



Jeudi 6 Novembre - *matin*

MODÈLES DE PAYSAGE ET MODÈLES DE RUISSELLEMENT POUR UNE BROUSSE TIGRÉE NIGÉRIENNE

J. M. Thiéry¹,

J.-M. d'Herbès², M. Ehrmann², S. Galle², C. Peugeot², J. Seghier³, C. Valentin⁴

1. CEA Cadarache, DSV/DEVM, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France
Tél. 04 42 25 27 64 ; Fax : 04 42 25 46 56 ; E-mail : thiery@orstom.rio.net

2. ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, 34032 Montpellier, France

3. ORSTOM-CSIRO, Div. Wildlife & Ecology, Po Box 84, Lyneham,
Canberra, Australia

4. ORSTOM, 213 rue La Fayette, 75480 Paris 10, France

Introduction

Des bandes de végétation, parallèles aux lignes de niveau et séparées régulièrement par des bandes de sol nu, ont été décrites dans des zones arides ou semi-arides. Ces structures contractées peuvent se constituer si la pluviométrie totale ne permet pas le maintien d'un couvert continu et si l'eau ruisselée sur les zones nues apporte le complément nécessaire pour l'alimentation en eau des bandes boisées. Une coupe à travers ces bandes montre successivement une zone dénudée, une zone de sédimentation, une zone pionnière, un coeur de fourré relativement dense et une zone de sénescence très dégradée (Thiéry et coll., 1995).

La plupart des structures de brousses tigrées observées au Niger peuvent être engendrées par le modèle de paysage °TIGREE° faisant intervenir essentiellement un coefficient de compétition pour l'eau et un coefficient de synergie, traduisant l'amélioration par les plantes et les micro-organismes de leur environnement local (Thiéry et coll., 1995). Ce modèle fonctionne avec une résolution spatiale de quelques mètres et un pas de temps de quelques années, pour des prévisions sur plusieurs décennies.

Le modèle °TIGREE° est un modèle synthétique bien adapté pour des études à long terme. Par construction, il ne cherche pas à préciser tous les mécanismes qui se déroulent à courte distance et pendant des temps courts, comme le fait le modèle TLALOC développé par Mauchamp et coll. (1994) pour les mosaïques de végétation observées au nord du Mexique. Des travaux sont en cours pour adapter le modèle TLALOC aux brousses tigrées nigériennes (Ehrmann, 1997). Dans cette communication, nous présentons un modèle préliminaire °TIGRFLUX° qui met l'accent sur les flux hydriques à différentes échelles de temps et d'espace.

JOURNÉES PIREVS - LES TEMPS DE L'ENVIRONNEMENT TOULOUSE 5 / 6 / 7 NOVEMBRE 1997





1. Description du modèle °TIGRFLUX°

Le modèle °TIGRFLUX° est une extension du modèle °TIGREE° basé sur des automates cellulaires (Thiéry et coll., 1995, 1997). La brousse tigrée est représentée par une matrice d'états $S_{i,j,k}$ indiquant l'état de la végétation dans chaque cellule (i,j) à l'itération k . Chaque cellule correspond à une cellule carrée de 5 à 10 m de côté qui peut exister sous 4 états selon son activité biologique. L'état 0 correspond à une cellule dénudée, tandis que l'état 3 correspond à une cellule complètement recouverte par une végétation en pleine activité. Les états 1 et 2 correspondent à des situations intermédiaires. L'état d'une cellule pourrait être estimé par des mesures écophysiologiques (photosynthèse, transpiration, etc.) ou par la numérisation de cartes d'indices de végétation.

Le modèle °TIGREE° ne cherche pas à représenter les évolutions saisonnières et se concentre sur les évolutions à long terme, avec un pas de temps de l'ordre de quelques années. Dans ces conditions, l'état d'une cellule évolue en fonction de la pluviométrie moyenne et de l'état des cellules voisines. On suppose que les cellules situées en amont (directement ou partiellement) prélèvent une quantité d'eau proportionnelle à leur activité métabolique et donc à leur état (effet de *compétition* pour l'eau). Les cellules les plus proches (latéralement ou en aval) jouent un rôle de *synergie* pour de multiples raisons : ameublissement et amélioration du sol dus à la présence de termites et à l'augmentation du taux de matière organique, protection des arbres contre le vent et les prédateurs, protection des plantules et des rejets, etc. L'effet global résultant de toutes ces contributions se traduit par la règle de transition

$$S_{i,j,k+1} = \text{Max} (0, \text{Min} (S_{\text{Max}}, S_{i,j,k} + \text{Max} (B, \text{Min} (H, c \sum_{m,n} C_{m,n} S_{i+m,j+n,k}))))), \quad (1)$$

qui introduit la matrice de convolution $C_{m,n}$, le coefficient de normalisation c et les seuils S_{Max} , B et H limitant l'ampleur des transitions (une cellule de faible densité ne peut pas se développer complètement en une seule étape). L'article original (Thiéry et coll., 1995) utilisait la matrice de convolution de dimension $9 * 3$

$$\begin{matrix} 0 & -a & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -a & 0 \\ b & * & b \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix}, \quad (2)$$

qui introduit un *coefficient* de compétition a et un *coefficient* de synergie b . Les différents éléments de cette matrice pondèrent les effets des cellules entourant la cellule courante $*$. Des calculs complémentaires ont été réalisés avec des matrices plus détaillées, mais les conclusions principales restent les mêmes.



Les conditions initiales existant il y a quelques siècles étant inconnues, les calculs itératifs commencent avec une matrice de paysage aléatoire (tirage au hasard de l'état des cellules).

Le modèle °TIGRFLUX° reprend l'essentiel de ce formalisme, sauf en ce qui concerne les coefficients de compétition qui sont remplacés par une modélisation plus détaillée des flux hydriques. Cette modélisation transpose à l'échelle du paysage et de l'année le modèle de ruissellement et d'infiltration développé par Galle et coll. (1997) à l'échelle de la parcelle de ruissellement et de l'averse (c'est à dire, en première analyse, au pas de temps journalier). Les données expérimentales ont été mesurées sur quatre parcelles de ruissellement implantées dans les différentes zones d'une brousse tigrée typique. Dans tous les cas, la lame ruisselée L_R peut s'exprimer en fonction de la pluie P par une relation linéaire à seuil du type

$$L_R = C \text{ Max}(0, P - P_S) , \quad (3)$$

où le coefficient C et le seuil P_S sont spécifiques du type de surface des parcelles. Cette relation représente des processus journaliers, alors que le modèle proposé a une résolution temporelle de 5 à 10 ans. De plus, le seuil P_S , qui introduit une non-linéarité, empêche la simple intégration dans le temps : la lame ruisselée cumulée sur 5 années dépend de la distribution dans le temps des lames précipitées. Pour agréger de manière simple ces différentes échelles de temps, on a utilisé la chronique des pluies journalières observées à Niamey depuis 1905 (soit 85 années, compte tenu des lacunes). Le ruissellement produit par chaque averse est simulé pour chaque parcelle par la relation (3) ci-dessus. On effectue ensuite, sur la chronique des lames ruisselées obtenue, une somme glissante correspondant à 5 années, soit 81 valeurs. On recherche alors une relation statistique analogue à la précédente

$$L_{R5} = C_5 \text{ Max}(0, P_5 - P_{S5}) , \quad (4)$$

dans laquelle L_{R5} et P_5 sont les cumuls sur cinq ans, et C_5 et P_{S5} les paramètres obtenus. On fait alors l'hypothèse que cette relation reste valable sur une portion de terrain avec un ruissellement amont L_{A5} (contrairement aux parcelles expérimentales qui sont closes à l'amont)

$$L_{R5} = C_5 \text{ Max}(0, (P_5 + L_{A5}) - P_{S5}) . \quad (5)$$

Avec des notations adaptées à °TIGRFLUX°, on peut écrire que sur chaque cellule (i,j) , à l'itération k , le ruissellement sortant $(R_{i,j,k})$ est une fonction linéaire à seuil de l'apport d'eau (somme du cumul pluviométrique P_k et du ruissellement entrant $R_{i-1,j,k}$)

$$R_{i,j,k} = C_5 \text{ Max}(0, (P_k + R_{i-1,j,k}) - H_S) . \quad (6)$$



Les coefficients C_S et H_S dépendent de l'état S de la cellule (i,j) à l'itération k ($S = S_{i,j,k}$).

A chaque itération temporelle k , le ruissellement $R_{i,j,k}$ est calculé par une itération spatiale sur la colonne j . Pour permettre le calcul du flux sortant ($F_{j,k}$) à la base de la matrice de paysage, on a supposé qu'il n'y avait pas de flux entrant au sommet de la matrice ($R_{0,j,k} = 0$). Autrement dit, dans °TIGRFLUX° il n'y a pas de continuité entre le haut et le bas de la matrice de paysage, contrairement à °TIGREE°. Par contre les deux modèles introduisent une continuité latérale entre les bords gauche et droit de la matrice de paysage (le voisin gauche d'un point de la première colonne se trouve sur la même ligne dans la dernière colonne). Ces conditions de continuité, dites cycliques, permettent de réduire les éventuels effets de bord.

La quantité d'eau ($Q_{i,j,k}$) entrant dans chaque cellule (i,j) à l'itération k est donnée par le bilan

$$Q_{i,j,k} = P_k + R_{i-1,j,k} - R_{i,j,k} \quad (7)$$

Des travaux récents montrent que toute cette eau est évapotranspirée à la fin de la saison sèche sans report d'une année sur l'autre (Galle et coll., 1997). Pour chaque cellule (i,j) à l'itération k , on suppose que la demande d'évapotranspiration ($D_{i,j,k}$) est donnée par la formule

$$D_{i,j,k} = D_S / S_{yni,j,k} \quad (8)$$

où le coefficient $D_S = D(S_{i,j,k})$ dépend de l'état $S = S_{i,j,k}$ de la cellule (i,j) à l'itération k et où $S_{yni,j,k}$ représente la synergie correspondante. Par analogie avec °TIGREE°, cette synergie est supposée être une somme pondérée des effets des cellules voisines

$$S_{yni,j,k} = (1 + c \sum_{m,n} C_{m,n} S_{i+m, j+n, k}) / (1 + c S_{i,j,k} \sum_{m,n} C_{m,n}) \quad (9)$$

Le dénominateur permet de normaliser la synergie pour des paysages homogènes ($S_{yni,j,k} = 1$). Les calculs préliminaires ont été effectués avec la matrice de convolution $C_{m,n}$ égale à

$$\begin{matrix} 0 & e(1-d) & 0 \\ b & * & b \\ 0 & e(1+d) & 0 \end{matrix} \quad (10)$$

La synergie latérale, la synergie amont et la synergie aval sont représentées respectivement par le coefficient b , l'expression $e(1-d)$ et l'expression $e(1+d)$. Si le coefficient de dissymétrie d est positif, la synergie aval l'emporte sur la synergie amont, ce qui arrive quand les arbustes favorisent l'amont en ralentissant le ruissel-



lement. Comme pour °TIGREE°, les synergies sont essentiellement d'origine biologique, mais b inclut aussi la redistribution latérale de l'eau qui n'est pas prise en compte par les équations de ruissellement (6) et (7).

A chaque itération, les équations (6) à (10) permettent de calculer la quantité d'eau disponible dans chaque cellule et la synergie correspondante. On peut alors calculer l'état optimal de la végétation sur cette cellule, c'est à dire le plus grand état $O_{i,j,k}$ qui satisfasse la relation

$$D_{(O_{i,j,k})} / Syn_{i,j,k} \leq Q_{i,j,k} \quad (11)$$

On suppose implicitement que le développement de la végétation est limité essentiellement par les ressources en eau et que la végétation aura le temps de se développer dans les cellules favorables et de régresser dans les cellules stressées. On obtient ainsi la formule de transition qui permet de calculer la nouvelle matrice de paysage à l'itération $k+1$

$$S_{i,j,k+1} = \text{Max}(0, \text{Min}(S_{\text{Max}}, S_{i,j,k} + \text{Max}(B, \text{Min}(H, O_{i,j,k} - S_{i,j,k})))) \quad (12)$$

L'équation précédente fixe indirectement le pas de temps de chaque itération, qui doit correspondre au temps minimum pour passer d'un état à l'autre (c'est à dire environ 5 à 10 ans).

2. Résultats préliminaires

De nombreux calculs ont été effectués avec le modèle °TIGRFLUX°, en faisant varier les paramètres qui interviennent dans les équations (6) à (12). On obtient très facilement la formation de bandes de végétation, mais celles-ci sont plus ou moins réalistes. En particulier la largeur des bandes dépend des dimensions de la matrice de convolution, c'est à dire de la distance de corrélation entre cellules. La matrice suivante, qui conserve les symétries de la matrice (10), donne de bons résultats

0	0	0.005	0	0	
0	0.010	0.015	0.010	0	
0.020	0.060	*	0.060	0.020	
0	0.030	0.045	0.030	0	
0	0	0.015	0	0	(13)

La Figure 1 présente deux vues du même paysage qui s'est stabilisé après 34 itérations. La vue de gauche est plus réaliste tandis que la vue de droite indique plus précisément l'état de chaque cellule (la taille des symboles est proportionnelle au numéro des états). Les paramètres C_S et H_S ont été calculés avec des mesures de parcelles de ruissellement placées dans quatre zones typiques d'une brousse tigrée. Comme il n'y a pas de report des stocks d'eau d'une année sur l'autre, toutes les valeurs de la Table 1 ont été exprimées à l'échelle de l'année. Les paramètres des



états 0, 1 et 3 ont été calculés respectivement avec des parcelles sur une zone dénudée, sur une zone de sénescence en aval d'un fourré et sur un coeur de fourré. L'état 2 correspond à la moyenne entre les états 1 et 3. Les évapotranspirations en conditions homogènes ont été ajustées empiriquement pour obtenir des résultats raisonnables. Les évapotranspirations théoriques de cellules isolées s'en déduisent à l'aide des équations (8), (9) et (13). Les calculs ont été faits pour un cumul pluviométrique annuel de 600 mm an⁻¹ avec une matrice de paysage de dimensions 45 * 45.

Figure 1 : Exemple de brousse tigrée calculée avec °TIGRFLUX°. Les cellules sont représentées sous forme d'arbres (vue de gauche) ou sous forme géométrique (vue de droite).

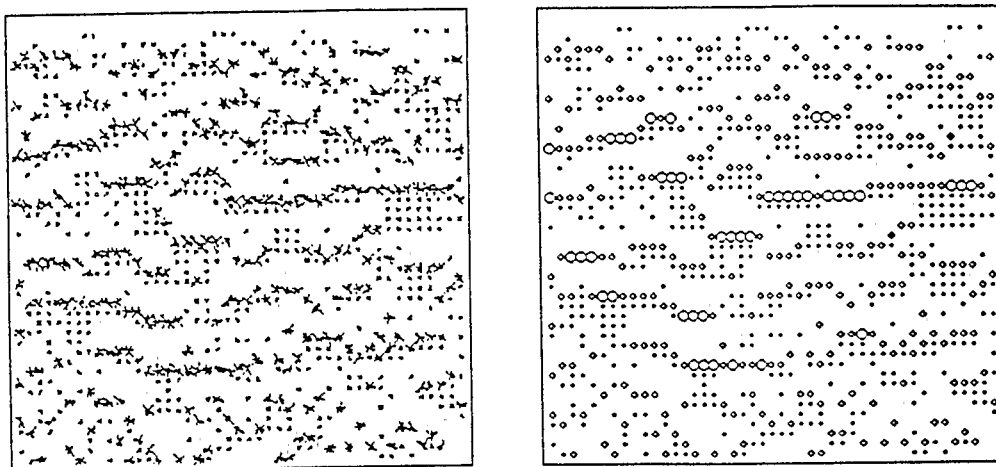


Table 1 : Paramètres hydriques dépendant de l'état de la cellule.

Paramètres	Etat 0 Dénudé	Etat 1 Minimum	Etat 2 Moyen	Etat 3 Maximum
Coefficient annuel de ruissellement CSA (sans dimension)	0.671	0.245	0.155	0.065
Seuil annuel de ruissellement HSA (mm an ⁻¹)	109	203	164	124
% d'un cumul pluviométrique de 600 mm pénétrant dans une cellule isolée	45	84	89	95
Evapotranspiration annuelle en conditions homogènes DSA (mm an ⁻¹)	300	520	700	850
Evapotranspiration annuelle théorique d'une cellule isolée ESA (mm an ⁻¹)	300	686	1148	1666

Compte tenu de la condition de flux nul au sommet du paysage, les cellules hautes sont dénudées tandis que les suivantes s'organisent progressivement. Les bandes sont assez dissymétriques (la partie la plus active du fourré étant généralement en amont). Elles sont aussi plus régulières en amont que dans la zone de sénescence. Des études statistiques seraient nécessaires pour comparer ces caractéristiques avec celles des brousses réelles. Par ailleurs, les flux calculés au bas du paysage sont très faibles (généralement inférieurs au cumul pluviométrique

JOURNÉES PIREVS - LES TEMPS DE L'ENVIRONNEMENT TOULOUSE 5 / 6 / 7 NOVEMBRE 1997



sur une cellule). On retrouve, sous une forme idéalisée, une propriété des brousses tigrées qui interceptent bien la pluie.

Conclusion

Les modèles °TIGREE° et °TIGRFLUX° ont plusieurs points communs au niveau de leur formalisme et prédisent tous deux la formation de bandes de végétation. °TIGREE° est un modèle de paysage qui ne travaille qu'à cette échelle avec ses deux paramètres empiriques pour les compétitions et les synergies. °TIGRFLUX° intègre à l'échelle de quelques années des phénomènes de ruissellement mesurables à l'échelle du jour. Cette approche devrait rendre compte de l'essentiel des compétitions hydriques, dans les sols où l'infiltration est limitée par les états de surface. °TIGRFLUX° intègre aussi implicitement l'évapotranspiration sur toute l'année, alors que l'essentiel de la dynamique de la végétation se situe pendant la saison des pluies. Dans °TIGRFLUX°, comme dans °TIGREE°, les synergies indispensables pour la formation de bandes de végétation sont traduites par une simple matrice de convolution. Un modèle complet de bandes de végétation (Ehrmann, 1997) devrait préciser l'origine essentiellement biologique de ces synergies, en s'inspirant des modèles déjà publiés (Ludwig et coll., 1994; Mauchamp et coll., 1994).

Références bibliographiques

D'Herbès J.-M., Valentin C. et Thiéry J. M. (1995) - "La brousse tigrée" : synthèse des connaissances acquises. Hypothèses sur la genèse et les facteurs déterminant les différentes structures contractées. Atelier International sur le Fonctionnement et la Gestion des Ecosystèmes Forestiers Contractés Sahéliens, Niamey (Niger), 20-24 Nov 1995.

Ehrmann M. (1997) - Thèse

Galle S., Ehrmann M. et Peugeot C. (1997) - Water balance on a banded vegetation pattern. The case of the tiger bush in the Western Niger. Submitted to *Catena*.

Ludwig J. A., Tongway D. J. et Marsden S. G. (1994) - A flow-filter model for simulating the conservation of limited resources in spatially heterogeneous, semi-arid landscapes. *Pacific Conservation Biology*, 1: 209-213.

Mauchamp A., Rambal S. et Lepart J. (1994) - Simulating the dynamics of a vegetation mosaic : a spatialized functional model. *Ecological Modelling*, 71: 107-130.

Thiéry J. M., d'Herbès J.-M. et Valentin C. (1995) - A model simulating the genesis of banded vegetation patterns in Niger. *J. Ecology*, 83: 497-507.

Thiéry J. M., d'Herbès J.-M. et Valentin C. (1997) - Modélisation de la réponse de brousses tigrées à différents modes de gestion. Accepté pour publication dans *Tendances nouvelles en modélisation pour l'Environnement*. Elsevier, Paris.