



Vendredi 7 Novembre - matin

Ø H2  
Ø Encours

## MODELE DE SIMULATION DE L'EXTENSION SPATIALE DE L'EMPRISE DES CULTURES AU SAHEL

*M. Loireau<sup>1</sup>, J.M. d'Herbes<sup>1</sup>, O. Gayte<sup>2</sup>*

*1. ORSTOM, Maison de la Télédétection; BP 5042, 34093 Montpellier cedex 5,*

*2. Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement,  
34397 Montpellier cedex 5*

### PROBLEMATIQUE

Les sociétés rurales des zones arides dépendent en grande partie, mais pas uniquement, des ressources naturelles renouvelables pour la satisfaction de leurs besoins alimentaires et énergétiques. Ces besoins se traduisent par une utilisation de l'espace et des ressources, selon des techniques, des pratiques et une logique spatiale dépendant d'une organisation sociale plus ou moins complexe.

Pour étudier la dynamique des interactions ressources / usages, il faut pouvoir interpréter (et anticiper) les changements biophysiques en fonction des changements socio-économiques et réciproquement. Or, le paysage est considéré comme la résultante, à chaque instant, des deux séries de facteurs. A partir de là, la question posée est : comment parvenir à différencier les influences respectives des deux séries de forces en action ?

L'espace étant le lieu où les systèmes socio-économiques et les systèmes biophysiques interagissent, la démarche adoptée pour la compréhension d'un système et sa modélisation est, de façon privilégiée, spatiale. Autrement dit, il s'agit de définir et de délimiter des espaces communs et homogènes tant du point de vue biophysique que socio-économique, possédant une stabilité relative dans le temps. Ces espaces communs délimités constituent les unités spatiales de référence (USR) sur lesquelles il est possible de faire un bilan "ressources / usages" à partir du moment où l'on en connaît la part respective des systèmes biophysiques et socio-économiques en action.

Le seul moyen d'y parvenir, selon notre point de vue, consiste à différencier, dans un premier temps la délimitation d'espaces homogènes du point de vue "biophysique", d'une part, et d'espaces homogènes du point de vue de la gestion qui en est faite par l'homme, d'autre part, et, à chercher leur intersection dans un deuxième temps seulement. Cette distinction a priori est un passage obligatoire puisqu'il est, de notre point de vue, l'unique manière de se doter des clés de compréhension et d'interprétation d'un paysage donné. Le paysage est ici considéré comme la résultante observable, à chaque instant, d'un écosystème (système d'écosystèmes).

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





Dans les zones agro-pastorales du Sahel, les modes d'utilisation des ressources dominants, qui déterminent un impact significatif sur le milieu sont bien identifiés : l'usage agricole pour la céréaliculture pluviale, l'usage pastorale (en relation avec les pratiques d'élevage) et l'usage du bois-énergie" (en relation avec les besoins énergétiques domestiques). L'utilisation agricole de l'espace rural est déterminante dans la structuration fondamentale du paysage. Elle détermine une zone sous l'emprise des cultures décomposée en unités élémentaires qui sont les parcelles, avec une affectation donnée : jachères, champs cultivés. De cet espace-ressource agricole, dépendent les autres usages : pastoral et "bois-énergie". En effet, à titre d'exemple, les jachères sont ouvertes au pâturage toute l'année, et les champs fermés en saison des pluies. On parle alors de multi-usage ( ou multi-fonctionnalité) d'un même *espace-ressource*.

Or, ces parcelles agricoles ont une grande mouvance temporelle saisonnière et annuelle. En effet, dans une même année, une parcelle est défrichée, sarclée, semée, "re-sarclée", "re-semée" éventuellement "n" fois, "re-coupée", et enfin récoltée. A chacune de ces étapes, il peut y avoir rupture et retour de la parcelle à un état de jachère dérobée. D'une année à l'autre, une jachère de tout âge peut être mis en culture et vice versa et une zone de végétation naturelle peut être défrichée pour une mise en culture. De plus, une même parcelle peut être partiellement cultivée d'une année sur l'autre et son contour peut donc varier. Cette mosaïque de champs et de jachères est donc extrêmement mobile et constitue un problème dès qu'il s'agit de cartographie. Il est alors nécessaire de passer à des unités spatiales majeures englobant un ensemble de parcelles qui, en moyenne, ont un comportement stable sur plusieurs années. Autrement dit, il est nécessaire de déterminer des unités spatiales qui ont une gestion agricole par l'homme homogène et relativement stable dans le temps. Ces unités sont dites "*unités de gestion*".

Ces unités de gestion peuvent alors être superposées aux grandes unités écologiques du paysage (principalement déterminées par la géomorphologie et la pédologie) pour déterminer les USR sur lesquelles il est alors possible de faire un bilan ressources/prélèvements.

Cette démarche nécessite une analyse fine de la logique d'utilisation des terres agricoles qui dépasse la seule analyse de l'évolution d'affectation parcellaire. La gestion localisée d'une parcelle dépend de facteurs socio-économiques (main d'oeuvre disponible, ...), de facteurs climatiques (répartition des pluies), de facteurs biophysiques (qualité des terres...), de critères d'accessibilité (distance au village...), etc... Le problème méthodologique au coeur de nos préoccupations se pose alors : comment délimiter des "unités de gestion" qui ne se visualisent pas à priori ? Quel peut être l'apport de la télédétection et de la modélisation ?

## LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude à laquelle a été appliquée cette problématique est le site de Banizoumbou (400 km<sup>2</sup>) au Niger, situé en zone sahélienne (550 mm de précipitations annuelles moyennes) à 70 km à l'est de Niamey. L'accent est délibérément mis



sur la dimension locale car c'est à ce niveau qu'il est possible d'appréhender les pratiques d'utilisation du milieu naturel.

Les paysages sont marqués par les grandes unités suivantes : les plateaux cuirassés, à usage sylvo-pastoral ; *les vallées sèches*, axes alluviaux de drainage disséquant les plateaux ; enfin les dépôts sableux éoliens de la fin du quaternaire qui occupent le reste de l'espace. Vallées et dépôts sableux font l'objet d'une mise en culture progressivement croissante (15% en 1950, 40% en 1975 et 81% en 1992), conduisant à une emprise presque totale sur ces milieux (Leduc et Loireau, 1997).

### MATERIELS ET METHODES

Pour l'étude de la dynamique interactive ressources / usages, huit centres villageois (quatre terroirs) ont été retenus dans la zone d'étude en fonction de la disponibilité en ressources (globalement superficie occupée par les plateaux et par les terres sableuses) et de l'ancienneté de l'installation du groupe social. En ce qui concerne l'activité agricole, un double échantillonnage a été privilégié :

- **Echantillonnage de type géographique** le long de transects radiaux à partir de points focaux (villages) vers les limites de terroirs ou la bordure d'un plateau. Sur chacun des transects (3 à 4 par villages ; 26 en tout), chaque parcelle traversée (271) est enquêtée sur son historique d'occupation (depuis 1950) et son type d'accès foncier. Le choix de tels transects se justifie par l'hypothèse de base qui consiste à dire que les zones cultivées dans les zones agro-pastorales sahéliennes s'organisent en auréoles concentriques autour des centres villageois.

- **Echantillonnage par unité d'exploitation.** Une enquête socio-économique préalable a été effectuée dans toutes les unités d'exploitation des huit villages pour servir, entre autres, de base d'échantillonnage. Une trentaine d'unités d'exploitation ont été ainsi retenues et, avec chaque chef d'exploitation, l'ensemble de leurs parcelles (91) ont été enquêtées sur leur historique d'occupation, les techniques agricoles employées, la gestion au niveau d'une exploitation, ... Cette échantillonnage se justifie par le fait qu'il apporte des réponses quant à la manière d'un paysan de gérer et d'exploiter, d'un point de vue pratiques agricoles, les ressources disponibles.

Toutes ces parcelles sont localisées grâce à un GPS et un recalage sur image satellite SPOT de la même date. Les informations recueillies permettent d'établir une typologie des gestions parcellaires en distinguant bien les variables déterminant la typologie des gestions, au sens pratiques agricoles marquant directement le paysage (*durée des jachères, durée des cultures, intensité d'intrants et critères de changements d'affectation*), et les variables explicatives (disponibilité de main d'oeuvre, accès foncier). Une seule parcelle peut avoir eu plusieurs types de gestion consécutifs au cours de son histoire. Sur 362 parcelles enquêtées, 895 périodes de gestion ont été identifiées.

Ensuite, il s'agit de chercher les relations entre ces différents types de gestion et les variables qui déterminent leur localisation : *qualité des sols et distance au village*. Ces relations localisés (utilisation d'un SIG) permettent de construire les bases d'un modèle d'utilisation des terres agricoles.



L'étape suivante consiste, à l'aide de ses lois établies, grâce à une modélisation spatialisée, de contourner les unités de gestion sur les terroirs échantillonnées. Toutes ces étapes sont intégrés dans un Système d'Information sur l'Environnement (SIE) utilisant des outils tels que : base de données, Système d'Information Géographique et modélisation.

## TYPOLOGIE DES UNITES DE GESTION

Une typologie des gestions parcellaires en 11 classes a ainsi été établie, associant à chaque type de gestion un degré d'artificialisation construit avec la somme des degrés d'artificialisation de chaque variable : durée de jachères, durée des cultures, intensité d'intrants, critères de changement d'affectation. Ces critères de remise en culture (ou jachère) sont soit de type socio-économique ou climatiques (marquage foncier, disponibilité de main d'oeuvre, migrations, sécheresses...), soit essentiellement des indicateurs écologiques (espèces herbacées indicatrices de la qualité des sols, indicateurs de production en mil, taille ou grosseur des tiges des ligneux), soit un rythme imposé par le cultivateur par tradition (rotation active).

Tableau 1 : Typologie des Unités de Gestion (UG)

TPG	Artif	Description	Durée des jachères			Durée des cultures			INT	Critères de mise en jachères	UG	Artif
			Moy	Ecart		Moy	Ecart					
1	0	brousse	0	0	0	0	0	0	0	aucun	A	0
2	3	jachères de marquage foncier	> 5	12	5	0	0	0	0	socio-éco.	A	0
3	6	jachères très longues de réserve	> 10	20	6	[3-20]	10	4	1	socio-éco.	n.d	6
4	9	jachères longues de réserve	]5-10]	8	2	[3-20]	10	6	1	socio-éco.	n.d	9
5	9	jachères longues, cultures moyennes	]5-10]	7	1	]0-10]	6	3	1	bio-physique	B	9
6	11	jachères courtes, cultures moyennes	]3-5]	4	1	]0-10]	6	2	2	bio-physique	C	11
7	12	jachères très courtes, cultures moyennes	]0-3]	2	1	]0-10]	6	3	3	bio-physique	D	13
8	14	jachères courtes, cultures très longues	]0-5]	3	1	> 10	60	n.d	2	bio-physique	E	14
9	12	jachères courtes, cultures courtes	]0-5]	4	1	]5-10]	4	1	3	rotation active	D	13
10	13	jachères courtes, cultures moyennes	]0-5]	4	1	]5-10]	8	1	2	rotation active	D	13
11	19	cultures permanentes	0	0	0	> 10	n.d	n.d	4	rotation active	F	19

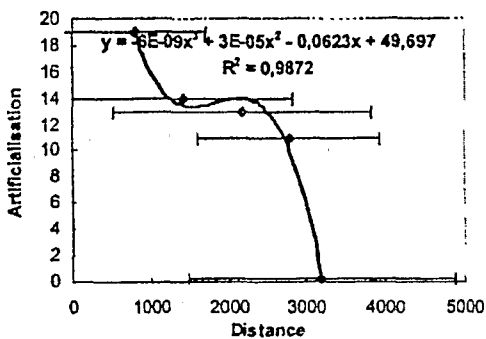
TPG = Type de Gestion Parcellaire ; UG = Unité de gestion ; Artif = degré d'artificialisation ; Moy = moyenne ; Ecart = écartype ; INT = Intensité d'intrants.

A partir de ces 11 types de gestion parcellaires, un regroupement a été établi pour caractériser des unités de gestion, c'est à dire des gestions qui répondent à une organisation spatiale. Les types 3 et 4 se trouvent partout dans l'espace et ne peut donc pas caractériser une unité de gestion. Ils sont une explication des cas particuliers dans chacune des autres unités de gestion. Six types d'unités de gestion sont ainsi retenus, allant de la brousse (le moins artificialisé) à la culture permanente (le plus artificialisé) en passant par 4 autres types de gestion de plus en plus artificialisés.

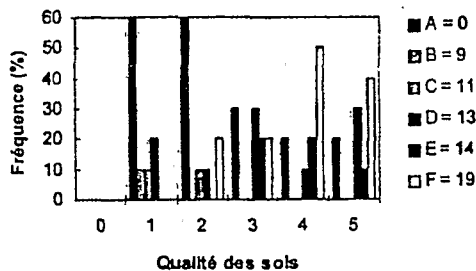


## LOIS ETABLIES POUR UNE MODELISATION

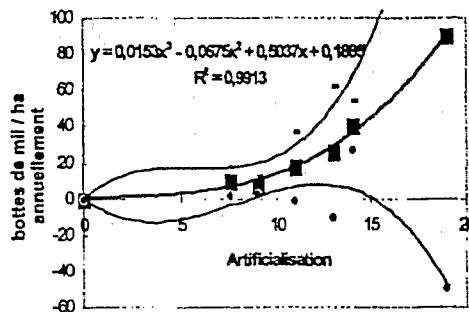
Relation entre l'artificialisation et la distance au village pour l'ensemble des terroirs échantillonnés



Fréquence des types de gestion agricole sur des qualités de sols croissantes



Production moyenne annuelle en boîtes de mil / ha selon une gestion agricole de plus en plus artificialisée



Une simple mise en relation statistique des degrés d'artificialisation (associé à une gestion) avec la distance au village donne une équation au troisième degré avec un  $R^2 = 0,98$ . Malgré des écartypes importants, une tendance est établie : une forte artificialisation près du village, puis un plateau qui indique que, quelque soit la distance, l'artificialisation est la même, et enfin une chute de l'artificialisation rapide au delà d'un certain seuil de distance.

En ce qui concerne la qualité des sols, la mise en relation avec le degré d'artificialisation met en évidence que, plus les sols ont une bonne aptitude agronomique et plus l'artificialisation est forte.

Le résultat global au niveau de la production en mil est une augmentation des rendements en fonction du degré d'artificialisation associé à la gestion agricole.

## MODELISATION

Pour spatialiser ces relations statistiques établies à l'aide de la modélisation, une interprétation plus déterministe des résultats est nécessaire. La modélisation est un exercice délicat qui exige à la fois de prendre du recul par rapport aux données



recueillies afin d'identifier les relations fondamentales entre les différents éléments du système, et, en même temps, de s'appuyer sur des techniques reconnues de modélisation : dynamique des systèmes, automates, multi-agents...

L'hypothèse testée actuellement est la suivante : la gestion agricole d'un territoire sahélien est telle que :

- Elle permette une production suffisante pour subvenir aux besoins du village,
- Elle limite l'effort nécessaire à l'activité agricole.

Pour limiter la complexité du modèle en phase d'élaboration, nous travaillons en statique avec une démographie donnée.

La production de chaque parcelle dépend à la fois de son aptitude agricole (qualité des sols) et de son type de gestion (ex :  $Pqg = 30 \text{ kg mil/ha}$  pour  $q =$  bonne aptitude et  $g =$  forte artificialisation). L'effort pour cultiver une parcelle est d'autant plus grand que :

- la parcelle est éloignée du village :  $E_d =$  effort lié à la distance.
- le degré d'artificialisation de la parcelle est élevé :  $E_g =$  effort lié à la gestion.
- l'aptitude des sols à l'agriculture est faible :  $E_q =$  effort lié à la qualité des sols.

L'effort total est le produit des trois types d'effort :  $E_t = E_d * E_g * E_q$ .

L'effort réel étant difficilement quantifiable, nous utilisons une échelle relative selon les lois établies précédemment. Il est possible de démontrer que les conditions présentées en hypothèse sont remplies dans le cas où :

- à chaque parcelle est affectée le type de gestion pour lequel le rendement  $Pqg/E_g$  est maximal.

- ne sont cultivées effectivement que les "n" parcelles les plus intéressantes en terme de rendement, ces "n" parcelles ayant une production totale équivalente aux besoins de la population.

Un développement informatique est en cours pour tester ces hypothèses par simulation. une première maquette a permis de tester l'utilisation d'un réseau d'automates cellulaires pour la mise en oeuvre. Cette technique a été abandonnée car elle oblige à définir de manière locale le type de gestion d'une parcelle alors qu'il est indispensable d'avoir une vision globale du territoire. Par exemple, les automates cellulaires ne permettent pas de simuler des parcelles fortement artificialisées éloignées du village. Finalement, les algorithmes utilisés se rapprochent plus des techniques d'optimisation issues de la recherche opérationnelle.

Ce modèle ne fournit pour l'instant qu'une vision statique du territoire et peut être validé avec les 362 parcelles échantillonnées. Les travaux en cours devraient permettre d'introduire les effets du temps (dynamique de la population, du climat, épuisement des ressources) dans le modèle afin que l'on puisse simuler l'évolution du territoire. L'approche multi-agents semble fournir des éléments méthodologiques intéressants pour ces développements futurs.

## CONCLUSION

Toute la difficulté de la démarche présentée est la spatialisation des modes de gestion et donc la délimitation des unités de gestion. A partir de relations statistiques simples obtenues entre plusieurs facteurs pris deux à deux, quel modèle spatial



faut-il utiliser pour rendre compte au mieux des multiples relations interactives entre ressources disponibles et usages. Les concepts sont simples, les lois d'organisation spatiale sont établies, mais la modélisation spatiale reste complexe et en cours d'exploration. Une fois le modèle d'utilisation des terres agricoles au Sahel établie, les étapes ultérieures consisteront à :

- extrapoler le modèle aux autres terroirs dont on ne connaît que la démographie et la disponibilité en terres grâce à des relations simples établies sur les terroirs échantillonnés entre la surface des différentes unités de gestion, la population du village et la disponibilité en terre cultivable (carte de qualité des sols).

- confronter ces unités de gestions aux grandes unités écologiques sur l'ensemble du site pour déterminer les Unités Spatiales de Référence.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

LEDUC C. & LOIREAU M., 1997, *Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahéenne (sud-ouest du Niger)*, IAHS Publication n° 240.

