essentiel de l'évolution du processus de régénération des sols dégradés (cf. Chapitre 4). A ce titre, son développement a souvent été stimulé, au besoin par une régénération "assistée", en vue d'accélérer le processus global. C'est dans cette optique que l'étude de la végétation ligneuse a porté sur des paramètres quantitatifs et qualitatifs de la régénération spontanée des espèces. Ainsi, les paramètres ci-après ont été mesurés ou quantifiés.

7.4.1 Germination et installation

Ce travail se situe dans un contexte où aucune mesure particulière n'est prise pour stimuler le développement des végétations ligneuses dans les parcelles aménagées ("90" et "90P" à Yabo). Si les aménagements de C.E.S. offrent les conditions d'installation et de développement spontanés d'un certain nombre d'espèces ligneuses, l'importance du phénomène reste cependant liée à plusieurs facteurs dont l'eau, la disponibilité et le pouvoir germinatif des semences. A travers le suivi des processus de germination et de croissance initiale de quelques espèces remarquables de la strate ligneuse spontanée, il s'agit d'établir les rapports avec la nature, l'intensité des aménagements de C.E.S. et l'environnement biologique des parcelles aménagées. Nous avons procédé au suivi de la germination et de l'installation de *Acacia seyal* et *Acacia senegal* pendant la première année du processus de régénération, par des observations relatives

- aux périodes et aux conditions de germination,
- à l'évolution du taux de survie des jeunes plantules dans six "carrés de densité" de dimensions variant de 625 à 2450 cm², entre la période des "grandes pluies" 1991 et le début de l'hivernage 1992.

Ces observations systématiques ont été accompagnées de quelques sondages sur la profondeur d'enracinement des plantules de *Acacia seyal* à la fin de l'hivernage 1991.

7.4.2 Structure, composition et croissance

Ces paramètres ont été mesurés en pleine saison sèche 1992/93 (février 1993), dans les parcelles aménagées en 1990 ("90" et "90P"), à l'aide des méthodes "**line-point intercept**" (LPI) et "**point centered quarter**" (PCQ) (Gounot, 1969, Bonham, 1988). La méthode PCQ pour la mesure de la densité a consisté à quadriller chaque parcelle de lignes de transect parallèles entre elles et à la ligne de plus grande pente. Ces lignes recoupant systématiquement les diguettes isohypses, les points d'observation sont disposés sur ces lignes, d'une part à chaque intersection avec une diguette (traitement AM), d'autre part à mi-chemin entre deux diguettes successives (traitement IN). Ainsi 28 points et 34 points ont été échantillonnés respectivement dans les parcelles "90P" et "90". La méthode LPI pour l'inventaire floristique s'est appuyée sur les lignes de transect du PCQ. Les relevés ont été

effectués cette fois tous les trois (3) pas, donnant ainsi respectivement 250 et 331 points échantillonnés pour les parcelles ci-dessus.

La biomasse foliaire des ligneux est une composante importante du bilan de biomasse totale et du bilan des éléments nutritifs. L'importance de la régénération ligneuse constatée sur les parcelles aménagées de Yabo, au-delà des observations qualitatives, a été quantifiée en vue de mieux apprécier la contribution de cette composante au stade actuel de la régénération. Dans ce sens, des mesures ont été faites en février 1993 sur un échantillon de 105 arbustes de *Acacia seyal* (60% de la strate ligneuse). Cet échantillon est composé respectivement à 33% d'individus de 1 saison pluvieuse, 51% d'arbustes de 2 saisons pluvieuses et 16% d'individus de 3 saisons.

Les mesures ont porté sur le diamètre à la base (15 à 20 cm du collet) et la hauteur totale. A partir de ces résultats, nous avons recherché les relations liant ces paramètres de croissance de l'espèce d'une part, puis celles qui lient ces paramètres et la production de biomasse d'autre part (de Wit, 1993). Sur la base des données de densité des arbustes mesurées à la même période, on a extrapolé les valeurs obtenues pour estimer la biomasse foliaire produite au cours de la saison de croissance 1992.

7.5 Dynamique de la végétation ligneuse

7.5.1 Germination et installation des ligneux

Un des constats les plus remarquables, fait lors du suivi de la germination des végétations herbacées, est la germination quasi ininterrompue des semences de *Acacia seyal*. Cette observation illustre l'importance particulière de la régénération des ligneux constatée dans les parcelles nouvellement aménagées à Yabo. Ce phénomène, qui s'est singularisé dès la première saison des pluies suivant l'aménagement, justifie l'attention accordée au suivi de la régénération naturelle des ligneux en général et de *Acacia seyal* en particulier. Les "carrés de densité" ont été mis en place dès juillet 1991, à partir des résultats d'un recensement de tous les points de concentration de jeunes plantules de *Acacia seyal* et de *Acacia senegal*, les deux espèces les plus remarquables du moment. Ce recensement a aussi permis de décrire l'environnement dans lequel cette régénération s'effectue; c'est ainsi qu'on peut noter que:

- la présence dans les parcelles aménagées de quelques individus adultes des deux espèces d'*Acacia*, ayant abondamment fructifié, est à la base de la disponibilité des semences.
- Les points de concentration privilégiés de plantules de *Acacia seyal* sont les fossés en amont des diguettes, le talus des diguettes orienté vers l'amont ainsi que toute dépression située dans l'espace "IN" et capable de concentrer l'eau de ruissellement et les semences.
- En ce qui concerne *Acacia senegal*, les germinations ont été observées, par ordre d'importance décroissante, sur les talus aval des diguettes, les talus amont et très rarement dans les fossés en amont et les espaces inter-diguettes.

La germination et l'installation de *Acacia spp.*

En 1991 les premières plantules ont été observées au cours de la 3ème décade de mai, environ 10 jours après la première grande pluie de la saison. La germination s'est poursuivie de façon quasi continue jusqu'en septembre, se déplaçant des fossés en amont des diguettes vers les micro-dépressions situées entre les ouvrages au fur et à mesure de l'accroissement de l'humidité du sol dans l'espace inter-diguettes. Elle a même repris, pour *Acacia seyal*, dans les fossés "AM" après la des-saturation en fin de saison pluvieuse ou après la récolte de la biomasse herbacée. Ceci indique que la germination et l'installation de ces espèces se trouvent naturellement favorisées par les conditions d'humidité prolongée. Cependant, l'excès d'eau et l'insuffisance de lumière finissent par l'inhiber. En particulier, les semences d'*Acacia senegal*, contrairement à *Acacia seyal*, ne semblent pas supporter les inondations, même temporaires. Au cours du second hivernage (1992), la germination de *Acacia spp.* est intervenue dans les 4 jours qui ont suivi la première grande pluie, et s'est poursuivie de façon continue pendant toute la durée d'observation de 1 mois. Une telle rapidité de germination n'est observable en pépinière qu'après prétraitement des semences, en particulier après trempage dans l'acide sulfurique 5 minutes, suivi de trempage dans l'eau 24 heures (Belem, 1993). Le tableau 7.7 présente les résultats du comptage des plantules issues de graines dans les "carrés de densité" ainsi que l'évolution du nombre de plantules vivantes au cours de leur première année d'existence. On constate que la germination est extraordinairement abondante par endroits. Elle est liée à l'accumulation considérable de semences dans les micro-dépressions et en amont des diguettes: 1500 à 2700 plantules/m² en pleine saison des pluies. Une bonne partie des semences accumulées en amont est rejetée par l'eau sur le talus des diguettes où la densité de semis atteint, dans le cas suivi, 400 plantules/m².

N ^o Carré	Superf.(m ²)	3/8/91	2/10/91	16/12/91	18/6/92	TS (%)
AM 2	625	1552	1424	448	64	4,1
AM 4	625	1680	1504	656	48	3,0
AM 5	625	2752	2480	1824	336	12,2
AM 6	625	2592	2528	2122	864	33,3
Moy AM						13,2
Talus 7	2450	412	412	294	00	0,0
IN 4	1000	1710	1530	860	00	0,0

Tableau 7.7 Densité des plantules de *Acacia seyal* (en nombre de plantules par m²) et son évolution au cours de la période 8/91-6/92, le taux de survie observé au bout d'un an (TS en %), selon la position du point d'observation par rapport aux diguettes isohypses: amont (AM) ou inter-diguettes (IN), Talus (corps) de diguettes. Le taux de survie observé aux points "IN 4" et "Talus 7" ne sont cependant valables que pour ces seuls points.

Avec de telles densités, l'évolution du nombre de plantules vivantes se traduit naturellement par des pertes aussi énormes au cours de la saison sèche qui suit, pour ne conserver, au début de l'hivernage suivant, que 3 à 30% des effectifs germés en amont des diguettes. Entre les diguettes le taux de survie est encore plus faible et le plus souvent nul. C'est sur ces effectifs restants que la sélection s'opèrera encore au cours de la croissance.

Survie des plantules et profondeur d'enracinement

En rapport avec le taux de survie, un sondage a été effectué, durant l'hivernage 1991 et en début de saison sèche 1991/92, sur la profondeur d'enracinement des plantules de *Acacia seyal* dans quelques positions variables par rapport aux ouvrages anti-érosifs. On a pu ainsi noter début août que des plantules hautes de 10 cm (2 mois après germination) et situées en amont des diguettes avaient une racine principale atteignant 70 cm au moins; d'autres individus du même âge, installés sur le talus de diguette, étaient en moyenne plus grands (30 cm) avec une racine principale pouvant dépasser 80 cm.

En début de saison sèche, (octobre), les deux catégories de plantules ci-dessus présentaient en moyenne respectivement 85 cm de racine pour 10 cm de hauteur et 110 cm pour 40 à 55 cm de hauteur. Ces valeurs, qui sont le résultat de 3 à 5 sondages par situation (AM ou Talus) plus ou moins réussis, sont certainement inférieures aux profondeurs d'enracinement maximales observables; ceci en raison de ruptures de la racine intervenues presque toujours au cours du sondage. Dans l'espace inter-diguette, les dimensions maximales observées sur trois sondages étaient de 50 cm de profondeur racinaire pour 21 cm de partie épigée. Ceci indique que c'est la profondeur d'enracinement atteinte à la fin de la saison des pluies qui détermine la survie des plantules de *Acacia seyal*: les plantules situées en amont, malgré une croissance épigée limitée par l'excès d'eau, développent mieux leur système racinaire par rapport aux sujets situés dans les espaces "IN". Les premiers sont favorisés en cela par la profondeur totale de sol mouillé: plus de 1,55 m dès le début de la saison.

Le niveau des réserves hydriques totales enregistré au cours de la saison sèche, en amont et en aval des diguettes dans les parcelles nouvellement aménagées (paragraphe 6.4.3), justifie les taux de survie observés chez les espèces ligneuses en général et chez *Acacia spp.* en particulier. En d'autres termes, la sécheresse est, dans ce cas, le premier facteur de mortalité des plantules au cours de la saison sèche.

7.5.2 Structure, composition et croissance des végétations ligneuses

Structure des végétations et espèces en présence

Deux ans après le démarrage du processus de régénération, des mesures ont été effectuées dans les deux parcelles nouvellement aménagées. Elles portaient sur la densité de la végétation ligneuse totale, le diamètre à la base et la hauteur de *Acacia seyal*. Les résultats de ces mesures sont discutés ci-après.

Les densités moyennes observées en février 1993 dans les différentes parcelles et traitements sont reportées au Tableau 7.8. L'effet du paillage sur la densité de la strate ligneuse est ici aussi évident: 955 arbustes/ha contre 235 pour l'espace sans paille. Tout comme pour les végétations herbacées, le paillage a créé les conditions favorables à

l'installation des ligneux; logiquement plus importante en amont des diguettes, la régénération y est aussi plus homogène. En comparant cependant la position "AM" des deux parcelles (90 et 90P), on constate que la strate ligneuse, au-delà de la différence de densité, est aussi plus homogène dans la parcelle paillée (90P): précision nettement meilleure pour un échantillon à peu près égal. Ce qui, à priori, n'était pas évident au regard de la similitude des conditions d'installation des ligneux en ces endroits.

Traitement	Nombre de points (PCQ)	Densité (Nbre arbustes/ha)	Précision de l'estimation (%)
90P/AM	19	2947	34
90P/IN	9	955	56
Moyenne "90P"	28	1154	39
90/AM	17	1425	41
90/IN	17	235	42
Moyenne "90"	34	384	42

Tableau 7.8 Densité de la régénération ligneuse et intensité des aménagements de C.E.S. Forêt classée de Yabo, février 1993.

L'effet positif du paillage sur la régénération de la végétation ne se limiterait donc pas au seul espace inter-diguettes. Dans tous les cas, l'échantillon utilisé dans la méthode PCQ (19 points au plus) ne semble pas assez grand pour permettre une estimation assez précise de la densité de la strate ligneuse, dans sa structure atteinte 2 ou 3 ans après les aménagements de régénération.

En utilisant la méthode LPI décrite au paragraphe 7.4.2, nous avons obtenu les résultats suivants pour la période de février 1993. Le tableau 7.9 reprend les données relatives à la taille de l'échantillon (nombre de points), le nombre d'espèces recensées, les quatre espèces dominantes dans chaque parcelle ainsi que la contribution spécifique (Csi) de chacune à l'amont des diguettes (AM), dans l'espace inter-diguettes (IN) et dans la parcelle prise dans son ensemble (Moyenne). Ce tableau indique que :

- deux ans après le début des processus de régénération, huit espèces ligneuses ont fait leur apparition dans les parcelles aménagées, indépendamment de quelques trois autres issues d'infructueuses tentatives de reboisement antérieures.
- A des densités moyennes de 400 à 1200 arbustes/ha selon l'intensité des mesures de régénération mises en oeuvre, la strate ligneuse est dominée par quatre espèces qui représentent près de 90% du peuplement.
- *Acacia seyal* à lui seul contribue pour 50 à 60% de la strate ligneuse, avec une concentration particulière en amont des ouvrages où sa contribution spécifique atteint 72%. L'abondante régénération de cette espèce a été favorisée par la présence de semenciers adultes et par une adaptation particulière au régime hydrique créé par les ouvrages d'absorption du ruissellement.

Traitement	Nb Pts (LPI)	Nbre Espèces	Espèces dominantes	Csi Moy	Csi AM	Csi IN
"90"	331	9*	<i>Acacia seyal</i>	58,5	72,0	20,0
			<i>Acacia senegal</i>	13,8	8,7	20,0
			<i>Piliostigma reticulata</i>	12,3	11,0	12,0
			<i>Balanites aegyptica</i>	4,6	4,3	4,0
"90P"	250	11**	<i>Acacia seyal</i>	49,0	54,2	39,3
			<i>Piliostigma reticulata</i>	17,1	12,5	25,0
			<i>Balanites aegyptiaca</i>	12,0	8,3	18,0
			<i>Acacia senegal</i>	6,6	6,3	7,1

* : dont une issue de plantation antérieure à 1990 mais peu représentée

** : dont trois issues de plantation antérieure à 1990, peu représentées

Tableau 7.9 Les espèces ligneuses dominantes et leur importance dans les aménagements de deux à trois ans. Forêt classée de Yabo, février 1993.

Croissance et production de biomasse foliaire

Les mesures faites sur le peuplement d'*Acacia seyal* âgé de 1 à 3 ans ont permis d'établir une relation linéaire entre le diamètre à la base (D) et la hauteur totale (H) des arbustes. En effet, les relations suivantes ont été obtenues par régression linéaire respectivement sur un échantillon de 105 sujets (représentant l'ensemble du peuplement), 70 sujets représentant le peuplement des 2 et 3 ans et 16 sujets représentant le peuplement des 3 ans (Figure 7.5) :

- Ensemble peuplement: $H (m) = 0,70 \times D(cm) \quad r = 0,86$
- Peuplement 2 et 3 ans: $H (m) = 0,68 \times D(cm) \quad r = 0,86$
- Peuplement des 3 ans: $H (m) = 0,67 \times D(cm) \quad r = 0,92$

En observant les nuages de points de la figure 7.5-A, on constate que c'est les jeunes sujets de l'échantillon qui contribuent à "déprécier" la qualité de la relation $H = f(D)$: le nuage des points représentant cette fraction du peuplement est entièrement situé au-dessus de la droite de régression; le rapport $H(m)/D(cm)$ est donc $\geq 0,7$. L'explication tient au fait que la mesure de D a été effectuée à hauteur constante à partir du collet (20 cm environ), quel que soit l'âge des individus de l'échantillon. Des mesures plus proches du collet sur la classe des sujets jeunes, plus conforme au rapport H/D des sujets plus âgés, auraient en effet contribué à déplacer le nuage de points plus à droite, c'est-à-dire rapprocher ce rapport de 0,7. La relative imprécision de l'équation ($r = 0,86$) serait donc liée à cette insuffisance. Ceci confirme néanmoins la validité pour le peuplement de 1 à 3 ans, d'un rapport constant (voisin de 0,7) entre la hauteur totale (en m) et le diamètre "à la base" (en cm); la "base" étant définie ici par une distance au collet qui globalement croît avec la hauteur totale de chaque arbuste.

Dans le même ordre d'idées, de Wit (1993) a établi dans la même station de Yabo, sur des sujets de 1 à 3 saisons des pluies, une relation linéaire entre le diamètre à 20 cm du sol (D) et le poids de la biomasse (totale, et foliaire) en fin d'hivernage 1992. Pour la biomasse foliaire (B), la relation est: $B (\text{grammes}) = 77,6 \times D(cm) - 65,6$; $r = 0,95$

En appliquant cette relation à nos données de février 1993, nous avons calculé la biomasse foliaire en fin d'hivernage 1992 sur la base des hypothèses suivantes:

- les calculs effectués sur *Acacia seyal* sont extrapolables, sans erreur excessive, à l'ensemble de la strate ligneuse, en raison de l'importance de cette espèce dans le peuplement tout entier.
- La surestimation de biomasse, liée à l'accroissement éventuel en diamètre des arbustes entre octobre 1992 et février 1993, est compensée par une sous-estimation de la biomasse liée à la baisse de densité (par mortalité des individus les plus jeunes ou les moins vigoureux) entre la fin de l'hivernage 1992 et février 1993.

Les valeurs définitives de biomasse foliaire produite pendant la saison sont obtenues en appliquant un facteur correctif de 1,33 basé sur le fait que la biomasse foliaire des ligneux en fin d'hivernage ne représente que 75 à 80% de la production annuelle (Breman et de Ridder, 1991). Les résultats se présentent ainsi qu'il suit (Tableau 7.10).

TRAITEMENT	DENSITE DES LIGNEUX (Nb/ha)	BIOMASSE FOLIAIRE (kg M.S./ha)
90/AM	1425	227,0
90/IN	235	37,5
Parcelle "90"	384	62
90P/AM	2947	470,0
90P/IN	955	152,0
Parcelle "90P"	1154	184

Tableau 7.10 Biomasse foliaire totale de la strate ligneuse (de 2 ans) au cours de la saison des pluies 1992. La moyenne de la parcelle est pondérée de la superficie relative de chaque espace (AM et IN) dans ladite parcelle.

Contrairement à la strate herbacée, le régime hydrique en amont des diguettes semble favoriser une évolution croissante de la végétation ligneuse et de sa production. Ceci pourrait contribuer rapidement à compenser l'effet dépressif susceptible de se développer en ces points sur les végétations herbacées. Le développement de la strate ligneuse dans l'espace inter-diguettes interviendrait alors comme un moyen supplémentaire de régulation de l'utilisation de l'eau (et des éléments nutritifs) par les végétations, particulièrement en normale ou humide.

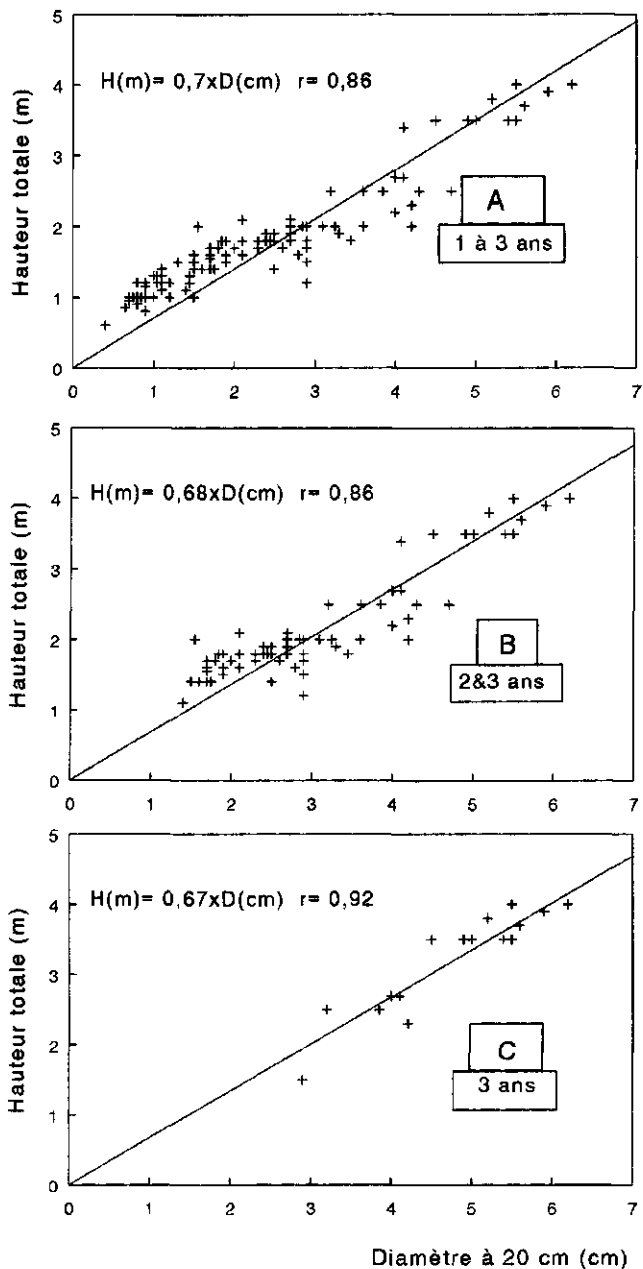


Figure 7.6 Relation entre la Hauteur totale et le Diamètre à la base d'un peuplement d'*Acacia seyal* réparti en trois groupes selon l'âge des sujets: groupe des sujets de 1 à 3 ans; groupe des 2 et 3 ans et groupe des 3 ans. Forêt classée de Yabo, février 1993.

7.6 Conclusions

Dans les précédents chapitres il est apparu que la concentration des eaux de ruissellement par les mesures de C.E.S. déclenche les processus de remontée biologique dans les terrains dégradés. On a aussi relevé que l'absorption de la quasi-totalité du ruissellement par les ouvrages isohypses pouvait entraîner une accumulation d'eau largement supérieure aux besoins des végétations herbacées. L'étude de la dynamique des végétations, telle qu'elle est influencée par ces mesures de C.E.S., montre que:

Sur le plan de la structure et de l'évolution du couvert végétal, l'installation de la végétation est conditionnée à la fois par le régime hydrique et les états de surface du sol: l'accumulation de l'eau en amont des ouvrages isohypses crée des conditions d'humidité qui favorisent l'installation d'une plus grande diversité d'espèces. La naissance et l'évolution spatiale du couvert végétal dans les espaces inter-ouvrages sont, quant à elles, dépendantes de mesures physiques ou biologiques prises en vue d'y accroître l'infiltration. Sans ces mesures, ces espaces pourraient atteindre rapidement, sous protection totale, un stade de stagnation caractérisé par un recouvrement irrégulier du sol (autour de 50%) et des "équilibres" biologiques instables.

Dans le temps, ces végétations sont soumises à d'importants remaniements floristiques pendant les dix premières années au cours desquelles les espèces pionnières sont progressivement étouffées puis remplacées par des pérennes ou des annuelles caractéristiques des milieux de savane non dégradés ou peu perturbés. L'apparition et la répartition spatiale des espèces sont liées aux variations du régime hydrique du sol engendrées par les mesures de C.E.S. et surtout à la durée de la période de restauration de ces sols dénudés. Dans ce processus, la dynamique d'une espèce comme *Andropogon gayanus* semble surtout liée au temps: elle n'a fait son apparition, en amont des diguettes, qu'à partir de la 3ème année suivant l'aménagement. Elle s'installe cependant aussi abondamment partout où apparaissent, localement, des conditions d'humidité durables (parcelle 82/IN). Ceci explique que dans l'analyse factorielle des correspondances, l'espèce ne s'identifie pas particulièrement au critère du régime hydrique représenté par la position par rapport aux diguettes (AM et IN), mais à l'âge des aménagements.

Au cours de ces années, l'installation d'une importante strate ligneuse peut être favorisée par les conditions biologiques environnantes et, en particulier, par la présence d'individus adultes d'espèces à forte capacité de diffusion. Le développement de cette strate ligneuse, tout en accélérant la régénération globale des espaces aménagés, peut contribuer rapidement à une meilleure utilisation de l'eau et probablement aussi des éléments nutritifs. Dans ces conditions, la régénération assistée d'une composante ligneuse apparaît comme une mesure utile à prendre lorsque l'environnement biologique ne favorise pas son développement spontané. Sur des sols argileux relativement profonds, tels ceux des stations de Yabo ou Bissiga, *Acacia seyal* est apparu à cette fin comme l'espèce pionnière par excellence.

Du point de vue de la production, le niveau élevé de la production de la strate herbacée au cours des premières saisons des pluies traduit le potentiel des sols dénudés et confirme le caractère essentiellement physique, et particulièrement hydrodynamique, de la dégradation qui les affecte. La biomasse aérienne estimée au stade de la biomasse maximale est de 5000

à 7000 kg M.S./ha en amont des diguettes, tandis que la production potentielle atteint 12500 kg M.S./ha. Ce stade de la biomasse aérienne maximale est atteint le 15 septembre, suivi par une période de chute des semences dont la durée est plus ou moins prolongée selon le régime hydrique du sol. Cependant, la production herbacée peut être négativement influencée, en amont des diguettes, par un régime hydrique constamment excédentaire. En conditions pluviométriques supérieures à la moyenne régionale, comme ce fut le cas pendant la durée de ces études, les ouvrages d'absorption en terre ont montré, après la première année, un effet dépressif sur la production de la strate herbacée et entraîné des pourrissements au cours de la croissance.

Dès le départ donc, la biomasse produite en amont des diguettes est suffisante, si elle est maintenue en place, pour permettre la poursuite des processus biologiques de la régénération. En revanche dans l'espace inter-diguettes cette biomasse accumulée en amont a besoin d'être utilisée comme matériau d'aménagement, sous forme de paillis, pour stimuler le développement du couvert végétal. En effet, l'accroissement du couvert végétal dans les espaces inter-diguettes, et en particulier la régénération des végétations ligneuses, permettent de réduire plus ou moins rapidement les écarts entre l'amont des diguettes et le reste des espaces traités. Dès la seconde saison des pluies suivant l'aménagement, l'amélioration du niveau des végétations a permis un accroissement de l'infiltration et de l'évapotranspiration en "IN" et une réduction du drainage en AM, c'est-à-dire une meilleure utilisation de l'eau et des éléments nutritifs. L'effet dépressif constaté au cours des premières années devrait en conséquence être, à terme, atténué par l'importance de la régénération ligneuse dont la densité peut atteindre 1200 arbustes/ha après deux ans.

En termes de durée, l'étude de la dynamique des végétations herbacées indique que les interactions entre les végétations et le milieu ne commencent à se stabiliser, dans le meilleur des cas, qu'après dix ans. Au cours de cette période, les processus de régénération sont marqués par de permanentes modifications dans les caractéristiques hydrologiques, biologiques et probablement chimiques du milieu; ils sont en conséquence susceptibles de voir leur évolution compromise par la gestion appliquée aux espaces en régénération. La protection contre les feux et l'exploitation, par le bétail notamment, apparaît dès lors comme une condition indispensable à l'aboutissement des mesures de régénération.

8 Le bilan des éléments nutritifs

8.1 Introduction

En plus de l'eau, les éléments nutritifs constituent le second facteur qui détermine la productivité des pâturages sahéliens. De nombreux travaux réalisés dans la région ont mis en exergue l'importance de l'azote (N), et du phosphore (P) comme éléments déterminants de la productivité de ces formations: Roose, 1981, Penning de Vries et Djitéye, 1982, Claude et al., 1991, Breman et de Ridder, 1991. On a constaté en effet que dans la région sahélienne, seulement 10 à 35 kg/ha d'azote sont absorbés par les végétations des pâturages naturels pendant une saison de croissance, malgré le fait qu'il se trouve au total 300 à 3000 kg/ha dans la couche supérieure du sol (0-30 cm) (de Ridder et al., 1982). Pour le phosphore, seulement 1 à 2 kg/ha sont absorbés pour des réserves totales d'environ une centaine de kg/ha. Ceci vient du fait que seulement une faible partie du N et du P du sol se présente sous forme disponible pour la végétation. Cette faible disponibilité de N et de P qui caractérise la plupart des sols de la région constitue une limite à la production et à la qualité de la biomasse produite lorsque l'alimentation en eau est assurée de façon satisfaisante. L'accroissement de la pluviométrie du Nord vers le Sud du Sahel, si elle se traduit par un accroissement de la phytomasse produite annuellement, entraînerait en revanche une dilution des éléments minéraux contenus dans la biomasse. Seuls les légumineuses peuvent dans ces conditions contribuer à améliorer la qualité de la biomasse et du fourrage. Toutes les espèces présentes au Sahel, sauf *Cassia tora*, développeraient bien le *Rhizobium*; de sorte que leur teneur en azote serait nettement plus élevée que celle des plantes environnantes (Penning de Vries & Djitéye, 1982). A une pluviométrie ≥ 600 mm, on estime en effet que 75% de l'azote immobilisé par les légumineuses en fin de croissance proviennent d'une fixation symbiotique, lorsque cette catégorie de plantes représente 5% de la biomasse; par contre, ce pourcentage peut diminuer jusqu'à 40% s'il y a plus de légumineuses que d'espèces non fixatrices dans la végétation (de Ridder et al., 1982).

Le problème principal des sols dénudés est un dysfonctionnement de leur régime hydrique qui se traduit par l'apparition d'une croûte plus ou moins imperméable et qui les rend apparemment improductifs. L'expérience montre cependant (cf. Chapitres 4 et 7) qu'ils possèdent un potentiel productif parfois insoupçonné que les modifications des termes du bilan hydrique peuvent révéler de façon spectaculaire. Dans les aménagements de régénération des sols qui nous concernent, l'eau ne constitue théoriquement plus un facteur très limitant; du coup, la production pourrait rapidement se trouver limitée par la disponibilité des éléments nutritifs. C'est pourquoi dans ce chapitre, les flux des éléments nutritifs principaux que sont N, P (et K) sont étudiés de manière relativement détaillée en relation avec le régime hydrique des sols, au cours des deuxième et troisième saison de développement végétatif suivant les aménagement de C.E.S.. Ainsi sont tour à tour discutés les réserves totales et disponibles du sol, le niveau d'absorption par la végétation comme indicateur de la disponibilité des éléments nutritifs, les pertes totales hors du système (par l'érosion et le drainage notamment) ainsi que les apports extérieurs, en particulier par les

eaux de pluie; ceci nous permet de dresser un bilan annuel des flux de N et P selon l'intensité des aménagements et le régime hydrique.

Dans les conditions de protection contre les feux et le bétail, le cycle des éléments nutritifs, basé sur le recyclage annuel de la biomasse produite, peut-il permettre d'entretenir un niveau de production élevé et soutenu ? C'est une des questions auxquelles cet exercice tente de répondre. Pour ce faire, des essais additionnels de fertilisation ont été conduits au cours de la deuxième saison de croissance. Ils visent non seulement à évaluer la production potentielle de ces sols, mais aussi à mieux comprendre la disponibilité et l'importance des flux des éléments nutritifs tels qu'influencés par le régime hydrique.

8.2 Les méthodes

L'approche du bilan des éléments nutritifs, N, P et K, est basée sur la quantification des paramètres suivants: le niveau d'absorption par la végétation herbacée, les réserves totales du sol et la disponibilité de ces minéraux pour la végétation, les mobilisations par l'érosion et les pertes hors du système qui en découlent, les pertes minérales par le drainage interne. Cet exercice est complété par une estimation, à partir des données de la littérature, des flux résultant des processus climatiques et biologiques: apports par les eaux de pluie et volatilisation de l'azote, fixation symbiotique et remontées par le système racinaire des ligneux, recyclage de la litière.

8.2.1 Les réserves totales des sols

En Avril 1991, lors de la caractérisation des sols, six profils représentatifs des deux principales unités pédologiques en place (FTLC et BEF) ont été identifiés pour des prélèvements d'échantillons entre 0 et 120 cm de profondeur (Chapitre 5.2). L'analyse de ces échantillons effectuée par le Bureau National des Sols (BUNASOL) a porté essentiellement sur les paramètres suivants: le pH (eau et KCl), la matière organique (m.o.), l'azote total (N), le phosphore total (P) et le potassium (K) total.

Après deux saisons de croissance, soit en Septembre 1992, d'autres analyses ont été effectuées, cette fois dans l'horizon 0-30 cm considéré comme le plus exploité par les végétations herbacées (cf. Chapitre 7.3.1). Les prélèvements ont été effectués à la période de la biomasse aérienne maximale. Le dispositif quant à lui, a été établi sur la base de l'hétérogénéité du régime hydrique créée par la mise en place des mesures de C.E.S. (cf Chapitre 6). Deux types d'emplacements ont été considérés: l'amont des diguettes (AM) et l'espace inter-ouvrages (IN). A chaque emplacement, six points ont été identifiés, de façon à couvrir l'ensemble du périmètre expérimental. Les prélèvements ont été effectués sur des placettes de 1 m² aussitôt après la récolte de la biomasse aérienne. Le pH, la m.o., N total, P total et P Bray, K total et K échangeable ont été mesurés.

8.2.2 L'absorption par la végétation

En même temps que l'analyse des sols en 1992, la biomasse provenant de 6 échantillons non fertilisés et 3 échantillons par essai de fertilisation (NPK et TSP) a aussi été analysée dans chaque situation AM et IN, pour déterminer les taux de N, P et K. Les échantillons contenant des légumineuses ont été analysés en lots séparés: légumineuses d'un côté, le reste de la biomasse de l'autre. Les essais de fertilisation ont consisté, il faut le rappeler en (1) un apport de NPK (400 kg/ha de N, 100 kg/ha de P_2O_5 , 100 kg/ha de K_2O) et (2) un apport de TSP (100 kg/ha de P_2O_5) sur des parcelles de 16 m² initialement couvertes de végétation. Ils avaient pour but (en particulier le premier essai) de mesurer la production potentielle de la végétation herbacée (voir Chapitre 7.2.3). Les analyses effectuées sur ces échantillons offraient ainsi la possibilité de mesurer le niveau d'absorption des éléments nutritifs dans ces conditions de fertilisation et d'essayer d'en établir le lien avec les conditions d'alimentation en eau.

Au cours de la saison 1993, le dispositif de mesure de la production primaire aérienne nette des herbacées (cf. Chapitre 7.2.3) a été utilisé pour suivre le niveau d'absorption des trois éléments nutritifs ci-dessus, en fonction du stade de développement des végétations. A partir du 15 juillet les récoltes de biomasse, effectuées tous les 15 jours jusqu'au 30 octobre, ont été séchées au soleil pendant 10 à 12 jours jusqu'à poids constant et analysées en deux lots: un lot des échantillons récoltés en amont des diguettes et un lot de ceux collectés dans l'espace inter-ouvrages.

En ce qui concerne la végétation ligneuse, l'azote, le phosphore et le potassium ont été dosés dans la biomasse foliaire de *Acacia seyal* qui représente 60% de la végétation ligneuse spontanée rencontrée à la fin de l'hivernage 1992. A partir de la relation entre diamètre et biomasse foliaire des arbustes, des mesures de densité de la recrue ligneuse (cf. 7.5.2), une estimation des quantités d'éléments nutritifs immobilisés par les feuilles des ligneux a été faite.

8.2.3 Les pertes d'éléments nutritifs

Pendant l'hivernage 1992, des prélèvements d'eau de ruissellement ont été effectués après 7 pluies individuelles totalisant 200 mm, soit 30% de la pluviométrie annuelle. Chaque échantillon a été filtré au papier filtre et les sédiments ainsi recueillis séchés à l'étuve; on a alors déterminé la charge solide des eaux (en grammes de sédiments/litre). Ces sédiments et le filtrat ont été analysés séparément (toujours par le BUNASOL) pour déterminer les teneurs en N, P et K totaux. Dix placettes de mesure du ruissellement, réparties dans l'ensemble des parcelles, ont été utilisées pour cette opération dont quatre sur des surfaces nues et six sur des surfaces couvertes de végétation à des taux variables. Les données obtenues permettent de calculer les quantités de terre érodées et d'éléments nutritifs mobilisés par l'érosion et le ruissellement. Compte tenu de la nature des mesures de C.E.S en place, l'essentiel des sédiments transportés est retenu en amont des diguettes; seules les eaux résultant des crues lors de certaines pluies sont considérées comme à l'origine des pertes minérales hors du système (cf. 6.2.2). Ces pertes sont calculées à partir des volumes d'eau évacués et de leurs charges solides.

Utilisant les essais de fertilisation mentionnés plus haut, des sondages ont été effectués en fin de période de croissance à 10, 50 et 100 cm de profondeur en vue de mettre éventuellement en évidence un phénomène de lessivage de N, P ou K. Les échantillons ont été prélevés dans les positions "AM" et "IN" dans douze placettes voisines de 1 m², dont six non fertilisées et six fertilisées au NPK.

8.2.4 Les apports extérieurs d'éléments nutritifs

Ils consistent essentiellement aux apports par les eaux de pluie et accessoirement des poussières et autres déchets industriels. Les données en la matière ne sont pas toujours disponibles pour la région sahélienne. Nous avons utilisé les données, aussi concordantes que possible, issues d'un certain nombre d'études dans la région: Roose, 1981, Penning de Vries et Djitéye, 1982; Pieri, 1989; Janssen, 1993.

8.3 Les résultats des processus chimiques

8.3.1 Les réserves minérales du sol

Lors de la caractérisation des sols intervenue en Avril 1991, les analyses chimiques des échantillons prélevés ont donné les résultats du Tableau 8.1. Traduites en termes quantitatifs ces chiffres signifient que pour l'horizon 0-20 cm (DA = 1,57), on enregistre 1450 kg/ha de N total d'où une teneur en N dans la matière organique du sol de 6,5%. Ramenée à l'horizon 0-30 cm, cette teneur est de 7,0%. Pour l'horizon 20-60 cm (DA = 1,8): 2455 kg/ha de N total ou 10,7% de N dans la m.o. du sol; pour l'horizon 60-120 cm (DA = 1,83), 3206 kg/ha de N ou 13,9% de N dans la m.o..

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES MESUREES						
Horizon	pH eau	m.o.(%)	N tot. (ppm)	P tot. (ppm)	K tot. (ppm)	C/N
0-20 cm	6,5	0,72	461	222	3200	9,0
20-60 cm	6,5	0,32	341	200	3500	5,4
60-120cm	6,8	0,21	292	185	4350	4,2

Tableau 8.1 Caractéristiques chimiques des sols nus de la station de la forêt classée de Yabo, avant le début du processus de régénération: moyennes de 6 analyses pour deux types de sols (BEF et FLTC); Avril 1991.

Ces rapports entre l'azote total et la matière organique du sol paraissent plutôt "normaux" dans l'horizon 0-20 cm. Pieri (1989) rapporte en effet, pour différentes jachères anciennes ou récentes du Sénégal et du Burkina Faso, des rapports variant de 4,7 à 6,5% dans l'horizon 0-20 cm. En revanche les horizons plus profonds présentent, dans la station de Yabo, des rapports plus élevés (10,7% et 13,9% de N dans la m.o. du sol respectivement pour les horizons 20-60 cm et 60-120 cm). Ces horizons renfermeraient-ils d'autres formes de m.o.? Demeurés nus et encroûtés pendant plusieurs décennies, ces sols n'ont connu, pendant ce temps, aucune activité biologique notable.

En Septembre 1992, après deux saisons des pluies au cours desquelles un couvert végétal s'est développé pour la première fois, les analyses dans l'horizon 0-30 cm ont donné les valeurs contenues dans le Tableau 8.2. C'est sur cet horizon (0-30 cm) que portera l'essentiel des discussions sur le bilan des éléments nutritifs majeurs.

L'accumulation des sédiments en amont des ouvrages anti-érosifs, la décomposition de la paille utilisée lors des aménagements et de la litière issue de la production de la saison 1991 pourraient expliquer les légères modifications du taux de m.o. et de N enregistrées dans l'horizon superficiel. Le taux de N total dans la m.o. du sol n'a, quant à lui, pas varié: il demeure de 7,0% dans l'horizon 0-30 cm en septembre 1992 (moyenne des espaces IN et AM).

	m.o. (%) %Cx1,72	N total ppm (kg/ha)	P Bray ppm (kg/ha)	K total ppm (kg/ha)	K disponible. ppm (kg/ha)
Témoin/AM	0,78	594 (2798)	3,4 (16)	2082 (9800)	41 (190)
Témoin/IN	0,82	531 (2501)	5,6 (27)	1920 (9050)	39 (190)
TSP/AM	0,85	589 (2774)	5,1 (24)	2056 (9680)	38 (180)
TSP/IN	0,87	541 (2548)	6,3 (30)	1750 (8240)	37 (175)
NPK/AM	0,99	613 (2887)	5,5 (26)	2016 (9500)	29 (140)
NPK/IN	0,92	561 (2642)	5,3 (25)	1910 (9000)	22 (110)

Tableau 8.2 Réserves minérales dans l'horizon superficiel du sol (0-30 cm) à la période de la biomasse maximale, en amont des diguettes (AM), entre les diguettes (IN) sur terrains non fertilisés (Tem) et sur terrains fertilisés au N-P-K (400 kg/ha de N, 100 kg/ha de P₂O₅, 100 kg/ha de K₂O) et au Triple Super Phosphate (100kg/ha P₂O₅). Les chiffres entre parenthèse correspondent aux valeurs en kg/ha. Moyennes de 6 (pour les Temoins) et de 3 mesures (pour NPK et TSP). Forêt classée de Yabo, Burkina Faso, 1992.

A titre d'exemple, Roose (1981) rapporte pour une jachère herbacée et un sol sableux nu à Saria (P = 860 mm/an) dans le plateau central du Burkina Faso, les stocks d'éléments nutritifs contenus dans les 30 premiers cm du sol (en kg/ha):

	<u>N total</u>	<u>P total</u>	<u>K total</u>
Saria, jachère herbacée	1130	280	13945
Saria, sol nu	1124	268	13242
Yabo, sol nu (avril 1991)	1985	1013	15540
Yabo, végétation de 2 ans	2650	660	9425

En dehors de considérations spéculatives, ces chiffres en eux-mêmes ne permettent pas de tirer une conclusion comparative, dans la mesure où les conditions de mesures ne sont pas nécessairement comparables. Cependant les valeurs obtenues à Yabo semblent bien indiquer que le problème de régénération des sols argilo-limoneux dégradés est moins lié à leur fertilité chimique qu'à la dégradation physique qui les affecte (Tableau 8.2).

8.3.2 L'absorption par la végétation

La végétation sans fertilisation

Les résultats discutés ci-après proviennent de l'analyse des 12 échantillons de sol et de biomasse herbacée non fertilisés dont six récoltés en AM et six en IN au "standing crop maximum" (septembre 1992). Ils correspondent au "Témoin" dans les tableaux 8.2 et 8.3.

L'azote

En amont des diguettes, les réserves totales de N atteignent 2800 kg/ha dans la couche 0-30 cm, pendant que les quantités absorbées sont de 39,5 kg/ha, soit 1,4%. Entre les ouvrages, on observe respectivement 2500 kg/ha et 32,2 kg/ha soit 1,3%. Ainsi, la végétation herbacée n'absorberait qu'environ 1,5% de l'azote du sol à la floraison. L'examen du tableau 8.2 indique que malgré des réserves d'azote apparemment plus élevées en amont des ouvrages (zone d'accumulation de sédiments) que dans l'espace inter-diguettes, le taux du même élément dans la biomasse y est plus faible (0,67% contre 0,92% en moyenne).

Le Phosphore

Les quantités totales présentes dans l'horizon supérieur du sol en septembre 1992 sont d'environ 660 kg/ha (140 ppm). La végétation herbacée n'en absorbe cependant que 3,7 kg/ha en amont des diguettes, pour une production de 5900 kg/ha de matière sèche. Ce niveau d'absorption représente environ 25% des réserves facilement assimilables (P Bray) qui sont de 16 kg/ha. Ceci indique que l'absorption du phosphore est limitée dans ces conditions de croissance.

Traitement	Prod. kg/ha	Nb (%)	Immob N* kg/ha	Pb (%)	Immo P kg/ha	Kb (%)	Immob. K kg/ha	P/N
Témoin/AM	5900	0,67	39,5	0,06	3,7	1,63	96,2	0,09
Témoin/IN	3500	0,92	32,2	0,06	2,2	1,79	62,7	0,07
TSP/AM	7000	0,62	43,5	0,14	9,8	1,93	135,1	0,22
TSP/IN	7600	0,72	55,0	0,15	11,4	1,77	134,5	0,21
NPK/AM	12800	1,45	186,0	0,10	13,0	2,49	318,7	0,07
NPK/IN	12500	1,64	205,0	0,12	15,0	2,28	285,0	0,07

Tableau 8.3 Taux de N (Nb), P (Pb) et K (Kb) dans la biomasse sans légumineuses et immobilisations (Imm) correspondantes au "standing crop" maximal saison 1992, en amont et entre les diguettes, pour des terrains non fertilisés (Tem) et fertilisés au NPK et au TSP. Les immobilisations de N (*) ne prennent pas en compte la fixation par les légumineuses qui est discutée plus en détail au paragraphe 8.4. Les valeurs du rapport P/N et la production moyenne sont aussi indiquées: moyennes de 6 mesures. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

La méthode "Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils" (QUEFTS), qui utilise les valeurs de P-OLSEN, est basée sur l'hypothèse que seulement 50% des valeurs mesurées au laboratoire sont réellement disponibles pour les plantes. (Janssen et al., 1990). Dans les conditions où l'absorption de P est aussi limitée qu'en amont des diguettes, le choix porté sur les valeurs totales de P-Bray (à 100%), en lieu et place de P-OLSEN (à 50%), pour exprimer les quantités de P mobilisables par les végétations, apparaît bien réaliste.

Le Potassium

Il se présente quant à lui comme l'élément le plus disponible dans ces sols: près de 200 kg/ha de K disponible. Il est aussi le plus fortement absorbé par la végétation: près de 100 kg/ha sans fertilisation en régime hydrique très humide.

Enfin il est utile de rappeler que la différence de production entre le "Témoin AM" et le "Témoin IN" n'est pas liée à une insuffisance éventuelle d'eau dans l'espace inter-diguettes mais est due à l'hétérogénéité du couvert végétal qui caractérise cet espace. Les 3500 kg/ha sont en effet issus de la moyenne des placettes de récolte de 1 m² dont la biomasse a fait l'objet de l'analyse chimique. Cet exercice visait à réduire la différence "artificielle" entre la production réelle et la production potentielle dans l'espace "IN". Il ne permet cependant pas d'éliminer complètement cette différence dans la mesure où les parcelles fertilisées (TSP/IN ou NPK/IN) ont été choisies exclusivement dans des endroits à végétation initialement couvrante qui ne correspondent ni à la moyenne réelle des espaces "IN", ni à celle de ce micro-échantillon de 6 placettes. (voir aussi au chapitre 7.2.3).

Absorption et cycle végétatif (Figure 8.1)

Les mesures de production primaire aérienne nette de la strate herbacée (en 1993) ont été mises à profit pour suivre l'évolution du taux d'azote (Nb), de phosphore (Pb) et de potassium (Kb) dans la biomasse (Chapitre 7.2.3). Les résultats obtenus des 8 séries de placettes en amont et 8 séries entre les diguettes ont donné les résultats du Tableau 8.4.

On constate ainsi que Nb, Pb et Kb diminuent avec l'âge des végétations (Figure 8.1). Plusieurs travaux dans la région sahélienne et soudanienne ont montré en effet que les taux d'azote (Nb) et de phosphore (Pb) dans la biomasse diminuent avec l'âge des plantes, en raison du fait, d'une part que l'absorption de N devient nulle après la floraison alors qu'on assiste au développement de tissus fibreux et contenant moins de protéines et d'acides nucléiques, et d'autre part qu'il y a redistribution de N et P vers la fin du cycle phénologique des vieux tissus vers les tissus reproducteurs puis des tiges vers les racines. (Penning de Vries et Djitéye, 1982, Fournier, 1982, Claude et al., 1991).

En amont des diguettes, Nb est dilué: il évolue de 1,05% le 15 Juillet à 0,26% en fin d'hivernage. Il est de 0,35% au stade de la biomasse maximale (15/9). Dans l'espace inter-diguettes, Nb évolue de 1,5% en début de cycle à 0,33% à la fin du cycle végétatif; il est de 0,65% à la floraison. Claude et al. (1991) rapportent des variations comparables de Nb dans la région de la mare d'Oursi (Burkina Faso). Ces valeurs confirment l'effet du régime hydrique sur le taux d'azote dans la biomasse: l'effet de dilution conduit ainsi à plus de biomasse mais de moindre qualité. Elles montrent surtout que les plantes ont souffert d'une carence en azote, à la fin de la croissance, particulièrement en amont des diguettes anti-érosives: Nb à la floraison y est en effet inférieur à 0,5%, taux considéré comme traduisant une limitation complète de la productivité par l'azote (Penning de Vries et Djitéye, 1982). Le niveau de dilution de N à la floraison (0,35%) est proche de la valeur extrême possible pour des espèces de type C₄, c'est-à-dire 0,30% (Breman et de Ridder, 1991). La qualité de la biomasse est dans ces conditions extrêmement basse pour un usage fourrager.

Date 1993	AMONT DIGUETTES					INTER-DIGUETTES				
	Biomasse kg/ha	Nb (%)	Pb (%)	Kb (%)	P/N	Biomasse kg/ha	Nb (%)	Pb (%)	Kb (%)	P/N
15/07	1390	1,05	0,07	2,28	0,07	1250	1,50	0,08	2,61	0,06
30/07	1830	0,95	0,08	2,66	0,08	1930	1,19	0,11	3,00	0,09
15/08	3160	0,58	0,07	1,95	0,12	3690	0,99	0,10	2,85	0,10
30/08	3780	0,56	0,06	1,84	0,11	4490	0,77	0,08	2,12	0,105
15/09	4900	0,35	0,05	1,51	0,14	5500	0,65	0,07	1,70	0,11
30/09	4140	0,32	0,04	1,48		3890	0,58	0,04	1,61	
15/10	3650	0,27	0,04	1,40		3650	0,39	0,04	1,57	
23/10	3340	0,26	0,04	1,35		2630	0,33	0,04	1,39	

Tableau 8.4 Evolution de la biomasse sur pied (végétation dominée par des graminées de type C₄), du taux de N, P et K et du rapport P/N dans la biomasse au cours de la saison de croissance 1993, selon le régime hydrique: moyennes de 8 analyses. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

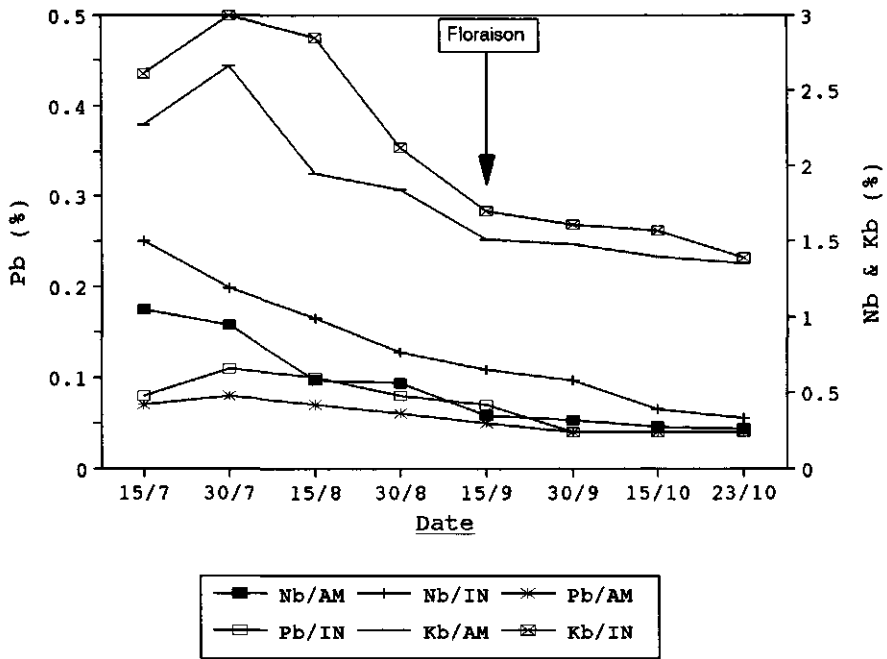


Figure 8.1 Evolution de Nb, Pb et Kb dans la biomasse au cours de la saison de végétation 1993. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

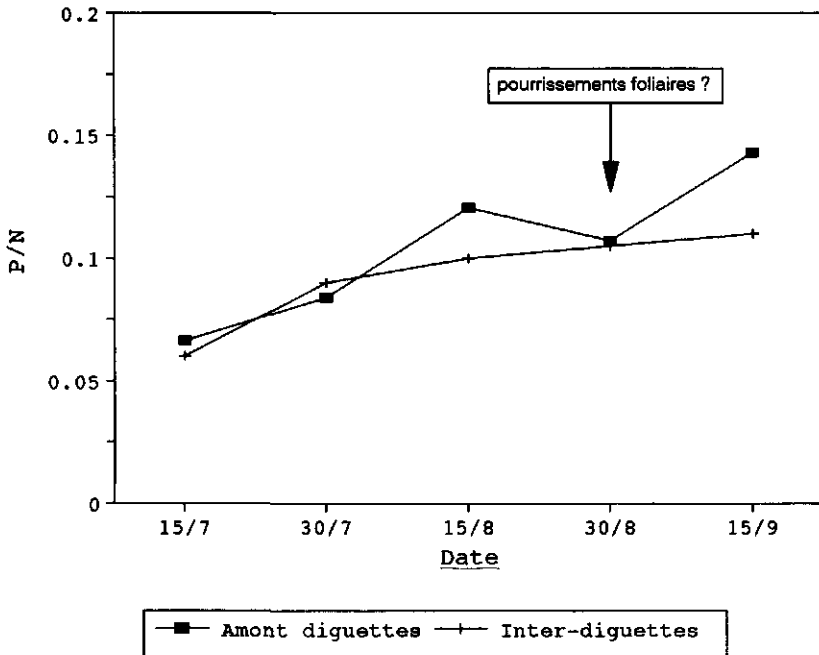


Figure 8.2 Evolution du rapport P/N dans la biomasse au cours de la saison 1993. Forêt classée de yabo, Burkina Faso.

On remarquera enfin que par rapport aux valeurs de Nb observées l'année précédente (1992) dans les espaces non fertilisés, la situation en 1993 semble traduire une limitation accrue de l'azote en amont des diguettes. Ceci signifierait qu'il y a trop d'eau, en tout cas plus que nécessaire pour une utilisation efficace des éléments nutritifs par les végétations herbacées.

En ce qui concerne le phosphore et le potassium, leur absorption par la végétation semble avoir d'abord été limitée par la pluviométrie ou le développement des racines jusqu'au 15 Juillet. Pb et Kb atteignent en effet leur valeur maximale fin juillet, c'est-à-dire au début des grandes pluies. Pb évolue à partir de ce moment selon la même tendance que Nb jusqu'à atteindre, à la floraison, une valeur minimale de 0,05% en "AM" et de 0,07% en "IN".

L'évolution du rapport P/N montre que sa valeur a dépassé la moyenne de 0,10 (moyenne entre les valeurs extrêmes généralement utilisées au Sahel- voir 8.3.3), à partir du début des grandes pluies; elle augmente globalement du début de l'hivernage jusqu'à la floraison, indiquant ainsi que P est plus disponible pour les plantes que N (Figure 8.2). Cette évolution globale du rapport P/N confirme encore que la végétation "apprécie" ces sols comme étant plus pauvres en azote qu'en phosphore. Des observations similaires ont déjà été faites sur un trajet Nord-Sud à partir du ranch de Niono (Penning de Vries et Djitéye, 1982) et dans la région de la mare d'Oursi (Claude et al., 1991). Cette caractéristique est considérée comme générale des parcours sahélo-soudaniens.

Pour Kb, les valeurs observées diminuent à partir du début des grandes pluies de 2,70% à 1,51% à la floraison en amont des diguettes; elles varient respectivement de 3,00% à 1,70% entre les diguettes.

Au delà des taux de N, P ou K dans la biomasse, c'est l'évolution des quantités totales d'éléments nutritifs annuellement immobilisées par la végétation qui illustre le mieux le bilan minéral (cf. Figure 8.3). Il apparaît ainsi que les quantités immobilisées augmentent jusqu'au "standing crop" maximal; puis elles diminuent à cause de la chute des semences et, dans une moindre mesure, des redistributions tiges → racines consécutives au dessèchement de la végétation. Entre le 15/9, stade de la biomasse maximale, et le 23/10, la diminution des quantités immobilisées est d'autant plus importante que le régime hydrique est sec et le dessèchement des plantes rapide: pour l'azote, les "pertes" sont de 49% en amont alors qu'elles atteignent 81% entre les diguettes. Ces pertes ont même commencé avant la maturité de la végétation, comme l'ont aussi observé d'autres auteurs (Penning de Vries et van Keulen, 1982). Pour le phosphore et le potassium, les "pertes" sont respectivement de 32% et 39% en amont, contre 80% et 70% entre les diguettes au cours de la même période.

Penning de Vries et van Keulen (1982) estiment que 20 à 60% des pertes de l'azote et du Phosphore contenus dans la biomasse aérienne entre mi-septembre et fin octobre sont liées à la chute des semences. Si les redistributions tiges → racines sont pour une part importante dans ces pertes chez les herbacées pérennes en fin de cycle (Fourmier, 1982), ces transferts sont jugés très improbables chez les plantes annuelles. Dans les conditions d'humidité prolongée en amont des diguettes où les herbacées demeurent vertes pendant plus longtemps, même après la chute des semences (cf. 7.3.3), ce phénomène pourrait cependant conserver une incidence assez significative sur les pertes d'éléments nutritifs enregistrés en fin de cycle végétatif.

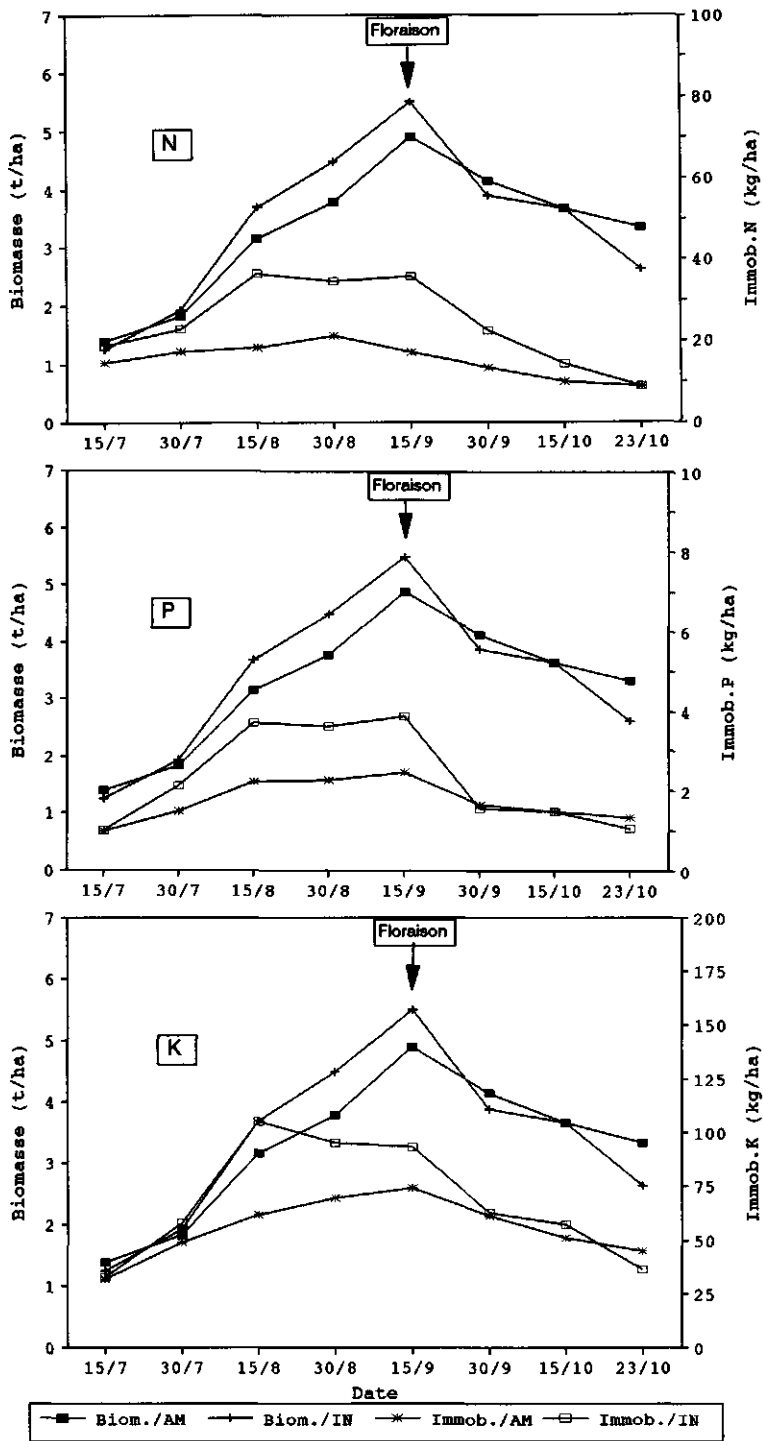


Figure 8.3 Immobilisations de N, P et K au cours de la saison de végétation en fonction du régime hydrique. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso, 1993.

Les végétations sous fertilisation

Deux types de fertilisation ont été testés: du Triple Super Phosphate (TSP) à la dose de 100 kg/ha de P_2O_5 (soit 44 kg/ha de P), et du NPK constitué d'un mélange d'urée (400 kg/ha N), de TSP (100 kg/ha P_2O_5) et de sulfate de potassium (100 kg/ha K_2O soit 83 kg/ha de K) (traitements TSP et NPK dans les tableaux 8.2 et 8.3). Ces doses sont jugées suffisamment élevées pour permettre de déterminer la production primaire potentielle des végétations étudiées (voir 7.2.3). Les analyses effectuées des sols et de la biomasse à la floraison ont permis de mesurer l'incidence de la fertilisation sur l'absorption de N, P et K par la végétation.

La fertilisation phosphatée (TSP)

Elle s'est traduite par un accroissement de la production en amont des diguettes de 5900 à 7000 kg/ha, soit 19%. Dans l'espace inter-diguettes, la production a atteint 7600 kg/ha en conditions initiales de recouvrement semblables à celles de l'amont. L'incidence sur l'absorption par la végétation est traduite par (Tableau 8.3):

- un doublement du taux de P dans la biomasse: Pb passe de 0,06 à 0,14% en amont des diguettes (+230%) et de 0,06 à 0,15% (+250%) entre les diguettes.
- Une réduction du taux d'azote dans la biomasse (Nb) de 0,67 à 0,62% (-7,5%) en amont et de 0,92 à 0,72% (-22%) en "IN"; mais aussi un accroissement des immobilisations totales de N lié à l'accroissement de la production.
- Le rapport P/N dans la biomasse passe ainsi de 0,09 à 0,22 en amont des ouvrages anti-érosifs et de 0,07 à 0,21 entre les diguettes.
- Un accroissement du niveau d'absorption de K par la végétation de près de 40 kg/ha alors qu'on enregistre dans le même temps une baisse des quantités de K disponible de 10 kg/ha (Tableau 8.2).

Il semblerait donc que la fertilisation au TSP a d'abord stimulé l'absorption de P (Pb est multiplié par 2). Ceci a augmenté la capacité d'absorption de N. Mais la production a augmenté plus que l'absorption de N, ce qui s'est traduit par un taux de N plus bas dans la biomasse. La qualité de la biomasse, liée au taux d'azote, a donc diminué. Toutefois, à conditions de recouvrement initiales comparables, la production en amont est restée inférieure à celle des espaces inter-diguettes. Ajouté à la baisse du taux d'azote (Nb) dans la biomasse, on peut penser que la dose de P apportée était telle qu'elle a épuisé les réserves disponibles d'azote, ceci d'autant plus que l'eau n'est pas limitative. Cette baisse générale de Nb suggère que, dans les conditions de croissance étudiées, la disponibilité de l'eau pour les plantes soit au moins aussi suffisante dans les espaces inter-diguettes.

La fertilisation au NPK

L'apport simultané de N, P et K a permis de doubler la production qui est passée de 5900 à 12800 kg/ha en amont des diguettes. Dans les espaces inter-diguettes, elle atteint 12500 kg/ha en conditions de recouvrement initial semblables à celles de l'amont. Nb est multiplié par 2 par rapport aux terrains non fertilisés, mais demeure plus faible en amont qu'entre les ouvrages anti-érosifs (cf. Tableau 8.3). La valeur maximale de Nb est de 2,07%. Pb est aussi multiplié par 2, avec pour valeurs extrêmes 0,09 et 0,15%. Kb quant à lui augmente de 50%, avec pour valeurs extrêmes 1,78 et 3,47%.

L'effet de la fertilisation au NPK sur la production confirme les limitations en Azote des sols concernés ainsi que l'importance de cet élément pour la croissance: en effet, l'apport de P seul a entraîné un accroissement de la production de seulement 19% en même temps que Nb diminue de 15% par rapport aux terrains non fertilisés; seul l'apport (simultanément avec P) de N a permis d'accroître Nb et de doubler conséquemment la production.

Le cas des légumineuses.

L'analyse séparée des légumineuses dans chaque échantillon de biomasse à la floraison en 1992 montre que (Tableau 8.5) les teneurs en N des légumineuses (Nleg) sont de 2,5 à 4 fois plus élevées que dans la végétation environnante. Cette différence est d'autant plus grande que l'absorption de N par la végétation est soit limitée par sa disponibilité (fertilisation à 100 kg/ha de P₂O₅ par exemple), soit influencée par le régime hydrique (amont des diguettes): la valeur maximale du rapport Nleg/Nb (4,06) est en effet observée en amont de diguettes sous fertilisation au TSP. Dans le cas de la fertilisation au NPK où N n'est pas limitatif, le rapport Nleg/Nb conserve en amont des diguettes une valeur minimale (2,6) proche des conditions naturelles sans fertilisation (2,5). Ce dernier constat reste toutefois lié à un nombre d'observations trop limité pour être généralisé. L'accroissement de la teneur en N des légumineuses s'accompagne naturellement d'une augmentation de l'absorption de P. Toutefois, les rapports Pleg/Pb sont nettement inférieurs à ceux observés pour l'azote (ils sont ≤ 2).

Quant au Potassium, les données en présence renseignent peu sur la particularité de son absorption par les légumineuses.

Traitement	Nb(%)	Nleg(%)	Pb(%)	Pleg(%)	Kb(%)	Kleg(%)
Témoin/AM	0,67	1,66	0,06	0,07	1,63	1,31
Témoin/IN	0,92	2,36	0,06	0,10	1,79	1,98
TSP/AM	0,62	2,52	0,14	0,14	1,93	2,00
TSP/IN	0,72	2,30	0,15	0,15	1,77	1,98
NPK/AM	1,45	3,71*	0,10	0,18*	2,49	2,13*
NPK/IN	1,64	1,94*	0,12	0,15*	2,28	1,47*

* : nombre d'observations limité (1 à 2 échantillons)

Tableau 8.5 N, P et K dans les légumineuses (Nleg, Pleg, Kleg) et la végétation environnante à la floraison, sur terrains fertilisés (TSP et NPK) et non fertilisés (Témoin), selon le régime hydrique. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso, 1992.

8.3.3 La disponibilité des éléments nutritifs dans le sol

On a constaté au paragraphe 8.3.2 que seulement 1,4% de l'azote total et 25% du Phosphore assimilable contenus dans les 30 premiers cm du sol ont été absorbés en amont des diguettes au cours de la saison de croissance 1992. De même on a relevé que le taux d'azote contenu dans la biomasse à la floraison était inférieur en amont des diguettes à celui observé dans l'espace inter-ouvrages, même avec un apport massif d'azote de 400 kg/ha. Ceci indique que, plus que les réserves contenues dans le sol, c'est la disponibilité de N,P et K pour les plantes et le régime hydrique qui paraissent les plus déterminants pour le niveau d'absorption.

Dans les conditions sans fertilisation

La disponibilité de N,P et K.

L'azote et le phosphore

Le tableau 8.2 indique que les réserves totales de N dans les 30 premiers cm du sol sont plus importantes en amont que dans l'espace inter-diguettes (2800 contre 2500 kg/ha): l'amont est le lieu d'accumulation des sédiments provenant de l'érosion des espaces inter-diguettes. En même temps, le taux d'azote dans la biomasse (Nb) en amont est toujours inférieur à celui des espaces interdiguettes. Cette observation faite à la floraison en 1992 est confirmée l'année suivante: Nb en amont est demeurée inférieure à Nb entre les diguettes pendant toute la période de croissance, renforçant ainsi l'hypothèse d'une influence du régime hydrique sur l'absorption de N par les plantes. Le début de la saison des pluies est une période particulière dans l'équilibre entre disponibilité de N et son absorption par les plantes. On observe en effet avec les premières pluies de cette période une intense minéralisation de la matière organique du sol (Pieri, 1989). Or à ce même moment l'enracinement des végétations naturelles est peu profond et leur capacité à absorber N faible. En amont des diguettes où les quantités d'eau infiltrées sont déjà très élevées dès les premières pluies, ce processus peut prendre une importance accrue et provoquer des pertes plus élevées par lessivage.

En ce qui concerne le phosphore, alors que la végétation n'absorbe en 1992 que 25% des réserves assimilables en amont des diguettes, le rapport P/N reste plus élevé qu'en IN (0,09 contre 0,07, cf. Tableau 8.3). Ceci est confirmé par les mesures effectuées en 1993. Ce rapport ne diminue à 0,07 qu'avec la fertilisation au NPK. L'absorption de P dans les conditions de fertilité naturelle ne semble donc pas limitée par la disponibilité de cet élément mais par celle de N. En effet l'évolution du rapport P/N au cours de la saison de croissance 1993 montre que sa valeur croît jusqu'à la floraison (15 septembre), indiquant ainsi une plus grande disponibilité de P par rapport à N pendant la croissance. En amont des diguettes cependant on observe, au 30 août, une inflexion de la courbe d'évolution de P/N qui traduirait des perturbations dans l'absorption de N et P. Le mois d'août correspond en effet à la période la plus pluvieuse de la saison (près de 40% de la pluviométrie totale en 1993) marquée par d'importants pourrissements foliaires en amont des diguettes (voir 7.3.1-C). En d'autres termes, la croissance des végétations herbacées s'en est trouvée perturbée en même temps, probablement, que leur capacité à absorber N et P.

Un autre argument qui milite en faveur des perturbations dans l'absorption de N (et P) en amont des diguettes est donné par l'écart entre les valeurs minimales et maximales de P/N observées en 1992 sans fertilisation. Ces valeurs se présentent selon les traitements de la manière suivante (résultats de 6 observations par traitement):

Espaces IN	Nb min = 0,40	Nb max. = 1,22 (x 3,0)
	Pb min = 0,03	Pb max. = 0,07 (x 2,5)
	P/N min = 0,03	P/N max. = 0,11 (x 3,7)

Espaces AM	Nb min = 0,15	Nb max. = 1,33 (x 9,0)
	Pb min = 0,044	Pb max. = 0,09 (x 2,0)
	P/N min = 0,04	P/N max. = 0,29 (x 7,3).

Dans les espaces inter-diguettes, le rapport P/N varie de 1 à 4 alors qu'en amont des diguettes il prend des valeurs maximales beaucoup plus éloignées des valeurs minimales (7 fois). Dans une série d'observations faites sur un trajet nord-sud (150 à 1100 mm de pluviométrie annuelle), Penning de Vries et Van Keulen (1982) ont rapporté que le taux de N dans la biomasse a toujours une valeur qui se situe entre un minimum et un maximum égal à environ 4 fois le minimum. Il en serait de même pour le Phosphore. Ainsi donc, si l'absorption de N était indépendante de celle de P, la valeur maximale de P/N pourrait être de 16 fois sa valeur minimale; ils constatent qu'en réalité, ce rapport se trouve entre 0,04 et 0,15, soit une variabilité plus limitée (4 fois). Ils concluent à une sorte de régulation dans l'absorption de ces deux éléments par les plantes, de façon à ce que leur rapport ne fluctue pas beaucoup. Claude et al.(1991) pour les pâturages de la région d'Oursi (Burkina Faso) parviennent à des conclusions semblables. L'étendue de variation de Nb (de 1 à 9) et du rapport P/N (de 1 à 7) en amont des diguettes pourrait effectivement traduire des perturbations dans l'absorption de N.

De ce qui précède, la faible disponibilité de N semble être une caractéristique des terrains aménagés dans la forêt de Yabo. En amont des diguettes, cette faible disponibilité serait doublée de difficultés d'absorption temporaire de N (et P) par les végétations en raison de l'excès d'eau qui s'accumule en ce point pendant la période des "grandes pluies".

Le potassium

Sans fertilisation, le potassium se présente à la fois comme l'élément le plus disponible (200 kg/ha de K disponible) et le plus fortement absorbé par la végétation (près de 100 kg/ha en amont des diguettes au cours de la saison 1992). La fertilisation phosphatée a accru le niveau d'absorption de K par la végétation de près de 40 kg/ha alors qu'on enregistre dans le même temps, une baisse des quantités de K disponible de seulement 10 kg/ha. De même, une fertilisation au NPK accroît les quantités de K immobilisées de 222,5 kg/ha alors que les valeurs de K échangeable sont seulement réduites de 50 kg/ha. Ceci confirme bien que K échangeable n'est pas une valeur appropriée pour exprimer les réserves mobilisables de Potassium (Pieri, 1989).

La récupération par la végétation

Le tableau 8.3 indique qu'à la fin de la période de croissance 1992, les végétations herbacées ont immobilisé 39,5 kg/ha de N pour une production de 5900 kg/ha de M.S. en amont et 32,2 kg de N pour 3500 kg de M.S. entre les ouvrages anti-érosifs. Les réserves totales de N au même moment étaient respectivement estimées à 2800 et 2500 kg/ha dans l'horizon 0-30 cm (Tableau 8.2). En se basant d'une part sur le fait que 85 à 97% des racines des herbacées se trouvent dans cet horizon (cf. 7.3.3) et d'autre part sur le principe que 2% de l'azote total contenu dans cet horizon est annuellement minéralisé et disponible pour les plantes (Pieri, 1989), on estime respectivement à 56 kg/ha en "AM" et 50 kg/ha en "IN" les

quantités de N théoriquement disponibles au cours de cette saison de croissance. Le taux de récupération naturel de N, qui est la proportion de N disponible du sol retrouvée dans la biomasse à la floraison, serait alors de 71% en "AM" et 65% en "IN".

Ce constat paraît en contradiction avec les problèmes de disponibilité et d'absorption de N discutés plus haut, particulièrement en amont des diguettes. Il s'explique cependant par la différence de production entre les espaces "AM" et "IN"; différence due non pas à une insuffisance d'eau en "IN" mais à la structure même de la végétation herbacée. La production moyenne en "IN" (3500 kg/ha) est le résultat de l'hétérogénéité du couvert végétal dans les espaces échantillonnés (82/IN et 90P/IN) au moment de la récolte. La valeur de Nb à la floraison dans ces espaces (0,92%) laisse supposer que le taux de récupération naturel aurait pu atteindre 90 à 100% si le couvert végétal à la récolte y était aussi homogène qu'en "AM". A ce sujet il est utile de remarquer que, sur la base de l'hypothèse que 2% des réserves totales de N contenues dans l'horizon 0-30 cm sont annuellement disponibles pour les plantes (Pieri, 1989), les quantités de N immobilisées suite à la fertilisation au TSP (43,5 kg/ha en amont des diguettes et 55 kg/ha en "IN") représenteraient respectivement 80% et 110% de N disponible en ces endroits. En revanche, si on considère que l'apport de P uniquement sous forme de TSP a conduit à un épuisement des réserves disponibles de N, comme tend à l'indiquer la baisse consécutive du taux de N dans la biomasse dans les deux cas (AM et IN), la proportion du N total effectivement disponible serait alors de 1,6% en "AM" et 2,2% en "IN". En conséquence, la proportion de 1,4% du N total absorbé par la végétation herbacée à la floraison en "AM", sans fertilisation, représenterait assez valablement la disponibilité réelle de cet élément, dans les conditions d'alimentation en eau de ces espaces; ce qui donnerait un taux de récupération naturel, et très probable, de 88%.

En ce qui concerne le phosphore et le potassium, le taux de récupération naturel calculé sur les mêmes bases est de 25% pour P et 51% pour K en amont des diguettes et 8,2% pour P et 33% pour K dans l'espace "IN".

Dans les cas de Fertilisation.

Avec la fertilisation au NPK, la production potentielle de biomasse obtenue en amont des diguettes est de 12800 kg/ha de M.S. pour des immobilisations totales de 186 kg/ha de N, 13 kg/ha de P et 319 kg/ha de K. Sur la base des quantités apportées (400 kg/ha de N 44 kg/ha de P et 83 kg/ha de K) et par rapport aux parcelles non fertilisées, on enregistre des immobilisations supplémentaires de 146,5 kg/ha de N, 9,3 kg/ha de P et 222,5 kg/ha de K. Le taux de récupération, qui représente cette fois la proportion d'éléments nutritifs apportés qui est retrouvée dans la biomasse, est de 37% pour N et 21% pour P. Sur la base des réserves résiduelles mesurées dans le sol à la récolte, toujours pour l'horizon 0-30 cm, on estime alors que 41% de l'azote apporté a été perdu par volatilisation avant dissolution et/ou par lessivage. Terman (1980) cité par Penning de Vries et van Keulen (1982) estime, en conditions pluviales ordinaires, à 20% les pertes par volatilisation, lorsque l'urée est utilisé comme engrais azoté. Dans notre cas, où l'humidité en AM peut réduire les pertes par volatilisation, cela signifierait que les pertes par lixiviation sont au moins égales à 84 kg/ha.

Dans les conditions sahéliennes (Niono, Mali), on a trouvé que selon les types de sol, 30 à 80% de l'azote appliqué sous forme d'engrais sont récupérés par la végétation au cours de la première saison de croissance; ce taux de récupération est cependant plus faible lorsque les doses d'azote sont élevées. La partie non utilisée serait assimilée par les bactéries du sol qui, à leur mort pendant la saison sèche, la libèrent à nouveau pour les plantes. En même temps, il est apparu que le taux d'azote dans la biomasse Nb (et donc le taux de récupération)

connaissait une limite maximale lorsque la dose de N atteignait 300 kg/ha (Penning de Vries et Djitéye, 1982 p.196-218). Une dose de 400 kg/ha, apportée de surcroît dans les conditions hydriques qui prévalent en amont des diguettes à Yabo, n'offrent donc pas les conditions optimales de récupération : les percolations profondes atteignent 3000 à 4000 mm en amont des diguettes dans les parcelles où la fertilisation a été effectuée. Ce qui peut justifier l'importance des pertes enregistrées (41%).

En ce qui concerne P, si le taux de récupération est de 21% avec la fertilisation au NPK en amont des diguettes, il est de 14% seulement avec la fertilisation au TSP; ceci en raison, vraisemblablement, de l'épuisement des réserves disponibles de N. Dans l'espace inter-diguettes, le plus faible pourcentage de P immobilisée (8% des réserves disponibles) demeure, quant à lui, lié beaucoup moins à la disponibilité de N qu'à l'hétérogénéité du couvert herbacé et à la faiblesse de la production.

Quant au Potassium, les immobilisations supplémentaires sont supérieures aux apports par fertilisation: 222,5 kg/ha pour 83 kg/ha apportés. D'où une différence au moins égale à 139,5 kg/ha. Le Tableau 8.2 fait apparaître en effet un déficit important du potassium total du sol, en amont des diguettes, lorsque son absorption a été stimulée par une fertilisation au NPK (-300 kg/ha de K) ou au TSP (-120 kg/ha de K). Ceci illustre non seulement la plus grande disponibilité relative de K, mais aussi et surtout le fait que les plantes se livrent à une "consommation de luxe" lorsque les conditions sont favorables.

Les différences initiales dans la structure du couvert herbacé entre le "Témoin IN" et les parcelles fertilisées dans les espaces inter-diguettes ne permettent pas de calculer un taux de récupération acceptable pour ces traitements.

En conclusion, les résultats ci-dessus montrent que stimuler la croissance par application de N, P (et K) accroît de façon considérable les exportations de ces éléments par la végétation. Ils montrent surtout que dans le cas d'un aménagement comme celui de Yabo, les risques d'épuisement sont encore plus considérables pour le Potassium lorsque son absorption est stimulée par une bonne disponibilité de l'eau, de l'azote et du phosphore. Ces risques devront être considérés dans les cas où l'utilisation prolongée d'engrais minéraux serait envisagée pour stimuler la production, ceci d'autant plus que la situation des autres bases et des oligo-éléments est généralement inconnue ou négligée.

8.3.4 Les pertes

Les pertes par érosion

Le Tableau 8.6 donne le détail des résultats des mesures effectuées au cours de l'hivernage 1992 sur les sols ferrugineux et bruns ferruginisés caractérisés par différents états de surface (pluviométrie totale = 701,4 mm). Sur la base du taux de recouvrement mesuré sur les différentes parcelles expérimentales, on a calculé les valeurs des pertes d'éléments nutritifs par érosion et ruissellement (cf Tableau 8.7). Ainsi, l'érosion enregistrée au cours de la saison pluvieuse 1992 atteint en moyenne 10,7 t/ha/an sur l'ensemble du périmètre aménagé; dans les espaces avec couvert végétal (à différents niveaux de recouvrement), elle est en moyenne de 7,3 t/ha contre 20,7 t/ha sur les sols nus. Les valeurs extrêmes ont été enregistrées respectivement sous couvert herbacé dense à *Zornia glochidiata* et *Andropogon pseudapricus* (1,7 t/ha) et sur une croûte de ruissellement ("R" dans le tableau 8.6) sur sol argileux (28,7 t/ha). Les quantités d'éléments nutritifs mobilisées par l'érosion sont en

moyenne de (Tableau 8.7) 13 kg/ha de N dont 18% dans l'eau de ruissellement, (variant de 20,6 kg/ha dont 14% dans l'eau sur sols nus, à 10,4 kg/ha sous couvert végétal dont 25% dans l'eau de ruissellement). Pour le phosphore, on a 2,25 kg/ha dont 11% dans l'eau, (variant de 3,3 kg/ha dont 8% dans l'eau sur sols nus, à 1,8 kg/ha dont 13% dans l'eau sous végétation). Pour le potassium, les pertes moyennes sont de 25 kg/ha dont 16% dans l'eau de ruissellement, les valeurs allant de 39 kg/ha (dont 11% dans l'eau) sur sols nus à 20 kg/ha sous végétation (dont 20% dans l'eau).

Placette	E.S. (%)	Erosion t/ha/ an	N	P	K	Ruiss mm/an	N	P	K	charge solide eaux (g/l)
90/ RA1	E nu	13,3	12,0	2,03	20,0	344	3,0	0,21	4,0	3,86
90/ RI3	E nu	20,0	13,2	3,10	33,5	426	3,7	0,25	4,6	4,70
82/ RI _n 3	R nu	20,9	16,7	4,00	28,1	293	2,5	0,21	4,5	7,14
90/ RI4	R nu	28,7	28,7	3,10	58,0	296	2,5	0,44	3,7	9,70
90/ RA3	R 20%	17,7	18,6	2,96	32,3	260	2,2	0,26	3,3	6,82
82/ RI _n 1	E 50%	8,1	9,7	2,10	17,1	397	3,4	0,30	6,0	2,04
90P/ RI1	R 60%	8,8	5,3	1,50	12,3	204	1,9	0,40	4,2	4,32
90/ RI1	E 70%	5,2	4,7	0,86	14,7	280	2,4	0,20	5,0	1,85
82/ RI _v 4	90%	2,0	3,7	2,00	4,7	167	1,4	0,86	3,4	1,23
90P/ RA3	100%	1,7	3,1	0,50	3,9	122	1,1	0,10	2,5	1,40

Tableau 8.6. Pertes chimiques par érosion et ruissellement mesurées sur différents états de surface (E.S) au cours de l'hivernage 1992. Les états de surface sont précisés ("R" pour croûte de Ruissellement, "E" pour croûte d'érosion) avec leur niveau de couverture végétale (nu ou couvert à X %). N, P et K totaux dans les sédiments et dans l'eau de ruissellement sont exprimés en kg/ha/an. Le ruissellement total cumulé (Ruiss. mm/an), et la charge solide des eaux de ruissellement sont aussi indiqués. Résultats extrapolés sur l'ensemble de la saison des pluies à partir d'analyses de 7 pluies représentant 30% de la pluviométrie totale. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

Sous végétation naturelle protégée à Saria (0,51 t/ha d'érosion et 42 mm de ruissellement), Roose (1981) rapporte des pertes totales de 1 kg/ha de N, 0,29 kg/ha de P et 1,7 kg/ha de K. Les valeurs les plus faibles observées à Yabo sous tapis herbacé à *Zornia glochidiata*, ramenées à un niveau d'érosion et de ruissellement comparable à celui de Saria, donneraient des résultats tout aussi comparables: 1,3 kg/ha de N, 0,2 kg/ha de P et 2 kg/ha de K.

On retiendra cependant que les sols de Saria sont sableux gravillonnaires dès la surface et couverts d'une vieille jachère de 30 ans protégée des feux, avec une pente < 1%. A Yabo par contre, il s'agit d'un sol plus argileux en surface, nouvellement colonisé par la végétation, avec une pente > 1%. A titre indicatif, les pertes enregistrées sur une parcelle cultivée de sorgho et fertilisée au NPK, toujours à Saria, sont de 15 kg/ha de N dont 23% dans l'eau de ruissellement; 3,8 kg/ha de P dont 34% dans l'eau et 46,8 kg/ha de K pour 18% dans l'eau, pour une érosion estimée à 7,3 t/ha et un ruissellement total de 208 mm (Roose, op cit).

En définitive, comme le souligne si bien Roose, ce sont les volumes des écoulements et les quantités de terre érodées qui déterminent les différences significatives des flux d'éléments nutritifs. Dans notre cas, ces éléments nutritifs mobilisés sont en partie concentrés en amont des ouvrages anti-érosifs et en partie évacués lors des crues occasionnées par certaines grandes pluies. En considérant les hauteurs moyennes des ouvrages anti-érosifs (30 cm pour la parcelle "82", 35 cm pour les autres traitements), les quantités d'eau écoulées hors du système ont été évaluées à 60 mm en 1992 soit seulement 8,5% de la pluviométrie totale. Ces crues, il faut le rappeler, interviennent généralement au cours des pluies individuelles de hauteur supérieure à 35 mm. Ces pluies représentaient quand même en 1992 près de 30% des précipitations totales. Les pertes hors du système correspondent en moyenne à 2,4 t/ha de sédiments, soit 2,8 kg/ha/an de N (0,10% des réserves totales dans les 30 premiers cm), 0,5 kg/ha/an de P (0,08% des réserves totales) et 5,5 kg/ha/an de K (0,06% des réserves totales).

	Sédiments/ érosion				Ruissellement			
	Qtés. (t/ha)	N total	P total	K total	Qtés (mm)	N total	P total	K total
Sols nus	20,74	17,7	3,0	35	340	2,9	0,28	4,2
végétation	7,27	8,3	1,6	16	240	2,1	0,24	3,9
Moyenne station	10,70	10,7	2,0	21	270	2,3	0,25	4,0

Tableau 8.7 Mobilisations de N, P et K (en kg/ha) par l'érosion et le ruissellement: moyennes pondérées (par leur importance relative) sur les sols nus, les espaces couverts et l'ensemble de la station expérimentale de YABO, au cours de la saison des pluies 1992.

Les pertes par drainage

La méthode la mieux indiquée pour estimer de façon fiable les pertes par lixiviation aurait été la collecte et l'analyse des eaux de percolation. Ceci n'a pas été possible par défaut de moyens. La méthode d'analyse de sols à différentes profondeurs d'un même point, utilisée à la période de floraison, permet tout au plus d'apprécier l'existence éventuelle du phénomène. L'analyse des sols montre en effet des différences entre témoins et parcelles fertilisées d'une part, et entre horizons d'une même parcelle d'autre part (Tableau 8.8).

Cependant, l'importance relative des quantités en jeu (exprimées en kg/ha/horizon) est telle, qu'elles ne peuvent être liées aux seuls processus de transfert par lixiviation: les différences observées seraient donc beaucoup plus dues au hasard. Si pour N et P ces analyses de sols ne sont pas assez précises pour prouver un phénomène de lessivage, les réductions du stock de K total dans l'horizon supérieur sont remarquables dans les parcelles fertilisée au NPK. Les quantités (en kg/ha) correspondant à ces différences de stock permettent d'attribuer une part de celles-ci à la surconsommation par les végétations (cf. 8.3.3)

La littérature dans ce domaine indique cependant que les risques de lessivage sont élevés dans nos régions lorsque l'azote est apporté à des doses importantes. Le volume du drainage constaté en amont des ouvrages anti-érosifs et les pertes d'azote résultant d'un apport de 400 kg/ha (cf. 8.3.3) militent en faveur de cette probabilité dans la station de Yabo.

Profondeur (cm)	AZOTE TOTAL (ppm)				PHOSPHORE TOTAL (ppm)				POTASSIUM TOTAL (ppm)			
	Tém AM	Tém IN	NPK AM	NPK IN	Tém AM	Tém IN	NPK AM	NPK IN	Tém AM	Tém IN	NPK AM	NPK IN
10	720	598	665	631	153	132	132	146	1505	1171	1279	1006
50	573	646	603	721	139	126	105	137	2089	1920	1902	1804
100	636	718	582	698	132	119	93	132	2220	1927	2158	1988

Tableau 8.8 Réserves de N, P et K du sol à différentes profondeurs, dans des parcelles fertilisées (au NPK) et des parcelles témoins voisines (T), selon le régime hydrique ("AM" et "IN"). Les analyses ont été faites à la période de la biomasse maximale. Forêt classée de Yabo, 1992. Moyennes de 6 analyses.

En utilisant le taux de N total mesuré dans l'eau de ruissellement, et sur la base du drainage calculé en amont des diguettes, les pertes annuelles de N par lixiviation (au delà de 1,55 m) seraient en moyenne 27 kg/ha dans l'espace "82/AM", 37 kg/ha dans la partie "90P/AM" et 36 kg/ha dans la partie "90/AM", soit 34 kg/ha si on considère la moyenne de l'ensemble de la zone aménagée.

Ces chiffres paraissent élevés en conditions naturelles. Cependant les pertes par lixiviation peuvent être effectivement élevées, en amont des diguettes en particulier, au début de la saison pluvieuse qui représente une période critique. Au cours de cette période en effet, lorsque la "pointe de minéralisation" est accusée et associée à de fortes quantités d'eau infiltrées (comme c'est le cas en amont des diguettes), toutes les conditions sont réunies pour favoriser la lixiviation des nitrates. Pieri (1989) rapporte, pour des conditions pluviométriques semblables (600 à 700 mm) en Côte d'Ivoire et au Cameroun, et sous des

cultures de cotonnier et de maïs, des pertes de N par lixiviation de 2,5 à 2,9 kg/ha/100 mm de drainage. Dans une savane arborée (Gonsé, près de Ouagadougou) Roose (1981) est parvenu à des conclusions quelque peu comparables: les pertes d'azote par drainage sont estimées à 2,4 kg/ha/100 mm dans l'horizon superficiel. Ceci correspondrait pour Yabo, en 1992, à des pertes par lixiviation de 76 à 105 kg/ha en amont des diguettes, selon les traitements.

L'enracinement des plantes par son volume et sa profondeur constitue un facteur déterminant de contrôle de la lixiviation. Le système racinaire des végétations naturelles de Yabo est, par son importance dans la couche superficielle du sol, plus avantageux que des cultures telles que le cotonnier et le maïs. Les résultats des calculs ci-dessus donnent cependant une mesure de l'importance potentielle du problème, en particulier en amont des diguettes sous un régime pluviométrique comme celui observé entre 1991 et 1993. Les pertes par lixiviation étant estimées à au moins 84 kg/ha sous une fertilisation à 400 kg N/ha, nous retiendrons les valeurs de 27 à 37 kg/ha comme hypothèse de travail dans les conditions sans fertilisation. De plus on peut admettre que le lessivage, lorsqu'il a lieu, procède à un transfert des éléments nutritifs dans les horizons fortement exploités par la végétation ligneuse (100-200 cm).

Les pertes d'azote par volatilisation

Les travaux effectués dans la région sahélienne montrent que le taux de N dans la paille (Nb) diminue au cours de la saison sèche, jusqu'à atteindre 0,1 à 0,2% alors que le taux de P (Pb) change seulement un peu (Penning de Vries et Djitéye, 1982). Ce phénomène proviendrait de la volatilisation du NH_3 des protéines décomposées par la chaleur; il peut atteindre 0,1% des protéines présentes par jour, ce qui représenterait environ 18% du N des parties aériennes en 6 mois de saison sèche. Ainsi, Breman et de Ridder (1991) proposent de calculer la teneur en azote de la paille à la fin de la saison sèche par l'équation $\text{Nb}(\text{fin saison sèche}) = 0,44 \times \text{Nb}(\text{fin saison pluvieuse}) + 0,127$. Nous n'avons pu effectuer de mesures précises à Yabo au cours de cette période; cependant, l'évolution de Nb observée en fin de saison pluvieuse (Figure 8.1) permet de penser que la situation en fin de saison sèche soit comparable à celle décrite par Penning de Vries et Djitéye. Nous considérerons pour la suite des calculs que Nb = 0,20% en amont et 0,25% entre les diguettes à la fin de la saison sèche.

8.3.5 Les apports

Le recyclage de la litière.

Dans les conditions de protection contre les feux et le bétail, le recyclage de la litière constitue le principal moyen de restitution des éléments nutritifs immobilisés par la végétation. Ce processus de restitution peut être décrit en trois étapes: la fin de la saison pluvieuse (mi-septembre à fin octobre), la saison sèche (novembre à mai) et la saison des pluies suivante (de juin à septembre).

La fin de la saison des pluies

Elle correspond à la période qui suit la maturation des végétations herbacées et conduit à leur dessèchement. Les restitutions chimiques s'opèrent principalement à travers la chute des semences et, dans une moindre mesure, la redistribution vers les racines. Ainsi, on a observé en 1993 que 50 à 81% de l'azote total immobilisé était "restitué" entre le 15 septembre et la fin d'octobre; il en est de même de 32 à 80% du phosphore et de 39 à 70% du potassium, selon le régime hydrique. On admet que les "retards" de restitution constatés en amont des diguettes, où l'humidité est persistante, ne devraient qu'allonger la durée de l'étape, sans remettre en cause les proportions du processus.

La saison sèche

Si dans les conditions sèches les pertes par volatilisation constituent un phénomène remarquable, la diminution de la nécromasse en saison sèche, lorsqu'elle a lieu, est surtout liée à l'activité des termites. Les mesures effectuées entre le "standing crop" maximal (septembre 1992) et la fin de la saison sèche (mai 1993) indiquent à Yabo des réductions de 24 à 32% de la nécromasse incluant les pertes de poids liées à la chute des semences. Si les pertes de poids liées à la chute des semences peuvent être estimées entre 20 et 29% sur la base des mesures effectuées au cours de la saison des pluies 1993 (Tableau 7.5), on créditerait seulement de 3 à 4% les pertes de biomasse due à l'activité de la macro-faune du sol. Penning de Vries et Djitéye (1982) estiment cette diminution à 15% au maximum sur les pâturages entièrement protégés.

L'activité des termites n'a pas été étudiée; elle semble cependant d'autant plus importante que la matière végétale est rare ou riche en éléments minéraux: la nécromasse des parcelles précédemment fertilisées au NPK (parcelles de 16 m² contenant en moyenne 16,5 kg M.S., ou 10300 kg/ha, à la floraison) a en effet été entièrement consommée entre novembre 1992 et avril 1993, alors que celle issue de la végétation non fertilisée atteignait encore jusqu'à 4000 kg/ha en fin de saison sèche.

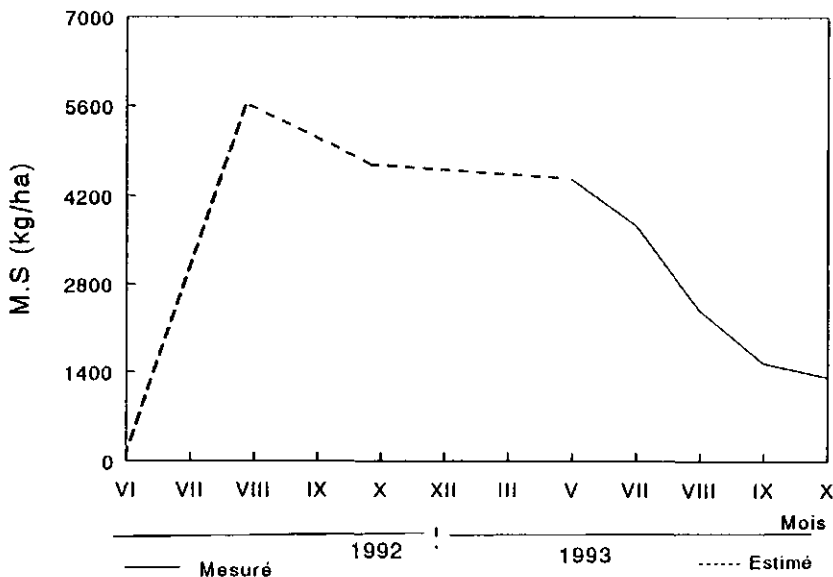


Figure 8.4 Cycle de la phytomasse entre juin 1992 et octobre 1993. Situation moyenne d'une parcelle à végétation homogène: AM et IN inclus.

La saison des pluies suivante

C'est la principale période de recyclage de la nécromasse: l'activité de récolte des termites est beaucoup plus intense en fin de saison sèche pendant que les premières pluies accélèrent le pourrissement de la litière (Breman et de Ridder, 1991). L'installation des pluies et le développement d'une nouvelle végétation active favorisent à nouveau les conditions de pourrissement et d'humification de la nécromasse résiduelle. Ainsi à Yabo, des observations sommaires ont montré que la nécromasse résiduelle de la saison 1992 a subi une diminution de 20% environ entre fin Avril et mi-juillet 1993. Puis, des mesures plus suivies sur placettes appariées ont permis de constater que 60 à 80% de la nécromasse disponible mi-juillet était recyclée au 15 octobre. En définitive, environ 80% de la nécromasse disponible à la fin de la saison sèche a été recyclée au cours de l'hivernage suivant: il est resté en moyenne 1300 kg/ha (700 à 3000 kg/ha selon les endroits) de litière de l'année précédente à la fin de l'hivernage 1993. La figure 8.4 illustre le cycle de la phytomasse tel qu'issu des observations et calculs entre le stade de la biomasse maximale 1882 et la fin de l'hivernage 1993, en supposant une situation de départ au début de l'hivernage 1992.

Les remontées d'éléments nutritifs par les ligneux.

De nombreux auteurs font appel à la capacité des végétaux pérennes à exploiter l'eau et les éléments nutritifs inaccessibles aux plantes herbacées, pour expliquer leur rôle dans la production et la stabilité des écosystèmes (agro)-sylvo-pastoraux sahéliens: Duchaufour et Lovering cités par Roose, 1981, de Ridder et al., 1982, Kessler et Ohler, 1983, Kessler et Breman, 1991, Breman et Kessler, 1994. Les analyses de sols à Yabo montrent que des réserves non négligeables d'éléments nutritifs (N,P et K notamment) sont présentes dans les horizons ≥ 100 cm. (Tableau 8.1). Par ailleurs, les mesures de la biomasse racinaire montrent qu'environ 90% des racines des herbacées se trouvent dans les 30 premiers cm du sol; seules les herbacées pérennes, *Andropogon gayanus* notamment, exploitent jusqu'à 80-100 cm de profondeur. En revanche, le suivi de l'enracinement d'une espèce ligneuse comme *Acacia seyal* (60% de la végétation ligneuse de la station) a permis de constater que les jeunes plantules de 3 mois ont des racines pouvant atteindre 110 cm de profondeur; de même, en Septembre 1993, ces racines (les plus fines) ont même été observées à 2,90 m de profondeur pour des sujets de 2 à 3 ans dans la parcelle "90P". On peut donc considérer que l'évaluation de la biomasse foliaire produite annuellement permette d'estimer les quantités d'éléments nutritifs susceptibles d'être remises à la disposition du système à partir des couches profondes du sol.

Le caractère annuel du bilan recherché explique la limitation aux seules immobilisations par les feuilles des ligneux. Les immobilisations dans le bois ne sont en effet pas immédiatement disponibles dans le calcul d'un bilan annuel. Ainsi l'estimation de la biomasse foliaire des ligneux en fin d'hivernage 1992, dans les parcelles aménagées en 1990, (Tableau 7.10) a servi de base aux calculs. Les analyses des taux de N, P et K dans la biomasse foliaire ont permis d'obtenir les quantités de nutriments susceptibles d'être recyclées en surface. En tenant compte du fait que la biomasse foliaire en fin d'hivernage représente 75 à 80% de la production annuelle totale (Breman et de Ridder, 1991), on obtient les résultats suivants (Tableau 8.9).

TRAITEMENT	Biomasse kg/ha/an	Nb (%)	N Immob kg/ha/an	Pb (%)	P immob kg/ha/an	Kb (%)	K immob kg/ha/an
"90" MOYENNE PARCELLE	62	1,75	1,1	0,11	0,1	1,0	0,6
90P MOYENNE PARCELLE	184	1,75	3,2	0,11	0,2	1,0	1,8
90/AMONT	227	1,75	4,0	0,11	0,2	1,0	2,3
90P/AMONT	470	1,75	8,2	0,11	0,5	1,0	4,7
82/AM: Extrapo lation de 90P/AM	860	1,75	15,0	0,11	1,0	1,0	8,6

Tableau 8.9 Biomasse foliaire et absorption de N, P et K par les feuilles de la végétation ligneuse spontanée dans les parcelles en régénération de 2 ans. Valeurs extrapolées au traitement 82/AM. Forêt classée de Yabo, 1992.

Breman et de Ridder (op cit) estiment que le taux d'azote des feuilles des ligneux varie, en fin de la période des pluies, de 2,2% dans la zone soudanienne à 2,5% au sud du Sahel. Les valeurs mesurées à Yabo (1,75%) et les quantités calculées ont probablement été sous-estimées, en raison de la date de récolte (fin octobre) et de l'âge vieillissant des feuilles, elles-mêmes issues de sujets très jeunes. Néanmoins, ces chiffres illustrent l'importante régénération ligneuse qui caractérise les processus biologiques en cours dans ces espaces aménagés; ils illustrent aussi l'incidence de l'intensité des mesures de C.E.S., notamment le paillage, sur cette régénération après seulement deux saisons des pluies.

Les remontées biologiques d'éléments nutritifs s'entendent aussi dans le rôle joué par la macrofaune (termites et vers de terre) dans les remaniements des couches superficielles du sol. Nous avons, dans le cas précis, peu de données disponibles pour en apprécier l'importance. Cependant, on signalera que les observations faites dans les savanes de Saria et Gonsé entre 1976 et 1980 font état de faibles quantités de minéraux annuellement mobilisées, en raison du contraste climatique prononcé et de la courte durée de la saison humide: 0,3 à 0,8 kg/ha de N; 0,1 kg/ha de P et 0,4 à 0,5 kg/ha de K. (Roose, 1981).

La fixation symbiotique de l'azote

Au cours des deux premières saisons de production qui ont suivi l'aménagement (1991 et 1992), les observations ont révélé que dans les parcelles nouvellement traitées, la contribution spécifique (CSiM) des légumineuses dans la biomasse herbacée était de 6% en "AM" où le recouvrement est homogène. Entre les diguettes, cette CSiM variait considérablement selon le niveau de recouvrement et les années, alors qu'elle demeurait aussi constante dans la végétation naturelle témoin (4%). Dans les "vieilles" parcelles par contre (aménagement 1982), ce taux était de 10% en 1991 et de 3% en 1992. Ceci indique qu'au "standing crop" maximal en 1992, 2 à 5 kg/ha d'azote ont été biologiquement fixés en amont des diguettes (4 kg/ha en moyenne), contre 0,3 à 1 kg/ha (moyenne de 0,7 kg/ha) entre les diguettes et selon les traitements.

Les apports par les eaux de pluie

A partir de 3 années d'observations à ciel ouvert à Saria (860 mm), on estime que chaque mm de pluie ajoute aux pâturages naturels 6,3 g/ha de N, 2,4 g/ha de P et 4 g/ha de K (Roose, 1991; Roose cité par Pieri, 1989). Penning de Vries et Djitéye (1982) arrivent aux mêmes conclusions, en ce qui concerne N, à partir de données publiées entre 1952 et 1977 sur le Sahel: 6,5 g/ha/mm. Janssen (1993), quant à elle, rapporte pour la zone de Silmiougou (Kaya) des apports d'azote de 16 g/ha/mm (soit 11,2 kg/ha/an). Il apparaît donc qu'au cours des trois dernières années les apports minéraux par les eaux de pluie atteignent à Yabo 4,5 à 5 kg/ha de N, 3 kg/ha de K et 1,7 kg/ha de P. Cependant, au regard du nombre de données disponibles sur la région et des écarts entre ces données, des mesures additionnelles mériteraient d'être faites, en particulier pour le phosphore.

8.4 Le bilan (0-30 cm)

L'examen des flux positifs et négatifs montre que le bilan des éléments nutritifs est significativement influencé par l'intensité des mesures de C.E.S. deux années après leur mise en place. Sur la base des données de la saison de croissance 1992, une approche quantitative du bilan d'azote et du bilan de phosphore a été faite. Ce bilan concerne l'horizon 0-30 cm. De même, nous avons appliqué aux différents traitements en présence l'équation théorique d'équilibre de l'azote (Penning de Vries et Djitéye, 1982) pour apprécier le "fossé" qui sépare la situation actuelle d'un équilibre nutritif théorique (en ce qui concerne l'azote) dans les conditions d'une protection totale contre les feux et l'exploitation.

En dressant le bilan de N et P, il s'agit d'illustrer les tendances du cycle annuel des éléments nutritifs tel qu'il est influencé, dans l'horizon 0-30 cm, par les processus physiques et biologiques liés à la régénération de ces espaces. Ces bilans sont établis sur la base de l'hétérogénéité créée par les mesures de C.E.S. et de l'intensité de celles-ci. Ainsi, ont été considérés les compartiments "Amont" (AM) et inter-diguettes (IN) pour chacune des trois parcelles:

- l'aménagement "82": diguettes en terre isohypses simples construites en 1982 avec plantation en 1984 de haies vives en aval des ouvrages;
- l'aménagement "90": diguettes en terre isohypses simples construites en novembre 1990;
- l'aménagement "90P": diguettes isohypses en terre construites en novembre 1990 avec paillage de l'espace inter-diguettes.

Le bilan a consisté à faire la balance des flux entrants et sortants de chaque compartiment à partir des valeurs mesurées au cours de la saison 1992 et des données de la littérature récente sur la région. Comme on le constate, il s'agit du bilan annuel à un stade de régénération donné des sols (2 ans), qui est basé sur les transferts spatiaux d'éléments nutritifs entre les compartiments "IN" et "AM" d'une part et entre chacun de ces compartiments et l'environnement "extérieur" d'autre part.

8.4.1 Le bilan d'azote

Les observations précédentes ont montré que même si les sols étudiés sont relativement carencés en N et P, c'est surtout la disponibilité de N pour les plantes qui constitue le facteur le plus limitant de la production; le tableau 8.10 résume les résultats des calculs basés sur la superficie relative de chaque traitement dans la parcelle. Si le ruissellement né dans les espaces inter-diguettes est reporté dans un espace plus limité (1 à 2 m de large) en amont des ouvrages anti-érosifs, les sédiments véhiculés par l'eau sont, quant à eux, progressivement retenus par la végétation à l'approche de l'espace "AM". De sorte que la surface située en AM et bénéficiant de ce report de sédiments est généralement plus large que celle où s'accumule l'eau de ruissellement. Le calcul des apports par les sédiments considère que 1/4 au moins de l'espace inter-diguettes situé vers l'amont de chaque ouvrage isohypse bénéficie de ces apports; c'est ce qui ressort des mesures effectuées à la fin de l'hivernage 1992 sur la largeur moyenne de la bande de végétation située en amont des diguettes dans la parcelle "90" aménagée sans paillage. L'interprétation de ce tableau peut s'appuyer sur deux hypothèses:

1. Sur la base des pertes moyennes par lixiviation de 27 à 37 kg/ha/an en amont des diguettes, le bilan laisse apparaître une situation encore globalement déficitaire dans l'ensemble des parcelles aménagées. Avec un couvert végétal abondant et une production de biomasse nettement plus élevée, l'amont des ouvrages connaît, malgré l'importance du lessivage supposé, un bilan d'azote plus favorable que l'espace inter-ouvrages, encore largement influencé par les pertes dues à l'érosion. La protection contre le bétail et le feu permet en effet de restituer 90% de l'azote immobilisé annuellement par la végétation herbacée. L'importante érosion observée en "IN" procède aussi à un transfert de sédiments et de nutriments vers l'amont des ouvrages où ils s'accumulent: pour 10 kg de N mobilisés par l'érosion et le ruissellement au cours de l'hivernage 1992, 8 kg sont retenus en amont des diguettes dans les parcelles nouvellement aménagées et 7,5 kg dans la parcelle "82" dont les ouvrages sont légèrement plus érodés. De même, le développement spectaculaire de la végétation ligneuse en "AM" permet, au bout de deux années, de recycler en surface 4 à 8 kg/ha de N pendant que la haie vive de 8 ans restitue 15 kg/ha en amont des diguettes dans la parcelle de 1982. Ainsi, seul l'aménagement de 1982 présenterait un résultat global presque équilibré. Le couvert végétal moins développé dans la parcelle "90" favorise l'érosion des espaces IN et entraîne une accumulation plus importante de sédiments en AM. Comparativement aux autres, cette parcelle présente donc, logiquement, un "bilan" plus élevé en AM, alors que son bilan global est le moins favorable.
2. En revanche, si on suppose les pertes par lixiviation nulles en amont des diguettes (ce qui n'est pas non plus vraisemblable), les espaces "AM" connaîtraient, dès la seconde année qui suit l'aménagement, un bilan azoté globalement positif, même s'il reste négatif dans les espaces "IN".

Aucune des deux hypothèses n'est cependant vraie dans son ensemble. Même si la première pourrait surestimer les pertes par lessivage, la seconde les sous-estime manifestement. En d'autres termes, le bilan réel se situe bien quelque part entre les deux.

	AMONT DES DIGUETTES				INTER-DIGUETTES			
	"90"	"90P"	"82"	Moyen "AM"	"90"	"90P"	"82"	Moyen "IN"
IMMOB/VEGETAT	42,5	38,6	34,7	38,8	11,8	29,2	22,0	21,1
EROSION & RUISS.	8,1	7,2	9,6	8,0	14,1	12,0	13,0	13,0
LIXIVIATION	36,0	37,0	27,0	34,4	0,0	0,0	0,0	0,0
VOLATILISATION	2,6	2,7	2,3	2,6	0,7	1,8	1,3	1,3
TOTAL (-)	89,2	85,5	73,6	83,8	26,6	43,0	36,3	35,4
RESTITUTION / SEMENCES	34,5	31,3	28,1	31,5	9,6	23,7	17,8	17,1
RECYCL. LITIERE	3,6	3,0	2,7	3,2	1,0	2,8	2,1	2,0
FIXAT.SYMBIOT.	4,9	4,4	2,0	3,7	0,5	1,3	1,0	0,9
APPORTS/PLUIE	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
REMONTÉES / LIGNEUX	4,0	8,2	15,0	8,1	0,7	2,7	1,0	1,5
APPORTS / SEDIMENTS	42,3	36,0	39,0	39,0	-	-	-	-
TOTAL (+)	93,8	87,4	91,3	90,0	16,3	35,0	26,4	26,0
BILAN "AM" ou "IN"	+4,6 +40,6*	+2,0 +39,0*	+17,7 +44,7*	+6,2 +40,6*	-10,3	-8,0	-9,9	-9,4
BILAN GLOBAL					-5,3 +6,7*	-4,7 +7,7*	-0,7 +8,3*	

* résultat basé sur l'hypothèse de pertes nulles par lixiviation

Tableau 8.10 Le bilan d'azote (en kg/ha pour la couche 0-30 cm) pour la période octobre 91- octobre 92 à la station de Yabo: somme des flux négatifs (TOTAL -xx) et des flux positifs (TOTAL +xx). La fixation symbiotique ne concerne que celle provenant des bactéries associées aux légumineuses. Le bilan global concerne la parcelle prise dans son ensemble, dont 1/4 de la superficie serait sous "influence" des diguettes.

Dans tous les cas, il apparaît clairement que les différences observées entre les deux compartiments ou entre les traitements eux-mêmes sont le fait de deux processus: les transferts d'éléments nutritifs par le ruissellement et l'érosion des espaces "IN" vers l'amont des diguettes d'une part, et d'autre part les pertes par lixiviation potentiellement élevées dans les espaces "AM", en raison précisément de l'importance de ce ruissellement en "IN". Dans ces conditions, l'effet de l'intensité des mesures de C.E.S. sur le développement du couvert végétal sera le paramètre déterminant de la rapidité avec laquelle le cycle des éléments nutritifs se stabilisera dans un premier temps pour devenir "exédentaire" ensuite.

Cette stabilisation ne peut en effet intervenir que par la réduction du ruissellement et des pertes par érosion en "IN" qui entraînera une réduction encore plus notable des pertes par lessivage en amont des diguettes. Le résultat peut alors devenir "excédentaire" avec l'accroissement des remontées minérales par la végétation ligneuse, en "AM" d'abord et sur l'ensemble de la parcelle ensuite. Ainsi en comparant la parcelle aménagée en 1982 à celles de 1990 on observe que, malgré 10 ans de "régénération", le bilan nutritif reste moins favorable dans l'espace "82/IN" (-10,1 kg/ha/an) que dans le "90P/IN" (-8,0 kg/ha/an). Le paillage a contribué en 2 saisons des pluies à réduire plus les écarts entre l'amont et les espaces inter-diguettes dans la parcelle 90P. Par contre, l'espace inter-diguettes de la parcelle "82" semblait avoir atteint en 1991 une sorte "d'équilibre instable" caractérisé par une relative stagnation du couvert végétal (autour de 50%) et de la production; seules des mesures nouvelles (mulching) prises en 1992 et 1993 ont permis d'accroître le couvert herbacé et la production dans cette parcelle. Les haies vives plantées en aval des ouvrages en 1984 apparaissent en revanche, dans cette parcelle, comme le principal facteur d'enrichissement de la couche superficielle (0-30 cm) du sol.

8.4.2 Bilan d'azote et conditions d'équilibre

En considérant un système théoriquement équilibré où l'ensemble des pertes d'azote enregistrées annuellement sont compensées par les apports extérieurs au système, Penning de Vries et Djitéye (1982) proposent de traduire une telle situation par l'équation suivante: $f \times NB = NA$ dans laquelle

- NB est la quantité de N (kg/ha), dans la biomasse aérienne totale au moment de la floraison, qui est effectivement absorbée du sol pendant la saison de croissance;
- NA la quantité de N (kg/ha) qui est ajoutée annuellement au système (par les eaux de pluie, la fixation par les algues, la fixation symbiotique dans les légumineuses, la fixation par les bactéries libres et associées aux non légumineuses);
- f la fraction de NB qui disparaît annuellement du système et $f \times NB$ la quantité de N annuellement perdue du système.

Sur la base des valeurs du taux de N dans la biomasse et les légumineuses mesurées sur le terrain pour la strate herbacée, et d'une estimation aussi complète que possible de NA, nous avons essayé de déterminer pour les différents traitements, les valeurs de $f \times NB$ et de f pour lesquelles il y aurait théoriquement équilibre, puis de les comparer aux pertes effectives calculées ou mesurées au cours de la période 1991/92 (pertes par érosion, volatilisation et lixiviation). Nous avons pour cela suivi la démarche développée par de Ridder et al. (1982): en tenant compte des apports d'azote liés à la pluviosité, à la fixation par les algues sur la surface du sol, les bactéries libres et symbiotiques, ils ont abouti à la transformation de l'équation ci-dessus en:

$$NB = \frac{0,0085 \times P}{f(1 + 0,00025/Nb) - (F \times N_{leg} \times L)/Nb - 0,00035/Nb}$$

dans laquelle Nb représente le taux d'azote dans la biomasse aérienne au moment de la floraison, N_{leg} le taux de N dans les légumineuses au même moment, L la fraction des légumineuses dans la biomasse totale, F la fraction de N dans les légumineuses qui est fixée par le *Rhizobium* et P la pluviométrie annuelle moyenne (de Ridder et al., 1982 p 142-151).

Les valeurs utilisées dans cet exercice sont données au Tableau 8.11. Pour réduire les trop grandes disparités au sein des traitements IN (où on observe un ruissellement dont la valeur moyenne diffère légèrement selon les parcelles), et entre ces traitements et les traitements AM où s'accumulent des quantités d'eau égales de 5 à 8 fois P, on a décidé de retenir dans le calcul de NA, et pour tous les traitements, la pluviométrie ($P = 701,4$ mm) au lieu de l'infiltration réelle, ainsi qu'une valeur de F égale à 0,75. Retenir les valeurs de l'infiltration réelle aurait en effet conduit à des surestimations grossières de NA, en particulier en amont des diguettes. Nous y reviendrons.

Traitement	Biomasse s. légum. (kg/ha)	Légumineuses (kg/ha)	Biomasse Totale (kg/ha)	Nb (%)	Nleg (%)	NB (Kg/ha)	L(%)
90/AM	6110	390	6500	0,67	1,66	47,4	6
90/IN	1274	26	1300	0,92	2,36	12,3	2
90P/AM	5550	350	5900	0,67	1,66	43,0	6
90P/IN	3125	75	3200	0,92	2,36	30,5	2,3
82/AM	5090	160	5250	0,67	1,66	36,7	3
82/IN	2350	50	2400	0,92	2,36	23,0	2
Moy.AM	5600	300	5900	0,67	1,66	42,5	5
Moy.IN	2250	50	2300	0,92	2,36	22,0	2,1

Tableau 8.11 Les données utilisées dans l'équation d'équilibre de l'azote. Biomasse aérienne sans les légumineuses, biomasse aérienne des légumineuses et biomasse aérienne totale, taux de N dans la Biomasse et les légumineuses et proportion des légumineuses dans la biomasse totale sont les données mesurées au stade de la biomasse maximale en 1992. Forêt classée de Yabo, Burkina Faso.

L'exercice a permis d'aboutir aux résultats du Tableau 8.12. Ces résultats, s'ils sont basés sur l'hypothèse de pertes par lessivage nulles ou négligeables en amont des diguettes, confirmeraient ceux du Tableau 8.10: en amont des diguettes, les pertes annuelles d'azote (en 1992) seraient inférieures à ce qu'on pourrait appeler le "seuil d'équilibre" ($fxNB$), sauf pour le traitement 82/AM. En d'autres termes, il serait possible d'exploiter une partie des productions en amont des ouvrages, à concurrence de la différence entre $fxNB$ et les pertes effectives calculées, sans porter préjudice au niveau de production actuel.

Le cas du traitement 82/AM, qui représente l'aménagement le plus ancien du site, pourrait s'expliquer par l'influence des espèces ligneuses (la haie vive de 8 ans) sur la production des herbacées en amont des diguettes. En supposant l'existence d'une concurrence entre les deux types de végétation, soit pour l'obtention des éléments nutritifs, soit pour la lumière, la formule d'équilibre utilisée connaît une exception (Bremen et de Ridder, 1991): la formule proposée dérive de la précédente et prend en compte l'absorption de N à la fois par les herbacées et les feuilles des ligneux (N_{LH} en lieu et place de NB) et l'infiltration.

Traitement	Equation NB	f calculé an ⁻¹	NB mesuré kg/ha	fxNB théorique kg/ha/an	P.E.C kg/ha/an
90/AM	0,0082P/(f-0,16) (f > 0,16)	0,28	47,4	13,3	46,7 10,7*
90/IN	0,0083P/(f-0,07) (f > 0,07)	0,54	12,3	6,6	14,8
90P/AM	0,0082P/(f-0,16) (f > 0,16)	0,29	43,0	12,5	46,9 9,9*
90P/AM + Biom. foliaire ligneux	0,0082P/(f _{ln} -0,13) (f > 0,13)	0,26	51,2	13,3	
90P/IN	0,0083P/(f-0,08) (f > 0,08)	0,27	30,5	8,2	13,8
82/AM	0,0082P/(f-0,10) (f > 0,10)	0,26	36,7	9,5	38,9 11,9*
82/AM + Biom. foliaire ligneux	0,0083P/(f _{ln} -0,08) (f > 0,08)	0,19	51,7	9,8	
82/IN	0,0083P/(f-0,07) (f > 0,07)	0,33	23	7,6	14,3
Moy/AM	0,0082P/(f-0,14) (f > 0,14)	0,28	42,5	11,9	45,0 10,6*
Moy/IN	0,0083P/(f-0,08) (f > 0,08)	0,34	22	7,5	14,3

Tableau 8.12 Bilan d'azote et condition d'équilibre. Valeurs des pertes annuelles de N (fxNB) -en kg/ha/an- pour lesquelles la situation des différents traitements rencontrés à Yabo serait en équilibre dans leur régime actuel de gestion caractérisé par la valeur mesurée de NB (NB mesuré) et une protection totale contre l'exploitation et les feux. Ces valeurs, comparées aux pertes effectives calculées (P.E.C) permettent de visualiser le "fossé" qui sépare la situation actuelle de l'équilibre théorique à atteindre (P.E.C > fxNB). Le premier chiffre des valeurs des P.E.C correspond à l'hypothèse de pertes d'azote par lixiviation de 27 à 37 kg/ha dans les espaces "AM" et les chiffres marqués d'une (*) à l'hypothèse d'un lessivage de N nul ou négligeable en amont des diguettes. Situation à la fin de la saison de croissance 1992. Forêt classée de Yabo.

En considérant, dans notre cas, que l'infiltration est au plus égale à P et, en extrapolant au traitement 82/AM les données de biomasse foliaire des ligneux et du taux de N dans cette biomasse foliaire (cf. Tableau 8.9), on aboutit à des valeurs de f (désigné par f_{ln}) et de f_{ln} × N_{LH} respectivement de 0,19 an⁻¹ et 9,8 kg/ha/an pour le traitement 82/AM et 0,26 an⁻¹ et 13,3 kg/ha/an pour le traitement 90P/AM (Tableau 8.12). Ces résultats améliorent davantage les conclusions concernant le traitement 90P/AM mais ne les changent pas fondamentalement en ce qui concerne 82/AM: les pertes effectives calculées pour ce traitement (P.E.C = 11,9 kg/ha/an) restent plus élevées que la valeur de f_{ln} × N_{LH}. Cette situation ne peut s'expliquer que par l'importance des pertes par érosion hors du système. Ces pertes sont déterminées par la hauteur des diguettes (30 cm) qui est elle-même influencée par l'érosion des ouvrages et le comblement des fossés amont dans la parcelle "82" (voir Chapitre 6.2.2).

Ainsi donc, dix ans après l'aménagement (sans paille), c'est l'importance du ruissellement et de l'érosion dans l'espace IN qui constitue encore le point faible du dispositif. Pour tous les traitements en effet, les pertes enregistrées entre les diguettes sont bien plus élevées que le "seuil d'équilibre"; ce qui traduit bien l'importance des pertes d'éléments nutritifs liées à un couvert végétal insuffisant. Le traitement 90P/IN se présente logiquement comme celui qui soit le plus proche d'un équilibre azoté théorique.

En revanche, si on s'appuie sur la seconde hypothèse de pertes par lessivage variant de 27 à 37 kg/ha/an en amont des diguettes, c'est l'espace 82/AM qui se rapprocherait le plus d'un équilibre manifestement encore lointain en raison, cette fois, de la réduction des pertes par drainage liée à la présence des haies vives en aval des diguettes. Ces conclusions sont conformes au bilan calculé sur les bases de la même hypothèse.

Les valeurs de f obtenues à partir de la seule strate herbacée varient de 0,26 à 0,29 en amont des diguettes. Elles sont nettement inférieures aux valeurs des "pertes totales" observées sur un trajet nord-sud au Mali, où la pluviométrie varie de 400 à 1100 mm/an: respectivement 0,50 à 0,60 (Penning de Vries et Djitéye, 1982, p.305). En revanche, elles sont légèrement supérieures à ce que ces auteurs ont appelé "pertes annuelles diverses" qui excluent les pertes par le feu et le bétail et qui, dans les conditions pluviométriques semblables à celles de Yabo (600 à 800 mm), sont comprises entre 0,20 (à 600 mm) et 0,25 (pour 700 à 800 mm). Le niveau élevé de la production en AM d'une part et la protection totale dont fait l'objet le site de Yabo d'autre part justifient bien cette différence avec les pertes totales observées par ces auteurs. Les pertes enregistrées excluant alors le feu et l'exploitation par le bétail, c'est l'importance des pertes par lixiviation en amont des diguettes qui expliquerait les valeurs supérieures aux "pertes diverses" observées ailleurs dans des conditions pluviométriques semblables.

Même en basant les calculs de NA sur une infiltration égale à 1,5P en amont des diguettes, en lieu et place de P, les conclusions ci-dessus ne changent pas radicalement: les valeurs de f obtenues sur la base de la seule strate herbacée s'échelonnent de 0,34 (90/AM et 82/AM) à 0,36 (90P/AM); elles vont de 0,25 (82/AM) à 0,31 (90P/AM) lorsque les immobilisations dans la biomasse foliaire sont prises en compte.

Dans les espaces inter-diguettes par contre, les valeurs de f obtenues vont de 0,27 pour le traitement 90P/IN à 0,54 pour 90/IN, soit du simple au double. Ces valeurs traduisent pour le traitement 90/IN un faible niveau d'utilisation, par les végétations, des quantités de N annuellement apportées au système. Les pertes par exploitation étant ici aussi exclues, ces valeurs illustrent encore mieux l'effet du paillage qui, après 2 ans, présente un niveau d'utilisation de N plus intéressant que l'aménagement de 10 ans effectué sans paillage ($f = 0,33$). La prise en compte des quantités de N immobilisées dans la biomasse foliaire des végétations ligneuses se traduit par une réduction de la valeur de f en même temps que NB est plus élevée; ceci suggère donc que la strate ligneuse contribue à améliorer la stabilité des espaces en régénération.

Au regard de la place de l'azote dans le processus de production, ces résultats montrent le fossé qui sépare encore la situation actuelle, particulièrement en "IN", d'un équilibre minéral, même basé sur la seule strate herbacée et un régime de protection absolue. Après deux saisons de végétation, le traitement "90P/IN" est cependant plus proche d'un état "d'équilibre" que les espaces aménagés sans paillage, y compris le traitement "82/IN" âgé de 10 ans. Cela traduit plus généralement la meilleure tendance du processus de régénération dans la parcelle "90P". La taille réduite de l'aménagement effectué en 1982 et son isolement,

de 1982 à 1990, dans le sous-bassin versant dégradé ainsi que l'absence de protection au cours des deux premières années de sa mise en place, ont certainement été des facteurs déterminants de l'évolution et de l'état actuel de cette parcelle.

8.4.3 Le bilan de phosphore

Selon les mêmes principes que pour l'azote, le bilan du phosphore a été dressé pour la période octobre 1991-octobre 1992 ainsi que le montre le Tableau 8.13. En raison de sa faible solubilité, le phosphore ne migrerait qu'en petites quantités (Roose, 1981; Pieri, 1989). Dans le bilan qui a été calculé, les pertes liées au drainage sont en conséquence considérées négligeables. Ces résultats confortent à tous points de vue les conclusions déjà tirées pour le bilan d'azote dans l'hypothèse de pertes négligeables par lixiviation, à la différence que les résultats du bilan de P tels que résultant des calculs ci-dessus traduisent plus la réalité du terrain.

	AMONT DES DIGUETTES				INTER-DIGUETTES			
	"90"	"90P"	"82"	Moy.A M	"90"	90P	"82"	Moy. IN
IMMOBIL./VEGETAT.	4,0	3,6	3,2	3,6	0,8	2,0	1,5	1,4
EROSION & RUISS.	1,4	1,2	1,7	1,4	2,3	2,1	2,2	2,3
DRAINAGE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL (-)	5,4	4,8	4,9	5,0	3,1	4,1	3,7	3,7
RESTIT./SEMENCES	3,2	3,0	2,6	2,9	0,6	1,6	1,2	1,1
RECYCL. LITIERE	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,3	0,2	0,2
APPORT/PLUIE *	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
REMONTÉES / LIGNEUX	0,2	0,5	1,0	0,6	0,05	0,2	0,1	0,2
APPORTS/SEDIMENT	6,9	6,3	6,6	6,9				
TOTAL (+)	12,5	12,0	12,4	12,6	2,5	3,8	3,2	3,2
BILAN	+7,1	+7,2	+7,5	+7,6	-0,6	-0,3	-0,5	-0,5

* d'après Roose, cité par Pieri (1989)

Tableau 8.13 Le bilan de phosphore pour la période Oct.91- Oct.92 à la station de Yabo: somme des flux négatifs (total -xx) et des flux positifs (total +xx).

Néanmoins, des interrogations subsistent quant aux valeurs des apports de P par les pluies. Au delà du nombre relativement limité des informations sur le sujet en Afrique soudano-sahélienne, les chiffres sont souvent bien différents selon l'environnement local et les conditions de mesure. Roose, (1981) cité par Pieri (1989) rapporte 2,44 g/ha/mm de pluie pour Saria; Pieri (1989) trouve, pour 4 stations du Sénégal, 1,6 g de P par ha et par mm de pluie tandis qu'à Silmouougou (Kaya, Burkina Faso), Janssen (1993) mesure 0,0 g/ha/mm.

Pieri souligne en effet que les quantités minérales provenant des poussières et des pluies semblent dépendre de la proximité de l'océan, voire de celle d'installations industrielles dont les fumées peuvent être entraînées sur quelques centaines de km par les vents dominants. Si certains auteurs considèrent que ces apports sont surtout le résultat de la redistribution de ces poussières, il pense, pour sa part, que ce phénomène ne serait pas aussi général en ce qui concerne les savanes au sud du Sahara. Malgré tout, ces différences sont là et jouent un rôle non négligeable lorsqu'il s'agit d'approches écologiques détaillées du bilan minéral dans la région.

8.5 Conclusions

Les analyses et observations faites dans ce chapitre montrent que les sols dégradés des espaces sylvo-pastoraux possèdent un potentiel productif quelquefois élevé, dont le dysfonctionnement hydrique anéantit l'expression. La mise en oeuvre de mesures de C.E.S. en général, et particulièrement d'ouvrages isohypses en terre modifie le régime hydrique et influence considérablement les flux et le bilan des éléments nutritifs. Ainsi l'amont des ouvrages d'absorption que constituent ces diguettes apparaît très vite comme le lieu de concentration non seulement de l'eau mais aussi des éléments nutritifs. Cette concentration est favorisée par les transferts liés à l'érosion et au ruissellement dans les espaces inter-ouvrages.

Les réserves contenues dans les 30 premiers cm de sol atteignent 2500 à 3000 kg/ha d'azote total et 20 à 30 kg/ha de Phosphore facilement assimilable. Cependant, les végétations herbacées n'en absorbent respectivement que 1,5% et 25% pendant une saison de croissance. Les quantités considérables d'eau accumulées en amont des diguettes ont une incidence négative sur la disponibilité et l'absorption de N qui elle-même limite l'absorption de P. La faible teneur en N (et P) dans la biomasse (comparativement aux espaces inter-diguettes) semble résulter à la fois des difficultés d'absorption par les végétations qui pourrissent sous l'effet des inondations que d'une faible disponibilité de l'azote: le volume impressionnant des percolations profondes (environ 6 fois la pluviométrie annuelle en 1992) laisse en effet supposer des pertes considérables par lixiviation, au moins en début d'hivernage. Les essais de fertilisation phosphatée permettent en effet de penser que la disponibilité réelle de N est < 2% en amont des diguettes (1,6%), ce qui signifie un taux de récupération naturelle, par les végétations herbacées, de près de 90%. Cette situation provoque une dilution maximale de l'azote (et du phosphore) dans la biomasse et une limitation importante de la production. Une fertilisation azotée (NPK), à haute dose de N sous forme d'urée (400kg N /ha) a permis en effet un taux de récupération, par les végétations herbacées, de près de 40% sous un drainage de 3000 à 4000 mm!

Le potassium semble, quant à lui, l'élément le plus disponible pour les plantes dans ces conditions de croissance. En raison d'une "sur-consommation" par les végétations, dès lors que les conditions d'alimentation en eau sont favorables, le potassium apparaît cependant comme l'élément dont les risques d'épuisement sont aussi les plus élevés, en particulier en cas de fertilisation azotée ou phosphatée.

Pour les parcelles de régénération de la forêt classée de Yabo, le bilan annuel des transferts minéraux, et particulièrement azotés, entre les compartiments AM et IN d'une part et entre ces compartiments et le milieu environnant d'autre part, est globalement négatif au cours des deux premières années du processus. A l'amont des diguettes, le bilan d'azote est surtout influencé par les pertes dues à la lixiviation, alors que c'est la réduction du ruissellement et de l'érosion qui peuvent l'améliorer dans les espaces inter-ouvrages.

Dans les espaces situés entre les diguettes en effet, la lenteur des processus de revégétation entretient une érosion et des pertes chimiques élevées: 10 à 15 kg de N et 2 à 3 kg de P par ha; avec un bilan encore largement négatif après deux ans. En dehors de mesures d'accompagnement capables d'accélérer l'installation du couvert végétal dans ces espaces, la situation évolue difficilement et peut demeurer déficitaire même après dix ans. En revanche, le paillage (ou le mulching) entre les ouvrages isohypses a conduit, après deux ans seulement, à un bilan d'azote plus favorable, dans un régime de protection contre l'exploitation et le feu, alors que le bilan du phosphore, lui, paraît déjà équilibré.

Ces mesures d'accompagnement, en accélérant une installation plus homogène de la végétation, non seulement réduisent les pertes chimiques par érosion mais aussi favorisent l'apparition de la végétation ligneuse dont le rôle dans le bilan nutritif apparaît déjà comme non négligeable après deux saisons de croissance. L'évolution des termes du bilan hydrique au cours des deux premières saisons des pluies et celle du niveau de production des végétations ligneuses laissent entrevoir, à moyen terme, une stabilisation des bilans minéraux dans l'horizon de surface (0-30 cm) si le régime actuel de gestion est maintenu. L'accroissement du couvert végétal dans les espaces inter-diguettes et ses répercussions sur l'infiltration ont conduit à une augmentation de l'ETR, c'est-à-dire à une meilleure utilisation de l'eau et des éléments nutritifs par les plantes. Le développement, en amont des ouvrages d'absorption, d'une strate ligneuse qui, au même moment, a entraîné un écrêtage des excédents hydriques et une réduction sensible du damage, devrait se traduire, à terme, par une réduction proportionnelle des pertes d'azote par lixiviation et par un accroissement des immobilisations dans la biomasse foliaire qui constituent une source d'enrichissement non négligeable du système.

9 Conclusions et recommandations

L'histoire des projets de développement agricole en général, et des programmes de C.E.S. mis en oeuvre au Burkina en particulier, indique que la préoccupation actuelle des acteurs est de parer urgemment à l'épuisement des sols cultivés et de garantir ainsi une production minimale dite auto-suffisante. Si le souci de sécurité alimentaire peut justifier cette orientation des projets agricoles, la dégradation continue des espaces sylvo-pastoraux sous l'effet de la surexploitation est cependant une source de préoccupation pour l'avenir même des systèmes de production rurale. Le processus, qui a pour origine la déforestation et la réduction de la couverture biologique du sol, se traduit en effet par un développement exponentiel des surfaces nues et encroûtées, naturellement irrécupérables. Les superficies défrichées augmentent chaque année et concernent de plus en plus des terres marginales, pendant que les espaces sylvo-pastoraux connaissent un recul encore plus impressionnant. Or, en dehors de l'utilisation massive d'engrais chimiques (ce qui paraît utopique au regard des conditions socio-économiques actuelles des populations), les transferts organiques et minéraux en provenance de la "brousse" auraient pu constituer la seule voie d'intensification accessible aux populations. L'exploitation familiale au Burkina Faso est presque toujours basée sur les cultures pluviales et un élevage plus ou moins développé qui contribue à l'entretien de la fertilité des champs de case. Un meilleur contrôle des mouvements du bétail pendant la journée, permettrait d'augmenter sensiblement la contribution de l'élevage - et des espaces sylvo-pastoraux - à l'entretien de la fertilité des terres agricoles. A ce titre, les E.S.P., sur le plateau central du Burkina, occupent une place au moins aussi importante que les terres cultivées. Dans la majeure partie de cette région, plus de 50% de la population a moins de 20 ans et est appelée à créer de nouveaux ménages, c'est-à-dire à défricher de nouvelles terres, lorsqu'elles existent. A moins d'une migration permanemment entretenue vers d'autres régions de moins en moins hospitalières, une catastrophe semble inévitable si des investissements massifs, pour la réhabilitation des terres dégradées en général et des E.S.P. en particulier, ne sont pas consentis.

Le statut actuel des E.S.P. et les besoins de sécurité alimentaire immédiate des populations ne favorisent pas les investissements nécessaires à leur réhabilitation. Les rares investissements fonciers constatés jusqu'ici dans les espaces sylvo-pastoraux du plateau central burkinabe sont, généralement, le fait de quelques projets publics et d'ONG. Ces aménagements de régénération des sols ont un caractère expérimental ou de démonstration: utilisant une large gamme de mesures de C.E.S., leur envergure spatiale est souvent insuffisante pour assurer un impact significatif et durable: la moitié des aménagements concerne une superficie inférieure à 10 ha. Généralement mal entretenus et mal suivis, les résultats de ces aménagements ne sont pas quantifiés. L'analyse de ces mesures de régénération a permis d'identifier un certain nombre de conditions dont la combinaison autorise le déclenchement et le développement des processus de réhabilitation de ces espaces:

- la concentration de l'eau et des semences, comme condition première pour déclencher la régénération biologique des sols;
- cette concentration est généralement assurée par des mesures physiques de type linéaire; mais à eux seuls, ces dispositifs linéaires sont insuffisants pour permettre l'extension spatiale du couvert végétal. Aussi des mesures d'accompagnement de type biologique (paillage, mulching) ou physique (travail du sol), sont-elles indispensables, dans les

espaces inter-ouvrages, pour assurer l'efficacité des aménagements et la durabilité des résultats .

- La quantité de biomasse produite et son maintien en place, au cours des premiers instants du processus de régénération, déterminent la durabilité de celui-ci. Les fonctions biologiques et physiques que remplit cette biomasse au début du processus exigent plus de quantité que de la qualité du produit.
- Stimuler le développement d'une végétation ligneuse apparait aussi comme un moyen d'accélérer et de stabiliser les processus physico-chimiques et biologiques de la régénération.
- Enfin la protection contre l'exploitation (et le feu) est une disposition indispensable à cette étape de démarrage de la régénération.

Dans un milieu expérimental représentatif des E.S.P. du plateau central et réunissant le plus grand nombre possible des conditions ci-dessus, une étude quantitative des processus de la régénération des espaces sylvo-pastoraux a été conduite pendant trois saisons des pluies. Destinée à mieux comprendre les processus qui déterminent à long terme le résultat (la réhabilitation des E.S.P.), et à identifier les facteurs susceptibles de limiter l'efficacité des mesures prises, l'étude a permis d'aboutir aux conclusions essentielles suivantes.

9.1 Les conclusions essentielles de l'étude

Notre satisfaction majeure, à l'issue de ce travail, est d'avoir cherché, parfois "à tout prix" à quantifier l'ensemble des paramètres considérés comme essentiels dans la compréhension des processus étudiés. En raison d'insuffisances inhérentes à certaines méthodes de mesures ou de difficultés matérielles ou environnementales liées à leur mise en oeuvre, un certain nombre de données chiffrées ainsi que les conclusions scientifiques qui en découlent méritent probablement d'être validés par des observations supplémentaires. Cependant, cet exercice de quantification a révélé les forces et les limites objectives de certaines hypothèses sur lesquelles nous avons, nous-mêmes par le passé, basé l'élaboration de projets de développement. Il nous indique ainsi que l'analyse quantitative est un instrument fondamental de planification dans le domaine de la gestion durable des ressources naturelles en général et de l'agriculture des pays sahéliens en particulier. L'examen des résultats des mesures effectuées pendant deux à trois années fait ressortir les conclusions particulières suivantes.

9.1.1 Sur le plan physique et hydrodynamique

On a pu constater que les sols dénudés, appelés "sols blanchis" par les populations du plateau central burkinabè, possèdent encore, en général, un potentiel de régénération (ou résilience) élevé que la disponibilité de l'eau révèle parfois de façon spectaculaire. Les caractères hydrodynamiques et chimiques de ces sols, même restés nus pendant des décennies, attestent que leur "aridité" est surtout le fait de la dégradation physique et en particulier hydrodynamique de l'horizon superficiel, consécutive à la réduction excessive du couvert végétal: l'érosion, l'encroûtement et/ou le compactage sont les manifestations de cette dégradation. En une saison des pluies, une végétation impressionnante peut s'installer, à la

seule faveur de l'amélioration de l'infiltration, et produire plusieurs tonnes de matière sèche à l'hectare.

Pour concentrer l'eau et relancer le fonctionnement hydrologique des sols dégradés, les diguettes isohypses en terre ou diguettes imperméables sont parmi les plus efficaces. Selon leurs dimensions et la pente du terrain, elles absorbent la quasi-totalité du ruissellement en provenance des espaces inter-diguettes. Par exemple, avec un taux de ruissellement moyen de 50% dans l'espaces inter-ouvrages, tout le ruissellement issu d'une pluie inférieure à 35 mm (soit jusqu'à 350 mm d'eau) est absorbé par des diguettes en terre de 35 cm de hauteur, espacées de 20 m en moyenne (pente de 1% environ). Au total, les quantités ainsi infiltrées le long des diguettes atteignent 5 à 8 fois la pluviométrie annuelle. Schématiquement, l'hétérogénéité du régime hydrique ainsi créé permet de distinguer trois situations topographiques: l'amont (AM) des ouvrages linéaires, l'aval (AV) des mêmes ouvrages et l'espace inter-ouvrages (IN).

Les flux hydriques en **amont des diguettes (AM)** sont à la mesure des quantités accumulées: sur des terrains initialement nus et secs, l'eau s'infiltré d'abord verticalement jusqu'à saturation du profil du sol. Sur les sols profonds comme ceux de Yabo et Bissiga, le front d'humidité dépasse 1,55 m de profondeur dès le début de la saison pluvieuse. La diffusion oblique (ou latérale) intervient alors de façon significative en direction des couches profondes (> 80 cm) de la zone située en aval des ouvrages. Ce processus de redistribution s'intensifie à partir du début de la période dite des "grandes pluies" (mi-juillet à début septembre) et entraîne un drainage proportionnel aux quantités infiltrées. En 1991, le drainage cumulé en amont des diguettes était estimé à 8 fois la pluviométrie totale dans les aménagements effectués en 1990; ajouté aux percolations enregistrées en aval des diguettes, cela correspond, à l'échelle d'une parcelle aménagée, à des apports supérieurs à 300 mm dans l'alimentation de la nappe phréatique. L'évapotranspiration y est constamment élevée en raison de la permanence de humidité. Elle est fonction de la nature et de l'importance du couvert végétal qui s'y développe: estimée à 70% de la pluviométrie annuelle (P) dans les parcelles nouvellement aménagées, l'ETR est supérieure à 80% de P à coté des diguettes le long desquelles est plantée une haie vive de 7 à 8 ans. Le bilan hydrique, favorable aux végétations à enracinement profond, est manifestement excessif pour les besoins des espèces annuelles qui constituent l'essentiel des végétations au démarrage du processus de régénération.

L'aval des diguettes (AV) bénéficie, dans les couches profondes (> 80 cm), de l'effet de redistribution des eaux accumulées en amont, tandis que la couche supérieure reste dépendante des flux de surface: l'infiltration, qui est fonction des états de surface, peut être négativement influencée par l'érosion progressive du corps de la diguette en terre si celle-ci reste nue. Les transferts latéraux en provenance de l'Amont s'intensifient au cours de la période des "grandes pluies"; ils se traduisent par un accroissement brusque du stock d'eau du sol pouvant donner lieu à des percolations plus ou moins importantes. L'évapotranspiration est limitée dans un premier temps à la couche supérieure (< 80 cm); avec le développement de la végétation ligneuse, elle concerne progressivement les couches plus profondes. Lorsqu'au cours de l'aménagement un fossé est pratiqué à l'aval des diguettes, le sol atteint plus rapidement le niveau de saturation et on a pu observer des percolations profondes égales à 40% de P. Sans fossé, ces percolations restent "insignifiantes" (5 à 8% de P). Le bilan hydrique, ici, est surtout favorable aux végétations pérennes à enracinement profond.

L'espace inter-diguettes (IN), qui représente souvent 80 à 90% des superficies traitées, est la portion dont l'évolution conditionne la qualité globale du bilan hydrique et, plus généralement, des processus de régénération. Lorsque le sol est nu, le ruissellement naît très vite (la pluie d'imbibition est ≤ 5 mm) et atteint en moyenne 60 à 70% de la pluviométrie annuelle totale selon le type de croûte en présence. L'érosion peut alors entraîner des pertes en terre supérieures à 20 t/ha. L'eau et les sédiments ainsi mobilisés sont transférés vers l'amont des diguettes. L'infiltration réduite et l'évaporation intense (2 mm/jour) ne favorisent guère l'installation et le développement de la végétation.

Lorsque des mesures sont prises pour améliorer l'infiltration dans cet espace, comme par exemple un paillage en 1991, le bilan hydrique devient rapidement plus favorable: le ruissellement ne représente plus que de 25 à 30% de P au cours de l'année du paillage. L'amélioration de l'infiltration se traduit par l'installation d'une végétation assez abondante. L'ETR atteint 60% des quantités infiltrées tandis que des percolations profondes non saturées sont même enregistrées. L'effet du paillage s'estompe cependant dès la seconde année mais est relayé par celui du couvert végétal dont l'importance s'accroît plus qu'ailleurs.

L'évolution globale du processus de régénération dépendra donc de la réduction et de la stabilisation des écarts entre l'amont des ouvrages et l'espace inter-ouvrages. Au cours de la deuxième saison des pluies suivant l'aménagement à Yabo, ces écarts entre les espaces AM/AV d'une part et IN de l'autre se sont amoindris: le développement du couvert végétal, même faible (35%), a provoqué une amélioration de 42% de l'infiltration dans les espaces IN initialement sans paille. L'ETR a ainsi enregistré un accroissement de 10 à 40% selon les traitements, dans l'ensemble des espaces IN. Au même moment, les quantités d'eau accumulées en AM sont moins importantes, tandis que le développement d'une abondante végétation ligneuse accroît le niveau de ETR et réduit conséquemment les pertes par drainage qui ne représentent plus que 4 à 6 fois la pluviométrie totale selon les traitements.

9.1.2 Sur le plan biologique

Sur des sols initialement nus, aménagés en saison sèche, les premières pluies entraînent la germination spontanée de plusieurs dizaines d'espèces. A l'amont des diguettes, 37 à 47 espèces herbacées apparaissent dès la première année, tandis que dans les espaces inter-ouvrages le nombre d'espèces est influencé, du simple au double, par l'existence de mesures spatiales de C.E.S. comme le paillage. Indépendamment des apports de spores dans la paille, l'installation des herbacées traduit, dans ces milieux, une remarquable disponibilité naturelle des semences au début de la saison des pluies et une forte capacité de diffusion des espèces annuelles. L'humidité quasi-permanente entretenue en amont des diguettes favorise la germination prolongée des semences avec, pour résultat, un nombre plus élevée d'espèces. Entre les ouvrages, le paillage favorise les conditions d'une germination aussi bonne qu'en amont mais moins prolongée dans le temps. Cependant on a observé, tant à Yabo qu'à Bissiga, que l'accumulation de litière pouvait devenir, au fil du temps, un facteur inhibiteur de la germination.

La structure de la végétation est directement influencée par le régime hydrique des sols en début d'hivernage. Si en amont des diguettes le taux de recouvrement peut atteindre 100% dès les premières années, c'est surtout les mesures spatiales prises entre les ouvrages qui déterminent l'importance du couvert végétal dans ces espaces. Ainsi avec un sous-solage mécanisé à Bissiga, le taux de recouvrement mesuré après 5 ans est de 95%; le paillage

effectué à Yabo a, quant à lui et en deux ans, doublé la couverture végétale par rapport aux espaces non travaillés. En termes de rapport efficacité/coût, le paillage apparait comme une mesure efficace et pas chère. En l'absence de ces mesures spatiales qui augmentent l'infiltration, la courbe d'évolution du couvert végétal dans les espaces IN, sous mise-en-défens et protection contre le feu, connaît très tôt un palier. Le taux de recouvrement tend à se stabiliser autour de 50% même après 9 ans de régénération.

La biomasse aérienne produite atteint 5000 à 7000 kg de M.S./ha en amont des ouvrages dès la première saison de croissance. Entre les diguettes en revanche, la production dépend étroitement de la structure de la végétation induite par les mesures spatiales de C.E.S.. Elle est, par exemple, de 3900 kg/ha trois ans après un paillage, contre 1500 kg/ha dans les espaces non travaillés. Lorsque la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs n'est pas limitée, la biomasse aérienne produite peut atteindre 12500 à 12800 kg/ha. Cependant, l'humidité entretenue en amont des ouvrages, par un régime pluviométrique au-dessus de la moyenne, se révèle défavorable à la croissance des herbacées, au moins à partir de la deuxième saison de végétation. Les inondations entraînent en effet, au cours de la croissance, d'importantes mortalités foliaires par pourrissement. A recouvrement initial semblable, la production primaire aérienne nette en amont des diguettes devient alors inférieure à celle des espaces inter-diguettes. En revanche, ce régime hydrique favorise le développement d'une strate ligneuse dont la composition est surtout liée à l'existence, dans les environs immédiats des parcelles aménagées, de sujets adultes servant de semenciers. Sur les sols argileux profonds de Yabo (et Bissiga), cette régénération spontanée est dominée par *Acacia seyal* qui forme environ 60% de la végétation ligneuse. La densité en amont des diguettes peut atteindre 1500 à 3000 arbustes/ha après deux saisons des pluies. Dans les espaces IN, le développement de la strate ligneuse est, comme pour les herbacées, liée à l'amélioration du régime hydrique des sols.

Le processus de régénération biologique apparait comme l'indicateur principal de la restauration progressive des équilibres écologiques. L'évolution des communautés végétales, telle que la révèlent des relevés floristiques dans des stations d'âge variant de 1 à 11 ans, indique en effet que les premières années sont caractérisées par des phénomènes de colonisation et de remaniements floristiques au sein de la strate herbacée. Les espèces annuelles dites pionnières (*Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Cassia tora*, etc.) apparaissent en premier. L'indice de diversité croît globalement pendant les dix premières années au cours desquelles les espèces pionnières sont progressivement remplacées par des pérennes ou des annuelles caractéristiques des milieux non dégradés ou peu perturbés, dominées par *Andropogon gayanus*, *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*. Ce stade d'évolution correspondrait à une sorte de saturation des niches écologiques. Il traduit non seulement une évolution qualitative des conditions pédologiques mais annonce aussi la stabilisation progressive des équilibres écologiques. L'abondance des herbacées pérennes et des végétations ligneuses sert en effet, traditionnellement, d'indicateur de la restauration des sols dans la plupart des agrosystèmes au Burkina Faso. C'est à partir de ce moment, dans le cas des jachères traditionnelles, que les nouveaux défrichements sont envisagés. De ce point de vue, la régénération des ligneux apparait comme une sorte d'accélérateur des processus de régénération des sols dégradés et, à cet égard, constitue une mesure à prendre lorsque les conditions naturelles ne favorisent pas le développement spontané de ce type de végétation.

9.1.3 En ce qui concerne les processus chimiques

Les caractéristiques chimiques des sols dénudés dans les espaces sylvo-pastoraux indiquent que la pauvreté minérale n'est pas nécessairement la cause de leur état. Elles confirment ainsi le caractère essentiellement physique de la dégradation qui affecte ces sols. Cependant, comme dans la majeure partie de la région soudano-sahélienne, c'est la disponibilité des éléments nutritifs en général, de l'azote (N) et du phosphore (P) en particulier, qui constitue la limite essentielle à la production des écosystèmes agro-sylvo-pastoraux, dès que l'eau est disponible en quantité suffisante. Dans les sols étudiés, l'azote se révèle le plus limitant: 1,5% des réserves totales contenues dans les 30 premiers cm sont absorbées annuellement par les végétations herbacées dans les conditions d'humidité les plus élevées. Ceci a pour conséquence que seulement 25% des réserves assimilables de phosphore sont annuellement utilisées; le potassium quant à lui connaît, presque toujours, un niveau d'absorption qui peut entraîner une réduction importante des réserves au fil du temps.

Le régime hydrique entretenu en amont des ouvrages anti-érosifs influence considérablement la disponibilité et l'absorption de N et P. Les risques de lessivage de N y sont élevés, en particulier en début d'hivernage où les fortes minéralisations coïncident avec des quantités de drainage élevées et une faible capacité d'absorption des végétations herbacées. Le lessivage, encore plus élevé en cas de fertilisation, influence les quantités disponibles au cours de la croissance. La production primaire en amont est en conséquence plus limitée par l'azote: le taux de N dans la biomasse à la floraison est toujours moins élevée en amont des diguettes que dans l'espace IN, alors que le taux de P ne varie pas significativement entre ces deux situations. Au cours de la croissance, le phosphore apparaît en effet plus disponible pour les plantes que l'azote: le rapport P/N croît jusqu'au stade de la floraison qui intervient le 15 septembre. Le maintien d'un tel régime hydrique pendant trois saisons successives a abouti (en 1993) à une limitation totale de la production des végétations herbacées par l'azote: Nb à la floraison - 0,35% - est en-dessous du taux de 0,5% considéré au Sahel comme le seuil d'une limitation complète de la production par l'azote. Cela se traduit en conséquence par une qualité fourragère médiocre de la biomasse produite.

Dans un régime de protection totale contre l'exploitation et les feux, le bilan des flux minéraux (N et P en particulier), entre les espaces IN et les espaces AM au cours des premières années de régénération, est principalement conditionné par trois processus. En amont des ouvrages d'absorption, c'est (i) l'importance des pertes par lixiviation (de N en particulier) et (ii) les possibilités de recyclage en surface par les végétations ligneuses qui exploitent des horizons de sol situés hors de portée des herbacées. Ainsi, le bilan annuel d'azote est plus rapidement équilibré lorsque la composante ligneuse (une haie vive le long des diguettes par exemple) est plus développée ou quand le volume total du drainage en amont est réduit par un accroissement de l'infiltration dans les espaces inter-diguettes (paillage, sous-solage par exemple). Entre les diguettes où les pertes par lixiviation sont plus limitées, c'est (iii) l'importance du ruissellement et de l'érosion qui détermine la qualité du bilan minéral annuel. C'est ainsi que le paillage utilisé à Yabo améliore le bilan de N de 20% par rapport aux espaces non paillés, après deux saisons de croissance.

De manière générale, la plus grande solubilité de N et sa forte susceptibilité aux migrations sous forme de nitrates font que, dans des aménagements comme ceux de Yabo et Bissiga, l'azote est, plus que le phosphore, l'élément le plus sensible et le plus limitant de la durabilité des processus de réhabilitation.

Il est en définitive utile de constater que les processus physico-chimiques qui ont cours sur ces terrains sylvo-pastoraux, sous l'effet des dispositifs de C.E.S. linéaires et imperméables, peuvent être aussi valables dans le cas des cultures annuelles, même sous diguettes filtrantes. C'est ce qui ressort des résultats de travaux conduits au cours de la même période dans des espaces agricoles des régions de Namsiguia (Kaya) et Kirsi (Yako). Ces champs, contrairement aux terrains dégradés de Yabo et Bissiga, sont aménagés de diguettes filtrantes en blocs de latérite.

Toutefois, il convient de garder à l'esprit que les processus en cours dans les espaces sylvo-pastoraux étudiés viennent de démarrer et sont susceptibles d'une évolution plus ou moins rapide qui, elle, dépendra de l'évolution des végétations herbacées et ligneuses des parcelles aménagées. La structure de ces végétations (en particulier l'importance de la strate ligneuse) et leur incidence sur les flux hydriques et minéraux constituent, ainsi que les modes de gestion, les principaux éléments de différence entre les espaces sylvo-pastoraux et les espaces agricoles. L'objectif de régénération des espaces sylvo-pastoraux consiste à stimuler le développement spontané d'une végétation, à la limite n'importe laquelle, qui permette de remplir à la fois des fonctions de production et de maintien des équilibres des milieux. Au regard des besoins en la matière, ces actions de réhabilitation exigent, pour avoir un impact significatif, d'être conduites à des échelles plus importantes que l'aménagement des seules parcelles agricoles. Dans ces conditions, le mode d'intervention privilégierait l'emploi des matériaux disponibles sur place, en l'occurrence la terre, pour la confection des ouvrages anti-érosifs. Car, si ces ouvrages imperméables peuvent aggraver les risques de contre-performances dans la production agricole, ils semblent en revanche les mieux indiqués dans les espaces sylvo-pastoraux pour stimuler le développement des végétations pérennes.

Toutes ces observations confirment, une fois de plus, que l'étude de la dynamique des espaces agro-pastoraux ou sylvo-pastoraux dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes doit être toujours envisagée dans un cadre écologique élargi. Le fonctionnement de ces espaces est caractérisé par des inter-actions permanentes -fortement influencées par l'homme - entre ce qui constitue en fait deux sous-systèmes d'un même système écologique. Leurs capacités et leurs limites sont en effet liées à des processus assez semblables, ceux qui déterminent la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs. A cet égard, on peut admettre qu'un concept théorique, telle que la capacité de charge, peut servir dans ces différents sous-systèmes comme base de planification pour une exploitation rationnelle de leurs ressources, dans les systèmes actuels d'utilisation des terres. Ce concept traduit l'équilibre entre la productivité naturelle des ressources d'un écosystème et leur niveau d'exploitation.

En tant que potentiel naturel de ressources exploitables, la capacité de charge ne peut cependant servir, seul, de référence pour une gestion soutenue et durable de ces ressources dont la productivité actuelle est déjà considérée comme largement inférieure à l'accroissement des besoins de la population. La mise en oeuvre, dans les systèmes de production rurale, de technologies permettant d'accroître cette capacité de charge des écosystèmes est donc indispensable pour atteindre un tel objectif d'utilisation durable. Cette démarche d'intensification passe, dans les conditions socio-économiques actuelles de la région, par une rationalisation des inter-actions entre ces sous-systèmes.

En revanche, même si les caractéristiques des sols dégradés et leur réponse aux mesures de C.E.S. peuvent traduire l'existence, dans cet état, d'un potentiel productif (qualifié de résilience) élevé, il convient de rester réaliste face au principe d'une **nécessaire persistance** des systèmes agro-sylvo-pastoraux dans cette région d'Afrique. La vision "résilience" développée dans les théories écologiques veut en effet que les écosystèmes naturels

conservent toujours une stabilité quel que soit l'état dans lequel ils se trouvent, et que cette stabilité du moment peut basculer, à la faveur d'évènements naturels, vers une autre situation stable dans de nouvelles conditions d'utilisation.

Cette approche théorique semble surtout caractériser la dynamique d'écosystèmes naturels soumis aux seules lois aléatoires de la nature, où l'influence de l'homme n'est pas déterminante. L'ensemble des agrosystèmes du Burkina, et ceux du plateau central en particulier sont, quant à eux, caractérisés par l'omniprésence humaine qui en détermine souvent l'évolution. Une approche plus quantitative, même sommaire, des potentialités réelles de ces systèmes et des possibilités de leur intensification nous semble donc, au stade actuel, une voie qui évite aux chercheurs et planificateurs de baser des projets de développement sur des hypothèses non vérifiées, c'est-à-dire sur des illusions.

9.2 Recommandations

Trois types de recommandations nous ont paru importantes à l'issue de ces discussions. Elles portent sur un itinéraire technique idéal pour déclencher et conduire un processus durable de régénération des sols sylvo-pastoraux dégradés, sur les implications en matière de recherche ou de développement de ces travaux et enfin sur la planification et le financement des projets de réhabilitation des espaces sylvo-pastoraux dégradés.

9.2.1 Recommandation d'ordre technique

La mesure de régénération idéale

L'inventaire des mesures de régénération entreprises dans les espaces sylvo-pastoraux ainsi que l'étude des exemples de Yabo et Bissiga montrent assez clairement que le déclenchement et la durabilité d'un processus de réhabilitation exigent d'une part la remise en fonction de l'activité biologique des sols et d'autre part la recherche d'un équilibre minéral (particulièrement de N et P) constant entre les flux sortant et entrant dans le système. Les mesures de C.E.S. peuvent permettre d'atteindre à terme un tel objectif si leur mise en oeuvre répond aux conditions minimales suivantes.

- Dans l'espace, ces mesures doivent accroître l'infiltration en vue de permettre l'installation de la végétation. Pour cela, les dispositifs physiques de type linéaire, et en particulier isohypses, offrent les meilleures conditions de collecte du ruissellement et d'accroissement de l'infiltration. Cependant, à elles seules, elles ont un impact généralement limité à la zone située immédiatement le long des ouvrages. Leur efficacité peut être étendue dans l'espace à l'aide de mesures spatiales destinées à améliorer de façon homogène l'infiltration entre les ouvrages linéaires. Ces mesures peuvent être de nature physique (travail du sol) ou biologique (paillage, mulching) avec cependant, un meilleur rapport efficacité/prix pour les secondes.

- Dans le temps, il s'agit d'assurer la durabilité des processus initiés à travers une disponibilité suffisante de l'eau et des éléments nutritifs, l'azote et le phosphore en particulier, qui permette une production soutenue de biomasse. Une fois que l'eau est disponible, il s'agit d'une part d'accroître la disponibilité totale de N et P, et d'autre part de limiter au maximum les pertes hors du système. Accroître la disponibilité dans les conditions naturelles de ces systèmes écologiques consiste surtout à rendre disponibles pour les végétations annuelles, qui constituent la base de la production, des éléments minéraux normalement hors de portée de leur système racinaire. Seules les végétations ligneuses qui, dans les cas de sols suffisamment profonds, exploitent des horizons plus vastes, peuvent théoriquement contribuer à cela. Leur part dans l'augmentation de la biomasse totale est en tout cas une réalité qui doit être mise à profit dans des objectifs d'utilisation durable de ces espaces. Limiter les pertes consistera surtout à réduire l'érosion dans les espaces inter-ouvrages et les pertes par lixiviation dans les zones d'accumulation de l'eau. C'est pourquoi le développement d'un couvert herbacé sur l'ensemble des espaces à régénérer apparaît comme la première étape du processus de remontée biologique. Cette étape doit être suivie du développement de la strate ligneuse. On stimulera donc, au besoin, l'installation et le développement de cette végétation ligneuse, pour améliorer l'utilisation verticale de l'eau et des éléments nutritifs et augmenter ainsi la production totale par unité de surface. Quant au maintien d'un équilibre minéral durable, il ne peut être assuré que par des mesures de gestion qui tiennent compte du bilan global à chaque instant, y compris la protection totale pendant la période de reconstitution des ressources.
- La mise en oeuvre de telles mesures pourrait donc suivre des séquences logiques au cours desquelles les ouvrages d'absorption ou de réduction du ruissellement seront d'abord installés. Des mesures spatiales seront prises ensuite, de préférence simultanément, pour développer la rugosité des surfaces et accroître de façon homogène l'infiltration dans les espaces inter-ouvrages. Les mesures biologiques tels le paillage ou l'épandage de branchages sont généralement les moins onéreuses. Si ces mesures spatiales ne peuvent être prises simultanément, la biomasse produite le long des ouvrages linéaires au cours des premières saisons de croissance peut être utilisée les années suivantes pour cet objectif. En même temps, la régénération des espèces ligneuses sera stimulée, au besoin par des semis directs d'espèces à forte capacité de diffusion (par exemple *Acacia spp.*) ou des plantations d'essences locales qui, dans ces conditions, sont les mieux adaptées. La protection contre l'exploitation et les feux est une condition nécessaire pendant la période de reconstitution des ressources.

En résumé, la mesure de régénération idéale serait une combinaison de mesures physiques et biologiques, utilisées selon un dispositif linéaire-isohypse et spatial, mise en oeuvre selon une succession temporelle cohérente, pour favoriser l'installation et le développement d'une végétation d'annuelles et de pérennes dont la finalité est de restaurer les équilibres hydrologiques et bio-géo-chimiques des espaces aménagés. Toute une "B.I.O.S.P.H.E.R.E"!

9.2.2 Recommandations à la recherche et la vulgarisation

Deux à trois saisons d'observations et de mesures ont révélé beaucoup d'informations; mais elles ont surtout révélé de nombreux indices et soulevé autant d'hypothèses et de questions dont les réponses se trouvent uniquement dans des observations prolongées de l'évolution des paramètres clés du processus: le drainage et les pertes par lixiviation, la structure et la composition des végétations, la production primaire totale (incluant la production des ligneux) et les flux de N et P. On devrait parvenir à dimensionner les ouvrages de C.E.S., et donc les investissements, en fonction des terrains et des objectifs quantitatifs théoriquement réalisables dans ces espaces. Il apparaît en conséquence utile de poursuivre les mesures et observations, non seulement dans les sites déjà étudiés mais aussi dans d'autres sites et à des échelles plus grandes, si on veut parvenir à des conclusions formelles applicables aux zones soudanaises. Dans le site de Yabo, ces mesures pourraient se faire, par exemple tous les deux ans, jusqu'à ce que les aménagements atteignent l'âge de 10 ans au moins. Cela signifie pour le Service forestier du Sanmatenga de pouvoir assurer la protection des parcelles aménagées et pour le programme de recherche sur l'aménagement et la gestion de l'espace sylvo-pastoral (SPS) notamment, de pouvoir intégrer les résultats actuels en vue de poursuivre les travaux.

Sur le plan agricole, le développement tous azimuts des dispositifs d'absorption ou de freinage du ruissellement de type isohypse est perçu, aujourd'hui au Burkina, comme une solution "facile" et généralisable aux problèmes d'épuisement des sols et de baisse de la pluviométrie. Les travaux effectués dans des parcelles agricoles ainsi aménagées, aussi bien que ceux dont les résultats ont été discutés ici, montrent que des risques de contre-performances existent, lorsque la pluviométrie est supérieure à la moyenne régionale, en particulier dans les régions où celle-ci atteint ou dépasse encore 700 mm. La Recherche Agricole a le plus souvent mis au point les techniques culturales qui réduisent le ruissellement et l'érosion à la parcelle; le problème est que leur vulgarisation se heurte à l'insuffisance d'équipement et à la pauvreté des agriculteurs. Pendant ce temps, on maîtrise encore insuffisamment la gestion de l'eau au niveau bassin versant ainsi que l'importance et l'incidence, dans les systèmes de production actuels, des transferts organiques et minéraux entre le bassin versant et la parcelle, entre la "brousse" et les champs. Il nous semble en conséquence utile de suggérer à la Recherche Agricole dans son sens le plus large,

(i) de travailler davantage à proposer aux paysans, une série de possibilités pour les années pluvieuses et pour les années sèches (à fréquence décennale), plutôt que la meilleure solution moyenne qui pourrait se révéler inutile ou négative pendant les années humides (plus fréquentes) dans les zones à pluviosité intermédiaire.

(ii) D'accorder plus d'attention aux études écologiques aussi complètes que possible des systèmes de production agro-sylvo-pastorale dans la région soudanaise, en vue d'une part de quantifier les inter-actions actuelles et potentielles entre les sous-systèmes qui les composent et les possibilités de rationaliser de telles inter-actions, et d'autre part de donner aux planificateurs du développement rural des outils quantitatifs et des hypothèses fiables pour la formulation des projets.

9.2.3 Recommandation de politique générale

L'état actuel des ressources naturelles renouvelables dans les pays du Sahel et les perspectives démographiques de la région exigent des gouvernements et des populations locales, de se ressaisir dès maintenant. Il est plus que temps, nous semble-t-il, de lancer ou relancer des programmes de réhabilitation des terres dégradées en général et des espaces sylvo-pastoraux en particulier, dans l'ensemble de la région soudano-sahélienne où le besoin est de plus en plus urgent. En tenant compte du statut moderne et traditionnel de ces terres, des priorités actuelles des populations rurales (la subsistance) et de "l'impasse" dans laquelle se trouvent aujourd'hui les programmes de reforestation d'une part, en considérant d'autre part les exigences, les orientations et "sensibilités" actuelles des partenaires au développement et des bailleurs de fonds dans le financement des projets de développement rural, des actions de réhabilitation des terres devraient être systématiquement intégrés aux projets de développement agricole. Par des **subventions indirectes** aux communautés locales, à travers les ménages, pour l'amélioration de leurs systèmes de production agricole (stimulations matérielles, crédits à des conditions favorables pour l'équipement agricole, etc.), ces projets peuvent "exiger" en retour, de ces communautés, des engagements collectifs et individuels à exécuter des actions de réhabilitation des terres en général et des espaces sylvo-pastoraux en particulier. Lorsque dans l'esprit des paysans de cette région la récupération des terres dégradées ne répondra plus seulement à des objectifs de mise en culture immédiate, parce qu'ils auront d'autres possibilités d'intensifier l'utilisation des terres qu'ils occupent, lorsque cette activité signifiera par ailleurs des facilités de développement de leur moyens de production, on aura, peut-être, ouvert une brèche dans la spirale de dégradation qui affecte l'ensemble des écosystèmes de la région.

10 Bibliographie

- Anderson, J.M. and J.S. Ingram, 1989. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. CAB international, IUBS-ISSS-UNESCO/MAB, 171 pp
- Anonyme, 1983. Eléments de géographie agricole. Cours de géographie agricole. I.S.P. Université de Ouagadougou.
- Bekker, H. & Meier, A., 1992. Un Sahel vert, c'est possible ??? Une étude sur l'impact des techniques de régénération des terres sylvopastorales au Burkina Faso, sur les conditions pédologiques et le bilan d'eau IAHL Arnhem, 73 pp.
- Belem, B., 1993. Détermination du stade optimal de repiquage de *Acacia seyal* DEL., *Acacia raddiana* SAVI et *Balanites aegyptiaca* (LIN) DEL. Document ronéotypé CNSF Ouagadougou, 8 pp.
- Bie S.de & C. Geerling, 1987. L'exploitation soutenue des ressources naturelles. dans Geerling et Diakité (ed.) "Rapport final du projet Recherche sur l'utilisation rationnelle du gibier au Sahel" 24p
- Bie S. de, 1991. Wildlife resources of the West African Savana. Wageningen Agricultural University Papers 91-2. 266 p
- Bille, J.C., 1977. Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. Travaux et Documents de l'ORSTOM No 65, 82 p.
- Blaikie, P., 1989. Explanation and policy in land degradation and rehabilitation for developing countries. in Land degradation and Rehabilitation Vol. 1: 23-37
- Boers, Th.M., 1994. Rainwater harvesting in arid and semi-arid zones. Thesis Wageningen Agricultural University. 133p.
- Boer, F. de & J.J. Kessler, 1994. Le système d'élevage Peulh dans le sud du Burkina Faso. Documents sur la gestion des ressources naturelles tropicales No 4. Université Agronomique de Wageningen (UAW) 106 p.
- Bognetteau-Verlinden, E., S. v.d. Graaf, et J.J. Kessler, 1992. Aspects de l'aménagement intégré des ressources naturelles au Sahel. Documents sur la gestion des ressources naturelles tropicales No 2. Université Agronomique de Wageningen (UAW) 104 p.
- Bonham, D.C., 1989. Measurements for terrestrial vegetation. Willey Intern. Publishers, USA 338 p
- Boudet, G., 1978. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. 3è édition. Série Manuels et Précis d'Élevage. Minist. Coop./IEMVT. 258 p
- Breman, H., A.M. Cissé, M.A. Djitèye et W. Th. Elberse, 1982. Le potentiel botanique des pâturages. dans Penning de Vries et Djitèye (ed.) voir réf. p.98-132.
- Breman, H. & N. Traoré (ed.), 1986. Analyse des conditions de l'élevage et de propositions politiques et de programmes. Burkina Faso. Sahel doc. (86) 300, Club du Sahel/CILSS/OCDE, 202 pp
- Breman, H., 1987. The struggle of the green against the yellow dragon. (The chinese approach to desertification control and its usefulness for the Sahel). CABO, Wageningen, 62 p.
- Breman, H. et N. de Ridder (ed.), 1991. Manuel sur les pâturages des pays sahéliens. ACCT/CTA/KARTHALA, 485 P.

- Breman, H. et J.J. Kessler, 1994. Role of woody plants in Agro-Ecosystems of semi-arid regions. with emphasis on the Sahelian Countries. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New-York.
- Cassenave, A. et C. Valentin, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Editions ORSTOM, 229 p.
- Chase, R.G. and E. Boudouresque, 1987. A study of methods for the revegetation of barren crusted sahelian forest soils. *in* "Soil, crop and water management systems for rainfed agriculture in the sudano-sahelian zone": proceedings of an international workshop 7-11 Jan. 1987, Niamey. ICRISAT (ed.) p. 125-135
- Cissé, A.M. 1986. Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahélienne. Thèse PH.D. Université Agronomique de Wageningen. 211 p.
- Claude, J., M. Grouzis et P. Milleville, 1991. Un espace sahélien. La mare d'Oursi, Burkina Faso. Ed. ORSTOM, 241 p. + cartes.
- Clappers, J., 1993. Plus de bois de villages: appui à foresterie villageoise et classique. MET/PAFV, Burkina Faso. 35p + annexes.
- Commission Provinciale A.T.V - Sanmatenga, 1989. Note sur la méthodologie du Test d'aménagement du terroir villageois. 89 p + annexes
- Commission Provinciale A.T.V - Sanmatenga, 1990. Plan d'aménagement et de gestion du terroir villageois de Nakombogo. Kaya, Burkina Faso
- Commission provinciale A.T.V - Sanmatenga, 1991. Plan d'aménagement et de gestion du terroir villageois de Bangassé. Kaya, Burkina Faso.
- Cornet, A., 1981. Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. *dans* Acta Oecologica, Oecologia plantarum, 1981, vol 2(16) no 3 : 251-266
- Coulibaly née Somé, O., 1994. Le secteur des forêts classées de BISSIGA-NAKAMBE: une approche de la dynamique des paysages au plateau central. Mémoire maîtrise Université de Ouagadougou, FLASHS, Dpt Géographie.
- Daget, P. et J. Poissonnet, 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies; critères d'application. *dans* Annales Agron. 22 (1) : 5-41.
- Dempster, J.P. & E. Pollard, 1981. Fluctuations in resource availability and insects populations. *in* Oecologia 50: 412-416.
- DEP/Ministère de l'Eau (Burkina Faso), 1993. Carte hydrologique du Burkina Faso. Feuille Ouagadougou.
- Dervin, C., 1992. Comment interpréter les résultats d'une Analyse Factorielle de correspondance. Collection STAT-ITCF, 72p
- Dickinson, N.M., 1982. Decomposition of grass litter in a successional grassland *in* Pedologia 25, 1983, : 117-126
- Duijn, v. H.J.W, F.W. van Driel et O. Kaboré., 1991. Influence des cordons pierreux sur la relation entre le bilan hydrique et le rendement du mil dans le bassin versant de Oualaga à Namsiguia. Séminaire international sur la gestion agroclimatique des précipitations. Bamako, 9-13 Dec. 1991. CIEH/ UAW. Ouagadougou 16p.
- F.A.O., 1977. Crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24, Rome 144p
- F.E.E.R./DEP/Eau (Burkina Faso), 1986. Evaluation des programmes de lutte contre l'érosion. 75 p
- Floret, C. et G. Serpantié (ed.), 1993. La jachère en Afrique de l'Ouest. Textes de l'atelier international de Montpellier 2-5 Déc. 1991. Collection Colloques et séminaires, Ed. de l'ORSTOM, 494 p.

- Fournier, A., 1982. Cycle saisonnier de la biomasse herbacée dans les savanes de Ouango-Fitini (Nord de la Côte d'Ivoire) Dans Annales Université d'Abidjan, sér. E (écologie) Tome XV, p 63-94.
- Fournier, A. et M. Lamotte, 1983. Estimation de la production primaire des milieux herbacés tropicaux. dans Annales Université d'Abidjan sér. Ecologie Tome XVI:7-38.
- Geerling, C. & S. de Bie, 1986. The concept of carrying capacity and land use. *Neth. Journ. of Agric. Sc.* 34: 339-347
- Geerling, C. et S. de Bie, 1987a. Forêts classées et élevage: YABO, BISSIGA et NAKABE, Burkina Faso. Tome 1: résultats et recommandations. U.A.Wageningen, 15p
- Geerling, C. et S. de Bie, 1987b. Forêts classées et élevage: YABO, BISSIGA et NAKABE, Burkina Faso. Tome 2 : rapport technique. U.A.Wageningen, 84p
- Gijbers, H.J.M. & al., 1993. Dynamics and natural regeneration of woody species in farmed parklands in the sahel region (province of Passoré, Burkina Faso) in *Forest Ecology and Management* 64: 1-12.
- Gounot, M., 1969. Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Ed. Masson & Cie, 314p.
- Gounot, M. et O. Yu, 1980. Recherches sur l'évaluation de la productivité primaire épigée des graminées prairiales. dans *Acta Oecologica, Oecologia plantarum* vol 1(15), No 1: 81-102
- Grouzis, M., 1979. Structure, composition floristique et dynamique de la production de la matière sèche de formations végétales sahéliennes (Mare d'Oursi). ACC. lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta).
- Grouzis, M., 1988. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse Doct.es Sciences Naturelles, Univers. Paris Sud/ORSA. Etudes et Thèses ORSTOM, Paris 336 p.
- Graaf, v.d. S., 1992. Foresterie et élevage au Sahel: contribution à la discussion sur l'aménagement et la gestion des terroirs. dans Bognetteau-Verlinden et al. 1992 (voir Référence) p.17-71
- Guinko, S., 1984. Végétation de la Haute Volta. Thèse Doct.es Sc.Naturelles Université de Bordeau III. 381 p + annexes.
- Henin, S., 1977. Cours de physique du sol-tome II: l'eau et le sol. les propriétés mécaniques, la chaleur et le sol. ORSTOM/EDITEST 222 p.
- Hien, F. et G. Zigani, 1987. La haie vive, un modèle d'intégration de l'arbre au système d'exploitation agricole et pastorale. CRDI, manuscript report N° 163 f. 60p
- Hien, F., 1994. Les mesures de C.E.S. pour la régénération des espaces sylvo-pastoraux: analyse de la situation dans le plateau central Burkinabè. Antenne sahélienne U.A.W/U.O. Ouagadougou, 44 p.
- Hoek, v.d. R., A. Groot, F. Hottinga, J.J. Kessler et H. Peters, 1993. Perspectives pour le développement soutenu des systèmes de production agrosylvopastorale au Sanmatenga, Burkina Faso. Documents sur la gestion des ressources naturelles tropicales No 3. Université Agronomique de Wageningen (UAW), 73 p.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability in ecological systems. in *Ann. Rev. Ecol. & Syst.* 4: 1-23
- Hoogmoed, W.B. and L. Stroosnijder, 1984. Crust formation on sandy soils in the Sahel. I: rainfall and infiltration. in *Soil and Tillage Res.* 4 : 5-23
- Hoogmoed, W.B., M.C. Klaij, et J. Brouwer, 1991. Infiltration, runoff and drainage in the sudano-sahelian zone in soil water balance in the sudano-sahelian zone. Proceedings of the Niamey workshop, Feb 1991. IAHS publ. p 85-98.

- IFAD, 1992. Soil and water conservation in the sub-saharan Africa. A report prepared for the International Fund for Agricultural Development by the Center for Development Cooperation Studies. Free University, Amsterdam. 110p
- INERA, 1994a. Bilan de la recherche dans le domaine des ressources naturelles au Burkina Faso. Document provisoire. Ouagadougou.
- INERA, 1994b. Etude du ruissellement, de la dégradation et des techniques de récupération des milieux dégradés. Equipe C.E.S/ESFIMA. CNRST, Ouagadougou.
- Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. v.d. Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf & H. Van Reuler, 1990. A system for Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS). *in* *Geoderma* 46 (4) : 299-318.
- Janssen, I.H., 1993. De invloed van korsten op afstroming en nutriëntenverliezen in de Sahel. Studentenverslag 24. Antenne sahélienne U.A.W/U.O 45 pp + annexes
- Kaboré, C., 1987. Projet de plan d'aménagement de la forêt classée de Bissiga. M.E.T./ Direction des Forêts et du Reboisement. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Kessler, J.J. & F.M.J. Ohler, 1983. Interventions dans les pays du Sahel: une approche écologique. Dpt de l'Aménagt de la Nature U.A.W / C.A.B.O, Wageningen.
- Kessler, J.J. & Boni J., 1991. L'agroforesterie au Burkina Faso. Bilan et Analyse de la situation actuelle. Tropical resource management papers No 1. Université Agronomique de Wageningen, 144p.
- Kessler, J.J. and H. Breman, 1991. The potential of agroforestry to increase primary production in the sahélian and sudanian zones of West Africa. *in* *Agroforestry Systems* 13: 41-62
- Kessler, J.J. & C. Geerling (ed.), 1991. Profil environnemental du Burkina Faso. Département de l'Aménagement de la Nature. U.A. Wageningen 63p
- Kessler, J.J., 1994. The usefulness of human carrying capacity concept in assessing ecological sustainability of land use in semi-arid regions *in* *Agriculture, Ecosystems & Environment* 48: 273-284.
- Kessler, J.J. & P. Laban, 1994. Planning strategies and funding modalities for land rehabilitation. *in* *Land Degradation and Rehabilitation* 5 - 161: 1-8.
- Laman, M., 1988. La dynamique du système agraire sur le plateau central au Burkina Faso. Un bilan des recherches existantes. Rapport présenté au conseil consultatif du Programme CEDRES/AGRISK (Sept. 1988) La Haye. 41 p + annexes.
- Le Houerou, H.N., 1989. The grazing land ecosystems of the African Sahel. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New-York.
- Levang, P., 1978. Biomasse herbacée de formations sahéliennes. Etude méthodologique et application au bassin versant de la mare d'Oursi. ACC. lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta). ORSTOM, Ouagadougou. 29 p
- Levang, P. et M. Grouzis, 1980. Méthodes d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes; application à la mare d'Oursi, Haute Volta). *dans* *Acta Oecologica/Oecologia plantarum* vol.1 (15) no 3. p.231-244.
- Luc, J.P., 1978. Caractérisation hydrique des sols: utilisation des mesures d'humidité et de charge in situ. Comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse de Doctorat de spécialité en agronomie, option pédologie, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier 169 p + annexes
- Mando, A., 1991. L'impact de l'activité des termites sur la dégradation de la biomasse végétale et quelques propriétés physiques des sols dégradés: étude menée à Zanamogo (province du Bam, B.F). Mémoire de fin d'études I.D.R, Université de Ouagadougou.

- Mando, A., 1992. Rôle des termites dans la régénération des sols dégradés au Sahel: proposition de recherche. U.A.W.
- Marchal, J.Y., 1983. Yatenga: la dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Travaux et Documents de l'ORSTOM No 167. ORSTOM, Paris 873 pp.
- Marchal J.Y., 1986. Vingt ans de lutte anti-érosive au nord du Burkina Faso dans cahier ORSTOM, série pédologie vol XXII, N° 2: 173-180
- Masse, D., 1992. Amélioration du régime hydrique des sols dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat d'ingénieur INP Toulouse. IRA/ORSTOM 137p.
- Mietton, M., 1986. Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. dans cahier ORSTOM, série pédologie, vol XXII, n° 2: 181-196.
- Mitja, D., 1992. Influence de la culture itinérante sur la végétation d'une savane humide de Côte d'Ivoire (Booro-Borotou-Touba). Thèse Doct. Biologie Végétale. Univers. Paris VI (1990). Collection Etudes et Thèses ORSTOM, 270 p.
- Parkan, J., 1986. Développement des ressources forestières. Burkina Faso. FAO, Rome. 99p
- Penning de Vries, F.W.T. et M.A. Djitéye (ed.), 1982. La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle (1ere édition) PUDOC, Wageningen, 525p.
- Penning de Vries, F.W.T. et H.van Keulen, 1982. La production actuelle et l'action de l'azote et du phosphore. dans Penning de Vries et Djitéye (ed.) (voir référence) p. 196-226.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherches et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération/CIRAD/IRAT, Paris. 444p.
- Pieri, C., J.M. Kambiré, P. de Blic, F. Hien et J. Brouwer, 1994. Evaluation externe du programme "Eau, sol, Fertilisation, Irrigation et Machinisme Agricole" (ESFIMA). Rapport de synthèse de la mission d'évaluation. INERA (CNRST), 65p
- Poel, v.d. P. et B. Kaya, 1990. La régénération de la végétation sur des terrains dénudés: tests sur les berges du Marigot à Kaniko, Mali Sud. Version provisoire. DRSPR/IER/KIT. 16 p
- Pollard, E., 1981. Resource limited and equilibrium models of populations. in Oecologia 49: 377-378
- Reij, C., 1988. Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur les rendements agricoles; analyse succincte des données disponibles pour le plateau central au Burkina Faso. Rapport de mission, AGRISK. 14 p.
- Ridder, N. de, L. Stroosnijder et A.M. Cissé, 1982. La productivité des pâturages sahéliens. Textes du cours PPS. Tome 1: Théorie. UAW/ENSUP, 237 p.
- Rietkerk, M., 1992. Les différences locales du sol et la capacité de régénération: une étude pour la régénération des écosystèmes sylvopastoraux sahéliens dans la forêt classée de Yabo (Burkina Faso). Université Agronomique de Wageningen. 35 p + annexes.
- Rietkerk, M. & F. Hien, 1992. Mesures de régénération au Sahel. Antenne sahélienne U.A.W/U.O. Ouagadougou, Burkina Faso. 24p
- Rochette, R.M. (ed.), 1989. Le Sahel en lutte contre la désertification: leçons d'expériences. CILSS/PAC/GTZ, 592 p.
- Roorda, T. et B. Lamers, 1991. La mise en défens de Zanamogo: une étude pour la régénération des sols et végétations sylvo-pastoraux sahéliens au Burkina Faso. CIEH/UAW, 80p.

- Roose, E., 1981. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct. Es Sciences, Univers. d'Orléans. Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 130, Paris. 569p. **
- Schmitt, A., 1992. Hydrologie agricole: l'eau, le sol, la plante: études de cas, applications. EIER, Ouagadougou, 103p
- Sivakumar, M.V.K. et F. Gnomou, 1987. Agroclimatology of West Africa: Burkina Faso. ICRISAT info. Bull. No 23. 192p
- Stroosnijder, L. et D. Koné, 1982. Le bilan d'eau du sol. dans Penning de Vries et Djitéye (ed.) (voir référence) p 133-165.
- Stroosnijder, L., 1982. La pédologie du Sahel et du terrain d'étude. dans Penning de Vries & Djitéye (ed.) (Voir référence) p. 52-71
- Stroosnijder, L., 1992. La désertification en Afrique sahélienne. dans Le courrier ACP-CEE No 133. Tiré à part: 36-39
- Stroosnijder, L., 1992. Processes and models in erosion and soil and water conservation. Crust formation, crust properties and crust control. 44p
- Stroosnijder, L., 1994. Population density, Carrying Capacity and agricultural production technology in the Sahel. Paper presented at the 1994 Danish Sahel Workshop: 6-8 Jan. 1994. Sandberg Manor. Sonderborg, Denmark. Publication de l'Antenne Sahélienne U.A.W/U.O No 11. 12p
- Stroosnijder, L., 1994. Modeling the effects of grazing on the soil water balance and the primary production in the Sahel. Modeling of Geo-Biosphere Processes 00:000-000 (submitted)
- Stroosnijder, L. & A. de Wit, 1994. Water use and growth of *Acacia seyal* behind water conservation dykes in the Sahel. Document ronéotypé, Université Agronomique de Wageningen. 10p
- Toutain, B., 1978. Etude des effets de la mise en repos temporaire de quelques formations végétales sahéliennes dégradées sur leur évolution. Rapport de campagne (résultats de la première année d'essais). ACC. lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta) IEMVT. 67p.
- Toutain, B. et J. Piot, 1980. Mises en défens et possibilités de régénération des ressources fourragères sahéliennes. Etudes expérimentales dans le bassin versant de la mare d'Oursi (Haute Volta) IEMVT/GERDAT, 156p.
- Trouwborst, K.O., 1994. Soil moisture reserve development at soil-water conservation measures in Burkina Faso. Agricultural University of Wageningen. 157p
- Vlaar, J. et Mosselmans (ed.), 1989. Etude sur l'optimisation du recours aux ressources locales en matière de conservation des sols dans les pays sahéliens. Analyse des expériences du Niger et du Burkina Faso. Projet RAF/87/033, BIT. version provisoire. 146 pp + annexes.
- Vlaar, J.C.J (ed.), 1992. Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel. CIEH/UAW, 99p + annexes.
- Wiegert, R.G. and F.C. Evans, 1964. Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in southeastern Michigan. in Ecology 45, 1: 49-63
- Wit de, C.T. et J.M. Krul, 1982. La production actuelle dans une situation d'équilibre dans Penning de Vries et Djitéye (ed.) (voir référence) p 275-283.
- Wit de, A., 1993. Effet du bilan hydrique sur la croissance de *Acacia seyal*. Antenne sahélienne UAW. Ouagadougou. 41 p.

- Zombré, P., F. Pallo, F. Hien et A. Sanou, 1993. Guide de terrain relatif aux processus de régénération des terres sylvopastorales dégradées dans le plateau central Burkinabe. Cas de la forêt classée de YABO. Premier colloque international de l'A.O.C.A.S.S sur "gestion durable des sols et environnement en Afrique inter-tropicale" 6-10 Déc. 1993 Ouagadougou. 29p + tableaux et cartes.
- Zoungrana, I., 1992. Diversité stabilité et évolution des communautés végétales. Cas des jachères Nord-soudaniennes du Burkina Faso. dans Annales Univ. de Ouagadougou, sér. B. 1992: 115-125
- Zoungrana, I. et C. Zoungrana, 1992. Situation des ressources sylvo-pastorales au Burkina Faso. dans Revue Réseau Amélior. Prod. Agric. en milieu aride 4: 169-181.

Regeneratie van silvopastorale gebieden in de Sahel; effecten van bodem- en waterconservering in Burkina Faso.

Samenvatting

Ter vergroting van de voedselzekerheid concentreren zowel de rurale bevolking als ook de vele ontwikkelingsprojecten in Burkina Faso zich voornamelijk op anti-erosie maatregelen in het akkerbouwgebied. Deze situatie wordt in de hand gewerkt door de gebrekkige regelgeving met betrekking tot het gebruik van de silvopastorale gebieden welke regelmatig aanleiding vormt tot conflicten. Slechts enkele bosbouwprojecten en NGO's durven te investeren in silvopastorale gebieden. Dit gaat dan echter meestal om demonstraties van wat mogelijk is. Daardoor zijn de genomen maatregelen van een te geringe omvang om enig effect te ressorteren en worden de resultaten zelden op kwantitatieve wijze geëvalueerd. Ondertussen degraderen de silvopastorale gebieden in de Sahel met een steeds toenemende en alarmerende intensiteit.

De hier gepresenteerde resultaten betreffen onderzoek dat sinds 1990 heeft plaatsgevonden op het centrale plateau van Burkina Faso. Begonnen is met een inventarisatie van bodem- en waterconserverings(BWC)technieken in de silvopastorale gebieden van de tien provincies van dit centrale plateau. Dit betrof zowel het gebruik als de effecten van verschillende technieken. Het oogmerk was om beter te begrijpen waarom bepaalde maatregelen een succes en andere (de meeste) een fiasco zijn geworden. Geconcludeerd kon worden dat een combinatie van factoren zoals het concentreren van water en sediment (met daarin nutriënten en zaden), het voldoende lang handhaven van een minimale biomassa en de ontwikkeling van een boomvegetatie bepalend zijn voor het succes en de duurzaamheid van de beoogde regeneratie van gedegradeerde gebieden. Op basis van dit resultaat zijn twee proefvelden uitgekozen (in forêt classées van Yabo en Bissiga) waar aan de meeste van bovengenoemde voorwaarden werd voldaan. Op deze proefvelden is kwantitatief ecologisch onderzoek verricht. De waterbalans, de dynamiek van de vegetatie en fluxen en balansen van nutriënten stikstof (N), fosfaat (P) en Kalium (K) zijn bepaald voor verschillende BWC-maatregelen met een variërende ouderdom gedurende twee tot drie groeiseizoenen.

Het meeste onderzoek is verricht aan kleine aarden dijkes die volgens de hoogtelijnen zijn aangelegd en in ouderdom variëren van 1 - 10 jaar. Deze dijkes veroorzaken een heterogene infiltratie van het regenwater in de bodem en als gevolg daarvan een heterogeen verloop van het regeneratieproces. Het bleek nodig drie situaties te onderscheiden welke sterk verschillen met betrekking tot de hydrologische, biologische en chemische omstandigheden. In het gebied juist bovenstrooms van de dijkes infiltreert vrijwel al het water dat van het tussen de dijkes gelegen gebied en het benedenstroomse gebied stroomt. De metingen leiden tot een aantal conclusies m.b.t. de water- en nutriëntenbalans en de dynamiek van de zich regenererende vegetatie.

De waterbalans

Het onderzoek toont aan dat de oorzaak van het onbegroeid blijven van gedegradeerde gronden eerder een fysisch dan chemisch van aard is. Door een te geringe infiltratie van water als gevolg van fysische degradatie, welke op haar beurt weer een gevolg is van een te geringe bedekking van de grond met biomassa, kan zich geen of geen voldoende vegetatie ontwikkelen. Op kale gronden varieert de afstroming, afhankelijk van het soort korst aan het bodemoppervlak, tussen de 60 en 80% van de jaarlijkse neerslag (P). Afstroming begint op een grond met een erosie-korst al bij een buigrootheid van 1 mm terwijl deze drempelwaarde op een grond met een runoff-korst ca 5 mm bedraagt. De grootte van een bui bepaalt de grootte van de runoff en de intensiteit van de bui bepaalt de tijd tussen begin van de bui en begin van de afstroming. Door deze afstroming op een of andere manier binnen het gebied te houden komt er een proces op gang van een zich herstellende waterbalans en de daarmee gepaard gaande fysische, biologische en chemische processen. Bij de bestudeerde aarden dijkes verloopt dit proces als volgt.

Bovenstreams van de dijkes, waar vrijwel al het water infiltreert, ontstaat een milieu waar op spontane en overvloedige wijze een vegetatie kiemt en zich ontwikkelt. De hoeveelheid water die hier infiltreert kan oplopen tot 8 maal de regenval. Direct na de eerste buien is het bodemprofiel tot op enkele meters vochtig. Als gevolg hiervan ligt de evapotranspiratie (ETR) constant op een hoog niveau. De cumulatieve waarde van ETR bedraagt in het eerste seizoen na de aanleg van de dijkes al 70% van de jaarlijkse neerslag. Vanwege de concentratie van runoff water komt dat overeen met < 10% van de cumulatieve infiltratie (I) ter plaatse. De cumulatieve drainage (D) is erg groot en bedraagt 94% van I en is dus ongeveer 7,5 maal P. Bij oudere dijkes met een 7 jaar oude struikenhaag is D ongeveer 90% van I of te wel 6,5 maal P. Achter deze dijkes is er dus, althans in de beginfase van het regeneratieproces, sprake van een teveel aan water t.o.v. de gewasbehoefte.

Benedenstreams van de dijkes treedt laterale stroming van water op vanuit de zeer natte bovenstroomse zone. Dit speelt zich vooral af in het gedeelte van het bodemprofiel dieper dan 80 cm terwijl de waterbalans in de bovengrond afhankelijk blijft van wat er aan het verkorstte bodemoppervlak gebeurt. Deze laterale stroming treedt vooral op in de periode van de grote regenbuien (20 juli tot begin september). In die periode neemt de vochtvoorraad in het profiel snel toe waarbij verzadiging en diepe percolatie kunnen optreden. De cumulatieve ETR bedraagt in het eerste jaar na de aanleg 50-60 % van P terwijl dit toeneemt tot 75%*P benedenstreams van dijkes waarlangs een 7 jaar oude struikenhaag groeit. De diepe drainage bedraagt > 100 mm/jaar op die plaatsen waar de infiltratie van water in de bodem is toegenomen als gevolg van de aanwezigheid van een vegetatiedek. In situaties waar benedenstreams van de dijkes een geul is aangelegd is de diepe drainage 4-8 maal groter dan in een situatie zonder geul. In de beginfase van het regeneratieproces komt de verbetering in de waterbalans benedenstreams van de dijkes dus vooral ten goede aan diep wortelende gewassen zoals bomen.

Tussen de dijkes blijkt het afstroompercentage een functie te zijn van de zich ontwikkelende vegetatiebedekking. Indien mulch, als extra maatregel op dit tussen de dijkes gelegen gebied, wordt toegepast verdubbelt de infiltratie in het volgende seizoen. I neemt toe van 34% (zonder mulch) tot 75% van P. Het effect van mulch wordt na het eerste regenseizoen onduidelijker doordat de rol ter vergroting van de infiltratie wordt overgenomen door de zich overvloedig ontwikkelende vegetatie.

De vegetatiedynamiek

De intensiteit en soortenrijkdom van de vegetatie welke zich in het eerste regenseizoen na de aanleg van BWC-maatregelen op de kale gronden ontwikkeld duidt niet alleen op een ruime beschikbaarheid van zaden maar vooral op een groot verspreidingsvermogen van zaden. De eerste kiemingen vinden plaats in het bovenstroomse gebied waar tussen de 37 en 47 soorten onderscheiden kunnen worden. Hier leiden de vochtige omstandigheden tot een doorlopende kieming, in meerdere golven, hetgeen een duidelijke invloed heeft op de uiteindelijke floristische samenstelling van de daar gevormde kruidlaag. Tussen de dijkjes leidt het toepassen van mulch door het opbrengen van zaden maar ook door het verbeteren van de infiltratie ook tot overvloedige kieming. De kiemingsduur is hier echter veel korter dan bovenstrooms. In het eerste jaar na mulching kiemen er gemiddeld 37 soorten tegen slechts 19 soorten zonder mulch.

De verdere ontwikkeling van de vegetatie na kieming is vooral een functie van de waterbalans. In het tweede seizoen na de aanleg is er al sprake van 100 % bedekking op de smalle strook bovenstrooms van de dijkjes. Of en hoe snel deze strook zich uitbreidt hangt af van de maatregelen welke tussen de dijkjes worden genomen. Zonder maatregelen stabiliseert deze breedte zich al in het tweede seizoen op ongeveer 4 meter met een productie van 5000-7000 kg droge stof per hectare. Tussen de dijkjes ontwikkelt de vegetatiebedekking zich zonder extra maatregelen (anders dan bescherming tegen vuur en begrazing) van 23% in het eerste seizoen, via 35% in het tweede seizoen en stabiliseert zich op 50% na 10 jaar. Bij het toepassen van mulch tussen de dijkjes is de vegetatiebedekking het eerste jaar direct al 55% en in het tweede jaar opgelopen tot 73%. In dit tweede jaar bedraagt de productie respectievelijk 3200 en 1300 kg droge stof per hectare bij wel en geen mulch. In gebieden waar diepwoelen is toegepast als extra maatregel in het gebied tussen de dijkjes is na 5 jaar de productie toegenomen tot 5800 kg droge stof per hectare. Deze gunstige ontwikkeling in het gebied tussen de dijkjes staat in contrast met de ontwikkeling in de tijd van het bovenstroomse gebied. De voortdurende te natte omstandigheden daar hebben een negatieve invloed op de biomassa ontwikkeling. Na drie groeiseizoenen (in jaren waar de neerslag meer bedroeg dan het gemiddelde van de laatste 30 jaar) is de productie bovenstrooms 20% lager dan die tussen de dijkjes uitgaande van een gelijke bedekkingsgraad.

Er is een factoranalyse uitgevoerd van de specifieke bijdragen van de aanwezige soorten in vegetaties met een leeftijd welke varieert tussen 1 en 11 jaar. Deze eerste 10 jaar worden gekarakteriseerd door processen zoals kolonisatie en verandering in samenstelling van de kruidlaag. Het aantal soorten neemt af met de leeftijd waarbij pioniersoorten zoals *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis* en *Cassia tora* langzaam verdrongen worden en vervangen door andere éénjarige of meerjarige (*Andropogon gayanus*, *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*). De ruimtelijke verschillen in de waterbalans leiden tot een ruimtelijke verdeling in soorten. Bovenstrooms van de dijkjes komen vochtminnende (*Andropogon gayanus*) of -bestendige soorten voor zoals *Vetiveria nigritana* en *Cyperus spp.* voor.

De vochtige bovenstroomse omstandigheden bevorderen ook de spontane kieming van houtigen. De dichtheid en verscheidenheid van de kieming hangen af van het voorkomen van volwassen zaaddragende bomen in de omgeving. Soorten met een groot verspreidingsvermogen blijken het meeste van de gunstige omstandigheden voor kieming en vestiging te profiteren. Zo kiemt op de kleiige diepe bodems van Yabo en Bissiga *Acacia seyal* met een dichtheid van 2500 planten per vierkante meter. Na 2-3 jaar blijken er nog 1200 struiken per hectare over te zijn in het gebied waar mulching werd toegepast. Bij die leeftijd werd de bladproductie op 470 kg droge stof per hectare bovenstroomsgebied geschat.

De nutriëntenbalans

Metingen in de bovenste 30 cm van de bodem tonen aan dat zich daar in het totaal 2000-3000 kg stikstof en ongeveer 600 kg fosfaat bevinden. Dit geldt zowel voor begroeide als voor kale bodems. Tijdens het tweede groeiseizoen na aanleg van de dijkes neemt de kruidlaag bovenstrooms ongeveer 1,4% van deze totale stikstof reserve op en 25% van het opneembare fosfaat. Deze verhouding, welke een geringe beschikbaarheid van N weerspiegelt, is een gevolg van de waterbalans. Met een geschatte diepe drainage van 3000-4000 mm is het risico van stikstofuitspoeling bovenstrooms erg groot. Dit is vooral het geval aan het begin van het groeiseizoen wanneer een sterke mineralisatie samenvalt met een nog slecht ontwikkelde vegetatie. Ook leidt het teveel aan water tot rottingsverschijnselen waardoor bladeren problemen krijgen met het opnemen van stikstof tijdens de groei. Een bemesting met fosfaat bevestigt dat de opname van N bovenstrooms slechts 1,6% tegen 2,2% tussen de dijkes bedraagt. Bij bemesting met N (400 kgN/ha in de vorm van ureum) wordt ca 40% door de kruidlaag opgenomen waarbij de verliezen eveneens op 40% werden geschat. In het eerste jaar na de aanleg van de dijkes verdunt de stikstof in de kruidlaag zich uit tot 0,67% bovenstrooms en 0,92 % tussen de dijkes in het geval van geen bemesting. Bij bemesting met NPK klimmen deze gehalten naar respectievelijk 1,45% en 1,64%. De te natte omstandigheden bovenstrooms van de dijkes leiden er na drie regenseizoenen toe dat de kruidlaag aldaar ernstig te leiden heeft van stikstofgebrek. Tijdens de bloei in 1993 (ongeveer 15 september) bedraagt het %N nog maar 0,35% bovenstrooms tegen 0,65% tussen de dijkes. Deze eerste waarde is beneden de in de literatuur genoemde minimale verdunningswaarde. Het zeer lage stikstofgehalte verklaart de geringe fosfaat opname.

Op basis van gemeten en geschatte fluxen van N en P tussen de gebieden bovenstrooms en tussen de dijkes is een schatting gemaakt van de balansen van deze elementen voor de bovenste 30 cm van de bodem. Voor N is deze balans vervolgens vergeleken met schattingen voor een evenwichtssituatie. Het belangrijkste proces dat de bovenstroomse N-balans bepaalt is de uitspoeling naar diepere lagen. Dit ondanks een aanvoer in het daar verzamelde sediment van ca 40 kgN/ha per jaar. In het gebied tussen de dijkes worden de N- en P-balansen vooral bepaald door verliezen als gevolg van erosie en afstromend water. Het mulchen van de grond blijkt de N-balans weliswaar met meer dan 20% te verbeteren ten opzichte van de situatie zonder mulch maar ook daar blijft de balans negatief.

De vegetatieontwikkeling tussen, volgens de hoogtelijnen aangelegde, dijkes blijkt de sleutel te zijn tot het vermijden van te natte bovenstroomse omstandigheden en van te grote verliezen aan vooral N. Zo kan in korte tijd de infiltratie in het tussen de dijkes gelegen gebied 10-40% per jaar toenemen, de ETR van de bovenstroomse strook met 20% toenemen en de drainage met 22% afnemen. Het blijkt mogelijk om de grote ruimtelijke verschillen welke worden geïntroduceerd door de aanleg van dit soort bodem- en waterconserveringsmaatregelen in enkele jaren drastisch te verminderen en de resterende verschillen door middel van een boomvegetatie te benutten.

Annexe 1 **Tableaux détaillés du bilan hydrique dans les différents traitements de la station de Yabo au cours des saisons des pluies 1991 et 1992**

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1991: 90/AM

Date 1991	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P+14*R)	Stock eau(mm)	dStock eau(mm)	I-dSto (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRCu (mm)	Dcumul (mm)
	263.6									
19/7				443.14						
	20.7	13.23	205.85		9.33	196.52	7.00	189.52	7.00	189.52
21/7				452.47						
	0	0.00	0.00		-4.36	4.36	4.36	0.00	11.36	189.52
24/7				448.11						
	49.5	33.53	440.74		6.75	433.99	10.20	423.79	21.56	613.31
27/7				454.86						
	6.9	0.48	13.59		-1.95	15.54	10.20	5.34	31.76	618.65
30/7				452.91						
	28.5	20.56	316.41		2.96	313.45	10.00	303.45	41.76	922.10
2/8				455.87						
	34.3	25.86	350.00		7.96	342.04	9.90	332.14	51.66	1254.24
5/8				463.83						
	16.9	8.68	138.43		-3.43	141.86	9.90	131.96	61.56	1386.19
8/8				460.4						
	74	56.67	700.00		4.9	695.10	9.60	685.50	71.16	2071.69
11/8				465.3						
	73.8	56.49	700.00		-0.6	700.60	9.00	691.60	80.16	2763.29
14/8				464.7						
	18.5	4.42	80.36		-1.16	81.52	9.00	72.52	89.16	2835.81
17/8				463.54						
	3.6	0.00	3.60		-6.94	10.54	10.54	0.00	99.70	2835.81
23/8				456.6						
	19.5	12.42	193.34		1.73	191.61	10.65	180.96	110.35	3016.77
26/8				458.33						
	6.4	1.38	25.71		-3.22	28.93	10.65	18.28	121.00	3035.05
29/8				455.11						
	66.9	53.61	352.40		11.75	340.65	23.50	317.15	144.50	3352.20
04/9				466.86						
	0	0.00	0.00		-13.91	13.91	13.91	0.00	158.41	3352.20
10/9				452.95						
	5.7	0.93	18.68		-13.67	32.35	28.20	4.15	186.61	3356.35
16/9				439.28						
	14.9	8.33	131.50		13.12	118.38	14.10	104.28	200.71	3460.63
19/9				452.4						
	1	0.00	1.00		-9.15	10.15	10.15	0.00	210.86	3460.63
25/9				443.25						
	2.7	0.00	2.70		-18.93	21.63	21.63	0.00	232.49	3460.63
4/10				424.32						
	0	0.00	0.00		-8.2	8.20	8.20	0.00	240.69	3460.63
10/10				416.12						
	0	0.00	0.00		-4.17	4.17	4.17	0.00	244.86	3460.63
13/10				411.95						
	10.5	3.81	63.82		8.71	55.11	15.30	39.81	260.16	3500.44
16/10				420.66						
	0	0.00	0.00		-7.11	7.11	7.11	0.00	267.27	3500.44
22/10				413.55						
	0	0.00	0.00		-26.81	26.81	26.81	0.00	294.08	3500.44
17/12				386.74						
		0.00	0.00		-18.39	18.39	18.39	0.00	312.47	3500.44
28/1				368.35						

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90/AM

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P+14*R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dStock (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRcum (mm)	Ocumul (mm)
	75.7									
31/5				419.71						
4/6	3.4	0.00	3.40	416.04	-3.67	7.07	7.07	0.00	7.07	0.00
7/6	33.5	22.39	346.96	431.99	15.95	331.01	12.60	318.41	19.67	318.41
10/6	3	0.00	3.00	430.03	-1.96	4.96	4.96	0.00	24.63	318.41
13/6	4.1	0.00	4.10	425.65	-4.38	8.48	8.48	0.00	33.11	318.41
16/6	16.5	8.24	131.91	430.47	4.82	127.08	12.30	114.78	45.41	433.20
19/6	0.2	0.00	0.20	422.79	-7.68	7.88	7.88	0.00	53.29	433.20
22/6	0	0.00	0.00	415.52	-7.27	7.27	7.27	0.00	60.56	433.20
25/6	25.9	16.00	249.92	432.07	16.56	233.36	11.70	221.66	72.28	654.86
28/6	24	9.40	155.56	433.49	1.42	154.13	11.70	142.43	83.96	797.29
1/7	8.7	2.27	40.53	434.35	0.85	39.68	11.40	28.28	95.36	825.57
4/7	10.9	3.86	64.87	437.20	2.85	62.02	10.80	51.22	106.16	876.79
10/7	27.4	16.84	263.13	439.24	2.04	261.09	21.60	239.49	127.76	1116.28
13/7	11.5	1.36	30.56	431.49	-7.75	38.31	9.30	29.01	137.06	1145.29
16/7	4.4	0.00	4.40	432.42	0.93	3.47	3.47	0.00	140.53	1145.29
22/7	54.5	40.21	350.00	445.10	12.67	337.33	18.90	318.43	159.43	1463.72
3/8	106.8	63.70	668.82	455.12	10.03	658.79	36.30	622.49	195.73	2088.21
6/8	3.1	0.00	3.10	424.11	-31.02	34.12	9.90	24.22	205.63	2110.43
9/8	46.5	23.86	380.54	433.82	9.71	370.83	9.90	360.93	215.53	2471.36
15/8	22.4	8.10	135.75	432.79	-1.03	136.79	18.80	117.99	234.33	2589.34
18/8	7.2	0.00	7.20	428.59	-4.20	11.40	9.30	2.10	243.63	2591.44
24/8	5.1	0.00	5.10	415.36	-13.23	18.33	18.20	0.13	261.83	2591.57
27/8	3.7	0.00	3.70	411.26	-4.10	7.80	7.80	0.00	269.63	2591.57
30/8	54.5	35.15	386.30	428.23	16.97	369.33	9.00	360.33	278.63	2951.90
2/9	28.3	18.01	280.47	433.42	5.19	275.28	7.20	268.08	285.83	3219.98
5/9	28.1	17.84	277.92	436.92	3.50	274.42	12	262.42	297.83	3482.40
8/9	13.4	1.87	39.59	434.04	-2.88	42.47	12	30.47	309.83	3512.87
11/9	0	0.00	0.00	428.46	-5.57	5.57	5.57	0.00	315.40	3512.87
17/9	24.8	12.75	203.34	445.21	16.75	186.59	25.2	161.39	340.60	3674.26
20/9	9.7	0.00	9.70	439.25	-5.96	15.66	12.6	3.06	353.20	3677.32
26/9	0	0.00	0.00	423.34	-15.91	15.91	15.91	0.00	369.11	3677.32
29/9	0	0.00	0.00	409.87	-13.47	13.47	13.47	0.00	382.58	3677.33
2/10	19.7	6.11	105.22	417.21	7.34	97.88	14.6	83.28	397.18	3760.61
5/10	0	0.00	0.00	410.03	-7.18	7.18	7.18	0.00	404.36	3760.61
11/10	1.5	0.00	1.50	386.97	-23.06	24.56	24.56	0.00	428.92	3760.61

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90P/AM

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P+20*R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dStock (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRcum (mm)	Dcumul (mm)
	75.7									
31/5				408.74						
4/6	3.4	0.00	3.40	403.19	-5.55	8.95	8.95	0.00	8.95	0.00
7/6	33.5	17.27	350.00	414.99	11.80	338.20	12.60	325.60	21.55	325.60
10/6	3	0.00	3.00	416.98	1.99	1.01	1.01	0.00	22.56	325.60
13/6	4.1	0.00	4.10	411.67	-5.30	9.40	9.40	0.00	31.96	325.60
16/6	16.5	5.76	131.77	419.86	8.19	123.58	12.30	111.28	44.26	436.88
19/6	0.2	0.00	0.20	411.68	-8.18	8.38	8.38	0.00	52.64	436.88
22/6	0	0.00	0.00	406.30	-5.37	5.37	5.37	0.00	58.01	436.88
25/6	25.9	11.95	264.88	424.76	18.46	246.42	11.70	234.72	69.71	671.60
28/6	24	6.32	150.47	432.82	8.05	142.42	11.70	130.72	81.41	802.32
1/7	8.7	1.53	39.27	429.88	-2.94	42.20	11.40	30.80	92.81	833.12
4/7	10.9	2.57	62.26	428.99	-0.89	63.14	10.80	52.34	103.61	885.47
10/7	27.4	12.64	280.16	425.64	-3.35	263.51	21.60	261.91	125.21	1147.38
13/7	11.5	0.97	30.91	416.86	-8.78	39.69	9.30	30.39	134.51	1177.76
16/7	4.4	0.00	4.40	417.36	0.50	3.90	3.90	0.00	138.41	1177.76
22/7	54.5	32.49	350.00	432.66	15.30	334.70	18.90	315.80	157.31	1493.56
3/8	106.8	49.89	674.90	442.13	9.47	665.43	36.30	629.13	193.61	2122.69
6/8	3.1	0.00	3.10	409.79	-32.34	35.44	9.90	25.54	203.51	2148.23
9/8	46.5	17.32	392.90	425.48	15.69	377.21	9.90	367.31	213.41	2515.54
15/8	22.4	5.47	131.72	424.48	-1.00	132.72	18.80	113.92	232.21	2629.46
18/8	7.2	0.00	7.20	420.16	-4.32	11.52	9.30	2.22	241.51	2631.68
24/8	5.1	0.00	5.10	402.50	-17.66	22.76	18.20	4.56	259.71	2636.24
27/8	3.7	0.00	3.70	398.24	-4.27	7.97	7.97	0.00	267.68	2636.24
30/8	54.5	27.78	385.90	418.14	19.90	366.00	9.00	357.00	276.68	2993.24
2/9	28.3	13.61	300.47	429.67	11.53	288.94	7.20	281.74	283.88	3274.97
5/9	28.1	13.47	297.49	430.30	0.63	296.86	12	284.86	295.88	3559.84
8/9	13.4	1.28	38.95	431.19	0.89	38.06	12	26.06	307.88	3585.89
11/9	0	0.00	0.00	421.73	-9.46	9.46	9.46	0.00	317.34	3585.89
17/9	24.8	9.31	210.96	426.60	4.87	206.09	25.2	180.89	342.54	3766.79
20/9	9.7	0.00	9.70	414.05	-12.55	22.25	12.6	9.65	355.14	3776.44
26/9	0	0.00	0.00	401.56	-12.49	12.49	12.49	0.00	367.63	3776.44
29/9	0	0.00	0.00	390.03	-11.53	11.53	11.53	0.00	379.16	3776.44
2/10	19.7	4.07	101.11	394.62	4.60	96.52	14.6	81.92	393.76	3858.35
5/10	0	0.00	0.00	384.48	-10.14	10.14	10.14	0.00	403.90	3858.36
11/10	1.5	0.00	1.50	369.39	-15.10	16.60	16.6	0.00	420.50	3858.36

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 82/AM

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P+16*R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	l-dStock (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRCum (mm)	Dcumul (mm)
	75.7									
31/5				417.32						
4/6	3.4	0.00	3.40	391.36	-25.96	29.36	16.80	12.56	16.8	12.56
7/6	33.5	18.75	300.00	425.17	33.80	266.20	12.60	253.60	29.4	266.16
10/6	3	0.00	3.00	412.03	-13.14	16.14	12.60	3.54	42	269.69
13/6	4.1	0.00	4.10	391.76	-20.27	24.37	12.30	12.07	54.3	281.76
16/6	16.5	4.56	89.49	404.69	12.93	76.56	12.30	64.26	66.6	346.02
19/6	0.2	0.00	0.20	385.99	-18.70	18.90	12.30	6.60	78.9	352.62
22/6	0	0.00	0.00	371.34	-14.65	14.65	11.90	2.75	90.8	355.37
25/6	25.9	11.88	215.91	412.43	41.09	174.82	11.70	163.12	102.5	518.49
28/6	24	4.23	91.70	421.96	9.53	82.17	11.70	70.47	114.2	588.96
1/7	8.7	0.88	22.77	415.88	-6.09	28.86	11.40	17.46	125.6	606.42
4/7	10.9	1.62	36.78	410.80	-5.08	41.86	10.80	31.06	136.4	637.48
10/7	27.4	12.75	231.45	415.00	4.20	227.24	21.60	205.64	158	843.12
13/7	11.5	0.54	20.12	399.54	-15.46	35.58	9.30	26.28	167.3	869.40
16/7	4.4	0.00	4.40	390.64	-8.90	13.30	9.30	4.00	176.6	873.40
22/7	54.5	38.34	300.00	417.80	27.16	272.84	18.90	253.94	195.5	1127.35
3/8	106.8	54.20	530.70	433.76	15.96	514.74	36.30	478.44	231.8	1605.79
6/8	3.1	0.00	3.10	396.67	-37.09	40.19	9.90	30.29	241.7	1636.08
9/8	46.5	15.71	297.81	418.23	21.56	276.25	9.90	266.35	251.6	1902.43
15/8	22.4	3.62	80.29	413.02	-5.21	85.50	18.80	66.70	270.4	1969.12
18/8	7.2	0.00	7.20	398.55	-14.47	21.67	9.30	12.37	279.7	1981.49
24/8	5.1	0.00	5.10	377.37	-21.18	26.28	18.20	8.08	297.9	1989.57
27/8	3.7	0.00	3.70	369.60	-7.77	11.47	9.00	2.47	306.9	1992.04
30/8	54.5	31.40	321.10	403.73	34.13	286.97	9.00	277.97	315.9	2270.01
2/9	28.3	14.00	252.28	415.43	11.70	240.58	7.20	233.38	323.1	2503.39
5/9	28.1	13.82	249.22	419.29	3.86	245.36	12	233.36	335.1	2736.75
8/9	13.4	0.72	24.94	417.55	-1.75	26.69	12	14.69	347.1	2751.43
11/9	0	0.00	0.00	404.46	-13.09	13.09	12.2	0.89	359.3	2752.32
17/9	24.8	8.60	162.33	422.63	18.18	144.15	25.2	118.95	384.5	2871.28
20/9	9.7	0.00	9.70	414.77	-7.86	17.56	12.6	4.96	397.1	2876.23
26/9	0	0.00	0.00	386.46	-28.32	28.32	28.32	0.00	425.42	2876.23
29/9	0	0.00	0.00	369.62	-16.84	16.84	14.4	2.44	439.82	2878.67
2/10	19.7	2.46	59.06	375.70	6.08	52.98	14.6	38.38	454.42	2917.05
5/10	0	0.00	0.00	366.30	-9.39	9.39	9.39	0.00	463.81	2917.05
11/10	1.5	0.00	1.50	347.08	-19.22	20.72	20.72	0.00	484.53	2917.05

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1991: 90/AVs

Date 1991	Pluie (mm)	R (mm)	l(mm) P-R	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	l-dSto (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	dStock theorique	DI+ (mm)	ETRcumu (mm)	Dcumul (mm)	ETP (mm)
19/7	263.6			259.73									
24/7	20.7	13.36	7.34	260.77	1.04	6.29	6.29	0.00	1.05	0.00	6.29	0.00	17.20
27/7	49.5	33.84	15.66	264.22	3.45	12.21	10.20	2.01	5.46	0.00	16.49	2.01	10.2
30/7	6.9	0.50	6.40	262.02	-2.20	8.60	8.60	0.00	-2.20	0.00	25.09	2.01	10.20
2/8	28.5	20.75	8.50	283.50	21.48	-12.98	10.00	0.00	-1.50	22.98	35.09	2.01	10.00
5/8	34.3	26.08	8.22	300.74	17.25	-9.03	9.90	0.00	-1.68	18.93	44.99	2.01	9.90
8/8	16.9	8.79	8.11	326.85	26.11	-18.00	9.90	0.00	-1.79	27.90	54.89	2.01	9.90
11/8	74	57.14	16.86	388.92	62.07	-45.21	9.60	0.00	7.26	54.81	64.49	2.01	9.60
14/8	73.8	56.96	16.84	411.45	22.52	-5.68	9.00	0.00	7.84	14.68	73.49	2.01	9.00
17/8	18.5	4.51	13.99	410.01	-1.43	15.42	9.00	6.42	4.99	0.00	82.49	8.43	9.00
23/8	3.6	0.00	3.60	410.08	0.07	3.53	3.53	0.00	0.07	0.00	86.02	8.43	19.65
26/8	19.5	12.55	8.59	413.63	3.55	5.04	5.04	0.00	3.55	0.00	91.06	8.43	10.65
29/8	6.4	1.42	4.98	411.51	-2.12	7.10	7.10	0.00	-2.12	0.00	98.16	8.43	10.65
04/9	66.9	54.01	12.89	425.54	14.03	-1.14	23.50	0.00	-10.61	24.64	121.66	8.43	23.50
10/9	0	0.00	0.00	414.40	-11.14	11.14	11.14	-0.00	-11.14	0.00	132.80	8.43	24.60
16/9	5.7	0.96	4.74	407.29	-7.11	11.85	11.85	-0.00	-7.11	0.00	144.65	8.43	28.20
19/9	14.9	8.43	6.47	411.53	4.24	2.23	2.23	0.00	4.24	0.00	146.88	8.43	14.10
25/9	1	0.00	1.00	403.41	-8.12	9.12	9.12	0.00	-8.12	0.00	156.00	8.43	29.70
10/10	2.7	0.00	2.7	389.90	-13.51	16.21	16.21	0.00	-13.51	0.00	172.21	8.43	76.00
13/10	0	0.00	0.00	383.115	-6.78	6.78	6.78	0.00	-6.78	0.00	178.99	8.43	15.3
16/10	10.5	3.88	6.62	385.04	1.93	4.70	4.70	0.00	1.92	0.00	183.89	8.43	15.30
22/10	0	0.00	0.00	380.09	-4.95	4.95	4.95	0.00	-4.95	0.00	188.64	8.43	31.30
17/12	0	0.00	0.00	341.61	-38.48	38.48	38.48	0.00	-38.48	0.00	227.12	8.43	
28/1	0	0.00	0.00	334.86	-6.75	6.75	6.75	0.00	-6.75	0.00	233.87	8.43	

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90/AVI

Date 1992	Pluie (mm)	I(mm) (I=P)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dStock (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRCum (mm)	Decumul (mm)
	75.7								
31/5			367.39						
	3.4	3.4		-6.97	10.37	10.37		10.37	0.00
4/6			360.42						
	33.5	33.5		-2.14	35.64	12.6	23.04	22.97	23.04
7/6			358.27						
	3	3		0.46	2.54	2.54		25.51	23.04
10/6			358.73						
	4.1	4.1		-0.88	4.96	4.96		30.49	23.04
13/6			357.85						
	16.5	16.5		2.86	13.64	12.3		42.79	23.04
16/6			360.71						
	0.2	0.2		-4.13	4.33	4.33		47.12	23.04
22/6			356.58						
	25.9	25.9		0.31	25.59	11.7	13.89	58.82	36.93
25/6			356.90						
	24	24		0.67	23.33	11.7	11.63	70.52	48.56
28/6			357.57						
	8.7	8.7		7.50	1.20	1.2		71.72	48.56
1/7			365.07						
	10.9	10.9		7.35	3.55	3.55		75.27	48.56
4/7			372.41						
	27.4	27.4		3.17	24.23	21.6	2.63	96.87	51.19
10/7			375.58						
	11.5	11.5		0.26	11.24	9.3		106.17	51.19
13/7			375.84						
	4.4	4.4		2.16	2.22	2.22		108.39	51.19
16/7			378.02						
	54.5	54.5		40.70	13.80	13.8		122.19	51.19
22/7			418.73						
	106.8	106.8		9.85	96.95	36.3	60.65	158.49	111.84
3/8			426.58						
	3.1	3.1		-29.85	32.95	9.9	23.05	168.39	134.88
6/8			396.73						
	46.5	46.5		22.97	23.53	9.9	13.63	178.29	148.51
9/8			421.70						
	22.4	22.4		-8.01	30.41	16.8	11.61	197.09	160.12
15/8			413.70						
	7.2	7.2		-9.19	16.39	9.3	7.09	206.39	167.20
18/8			404.51						
	5.1	5.1		-17.62	22.72	18.2	4.52	224.59	171.72
24/8			386.89						
	3.7	3.7		-4.90	8.60	8.6		233.19	171.72
27/8			381.99						
	54.5	54.5		15.90	38.60	9	29.60	242.19	201.32
30/8			397.89						
	28.3	28.3		11.90	16.40	7.2	9.20	249.39	210.52
2/9			409.79						
	28.1	28.1		7.16	20.94	12	8.94	261.39	219.46
5/9			416.95						
	13.4	13.4		-7.15	20.55	12	8.55	273.39	228.01
8/9			409.80						
	0	0		-7.30	7.30	7.3		280.69	228.01
11/9			402.50						
	24.8	24.8		2.70	22.10	22.1		302.79	228.01
17/9			405.20						
	9.7	9.7		-4.09	13.79	12.6	1.19	315.39	229.21
20/9			401.11						
	0	0		-21.58	21.58	21.58		336.97	229.21
26/9			379.53						
	0	0		-15.64	15.64	14.4	1.24	351.37	230.44
29/9			363.90						
	19.7	19.7		1.24	18.46	14.6	3.86	365.97	234.30
2/10			365.14						
	0	0		-9.17	9.17	9.17		375.14	234.30
5/10			355.97						
	1.5	1.5		-19.92	21.42	21.42		396.56	234.30
11/10			336.05						

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90P/AVf

Date 1992	Pluie (mm)	l(mm) (l=P)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	l-dStock (mm)	ETR (mm)	Drainage (mm)	ETRoum (mm)	Deumul (mm)
	75.7								
31/5			413.52						
	3.4	3.4		-6.37	9.77	9.77		9.77	0.00
4/6			407.15						
	33.5	33.5		6.02	27.48	12.6	14.88	22.37	14.88
7/6			413.17						
	7.1	7.1		1.98	5.12	5.12		27.49	14.88
13/6			415.15						
	16.5	16.5		11.77	4.73	4.73		32.22	14.88
16/6			426.93						
	0.2	0.2		-7.65	7.85	7.85		40.07	14.88
19/6			419.28						
	0	0		-4.52	4.52	4.52		44.59	14.88
22/6			414.76						
	25.9	25.9		8.48	17.42	11.7	5.72	56.29	20.60
25/6			423.24						
	24	24		9.35	14.65	11.7	2.95	67.99	23.54
28/6			432.59						
	8.7	8.7		5.71	2.99	2.99		70.98	23.54
1/7			438.30						
	10.9	10.9		-1.03	11.93	10.8	1.13	81.78	24.68
4/7			437.27						
	27.4	27.4		3.28	24.12	21.6	2.52	103.38	27.19
10/7			440.55						
	11.5	11.5		-7.71	19.21	9.3	9.91	112.68	37.10
13/7			432.84						
	4.4	4.4		-4.04	8.44	8.44		121.12	37.10
16/7			428.80						
	54.5	54.5		7.28	47.24	18.9	28.34	140.02	65.44
22/7			438.06						
	106.8	106.8		7.46	99.34	36.3	63.04	176.32	128.48
3/8			443.52						
	3.1	3.1		-29.92	33.02	9.9	23.12	186.22	151.60
6/8			413.61						
	46.5	46.5		10.70	35.80	9.9	25.90	196.12	177.49
9/8			424.31						
	22.4	22.4		-1.46	23.86	18.8	5.06	214.92	182.56
15/8			422.85						
	7.2	7.2		-1.72	8.92	8.92		223.84	182.56
18/8			421.13						
	5.1	5.1		-24.23	29.33	18.2	11.13	242.04	193.68
24/8			396.90						
	3.7	3.7		-3.71	7.41	7.41		249.45	193.68
27/8			393.19						
	54.5	54.5		16.38	38.12	9	29.12	258.45	222.80
30/8			409.57						
	28.3	28.3		16.22	12.08	7.2	4.88	265.65	227.68
2/9			425.79						
	28.1	28.1		4.13	23.97	12	11.97	277.65	239.65
5/9			429.92						
	13.4	13.4		0.90	12.50	12	0.50	289.85	240.15
8/9			430.83						
	0	0		-9.52	9.52	9.52		289.17	240.15
11/9			421.31						
	24.8	24.8		5.81	18.99	12.6	6.39	311.77	246.54
14/9			427.12						
	0	0		-12.47	12.47	12.47		324.24	246.54
17/9			414.65						
	9.7	9.7		-8.84	18.54	12.6	5.94	336.84	252.47
20/9			405.81						
	0	0		-23.65	23.65	23.65		360.49	252.47
26/9			382.16						
	0	0		-17.98	17.98	14.4	3.58	374.89	258.06
29/9			384.18						
	19.7	19.7		14.41	5.29	5.29		380.18	258.06
2/10			378.59						
	0	0		-4.69	4.69	4.69		384.87	258.06
5/10			373.90						
	1.5	1.5		-27.04	28.54	28.54		413.41	258.06
11/10			346.86						

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1991: 90/IN

Date 1991	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P-R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	ETR (I-dSto)	ETRcumu (mm)	ETP (mm)
	263.6							
19/7				235.49				
	20.7	13.23	7.47		7.56	4.00	4.00	7.00
21/7				243.05				
	0	0.00	0.00		-0.26	0.26	4.26	10.20
24/7				242.79				
	49.5	33.53	15.97		8.15	7.82	12.08	10.20
27/7				250.94				
	6.9	0.48	6.42		-3.12	9.54	21.63	10.20
30/7				247.82				
	28.5	20.56	7.94		2.08	5.86	27.48	10.00
2/8				249.9				
	34.3	25.86	8.44		9.1	9.90	37.38	9.90
5/8				259				
	16.9	8.68	8.22		-1.77	9.99	47.37	9.90
8/8				257.23				
	74	56.67	17.33		8.12	9.21	56.58	9.60
11/8				265.35				
	73.8	56.49	17.31		21.22	9.00	65.58	9.00
14/8				266.57				
	18.5	4.42	14.08		5.07	9.01	74.60	9.00
17/8				291.64				
	3.6	0.00	3.60		1	2.60	77.20	19.65
23/8				292.64				
	19.5	12.42	7.08		1.66	5.42	82.62	10.65
26/8				294.3				
	6.4	1.38	5.02		-0.46	5.48	88.10	10.65
29/8				293.84				
	66.9	53.61	13.29		10.55	2.74	90.84	23.50
04/9				304.39				
	0	0.00	0.00		-3.44	3.44	94.28	24.60
10/9				300.95				
	5.7	0.93	4.77		1.45	3.32	97.60	28.20
16/9				302.4				
	14.9	8.33	6.57		-3.9	10.47	108.07	14.10
19/9				298.5				
	1	0.00	1.00		-2.69	3.69	111.76	29.70
25/9				295.81				
	0.4	0.00	0.40		-2.29	2.69	114.45	30.27
1/10				293.52				
	2.3	0.00	2.30		-2.04	4.34	118.79	15.13
4/10				291.48				
	0	0.00	0.00		-3.56	3.56	122.35	30.60
10/10				287.92				
	0	0	0		-0.72	0.72	123.07	15.30
13/10				287.2				
	10.5	3.81	6.69		1.16	5.53	128.60	15.30
16/10				289.06				
	0	0.00	0.00		-2.21	2.21	130.81	31.3
22/10				286.87				
	0	0.00	0.00		-19.78	19.78	150.59	
17/12				267.09				
	0	0.00	0.00		-5.2	5.20	155.79	
26/1				261.89				

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90/IN

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P-R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dStock (mm)	ETR (mm)	ETRacumul (mm)	Drainage (mm)	ETP (mm)
	75.7									
31/5				257.01						
	3.4	0.00	3.40		-1.58	4.98	4.98	4.98		16.8
4/6				255.43						
	33.5	20.93	12.57		7.21	5.36	5.36	10.34		12.6
7/6				262.64						
	3	0.00	3.00		-5.36	8.36	8.36	18.70		12.6
10/6				257.28						
	4.1	0.00	4.10		0.06	4.04	4.04	22.74		12.3
13/6				257.34						
	16.7	8.95	7.75		0.61	7.14	7.14	29.88		36.5
22/6				257.95						
	25.9	15.70	10.20		-0.23	10.43	10.43	40.31		11.7
25/6				257.72						
	24	11.03	12.97		2.94	10.03	10.03	50.34		11.7
28/6				260.66						
	8.7	2.91	5.79		2.86	2.93	2.93	53.27		11.4
1/7				263.52						
	10.9	4.65	6.25		2.72	3.53	3.53	56.80		10.8
4/7				266.24						
	27.4	16.39	11.01		3.06	7.95	7.95	64.75		21.6
10/7				269.3						
	11.5	1.84	9.66		-9.75	19.41	9.3	74.05	10.11	9.3
13/7				259.55						
	4.4	0.00	4.40		-0.1	4.50	4.5	78.55		9.3
16/7				259.45						
	54.5	35.02	19.48		1.7	17.78	17.78	96.33		18.9
22/7				261.15						
	106.8	59.11	47.69		10.48	37.21	36.3	132.63	0.91	36.3
3/8				271.63						
	3.1	0.00	3.10		-17.77	20.87	9.9	142.53	10.97	9.9
6/8				253.86						
	46.5	24.45	22.05		3.9	18.15	9.9	152.43	8.25	9.9
9/8				257.76						
	22.4	9.60	12.80		1.36	11.44	11.44	163.87		18.8
15/8				259.12						
	7.2	0.00	7.20		-1.59	8.79	8.79	172.66		9.3
18/8				257.53						
	5.1	0.00	5.10		-2.94	8.04	8.04	180.70		18.2
24/8				254.59						
	3.7	0.00	3.70		-0.72	4.42	4.42	185.12		9
27/8				253.87						
	54.5	32.09	22.41		1.19	21.22	9	194.12	12.22	9
30/8				255.06						
	28.3	17.37	10.93		5.28	5.65	5.65	199.77		7.2
2/9				260.34						
	28.1	17.23	10.87		4.81	6.06	6.06	205.83		12
5/9				265.15						
	13.4	2.45	10.95		-0.22	11.17	11.17	217.00		12
8/9				264.93						
	0	0.00	0.00		-1.95	1.95	1.95	218.95		12.12
11/9				262.98						
	24.8	12.95	11.85		10.83	1.02	1.02	219.97		25.2
17/9				273.81						
	9.7	0.00	9.70		0.59	9.11	9.11	229.08		12.6
20/9				274.4						
	0	0.00	0.00		-2.48	2.48	2.48	231.56		28.8
26/9				271.92						
	0	0.00	0.00		-4.04	4.04	4.04	235.60		14.4
29/9				267.88						
	19.7	7.58	12.14		-1.84	13.98	13.98	249.58		14.6
2/10				266.04						
	1.5	0.00	1.50		0.49	1.01	1.01	250.59		44.6
11/10				266.53						

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1991: 90P/IN

Date 1991	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P-R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dSto (mm)	ETR (mm)	ETRcumul (mm)	Drainage (mm)
	263.6								
19/7				271.25					
	20.7	3.45	17.25		9.39	7.86	7.00	7	0.86
21/7				280.64					
	0	0.00	0.00		-3.15	3.15	3.15	10.15	
24/7				277.49					
	49.5	11.67	37.83		51.52	-13.69	10.20	20.35	
27/7				329.01					
	6.9	0.00	6.90		-1.04	7.94	7.94	28.29	
30/7				327.97					
	28.5	6.71	21.79		9.13	12.66	10.00	38.29	2.66
2/8				337.1					
	34.3	9.50	24.80		25.7	-0.90	9.90	48.19	
5/8				362.8					
	16.9	1.85	15.05		4.08	10.97	9.90	58.09	1.07
8/8				366.88					
	74	21.82	52.18		30.81	21.37	9.60	67.69	11.77
11/8				397.69					
	73.8	21.84	51.96		16.7	35.26	9.00	76.69	26.26
14/8				414.39					
	18.5	0.63	17.87		0.74	17.13	9.00	85.69	8.13
17/8				415.13					
	3.6	0.00	3.60		-13.21	16.81	16.81	102.5	
23/8				401.92					
	19.5	3.14	16.36		1.58	14.78	10.65	113.15	4.13
26/8				403.5					
	6.4	0.15	6.25		-2.47	8.72	8.72	121.87	
29/8				401.03					
	66.9	28.60	38.30		23.99	14.31	14.31	136.18	
04/9				425.02					
	0	0.00	0.00		-15.38	15.38	15.38	151.56	
10/9				409.64					
	5.7	0.10	5.60		-4.58	10.18	10.18	161.74	
16/9				405.06					
	14.9	1.74	13.16		-2.53	15.69	14.10	175.84	1.59
19/9				402.53					
	1	0.00	1.00		-6.13	7.13	7.13	182.97	
25/9				396.4					
	2.7	0.00	2.70		-9.04	11.74	11.74	194.71	
4/10				387.36					
	0	0.00	0.00		-4.67	4.67	4.67	199.38	
10/10				382.69					
	0	0.00	0.00		-1.41	1.41	1.41	200.79	
13/10				381.28					
	10.5	0.58	9.92		-0.11	10.03	10.03	210.82	
16/10				381.17					
	0	0.00	0.00		-5.04	5.04	5.04	215.86	
22/10				376.13					
	0	0.00	0.00		-24.09	24.09	24.09	239.95	
17/12				352.04					
	0	0.00	0.00		-16.33	16.33	16.33	256.28	
28/1/9 2				335.71					

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 90P/IN

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	l(mm) (P-R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	i-dStock (mm)	ETR (mm)	ETRcumul (mm)	Drainage (mm)
	75.7								
31/5				320.18					
	3.4	0.00	3.40		-0.80	4.20	4.2	4.20	
4/6				319.39					
	33.5	16.53	16.97		2.73	14.25	12.6	16.80	1.65
7/6				322.11					
	3	0.00	3.00		-3.21	6.21	6.21	23.01	
10/6				318.90					
	4.1	0.00	4.10		0.04	4.06	4.06	27.07	
13/6				318.94					
	16.5	6.11	10.39		0.80	9.59	9.59	36.66	
16/6				319.74					
	0.2	0.00	0.20		-1.68	1.88	1.88	38.54	
19/6				318.07					
	0	0.00	0.00		-2.32	2.32	2.32	40.86	
22/6				315.75					
	25.9	11.73	14.17		-2.35	16.52	11.7	52.56	4.82
25/6				313.40					
	24	7.25	16.75		6.43	10.33	10.33	62.89	
28/6				319.82					
	8.7	1.93	6.77		-1.94	8.71	8.71	71.60	
1/7				317.89					
	10.9	3.04	7.86		1.71	6.15	6.15	77.75	
4/7				319.60					
	27.4	12.35	15.05		-4.42	19.46	19.46	97.21	
10/7				315.18					
	11.5	1.27	10.23		-2.61	12.84	9.3	106.51	3.54
13/7				312.57					
	4.4	0.00	4.40		0.99	3.41	3.41	109.92	
16/7				313.56					
	54.5	30.46	24.04		39.59	15.55	18.9	128.82	
22/7				353.15					
	106.8	48.35	58.45		26.00	32.44	32.44	161.26	
3/8				379.15					
	3.1	0.00	3.10		-27.41	30.51	9.9	171.16	20.61
6/8				351.75					
	46.5	17.51	28.99		16.91	12.08	9.9	181.06	2.18
9/8				368.65					
	22.4	6.34	16.06		-2.42	18.49	18.49	199.55	
15/8				366.23					
	7.2	0.00	7.20		-2.21	9.41	9.3	208.85	0.11
18/8				364.02					
	5.1	0.00	5.10		-8.99	14.09	14.09	222.94	
24/8				355.04					
	3.7	0.00	3.70		-3.59	7.29	7.29	230.23	
27/8				351.44					
	54.5	26.59	27.91		21.00	6.90	6.9	237.13	
30/8				372.44					
	28.3	13.23	15.07		6.54	8.53	7.2	244.33	1.33
2/9				378.99					
	28.1	13.10	15.00		2.74	12.26	12	256.33	0.26
5/9				381.73					
	13.4	1.64	11.76		-3.71	15.47	12	268.33	3.47
8/9				378.02					
	0	0.00	0.00		-6.15	6.15	6.15	274.48	
11/9				371.87					
	24.8	9.35	15.45		13.75	1.70	1.7	276.18	
17/9				385.62					
	9.7	0.00	9.70		-0.87	10.57	10.57	286.75	
20/9				384.75					
	0	0.00	0.00		-6.66	6.66	6.66	293.41	
26/9				378.09					
	0	0.00	0.00		-8.43	8.43	8.43	301.84	
29/9				369.66					
	19.7	4.85	14.75		3.14	11.60	11.6	313.44	
2/10				372.80					
	0	0.00	0.00		-5.31	5.31	5.31	318.75	
5/10				367.49					
	1.5	0.00	1.50		-12.23	13.73	13.73	332.48	
11/10				355.26					

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1991: 82/IN

Date 1991	Pluie (mm)	R (mm)	I(mm) (P-R)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	I-dStock (mm)	ETR (mm)	ETRCumul (mm)	Drainage (mm)
	263.6								
19/7				276.74					
	20.7	10.15	10.55		6.27	4.28	4.28	4.28	
21/7				283.01					
	0	0.00	0.00		-2.43	2.43	2.43	6.71	
24/7				280.58					
	49.5	27.81	21.69		3.5	18.19	10.20	16.91	7.99
27/7				284.08					
	6.9	0.32	6.58		-0.48	7.06	7.06	23.97	
30/7				283.6					
	28.5	17.02	11.48		5.57	5.91	5.91	29.88	
2/8				289.17					
	34.3	22.14	12.16		6.93	5.23	5.23	35.11	
5/8				296.1					
	16.9	6.14	10.76		1.89	8.87	8.87	43.98	
8/8				297.99					
	74	49.12	24.88		47.45	-22.57	9.60	53.58	
11/8				345.44					
	73.8	48.97	24.83		12.29	12.54	9.00	62.58	3.54
14/8				357.73					
	18.5	2.68	15.82		41.85	-26.03	9.00	71.58	
17/8				399.58					
	3.6	0.00	3.60		-10.23	13.83	13.83	85.41	
23/8				389.35					
	19.5	9.42	10.08		19.65	-9.57	10.65	96.06	
26/8				409					
	6.4	0.78	5.62		-24.99	30.61	10.65	106.71	19.96
29/8				384.01					
	66.9	49.80	17.10		11.81	5.29	5.29	112.00	
04/9				395.82					
	0	0.00	0.00		-17.64	17.64	17.64	129.64	
10/9				378.18					
	5.7	0.54	5.16		-10.77	15.93	15.93	145.57	
16/9				367.41					
	14.9	5.85	9.05		5.09	3.96	3.96	149.53	
19/9				372.5					
	1	0.00	1.00		-19.99	20.99	20.99	170.52	
25/9				352.51					
	2.7	0.00	2.70		-14	16.70	16.70	187.22	
4/10				338.51					
	0	0.00	0.00		-9.44	9.44	9.44	196.66	
10/10				329.07					
	10.5	2.32	8.18		-5.04	13.22	13.22	209.88	
22/10				324.03					
	0	0.00	0.00		-34.67	34.67	34.67	244.55	
17/12				289.36					
		0.00	0.00		-13.78	13.78	13.78	258.33	
28/1				275.58					

Bilan d'eau au cours saison des pluies 1992: 82/IN

Date 1992	Pluie (mm)	R (mm)	l(mm) (P-F)	Stock Eau(mm)	dStock (mm)	l-dStock (mm)	ETR (mm)	ETRcumul (mm)	Drainage (mm)
	75.7								
31/5	3.4	0.00	3.40	297.90	-5.76	9.16	9.16	9.16	
4/6	33.5	18.59	14.91	292.14	4.97	9.94	9.94	19.10	
7/6	3	0.00	3.00	297.11	-0.58	3.58	3.58	22.68	
10/6	4.1	0.00	4.10	296.53	-2.50	6.60	6.6	29.28	
13/6	16.5	7.98	8.52	294.04	2.75	5.77	5.77	35.05	
16/6	0.2	0.00	0.20	296.78	-2.04	2.24	2.24	37.29	
19/6	0	0.00	0.00	294.74	-3.98	3.98	3.98	41.27	
22/6	25.9	13.95	11.95	290.77	7.53	4.42	4.42	45.69	
25/6	24	12.77	11.23	298.30	9.27	1.95	1.95	47.64	
28/6	8.7	2.63	6.07	307.57	-2.05	8.11	8.11	55.75	
1/7	10.9	4.17	6.73	305.53	-12.92	19.65	10.8	66.55	8.85
4/7	27.4	14.88	12.52	292.60	6.96	5.56	5.56	72.11	
10/7	11.5	4.59	6.91	299.56	-1.90	8.81	8.81	80.92	
13/7	4.4	0.00	4.40	297.66	1.29	3.11	3.11	84.03	
16/7	54.5	31.08	23.42	298.95	24.09	-0.67	18.9	102.93	
22/7	106.8	61.85	45.15	323.03	-2.23	47.38	36.3	139.23	11.08
3/8	3.1	0.00	3.10	320.80	-21.09	24.19	9.9	149.13	14.29
6/8	46.5	26.35	20.15	299.71	3.52	16.63	9.9	159.03	6.73
9/8	22.4	11.77	10.63	303.24	-0.18	10.80	10.8	169.83	
15/8	7.2	0.53	6.67	303.06	-10.89	17.56	9.3	179.13	8.26
18/8	5.1	0.00	5.10	292.17	4.83	0.27	0.27	179.40	
24/8	3.7	0.00	3.70	297.00	-3.37	7.07	7.07	186.47	
27/8	54.5	31.08	23.42	293.63	-2.13	25.55	9	195.47	16.55
30/8	28.3	15.43	12.87	291.51	12.55	0.32	0.32	195.79	
2/9	28.1	15.31	12.79	304.06	20.14	-7.35	12	207.79	
5/9	13.4	5.91	7.49	324.20	6.98	0.51	0.51	208.30	
8/9	0	0.00	0.00	331.18	-5.70	5.70	5.7	214.00	
11/9	24.8	13.27	11.53	325.48	4.96	6.57	6.57	220.57	
17/9	9.7	0.00	9.70	330.44	-1.89	11.59	11.59	232.16	
20/9	0	0.00	0.00	328.55	-9.13	9.13	9.13	241.29	
26/9	0	0.00	0.00	319.42	-8.29	8.29	8.29	249.58	
29/9	19.7	10.06	9.64	311.13	0.84	8.80	8.8	258.38	
2/10	0	0.00	0.00	311.97	-5.08	5.08	5.08	263.46	
5/10	1.5	0.00	1.50	306.89	-5.16	6.66	6.66	270.12	
11/10				301.73					

Annexe 2 Table des relevés floristiques indiquant les contributions spécifiques des espèces dans la végétation herbacée, sur les stations des forêts classées de Yabo (en 1991 et 1993) et Bissiga en 1991. Pour la description des traitements et dates correspondant aux différents relevés, voir page 115, chapitre 7.

RELIEVES FLORESTALES

Noms des espèces	1 AM	1PAM	3AM	3PAM	9AM	11AM	1R	1PN	3PN	9N	11N	5BS	5HA	5BA	5H	5B
<i>Andropogon fastigiatus</i>	4	3	4	2		9	4	4	3	14	7	4	2	3	2	3
<i>Andropogon gayanus</i>		19	15	10	5	3				8	3	7	9	12	15	
<i>Andropogon pseudopanicus</i>	3	4	2	1	1	1	2	8	2	1	1	2	1	2	1	2
<i>Acanthospermum hispidum</i>								24								
<i>Achyrocline aspera</i>	21								15				18			
<i>Adenia sp.</i>			13						17							
<i>Allionathera nodiflora</i>		20														
<i>Allionathera repens</i>		19						23								
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>		20						24					16	17		
<i>Aristida adscandens</i>	6	5		14	16		6	7	16	16		17	11	15	7	4
<i>Aristida teretiflora</i>												10				16
<i>Aspita helminthoides</i>																
<i>Begharia moderatopaleata</i>			15													
<i>Begharia erecta</i>								23						17		
<i>Begharia trifida</i>											16					
<i>Borreria radialis</i>	18	20	14	13	18			18	13		12			20	15	15
<i>Borreria strobilifera</i>	17	9	6	8	5	5	11	9	13	6	6		8	6	6	7
<i>Brachiaria hagerupii</i>	22				19		12		22	15		9	15	9	9	8
<i>Brachiaria lutea</i>		17	15	19		16		22	17	11	15	14	13	9	11	10
<i>Brachiaria stigmatalis</i>														8		
<i>Cassia flacca</i>								24				18	18			
<i>Cassia mimosaoides</i>	14	16	15	16	7	12		24	15	11	15	14	16	11	15	14
<i>Cassia nigricans</i>					17							18	17	21	13	15
<i>Cassia tora</i>	7	7	8	12	13	13	10	19	15	11	13	14	18	16	16	16
<i>Chloris gayana</i>	12	16			16	16	6	21	7	5	8			21	12	12
<i>Chorizandra</i>									16					20		
<i>Chrysanthemum americanum</i>																9
<i>Cissus gracilis</i>														14		
<i>Citrullus lanatus</i>																
<i>Cochlospermum officinale</i>		20														
<i>Cochlospermum trichosperum</i>		16						23								
<i>Crotalaria comosa</i>		20			15	15										
<i>Crotalaria retusa</i>					16	16										
<i>Cucumis melo var. agrifolius</i>	22	19	15					22	20	9	15			20		15
<i>Cucumis melo var. agrifolius</i>					22									21		
<i>Cymbopogon schweinfurthii</i>					18							16	12		14	
<i>Cynodon dactylon</i>		19			18	11	12	21		12	14			20		
<i>Cyperus diffractus</i>									17							
<i>Cyperus iria</i>	20		15	18												
<i>Cyperus podocarpus</i>		20														
<i>Cyperus rotundus</i>		20														
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	16	11			22		11		18		12			20	15	16
<i>Dicoma lanthornia</i>					22											
<i>Digitaria ciliaris</i>									12	14						
<i>Digitaria horizontalis</i>						12										
<i>Eclipta alba</i>	15	13	11	20	9	7	9	11	19	10	10	19	7	7	7	13
<i>Eragrostis tremula</i>	20	19											18			16
<i>Fimbristylis ferruginea</i>	22	19						24								
<i>Fimbristylis hispida</i>	22	20						24								
<i>Haplochaeris granulata</i>														21		
<i>Hibiscus asper</i>				20					23			20		19	15	

RELIEVES FLORESTALES

Noms des espèces	1AM	1PAM	3AM	3PAK	9AK	11AM	1N	1PN	3N	3PN	9N	11N	SBS	SHA	SBA	5H	5B
<i>Indigofera tiruta</i>					16	15					16						
<i>Indigofera pubera</i>	22	20		19	10				20		14	16					
<i>Indigofera lincolnia</i>				20	15					16							
<i>Bomarea coarctosperma</i>									21	16		14					
<i>Bomarea eriocarpa</i>	11	10			14												
<i>Bomarea vagans</i>													15		21	15	15
<i>Bomarea sp.</i>		18			19										21	15	15
<i>Bomarea sp2</i>															20		
<i>Lantana camara</i>			15														
<i>Lepidagalis anabrya</i>		19	15	9					22	13		16					
<i>Lepidaria hastata</i>	20	19	7	7	22		11	23	9	6		20			13		
<i>Loudeia longensis</i>	5	8	3	4	4	2	3	5	5	4	3	2	5	6	10	9	6
<i>Melicope corchorifolia</i>		19															
<i>Melichthia maderaspatana</i>	21																
<i>Mitrochloa indica</i>	17	18			22	10	9		18		12	11	20	18	20	11	5
<i>Mulugo nudicaulis</i>																	
<i>Pandaka heudelotii</i>		12	13	11	21	13		20	21	15		13	17	13	17	14	14
<i>Panicum baham</i>	19	19				16	8						20	15	14		
<i>Panicum maximum</i>	21	20															
<i>Paspalum scrobiculatum</i>	2	2	1	3	2	4	7	2	4	2	4	4	3	3	4	5	11
<i>Pennisetum pedicellatum</i>									23								15
<i>Polyzopaea eriantha</i>																	
<i>Polygala arenaria</i>			13	19	18	11						15					
<i>Polygala multiflora</i>															18	19	
<i>Polygala gracilis</i>																	
<i>Rhynchosia tripartita</i>	10	6	5	5	11	15		10	11	17			17				
<i>Rhynchosia minima</i>																	
<i>Rottboellia exaltata</i>	21																
<i>Schizachyrium exile</i>	17	5		15				3	10								
<i>Schoenanthella gracilis</i>	1	1	6	13	12	15	1	1	1	5	2	10	13	17	12	4	4
<i>Scooparia dubis</i>													20				
<i>Sesbania pachycarpa</i>																	
<i>Sesbania pallidiflora</i>	8	15	9	13	3	12	10	18	14	9	7	6	8	13	7	15	12
<i>Sida acuta</i>	16	14	13	17	12	13		23	23	15	14	14					
<i>Sida alba</i>	13	14			22			24	8		12	8				15	16
<i>Sporobolus pectinellus</i>																	
<i>Styloschylon lamifolia</i>	18	16			21		12						7	11		10	
<i>Stylosanthes eracta</i>													1	5	5		
<i>Stylosanthes mucronata</i>			12			8											
<i>Tephrosia bracteolata</i>			15	16	19								15	18		8	16
<i>Tephrosia pedicellata</i>				20		11				12		9		10	18	16	16
<i>Triumfetta rhomboides</i>																	
<i>Vetiveria nigriflora</i>			17	12													
<i>Vigna sp.</i>															18		
<i>Valleria indica</i>																	
<i>Vernia glaberrima</i>	9	7	10	5	8	6	5	6	6	15	10	5	18	17	17	12	16
<i>Vidua sp.</i>			15							7			5	4	1	3	1

différent 1

Index Alphabétique

- Agriculture 1, 3, 15
 Agrosystème(s) 3,16, 18
Acacia nilotica 33
Acacia seyal 50, 90, 94, 109, 128-135, 140, 160
Acacia senegal 128-133
Acacia holosericea 36
Adansonia digitata 59
Andropogon gayanus 10,11,35,37,94,107,115-118,124,125,160
Andropogon pseudapricus 10, 51, 107, 109, 115-118, 125
Andropogon fastigiatus 115-118
Anogeisus leiocarpus 4, 50, 59
Antiaris africana 4
Antidesma venosum 4
 Analyse factorielle des correspondances (AFC) 103, 115-118
Aristida adscensionis 115-118
 Azote (N) 7,14,21,53,58,103,106,138-168,170,171

Balanites aegyptiaca 50,133
 Bam (province du) 28
 Bassin versant 2,26
 Biomasse
 Biomasse aérienne 103-106, 118-124
 Biomasse aérienne maximale 103,104,107,118-124
 Biomasse minimale 103
 Biomasse aérienne potentielle 124
 Biomasse racinaire 103,107,124-127
 Biomasse foliaire (ligneux) 90,129,133,134
 Bissiga 9,29,37,46,58,101-137
 Bois de chauffe/combustible 2,7
Borassus aethiopum 4
Borreria spp 50,108,109,115-118
Brachiaria spp 108,116-117
 Brousse 2
Butyrospermum paradoxum/Vitellaria paradoxa 4,50

 Capacité de charge 3,7,10,13,15,17,18
Cassia tora 108,109,115-118,138
Cassia mimosoides 109,116,118
 Charge d'exploitation 14,18
Chloris gayana 115-118
 Climat 1,6,11,19
 Coefficient cultural 68,90
Combretum spp 51
 Compost 8

<i>Corchorus spp</i>	108,110
Croûtes	6,11,21,36,53,72
<i>Cymbopogon schoenanthus</i>	11
<i>Cynodon dactylon</i>	116,117
<i>Cyperus iria</i>	116,117
<i>Daniellia oliveri</i>	4,59
Désertification	1,12,20
Défrichements	1,8,10
Discontinuité	18
Divergences	18
Domaines d'attraction (voir résilience)	
Dispositifs de C.E.S	
Linéaires	29,37,43,61
Spatial (aux)	29,32,37,43,98,111
Digues filtrantes	27
Diguettes	27,29,37,40,42,56,59,94,101,102
Banquettes	26,29,35,43
cordons pierreux	26,29,35,43
micro-bassins ou demi-lunes	32,33,43,56,59
Fossés	26,32,66,76,129
Bandes d'arrêt/de végétation	26,32,35
Sous-solage	26,32-35,37,43,59,111,113
Scarifiage	33-36
Labour/Billonage	36,37
Fascines	29
haies vives	32,37,38,42,56,59,89,91,111
Djibo (site de)	36,41
<i>Dolicos lab lab</i>	39,59
Donsé (site de)	32
Droits d'usage	7,49
Durabilité	1-3,11,13,15,16,43,103,173,178
Eau	
Crues	62,65,101
Bilan	3,60,61,94-99
Eau du sol	
Infiltration	11,21,22,26,32,33,40,43,64,65,68,69,72,76,79,82,88,94-99,109,111.
Drainage/percolations	61,62,63,68,69,82,85,88,89,91-99
Diffusion/redistribution	62,68,69,76,93-99
Régime hydrique	61,76,79,94-99,101,103,104,111,114-116
Réserve en eau(stock d'eau)	51,58,62,65,67,76,79-89,92-99,131,
Humidité	63,65,66,76,79,95,98,109,130
Profils hydriques/d'humidité	67,76-79,89,91
Nappe phréatique	61,98,174
Conductivité hydraulique	69
Echelle (d'étude)	45,106

Ecosystèmes	1,3,4,10,15,16
Stabilisation	22,37,112,114,116
Stabilité	11,13,15,17-19,22,37,44
Echantillon/nage	102,103,105-107,122-124,128,129,132,133
<i>Elionorus elegans</i>	115
Equilibres (écologiques)	1,3,6,7,15,17-20,101,118
Evapotranspiration	1,61,68,79,88,89,94-99
ETP	48,68,89,90,94
ETR	62,68,88-90,92,93-99
Evaporation	68,89,95
Transpiration	68,89,90
Eléments nutritifs	3,11,14,16,20,21,43,60,99
Réserves du sol	139,141,142
Disponibilité/Récupération	99,106,138,139,151-154
Absorption/immobilisation	140,143-150
Pertes (Erosion, Lixiviation, volatilisation)	140,154-158
Apports extérieurs (pluie, recyclage m.o., fixation symbiotique)	138,141,150,158-166
Bilan	162-170
Equilibre (conditions d')	165-168
Elevage	
Bétail/Bovins	7,44
Cheptel	7
Engrais	2,8,11,21
Enracinement (profondeur)	79,128,131
Erosion	1,8,11,20,21,26,72,140,154-156
Espace agropastoral (EAP)	4,5,25,26
Espaces Sylvo-pastoraux (ESP)	2-9,11,12,18,22,23,25,27,45
Feux de brousse	19,44
<i>Fimbristylis sp</i>	116,117
Fourrage/fourrager	1,7,14,111,138
qualité fourragère	7,103,138
Forêts classées	5,6,9,10,46,47,
Forêts villageoises	41
Foyers améliorés	7
Foncier (régime, législation)	8,9,23,42,
Géologie	6
Géomorphologie	6,48-50
Gradient	4,101,116
<i>Guierria senegalensis</i>	51
Humidimètre	
Sonde (ou humidimètre) à neutrons	60,65-67
Etalonnage	65-67,76
blocs de gypse	60
Hysteresis	18

Impluvium	63,65
Indice de diversité/d'équitabilité	102,113,114
<i>Indigofera sp</i>	115,116,118
Intensité (des mesures de CES)	102,103,106,111,114,115,122,132
Inventaire (mesures C.E.S/Végétation)	25,28,29,101,128
<i>Isobertinia doka</i>	4
Jachères	5,8-10,59,101,118
<i>Khaya senegalensis</i>	4,59
Koussougou (site de)	29,37
<i>Lannea microcarpa</i>	4,59
Légumineuses	138,150,164-167
<i>Leptadenia hastata</i>	116-118
Litière	102,104,105,119-121
<i>Loudetia togoensis</i>	10,50,51,107-109,115-118
<i>Macropitilium arthropurpureum</i>	39,59
Matière organique	2,3,6,8,11,20-22,53,58,139,141,142
Matière sèche (voir biomasse)	
M.A.D.	7
<i>Microchloa indica</i>	116
<i>Mitragyna inermis</i>	4,50,59
Mulch, Mulching	8,38,40,98,114
Nakambe/Nakabe	9,46,47,58
Nécromasse (voir litière)	
Occupation des sols	8,9,10
Oubritenga (province de)	9,59
Oursi (mare de)	25
Ouvrages anti-érosifs	
d'absorption	29,33,61,94,98
Amont	2,29,43,61,76,82,89,94,98,99,101,104,105,108,111,113,124,129,132
Aval	29,61,62,76,82,89,95,98,99,129
Espace inter-ouvrages	29,43,61,63,76,88,95,98,99,101,105,106,109,111,114,124,129,132
Entretien	26,42,45
Paille/paillage	8,29,36,37,40,56,71,79,85,96,98,109,111,113,114,131,132
Parcelles appariées	104
<i>Parkia biglobosa</i>	4
Passoré (province)	22
Pâturages	5,6,9,25,103,138
Paysages	2,9,48,49,58

<i>Pennisetum pedicellatum</i>	107,109,115-118,124,125
Persistance (voir résilience)	
Phosphore	14,21,53,58,106,138-162,169-171
Photopériodisme	119
Phytomasse	42-44,103,105,121,124
<i>Piliostigma reticulata</i>	133
Placettes	64,72,103,105-107
Pluviosité/Précipitations	
Pluviométrie	1,62,70,71,89,91-98,109,111,120,138
décades/décadaire	70,71,85,
intensité	11,46,63,71,74
Variabilité	6,101
Pluie d'imbibition	73,95
Pluviographe/pluviomètre	63
Plateau central	1,6,7,9,12,13,25,26
Population	
Densité	1,6,15,44
Accroissement	8,10,11,58
Potassium	21,106,138-162
Production	2,17,19,99,100-107,118-124
Production primaire	7,14,21,22,94,100-107,118-124
Production primaire aérienne	103,104-106,119-124
Production primaire aérienne nette (PPN)	104,119,120-124
Production p. aérienne potentielle/réelle	103,106
Protection	
Grillage	41,42,56,59
M.E.D	11,32,40,41
Reboisement	26,37
Resources naturelles renouvelables	1,6,9,13-17,19,25
Régénération (mesures de)	3,12,13,18-20,22,23,25,28-43,103
Régénération Naturelle Assistée	39
Résidus de récolte	5,7,8
Réorganisation Agraire et Foncière	9
Résilience	13,18,20
Rhizobium	138
<i>Rhytachne triaristata</i>	115,117-118
Ruissellement	2,11,21,29,33,35,40,61,62,64,72,73,74,94-99,111
Sahel/Sahélien	1,4,25
Saison	
de croissance	68,76,85,94,103,104,106
de végétation	109
Sédimentation	29,33,40,42,61
Silmiougou (site de)	32
Sols	
caractères physiques	21,29,51,58,69,141
caractères chimiques	21,53,58,139,141-171,177

classification	6,50,51,58,
dégradation	1,3,6,8,9,11,13,15,20,21,23,51,59
C.E.S	2,16,17,26,28,29,40,42,46,56,60,94-97,100-104,109,111
Fertilité	1,8,53,99,139,141-153
Fertilisation	106,124,125-127
Macro-faune (termites)	22,40
Soudan/soudanien	1,4,10,13,25,101,104
Systèmes de production	2,3,5-9,11,12,15,16
Socio-économiques (aspects)	2,12,17,23,25
Sanmatenga (province du)	7,8,41
Spirale de dégradation	8,11,20,21,25
Soum (province du)	28
<i>Schoenefeldia gracilis</i>	108,109,115-118,124
<i>Styloxanthes erecta</i>	35,39,59,111,114-115
<i>Schizachyrium exile</i>	115-118
<i>Setaria pallidifusca</i>	115-118
Toposéquence	48,49,60,101
Transect	48,106,128
<i>Théphrosia sp.</i>	116,117
Utilisation des terres	1,3,5-7,14-17,19,25
Végétations	
Herbacées	7,11,22,33,35,36,94-96,100-128
Ligneuses	7,10,11,14,22,32,44,82,94-96,128-135
Annuelles	4,22,32,94-96,98
Pérennes	4,10,22,35,76,94-96,98
Couvert végétal	9,10,11,18,20,40,44,50,51,59,71,79,85,94-96,100,101-137
Structure /recouvrement	20,22,33,72,74,100-104,111-113,114,122,124,125,128-132
Composition/diversité floristique	100-103,107,111,113-118,122,125,132
Dynamisme	22,100,101,103,113-118,136
Germination	94,95,98-99,100,103,108-111,128-130
Installation	108,111,128-130
Croissance (ligneux)	128,133-135
Densité des ligneux	100,128-134
Floraison-fructification	103,105,120
Pionnières	22,118
Vents	11,20
<i>Vetiveria nigriflora</i>	116,117
<i>Vigna sp.</i>	116-117
Yatenga (province du)	26,35
Yabo (site de)	29,37,40,46,47,68,70,101-137
"Zipelle"	10,51
<i>Zornia glochidiata</i>	50,108,109,115-118

Au sujet de l'Auteur

Fidèle Hien (de son vrai nom **F. Gbaanè-Hien**) est né le 24 mars 1957 à Guéguéré dans le Sud-Ouest du Burkina Faso. Il fréquente l'école primaire de Guéguéré puis successivement les collèges privés catholiques de Tounouma (Bobo Dioulasso) et de La Salle (Ouagadougou) d'où il obtient en 1979 le Baccalauréat série "Maths et Sciences Physiques". De 1979 à 1984, il étudie à l'Institut Supérieur Polytechnique (aujourd'hui Institut du Développement Rural) de l'Université de Ouagadougou (Burkina Faso) où il obtient en 1984 le grade d'Ingénieur du Développement Rural, option Eaux et Forêts. Au titre de sa recherche de fin d'études, il publie un mémoire intitulé "Contribution à l'Agroforesterie en Haute Volta..." Il est appelé pour le Service National Populaire en 1984/85 au cours duquel il travaille une partie du temps comme Cadre à la Direction de l'Aménagement Forestier et du Reboisement du Ministère de l'Environnement et du Tourisme de son pays. En mars 1986, il est nommé Directeur de la Production chargé des Forêts, du Reboisement et des Pêches au sein du même Ministère. Il décide en octobre 1987 de "faire le terrain": nommé Directeur provincial de l'Environnement et du tourisme (DPET) du Sanmatenga (Kaya), il dirigera en même temps un projet de foresterie rurale (Programme d'Appui à la Foresterie Villageoise) dans la province. C'est dans ce cadre qu'il initie avec plusieurs autres Services techniques et ONG de la province, un programme "Aménagement du Terroir Villageois (ATV)" comme contribution pilote à la démarche nationale de Gestion des Terroirs (PNGT); le DPET en assure la coordination. En même temps, il prépare un projet de recherches sur la régénération des terres dégradées qui sera développée en 1990 et soumis à l'Université Agronomique de Wageningen (UAW). D'Avril 1990 à Mars 1995, il évoluera donc comme chercheur en thèse Ph.D. entre l'Antenne Sahélienne de l'U.A.W/Université de Ouagadougou (au Burkina Faso) et le Département "Irrigation et Conservation des Eaux et des Sols" de l'U.A.W. (aux Pays Bas). En dehors de ses travaux de recherches, l'auteur a effectué, en tant qu'Agro-forestier, de nombreuses études et missions pour le compte d'institutions nationales et étrangères d'études, de recherche et de développement. Membre de la Société Internationale des Sciences du Sol (ISSS), F.G. Hien est également membre fondateur de plusieurs Associations et ONG s'occupant d'Environnement et de Développement au Burkina Faso. Il est marié et père de deux enfants.