

11

La brousse tigrée au Niger : synthèse des connaissances acquises. Hypothèses sur la genèse et les facteurs déterminant les différentes structures contractées

J.M. d'Herbès ¹, C. Valentin ¹, J.M. Thiéry ²

¹ *ORSTOM, Niamey, Niger.*

² *CEA, Cadarache, France.*

Résumé

Suite aux nombreux travaux portant sur la brousse tigrée, tant au Niger qu'au niveau international, il semble établi que ce système de contraction de la végétation en bandes constitue une réponse naturelle et efficace à la raréfaction des ressources hydriques, fondée sur la récolte et l'acheminement des eaux de ruissellement des zones dénudées vers les zones de végétation.

Le présent article se propose de faire un inventaire des questions en suspens concernant cette structure paysagère, en particulier les facteurs climatiques et topographiques déterminant cette structure, les hypothèses sur les conditions de son apparition (genèse), enfin la dynamique supposée d'avancée amont des bandes de végétation.

Les différents travaux conduits récemment au Niger pour tenter de répondre à ces questions sont passés en revue, ainsi que les principaux résultats acquis.

Introduction

La végétation des plateaux cuirassés à faible pente de la zone sahélienne, entre les isohyètes 300 et 700 mm, a tendance à se contracter, selon des formes identifiables sur les vues aériennes et satellitaires à très haute résolution spatiale (Couteron 1997 ; Mougénot et Hamani, 1997), et classées selon une typologie proposée pour le Niger par Ambouta (1997).

Les formes les plus typiques, les brousses tigrées, ont été caractérisées depuis longtemps au sol, sur les plans structurel et, moins souvent, fonctionnel, par de nombreux auteurs, sur plusieurs continents. Pour l'Afrique, citons Mac Fayden (1950 : Somalie) ; Worral (1960 : Soudan) ; Audry et Rossetti (1962 : Mauritanie) ; Boaler et Hodge (1964 : Somalie) ; Boudet (1972 : Mali) ; Leprun (1992 : Mali, Burkina Faso) ; pour l'Australie, Slatyer (1961) ; Tongway et Ludwig (1990) ; Greene (1992) ; pour le Moyen-Orient, White (1969 : Jordanie) ; pour le Mexique, Cornet *et al.* (1992) ; Mauchamp *et al.* (1994).

Au Niger, Clos-Arceuduc (1956) puis White (1970, 1971) ont décrit ces structures ; suite aux travaux pédologiques d'Ambouta (1984), il devint alors évident que l'existence des structures en bande dans cette zone sahélienne ne devait rien à des variations géologiques et pédologiques, mais que la base du fonctionnement était bien hydrologique et biologique. Des travaux concernant ce fonctionnement ont été repris récemment sur le site de Banizoumbou au Niger et exposés au cours du présent atelier (Galle *et al.*, 1997). Ces travaux sur le bilan hydrique permettent d'évaluer à 50% de la pluie annuelle la quantité d'eau ruisselée depuis la bande nue vers la bande de végétation. L'édification d'une digue empêchant ce ruissellement d'arriver à la bande de végétation, expérience réalisée au cours des mêmes travaux, permet de conclure que cet apport d'eau est indispensable au bon fonctionnement du système. La croissance et la production forestière résultantes sont en définitive supérieures à celles mesurées dans un système moins structuré (Ichaou et d'Herbès, 1997).

Il semble donc acquis que le système de brousse tigrée fonctionne comme un système naturel de collecte et d'acheminement des eaux de ruissellement sur des impluviums vers des zones de production végétalisée. Les aménagements et la gestion doivent tenir compte de son efficacité, en particulier dans ces zones à grande variabilité inter-annuelle des précipitations, avant d'intervenir pour une restauration hypothétique et coûteuse.

Il reste cependant de nombreuses questions en suspens : (1) Pour les brousses tigrées, quels sont les facteurs déterminant les largeurs des bandes et interbandes ; ces largeurs varient-elles en fonction d'un gradient (spatial ou temporel) de précipitations ? (2) Quels sont les facteurs qui permettent la coexistence, sur un même plateau, donc sous le même régime de précipitations, de structures différentes ? (3) Quelle est la dynamique des bandes : l'hypothèse d'avancée des bandes de végétation vers l'amont est-elle fondée ? Quelles en sont les conséquences pour la gestion forestière ? (4) Enfin, de nombreuses hypothèses ont été émises concernant la genèse des formations en bandes ; est-il actuellement possible de les rassembler en une théorie ? Quelles sont les possibilités d'évolution des différentes structures et à quelles échéances ?

Des travaux réalisés ou en cours de publication permettent de répondre à quelques unes de ces nombreuses interrogations. L'objectif de cet article est de les passer rapidement en revue. L'intérêt des réponses n'est pas seulement académique : les écosystèmes forestiers

contractés constituent la base des systèmes d’approvisionnement énergétique, en particulier des centres urbains (Mahamane et Montagne, 1997). Ils constituent également un exemple remarquable de corrélation directe entre une structure, aisément identifiable, un mode de fonctionnement et une productivité forestière.

Matériel et méthodes

Échantillonnage régional et local

Afin de répondre aux deux premières questions, deux échantillonnages emboîtés ont été adoptés, l’un à l’échelle régionale, l’autre à l’échelle locale.

A l’échelle régionale, la zone d’échantillonnage considérée est un grand transect nord-sud compris entre les latitudes 12°30 et 14°30 N et les longitudes 2° et 3° E (Figure 1). Il appartient à la zone agro-pastorale du sud-ouest nigérien, dont on trouvera une description générale dans Ichaou et d’Herbès (1997) ou d’Herbès et Valentin (1997).

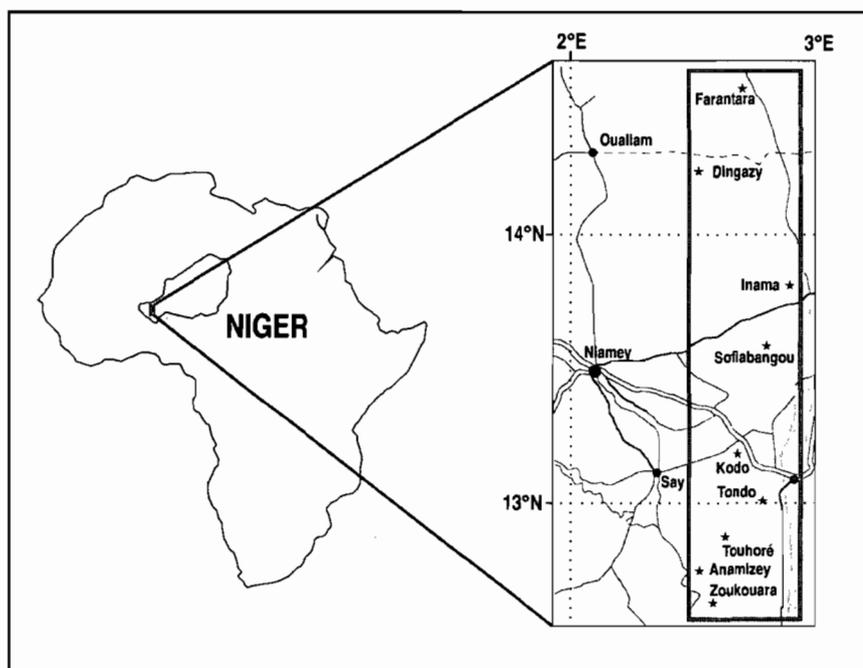


Figure 1. Localisation du transect d’échantillonnage des brousses tigrées typiques dans le sud-ouest nigérien (d’après Valentin et d’Herbès, *sous presse*).

Le long de ce transect d’échantillonnage, dix sites de brousse tigrée typique ont été sélectionnés à intervalles latitudinaux réguliers, sur des images satellitaires SPOT Panchromatique (résolution 10 m au sol), afin de déterminer les relations entre les caractéristiques structurales de ces brousses, la pluviosité (croissante de 315 mm pour le site le plus au nord à 641 mm pour le site sud) et les conditions topographiques.

Chacun des sites a fait l'objet d'observations le long de transects de mesure recoupant cinq séries de bandes-interbandes (périodes). Ces transects de mesure ont été reportés soigneusement sur les photos aériennes prises à différentes dates (1950 ; 1955 ; 1962 ; 1975 ; 1992 ; voir Valentin et d'Herbès, *sous presse*) : les largeurs des bandes et interbandes ont été mesurées sous loupe binoculaire à l'aide d'un micromètre gradué au 1/10^e de mm. Le quotient «largeur de bande nue» / «largeur de bande végétalisée» obtenu a été mis en relation avec la pluviométrie du site, évaluée par une moyenne calculée sur les quinze années précédant la prise de vue aérienne, en prenant en compte un gradient moyen de 100 mm par degré de latitude (Lebel *et al.*, 1992).

Entre les latitudes 13°30 et 13°40 N et 2°39 et 2°48 longitude E, c'est-à-dire au milieu du transect nord-sud, se trouve le site de Banizoumbou-Sofiabangou, à 70 km à l'est de Niamey, qui accueille depuis quelques années les travaux de nombreux chercheurs, portant en particulier sur le fonctionnement et la production de la brousse tigrée (*cf.* Galle *et al.* ; Ichaou et d'Herbès, 1997). Ce site de 20 x 20 km² comporte des plateaux supportant différentes structures de végétation forestière, échantillonnées par Delbære (1994) à travers la lecture de 33 transects de mesure représentant la diversité des situations (Figure 2).

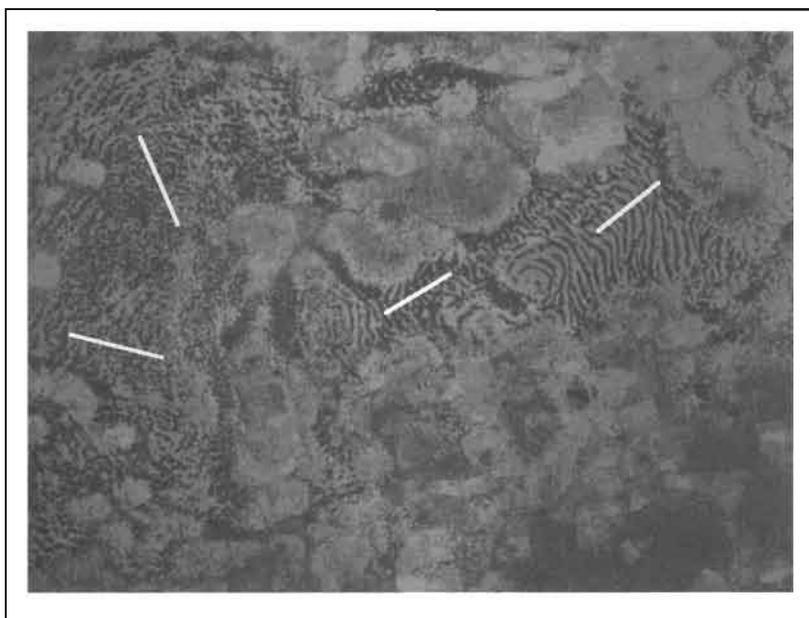


Figure 2. Exemples de structures échantillonnées sur les différents plateaux du site de Banizoumbou (13°30 N, 2°40 E).

Les traits blancs représentent les transects de mesure. (d'après Delbære, 1994).

Sur chacun des sites, appartenant au grand transect d'échantillonnage nord-sud comme à Banizoumbou, le transect de mesure recoupant cinq séries de bandes-interbandes a fait l'objet des observations suivantes : la topographie a été relevée au théodolithe, les recouvrements de la végétation et des états de surface (identifiés d'après la classification établie par Casenave et Valentin, 1992) ont été évalués le long d'un décimètre déplacé sur le transect.

Pour les dix sites situés sur le grand transect latitudinal, le phytovolume des bandes boisées a été calculé comme le produit du recouvrement de la végétation par sa hauteur moyenne (deux paramètres évalués lors de la lecture du transect) et par la longueur de l'unité correspondante. Ce phytovolume a été transformé en phytomasse à partir des relations établies sur le transect mesuré par Ichaou (1995 ; Ichaou et d'Herbès, 1997). La phytomasse a été à son tour mise en relation avec la quantité d'eau récoltée par la zone d'infiltration, modélisée à partir de la pluviométrie et des états de surface relevés sur le transect.

La séquence modale d'une brousse tigrée (Figure 3) comporte la succession répétitive de cinq zones caractérisées par une combinaison particulière des types d'état de surface et de végétation (Ambouta, 1997 ; Thiéry *et al.*, 1995). Ces zones ont été identifiées et leurs longueurs d'interception (l_i) mesurées sur les transects échantillonnés. Afin de différencier au sol les structures tigrées typiques des structures moins organisées, des petits transects latéraux de 50 m de longueur, perpendiculaires au transect principal, ont été installés au milieu de chaque «zone nue» interceptée (appelée ZR pour Zone de Ruissellement).

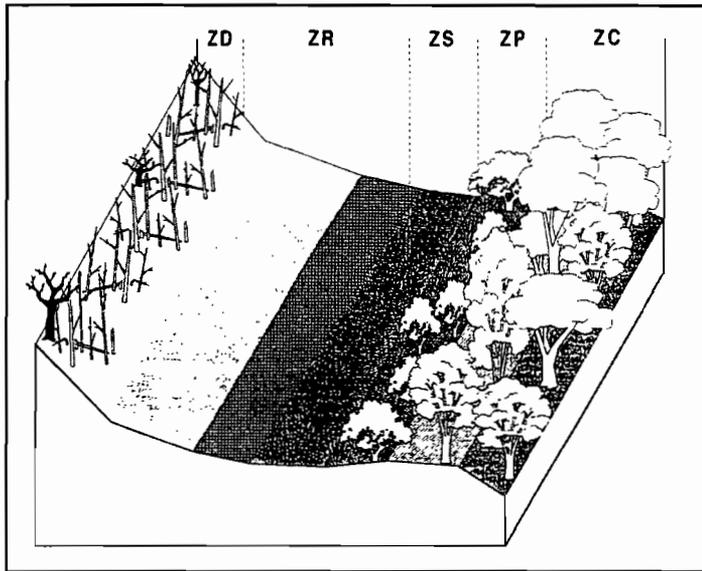


Figure 3. Séquence modale d'une brousse tigrée typique.

Zones ZD : dégradation ; ZR : ruissellement ; ZS : sédimentation ;

ZP : front pionnier ; ZC : cœur de bande.

(d'après Ambouta, 1984 ; adapté par Valentin et d'Herbès, *sous presse*).

Ces petits transects se situent entièrement en zone nue dans le cas de brousses tigrées à bandes régulières alignées (Figure 4a), mais se heurtent à d'autres zones dans le cas de structures différentes (Figure 4b). A partir de ces mesures, on a calculé un indice de diversité de zones (réciproque de l'indice de Simpson, $1/\sum p_i^2$; Hill, 1973, avec $p_i = l_i / L$, L étant la longueur totale du transect ; Delbære 1994) pour chaque transect afin d'obtenir une classification objective des structures, classées jusque là visuellement par Ambouta (1984).

Le calcul a été effectué séparément pour le transect principal et pour les transects latéraux. Chaque transect, caractérisé par cet indice, a été mis en relation avec la pente et les états de surface du plateau correspondant. La longueur moyenne d'une période (bande plus interbande) a enfin été mise en relation avec la pente moyenne des plateaux.

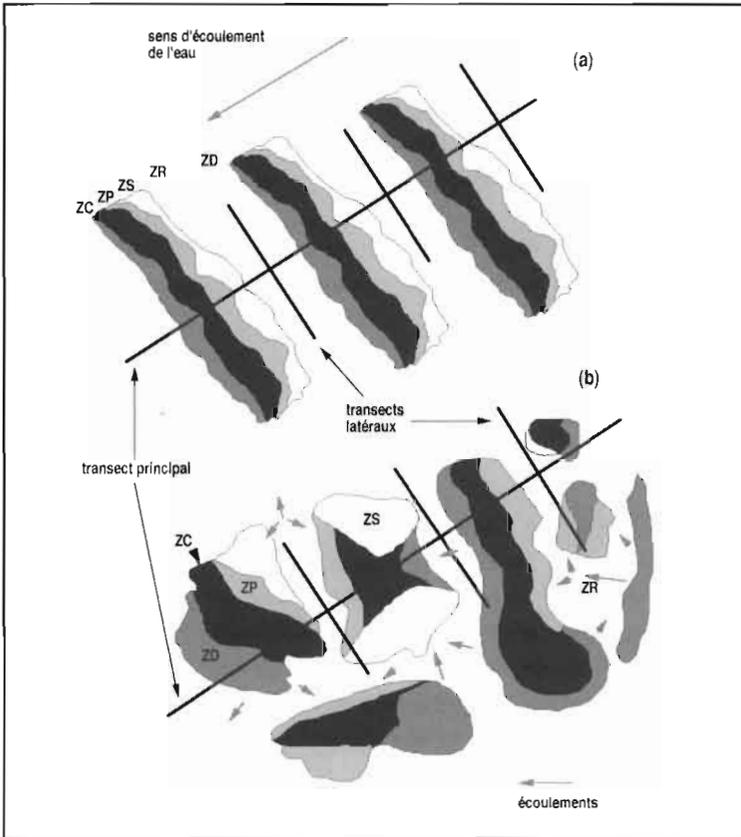


Figure 4. Schéma d'échantillonnage des structures au sol
(a : brousse tigrée ; b : brousse non tigrée)
par transect longitudinal (ou principal) et latéral (perpendiculaire ou secondaire).
Pour la signification des zones, voir Figure 3.

Dynamique des bandes

Afin de répondre à la troisième question, concernant la dynamique amont des bandes végétalisées, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre.

La première, la plus évidente, est un suivi diachronique : un transect de huit bandes a été installé et mesuré sur le site de Banizoumbou par Seghieri en 1993. Des bornes cimentées ont été implantées, leurs localisations relatives par rapport aux bandes soigneusement mesurées. Il faudra plusieurs années, voire décennies, pour obtenir des résultats, alors

irréfutables, sur la dynamique des bandes. Rappelons qu'avec la même méthode diachronique, Leprun (1992) avait obtenu des résultats convainquants au Mali, de l'ordre de 0,5 m d'avancée annuelle, mais sur des systèmes dans lesquels la dynamique sableuse semble jouer un rôle essentiel, ce qui n'est pas le cas des brousses tigrées nigériennes.

La deuxième méthode, en cours d'évaluation, consiste à analyser les éventuels changements sur photos aériennes, et distinguer ce qui appartient à la dynamique de retrécissement des bandes durant les périodes climatiques défavorables de ce qui constitue effectivement une dynamique amont. Les difficultés méthodologiques sont nombreuses, la première consistant à superposer des photos numérisées prises à des dates et des saisons différentes, à des échelles différentes, avec une qualité optique variable : les erreurs introduites par les corrections géométriques sont parfois supérieures aux dimensions des phénomènes que l'on veut mettre en évidence (Mougenot *et al.*, 1996).

La troisième méthode, actuellement testée (Guillaume *et al.*, *article soumis*), consiste à dater la matière organique résiduelle éventuelle dans les zones de sol nu, en espérant trouver un gradient d'âge, de la bande amont vers la bande aval, qui permette de mettre en évidence et de dater le « passage » de la bande. Là aussi, les difficultés méthodologiques sont nombreuses : les plus importantes tiennent à la délicate évaluation des rapports C^{13}/C^{14} qui permettent de dater des composés organiques récents (10-50 ans ?). Un mini-transect a été réalisé sur une séquence modale, sur le plateau de Sofiabangou dans le site de Banizoumbou.

Une quatrième méthode a été testée avec succès, malgré ses difficultés d'interprétation : elle consiste à évaluer les dynamiques d'érosion (processus dominant dans les zones ZD et ZR, voir Figure 3) et d'accumulation (ZS, ZP et ZC) des argiles par la méthode de quantification de la présence du Césium (^{137}Cs). L'échantillonnage a repris le mini-transect précédent (Chappell *et al.*, *sous presse*).

La dernière méthode a considéré que l'âge des arbres et arbustes devait suivre un gradient de l'amont vers l'aval, si l'hypothèse dynamique était exacte. Sur le plateau de Sofiabangou à Banizoumbou, sur un transect recoupant six bandes, servant par ailleurs à la quantification de la phytomasse aérienne sur pied (voir Ichaou et d'Herbès, 1997), l'âge de tous les individus coupés, sur une bande de 10 m de large, a été déterminé par lecture des cernes, après avoir obtenu l'assurance que ces cernes d'accroissement correspondaient effectivement à l'âge (Ichaou, 1995) : cela a été vérifié pour les Combrétacées, qui représentent entre 80 et 90 % des individus composant les brousses nigériennes.

Modélisation

La dernière question, concernant la genèse des brousses tigrées, est la plus complexe. De nombreuses hypothèses ont été émises par les auteurs s'intéressant à la brousse tigrée (voir une synthèse dans Tongway et Ludwig, *article soumis*), qui ont probablement toutes une base réaliste : dégradation d'un couvert homogène par péjoration des conditions climatiques ou par augmentation de la pression anthropique, ou au contraire colonisation progressive des plateaux par amélioration de la pluviométrie ; on a aussi proposé le rôle du vent (par analogie avec la structuration des ergs sahariens), ainsi que celui des termitières (points « hauts » créant des sources de ruissellement, puis s'anastomosant).

Il sera rendu compte ici du modèle «TIGREE» publié par Thiéry *et al.* (1995), qui loin de répondre à toutes les interrogations, a le mérite de proposer une théorie simple, voire simpliste, de l'organisation en bandes. Le modèle, fondé sur des automates cellulaires, est dérivé du jeu de la vie et dépend seulement de deux hypothèses sur les **compétitions** et les **synergies** : l'établissement, la croissance et la survie d'une plante donnée sont influencés **négativement** par les plantes en amont et **positivement** par les plantes latérales ou en aval.

Ces hypothèses ont été traduites sous forme de matrice et appliquées à des situations aléatoires générées mathématiquement (voir Thiéry *et al.*, 1995 pour plus de détails). Pour chaque cellule élémentaire (indiquée par *), la matrice représentant les effets de ses voisines immédiates prend la forme suivante (ou une forme voisine) :

0	-a	0	a et b sont des coefficients qu'il est possible de faire varier pour simuler les différentes structures observées sur le terrain. Le nombre d'itérations (cycle durant lequel le programme applique la matrice successivement à chacune des cellules de la grille actuelle), simule le temps et permet de suivre l'organisation progressive du paysage.
0	-a	0	
b	*	b	
0	4	0	

Résultats et discussions

Impact de la pluviométrie sur le rapport interbande / bande

Le résultat global des relations entre le rapport interbande nue / bande boisée (RIB) et la pluviométrie apparaît sur la Figure 5, empruntée à Valentin et d'Herbès (*sous presse*).

L'ensemble des points résulte de la mesure sur photos aériennes et sur le terrain des largeurs respectives des bandes et interbandes : plusieurs points apparaissent pour un même site, correspondant à plusieurs dates, donc à plusieurs pluviométries moyennées sur les 15 années précédant la mesure réalisée.

Il apparaît clairement que le quotient RIB augmente spectaculairement lorsque la pluviométrie diminue, soit géographiquement, soit temporellement : le déplacement des points pour un même site témoigne de cette évolution. Ce déplacement est d'autant plus important que la pluviométrie moyenne du site est faible : pour le site le plus nordique (Farantara), le quotient RIB est multiplié par 2 (passant de 1,1 à 2,2) entre 1962 (moyenne des 15 années précédentes : 430 mm) et 1992 (moyenne 320 mm), alors qu'il varie très peu pour les sites dont la pluviométrie moyenne évolue entre 600 et 750 mm. L'effet de seuil est ici très marqué : plus la pluviométrie diminue, plus la largeur de l'impluvium (l'interbande) doit être grande pour permettre à la végétation de la bande de se maintenir. Cela confirme l'importance, soulignée à plusieurs reprises, de conserver l'intégralité de l'impluvium, ainsi que la remarquable aptitude du système à tamponner l'extrême variabilité climatique inhérente à la région.

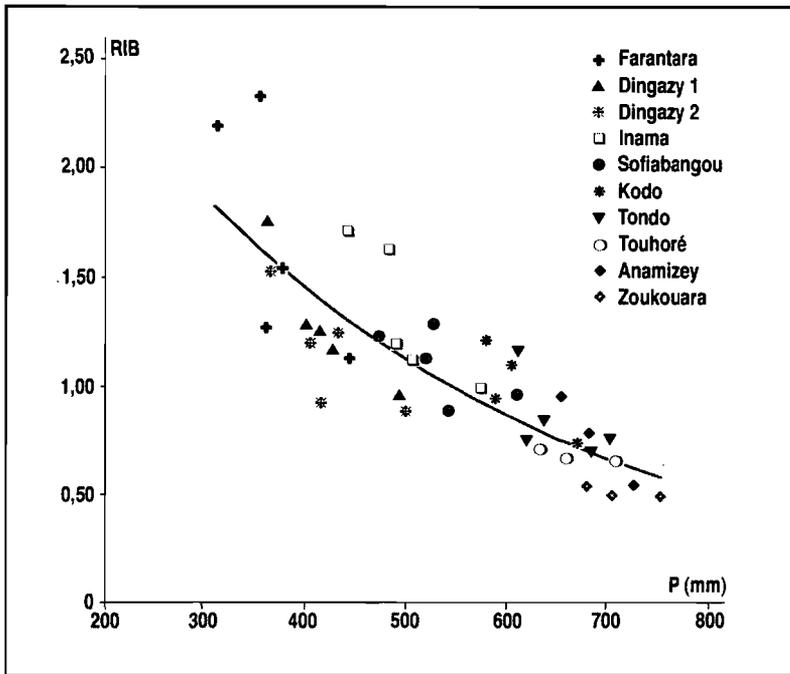


Figure 5. Influence de la pluviométrie P (mm) sur le rapport interbande / bande (RIB).

D'après les mesures de terrain (1995) et les photos aériennes (1955, 1962, 1975 et 1992),

à partir de 10 transects locaux situés sur un grand transect latitudinal (12°30 à 14°30 N) au Niger.

(d'après Valentin et d'Herbès, *sous presse*).

Relations entre phytomasse et approvisionnement en eau

La modélisation de l'approvisionnement en eau a été abordée par le biais de l'Efficacité de la Récolte d'Eau (ERE), calculée pour chacun des dix sites du transect latitudinal, à partir de la définition de deux zones : une zone de ruissellement (ZR), sur laquelle sont modélisés les écoulements correspondant aux zones dont les états de surface produisent du ruissellement, et une zone d'infiltration maximum (ZI), correspondant aux états de surface privilégiant les processus d'infiltration, essentiellement constituée par le corps principal de la bande (cf. Figure 3). L'ERE est calculée en fonction des pluies, moyennées sur la période de 15 ans précédant la mesure des transects (soit 1980-1995) et de la nature et du recouvrement des états de surface le long du transect. Les relations entre le coefficient ERE et la phytomasse ont été abordées à deux niveaux : celui de la bande seule et celui de l'ensemble du système (voir les détails dans Valentin et d'Herbès, *sous presse*).

Au niveau de la bande végétalisée (Figure 6), la relation établit clairement une production croissante avec la quantité d'eau récoltée (AME, égal à la somme de la pluie directe et de l'eau apportée par le ruissellement, cette dernière dépendant du coefficient ERE), ainsi qu'une limite théorique (courbe asymptotique) pour un approvisionnement en eau de 1 450 mm, correspondant à une phytomasse de 80,4 t/ha de bande : ce sont

approximativement les données correspondant au site le plus nordique de Farantara, pour lequel le rapport de la longueur de la zone de ruissellement sur la longueur de la zone d'infiltration est maximum, l'ERE atteignant 4,15. Sur la même Figure 6 ont été reportés les points relevés dans la littérature concernant la production ligneuse de forêts soudaniennes au Burkina Faso, sous des pluviométries comprises entre 750 et 1 300 mm : ces points sont systématiquement inférieurs à ceux mesurés en brousse tigrée, en ne retenant que les performances ramenées à l'hectare végétalisé.

Lorsque la production est ramenée à l'hectare de plateau, les équations calculées pour ces modèles de ruissellement par Valentin et d'Herbès (*sous presse*) permettent de prévoir les limites inférieure et supérieure théoriques d'efficacité de ce système de récolte : 155 mm et 685 mm, l'optimum se situant vers 550 mm. Cela signifie que, si la production de la bande elle-même est maximale pour les faibles pluviométries et des impluviums correspondants très importants, la production de l'ensemble du système (bande et interbande) croît progressivement des zones à 155 mm jusqu'à celles recevant 550 mm, puis décroît très rapidement au-delà. La limite inférieure correspond à la disparition de la zone d'infiltration ; la limite supérieure est obtenue en considérant que, lorsque la pluie augmente, la largeur de la zone de ruissellement diminue jusqu'à rendre inefficace le système de récolte d'eau : la structuration en bandes disparaît au profit de structures diffuses.

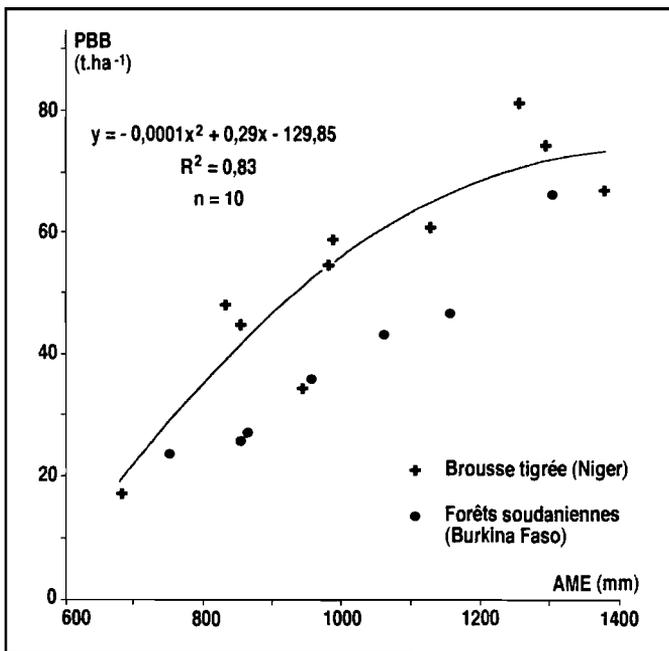


Figure 6. Relation entre la phytomasse mesurée par hectare de bande boisée (PBB) et l'approvisionnement annuel moyen en eau (AME : somme de la pluie directe et de la récolte des eaux ruissellées).

La courbe est ajustée aux résultats obtenus au Niger (d'après Valentin et d'Herbès, *sous presse*).

Ces limites calculées définissent en fait le domaine théorique d'existence de la brousse tigrée. En pratique, les brousses tigrées africaines les plus septentrionales ont été décrites dans le Gourma Malien sous une pluviométrie de 200-250 mm par Leprun (1992) et Hiernaux et Gérard (*article soumis*), en Mauritanie par Audry et Rossetti (1962), sous une pluviométrie de 150-200 mm. Au Niger, la limite septentrionale est surtout marquée par la présence d'importants dépôts sableux sur les plateaux en dessous de l'isohyète 300 mm, ce qui rend impossible l'écoulement en nappe nécessaire à la structuration en bandes.

Relations entre les structures et les pentes

Les structures échantillonnées ont été classées à partir de la relation établie entre un indice de diversité (calculé pour les mini-transects latéraux) et les pentes du transect principal. La Figure 7, empruntée à d'Herbès et Valentin (*article soumis*), montre clairement que les structures tigrées typiques présentent, par définition, une diversité latérale faible (voisine de 1), et se rencontrent exclusivement sur des pentes supérieures à 0,16%. L'indice de diversité augmente rapidement en dessous de cette valeur de pente.

Une fois cette classification «objective» réalisée, la longueur de la période moyenne (bande de végétation plus bande nue) a été mise en relation, pour l'ensemble des structures, avec la pente du plateau correspondant (Figure 8). Aucune relation claire n'apparaît pour les structures mouchetées ou peu structurées. En revanche, la longueur de période des brousses tigrées décroît assez rapidement lorsque la pente augmente, confirmant la relation entre la formation des bandes et la topographie du plateau. Cette relation a été retrouvée dans la littérature portant sur les brousses tigrées (d'Herbès et Valentin, *article soumis*) : Worral (1960) et Wickens et Collier (1971) au Soudan ; Slatyer (1961), Mabbut et Fanning (1987) et Dunkerley et Brown (1995) en Australie ; Montaña *et al.* (1990) au Mexique.

A pluviométrie identique, la pente joue donc un rôle fondamental sur le type de structure : une pente trop faible ne permet pas le ruissellement en nappe (indispensable pour organiser la végétation en bande) et la structure reste diffuse. Ce seuil inférieur est d'autant plus faible que la pluviométrie est faible également : la contraction en bande est d'autant plus «obligatoire» que les ressources hydriques sont faibles. En revanche, sous de fortes pluviométries, autorisant un recouvrement de végétation plus élevé, la structuration en bandes n'interviendra que sur les pentes les plus fortes, liée en cela à la récolte de l'eau de ruissellement caractérisée précédemment (Valentin et d'Herbès, *sous presse*). C'est ce qui apparaît sur les vues aériennes des zones à pluviométrie élevée (grossièrement >600 mm), sur lesquelles la structuration en bandes n'a lieu que sporadiquement, en général sur les bordures des plateaux, où les pentes sont plus fortes.

Ce fonctionnement laisse supposer que des transitions entre structures seraient possibles en un même lieu, en cas de fortes variations des précipitations sur une période suffisamment longue (*cf.* temps de «réaction» de quinze ans obtenu par Valentin et d'Herbès, *sous presse*). Peu d'exemples de ce type de transitions ont été rapportés : on peut évoquer le cas du nord du Burkina étudié par Serpantié *et al.* (1992) sur photographies aériennes prises avant et après les périodes de sécheresse des années 1971-1974 puis 1983-1985, sur lesquelles un changement de structures semble se dessiner, d'une brousse à mode de contraction diffus vers une brousse structurée en bandes. Couteron (1997) montre également une nette

contraction de la végétation résultant des périodes de sécheresse. L'analyse systématique des photographies aériennes multi-dates, appliquée aux zones de coexistence des différentes structures, permettra seule d'apporter des arguments dans le domaine des possibilités de transition. L'enjeu est ici encore double : si les transitions existent effectivement, il importe d'en tenir compte dans l'approche à long terme des aménagements et de la gestion des formations forestières. Parallèlement, on disposerait ainsi d'indicateurs assez sensibles des changements écologiques intégrant des variations pluviométriques sur le moyen et le long terme.

La relation entre la longueur de la période (bande de végétation+bande nue) et la pente mise en évidence sur la Figure 8 suggère en fait une corrélation entre le dénivelé et la longueur de période, similaire à celle établie dans les formules mises au point pour les constructions de banquettes en Défense et Restauration des Sols (formule de Ramser : d'Herbès et Valentin, *article soumis*). L'hypothèse d'un dénivelé d , commun à toutes les brousses tigrées, suppose que les données se répartissent sur l'hyperbole $y = d/x$. Cette hypothèse est exclue statistiquement si l'on prend l'ensemble des brousses tigrées. Par contre, elle est statistiquement acceptable en ne retenant que les brousses tigrées sur des pentes supérieures à 0,2%. Le dénivelé commun est alors $d = 0,25\text{m}$. Le système en bandes constitue en définitive une réponse naturelle à des contraintes physiques s'exerçant à travers la gestion de l'eau. Le fait que cette structuration se retrouve dans des contextes phytogéographiques différents (Afrique, Australie, Amérique centrale), dans des milieux écologiques comparables (topographie à faible pente uniforme, pluviométrie limitée) est un exemple des convergences de formes de végétation en réponse à des contraintes similaires.

Dynamique des bandes de végétation

Les hypothèses concernant la dynamique amont des bandes de végétation proviennent de la compréhension du fonctionnement du système interbande / bande : du fait que les ressources hydriques supplémentaires (nécessaires au maintien et à la croissance de la végétation) proviennent exclusivement de l'amont, il est logique de penser que la végétation située en amont aura une dynamique plus active que celle située en aval, laquelle ne recevra l'eau de ruissellement que lors d'événements pluvieux exceptionnels. Même alors, les conditions d'infiltration dans cette zone étant défavorables, la valorisation du surplus hydrique est improbable. En revanche, la strate herbacée et la strate ligneuse localisées en amont sont susceptibles de capter une partie importante des ressources hydriques (mais aussi minérales et organiques) et donc de se développer aux dépens des zones nues situées en amont, donnant naissance à ce qui ressemble à un processus de succession primaire (colonisation d'une zone totalement dénuée de végétation, dont le sol a des caractéristiques minérales brutes, même s'il a pu connaître le « passage » d'une bande de végétation dans le passé). Durant les bonnes séries pluviométriques, le maintien de la totalité de la bande est assuré ; de mauvaises séries affectent préférentiellement la végétation aval, et limitent probablement le développement amont. Le retour à des séries favorables relance la dynamique amont, créant un phénomène de pulsation des bandes résultant globalement en une progression de la végétation vers le haut de la pente (cf. Ambouta, 1984).

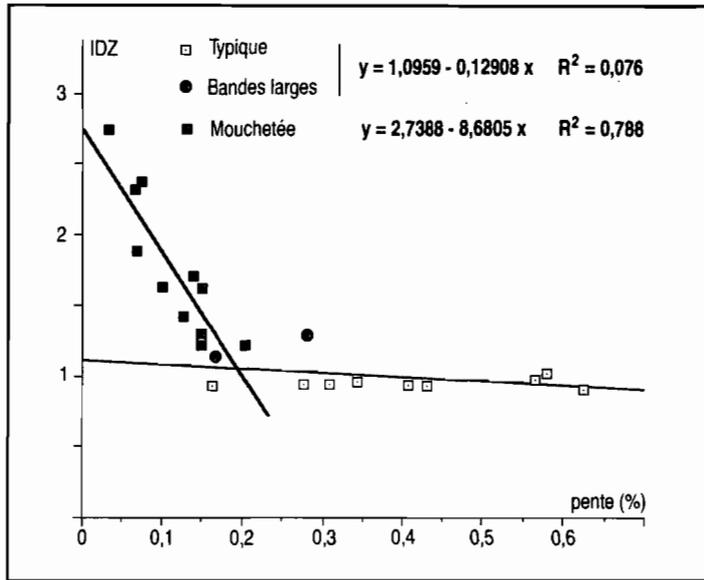


Figure 7. Relation entre l'indice de diversité zonale (IDZ) et la pente moyenne longitudinale.

Un indice égal à 1 indique que le transect est entièrement inclus dans une seule zone, la zone nue.

Plus l'indice est élevé, plus l'organisation est complexe et s'éloigne de la structuration en bandes alignées régulières. (d'après d'Herbès et Valentin, *article soumis*).

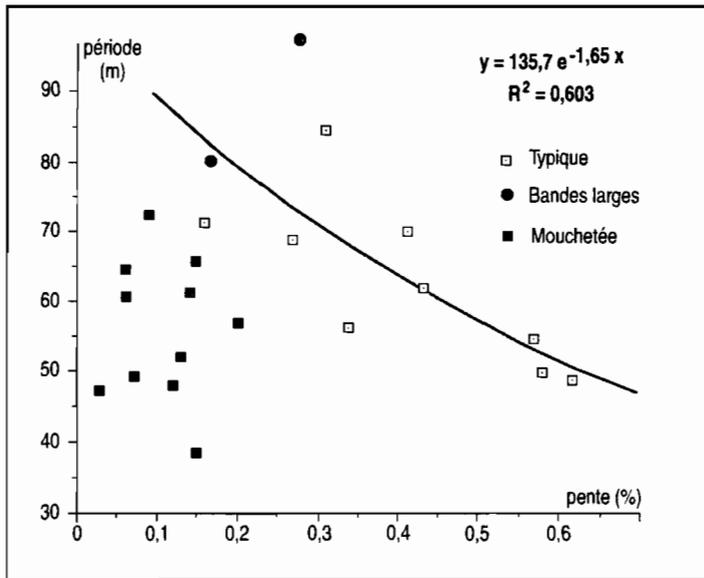


Figure 8. Relations entre la longueur de période (bande végétalisée + interbande nue) et la pente, faisant apparaître les différentes structures classées d'après les données de la Figure 7.

La courbe de régression est calculée pour les seules structures tigrées. (d'après d'Herbès et Valentin, *article soumis*).

La mise en évidence de ce processus est compliquée du fait des délais nécessaires à la croissance et à la reproduction de la végétation, en particulier ligneuse, susceptible de générer la dynamique. Qui plus est, le phénomène n'est assurément pas linéaire : le contour amont de la bande végétalisée est sinueux, formé de caps et de baies dont les conditions d'existence (micro-relief local ou hasard de la reproduction des arbustes pionniers, l'un pouvant dépendre de l'autre) sont actuellement en cours d'étude (Erhmann, en préparation).

Parmi les méthodes exposées, actuellement mises en œuvre pour rendre compte du phénomène et surtout estimer la vitesse moyenne d'avancée des bandes, deux d'entre elles donnent actuellement des résultats probants : l'utilisation de la datation par le Césium 137 et l'étude de l'âge des arbustes de l'amont vers l'aval de la bande végétalisée.

L'étude des processus d'érosion-accumulation de l'amont à l'aval de la bande nue (Chappell *et al.*, *sous presse*) rend compte d'une activité intense durant les 30 dernières années, ce qui confirme l'existence d'une dynamique au niveau des horizons superficiels du sol. La datation obtenue par la quantification du Césium 137 donne des cinétiques de l'ordre de 25 centimètres par an. Le comblement progressif, par des particules fines mêlées à des matières organiques, de la micro-dépression située juste en amont de la bande (zone pionnière et zone de décantation), modifie les états de surface, les conditions d'infiltration et la pente de cette zone et permettrait ainsi à la végétation herbacée (dynamique saisonnière et interannuelle, *cf.* Galle *et al.*, 1997) et ligneuse de progresser vers l'amont.

Les résultats de la datation de l'âge des arbres et arbustes, réalisée sur un transect du site de Banizoumbou, apparaissent sur la Figure 9 (d'après Mougenot *et al.*, 1996). La dynamique des populations d'arbustes est évidente (Figure 9a), avec une nette dominance de l'arbuste *Guiera senegalensis* en amont de la bande et un gradient d'âge remarquable. La population de *Combretum micranthum* a une répartition plus homogène dans la bande, les individus jeunes étant cependant localisés à l'amont. Les quelques individus arborés de *Combretum nigricans* permettent d'attribuer un âge maximum à la végétation de la bande, de l'ordre de 45 ans. On note la présence dans le cœur de la bande d'individus jeunes (5-15 ans), ce qui indique une dynamique de régénération interne à la bande, se superposant au gradient général d'âge de l'amont vers l'aval. Les régressions calculées pour les deux arbustes dominants (Figure 9b), permettent d'estimer la vitesse d'avancée de la bande à 0,5 m par an, soit 5 m tous les dix ans. Cette première estimation doit tenir compte du fait qu'elle ne se réfère qu'à un transect, sur un plateau, situé dans des conditions optimales pour l'existence de la brousse tigrée au Niger (voir Valentin et d'Herbès, *sous presse*). Il sera nécessaire de compléter ces travaux pour obtenir une vitesse d'avancée moyenne, reflétant un ensemble de conditions peut-être moins favorables. Il faut cependant retenir qu'une dynamique des populations d'arbustes existe en amont de la bande de végétation et qu'il faut donc en tirer partie pour l'aménagement et la gestion forestière.

En effet, si l'on considère qu'une brousse tigrée en bon état (c'est-à-dire n'ayant pas fait l'objet d'une sur-exploitation forestière ou d'un défrichement pour la mise en culture) représente un stade d'équilibre optimal avec les conditions climatiques actuelles et les conditions topographiques sur lesquelles elle se situe, il a été démontré que l'aménagement de la bande nue servant d'impluvium n'était pas souhaitable (*cf.* Galle *et al.*, 1997). En revanche, il peut être avantageux d'accélérer le phénomène d'épaississement des bandes

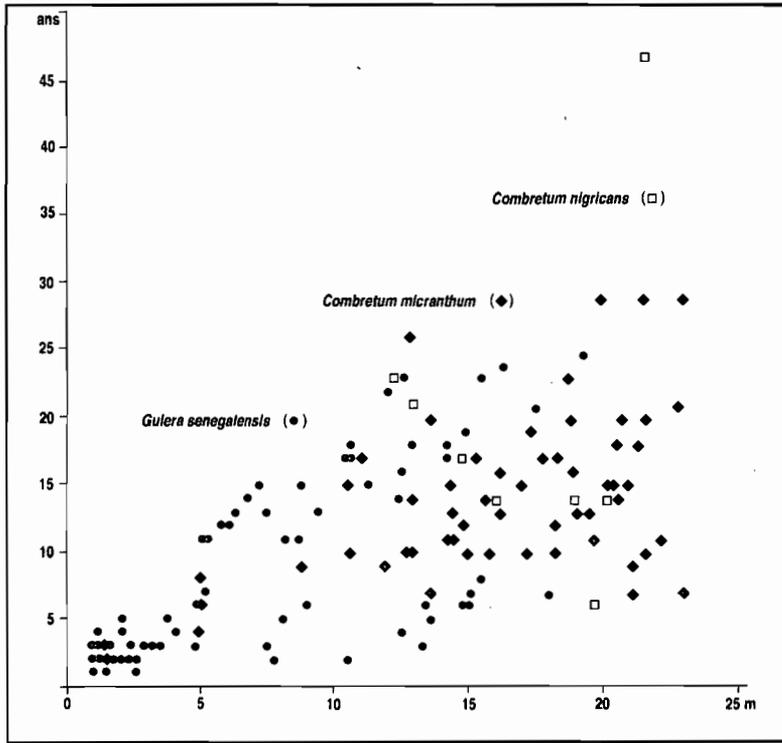


Figure 9a. Age des arbres et arbustes en fonction de leur position dans la bande.

On retrouve l'arbuste *Guiera senegalensis* en front pionnier, *Combretum micranthum* dominant le cœur de la bande ; quelques individus de *C. nigricans* donnent l'âge maximum présumé de la végétation de la bande : 45 ans.

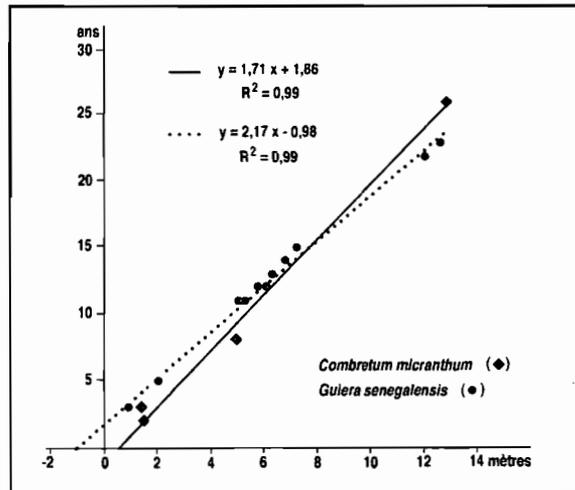


Figure 9b. Courbes de régression calculées pour les individus les plus âgés correspondant aux différentes positions dans la bande, pour les deux espèces principales. Les droites obtenues permettent de déduire une vitesse d'avancée de la bande de l'ordre de 0,5 m par an.

pour augmenter la surface de production, lorsque les conditions pluviométriques le permettent. C'est pourquoi, suite aux travaux menés par les équipes de l'ORSTOM sur la brousse tigrée, il a été recommandé aux bûcherons de répartir les branches inexploitable (petits bois, brindilles et feuilles) sur la partie amont (zone pionnière et zone de décantation, facilement identifiables par la dominance de croûtes de décantation, très caractéristiques, d'herbacées et de jeunes arbustes de *Guiera senegalensis*). Ce branchage facilite et protège la germination des herbacées et des ligneux, attire les termites (qui modifient les états de surface et améliorent ainsi l'infiltration) et active donc la dynamique de colonisation amont de la bande. Si les conditions pluviométriques restent favorables, l'alimentation hydrique sera suffisante pour permettre la production sur l'ensemble de la bande. Le retour à des séries pluviométriques défavorables provoquera une mortalité accrue de la partie aval de la bande, avant d'affecter les autres parties : il y aura production de bois mort, ce qui est l'un des buts recherchés par la gestion forestière, sans grever le potentiel productif de l'ensemble du système. Ces techniques, mises en application par le projet Énergie II, ont l'air de donner satisfaction, tant au niveau de leur mise en œuvre par les bûcherons chargés de l'exploitation forestière, que des taux de germination et de survie constatés dans la zone de branchage (Peltier *et al.*, 1994). Un suivi est cependant nécessaire pour évaluer l'impact à long terme de ces pratiques sur la durabilité du système.

Modélisation de la genèse des brousses tigrées

La Figure 10 montre un exemple des résultats obtenus en appliquant la matrice de convolution à une situation aléatoire commune, en faisant varier les coefficients a (2, 4 ou 8, compétition croissante pour les ressources) et b (1 ou 4, synergie croissante entre voisins).

Les structures se stabilisent au bout de 20 itérations (ce qui représenterait une durée de 100 à 200 ans). On peut constater que ce modèle très simple permet de reproduire avec une remarquable vraisemblance un grand nombre de structures réellement observées sur le terrain, ce qui lui donne une valeur intrinsèque forte. Cependant, la signification des coefficients reste à préciser : la «compétition» correspond essentiellement à la compétition pour l'eau. Par contre, l'effet de synergie entre individus voisins requiert une définition de ses différentes composantes (interception facilitée des flux amont, maintien d'un microclimat atténuant la demande évaporatrice, activité faunique, amélioration des caractéristiques physico-chimiques des horizons superficiels, *etc.*). Enfin, le modèle fonctionne avec des «activités métaboliques» abstraites, qui traduisent la proportionnalité généralement observée entre la photosynthèse et la transpiration. Comme tout modèle, celui-ci constitue une représentation simplifiée de la réalité, et non la réalité elle-même.

Des études sont lancées pour combiner les modèles fonctionnels résultant des travaux à l'échelle de la bande (*cf.* Galle *et al.*, 1997) et ce modèle, fonctionnant à l'échelle du paysage (Ehrmann, en préparation).

Ce modèle se prête également à des simulations diverses, en particulier pour analyser les impacts prévisibles de différents aménagements. La Figure 11, empruntée à Thiéry *et al.* (1996), est le résultat de la modélisation correspondant à la plantation d'arbres dans la zone nue. Le modèle prévoit d'une part que les arbres introduits sont très vite éliminés (en deux itérations) et, d'autre part, que leur introduction induit un net rétrécissement des bandes de

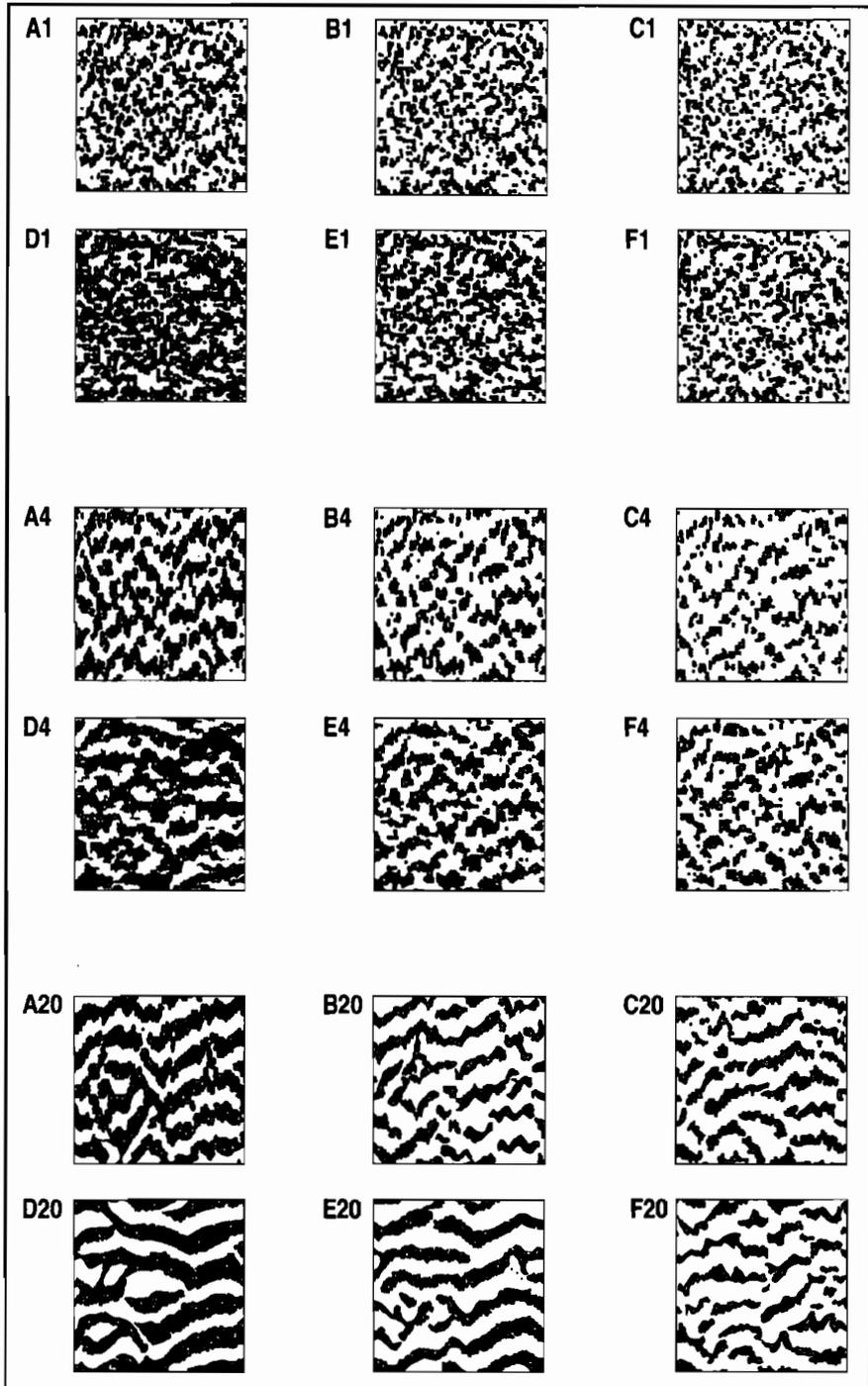


Figure 10. Motifs engendrés par le modèle pour différentes valeurs des paramètres : $a = 2$ (A, D), 4 (B, E) ou 8 (C, F) ; $b = 1$ (A, B, C) ou 4 (D, E, F), avec un coefficient de calibration $c = 0,5$. Le nombre d'itérations ($k = 1, 4, 20$) est proportionnel au temps, probablement 5 à 10 ans par itération. Les motifs correspondent à la matrice présentée dans le texte (p. 138).

végétation spontanée (Figure 11 : M1, M2), qui ne retournent à l'état initial qu'après deux itérations supplémentaires. Cette simulation ne reproduit que partiellement les conditions réelles des aménagements forestiers, dans la mesure où elle ne prévoit pas, en particulier, les ouvrages de type «demi-lune» destinés à recueillir les eaux de ruissellement en amont de chaque arbre introduit. Cependant, l'effet dépressur sur les bandes de végétation aval est bien pris en compte au travers du coefficient a , et traduit l'impact réel de l'introduction d'ouvrages en amont de ces bandes. L'examen du résultat négatif de nombres de projets d'aménagements forestiers réalisés ces dernières décennies semble valider le résultat de la simulation. Il conforte l'importance de conserver l'impluvium intact pour optimiser le fonctionnement global du système contracté et donc la production forestière.

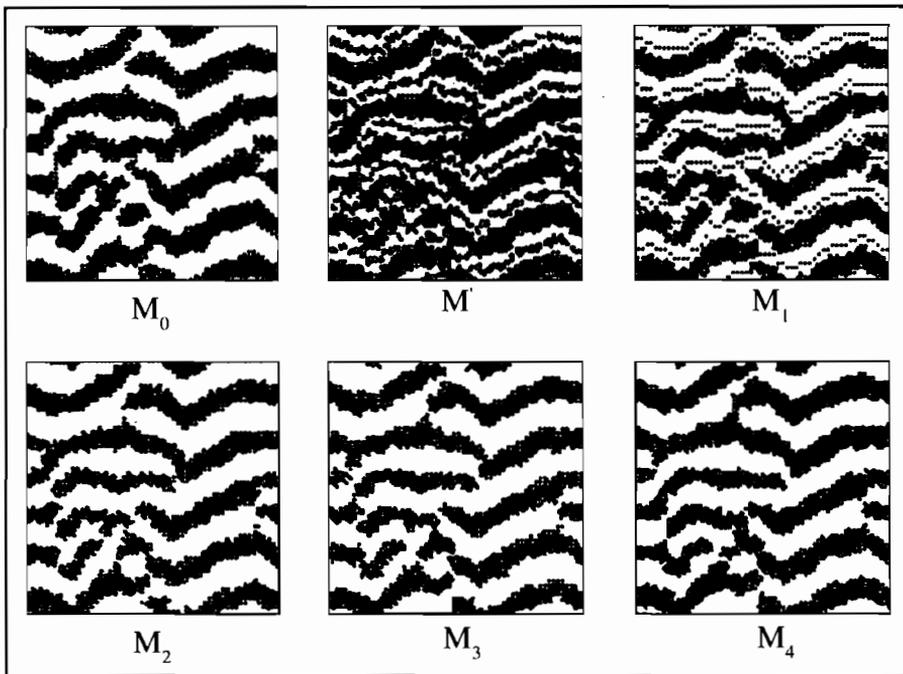


Figure 11. Simulation de l'introduction d'arbres au milieu de la bande nue (en M') à partir d'un état initial M_0 . (d'après Thiéry *et al.*, 1996).

Conclusion

Les travaux conduits ces dernières années sur les écosystèmes forestiers contractés au Niger (et présentés au cours de l'Atelier de Niamey) ont permis de confirmer certaines hypothèses émises auparavant, d'en nuancer d'autres, enfin d'en poser de nouvelles.

Les relations entre les différentes formes de contraction et la topographie locale (essentiellement la pente) sont désormais bien établies, ainsi que les variations structurales régionales selon le gradient pluviométrique. La dynamique des bandes de végétation n'est pas encore formellement prouvée, un faisceau de preuves indirectes se dégage cependant

en faveur d'une migration progressive des bandes vers l'amont de la pente. Ces résultats permettent de définir le cadre général des interventions d'aménagement et de gestion de ces formations, en jouant sur les potentialités locales déterminées par des facteurs biophysiques bien identifiés. Il apparaît en particulier que le mode de contraction en bandes régulières accroît la production forestière et doit donc être respecté, voire favorisé lorsqu'il est rendu possible par les conditions édapho-climatiques.

La modélisation, par définition imparfaite, de la genèse des systèmes contractés fournit des hypothèses de travail pour la poursuite de la compréhension des mécanismes conduisant à cette structuration spontanée particulière.

La reconnaissance des différentes structures sur les images aériennes et satellitaires semble être possible, et devrait modifier l'approche des inventaires forestiers : en effet, les relations entre structures et fonctionnements (et la production primaire résultante) permettent d'envisager à terme la cartographie automatique de la productivité des écosystèmes forestiers sahéliens à partir des seules données de la télédétection. Auparavant, il est cependant nécessaire de préciser encore ces relations : les travaux présentés se sont essentiellement concentrés sur les brousses tigrées typiques et il est indispensable de les appliquer à l'ensemble des structures contractées ou diffuses observées au Sahel.

Références

Ambouta J.M.K., 1984. *Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigérien*. Thèse de docteur-ingénieur, Univ. Nancy I, France.

Ambouta J.M.K., 1997. Définition et caractérisation des structures de végétation contractée au Sahel : cas de la brousse tigrée de l'ouest nigérien. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 41-57.

Audry P. et Rossetti C., 1962. *Observation sur les sols et la végétation en Mauritanie du sud-est et sur la bordure adjacente du Mali (1959 et 1961)*. Prospection Écologique en Afrique Occidentale, FAO, Rome : 53-71.

Boaler S.B. et Hodge C.A.H., 1964. Observations on vegetation arcs in the northern region, Somali Republic. *Journal of Ecology*, 52 : 511-544.

Boudet G., 1972. Désertification de l'Afrique tropicale sèche. *Adansonia*, série 2, 12(4) : 505-524.

Casenave A. et Valentin C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi arid areas of Africa. *Journal of Hydrology*, 130 : 231-249.

Chappell A., Valentin C., Peugeot C., Warren A., d'Herbès J.M., (in press). Using ¹³⁷Cs to trace soil erosion and potential upslope migration of banded vegetation in south-west Niger. *Catena*.

Clos-Arceud M., 1956. Étude sur photographies aériennes d'une formation végétale sahélienne : la brousse tigrée. *Bulletin de l'IFAN*, tome XVIII, série A(3) : 677-687.

Cornet A.F., Montaña C., Delhoume J.P., Lopez-Portillo J., 1992. Water flows and the dynamics of desert vegetation stripes. In : Hansen A.J., Di Castri F., eds. *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. Springer-Verlag, Ecological Studies 92, New-York : 327-345.

- Couteron P., 1997. Sécheresse et hétérogénéité spatiale de paysages végétaux soudano-sahéliens : exemple au nord-ouest du Burkina Faso. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 69-79.
- Delbære E., 1994. *Identification de la structure des écosystèmes forestiers contractés sahéliens par télédétection aérienne et satellitaire. Facteurs du milieu déterminant ces structures*. Mémoire d'ingénieur, ISTOM, Cergy-Pontoise / ORSTOM, Niamey.
- Dunkerley D.L. et Brown K.J., 1995. Runoff and runoff areas in a patterned chenopod shrubland, arid western New South Wales, Australia: characteristics and origin. *Journal of Arid Environments*, 30: 41-55.
- Ehrmann M. (en prép.). *Thèse*. Université Paris VI.
- Ehrmann M., Galle S., Seghieri J., Valentin C., (subm.) Patterning and pioneer processes of the herbaceous front in a tiger bush. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris. *Acta Oecologica*.
- Galle S., Seghieri J., Mounkaila H., 1997. Fonctionnement hydrologique et biologique à l'échelle locale. Cas d'une brousse tigrée au Niger. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 105-118.
- Greene R.S.B., 1992. Soil physical properties of three geomorphic zones in a semi-arid mulga woodland. *Australian Journal of Soil Research*, 30, 1 : 55-69.
- Guillaume K., Abbadie L., Mariotti A., (subm.) Soil organic matter dynamics in tiger bush. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris. *Acta Oecologica*.
- d'Herbès J.M. et Valentin C. (1997). Surface conditions in the Niamey region (Niger) : spatial distribution, ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 188-189 : 18-42.
- d'Herbès J.M. et Valentin C. (subm.). Slope gradient and rainfall control of banded woodland patterns in Niger. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris. *Catena*.
- Hiermaux P. et Gérard B., (subm.). Does patchiness increase vegetation productivity, diversity and stability. The case of «brousse tigrée» in the Sahel. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris. *Acta Oecologica*.
- Hill M.O., 1973. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54, 2 : 427-432.
- Ichaou A., 1995. *Étude comparée de la productivité des formations forestières de brousse tigrée et de brousse diffuse : conséquences pour la gestion et pour la régénération de ces formations*. Mémoire d'ingénieur, Institut Polytechnique Rural, Katibougou, Mali ; ORSTOM, Niamey, Niger.
- Ichaou A. et d'Herbès J.M., 1997. Productivité comparée des formations structurées et non structurées dans le Sahel nigérien : conséquences pour la gestion forestière. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 119-130.
- Lebel T., Sauvageot H., Hoepffner M., Desbois M., Guillot B., Hubert P., 1992. Rainfall estimation in the Sahel : the EPSAT-Niger experiment. *Hydrological Science Journal*, 37, 3 : 201-215.

- Leprun J.C., 1992. Etude de quelques brousses tigrées sahéliennes : structure, dynamique, écologie. In : Le Floch E., Grouzis M., Comet A., Bille J.C., eds. *L'aridité, une contrainte au développement*. ORSTOM éditions, Paris : 221-244.
- Mabbutt J.A. et Fanning P.C., 1987. Vegetation banding in arid western Australia. *Journal of Arid Environments*, 12 : 41-59.
- Mac Fayden W.A., 1950. Vegetation patterns in the semi desert plains of British Somalilands. *Geographic Journal*, 116 (4-6) : 119-211.
- Mahamane L. E. et Montagne P., 1997. Les grands axes stratégiques du projet Énergie II pour une gestion rationnelle des écosystèmes contractés péri-urbains. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 155-167.
- Mauchamp A., Rambal S., Lepart, J., 1994. Simulating the dynamics of a vegetation mosaic : a spatialized functional model. *Ecological Modelling*, 71 : 107-130.
- Montaña C., Lopez-Portillo J., Mauchamp A., 1990. The response of two woody species to the conditions created by a shifting ecotone in an arid ecosystem. *Journal of Ecology*, 78 : 789-798.
- Mougenot B. et Hamani S., 1997. Les possibilités de classification des formations contractées à partir de la télédétection aérienne et satellitaire. Exemple dans l'ouest nigérien. In : d'Herbès J.M., Ambouta J.M.K., Peltier R., eds. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey Eurotext, Paris : 59-68.
- Mougenot B., d'Herbès J.M., Ichaou A., Valentin C., 1996. How do vegetated arcs move upwards in the nigerien tiger bush. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris.
- Peltier R., Mahamane L.E., Montagne P., 1994. Aménagement villageois des brousses tachetées au Niger. 1ère et 2ème parties. *Bois et Forêts des Tropiques*, 242 : 59-76 et 243 : 5-24.
- Serpantié G., Tezenas du Montcel L., Valentin C., 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agro-pastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions. In : Le Floch E., Grouzis M., Comet A., Bille J.C., eds. *L'aridité, une contrainte au développement*. ORSTOM éditions, Paris : 419-447.
- Slatyer R.O., 1961. Methodology of a water balance study conducted on a desert woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) community in central Australia. In *Plant-water relationships in arid and semi-arid conditions*. Proc. of the Madrid symposium, UNESCO Arid Zone Research, 16 : 15-25.
- Thiéry J., d'Herbès J.M., Valentin C. 1995. A model simulating the genesis of banded patterns in Niger. *Journal of Ecology*, 83 : 497-507.
- Thiéry J.M., d'Herbès J.M., Valentin C., 1996. Modélisation de la réponse de brousses tigrées à différents modes de gestion. *Journées du PIR-Environnement, Vie et Sociétés, «Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement»*, 15-17 janvier 1996, Paris : 111-116. Elsevier, Paris (1997).
- Tongway D.J. et Ludwig J.A., 1990. Vegetation and soil patterning in semi-arid mulga lands of Eastern Australia. *Australian Journal of Ecology*, 15 : 23-24.
- Tongway D.J. et Ludwig J.A., (*subm.*). Theories on the origins, maintenance, dynamics and functioning of banded landscapes. In : Tongway D.J., Valentin C., d'Herbès J.M., Seghieri J., eds. *Banded vegetation patterning in arid and semi-arid environments : ecological processes and consequences for management*. Springer Verlag, Ecological Studies, New York.
- Valentin C. et d'Herbès J.M. (*in press*). The Nigerian tiger bush as a natural water harvesting system. *Banded vegetation patterning in arid and semi arid environment : ecological processes and consequences for management*. International Symposium, April 2-5, 1996, Paris. *Catena*.

Wickens G.E. et Collier F.W., 1971. Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan. *Geoderma*, 6 : 43-59.

White L.P., 1969. Vegetation arcs in Jordan. *Journal of Ecology*, 57 : 461-464.

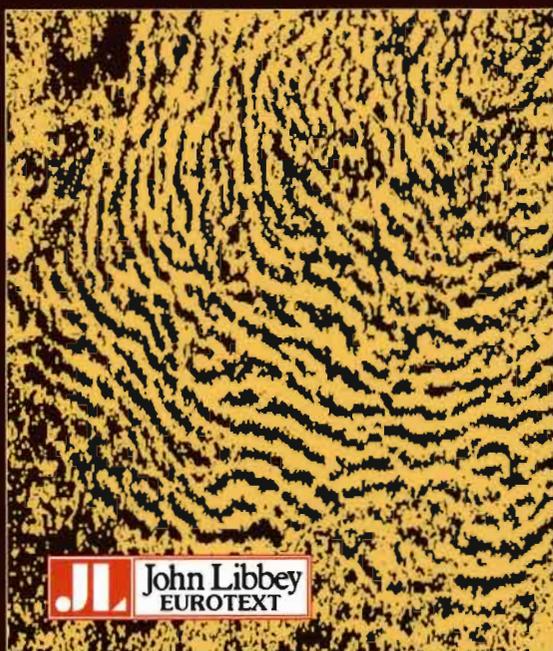
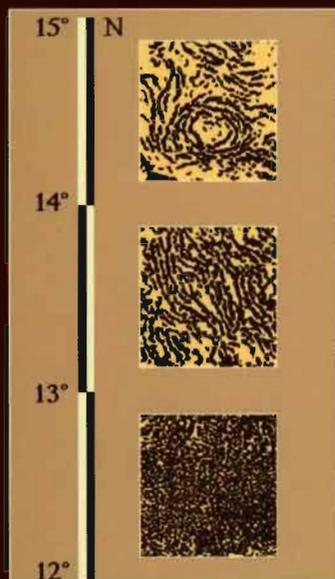
White L.P., 1970. Brousse tigrée patterns in Southern Niger. *Journal of Ecology*, 58 : 549-553.

White L.P., 1971. Vegetation stripes on sheet wash surfaces. *Journal of Ecology*, 59 (2) : 615-622.

Worrall G.A., 1960. Patchiness in vegetation in the Northern Sudan. *Journal of Ecology*, 48 : 107-117.

Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens

J.M. d'Herbès, J.M.K. Ambouta, R. Peltier



 John Libbey
EUROTEXT



Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens

TEXTES RASSEMBLÉS SOUS LA DIRECTION DE

J.-M. d'Herbès

J.-M.-K. Ambouta

R. Peltier



ISBN : 2-7420-0193-X

Éditions John Libbey Eurotext

127, avenue de la République, 92190 Montrouge, France.
Tél : 01.46.73.06.60

John Libbey and Company Ltd

13, Smiths Yard, Summerley Street, London SW18 4HR, England.
Tel : (1) 947.27.77

John Libbey CIC

Via L. Spallanzani, 11, 00161 Rome, Italy.
Tel : (06) 862.289

© John Libbey Eurotext, 1997, Paris.