SOLS DE TUNISIE

Bulletin de la Direction des Sols

Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles

ACTA

Numéro Spécial

2007

ISSN:0330-2059

REPUBLIQUE TUNISIENNE MINISTERE DE L'AGRICULTURE

SOLS DE TUNISIE

Bulletin de la Direction des Sols

38ème Année

Numéro Spécial N° 2

« Territoires et aridité au Nord et au Sud du Sahara » :

La lutte contre la dégradation des terres, bilan des acquis et nouvelles perspectives de recherche.

ACTES DU SEMINAIRE ORGANISE A TUNIS LE 13 JUIN 2005

Editeurs scientifiques : A. CORNET & H. HAMROUNI

HOMMAGE A ROGER PONTANIER

Ce séminaire scientifique et ce numéro spécial de « SOLS de TUNISIE » ont été réalisés en hommage à Roger PONTANIER, agropédologue et Directeur de recherche à l'IRD, qui nous a quitté le 18 décembre 2003. Roger PONTANIER a beaucoup travaillé dans les zones sèches d'Afrique : Tunisie, Cameroun, Sénégal. Son travail a été marqué par une grande disponibilité vis-à-vis de ses partenaires et par une approche très pluridisciplinaires et multi institutionnelles. Nous souhaitons que les scientifiques ayant contribué et les amis et collègues de Roger PONTANIER seront remerciés pour leur participation à cet Hommage.

« Roger était profondément enraciné dans le sud tunisien. Du Nefzaoua à Zougrata, du Bou Hedma aux Matmata, il n'est pas un arpent de terrain qu'il n'ait parcouru, pas une question du devenir de ces terroirs qui ne lui ait échappé. Entraînant dans son sillage géographes, hydrologues, écologues, pastoralistes, télédétecteurs et modélisateurs, à tous, il a fait aimer le Sud ».

(in « Environnement et sociétés rurales en mutation » IRD Editions)

Hédi HAMROUNI et Antoine CORNET

SOMMAIRE

Avant – Propos :

Hommage à Roger Pontanier : Itinéraire d'un chercheur au service du développement…….**4**

Jacques Claude

I – Etats de surface, érosion des Sols, aridité édaphique

- Les lacs et barrages collinaires : infrastructures hydrauliques d'aménagement et de conservation des terres agricoles en zone semi aride méditerranéenne…… **7**

Jean Albergel, Slah Nasri, Jean Marie Lamachère

- Estimation et spatialisation des réserves hydriques du sol, application au bassin versant de l'oued Zanfour, Tunisie……. **21**

Jean Collinet & Patrick Zante

- Comportement sous pluies simulées de sols argilo-limoneux irrigués par submersion ou aspersion……..**44**
Mohamed Hachicha

- La surface des sols des régions arides : lien entre l'écologie de terrain et la télédétection **56**
Richard Escadafal

- cartes et photographies couleur…… …….**63**

II – La Jachère en Afrique

- Le projet «La jachère en Afrique tropicale »…….**72**
Christian Floret, Victor Hien

- Comparaison de la composition botanique des régimes ingérés dans les champs, les jachères et formations naturelles par les bovins du système d'élevage sédentaire en zone soudanienne nord du Mali…… **80**
Moussa Karembé, Harouna Yossi , Fadiala Dembélé, Moussa Ballo, Mahamadou Coulibaly

- Modélisation de la croissance des formations ligneuses de jachère……**94**
Maguette Kaire

- Pour une gestion intentionnelle de l'arbre par les agropasteurs du nord Cameroun, du champ au paysage……. **103**
Régis Peltier, J.M. Harmand, M. Ntoupka , F. Njiti , N. Sibelet , G. Smektala

- Matières Organiques et Activités Biologiques dans les sols tropicaux des cycles Culture-Jachère……..**115**
Dominique Masse, Hien V., Bilgo A.., Diatta M., Manlay R.J., Chotte J-L.

III – Restauration des terres dégradées

- Restauration écologique des écosystèmes dégradés et des paysages fragmentés. Une approche hiérarchique……..**135**
Edouard Le Floc'h & James Aronson

- Diversité biologique et dynamique de la steppe à *Rhanterium suaveolens*, sous diverses conditions climatiques et niveaux de pression de pâturage, en Tunisie méridionale……**146**
Mohamed Tarhouni, Azaiez Ouled Belgacem et Neffati Mohamed*

- Performance de deux Poacea, candidates pour la réhabilitation des écosystèmes dégradés en zone aride de Tunisie…….**160**
Salma Derbel & Mohamed Chaieb.

TERRITOIRES ET ARIDITE AU NORD ET AU SUD DU SAHARA

Itinéraire d'un chercheur au service du développement

Hommage à Roger Pontanier

Jacques Claude *

*IRD, BP 64501 Montpellier cedex 5

Les trois thèmes de cette journée dédiée à la mémoire de Roger Pontanier marquent l'itinéraire scientifique d'un chercheur qui a continuellement élargi le champ de ses investigations, dans un souci constant de leur utilité pour le développement et dans la pratique quotidienne de la pluridisciplinarité. Ces thèmes ne sont pas une juxtaposition de projets de recherche ou des étapes de sa carrière ; il les a menés de front et pendant longtemps, élargissant son éventail de compétences et approfondissant les concepts utiles pour l'action.

1. Le fonctionnement des sols de régions arides

Comme tout élève ORSTOM à l'époque, Roger commence son premier séjour en Tunisie par des travaux de cartographie pédologique dans le Sud. Très rapidement, il réalise qu'il ne peut se limiter à une description statique de la diversité de ces sols et que la compréhension de leur évolution et de leur fonctionnement hydrique est nécessaire à l'évaluation de leurs potentialités. Il commence donc une longue collaboration avec les hydrologues et hydro-géo-chimistes qui le verra participer, ou diriger, tous les « chantiers » du Sud tunisien : la Citerne de la TRAPSA, le BV de l'Oued Zita, la Citerne Telman, le Jebel Dissa…

Il poursuivra ces expérimentations au Nord Cameroun, où je le retrouverai brièvement en 1989, avec ses parcelles de ruissellement sur sols hardé et savane défrichée et avec l'adaptation des techniques des citernes de ruissellement.

Il sera aussi un des premiers promoteurs de la simulation de pluies (avec R. Escadafal et J. Asseline), technique qu'il développera sur toute la dorsale tunisienne avec la Direction des Sols. Ces travaux permettront d'élaborer un référentiel du comportement des sols au ruissellement qui s'avérera très utile pour les études de lacs collinaires.

2. Les écosystèmes arides : fonctionnement, dégradation, réhabilitation

En 1970, Roger entame une longue collaboration, doublée d'une solide amitié, avec C. Floret et E. Le Floc'h, écologues du CNRS, qui pilotent le projet « Parcours Sud » portant sur la productivité et l'utilisation des ressources des steppes du Sud tunisien, avec le concours de nombreux organismes (CNRS, FAO, UNESCO, INRAT, Direction des Sols…). Plusieurs stations d'observations (légendaires) installées sur les principaux écosystèmes des marges sahariennes permettront de suivre pendant près de vingt ans la dynamique de ces écosystèmes (production végétale, cycle de vie des espèces, régimes hydriques et efficience de l'eau…) et de mener des expériences *in situ* sur les processus de dégradation et de régénération. Ceci permettra de définir des seuils d'irréversibilité de la dégradation et de proposer les premiers indicateurs de la désertification.

Les résultats des huit premières années de travaux communs seront brillamment synthétisés dans une thèse d'Etat sur « L'aridité en Tunisie pré-saharienne » soutenue en 1981 à l'Université de Montpellier.

La qualité de ces travaux font dès lors de Roger Pontanier ***l'expert de référence*** du Sud tunisien à qui l'on fait toujours appel pour implanter et porter de nouveaux projets ou nouvelles expérimentations (par ex. le projet ARZOTU, première interprétation d'images satellitaires de la région) ou pour contribuer aux conférences et débats internationaux sur le thème de la désertification (Conférence de Nairobi, 1977, contribution au MAB-UNESCO, création de l'OSS, animation du réseau Zones Arides, etc.) ou encore pour former et encadrer étudiants et thésards qui marchent sur ses pas (dès sa création en 1976, il est un collaborateur régulier de l'IRA-Médenine où sa marque est encore présente).

Il sera aussi un spécialiste des programmes européens de recherche en coopération (STD et INCO) et c'est grâce à deux projets successifs qu'il établira des liens durables entre les communautés scientifiques du Nord et du Sud du Sahara sur le thème de l'aridité.

3. La gestion des terroirs, le programme Jachères

Ses nombreux travaux scientifiques et l'expérience accumulée conduisent Roger Pontanier à proposer des pratiques de gestion et de réhabilitation des milieux arides dégradés sur des bases écologiques : maintien d'une biodiversité minimum, régulation autonome forte, recyclage organo-minéral, utilisation optimale de l'eau…

Il sait que ces pratiques ne doivent pas être que des recettes techniques de développeurs mais doivent s'intégrer dans les systèmes agro-pastoraux et donc être acceptables (et à terme bénéfiques) pour les sociétés qui vivent sur et de ces terroirs.

C'est sur ces bases qu'il collabore activement au programme DYPEN qui analyse les liens et interactions entre les dynamiques des populations et celles des environnements typiques de quatre régions tunisiennes.

C'est surtout au cours de sa dernière affectation au Sénégal qu'il déploiera pleinement ses compétences d'animateur, d'organisateur et de coordonnateur de programmes. Toujours en collaboration avec C. Floret, il obtiendra un important financement de la DG Développement de l'UE pour mener à bien le « Programme Régional Jachères ». Avec ce programme, il organisera les activités d'équipes de recherche-développement dans cinq pays d'Afrique de l'Ouest et il regroupera ses collègues de l'IRD dans une « US Jachères », validée par le nouveau Conseil Scientifique de l'IRD en 2000, et qu'il dirigera jusqu'à sa disparition le 18 décembre 2003.

Cet itinéraire exemplaire est celui d'un homme d'exception, travailleur acharné certes, mais aussi chaleureux, généreux, toujours disponible et attentif. La qualité des liens de travail et d'amitié qu'il avait tissés avec les membres de communautés scientifiques nationales et internationales fera perdurer longtemps l'impact de ses travaux et le style « Ponpon ».

PARTIE I

Etats de surface, érosion des Sols, aridité édaphique

Les lacs et barrages collinaires : infrastructures hydrauliques d'aménagement et de conservation des terres agricoles en zone semi aride méditerranéenne.

Hommage des équipes « Lacs collinaires » en Tunisie
à feu Roger Pontanier et à feu Habib Missaoui.

Jean Albergel*, Slah Nasri**, Jean Marie Lamachère***,

* IRD, UMR LISAH – 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex
** INRGREF, Unité de CES, BP n° 10, 2080 Ariana, Tunisie
*** IRD, UMR LISAH – BP 434, 1004 Tunis

Résumé :

Les barrages et lacs collinaires sont des aménagements de moyenne et petite hydraulique sur les cours d'eau secondaires dans les parties amont de grands bassins versants. Il s'agit de digues en terre compactée avec un déversoir latéral donnant lieu à des retenues d'eau de quelques dizaines de milliers de m^3 à quelques millions de m^3, inondant des surfaces de taille modérée (quelques hectares à quelques dizaines d'hectares). Leur construction vise des objectifs à la fois de conservation des eaux et des sols, de protection d'aménagements plus importants à l'aval et de développement local.

Au début de la décennie 90, à l'instar des pays méditerranéens d'Europe quelques années plutôt, la Tunisie a lancé un programme ambitieux de réalisation de ces aménagements dans toutes les régions semi-arides du pays. Ce programme fut à l'origine d'un important effort de recherche pluridisciplinaire sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants concernés et sur l'impact des petits barrages sur l'environnement et sur les sociétés riveraines. Il a concerné la Tunisie et le Maroc en Afrique du Nord, le Liban et la Syrie au Proche Orient (HYDROMED, 2001).

Mots Clés : Méditerranée, zone semi-aride, petits barrages, conservation des eaux et des sols.

Introduction

Cet article se veut, être un hommage à Feu Roger Pontanier, directeur de Recherche de l'IRD et à Feu Habib Missaoui, Directeur de la CES. Cet hommage leur est rendu par les équipes de chercheurs, ingénieurs, étudiants, techniciens et observateurs qui ont travaillé et travaillent en Tunisie et dans les autres pays du Maghreb et du Proche Orient depuis le début des années 90 sur les lacs et barrages collinaires.

Si les lacs et barrages collinaires sont devenus les objets et sujets de recherche aussi connus (326 références Web trouvées par Google pour Lac & Collinaire & Tunisie en 0,33 secondes), c'est que quelques hommes se sont retrouvés ensemble en Tunisie vers la fin des années 80 pour penser qu'il était possible aux Sciences de l'Environnement de tirer profit de l'important effort d'aménagement entrepris par l'Etat Tunisien dans les zones semi-arides pour créer des observatoires de recherche sur le milieu et les sociétés. Parmi les pionniers du sujet, il y avait bien sûr Feu Roger Pontanier et Feu Habib Missaoui mais il faut également citer, Si Amor Horchani, Secrétaire d'Etat pour l'aménagement hydraulique qui s'est personnellement impliqué dans ces projets de recherche, Bernard Dalmayrac, représentant de l'IRD en Tunisie, Si Habib Farhat, Directeur Général de la DG ACTA qui a succédé à Feu Habib Missaoui, Henri Camus, directeur de recherche à l'IRD, Slahédine Bouzaïane, ingénieur à la DGRE, Ahmed Rajah, CRDA de Kasserine où les premiers observatoires ont été installés, Jean Claude Talineau, Directeur de Recherche à l'IRD, Jallel El Falleh, Ahmed Smaoui de la CES, Noël Guiguen et Mohamed Ben Younes hydrologues à l'IRD…

Depuis plus de vingt années se succèdent, sur cet observatoire environnemental que constituent les lacs et barrages collinaires du réseau pilote tunisien de surveillance hydrologique, des chercheurs, ingénieurs, étudiants qui font référence à Feu Roger Pontanier dans leurs travaux scientifiques.

Lacs et barrages collinaires : définition

Les petits barrages sont connus depuis la haute antiquité, tel le barrage construit sur l'oued Nahr El Asi près de Homs sous le règne de Sethi 1er (1 319 -1 304 av JC). Beaucoup ont été construits au début de l'ère chrétienne (barrage de Badieh sur la route de Palmyre en Syrie). De nombreuses ruines attestent de leur présence dans les steppes et montagnes sèches des pays méditerranéens et du Moyen Orient. Certains existent toujours mais sont complètement remplis de sédiments. Les premiers petits barrages, construits selon des techniques modernes, ont été réalisés en Italie dans les monts Apennins après la seconde guerre mondiale par les services du Génie Rural auxquels il avait été confié le recyclage des nombreux engins de terrassement abandonnés par les armées américaines et canadiennes après les débarquements de la campagne d'Italie en 1944.

Ces petits barrages (photo 1) sont des aménagements très spécifiques destinés non seulement à la mobilisation des ressources en eau de surface mais aussi à la lutte contre les fortes crues. Ces barrages ont des hauteurs de digues faibles (5 à 15 m, limite inférieure des grands ouvrages pour la Commission Internationale des Grands Barrages). Ils sont constitués en remblai, sur de petits bassins versants ruraux, dans des zones de relief modéré (collines). Ils sont équipés de déversoirs latéraux de conception rustique, capables d'évacuer quelques dizaines de mètres cubes par seconde, quelquefois un peu plus de 100 mètres cubes par seconde. Ils possèdent ou non une vanne de fond et leur coût unitaire est de l'ordre du demi-million d'Euros et quelquefois nettement moins. D'extension modérée (quelques hectares) les lacs de ces barrages ont une capacité de rétention qui varie de quelques dizaines de milliers à quelques million de mètres cubes (Albergel et Rejeb, 1997). Parmi les objectifs assignés à ces structures on note :

- la capture des sédiments pour protéger de plus grands barrages en aval,
- la régulation des crues torrentielles de montagne,
- la recharge des nappes alluviales des oueds,
- la mobilisation locale d'un volume d'eau qui peut servir suivant la dimension du barrage et sa pérennité, (i) à la mise en place d'un reboisement ou d'une oliveraie, (ii) à l'abreuvement des animaux, (iii) de réserve pour de la micro-irrigation, ou encore pour (iv) une exploitation piscicole…

On note donc des objectifs essentiellement de deux ordres et parfois contradictoires :

- des objectifs de gestion et conservation des eaux et des sols avec la protection des infrastructures en aval et particulièrement, en Afrique du Nord, celle des grands barrages d'une sédimentation trop rapide

Figure 1 : Lac collinaire de Kamech au nord du Cap Bon en Tunisie (© Albergel).
Hauteur du barrage 10m ; volume du réservoir 142 560m^3, surface maximale du lac 44 500m^2

- et des objectifs de développement économique et social en offrant une ressource renouvelable, rare mais vitale : l'eau, de manière disséminée dans le paysage, en limitant les bouleversements d'ordre social (expropriation, déplacement d'infrastructures ou de logements).

Développement des barrages et lacs collinaires

La culture de l'aménagement du territoire étant différente dans chaque pays, le développement des petits barrages a suivi des chemins différents. Le premier trait commun est une volonté politique de développer ce type d'aménagement dans les années à venir dans l'ensemble des pays d'Afrique du Nord et du Moyen Orient (Albergel et *al*., 2004).

En Tunisie, dans le cadre du programme « Aménagement des terres en pente, mobilisation des ressources en eau, entretien et sauvegarde des aménagements », inscrit au 8ème plan de l'Etat, était prévue, au cours de la décennie 1990-2000, la construction de plus d'un millier de petits barrages dans la partie septentrionale du pays. Ces ouvrages sont devenus la pierre maîtresse de la stratégie nationale en matière de conservation des eaux et des sols (sources : Ministère de l'agriculture, Direction de la Conservation des Eaux et des Sols). Les objectifs de cette stratégie étaient les suivants (Talineau et *al*., 1994) :

- réduire les pertes en terres agricoles (estimées couvrir 10 000 ha par an) par l'aménagement des versants;
- réduire l'envasement des grands barrages (25 Mm^3 par an en 1990) ;
- augmenter la recharge des nappes ;
- mobiliser la plus grande partie possible des 500 Mm^3 d'eau perdue alors dans la mer ou dans les Sebkhas ;
- créer des points de développement des cultures irriguées.

La figure 2 montre l'état d'avancement du programme « barrages et lacs collinaires en Tunisie » au cours de l'année 2000. Dans ce pays, on distingue les aménagements dont les réserves d'eau sont

inférieures à 300 000 m^3 (lacs collinaires) de ceux dont la réserve est supérieure (barrages collinaires). Ainsi la Tunisie a réalisé, en une décennie, environ 700 unités de la première catégorie et une quarantaine de la seconde.

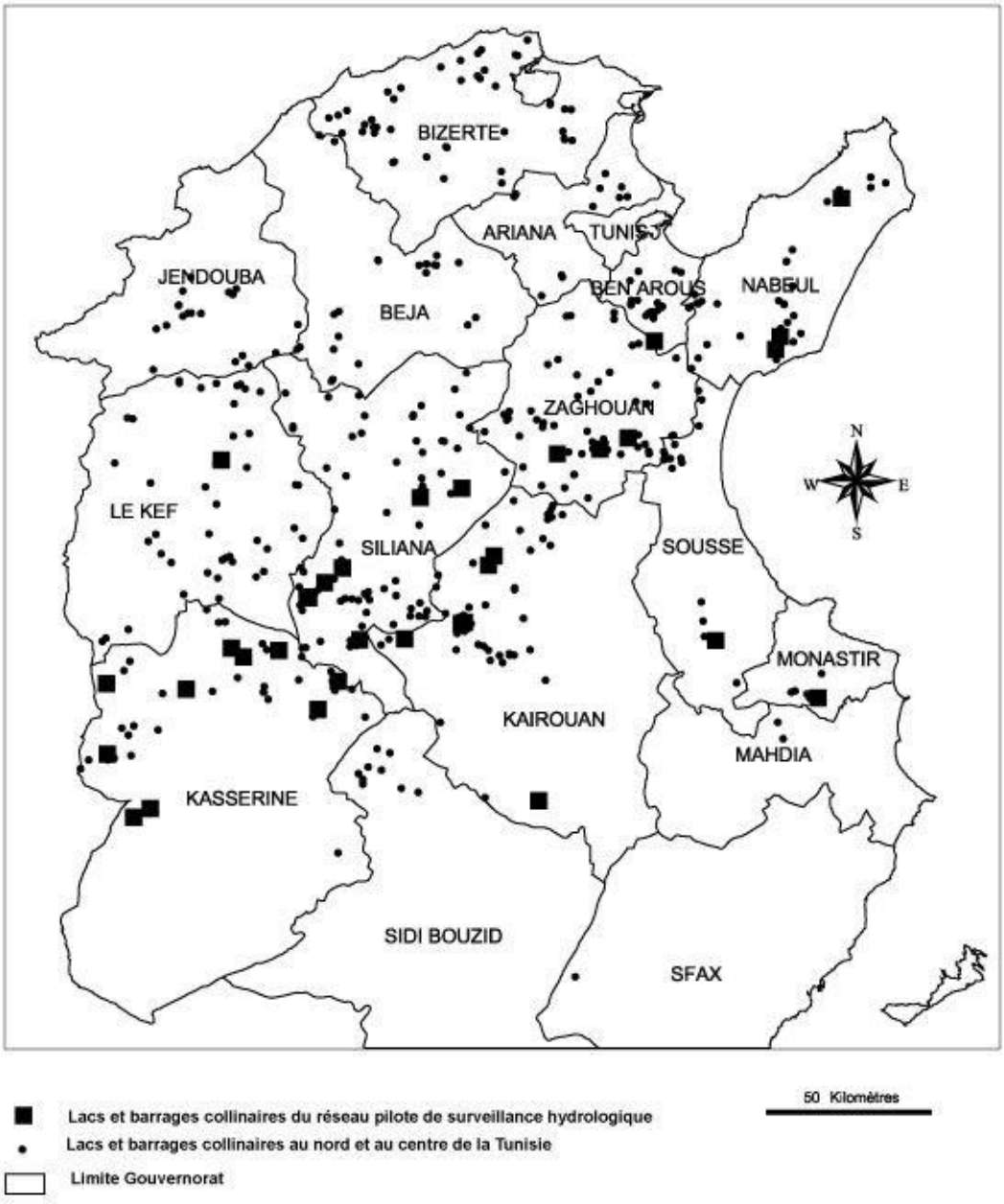


Figure 2 : Lacs et barrages collinaires tunisiens construits avant l'année 2000

Au Maroc, la période de sécheresse du début des années quatre-vingts, considérée comme la plus longue jamais observée, a été le point de départ d'une politique de construction de petits barrages et de lacs collinaires réalisés avec une pratique à haute intensité d'utilisation de la main d'œuvre (Albergel et Claude, 2001). Ces ouvrages sont destinés principalement à l'irrigation, à l'abreuvement du bétail, à la protection contre les crues ou à l'alimentation en eau potable des zones rurales dépourvues de ressources en eaux souterraines facilement exploitables. Quelques essais de pisciculture dans des bassins, en aval des barrages, ont été réalisés. Au cours des années 70 et 80, le Maroc s'est doté d'une importante infrastructure hydraulique or la quasi totalité des grands barrages sont concernés par des apports importants en sédiments et de nombreux petits barrages ont donc été construits pour ralentir leur envasement. Par exemple, le plus grand barrage du Royaume, le barrage d'Al Wahda sur l'oued Ouergha, dans la province de Sidi Kacem (88 m de hauteur et 3,4 10^9 m^3 de capacité) est protégé par de nombreux petits barrages construits dans l'amont de son bassin pour retenir les produits de l'érosion provenant des fortes pentes marneuses du Rif. L'érosion du bassin

versant de l'Ouergha, estimée à 98 T/ha/an sur une superficie de 6150 km^2, ferait perdre annuellement au barrage un volume de 60 Mm^3 (Maroc Agri, 2001). Au lancement du projet HYDROMED, une cinquantaine de petits barrages d'une hauteur supérieure à 10 m étaient en exploitation et un grand nombre de lacs collinaires, dont les barrages ont une hauteur comprise entre 5 et 10 m, avaient été créés (El Mohamadi, 1993).

En Syrie, les petits barrages sont connus depuis la haute antiquité, tel le barrage construit sur l'oued Nahr El Asi près de Homs sous le règne de Sethi 1^{er} (1 319 -1 304 av JC). Beaucoup ont été construits au début de l'ère chrétienne (barrage de Badieh sur la route de Palmyre). De nombreuses ruines attestent de leur présence dans les steppes sèches. Certains existent toujours mais sont complètement remplis de sédiments. Les premiers petits barrages construits selon des techniques modernes ont été réalisés au cours des années 60 dans la province de Swaïda pour l'alimentation en eau potable de villages situés sur un plateau basaltique sans aucune ressource en eau souterraine. Ces retenues sont le plus souvent empoissonnées et la pêche y est pratiquée. Proches de grandes villes, les sites de ces aménagements sont des lieux de résidences secondaires et les plans d'eau sont exploités pour les loisirs. C'est le cas du petit barrage d'Al Corane, non loin de Damas, dans une petite vallée d'altitude. Au Proche Orient, la notion de lac collinaire n'est pas aussi bien définie qu'au Maghreb, mais de nombreux aménagements de très petite taille ont été construits pour créer des réserves d'eau destinées au bétail des tribus nomades bédouines. Une cinquantaine de petits barrages d'une hauteur supérieure à dix mètres, construits après 1960, étaient en exploitation en Syrie au début du projet HYDROMED ainsi qu'un grand nombre de micro-aménagements.

Au Liban, dans le cadre du programme de reconstruction du Pays, le Plan Vert a lancé une étude pour la construction d'une centaine de petits barrages, essentiellement dans les zones de piémont des chaînes de montagnes jouxtant la plaine de la Bekaa (www.greenplan.gov.lb). Dans cette zone semi-aride, dominée par les chaînes montagneuses du Mont Liban et de l'Anti Liban, il s'agit de barrages de régulation de crues qui peuvent être très violentes. Il existe aussi, dans les montagnes du Liban, une multitude de petits réservoirs utilisés pour capter les eaux souterraines et les eaux de fonte des neiges. Ces captages alimentent des chapelets de réservoirs disposés en cascade sur les versants. Leur eau est utilisée pour l'irrigation de vergers.

Bilan hydro sédimentaire des barrages et lacs collinaires

Un réservoir alimenté par un seul tributaire, ou au moins un tributaire principal, peut donner autant de renseignements sur les bilans en eau et en sédiments qu'une station hydrologique de bassin versant expérimental et cela à moindre coût. Quelques conditions doivent être cependant remplies (Nouvelot, 1994) :

- Les hauteurs d'eau dans le lac, les précipitations et l'évaporation journalière doivent être contrôlées,
- Le déversoir doit être équipé de manière à connaître les débits évacués,
- La bathymétrie de la retenue doit être réalisée périodiquement afin de définir les relations entre les hauteurs du plan d'eau et les surfaces du plan d'eau d'une part {S=f(h)}, les hauteurs du plan d'eau et les volumes d'eau stockés dans la retenue d'autre part {V=g(h)} ; elle doit permettre également de suivre leur évolution dans le temps.

Dans les quatre pays du programme de recherche sur les lacs collinaires (HYDROMED 2001), plusieurs lacs collinaires ont été équipés pour un tel suivi. La figure 3 montre ce suivi pour le lac collinaire Kamech présenté en photo 1 :

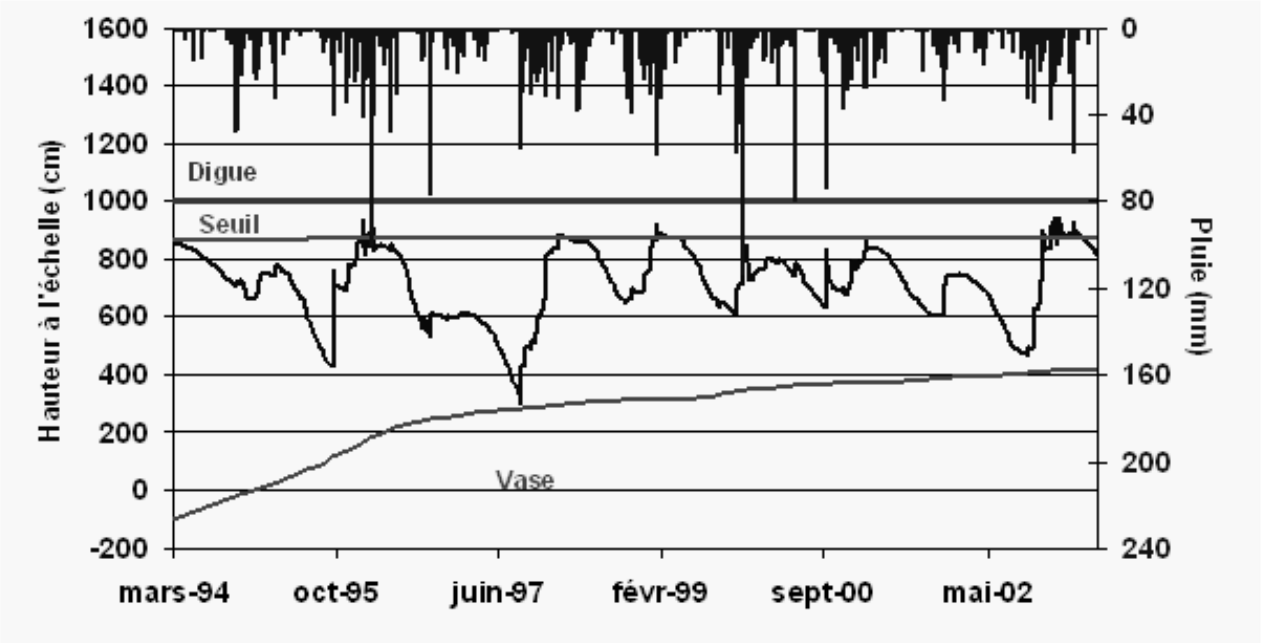


Figure 3 : Données de base pour l'étude des bilans hydro-sédimentaires du lac collinaire de Kamech (1994 – 2004).

A partir de ces données, un modèle basé sur l'équation de la conservation des volumes d'eau a été mis au point pour reconstituer les crues, entrant dans les retenues (Albergel et Rejeb, 1997). La figure 4 montre cette reconstitution sur une suite d'évènements pluvieux survenus sur le bassin du barrage collinaire d'El Gouazine en septembre 1995. Une base de données sur tous les événements averses–crues a pu être constituée pour les bassins versants situés en amont des barrages concernés par le projet HYDROMED (Maroc, Syrie, Tunisie). Ces données ont été à l'origine de plusieurs travaux sur la modélisation hydrologique et la caractérisation de la défaillance des barrages (Ragab *et al*., 2001)

L'évolution des capacités de stockage des petits barrages a été étudiée à partir des mesures de bathymétrie des réservoirs et à travers un modèle de reconstitution des transports solides, évènement par évènement. Ces études ont permis de mieux comprendre les phénomènes d'envasement en relation avec l'érosion des sols sur les bassins versants.

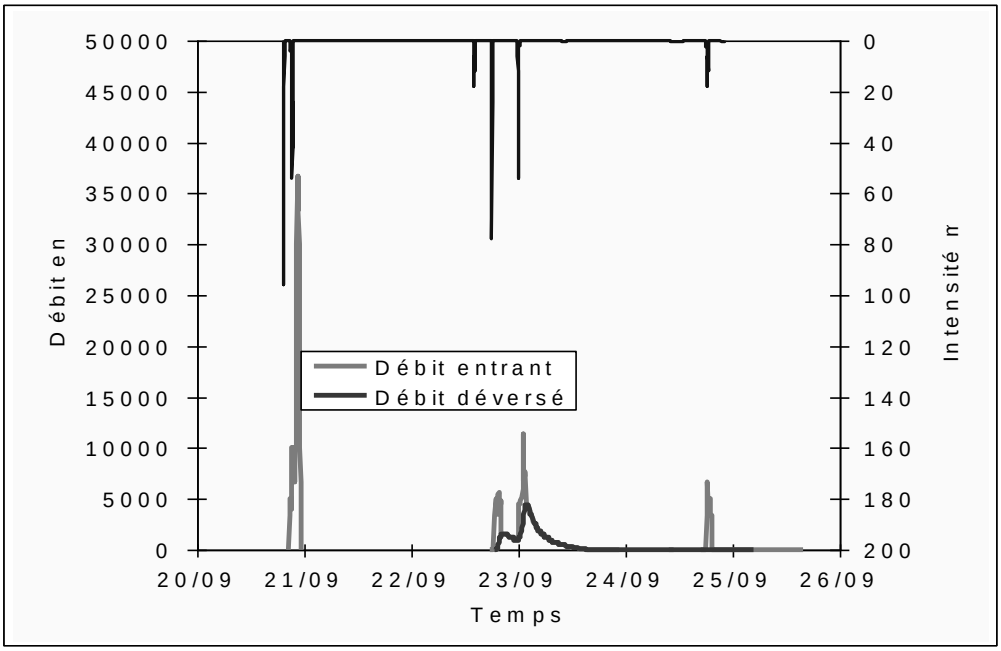


Figure 4 : Crues entrant et sortant de la retenue d'El Gouazine en septembre 1995.

Le modèle permettant de reconstituer les apports solides aux barrages, crue par crue a été validé sur huit sites répartis dans les quatre pays du programme HYDROMED (Albergel et *al*., 2003) et appliqué à vingt quatre petits barrages de la dorsale tunisienne (Albergel et *al*., 2005). La figure 5 montre cette reconstitution pour le barrage de Kamech en Tunisie. On voit, sur cette figure, que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de 9 années, trois crues ont apporté 50 % du transport solide (27 février 1996, 18 janvier 1999 et 29 novembre 1999). La dernière a contribué à elle seule à 20% du transport observé en 9 ans.

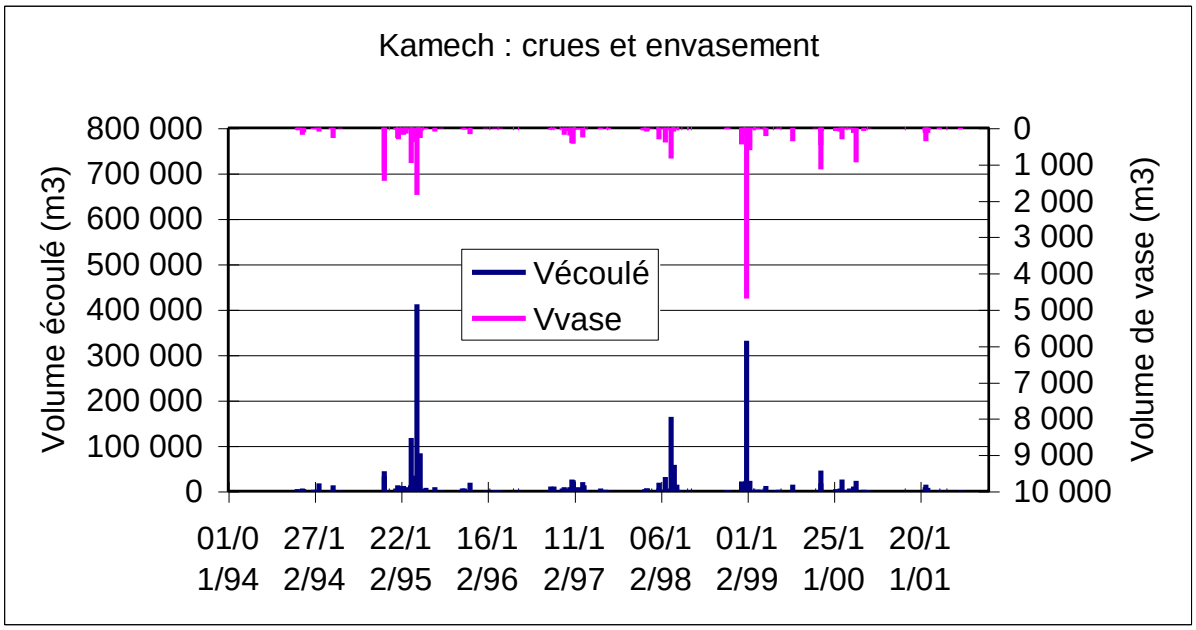


Figure 5 : Ecoulements et transports solides reconstitués crue par crue au barrage de Kamech sur une période de 9 années.

L'envasement des petits barrages, rapporté à la surface du bassin versant, varie de 1,1 m^3/ha/an (soit 1,8 t/ha/an), sur un bassin de piémont bien aménagé en dispositifs anti-érosifs et assez boisé (El

Gouazine en Tunisie Centrale), à 31 m^3/ha/an (soit 50 t/ha/an) sur un petit bassin très marneux des collines pré-rifaines au Maroc. Cet envasement est de 2,4 m^3/ha/an, (soit 3,8 t/ha/an) pour le barrage de Syndiané, sur le plateau basaltique de Homs en Syrie. Les zones cultivées sur les versants de ce bassin sont aménagées en talus et murettes de pierre délimitant les champs. Rappelons que l'USDA considère, comme érosion « normale » en sol cultivé, une érosion comprise entre 1 et 11 t/ha/an (Roose, 1994).

Le même suivi sur 24 petits barrages de la Dorsale tunisienne montre une perte totale de 585 200 m^3 à la fin de l'année 1999 sur une capacité initiale de stockage de 2 634 000 m^3, soit une perte de 22% pour une durée d'existence moyenne de 7,7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est donc de 4,6% par an, du même ordre de grandeur que celle des petits barrages italiens (Gazzalo et Bassi, 1969). Les transports solides captés par les petits barrages seraient d'environ 16 t/ha/an. En extrapolant ce résultat aux mille lacs collinaires prévus par la stratégie nationale tunisienne et en leur donnant les caractéristiques moyennes des 24 lacs étudiés, on obtiendrait un stockage en sédiments de 3,2 millions de m^3 par an, soit 13% de l'envasement actuel des grands barrages, ce qui n'est pas négligeable. Bien sûr, ce résultat ne tient pas compte des barrages qui seraient totalement envasés ou de ceux qui seraient emportés par de grosses crues et libèreraient les sédiments stockés.

En conclusion, on peut dire qu'une retenue artificielle de petite dimension est un lieu privilégié pour l'observation du bilan des matières solides transportées par le réseau hydrographique à l'exutoire d'un bassin versant. Les produits de l'érosion collectés par l'écoulement superficiel sont piégés dans le réservoir, à l'exception de ceux déversés lors de rares débordements. Il est facile d'estimer ces transports solides en faisant des mesures régulières de bathymétrie, des prélèvements lors des déversements et un suivi hydrologique de la retenue. Pour une majorité des petits barrages méditerranéens, la quantité de sédiments déversés ou évacués lors de l'ouverture de la vanne de fond est faible par rapport à celle stockée dans le barrage.

Enjeux de développement autour des barrages collinaires

L'eau stockée temporairement en amont des petits barrages peut avoir de nombreux usages : le tableau 1 montre le résultat d'une enquête réalisée en 1997 sur l'usage des eaux des petits barrages dans les pays du programme HYDROMED.

L'analyse des systèmes de production agricole autour de 26 lacs collinaires en Tunisie, réalisée de 1993 à 1996, a permis de comprendre la dynamique de développement agricole. Elle montre que (Selmi, 1996) :

- 50% des exploitants n'ont pas introduit l'irrigation et conservent leur système de production traditionnel ;
- 28% commencent à intégrer l'irrigation dans leur système de production agricole ;
- 22% des exploitants pratiquent couramment la petite irrigation.

Tableau 1 : Usage de l'eau dans les pays concernés par HYDROMED, enquête de 1997 *in* HYDROMED 2001.

	Liban	Maroc	Syrie	Tunisie
Barrages réalisés	2 petites unités, mais de nombreuses micro-réalisations	50 unités moyennes, de nombreuses petites unités	43 unités moyennes, 100 petites unités	40 unités moyennes, 450 petites unités
Projets futurs	Une trentaine prévue	500 prévues, priorité aux unités de 0,5 à 5 Mm^3	30 prévues	200 moyennes et 1000 petites unités
Objectifs AEP Protection aval Recharge nappes Agriculture Pisciculture Environnement Tourisme, loisir	 Oui Oui (crues) Oui Oui Oui Oui Oui	 Oui Oui (crues, sédiments) Oui Oui Oui Oui Non	 Oui Oui (crues) Oui Oui Oui Oui Oui	 Non Oui (crues, sédiments) Oui Oui Non Oui Non
Types d'ouvrages	Barrages en terre ou en béton armé	Barrages en terre, en béton compacté. Recherche sur les différents types d'étanchéité	Barrages en terre	Barrages en terre Rares en béton
Ministères (Organisme resp.)	Irrigation	Intérieur (Cercle)	Irrigation (Direction de bassins)	Agriculture (Centres régionaux du développement agricole)
Organisation des utilisateurs		AEP : société de distribution des eaux. Privée ou collective	Centralisée, direction de bassins	Encouragement à la création d'associations & comités de gestion
Remembrement et redistribution des terres		Suivant les barrages	Oui	Non pour les petites unités. Oui pour les moyennes.
Tarification de l'eau, couverture des frais d'exploitation		Oui	Oui	Non
Etudes et suivis	Faibles	Importants	Moyens	Très importants

Six ans après le début de leur construction, le taux d'exploitation des lacs collinaires est encore faible mais en augmentation constante et très variable d'un site à l'autre. Sur le site de Kamech, dans le Cap-Bon, au nord-est de la Tunisie, la retenue est équipée de trois à quatre motopompes. Des périmètres de cultures industrielles y cohabitent avec des jardins maraîchers traditionnels et l'irrigation au goutte à goutte s'y généralise. D'autres sites, plus isolés des marchés, ou dont les retenues s'assèchent souvent et longtemps, restent peu ou pas exploités.

L'usage de l'eau permet d'introduire de nouvelles spéculations très rentables (notamment le maraîchage et l'arboriculture) dont la marge brute peut atteindre 10 fois celle de la céréaliculture traditionnelle extensive. Cette exploitation de l'eau des lacs collinaires est à l'origine de la création d'un supplément de revenu annuel important qui se traduit par l'amélioration de l'habitat et une spéculation foncière sur les terres jouxtant les lacs.

Cependant, l'envasement rapide de certaines retenues a déçu les agriculteurs. Ainsi, huit hectares de pommiers plantés dans les trois premières années d'existence du lac de Sadine 1 (haut bassin du Zéroud en Tunisie) souffrent aujourd'hui du manque d'eau et sont actuellement très peu productifs. La retenue a été en effet comblée de sédiments à 90% de sa capacité de stockage.

A partir de l'enquête réalisée sur un grand nombre de retenues créées par de petits barrages, on voit bien comment cet aménagement de petite ou moyenne hydraulique complète une politique de mobilisation des eaux de surface jusqu'alors centrée sur la construction de grands barrages. La part de la ressource ainsi mobilisée reste modeste : en Tunisie, elle représentait 149,5 millions de m^3 en 1999 dont 72 millions pour les plus petites unités de capacité inférieure à 300 000 m^3 (Habaïeb et Albergel, 2001) contre 1 612 millions pour les grands barrages. Mais cette part représente 30% des eaux de surface non mobilisables par les grands barrages (500 millions de mètres cubes par an). Disséminée dans le paysage, cette ressource touche souvent des régions où il n'y a ni grand barrage, ni ressource en eau souterraine importante.

Les enjeux de développement autour des lacs collinaires sont très liés à la pérennité de la ressource en eau. Les types de cultures et d'aménagements agricoles doivent être adaptés à la durée de vie du barrage et aux fréquences de son assèchement. La recharge de la nappe phréatique dans la vallée améliore les potentialités de développement rural en aval du barrage.

Impacts environnementaux des lacs et barrages collinaires

Les petits barrages sont souvent présentés comme ayant un très faible impact sur les écosystèmes environnants en raison de leur petite taille.

Les premiers impacts environnementaux auxquels on peut penser sont ceux liés à la qualité des eaux stockées.

Au cours du programme HYDROMED, une étude sur la qualité de l'eau de 24 retenues a été menée en Tunisie (Rahaingomanana, 1998). Elle a permis d'apprécier la variabilité de la salinité des eaux stockées en relation avec la nature géologique des bassins versants et sous différentes chutes de pluies. Les salinités mesurées satisfont généralement aux divers usages. Trois groupes géochimiques ont été identifiés. Les eaux sulfatées-calciques caractérisent les retenues situées dans les bassins versants du Zéroud et du Merguellil (Tunisie Centrale) où affleurent d'importantes formations gypseuses. Ces eaux sont les plus chargées en sels et l'augmentation de la salinité par évaporation peut limiter les usages en irrigation. Les eaux à dominante bicarbonatée-calcique ont été collectées dans les sous-bassins versants de la Medjerdah (Centre et Nord du pays) où les formations géologiques dominantes sont des alternances de calcaires et de marnes. Bien plus diluées que les eaux sulfatées-calciques, elles présentent moins de contraintes. Deux retenues situées au Cap Bon (Nord-Est de la Tunisie) se singularisent par des eaux peu chargées mais à dominante chlorurée-sodique.

Le rôle des sédiments dans la régulation du phosphore a été étudié dans trois retenues. Les teneurs en phosphore total des sédiments analysés vont de 0,4 à 1,9 mg $P.g^{-1}$ sec et la fraction $P\sim CaCO_3$ prédomine (250 à 800 µg $P.g^{-1}$ sec). La fraction P~FeOOH est globalement plus importante dans les sédiments les plus riches en FeOOH. La capacité d'adsorption des sédiments n'est toutefois pas directement liée à la quantité de FeOOH, elle pourrait dépendre du degré de cristallisation de ces composés.

Une analyse des risques de pollution par les effluents agricoles a été menée dans le bassin versant du petit barrage de Kamech (Cap Bon, Tunisie) (Vateau, 2003). Aucune molécule de pesticides n'a été retrouvée en quantité significative dans les eaux analysées en début d'été. Les contaminations par les engrais azotés restent dans des proportions acceptables. Ces résultats peuvent être extrapolés à l'ensemble des retenues en milieu rural, excepté celles où des élevages intensifs de volaille ont été installés près des berges ou en amont des retenues. Du point de vue de la qualité des eaux, les impacts environnementaux des petits barrages semblent donc plutôt positifs lorsque les retenues se situent suffisamment loin en aval d'effluents importants : gros villages, élevages avicoles industriels ou élevages bovins en stabulation.

Les enquêtes de santé publique ne montrent pas, à cette date, de recrudescence ou d'apparition de maladies nouvelles liées à la mise en fonction de ces barrages. La Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles du ministère de l'agriculture tunisien a cependant pour projet de mener une étude sur le risque de transmission des maladies liées aux eaux stagnantes avec la collaboration de l'Institut Pasteur de Tunis. Les maladies transmises par les moustiques sont plus particulièrement visées par ce projet.

L'étude de la structure verticale des lacs montre l'existence de stratifications thermiques estivales dans les retenues les plus profondes, et, dans ce cas, d'une transparence réduite. Les teneurs en

chlorophylle *a* sont souvent inférieures à 10 µg.l^{-1} mais les macrophytes se développent dans les eaux limpides et ces réservoirs favorisent le développement d'une végétation et d'une faune aquatiques (batraciens, serpents d'eau, tortues, mollusques). Les principales espèces végétales rencontrées sont *Juncus spp* et *Potamogetum pectinatus* sur la zone de marnage, *Typha angustifolia et Phragmite communis* dans les zones inondées.

Les lacs et leur rives, souvent reboisées, sont des lieux de nidification et de conservation des oiseaux. Le Fulicule nyroca, espèce rare en Afrique du Nord, inclus dans la liste des espèces protégées en Tunisie, nidifie sur le site du lac collinaire Cherichira (Tunisie Centrale) où Azafzaf et Hamrouni (2002) ont recensé 4 couples.

Vu la forte variabilité inter annuelle des stocks d'eau disponibles dans ces réserves, l'idée a été de les exploiter comme des ouvrages de recharge de nappes phréatiques. A la mise en eau de certains lacs, on a remarqué une recharge rapide de la nappe alluviale en aval de l'ouvrage. Les variations quasi concomitantes des niveaux d'eau dans le barrage d'El Gouazine (Tunisie Centrale) et sur deux puits distants de 300 et 1000 mètres de la digue représentés sur la figure 4 montre bien la dépendance de la recharge de la nappe au remplissage du barrage (Nasri, 2002). Montoroi et *al*. (2002) ont apporté les preuves géochimiques d'une recharge efficace de la nappe alluviale par les infiltrations fortes lorsque, après des crues suffisamment importantes, les eaux du lac atteignent les terrasses alluviales perméables. En zone semi-aride, un barrage peut ainsi forcer le système naturel de recharge des nappes alluviales. Cette recharge se fait majoritairement par les inondations des lits majeurs des oueds lorsque ces lits sont suffisamment perméables.

Les risques environnementaux les plus souvent cités pour les barrages sont les conséquences de leur rupture. Malgré leur faible charge, les petits barrages ont un taux de rupture moyen qui est du même ordre de grandeur que pour les grands barrages. Comme il y a au moins cinquante fois plus de petits barrages que de grands barrages, quelques dizaines de petits barrages sont détruits chaque année (Lemperière, 1993). Lorsqu'il s'agit d'un barrage de 50 000 m^3, sa destruction passe inaperçue. Elle n'engendre que peu de catastrophes à l'aval, mais les sédiments stockés dans la retenue sont libérés dans le réseau hydrographique et le cours d'eau reprend son régime hydrologique naturel. Lorsqu'il s'agit d'un ouvrage de 10 à 15 m de haut avec un stockage de quelques centaines de milliers de mètres cubes, sa rupture peut créer des crues dangereuses de plusieurs centaines de mètres cubes par seconde dans un fond d'oued qui n'a pratiquement plus vu passer d'eau depuis la construction du barrage et dans lequel des populations ont pu s'installer.

En conclusion de ce chapitre, on peut dire que les impacts environnementaux de ces ouvrages sont liés à la qualité de l'eau et à son maintien. Ils sont plutôt positifs tant que l'ouvrage conserve sa fonction de stockage des eaux et des sédiments, le risque majeur étant la rupture de la digue.

Conclusion

Cette rétrospective des résultats obtenus par les équipes de recherche travaillant sur les lacs et barrages collinaires en zone méditerranéenne semi-aride a été réalisée en mémoire de Roger Pontanier et Habib Missaoui à partir de résultats déjà publiés et d'autres résultats originaux. Elle montre que les petits barrages sont des aménagements qui complètent une politique de mobilisation de la ressource en eau. Ils jouent un rôle important dans l'aménagement rural des zones semi-arides où ils constituent des points focaux pour un développement agricole local basé sur l'irrigation ou l'élevage.

Les lacs de retenue sont de bons pièges à sédiments. Ils protègent les infrastructures aval. En nombre suffisant, ils peuvent prolonger la durée de vie d'un grand barrage.

L'objectif de recharge d'une nappe alluviale est réaliste dans de nombreux cas, mais le site du barrage doit être choisi en conséquence, sur des terrains suffisamment perméables. Une gestion des lâchers d'eaux stockées dans la retenue et la création d'infrastructures annexes en aval peuvent faciliter l'infiltration des eaux dans le lit de l'oued en aval du barrage.

Le colmatage rapide des réservoirs va cependant à l'encontre d'un développement agricole durable. Dans les pays méditerranéens, les petits lacs collinaires sont perçus comme une ressource en eau à utiliser et l'aménagement anti-érosif des versants permet d'accroître leur durée de vie.

Le choix des implantations doit être en rapport avec des objectifs précis soit d'ordre conservatoire d'infrastructures aval, soit orientés vers le développement rural. Dans le premier cas, l'objectif de conservation doit être clairement défini. Ainsi, pour protéger un grand barrage il faut un certain nombre de retenues en amont de l'ouvrage. Celles-ci ont une durée de vie limitée, mais, lorsqu'elles seront complètement envasées, elles serviront de petits deltas d'épandage des eaux et d'amortissement des ondes de crue. Durant la vie de l'ouvrage, on peut réaliser des reboisements ou des plantations d'oliviers, qui n'ont besoin d'être irrigués que les trois premières années, et le coût de l'ouvrage peut être alors comparé à celui du transport de l'eau en citerne.

Dans le cas d'un objectif de développement rural, la pérennité de la ressource en eau devient prioritaire. Des aménagements de versant limitant les apports solides et l'érosion des versants, mais préservant les apports liquides, sont alors à prévoir dès la construction du petit barrage.

Du point de vue environnemental, tant que la digue ne s'est pas rompue, les impacts sont plutôt positifs si l'on préserve la qualité de l'eau en faisant attention aux effluents possibles générés par une agglomération ou un élevage industriel. Généralement implantés dans des milieux ruraux à faible concentration humaine, les petits barrages sont de petites zones humides qui contribuent à la diversité biologique et plus particulièrement à la protection des oiseaux et au développement d'espèces aquaphiles. Le risque environnemental majeur est celui de la rupture de digue.

Bibliographie

Albergel, J. ; Claude, J.; 2001 : Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen. *In Séminaire Int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" ; PHI-V / Documents Techniques en Hydrologie.* UNESCO Paris France, pp 19-32.

Albergel J., Nasri S., Boufaroua M., Droubi A., Merzouk A. 2004. Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient. *Sciences Planétaires /Sécheresse, John Libbey Eurotext ed. , Volume 15, Numéro 1, Janv. Fev. Mars 2004* pp.78-86

Albergel J., Pepin Y., Nasri S., Boufaroua M. 2003. Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. *In Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* IASH Publ. n° 278, 2003 pp. 373-379.

Albergel J., Rejeb N., 1997 : Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. Albergel*. Discussion pp. 101-104.

Albergel J., Collinet J., Zante P., Nasri S., Boufaroua M., Droubi A., Merzouk A. 2005 The sediment budgets of hill reservoirs in small catchments in North Africa and the Middle East. *Sediment Budgets 1 (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 291, 2005, pp. 323-331*

Azafzaf H., Hamrouni H., 2002. Observations ornithologiques effectuées dans les zones importantes pour la conservation des oiseaux (ZICO) et dans la région de Douz du 13 au 15 juillet 2001. *AAO/GTO. Unpublished Report.*

El Mohamadi N., 1993. Gestion et impact des petits barrages sur l'environnement – Cas du Maroc. *In journées nationales d'études : Petits barrages. AFEID CFGB, Bordeaux, France. Février, 1993.* pp. 391-403

Gazzalo T., Bassi G., 1969. Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. *Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique, n° 53.*

Habaïeb H. et Albergel J. 2001 : Vers une gestion optimale des ressources en eau : exemple de la Tunisie. *In Séminaire Int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" ; PHI-V / Documents Techniques en Hydrologie.* UNESCO, Paris, France, pp187-193.

HYDROMED, 2001. Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. Ed. J. Albergel & S. Nasri. Contrat européen INCO DC ERBIC 18CT 960091 – STD4. IRD / INRGREF Tunis, 120p + 6 annexes.

Lemperiere F., 1993. Introduction de Monsieur François Lemperière, Président du Comité Français des Grands Barrages. . *In journées nationales d'études : Petits barrages. AFEID CFGB, Bordeaux, France. Février, 1993.* pp. 465-466

Mahmood K., 1987. Reservoir sedimentation: Impact, extent, mitigation. *World Bank Technical Paper* Number 71. Washington DC: World Bank.

MAROC AGRI, 2001. Le Gharb, hier, aujourd'hui et demain. *Terre et Vie n° 47, février 2001.* 12p.

Montoroi J.P., Grunberger O., NASRI S., 2002. Ground water geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. *Applied Geochemistry* 17:1047-1060.

Nasri S., 2002. Hydrological effects of water harvesting techniques. A study of Tabias, soil contour ridges and hill reservoirs in Tunisia. *PHd, Lund Institute of Technology, Lund University*, Lund. 104 p.

Nouvelot J.F., 1994. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. *CIEH, Orstom, Montpellier*. pp. 539.

Ragab R., Moidinis D., Albergel J., Khouri J., Droubi A., Nasri S. 2001. The HYDROMED model and its applications to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. (2). Rainfall - runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences 5:554-562.*

Rahaingomanana N., 1998. Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. *Thèse de doctorat en Hydrologie, Université Montpellier I,* 311 p.

Roose E., 1994 : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique de la FAO n°70.* 420p

Selmi S., 1996 : Interventions de l'état en milieu rural et réactions des collectivités locales face a la gestion d'une ressource rare les lacs coolinaires dans le semi-aride Tunisien. *Thèse de doctorat en économie du Développement Agricole, Agro-alimentaire et Rural, Ecole nationale Supérieure Agronomique de Montpellier*.342 p.

Talineau J.C., Selmi S., Alaya K., 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse (FRA), 1994, Vol. 5, No 4,* pp. 251-256

Vateau C., 2003. Diagnostic de pollution agricole sur le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie). *DAA Agro Environnement de l'ENSAM, Montpellier*.53p.

Estimation et spatialisation des réserves hydriques du sol, application au bassin versant de l'oued Zanfour, Tunisie

Jean Collinet (*), Patrick Zante (*)

(*) IRD, UMR LISAH 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex

Résumé

Le barrage de Zanfour (Tunisie centrale) collecte les eaux d'un bassin de 43,4 km². La moitié des terres supporte une céréaliculture et un élevage extensif, l'autre moitié, est couverte de forêts claires et de garrigues.

En zone semi-aride, la disponibilité en eau est le facteur primordial pour définir les potentialités des terres. Cette disponibilité est généralement évaluée à partir de critères climatiques prenant en compte la pluie et l'évaporation, le stockage hydrique des sols étant fixé, une fois pour toute, quelle que soit la nature des sols.

Nous proposons une évaluation et une cartographie des réserves hydriques utilisables prenant en compte les caractéristiques des différents types de sols d'un bassin versant déjà étudié à d'autres fins. Cette approche nécessite la connaissance des limites de rétention de l'eau dans le sol, celles-ci sont soit mesurées par expérimentation soit calculées en utilisant les différentes informations statistiques sur les transferts hydriques des sols. Nous avons retenu cette seconde possibilité en calculant des teneurs en eau pour les différents états de rétention hydrique à partir d'analyses multivariées prenant en compte la texture, le taux de matière organique et la densité apparente des sols selon une méthode déjà mise en œuvre par l'INRA en France.

Dans un premier temps, on a déterminé les limites d'humidité au point de flétrissement et à la capacité au champ. Les réserves utiles de chaque unité de sols ont ensuite été calculées et cartographiées à l'aide d'un système d'information géographique prenant en compte les caractéristiques physiques de chaque unité de sol.

Dans un second temps, ces données ont été incorporées dans un modèle simplifié de bilan hydrique pour obtenir: (a) les périodes déficitaires et excédentaires pour différentes classes de réserves utiles, (b) les réserves utiles à l'échelle du bassin et la pluviométrie permettant leurs remplissages, (c) une prévision des doses d'irrigation.

Mots clés

Réserves hydriques utiles, bilans hydriques, bassin versant, cartographie, système d'information géographique.

1 Introduction

Les réserves hydriques utiles pour le développement des végétaux cultivés sont souvent estimées sur des sols dont on suppose l'homogénéité des caractéristiques physiques sur une épaisseur constante. Pour simplifier leurs modèles, une partie des agro-climatologues a retenu une réserve hydrique de 100mm comme représentative de ce que peuvent contenir et céder aux plantes la plupart des sols (Penmann 1948, Thorthwaite et Mather 1957, Turc 1961). Par la suite, l'évaluation des réserves hydriques utilisables fut approchée par un coefficient d'utilisation de ces réserves par la plante, ce coefficient prend en compte le stade de développement de la plante donc celui concomitant de son système racinaire donc, de l'épaisseur de sol prospecté (Hallaire et Bouchet 1965, Riou 1967). Cette prise en compte de l'épaisseur accessible aux racines ne donne cependant aucune information sur les caractéristiques physiques des matériaux susceptibles de contrôler l'accessibilité et le volume des réserves utiles aux plantes, ni sur les possibilités de remontées capillaires offertes par des volumes plus importants que ceux délimités par le seul profil racinaire.

Il manque enfin une spatialisation des informations précédentes pour dépasser celles du champ et pouvoir accéder aux réserves hydriques de plus grandes superficies telles que celles de bassins versants.

Nous avons extrait de la carte pédologique du bassin de Zanfour (Collinet, Zante, Ghesmi, 2001) toutes les données utiles à cette représentation spatialisée des caractéristiques hydriques d'un bassin. Comme nous disposions de données précises sur la pluviométrie et l'évaporation (Vacher 2000), l'analyse a pu dépasser cette simple représentation spatiale des réserves en approchant le bilan hydrique du bassin faisant apparaître les périodes déficitaires et permettant de préconiser des exemples de doses d'irrigation pour les cultures les plus pratiquées dans la région.

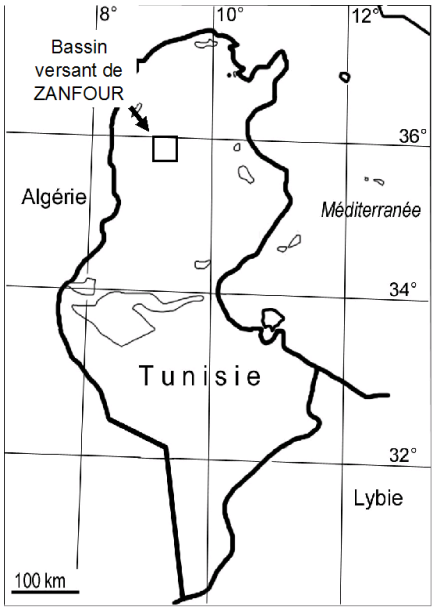
Le site de Zanfour, situé dans le « Haut Tell » tunisien, intéresse le Commissariat Régional pour le Développement Agricole (CRDA) du Kef en raison de la forte demande en eau et des aménagements spontanés qu'a suscité la création du lac collinaire. Ce travail entre dans le cadre d'une opération de recherches en développement « Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion » menée dans le « Programme de développement intégré du nord et du nord-est du Kef (PDAINNEK) à l'origine d'une convention entre le CRDA du Kef, l'Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef (ESAK) et l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD).

Cet article s'inspire du rapport remis aux signataires en décembre 2002.

2 Matériel et méthodes

2.1 Caractéristiques du site

Le bassin versant est en limite des gouvernorats de Siliana et du Kef. Le barrage est situé sur le gouvernorat du Kef. Les coordonnées de la digue sont les suivantes : 35° 57’ 51.6’’ N, 09° 00’ 14.9’’E.

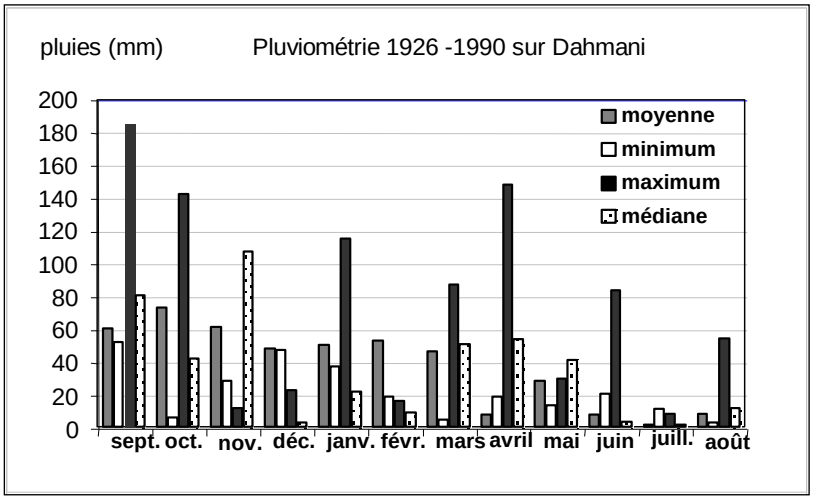


La construction du barrage date de décembre 1996, le volume initial du lac à la cote de déversement est de 710000m^3 ce qui correspond à une superficie de 24 ha, le bassin versant faisant, quant à lui, 4316 ha. Un limnigraphe permet l’enregistrement des variations du niveau du lac. La pluie est enregistrée par deux pluviographes et un pluviomètre. L’évaporation journalière est relevée au bac Colorado.

La zone étudiée se situe sous une pluviométrie de 400 à 500mm. Elle appartient au bioclimat semi-aride inférieur avec une amplitude thermique annuelle forte de 32 à 33°C., une saison sèche de 7 mois, 80 jours de pluies entre septembre et mai et une humidité atmosphérique moyenne annuelle de 65%.

L’équipement du bassin versant de Zanfour est trop récent pour pouvoir disposer d’une longue série de données pluviométriques, aussi utiliserons-nous les informations du poste de Dahmani (anciennement Ebba Ksour) situé à 15km du bassin de Zanfour

Figure 1 : Localisation du bassin versant de Zanfour



La pluviométrie médiane d'Ebba Ksour est de 431mm, Le minimum de 1945 (267mm) correspond à une occurrence cinquantennale sèche, l'année très humide de 1972 (909mm) dépasse l'année centennale humide qui n'est que 850mm.

Figure 2 : La pluviométrie à Ebba Ksour (1926-1990)

Géologiquement, le bassin s'inscrit dans un anticlinal creusé en son axe par l'oued Zanfour. Les roches les plus âgées (-80.10^6 années) sont des marnes campaniennes qui occupent le centre du bassin. Les formations de plus en plus récentes jusqu'à l'éocène (–56.10^6 années) affleurent latéralement et en amont du bassin où l’on découvre la puissante corniche calcaire du Maestrichtien. Au Quaternaire, l'érosion de toutes ces séries aboutit à la formation d'un vaste glacis dont on retrouve quelques surfaces généralement avec des croûtes carbonatées plus ou moins épaisses, consolidées ou friables (torba).

Cette histoire géologique et morphologique a marqué les paysages :

- l'amont du bassin est montagneux, il culmine à plus de 1100m au Djebel ben Hassen, vient ensuite un replat vers +1000m traversé par des gorges où s'encaisse l'oued Zanfour à écoulement semi-permanent ; là, des terrasses alluviales dominent le lit de plus de 6m.

- le milieu du bassin, sur Santonien puis Campanien devient marneux, le relief s'atténue et la vallée s'élargit, limitée latéralement par des corniches calcaires du Maestrichtien. Les versants d'abord concavo-rectilignes sur d'épaisses colluvions, s'entaillent de profonds ravins dès qu'affleurent les marnes santoniennes.

- en aval, le lac ferme le bassin vers +600m, les collines le ceinturant culminant à 720m, les bad-lands sur marnes de l'amont passent à des versants rectilignes encroûtés qui caractérisent les sols sur l'Eocène calcaire.

Un tiers du bassin est occupé par la forêt en rive droite amont. Cette forêt a reculé pour laisser la place à des terres de parcours ou des cultures en rive gauche amont et sur toute la partie aval.

2.2 Calcul des réserves hydriques utiles

2.2.1 Teneurs en eau aux potentiels délimitant les réserves utiles

En l'absence d'informations expérimentales sur les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, on a utilisé les formulations les plus récentes, établissant des relations entre les caractéristiques physiques facilement accessibles des sols et les teneurs en eau aux potentiels permettant de déterminer les RU. Les derniers travaux à ce sujet ont été présentés par Bruand et al. en 2002. Les prédécesseurs dans ce domaine ont été Jamagne et al (1977), Tessier et Pédro (1984), Tessier (1987), Curmi (1987), Bruand (1988), Bruand et al (1994).

Tous ces travaux se fondent sur des analyses multivariées. Les travaux de Bruand et al, (2002) s'appuient sur un effectif de 219 horizons de sols des régions tempérées du nord au sud-ouest de la France, choisis de telle sorte que toutes les classes texturales soient représentées. Des paramètres du sol conditionnant la teneur en eau ont été mis en relation avec les teneurs en eaux massiques aux potentiels matriciels suivants : pF 1,0 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 et 4,2. Les variables les plus pertinentes sont la texture et la densité apparente sur motte. Les teneurs en matière organique, la capacité d'échange cationique et la teneur en calcaire actif ont été utilisées pour une pré-classification.

Comme textures et densités apparentes ne sont pas strictement indépendantes, l'analyse a été menée par étapes :

- établissement de classes texturales des échantillons provenant des différents horizons,
- calcul des teneurs massiques en eau, aux pF remarquables, au sein de chaque classe texturale,
- répartition des échantillons de chaque classe texturale dans des sous-classes définies par les densités apparentes mesurées sur des mottes de quelques centimètres de diamètre et contenant donc les porosités efficaces aux potentiels hydriques remarquables précédents, c'est ainsi que la porosité fissurale grossière n'est pas prise en compte,
- calcul des teneurs en eau massiques moyennes au sein de chaque sous-classe construite par la stratification texturo-structurale précédente,
- enfin, calcul des teneurs en eau volumiques moyennes en prenant comme densité apparente représentative de l'ensemble de l'horizon la moyenne des densités sur mottes des échantillons prélevés dans cet horizon. De cette façon on ne prend pas en compte la macroporosité qui n'intervient pas dans le stockage hydrique attribué aux RU.

Les principaux résultats obtenus par Bruand et al. (2002) sont consignés dans le tableau de l'annexe A.

2.2.2 Modèle de calcul des réserves utiles des sols du bassin versant

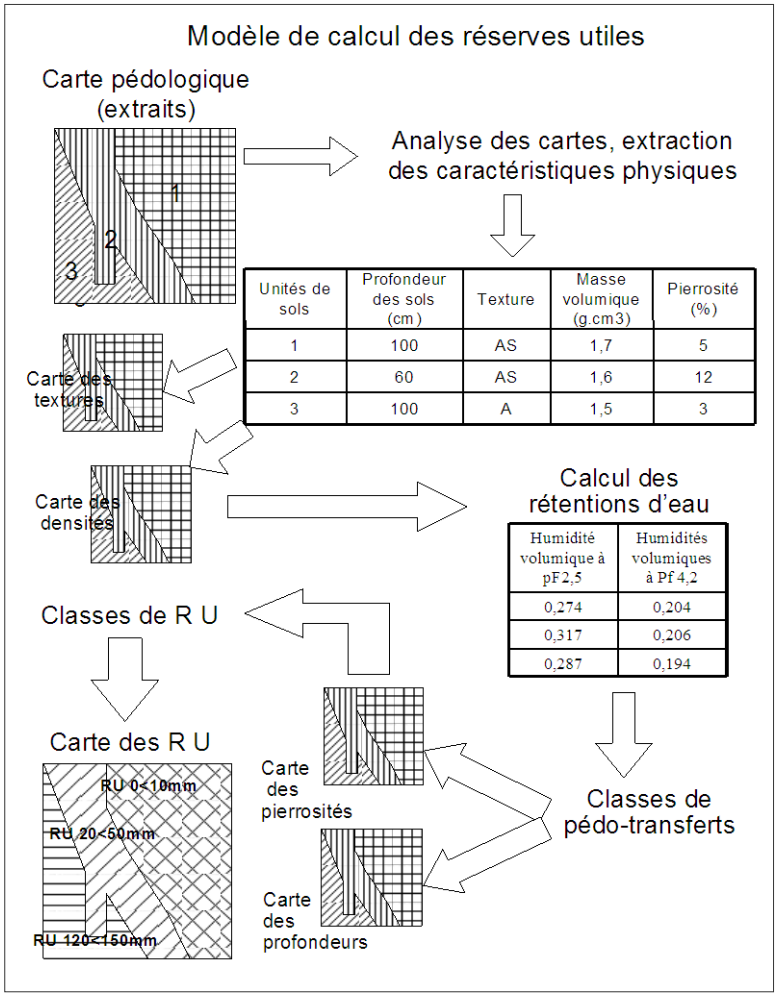


Figure 3 : Modèle de calcul et de cartographie des réserves utiles

Le calcul des RU nécessite la connaissance de différentes variables :

- les textures et les densités apparentes des sols, cette information est obtenue à partir de la carte pédologique qui fournit les limites des unités homogènes.
- l'épaisseur du sol, pour pouvoir transformer les teneurs volumiques en lame d'eau (mm) contenue dans la partie du sol participant à la R U.
- la teneur en éléments grossiers ; en effet, la porosité stockant la RU ne s'applique qu'au matériau meuble, aussi une pondération doit-elle être faite en tenant compte des éventuelles charges en éléments grossiers non poreux.

Cette organisation des analyses successives est schématisée sur l'organigramme de la figure 3.

La carte pédologique permet d'identifier différentes unités de sols caractérisées par toute une série de variables dont celles qui sont également utiles pour le calcul des teneurs en eau aux potentiels remarquables, ce sont: la texture, une évaluation des masses volumiques, la profondeur des sols et leur pierrosité.

L'utilisation d'un système d'information géographique (Arc View) permet de construire une table des variables, de calculer les humidités volumiques aux potentiels remarquables (différents pF) puis les réserves utiles. En regroupant chacune de ces variables par classe il est possible de dresser les cartes correspondantes pour indiquer leur répartition dans l'espace.

2.3 Calcul du bilan hydrique

La connaissance des RU correspondant aux caractéristiques réelles des sols d'un bassin versant permet de calculer la disponibilité en eau pour les plantes dans un bilan hydrique où rentrent également pluviométrie et évaporation. L'établissement de ce bilan soulève deux problèmes,

celui des données climatiques disponibles dans la région considérée et celui du pas de temps de l'analyse permettant de mieux rendre compte de l'utilisation de l'eau par les plantes compte tenu de la porosité du sol et des périodes excédentaires ou déficitaires.

Tant que les réserves hydriques sont suffisantes, les plantes utilisent une quantité maximale d'eau. Cette utilisation couvre des processus physiologiques complexes dont le moteur est l'évapotranspiration de la plante. Pour éviter toutes confusions terminologiques ultérieures, rappelons les définitions suivantes :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) est l'évaporation d'un gazon ras très couvrant, bien arrosé, en bon état végétatif ; dans ces conditions cette ETP ne dépend que des paramètres climatiques locaux tels que rayonnement, insolation, température, humidité de l'air, vitesse du vent,
- l'évaporation de tout autre type de couvert végétal bien arrosé et en bon état végétatif correspond à l'évapotranspiration maximum (ETM) de ce couvert végétal,
- l'évapotranspiration réelle (ETR) d'un couvert végétal naturel ou cultivé dépend du type de couvert végétal, des espèces végétales, de la structure du couvert, du stade phénologique des plantes et du climat local.

Les plantes n'évapotranspirent à l'ETM que si elles sont au stade de développement maximum de leur surface foliaire et si elles sont correctement alimentées en eau, c'est ainsi qu'en début de cycle végétatif on a ETR = 0,2 à 0,3 ETP.

Compte tenu de ce qui précède le bilan hydrique peut se formuler de la façon suivante :

$$P + (I) + R \pm D \pm \Delta H - ETR = 0 \qquad (1)$$

avec :

P = pluies en mm,
(I) = compléments hydriques d'une irrigation éventuelle (mm),
R = ruissellement (mm),

à l'échelle d'une parcelle la présentation du ruissellement pose problème car le ruissellement entre et sort de la parcelle, il apparaît dans les apports Re (ruissellements entrant) et dans les pertes Rs (ruissellements sortant). Par soucis de simplification, on fait l'hypothèse que Re = Rs pour éliminer ce terme de l'équation.

D = drainage (mm),
ΔH = variation du stock hydrique S du sol (mm) entre des instants i et i-1

$$\Delta H = S_i - S_{i-1}$$

avec : S_i = stock hydrique du sol à l'instant i et S_{i-1} = stock hydrique à i-1

Ici, les variations de stocks concernent l'eau utile (R U), donc à l'exclusion de l'eau de gravité transitant rapidement dans la macroporosité du sol et de l'eau fortement fixée par les éléments du sol et non accessible aux plantes.

lorsque P - ETR > 0, ΔH >0, la réserve hydrique (R U) se remplit,
lorsque P - ETR < 0 , ΔH <0, la réserve hydrique (R U) se vide ou ne peut se remplir.

L'équipement météorologique du barrage a permis de disposer d'un enregistrement pluviométrique journalier et de l'évaporation journalière en bac Colorado, de septembre 2000 à septembre 2001.

Nous n'avons pas l'occupation détaillée du sol, notamment pour les cultures annuelles, sur le bassin versant pour la période considérée ; nous ne pouvons donc pas calculer, par type de couvert, par surface cultivée et par période, des variations d'ETR. Pour ces raisons nous avons assimilé ETR à ETP. Les travaux de J. Vacher (2000) sur le site voisin de El Gouazine ont permis de passer de l'évaporation bac à l'ETP avec la relation suivante :

$$ETP = 1{,}088\ E_{bac}$$

Sous ces climats, du fait de l'importante demande évaporatoire, (#1900mm/an), et de la faiblesse des pluies (350 mm/an), les calculs aux pas de temps mensuels, décadaires et même pentadaires ne montrent qu'un déficit de saturation permanent et ne permettant aucun stockage d'eau donc aucun développement végétal. L'équipement installé sur le bassin versant a permis d'établir les bilans journaliers de septembre 2000 à septembre 2001. On accède alors à des différences P-ETP montrant les cycles des stockages et des utilisations voire des excédents hydriques.

On présente sur le tableau 1 un exemple de situation théorique permettant de suivre la procédure de calcul des termes du bilan.

Pour cet exemple on a considéré trois capacités de réserves utiles RU pouvant correspondre aux classes suivantes de représentation cartographique:

- RU de 0 à 10mm, soit une capacité moyenne de 5mm
- RU de 10 à 20mm, soit une capacité moyenne de 15mm,
- RU de 20 à 50mm, soit une capacité moyenne de 35mm.

Tableau 1: Exemple d'établissement d'un bilan hydrique

Date	P	ETP	P-ETP	RU 5	Exc.	Déf.	RU 15	Exc.	Déf.	RU 35	Exc.	Déf.
	mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	0,00	5,00	-5,00	0,00	0,00	100	0,00	0,00	100	0,00	0,00	100
B	14,50	4,00	10,50	5,00	5,50	0	10,50	0,00	30	10,50	0,00	70
C	15,40	3,50	11,90	5,00	11,90	0	15,00	7,40	0	22,40	0,00	36
D	0,10	2,20	-2,10	5,00	0,00	0	15,00	0,00	0	20,30	0,00	42
E	14,50	3,20	11,30	5,00	11,30	0	15,00	11,30	0	31,60	0,00	9,7
F	0,50	4,20	-3,70	5,00	0,00	0	15,00	0,00	0	29,70	0,00	15
G	8,50	4,70	3,80	5,00	3,80	0	15,00	3,80	0	33,50	0,00	4

Les termes du bilan se calculent de la façon suivante

Pour RU 5 :
Jour A, P-ETP <0, RU reste nulle
Jour B, P-ETP = 10.5, 5 remplissent la RU, 5.5 drainent ou ruissellent
Jour C, P-ETP = 11.9, mais la RU est déjà pleine, donc 11.9 drainent ou ruissellent
Jour D, P-ETP = -2.10, mais la RU reste à 5 car il y a l'excédent du jour C, l'excédent du jour D est zéro (on ne reporte pas les excédents, sauf pour remplir la RU du jour suivant)
Jour E, P-ETP = 11.3, la RU est déjà pleine, 11.3 drainent ou ruissellent
Jour F, P-ETP = -3.7, mais il y a l'excédent de la veille, donc la RU peut se remplir, par contre il n'y a pas d'excédent.
Jour G, P-ETP = 3.8, la RU est déjà pleine, il y a 3.8 d'excédent. Pas de déficit

Pour RU15 :
Jour A, P-ETP <0, RU reste à zéro
Jour B, P-ETP = 10.5, 10.5 remplissent la RU, pas d'excédents
Jour C, P-ETP = 11.9, la RU se complète à 15, donc 11.9-(15-10.5) = 7.4 drainent ou ruissellent
Jour D, P-ETP = -2.10, la RU serait à 15-2.1, mais il y a un excédent de la veille, donc elle reste à 15 par contre l'excédent du jour D est zéro (on ne reporte pas les excédents, sauf pour remplir la RU)
Jour E, P-ETP = 11.3, la RU est déjà pleine, 11.3 drainent ou ruissellent
Jour F, P-ETP = -3.7, mais il y a l'excédent de la veille, donc la RU peut se remplir, par contre il n'y a pas d'excédent.
Jour G, P-ETP = 3.8, la RU est déjà pleine, il y a 3.8 d'excédent

3. Résultats

3.1 Les données de base

3.1.1 La carte pédologique

Le point de départ est une carte des sols du bassin versant de Zanfour présentant une mosaïque d'unités (UC) contenant des informations classées selon une adaptation à la Tunisie de la CPCS 1967. (Voir carte couleur 1). La légende de cette carte descend assez loin dans la taxonomie pour pouvoir dégager la profondeur, la pierrosité et la texture des sols, tous caractères utiles au calcul des réserves hydriques (RU) :

épaisseur : quatre classes :
- classe A avec des sols très peu épais sur calcaires limitrophes du bassin et parfois sur croûtes calcaires dures (unités 1,3), parfois sur altérites de marnes (2)
- classe B avec des sols peu épais sur calcaires ou sur marnes (4,5,6))
- classe C avec des sols épais calcimagnésiques carbonatés et brun calcaires (7,9)
- classe D avec des sols très épais sur colluvions (8, 10, 11)

pierrosité
- sols très caillouteux (5) et caillouteux (parfois 9) essentiellement sur colluvions de roches calcaires,

texture : deux catégories dominantes, en relation avec les types d'argiles et la dynamique structurale que leur présence impose :
- sur marnes, la pédogenèse fournit beaucoup d'argiles gonflantes et les sols sont argileux à argilo-sableux (5, 8)

- si les calcaires dominent, la pédogenèse fournit peu d'argiles gonflantes, les sols sont alors limoneux à limono-sableux (7, 9)

Profondeur A : 0 à 10cm de sol meuble (UC 1, 2, 3)

U C 1

Superficie : 4,8 % du bassin versant.

Profil : R c'est à dire affleurements de roches dures, de croûte calcaire continue.

Strate herbacée et arbustive maigre (garrigue peu dense) ancrée dans les fissures des roches.

Economie de l'eau : très mauvaise sauf sur roche très fissurée.

U C 2

Superficie : 6,8 % du bassin versant

Profil R, voire C sur les flancs des ravines vives des marnes et argilites, pentes trop fortes et écoulements trop intenses pour permettre une accumulation de matière organique.

Economie de l'eau: mauvaise car toute l'eau ruisselle sauf dans certaines ravines

Problème: tous les sols de cette unité sont profondément ravinés

U C 3

Superficie : 11,1 % du bassin versant

Profil R, ce sont en effet des colluvions d'éléments rocheux, moins de 5 % d'horizon organique de type (A), souvent en contrebas de l' UC 1 dès que la pente faiblit.

Occupation: garrigue dense ou forêt claire, strates herbacée et arbustive ménageant des zones de sol nu.

Economie de l'eau : mauvaise à moyenne si les épandages sont plus graveleux que caillouteux.

Profondeur B: 10 à 50 cm de sol meuble (unités 4, 5, 6)

U C 4

Superficie : 13,5 % du bassin versant,

Profil AC obtenu par évolution de l'UC 1 ou dégradation de l'UC 9, 10 à 50cm de terre moins caillouteuse mais avec un épandage superficiel pouvant atteindre 10% d'éléments grossiers. Horizon organique A très sombre, structure fragmentaire fine bien développée, texture argilo-limono-sableuse à sablo-limoneuse.

Occupation : forêt dense, garrigue dense à Romarin, cultures s'installant en lisières.

Economie de l'eau : intéressante pour des forêts et plantations forestières, il y a assez d'eau pour les jeunes plants, les forêts âgées sont de belle venue mais hétérogènes car tout dépend de la profondeur de l'exploration racinaire permise par la fissuration des calcaires.

Problème: sur les pentes >10%, ces sols encore riches en matière organique sont actuellement défrichés ; ils ne résisteront que quelques décades sous cultures et que quelques années sous élevage ovin.

U C 5

Superficie : 17,9 % du bassin versant

Profil AC ou R. Epandage de 50% de graviers et cailloux calcaires au dessus d'une UC4. Ces éléments grossiers proviennent soit d'un épandage lié au ruissellement (allochtonie), soit d'une accumulation relative par épuisement du matériau meuble de sols initialement graveleux et caillouteux (autochtonie), il y a souvent concomitance des deux processus.

Economie de l'eau : plus intéressante que UC 4 car l'épandage joue le rôle de mulch.

Occupation : forêt dense et garrigue,

Problème: pierrosité top importante pour la culture.

U C 6
Superficie : 6,7 % du bassin versant
Profil AC, la limite entre A et C est difficile à déterminer car les altérations de marnes sont elles-mêmes souvent meubles. Sols très limoneux, beige clair, faible teneur en matière organique.
Structure fine à moyenne bien développée en jachère mais donnant rapidement des pellicules de battance après labour.
Economie de l'eau: faible infiltrabilité à cause des pellicules de battance.
Occupation : céréales sur les pentes <10% , sur des pentes supérieures, une mise en défens s'impose.
Problème: ces sols s'érodent rapidement sous forme linéaire sur des pentes >10%, ceci pourrait être limité par des traitements de CES qui devraient laisser se développer des couverts herbacés et buissonnants bas, surtout pas d'arboriculture ; les banquettes n'y sont pas non plus recommandées (risques de renards, d'effondrements).
Profondeur C : 50 à 100 cm de sol meuble (UC 7, 9)

U C 7
Superficie : 2,4 % du bassin versant.
Profil A (B) C voire A B C, texture argilo-limoneuse à argilo-limono-sableuse, structure fine bien à moyennement développée, brun foncé homogène sur au moins 50cm, taux d'éléments grossiers variable.
Economie de l'eau : bonne.
Occupation : forêt en cours de dégradation.

U C 9
Superficie : 11,3 % du bassin versant
Profil A (B) C ou A B C, argilo-limono-sableux, moyennement graveleux et caillouteux dans le profil mais accumulation relative pouvant atteindre 30% en surface; teinte brune à brun-jaunâtre sur 15cm marquant des taux de 0,7 à 2% de matière organique ; structure fine grenue et grumeleuse bien développée sur 15cm en hiver, devient massive en-dessous ; ces sols se forment sur un mélange de bancs calcaires dominant et marneux plus minces, les pentes varient de 5 à 7%.
Economie de l'eau : moyenne à cause de pellicules de battance limitant leur infiltrabilité et d'une charge en éléments grossiers limitant leurs réserves utiles.
Occupation : céréaliculture, maraîchage et fruitiers irrigués.
Problème: ces sols cultivés ont une structure fragile, les mottes de labour s'effondrent après quelque 25mm de pluies cumulées, ils ruissellent rapidement et s'érodent surtout en nappe, ils sont actuellement fort efficacement protégés par des banquettes en aval du bassin.
Profondeur D : 100 à 150 cm de sol meuble (UC 8, 10, 11)

U C 8
Superficie : 9 % du bassin versant
Profil A (B) C., la limite entre (B) et C est difficile à déterminer car les altérations de marnes sont elles-mêmes meubles ; texture argileuse à argilo-limoneuse, structure fine grenue et grumeleuse bien développée en hiver, forte dynamique structurale grâce aux smectites ; ces sols forment plutôt des pellicules structurales après labour et restent donc assez perméables après l'effondrement des mottes ; teinte brun-foncé sur 15cm soulignant les 1,5 % à 2,0 % de matière organique ; ces sols se forment sur des marnes en bancs plus épais que les calcaires.
Economie de l'eau : bonne pour les textures les moins fines, moyennes pour les plus argileuses car la gamme d'eau utilisable est déviée vers les fortes humidités, infiltrabilité bonne grâce à la dynamique structurale évoquée précédemment.
Occupation : céréales
Problème : cette unité n° 8 possède de très bonnes caractéristiques ce qui la différencie des unités 6 et 2 également sur marnes. Ces sols sont peu érodibles sur pentes de 5 à 10%, ils le deviennent par contre au delà de ces seuils, la meilleure protection peut être obtenue si on recherche un bon calage

du calendrier cultural : un labour précoce limitera le ruissellement. Comme pour les autres sols sur marnes les banquettes sont à proscrire.

U C 10
Superficie : 15,9 % du bassin versant
Profil A (B) C ou A B C: ce sont les sols les plus profonds du bassin car ils se différencient sur des matériaux colluvionnés hétérogènes verticalement et latéralement provenant du mélange de ce qui est en amont, assez peu de cailloux, nombreux sols enterrés; texture argilo-limoneuse à argileuse, structure fine bien développée en hiver mais sensible au tassement; couleur brun jaunâtre, plus foncée sur 20cm signalant des taux de 1,0 à 1,7 % de matière organique.
Economie de l'eau : RU excellente, infiltrabilité bonne car les pellicules structurales de surface sont plus fréquentes que les pellicules de battance.
Occupation : céréales, maraîchage et fruitiers dans les zones irrigables.
Problème: vitesse d'effondrement des mottes de labour moyennement rapide, sur certains sols, enfin les remontées capillaires peuvent poser problème à cause de l'hétérogénéité verticale des matériaux.

U C 11
Alluvions et affleurements rocheux nus des oueds (pour mémoire, non cartographiables)

3.1.2 La profondeur des sols

Les classes de profondeurs proviennent de l'analyse des cartes pédologiques. On note que les sols les plus épais sont groupés en amont du bassin sur les marnes et que les plus minces correspondent aux limites est et ouest du bassin, souvent sur corniches calcaires, et à l'aval sur encroûtements calcaires.
Enfin, près de 70% des sols ont moins de 50cm de profondeur ce qui limite fortement les possibilités de stockage hydrique.

Tableau 2 : Profondeur des sols

Profondeurs (cm)	Effectif d'unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
0-10	202	12642300	28,94
11-50	219	17431882	39,90
51-100	112	7570267	17,33
101-150	44	5760467	13,19
lac	1	283667	0,65

3.1.3 Les textures

Si l'on considère en même temps la carte pédologique et celle des textures, on constate une étroite relation entre les classes argileuses (A) et argilo-sableuses (AS) et l'extension des sols différenciés sur marnes, l'ensemble couvrant plus de 25% du bassin surtout en amont et au centre du bassin à plus forte densité hydrographique.

La forte proportion de sols limoneux (L et LS = 52%) atteste de la jeunesse de ces sols incessamment remaniés par érosion.

Tableau 3 : Texture des sols

Texture	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
A	81	10490735	24,01
AS	157	9426605	21,58
L	166	15044447	34,44
LS	151	7888296	18,06
LTS	22	554833	1,27
Lac	1	283667	0,65

3.1.4 La charge en éléments grossiers inclus

La charge en éléments grossiers inclus dans le sol péjore la capacité de stockage en eau. Ceux-ci, généralement non poreux, occupent en effet la place du matériau poreux, ils constituent aussi une gêne pour le travail du sol sur environ 15% de la superficie où leur pourcentage dépasse 40%.

Par contre, une accumulation relative de ces éléments grossiers en surface est intéressante pour des taux <40% car ils absorbent l'énergie des pluies, ils constituent un « mulch » limitant l'évaporation et enfin, ils diminuent l'accélération des écoulements donc l'abrasion linéaire.

Tableau 4 : Charge en éléments grossiers

Eléments grossiers (%)	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
0,0	132	10608255	24,28
10,0	165	10473270	23,97
20,0	84	7246372	16,59
30,0	119	8570873	19,62
40,0	70	5028003	11,51
50,0	7	1478143	3,38
lac	1	283667	0,65

3.2. Les réserves en eau du sol

3.2.1 Les humidités volumiques aux potentiels remarquables (pF 2,5 et pF 4,2)

Les humidités équivalentes à la capacité au champ (pF2,5) plus élevées appartiennent aux sols à texture fine, les mises en réserves hydriques sont plus exclusivement liées aux vides d'assemblages édifiés plus par une dynamique mésostructurale saisonnière que par une activité biologique extrêmement faible dans ces sols des zones semi-arides.

Tableau 5 : Humidités volumiques à pF 2,5

Hum.vol. pF 2,5	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
23<25 %	66	2687283	6,15
25<27 %	147	8308518	19,02
27<29 %	105	10509270	24,05
29<31 %	220	19029918	43,56
31<33 %	39	2869927	6,57
lac	1	283667	0,65

Sur la carte des humidités volumiques au point de flétrissement (pF4,2), on note que près de 55% des sols permettent la survie des végétaux avec des teneurs en eau très basses (13 à 17%) ; de

faibles précipitations, situation caractéristique de cette zone, permettent d'atteindre rapidement ces humidités qui assurent une survie sinon la croissance des végétaux. (Voir Carte couleur 2 : Cartes des humidités volumiques à pF 2.5 et pF 4,2)

Tableau 6 : Humidités volumiques à pF 4,2

Hum vol. pF 4,2	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surface (%)
13<15 %	180	12113100	27,73
15<17 %	159	11374476	26,04
17<19 %	57	2801868	6,41
19<21 %	113	9144192	20,93
21<23 %	68	7971280	18,25
lac	1	283667	0,65

3.2.2 Les réserves hydriques utilisables

Rappelons que le calcul des RU s'appuie sur l'établissement d'un stock en partant de la gamme d'eau utilisable (Hv pF2,5 - Hv pF4,2) appliqué à une épaisseur de sol (z) et possédant des caractéristiques hydrophysiques homogènes sur cette épaisseur. (Voir carte couleur 3: carte des réserves hydriques utilisables)

Tableau 7 : Réserves utiles

Cl. de réserves utiles (mm)	Effectif unités	Surfaces (m²)	Surfaces (%)
0<10	104	4806192	11,00
10<20	169	12024976	27,52
20<50	103	6090040	13,94
50<80	96	9433057	21,59
80<120	94	9875615	22,60
120<150	11	1175036	2,69
lac	1	283667	0,65

Cette simplification est acceptable sur ce bassin car tous les sols sont jeunes donc peu différenciés verticalement. Les sols sur colluvions échappent tant soit peu à cette simplification, elle sera cependant retenue car seules des prospections beaucoup plus détaillées auraient permis de révéler des horizons de différentes compositions susceptibles de modifier sensiblement les valeurs des stocks hydriques.

Par rapport à la complexité de la carte pédologique, la carte des R U montre finalement une distribution assez homogène des classes de réserves hydriques sur le bassin. Cette homogénéité résulte de compensations entre les RU dépendant des textures ou des pierrosités et celles dépendant plutôt des épaisseurs de sols ; c'est par exemple le cas de l'UC 9, à texture assez grossière, mais sur une grande épaisseur.

3.3 L'analyse des termes du bilan hydrique

3.3.1 Le climat

Il est tombé 350mm en 2000-2001, ce qui correspond à une année déficitaire si l'on se réfère à la pluviométrie médiane d'Ebba Ksour (431mm). L'évaporation (bac Colorado) sur le barrage a atteint 1895mm cette même année.

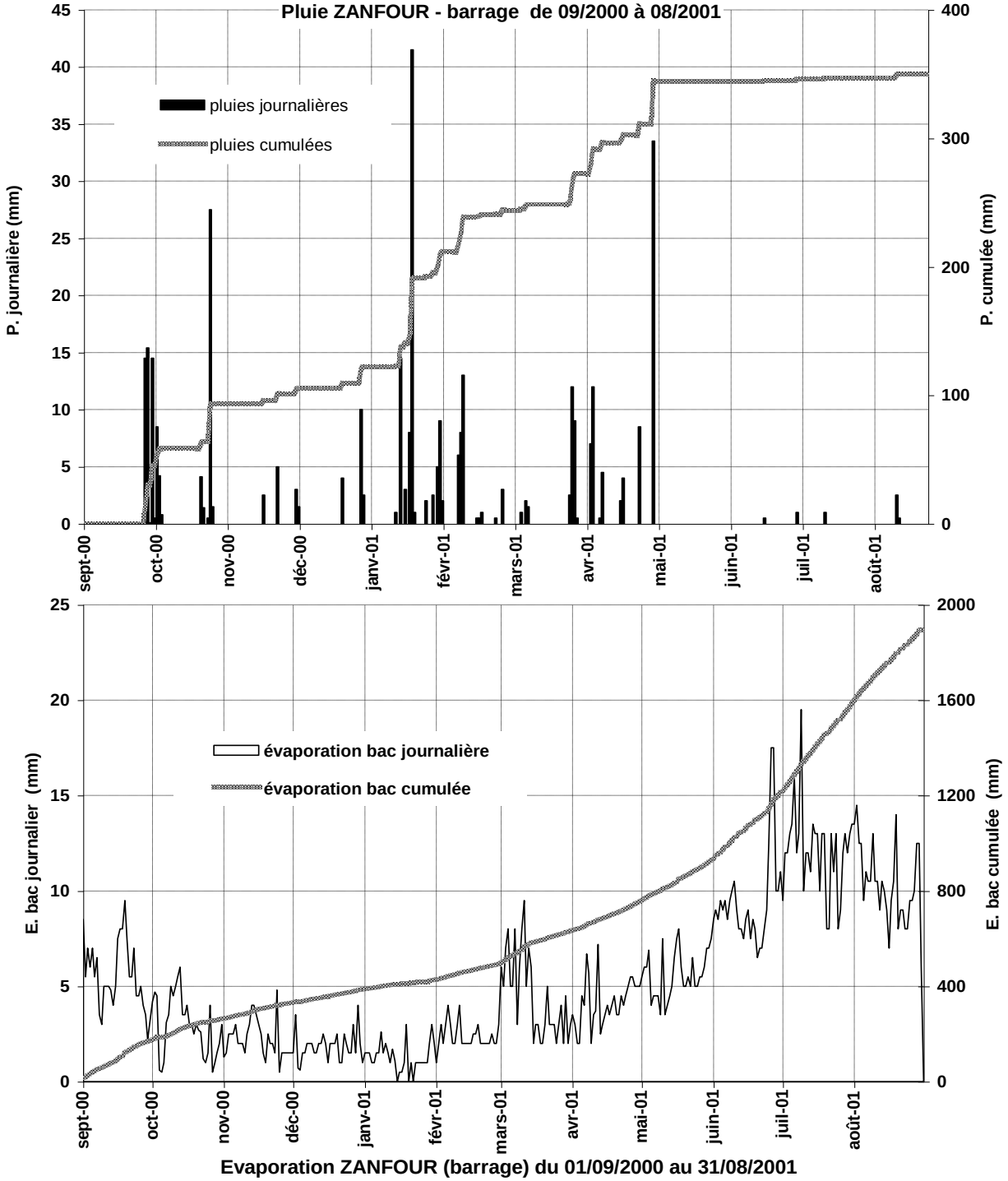


Figure 4 : Pluies et évaporation bac 2000-2001 sur Zanfour

Le cycle évaporatoire apparaît nettement sur la figure 4 avec des minimums de novembre à février (# 3 mm / j) explicables par la diminution des radiations et un maximum sur juillet et août (#11 mm / j) correspondant au cumul de l'advection et de radiations plus fortes.

La distribution des précipitations est caractéristique de ce que l'on observe en année déficitaire avec:

- des pics pluviométriques peu élevés,

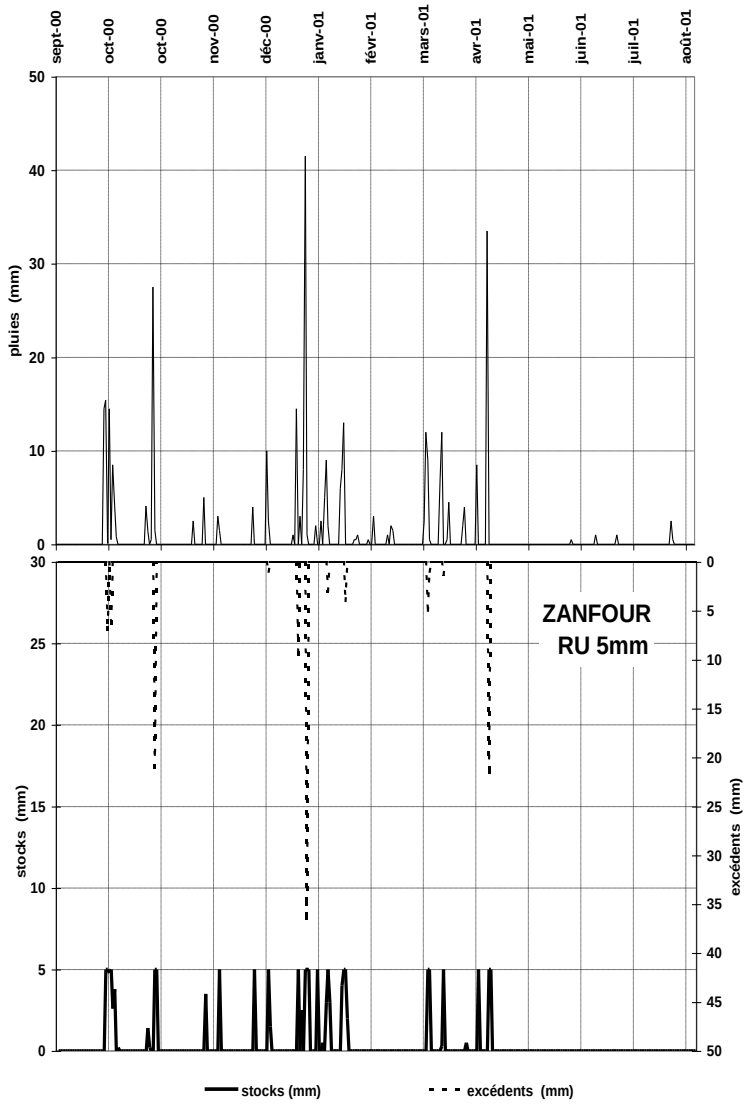
- un ralentissement excessif en décembre,
- trop peu de pluies en février, mars et avril, période critique parce que la demande évaporatoire reprend de l'importance.

3.3.2 L'évolution des stocks et excédents par classes de RU

Les bilans hydriques complets figurent sur un tableau de l'annexe B. La figure 5 résume les évolutions des stocks et des excédents ainsi que les pluies dont ils sont issus. Cet exemple correspond à une classe de sols très minces à texture équilibrée ou des sols un peu plus épais à texture grossière et ne possédant donc qu'une réserve hydrique maximale R U de 5 mm.

Graphique et tableau montrent que les sols de cette classe « RU 5 mm » se saturent 21 fois sur 37 remplissages ce qui représente 143 mm et détermine, sur l'année 2000-2001, un excédent de 117 mm dont 35 mm en janvier 2001.

Figure 5 : Pluies, stocks et excédents hydriques pour les sols à R U de 5mm



L'excédent correspond au flux se départageant entre ce qui peut drainer plus profondément dans une roche fissurée par exemple et ce qui s'écoule superficiellement.

Rappelons qu'une partie de l'excédent du jour J_{-1} participe à la recharge de RU au jour J.

Sur sols minces, il ne fait aucun doute que bien des sols à faible RU sont à l'origine de forts ruissellements que nous avions supposés dans un précédent travail (Collinet, Zante, Ghesmi 2001).

Les autres situations issues de sols à classes de RU supérieures sont résumées dans le tableau 8 et illustrées par la figure 6.

Compte tenu des faibles précipitations (350mm) et d'une ETP annuelle de 1896mm, les réserves atteignent un maximum de 291 mm pour les sols profonds de la classe des RU de 65mm. Le remplissage maximum des RU n'est atteint que 21 fois pour RU 5

mm, 4 fois pour RU 15 mm, une fois pour RU 35 mm, il n'est jamais atteint pour RU 65 mm qui ne devrait jamais donner lieu à des ruissellements.

Tableau 8 : Résumés des bilans sur 4 classes de réserves hydriques

Classes de RU (mm)	Stocks cumulés (mm)	Excédents cumulés (mm)	Jours remplissage total	Jours remplissage partiel
5	134	138	21	15
15	193	49	4	26
35	220	6	1	29
65	291	0	0	37

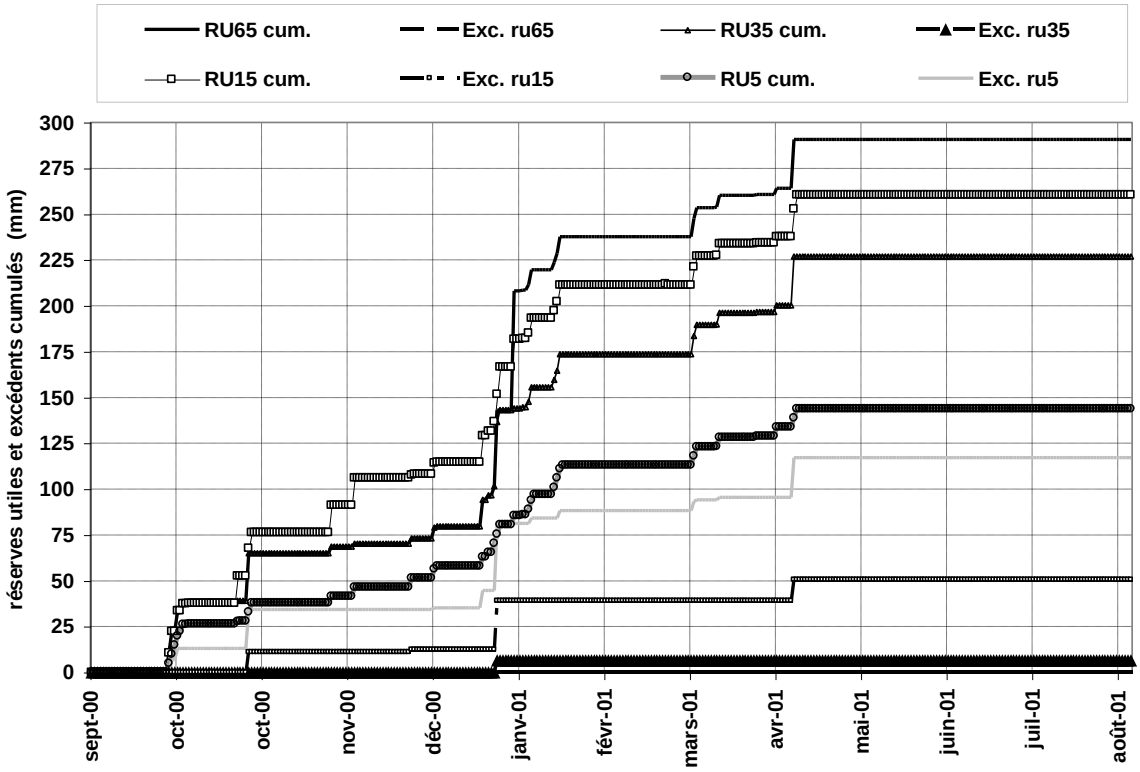


Figure 6 : Cumul des stocks, cumul des excédents sur le bassin de Zanfour en 2000-2001

Une hypothèse simplificatrice, qui accorderait aux surfaces des sols une conductivité superficielle saturée infinie et stable indiquerait que seulement 52% des sols du bassin sont susceptibles de ruisseler par saturation des porosités des classes de RU : 0/10, 10/20 et 20/50 mm (cf . carte des RU).

La figure 6 représente les cumuls des réserves utiles et des excédents de quatre classes de RU précédentes. On peut ainsi distinguer les périodes de plus fortes intensités des transferts hydriques : en début et fin octobre, en janvier, en mars et en avril.

3.4 L'Evaluation des compléments d'irrigation

Le calcul des données journalières du bilan permet aussi une évaluation des compléments hydriques à apporter par irrigation. Les doses journalières sont calculées en retenant les valeurs négatives de P-E.

J.Vacher (2000) a établi pour la région les dates et durées des différents stades phénologiques (du semis à la récolte) et a calculé pour chaque culture et chaque calendrier un coefficient cultural « k » tel que ETR = k ETP pour préciser l'utilisation de l'énergie en fonction du développement de la plante. Nous avons repris les informations concernant les calendriers culturaux mais ne disposons cependant pas assez d'informations pour calculer les coefficients culturaux. Pour simplifier on considérera que k = 1 pendant tout le cycle ce qui surestime sensiblement les doses d'irrigation pendant la levée.

Le tableau 9 présente un exemple de proposition d'irrigation pour le blé, l'orge et l'avoine.

Les doses journalières de complémentation sont calculées en établissant les déficits P-ETP et le cumul de ces déficits journaliers fournit les besoins correspondant aux différents stades phénologiques. Les différences de doses qui apparaissent entre les trois céréales résultent du calage dans l'année de cycles culturaux sensiblement différents, en ce sens l'orge est mieux adapté aux caractéristiques climatiques de la zone.

Tableau 9 : Compléments hydriques pour céréales sur Zanfour (exemple 2000-2001)

	Blé	Orge	Avoine
Période semis +levée	01/12 au 16/12	01/11 au 10/11	01/11 au 15/11
Irrigation période (mm)	23,8	22,3	26,3
Période maturation	17/12 au 01/04	11/11 au 28/02	16/11 au 25/02
Irrigation période (mm)	111,4	60,5	50,5
Période maturité	02/04 au 01/06(*)	01/03 au 10/04(*)	26/02au 18/04(*)
Irrigation période (mm)	221,7	121,9	153,8
Totaux des cycles (mm)	**356,9**	**204,7**	**230,6**

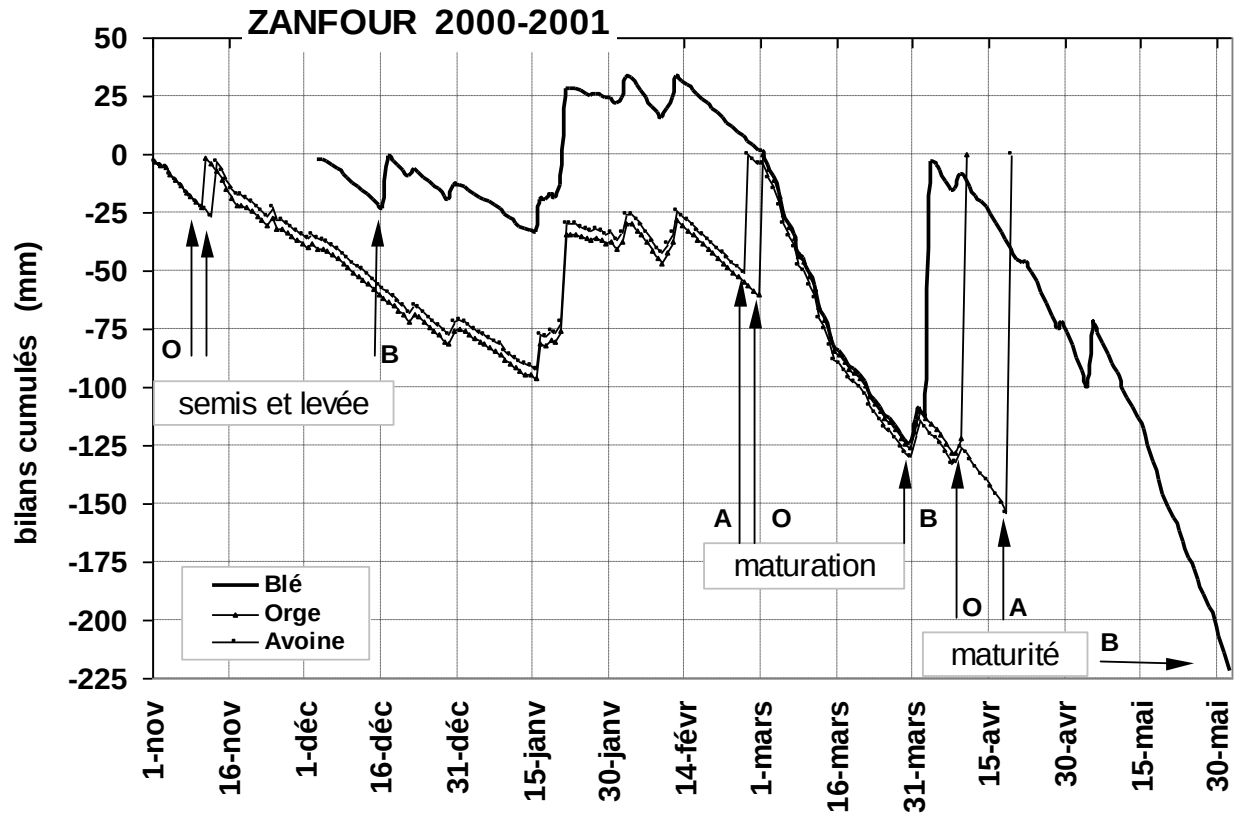


Figure 7 : Analyse des déficits hydriques sous trois cultures

La figure 7 représente les évolutions de ces déficits hydriques pour les trois céréales. Pendant une vingtaine de jours P-ETP>0, les réserves peuvent alors se regarnir partiellement ou totalement ce qui correspond aux inflexions positives des courbes sur le graphique.

3.5 L'évaluation du stokage total des sols

Les sols du bassin versant sont susceptibles de contenir d'importants volumes d'eau. Ces réserves hydriques fluctuent évidemment selon les caractéristiques pluviométriques inter-annuelles.

Il est instructif d'utiliser les informations de la carte des réserves hydriques pour pouvoir comparer ces teneurs selon différentes hypothèses :

- hypothèse d'une saturation des RU sur toute la superficie du bassin,

Le remplissage total des réserves hydriques utiles de tous les sols du bassin versant donnerait un stockage de 2 176 400 m3 (tableau 10).

Selon cette hypothèse, on imite évidemment une situation correspondant à une année exceptionnellement humide dont il est possible de connaître la pluviométrie puisque nous avons pu établir un bilan hydrique pour l'année 2000-2001 dont nous connaissons la pluviométrie.

Tableau 10 : Volume des réserves hydriques du bassin dans le cas d'une saturation totale

RU moyennes par classe (mm)	Surfaces des unités de chaque classe (ha)	Volumes = R U x surface (m3)
5	481	24050
15	1202	180300
35	609	213150
65	943	612950
100	988	988000
135	117	157950
totaux	4340	2176400

Tableau 11 : Volume des réserves hydriques du bassin versant en 2000-2001

RU moyennes par classe (mm)	Surfaces des unités (ha)	Coefficient d'abattement St.cum / Pcum	Volumes R U x surf x coef. (m3)
5	481	0,29	6974
15	1202	0,51	91953
35	609	0,63	134284
65	943	0,65	398417
100	988	0,65	642200
135	117	0,65	102667
totaux	4340		1376495

- hypothèse d'un remplissage partiel des RU des sols du bassin,

Les taux de remplissage réels des différentes RU des sols du bassin à l'issue de l'année 2000-2001, où il est tombé 350mm, sont obtenus par un cumul annuel des volumes de différentes classes (annexe B). La comparaison de ces cumuls de réserves saturées avec ceux des réserves non saturées de l'année 2000-2001 permet d'établir toute une série de coefficients d'abattement indiqués en colonne 3 du tableau 11. On note ainsi :

- que le rapport des volumes totaux des RU saturées de l'année « x » / RU partiellement remplies de 2000-2001 = 1,58,
- que la pluie de l'année « X » permettant de remplir toutes les réserves du bassin serait de 350 x 1,58 = 553 mm, qui correspond à une occurrence vicennale humide.

On se rend compte que les sols saturés du bassin pour cette année exceptionnellement humide contiendraient trois fois plus d'eau que le réservoir qui contient 710 000 m3 avant déversement et que, en 2000-2001, année d'occurrence quinquennale sèche, les sols du bassin contiennent encore deux fois plus d'eau que le réservoir. Bien évidemment il est rare d'observer une saturation simultanée de tous les sols du bassin versant ne serait-ce qu'à cause de l'hétérogénéité des précipitations sur des superficies de plusieurs km^2.

4 Conclusion

Le calcul et la représentation cartographique des réserves hydriques utilisables (RU) ont été réalisés à l'aide d'un S I G (Arc View) où la première couche d'information représente les contours d'unités de sols levées lors d'une prospection pédologique. Les autres couches, construites avec cette première carte, regroupent toutes les données nécessaires au calcul des RU : profondeur, texture et pierrosité.

Les données à notre disposition nous ont permis de déterminer six classes de RU, quatre d'entre elles se distribuent de façon assez homogène (# 20% de la superficie du BV), la classe la plus faible (0 à 10mm) ne représentant que 11% et la plus forte (120 à 150mm) à peine 3%. Deux processus orientent la distribution des classes de R U :

a) l'opposition des sols formés sur marnes de ceux formés sur calcaires, ce qui donne des RU assez étendues mais déviées vers de fortes humidités sur marnes, et des RU plus étroites et dans une gamme moins humide sur calcaires.

b) les différences de profondeur et de charge en cailloux qui révèlent deux groupes :

- des sols peu épais et caillouteux en sommets de formes, en limite de bassin et en aval sur croûtes,
- des sols épais, meubles sur les colluvions de versant et en élargissement de vallée.

Comme nous disposions des pluies et évaporations journalières de l'année 2000-2001, nous avons calculé les bilans hydriques journaliers prenant en compte les capacités réelles des RU ; il est apparu que les réserves ont été utilisées 32 fois en un an avec les seules saturations suivantes :

- sols à R U moyenne de 5 mm : 21 saturations
- sols à R U moyenne de 15 mm: 4 saturations
- sols à R U moyenne de 35mm : 1 saturation
- sols à R U moyenne de 65, 100 et 135 mm : jamais de saturation.

Compte tenu des faibles précipitations (350mm) et d'une ETP annuelle de 1896mm, les réserves atteignent un maximum de 291 mm pour les sols profonds de la classe des RU de 65mm.

Une utilisation simplifiée du bilan a permis de prévoir les doses d'irrigation pour trois céréales.

En travaillant uniquement sur les réservoirs hydriques, on a reconstitué, par classe de RU puis pour toutes les classes cumulées, un stockage de $1{,}38.10^6$ m^3 qui représente en 2000-001, année déficitaire, déjà deux fois la capacité du barrage avant déversement. De la même façon, si la totalité,

des RU venait à être saturée, on arriverait à un stockage total dans le sol de $2{,}18.10^6$ m^3 ce qui représenterait trois fois la capacité du barrage. Cette situation hypothétique correspondrait à une pluviométrie annuelle de 553mm, événement d'occurrence vicennale.

5 Bibliographie

Baize D. 1989 : *Guide des analyses courantes en Pédologie – choix, expression, présentation, interprétation*. INRA, 147 rue de l'Université 75007 Paris. 173p.

Brochet P., Gerbier N., 1974 : *L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique*. Mono.65, Météo Nat., Paris

Bruand A., Baize D., Hardy M., 1994: Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use manag*, 10, 3, 99-103.

Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M. 1996 : Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*. Vol. 3, n°1. 1996. pp 27 – 40.

Bruand A., Perez Fernandez P., Duval O., Quetin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L. 2002 : Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS / AFES*. Vol. 9, n°2 2002. pp 105 – 125

Collinet J., Zante P., Ghesmi M., 2001 : *Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne).* Convention CRDA Kef/ESAK/IRD, Programme : Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion - Opération : suivi pédologique de l'érosion des versants et impact des différentes techniques de CES sur les bilans de l'eau et des transports solides, Mission I R D de Tunis, Rapport Multigr 60p.

CPCS, 1967 : *Classification des sols par la Commission de Pédologie et Cartographie des Sols*. Coord. J. Boulaine , 27 collaborations. Labo. De Géologie – Pédologie de l'ENSA de Grignon. 87p.

Curmi P., 1987 : Comportement physique intrinsèque de mottes à macroporosité différente. In : *Soil compaction and regeneration* (G. Monnier et M.J. Goss eds.). Proc. Workshop on soil compaction: consequences and structural regeneration process, Avignon, 17-18 sept 1985, Balkema, Rotterdam.

F A O , 1968: *Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World.* World Soil Resources Report, FAO n°33. 73p.

Hallaire M., Bouchet R S., 1965 : La recherche de techniques nouvelles pour la mesure des évapotranspirations potentielle et réelle. *C. R. Acad. d'Agriculture de France*. Paris.

Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., 1977 : Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*. pp. 324-325, 627-641.

Penman HL., 1948 : National evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. T193 Londres*

Thornthwaite CW, Mather JR, 1957: Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol*., 311 p.

Turc L., 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évaporation potentielle. *Annales Agronomiques*. Paris.

Vacher J, 2000 : *Quelques résultats des recherches en agroclimatologie dans le programme HYDROMED*. Mission IRD Tunis, Rapport 17p.

ANNEXES

Annexe A : Table pour l'estimation des teneurs en eau aux potentiels remarquables, d'après Bruand *et al.*, 2002

Tableau 7 – Teneurs en eau volumiques aux différents potentiels de l'eau calculés à partir des classes de pédotransfert proposées après stratification texturo-structurales *(tableau 3)* et pour différentes valeurs de densité apparente de l'horizon ($D_{a,h}$) estimées à partir de la valeur médiane de la densité apparente de motte ($D_{a,m}$) au sein de chaque classe de $D_{a,m}$.

Table 7 *– Volumetric water contents at the different water potentials that were calculated using the class pedotransfer functions proposed after texturo-structural stratification (table 3) and for different values of horizon bulk density ($D_{a,h}$) that were similar to the median value of the clod bulk density ($D_{a,m}$) within every class of $D_{a,m}$.*

Classe de texture	Classe de $D_{a,m}$	Valeur estimée de $D_{a,h}$	Teneur en eau volumique $\theta_{log(v)}$						
			$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
			$cm^3\ cm^{-3}$						
	[1,2-1,3]	1,25	0,538	0,521	0,500	0,473	0,440	0,428	0,330
Argile lourde		1,15	0,495	0,480	0,460	0,435	0,405	0,393	0,304
(ALO)	]1,3-1,4]	1,35	0,473	0,467	0,451	0,428	0,400	0,378	0,305
		1,25	0,438	0,433	0,418	0,396	0,370	0,350	0,283
	]1,4-1,5]	1,45	0,480	0,467	0,451	0,434	0,403	0,379	0,315
		1,35	0,447	0,435	0,420	0,404	0,375	0,352	0,293
	]1,5-1,6]	1,55	0,402	0,395	0,388	0,374	0,349	0,324	0,287
		1,45	0,376	0,370	0,363	0,350	0,326	0,303	0,268
	]1,6-1,7]	1,65	0,376	0,361	0,348	0,333	0,317	0,300	0,266
		1,55	0,353	0,340	0,327	0,313	0,298	0,282	0,250
	[1,4-1,5]	1,45	0,381	0,365	0,344	0,318	0,284	0,247	0,216
Argile		1,35	0,355	0,340	0,320	0,296	0,265	0,230	0,201
(A, AL)	]1,5-1,6]	1,55	0,363	0,357	0,324	0,321	0,291	0,256	0,223
		1,45	0,339	0,334	0,303	0,300	0,273	0,239	0,209
	]1,6-1,7]	1,65	0,374	0,360	0,345	0,329	0,300	0,269	0,228
		1,55	0,352	0,338	0,324	0,309	0,282	0,253	0,214
	]1,7-1,8]	1,75	0,348	0,347	0,329	0,306	0,298	0,285	0,240
		1,65	0,328	0,327	0,310	0,289	0,281	0,269	0,226
	]1,8-1,9]	1,85	0,317	0,309	0,296	0,283	0,287	0,278	0,233
		1,75	0,300	0,292	0,280	0,268	0,271	0,263	0,221
	[1,5-1,7]	1,60	0,358	0,341	0,325	0,317	0,280	0,259	0,206
Argile sableuse		1,50	0,336	0,320	0,305	0,287	0,263	0,243	0,194
(AS)	]1,7-1,9]	1,80	0,333	0,328	0,308	0,290	0,274	0,245	0,216
		1,70	0,315	0,309	0,291	0,274	0,258	0,231	0,204
	[1,4-1,5]	1,45	0,386	0,365	0,351	0,305	0,234	0,183	0,155
Limon		1,35	0,359	0,340	0,327	0,284	0,217	0,170	0,145
(LM, LA)	]1,5-1,6]	1,55	0,369	0,352	0,341	0,302	0,253	0,195	0,163
		1,45	0,345	0,329	0,319	0,283	0,236	0,183	0,152
	]1,6-1,7]	1,65	0,371	0,360	0,343	0,320	0,266	0,211	0,173
		1,55	0,349	0,338	0,322	0,300	0,250	0,198	0,163
Limon sableux	[1,5-1,6]	1,55	0,355	0,344	0,313	0,259	0,209	0,189	0,160
		1,45	0,332	0,322	0,293	0,242	0,196	0,177	0,149
(LMS, LAS)	]1,6-1,7]	1,65	0,355	0,345	0,325	0,290	0,236	0,182	0,144
		1,55	0,333	0,324	0,305	0,273	0,222	0,171	0,135
	]1,7-1,8]	1,75	0,324	0,301	0,308	0,292	0,245	0,208	0,137
		1,65	0,305	0,284	0,290	0,276	0,231	0,196	0,129
	[1,5-1,7]	1,60	0,334	0,310	0,282	0,246	0,214	0,182	0,160
Limon très sableux		1,50	0,314	0,291	0,264	0,231	0,201	0,171	0,150
(LS, LSA)	]1,7-1,9]	1,80	0,317	0,304	0,288	0,270	0,252	0,211	0,160
		1,70	0,299	0,287	0,272	0,255	0,238	0,199	0,151
	[1,6-1,75]	1,68	0,306	0,286	0,254	0,212	0,180	0,148	0,121
Sable argilo-limoneux		1,58	0,288	0,269	0,239	0,199	0,169	0,139	0,144
(SL, SA)	]1,75-1,9]	1,83	0,317	0,297	0,262	0,225	0,185	0,157	0,119
		1,73	0,299	0,280	0,247	0,213	0,174	0,149	0,113
	[1,6-1,7]	1,65	0,279	0,229	0,163	0,140	0,112	0,086	0,061
Sable		1,55	0,262	0,216	0,154	0,132	0,105	0,081	0,057
(S)	]1,7-1,8]	1,75	0,236	0,207	0,133	0,107	0,075	0,067	0,058
		1,65	0,223	0,195	0,125	0,101	0,071	0,063	0,055

Annexe B : Exemple de calcul pour les RU 5 et 15mm en octobre 2000

Date	P	P cum	E bac	E cum	P-Ebac	P-Ecum	RU5	EXC5	DEF 5	RU15	EXC15	DEF 15	RU35	EXC35	DEF 35
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
01/10/00	14.5	44.5	3.2	171.7	11.3	-127.2	5	11.3	0	11.3	0	25	11.3	0	68
02/10/00	0.5	45	4.2	175.9	-3.7	-130.9	5	0	0	0	0	100	0	0	100
03/10/00	8.5	53.5	4.7	180.6	3.8	-127.1	3.8	0	24	3.8	0	75	3.8	0	89
04/10/00	4.2	57.7	4.5	185.1	-0.3	-127.4	0	0	100	0	0	100	0	0	100
05/10/00	0.8	58.5	0.6	185.7	0.2	-127.2	0.2	0	96	0.2	0	99	0.2	0	99
06/10/00	0	58.5	0.5	186.2	-0.5	-127.7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
07/10/00	0	58.5	1	187.2	-1	-128.7	0	0	100	0	0	100	0	0	100
08/10/00	0	58.5	3.1	190.3	-3.1	-131.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
09/10/00	0	58.5	3.5	193.8	-3.5	-135.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
10/10/00	0	58.5	5	198.8	-5	-140.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
11/10/00	0	58.5	4.5	203.3	-4.5	-144.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
12/10/00	0	58.5	5	208.3	-5	-149.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
13/10/00	0	58.5	5.5	213.8	-5.5	-155.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
14/10/00	0	58.5	6	219.8	-6	-161.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
15/10/00	0	58.5	3.5	223.3	-3.5	-164.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
16/10/00	0	58.5	3.5	226.8	-3.5	-168.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
17/10/00	0	58.5	4	230.8	-4	-172.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
18/10/00	0	58.5	3	233.8	-3	-175.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
19/10/00	0	58.5	3	236.8	-3	-178.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
20/10/00	0	58.5	2.5	239.3	-2.5	-180.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
21/10/00	0	58.5	3	242.3	-3	-183.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
22/10/00	4.1	62.6	2.7	245	1.4	-182.4	1.4	0	72	1.4	0	91	1.4	0	96
23/10/00	1.4	64	2.6	247.6	-1.2	-183.6	0	0	100	0	0	100	0	0	100
24/10/00	0	64	1.2	248.8	-1.2	-184.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
25/10/00	0.5	64.5	1	249.8	-0.5	-185.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
26/10/00	27.5	92	1.5	251.3	26	-159.3	5	21	0	15	11	0	26	0	26
27/10/00	1.5	93.5	4	255.3	-2.5	-161.8	5	0	0	0	0	100	0	0	100
28/10/00	0	93.5	0.5	255.8	-0.5	-162.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
29/10/00	0	93.5	1	256.8	-1	-163.3	0	0	100	0	0	100	0	0	100
30/10/00	0	93.5	1.5	258.3	-1.5	-164.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100
31/10/00	0	93.5	2	260.3	-2	-166.8	0	0	100	0	0	100	0	0	100

Légende des colonnes :
(1) : date en jours, mois, années,
(2) : P = pluies en mm/jour,
(3) : P.cum = pluies cumulées en mm, depuis le 01/09
(4) : E. bac = évaporation mesurée sur un bac de type Colorado, en mm/jour,
(5) : E. cum = évaporation bac cumulée en mm, depuis le 01/09
(6) : P-Ej = différence pluie-évaporation journalière, ce paramètre permet aussi de calculer les doses d'irrigation d'appoint,
(7) : P-Ej cum = différence pluies – évaporations cumulées, permet de connaître le déficit annuel
(8), (11) (14) : RU 5, RU 15, RU 35 sont les réserves hydriques utilisables de sols disposant de 5, 15 ou 35mm de capacité de stockage, ces réserves sont totalement remplies si la différence P-E est respectivement $\geq$ 5, 15 ou 35mm,
(9), (12), (15) : Exc 5, Exc 15, Exc 35 sont les excédents journaliers qui se partagent entre ce qui peut drainer plus profondément que le sol lui-même (roche fissurée) et ce qui ruisselle, en notant que l'excédent de J_{-1} participe à la recharge de RU au jour J,
(10), (13), (16) : Déficits en % de la capacité de la RU

Comportement sous pluies simulées de sols argilo-limoneux irrigués par submersion ou aspersion

Hachicha M.* Et Pontanier R.**

* INRGREF, 17 rue Hédi Karray, BP n°10 - Ariana 2080, Tunisie
* IRD, pédologue, Directeur de Recherche, décédé en décembre 2003

RESUME

Des simulations de pluies ont été menées sur des parcelles labourées et d'autres non labourées à surface battante dans les périmètres de Kalaât Landelous et Cebalat Borj-Touil. Ces périmètres diffèrent essentiellement par le mode d'irrigation conduisant la surface du sol irrigué à deux états différents. A Kalaât Landelous, l'aspersion génère une croûte de battance. A Cebalat, la submersion conserve les fentes. Les pluies automnales s'exprimant par une bonne infiltration et par conséquent par une meilleure lixiviation des sels n'apparaissent efficaces qu'en présence du labour et de la submersion. Dans les autres cas, les fortes pluies favorisent le ruissellement où la stagnation conduit à la dégradation de la structure par le déplacement des éléments fins vers les microdépressions et l'enrichissement de la surface en limons. La désagrégation mise en place sous lame d'eau ou sous pluies simulées donne lieu à des organisations superficielles qui agissent fortement sur les phénomènes de transferts hydriques et des solutés. Plusieurs aspects apparaissent liés à l'un ou l'autre des modes d'irrigation: aspersion et submersion.

Mots clés**:** Sol argilo-limoneux - Simulation de pluie – Milieu semi-aride – Irrigation - Basse Vallée de la Mejerda.

Behavior under simulated rains of irrigated clay silty soils by surface or sprinkler

ABSTRACT

Simulations of rains were carried out on plowed parcels and others not plowed with crusting surface in the areas of Kalaât Landelous and Cebalat Borj-Touil. These areas differ primarily by the system of irrigation leading the surface of the irrigated soil to two different states. In Kalaât Landelous, sprinkler system generates a crust. In Cebalat, the surface system preserves the slits. The results of simulation show the rains of low intensities infiltrate more than they give streaming because they modify only slightly the structural soil surface organization, contrary to the rains of high intensities. Ploughing is favorable to the infiltration of water and the reduction of the streaming. The rains are more effective in the surface irrigation. In the case of sprinkler, the strong rains support it streaming where stagnation leading to the degradation of the structure which acts on the transfers phenomena of water and salts.

Key words**:** Clay silty soil - Simulation of rain – Semi arid region – Irrigation - Low Mejerda Valley.

INTRODUCTION

Les organisations superficielles jouent un rôle déterminant dans le régime hydro-salin des sols et sur la lixiviation des sels surtout en milieu semi-aride. Le phénomène de battance (soil crusting) apparaît à la surface des sols meubles sous l'impact des gouttes de pluie qui détruisent les agrégats de la surface du sol (McIntyre, 1958). Les matériaux arrachés sont redistribués sur place formant un mince film d'épaisseur inférieure à 1 mm, auquel Escadafal (1989) propose le terme de "pellicule de

battance" (structural crusts) par opposition aux croûtes sédimentaires (depositional crusts) qui, par l'entraînement des matériaux, se forment dans les micro-dépressions en constituant des dépôts lités de plusieurs millimètres d'épaisseur. Souvent, lors du dessèchement, ces croûtes se craquellent en fragments convexes sous l'effet de tensions internes.

Valentin (1985) définit des niveaux d'organisation des pellicules superficielles (O.P.S) à la fois par leur structure lamellaire et leur cohésion. Ces O.P.S correspondent à des différenciations morphologiques. Elles présentent également des comportements mécaniques, vis-à-vis de la dynamique de l'eau, différents de ceux des matériaux sous-jacents. Les O.P.S possèdent de faibles conductivités hydrauliques qui peuvent être plusieurs fois inférieures à celles du sol sous-jacent. Elles agissent comme une barrière hydraulique (Hillel, 1988). Cette discontinuité de porosité peut également protéger le sol de l'évaporation. De nombreux facteurs conditionnent la conductivité hydraulique saturée (Ks). Selon Sumner (1993), la présence en proportion importante de sodium échangeable s'accompagne généralement d'une baisse de la conductivité hydraulique. Un équilibre s'établit entre le sol et l'eau d'irrigation légèrement saumâtre; la valeur de Ks se maintient alors constante. Lorsqu'il pleut, par contre, le déséquilibre ionique provoque la dispersion des argiles, qui bloquent les pores et Ks se trouve ainsi diminué (Qadir et Schubert, 2002). La dégradation de la structure des sols lourds suite à leur humectation peut se produire par éclatement, compaction, action mécanique des eaux pluviales, gonflement et dispersion.

En Tunisie, la battance des sols est un aspect fréquemment observé dans les sols limoneux irrigués. Floret et *al.* (1989) ont constaté que les sols vertiques mal drainés sont sujets à la battance. Elle est déterminante sur l'efficacité tant de l'infiltration, du ruissellement et de l'évaporation que de la lixiviation des sels. Dans une expérience de lessivage artificiel des sels réalisée dans la plaine d'Utique, le sol fortement salin et sodique a été désalinisé. A côté du drainage, l'efficacité du lessivage a été considérablement améliorée quand la surface du sol a été labourée. Pour analyser le rôle de l'état de la surface du sol dans l'efficacité de la pluie à lixivier les sels, une expérimentation de simulation artificielle de la pluie a été menée sur des parcelles situées dans la Basse Vallée de la Mejerda. L'essai a été réalisé en automne, à la fin du cycle d'irrigation sur des sols ayant été irrigués mais aussi sur des sols fraîchement labourés.

MATERIELS ET METHODES

Le milieu physique

L'expérimentation a été menée dans les périmètres irrigués de Kalaât Landelous et de Cebalat Borj-Touil qui se situent dans la Basse Vallée de la Mejerda (Figure 1). La région présente un climat méditerranéen semi-aride supérieur. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 470 mm (1964-2000). Les terres sont constituées des alluvions argilo-limoneuses calcaires déposées par la Mejerda. Il s'agit de sols peu évolués à caractères d'halomorphie et d'hydromorphie à dominance d'argiles gonflantes. Le périmètre de Kalaât est irrigué par l'eau de l'Oued Mejerda ayant une conductivité électrique d'environ 3,8 dS/m alors que celui de Cebalat est irrigué par les eaux usées épurées traitées ayant une conductivité électrique d'environ 5 dS/m.

La simulation de pluie

Le simulateur de pluie permet de produire un flux de gouttes d'eau, de taille et d'énergie cinétique comparables à celles des gouttes de pluies naturelles (Asseline et *al.*, 1989; Floret et *al.*, 1989). On obtient facilement, par des mesures d'écoulement superficiel et des prélèvements d'eaux turbides, des valeurs de ruissellement, d'infiltration et d'érodibilité. Chaque parcelle sélectionnée pour une expérimentation de simulation de pluie est décrite en terme d'occupation des terres et de caractérisation des états de surface. Pour cela, la méthode des points quadrats est utilisée. L'appareil de lecture des états de surface comprend un cadre mobile équipé latéralement de deux réglettes à 19

encoches (une tous les 5 cm), qui s'adaptent sur le cadre de la parcelle de 1 m^2. Sur le cadre à encoches, on installe un bâti-potence amovible servant de guide à 19 aiguilles et matérialisant la ligne du sol sur laquelle sont notés le type de contact au sol, le nombre de contacts aériens avec la végétation et les différences de dénivelés par rapport à un niveau de référence. Ce bâti conçu pour être extensible en hauteur, s'adapte sur les encoches latérales du cadre. Les mesures et lectures s'effectuent tous les 5 cm, ligne après ligne, en commençant par l'amont de la parcelle et de la gauche vers la droite en regardant l'amont. On réalise ainsi 19 lectures par ligne ce qui représente 361 points au total pour une parcelle de 1 m^2.

Figure 1. Localisation des périmètres irrigués de Kalaât Landelous et Cebalat Borj-Touil.

Un programme permet à partir de ces 361 triplets de mesures (hauteur aiguille, état de surface, nombre de contacts avec la végétation), de calculer la rugosité, la densité de la végétation et le pourcentage de chaque état de surface.

Les essais de simulation ont été réalisés sur des sols secs en surface environ un mois après l'arrêt des irrigations. Aussi bien à Kalaât qu'à Cebalat, l'humidité pondérale était de l'ordre de 17 % en surface et 24 % vers 1 m de profondeur (l'humidité à pF 4,2 est d'environ 17 % et à pF 2,7 égale à 28 %). Le sol du périmètre de Kalaât est légèrement plus argileux, moins limoneux, moins salé et aussi pauvre en matière organique et sodique que celui de Cebalat (Tableau 1). Son irrigation par aspersion a conduit à la formation d'une pellicule de battance qui atteint 85 % de l'état de surface (Tableau 2).

Tableau 1. Caractérisation pédologique de la surface des parcelles (0-10 cm), à la fin du cycle d'irrigation et sans labour.

Périmètre	Granulométrie (%)					Calcaire (%)		M.O.	CEe	ESP
	A	Lf	Lg	Sf	Sg	Total	Actif	(%)	dS/m	
Kalaât	32	27	23	18	0	38	15	1,2	4,5	14
Cebalat	27	34	22	13	1	47	23	0,7	5,3	14

A: Argile, Lf: Limon fin, Lg: Limon grossier, Sf: Sable fin, Sg: Sable grossier

M.O.: Teneur en matière organique

CEe: Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée du sol

ESP: Pourcentage de sodium échangeable

Tableau 2. Etats de surface des parcelles expérimentales de simulation. (moyenne de deux répétitions).

Périmètre / Irrigation	Sites	Occupation du sol	Pente	Etat de surface (%)				
			(%)	Vég.	Bat.	Rec.	Nu	Fen.
Kalaât/	KL2 et KD3	Ch.+Pel. battance	1,1	9	85	2	4	0
Aspersion	KL3 et KD2	Labour	1,3	14	0	0	86	0
Cebalat/	CL3 et CF2	Ch.+Pel. battance	1,3	18	56	5	0	21
Submersion	CF3 et CL2	Labour	1,3	6	0	0	94	0

Ch.+Pel.battance: Chaume de maïs et pellicule de battance

Vég.: Végétation au sol

Bat.: Pellicule de battance

Fen.:Fentes

Rec.: Recouvrement sableux

Nu: Sol nu sans battance

Dans le sol de Cebalat et après un cycle d'une dizaine d'irrigations estivales par submersion, la structure de la surface du sol a évolué d'un état de labour rugueux vers un état massif à éléments structuraux polygonaux de l'ordre d'une dizaine de centimètres de côté. Ces éléments sont séparés par des fentes de l'ordre de 3 mm de large qui s'enfoncent à environ 10 cm. Ils sont arrondis au sommet et couverts par une fine pellicule de matière organique. L'état de surface engendré par les irrigations était à 56 % formé par une pellicule de battance et à 21 % par des fentes.

Les essais de simulation de pluie sont réalisés sur des parcelles échantillons de 1 m^2 soumises à trois séquences d'averses:

- séquence P1: présentant des averses de 20, 40 et 80 mm/h pendant 15 mn chacune;
- séquence P2: présentant des averses de 30 puis 60 mm/h pendant 20 puis 15 mn, P2 est réalisée 24 heures après P1;
- séquence P3: averse de 120 mm/h pendant 10 mn, 15 mn après P2.

Sur chacune de ces séquences, les variables suivantes sont déterminées:

- I mm/h: intensité de la pluie
- Pu mm: pluie utile = hauteur totale de l'averse
- Pi mm: pluie d'imbibition = Pu - Pe
- Pe mm: pluie efficace = hauteur de la pluie ayant effectivement donné lieu à du ruissellement
- Lr mm: lame ruisselée
- Kru (%): coefficient de ruissellement utile = [(Lr+Dr)/Pu]*100
- Kre (%): coefficient de ruissellement efficace = [(Lr+Dr)/Pe]*100
- E (g/m2): érodibilité ou détachabilité en g pour 1 m^2
- Er (g/mm): érosivité d'un mm d'eau ruisselée = E/Lr
- Rx mm/h: intensité maximale de ruissellement
- Fn mm/h: infiltration minimale stabilisée = I-Rx
- W mm: lame infiltrée = Pu-Lr

Lors d'une averse, le sol s'humecte puis génère le ruissellement. La première fraction de la pluie est appelée pluie d'imbibition (Pi) et la seconde partie, qui ruisselle, est appelée pluie efficace (Pe). Ces événements dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. Sous l'impact des gouttes de pluie, la structure de la surface du sol se dégrade et se réorganise. Cet aspect est aussi fonction de l'intensité de la pluie et de l'état de surface du sol. Le coefficient de ruissellement (Kre) permet de distinguer les différences de comportement pendant la phase ruissellement.

Les essais de simulation de pluie sont également utilisés pour définir la conductivité hydraulique de sols saturés sous pluie (Casenave, 1982). L'intensité limite de ruissellement est un facteur caractéristique des réactions d'un sol à une précipitation. Elle est définie comme l'intensité de pluie au dessus de laquelle le sol présente un refus d'infiltration et un ruissellement peut apparaître. Elle est généralement évaluée par tâtonnements (Chevallier, 1982). Cette intensité limite varie en fonction de l'état hydrique du sol et se stabilise à saturation.

Pour définir l'infiltration maximale de ces sols sous conditions de saturation, on a procédé, à côté des essais de simulation, à des mesures de la vitesse d'infiltration par la méthode Müntz. La méthode sert d'habitude à cerner les paramètres d'irrigation aussi bien par submersion que par aspersion bien qu'elle ne soit pas normalement conçue pour cette méthode. La comparaison des conductivités hydrauliques à saturation (Ks), estimées par plusieurs méthodes, permet d'évaluer la validité de ces méthodes dans ce type de sol. Dans les mesures par la méthode Müntz, l'infiltration sous lame d'eau constante de 3 cm est suivie pendant 90 mn. Le ruissellement est nul or ce facteur peut modifier l'état de surface. D'autre part, les réactions de la surface du sol à l'impact des gouttes de pluie ne sont pas les mêmes que pour l'apport d'une épaisse lame d'eau (Floret et al., 1989).

Expérimentation

On a effectué deux tests avec deux répétitions par périmètre correspondant à deux états de surface sur lesquels se produisent les pluies précoces d'automne. Dans le premier cas, les pluies surviennent juste après la récolte d'une culture irriguée. Dans le deuxième cas, ces pluies se produisent sur un sol récemment labouré. Les sols des parcelles de Kalaât ont été préalablement cultivés en maïs irrigué par aspersion avec l'eau de la Mejerda. Ceux des parcelles de Cebalat ont été eux aussi cultivés en maïs mais irrigué par submersion avec l'eau usée traitée.

Pour évaluer l'effet des essais de simulation de pluie sur l'état salin du sol, des échantillons ont été prélevés dans la couche 0-20 cm. Ils ont servi à la détermination de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (CEe). Cinq échantillons par placette ont été réalisés avant et à la fin des

essais. Il faut signaler que les essais de simulation ont été conduits avec de l'eau du robinet ayant environ une conductivité électrique de 1 dS/m.

RESULTATS

1. Evolution sous pluies simulées

1.1. Efficacité du ruissellement

L'efficacité du ruissellement analysé par le coefficient de ruissellement (Kre) est abordée pour deux états hydriques et deux états de la surface du sol (Tableau 3).

Tableau 3. Ruissellement et érosivité des sols de Kalaât et de Cebalat en fonction de l'intensité de la pluie et l'occupation du sol. (Kre: coefficient de ruissellement efficace et Er: Erosivité)

.

Périmètre	Occupation du sol	Séquence	I(mm/h)	Kre(%)	Er(g/mm/m²)
Kalaât	**Chaume + Pellicules de battance**	**P1**	20	0	0
			40	0	0
			80	20	3,5
		P2	30	10	1
			60	26	2
		P3	120	61	4
	Labour	**P1**	20	0	0
			40	0	0
			80	3	0
		P2	30	3	0
			60	3	0
		P3	120	11	4
Cebalat	**Chaume+Pellicules de battance**	**P1**	20	0	0
			40	0	0
			80	15	3
		P2	30	19	4
			60	44	4
		P3	120	51	9
	Labour	**P1**	20	0	0
			40	0	0
			80	7	0
		P2	30	4	1
			60	6	2
		P3	120	17	3

A Kalaât sur sol sec (séquence d'averses P1), le ruissellement est nul jusqu'à une intensité de 40 mm/h. Il ne devient effectif qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h dans les parcelles labourées. Sur sol humide (séquence d'averses P2 intervenant après une séquence de pluies P1 conduite la veille), le ruissellement se produit même à une intensité de 30 mm/h pour une durée de l'averse de 15 mn. Ce ruissellement est environ 3 fois plus important quand le sol est humide que quand il est sec et 7 à 20 fois plus élevé sur un sol couvert par une pellicule de battance que sur un labouré. A Cebalat, le ruissellement est 2 à 5 fois plus élevé sur un sol couvert par une pellicule de battance que sur un sol labouré et 2 à 3 fois plus important sur un sol humide que sur un sol sec. Eu égard aux mesures réalisées à Kalaât et à Cebalat, le sol de Cebalat comportant des fentes en surface engendre un ruissellement d'environ 30 % inférieur à celui de Kalaât dépourvu de fentes. Par ailleurs, le sol humecté par l'averse P1 qui précède P2, produit toujours un ruissellement, même aux faibles intensités.

1.2. Evolution de l'érosivité des sols

Dans le cas où les averses sont conduites sur le sol sec de Kalaât, en fin de culture, couvert d'une pellicule de battance, l'érosion ne se manifeste qu'à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité (détachabilité) du millimètre d'eau ruisselé est d'environ 3,5 g/mm/m² (Tableau 3). Si le sol est humide, cette érosion se produit avec une pluie de 30 mm/h. Dans ce cas, l'érosivité est d'environ 1 g/mm/m² pour une pluie de 30 mm/h et s'élève à 4 g/mm/m² quand la pluie est de 120 mm/h. Quand ces averses surviennent sur un labour, que le sol soit sec ou humide, l'érosion ne se manifeste que pour une intensité élevée, égale à 120 mm/h (Figure 2). L'érosivité est de même grandeur sur sol sec que sur sol humide. Elle est d'environ 4 g/mm/m² soit 0,04 t/ha par mm ruisselé. Dans le cas du sol sec de Cebalat, couvert par une pellicule de battance, l'érosion apparaît à partir d'une intensité de 80 mm/h. L'érosivité est d'environ 3 g/mm/m². Sur sol humide, l'érosivité est d'environ 4 g/mm/m² aussi bien pour 30 mm/h que pour 60 mm/h. Elle double pour une intensité de 120 mm/h. Si les averses sont appliquées à un sol labouré sec, l'érosion est pratiquement nulle jusqu'à une intensité de 80 mm/h. Si le sol est humide, elle se déclenche à partir de 30 mm/h (1 g/mm/m²) et triple à 120 mm/h.

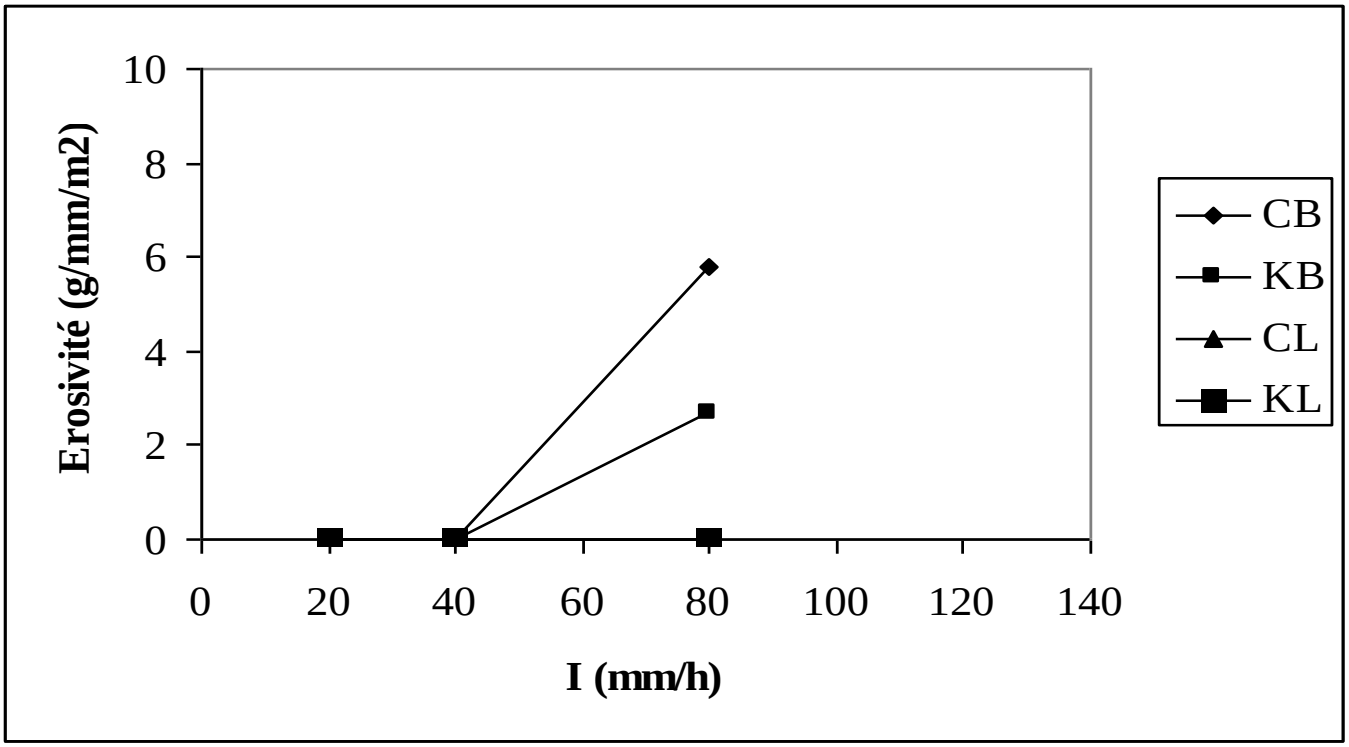
1.3. Aspects relatifs à lixiviation des sels

Les sols soumis aux essais de simulation avaient initialement, dans la couche 0-10 cm, une CEe d'environ 4,5 dS/m à Kalaât et environ 5,3 dS/m à Cebalat. A la fin des essais, ces valeurs étaient d'environ 2,2 à Kalaât et environ 3,1 dS/m à Cebalat. Cette lixiviation des sels est le résultat de la dissolution des accumulations salines et de l'entraînement des sels libres.

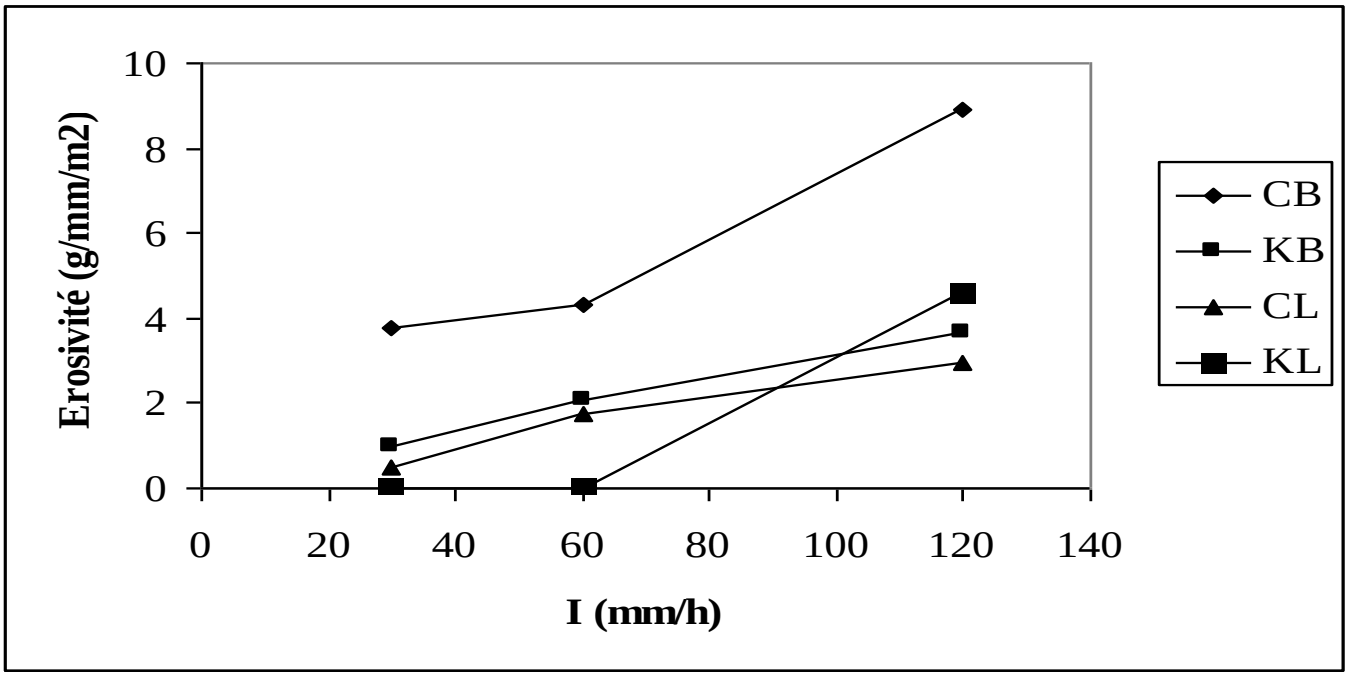
Dans les périmètres de Cebalat et Kalaât, les chlorures de sodium, en majorité des halites prédominent largement sur les autres types de sels. Comme ces sels sont très solubles et que la durée des mesures est suffisante pour les dissoudre, on peut considérer qu'une bonne infiltration est la condition sine qua non pour une bonne lixiviation des sels. Deux contraintes majeures s'opposent à cette hypothèse. D'abord, la tranche de sol humecté dans les essais de simulation est souvent une couche de surface alors que la lixiviation des sels concerne tout l'horizon. Ensuite, le ruissellement de surface contribue à emporter les sels accumulés en surface. Néanmoins, dans les conditions de Kalaât et Cebalat, le ruissellement est faible et local et la présence d'une nappe phréatique à moins de 1,60 m maintient le sol à une humidité élevée. Dans ces conditions, l'efficacité de la lixiviation des sels est très dépendante de l'efficacité de la pluie dans la recharge des réserves en eau du sol. En s'appuyant sur cette approximation (qui ne s'éloigne pas de la réalité), l'efficacité de l'infiltration et par conséquent celle de la lixiviation des sels diminue quand celle du ruissellement augmente et vice versa.

2. Evaluation de la conductivité hydraulique sur sol saturé à la fin de la simulation

Les conductivités hydrauliques saturées déterminées par le dispositif Müntz ou calculées par les pluies simulées ne sont pas directement comparables, puisqu'elles ne correspondent pas aux mêmes approches. Cependant, plusieurs auteurs ont tenté de faire la comparaison (Lafforgue et al., 1976; Valentin, 1985). Dans nos simulations de pluies, on aboutit à des intensités limites de ruissellement qui se rapprochent assez des conductivités hydrauliques saturées obtenues par la méthode Müntz (Tableau 4).



Sol sec



Sol humide

KALAAT:
KL: Kalaât - Labour
KB: Kalaât - Chaume et pellicule de battance

CEBALAT:
CL: Kalaât - Labour
CB: Kalaât - Chaume et pellicule de battance

Figure 2. Variation de l'érosivité en fonction de l'occupation du sol et de son état hydrique.

Tableau 4. Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à partir des mesures Müntz (Km) et des valeurs d'intensité limite de ruissellement (Il) (en mm/h).

Périmètre	Sites	Etat de surface après simulation	Km	Il
				P3
Kalaât	KL2-KD3	Chaume+Pellicule de battance	24	15
	KL3-KD2	Labour+Pellicule de battance induite par les averses	102	107
Cebalat	CF2-CL3	Chaume+Pellicule de battance +fentes	74	58
	CF3-CL2	Labour+Pellicule de battance induite par les averses	528	109

* Les valeurs de Km proviennent de 4 répétitions.

- Par le dispositif de Müntz: A Kalaât, les mesures faites sous lame d'eau de 3 cm employant le dispositif de Müntz et réalisées à la fin des séquences de la simulation dans les parcelles labourées, aboutissent à des conductivités hydrauliques à saturation ($Ks_{Müntz}$) de l'ordre de 102 mm/h, soit quatre fois plus élevées que dans les parcelles couvertes par des pellicules de battance où elle est de l'ordre de 24 mm/h (Tableau 4). A Cebalat, sur les labours qui ont subi les averses de la simulation, $Ks_{Müntz}$ est de 528 mm/h. Pour les parcelles à la fois couvertes par une pellicule de battance et fissurées, $Ks_{Müntz}$ n'est que de 74 mm/h.

- Par les intensités limites des simulations de pluie: Valentin (1985) considère que l'intensité limite de ruissellement (Il) de la dernière séquence pluvieuse peut être assimilée à la conductivité hydraulique saturée. A Kalaât, la valeur de Il de la dernière séquence pluvieuse P3 est d'environ 107 mm/h pour les parcelles labourées et 15 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance. A Cebalat, la valeur de Il de P3 est d'environ 109 mm/h pour les parcelles labourées et 58 mm/h pour celles couvertes par une pellicule de battance et fissurées.

Mise à part la valeur élevée de $Ks_{Müntz}$ dans le cas du labour à Cebalat et compte tenu de la forte variabilité de la perméabilité, l'écart des résultats est inférieur à 37 %. Les approches très différentes ne conduisent pas à des résultats similaires. Si on peut admettre les intensités d'infiltration mesurées par la méthode de Müntz et réalisées en condition de saturation maximale pour estimer les doses d'irrigation par submersion, il est par contre plus exact de se baser sur les essais de simulation de pluies pour concevoir les irrigations par aspersion qui sont mieux reproduites par ces essais. En effet, l'eau est rapportée gravitairement dans la submersion alors qu'il est projeté sur le sol sur une certaine distance par aspersion.

Discussion et conclusion

Lors des averses, les sols argilo-limoneux des périmètres irrigués de la Basse Vallée de la Mejerda s'humectent avant de générer le ruissellement. Cette humectation et ce ruissellement dépendent de l'état de surface et de l'intensité de la pluie. La réorganisation de la surface sous l'impact des gouttes de pluie est plus importante pour le labour et se traduit par la diminution de l'infiltration au cours des averses successives. L'état de surface tend alors à se rapprocher de celui du sol nu battant non labouré. Les pluies d'intensités faibles s'infiltrent plus qu'elles ne donnent lieu à un ruissellement car elles ne modifient que faiblement l'organisation structurale de la surface du sol, contrairement aux pluies d'intensités élevées. Le ruissellement se déclenche à des moments différents suivant les états de surface. La cohésion des agrégats sur sol sec battant ralentit leur mobilisation. Après humidification, la mobilisation d'éléments fins désagrégés par les pluies précédentes est rapide. Les fentes qui apparaissent sur alluvions argileuses ne se referment qu'après un certain temps et allongent par conséquent la durée d'imbibition. Sur labour, la désagrégation des agrégats est très différente suivant leur état d'hydratation initial. Lorsque les agrégats sont secs, la désagrégation est plus importante et un excès d'eau apparaît rapidement en surface. En revanche, lorsqu'ils sont saturés, la croûte se forme lentement et l'infiltrabilité reste élevée. Ainsi, une averse de 30 mm/h sur

sol déjà humide apparaît dans certaines parcelles, plus érosive qu'une averse de 60 mm/h sur sol sec. En fait, dans une séquence se simulation de pluie donnée, les averses de faibles intensités qui précèdent une averse plus intense, commencent par humecter les agrégats qui éclatent progressivement. Les éléments fins déliés de leur squelette sont ainsi disponibles à l'entraînement et au transfert horizontal, ce que l'intensité des pluies qui succèdent se charge de faire. Ce raisonnement s'applique également à l'enchaînement des séquences P1, et P2 et P3 réalisé après 24 heures de ressuyage. Il serait donc hasardeux de voir chaque résultat obtenu en dehors du protocole expérimental. Au cours de chaque averse et aussi au cours de la même averse, les organisations superficielles subissent des modifications morphologiques et physico-hydriques et les couches sous-jacentes se saturent en eau. Cet enchaînement d'événements se traduit par des comportements mécaniques et hydriques en constante évolution.

L'infiltration des pluies est fortement augmentée par des façons culturales qui préparent les sols à mieux infiltrer l'eau et qui sont ainsi moins affectés par le ruissellement et par l'érosion. L'irrigation par aspersion apparaît moins favorable à l'infiltration. Cependant, cet inconvénient disparaît complètement après un labour. Ainsi, le comportement du sol à la fin d'un cycle d'irrigation est nettement différent entre Cebalat où l'irrigation se fait par submersion et Kalaât où l'irrigation se fait par aspersion. Cette différence n'est plus significative après un labour. Cette efficacité des pluies joue positivement sur l'entraînement des sels. Il s'ensuit que la mise en valeur des sols salés de la région doit intégrer judicieusement l'apport favorable des pluies en favorisant l'infiltration.

Le mode d'irrigation génère une réorganisation superficielle du sol. L'irrigation par aspersion produit des pellicules de battance favorables à la formation de flaques et au ruissellement. Le travail du sol et en particulier le labour après la récolte de la culture estivale, est une mesure anti-érosive efficace pour la lixiviation des sels. Cependant, après les premières averses d'automne, le sol humecté devient boueux et un nouvel obstacle à l'infiltration réapparaît.

Par ailleurs, les organisations pelliculaires de surface (O.P.S) réduisent les pertes d'eau par évaporation. Le tassement de l'horizon travaillé et son assèchement conduisent à une "auto-protection" qui ralentit la remontée des sels. La présence d'O.P.S limite considérablement l'entraînement des sels vers les drains.

A la limite, on peut concevoir l'efficacité de la lixiviation des sels qui serait inversement proportionnelle au coefficient du ruissellement efficace Kre. Ainsi, sur sol humide, l'efficacité de la lixiviation des sels diminue d'environ 10 à 30 %, toute chose étant par ailleurs égale.

Réalisées à la fin des simulations de pluies, nos observations ont permis de noter que les microhorizons apparaissent réduits à un premier niveau de 1 mm environ à dominance de limons suivi d'un second niveau plus épais formé de matériaux compacts. Ces deux niveaux forment une croûte qui se distingue du microhorizon sous-jacent dont elle est séparée par de gros pores. Des agrégats, formés au cours du labour, restent identifiables. Ces organisations s'apparentent à celles générées sous irrigation par aspersion. D'ailleurs, plusieurs auteurs ont employé cette technique pour le choix des asperseurs adéquats (Valentin et Ruiz Figueroa, 1987). Au cours d'un itinéraire d'irrigation, les organisations qui résultent de l'une des deux méthodes d'irrigation sont détruites par le labour. Ce dernier a pour effet de bouleverser la structure de l'horizon de surface. Le labour, suivi des pluies et de la dessiccation, s'accompagne de la formation d'une organisation de surface dont la porosité est nettement plus réduite que l'organisation initiale. En ce qui concerne le comportement hydrodynamique et la conséquence sur la lixiviation des sels, on constate que:

- l'horizon à gros pores situé sous l'organisation de surface à pores plus fins stoppe momentanément la progression du front. L'eau s'accumule à la base du matériau à pores fins

jusqu'à ce que le potentiel soit devenu suffisamment bas pour permettre l'entrée de l'eau dans l'horizon suivant (Hillel et Garder, 1969).

- au cours des irrigations, le microhorizon peu perméable en surface expose plus l'eau à l'ensoleillement et à l'évaporation. A la fin des irrigations, cet obstacle hydraulique protège le sol du dessèchement. Le flux ascendant des sels depuis la nappe phréatique superficielle salée se trouve ainsi réduit.
- les organisations de surface qui résultent de l'aspersion limitent l'infiltration. La parcelle irriguée par submersion présente une conductivité hydraulique saturée (74 mm/h) à peu près triple de celle générée par aspersion (24 mm/h). Il faut aussi noter l'effet des fentes qui restent ouvertes sous submersion et disparaissent sous aspersion.

Le mode d'irrigation conduit donc la surface du sol irrigué à deux états différents. Les fissures, présentes ordinairement dans les sols irrigués par submersion, n'existent plus après aspersion. La nature des organisations superficielles, liées au mode d'irrigation (aspersion et submersion), entraîne donc un comportement différent des sols vis à vis de l'eau, des solutés et de la détachabilité des matériaux.

Ainsi, les sols limono-argileux et salins du périmètre de Kalaât et Cebalat subissent, entre l'automne et l'été, l'impact des pluies qui permettent une certaine lixiviation des sels et une réorganisation de leur surface. Dans ce contexte, la désalinisation des sols et leur réhabilitation peuvent être rendues plus rapides et moins coûteuses si la gestion des sols et des eaux tient plus compte du régime des pluies. L'amélioration des propriétés hydrodynamiques, en particulier la conductivité hydraulique à saturation, est un préalable à leur récupération. Son estimation permet d'ajuster la gestion des eaux d'irrigation et la conception du drainage des terres. Les données de l'essai de simulation de pluie permettent de mieux caler les caractéristiques des asperseurs employés dans l'irrigation.

BIBLIOGRAPHIE

Asseline J., Escadafal R., Mtimet A., 1989.- Infiltromètre à aspersion - Dépouillement des données de terrain par micro-ordinateur (1985). Sols de Tunisie n°14. pp. 133-158.

Casenave A., 1982.- Le mini-simulateur de pluie: conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., Vol.XIX, n°4: 207-228.

Chevallier P., 1982.- Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens. Cah. ORSTOM, Série Hydrol., Vol.XIX, n°4: 253-297.

Escadafal R., 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie) - Collection Etudes et thèses. Edition ORSTOM. Paris, 317 p.

Floret Ch., Mtimet A., Pontanier R., 1989.- Caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols en zone aride. Sols de Tunisie n°14. pp. 63-109.

Hillel D., Gardner W.-R., 1969.- Steady infiltration into crust topped profiles. Soil Sc., 108: 137-142.

Hillel D., 1988.- L'eau et le sol:principes et processus physiques. Ed. Academia. Louvain-La-Neuve Belgique, 294 p.

Lafforgue A., Naah E., 1976.- Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 13 (3): 115-237.

Mc Intyre D.-S., 1958.- Permeability measurements of soil crusts formed by impact. Soil Sci., 85: 185-189.

Qadir M. and Schubert S., 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. Land Degradation Development 13: 275-294.

Sumner M.E., 1993.- Sodic soils: new perspectives. Aust. J. Soil Res., 31 pp. 683-750.

Valentin C., 1985.- Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Edit. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris. 253 p.

Valentin C. et Ruiz Figueroa J., 1987.- Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology. Edit. AFES (Plaisir, France): 401-408.

La surface des sols des régions arides : lien entre l'écologie de terrain et la télédétection

Richard Escadafal *

* CESBIO, 18 avenue Edouard Belin, F-31401 Toulouse Cedex 9

RESUME

Parmi les caractéristiques des sols, la composition et l'organisation de la surface se sont révélées de puissants indicateurs de l'état écologique des milieux arides, en particulier par leur impact sur l'aridité édaphique. Dans cette brève revue, les travaux pionniers de Roger Pontanier sur ce thème sont mis en perspective, tentant de montrer comment ses mesures et ses observations de terrain ont apporté de nouvelles connaissances dans le fonctionnement écologique des milieux arides (particulièrement en Tunisie), mais aussi comment ils ouvraient la voie à l'interprétation et l'utilisation des images satellites pour la surveillance de ces régions.

Mots clés**:** Surface des sols, infiltration, germinations, réflectance, télédétection.

Soil surface in arid regions: a link between field ecology and remote sensing

ABSTRACT

Among soil characteristics, the composition and organization of the soil surface have appeared as powerful indicators of the ecological condition of arid lands, particularly through their impact on "edaphic aridity". Through this brief review, pioneering research of Dr. Roger Pontanier in this area is put in perspective, in an attempt to show how his field observations and experiments have brought new knowledge on arid land ecological functioning, particularly in Tunisia. In conclusion we will discuss how his interest in the soil surface has paved the road to the interpretation and use of satellite images to monitor these regions.

Key words: Soil surface, infiltration, seedling emergence, surface reflectance, satellites.

INTRODUCTION

Parmi, les pédologues qui ont travaillé dans les régions arides, Roger Pontanier † a été un des pionniers de l'étude de la surface des sols et de son rôle écologique fondamental. Cette brève revue en son hommage, souligne différents aspects que ses travaux ont mis en évidence ou initiés.

La surface des sols a depuis toujours été observée par les spécialistes des milieux naturels arides, de façon plus ou moins explicite. Des observations sur la présence d'écailles et de fentes de dessiccation, de débris végétaux, de sable mobile, sont classiquement utilisées dans les relevés de terrain des naturalistes. Souvent ces données ont été utilisées comme critère indicatif sur l'état des milieux, par exemple pour déterminer s'il est dégradé ou en cours d'ensablement. Ces points particuliers n'étaient pas groupés en un ensemble structuré de descripteurs de la surface mais plutôt comme compléments d'une description en vue d'un diagnostic écologique général qu'il concerne la végétation (basés par ex. sur le cortège floristique; l'abondance relative des espèces, Godron & al., 1968 ; Long, 1974) et/ou les sols (description des profils de sols : Girard & Viellefon, 1980 ; Maignien, 1980)

Les recherches menées sur la région de Zougrata (Menzel Habib, en Tunisie) ont combiné les études pédologiques sur la distribution des sols dans les paysages avec des mesures du bilan en eau

saisonnier sur plusieurs sites représentatifs des principaux systèmes écologiques. Simultanément un suivi fin de la végétation était réalisé par des mesures phytoécologiques (particulièrement la biomasse) au long de la saison.

Cet ensemble de travaux qui a fait l'objet de nombreuses publications, a été rassemblé en 1982 dans un ouvrage conjoint (Floret et Pontanier, 1982). Parmi les concepts développés, R.Pontanier met en évidence le rôle des sols dans la modulation de l'impact de l'aridité climatique, et développe le concept d'aridité édaphique, en soulignant l'importance de la surface.

SURFACE DES SOLS ET ECOLOGIE

Surface du sol et cycle de l'eau

L'eau apportée par précipitations souvent violentes et intervenant surtout en hiver dans la région étudiée, est ensuite plus ou moins disponible pour la végétation selon qu'elle a pu s'infiltrer rapidement dans le sol, y être stockée, puis être extraite par les racines des plantes. Les sols les meilleurs de ces points de vue sont les siérozems qui combinent un horizon de surface sableux, et des horizons profonds sablo-limoneux (Floret et al., 1983).
Le recouvrement sableux présente le double avantage de favoriser l'infiltration, et de limiter l'évaporation, comme l'indiquent les mesures de bilan hydrique saisonnier. Ce recouvrement peut être relativement mince, lorsqu'il s'agit de voile éolien plus ou moins stabilisé, c'est donc bien une caractéristique de la surface qui a un fort impact sur le cycle de l'eau, comme l'ont confirmé les mesures d'infiltrabilité sous pluies simulées réalisées ultérieurement (Floret, Mtimet et Pontanier, 1989).
De façon opposée, les surfaces de sols battantes caractérisées par le glaçage de la surface, la fermeture de la porosité et souvent la formation de croûtes se sont révélées responsables d'une très forte limitation de l'infiltration et donc d'une augmentation du ruissellement. De l'autre côté du Sahara, les recherches de même nature, basées sur des pluies simulées ont abouti à une typologie de ces croûtes permettant d'établir une nomenclature et les propriétés hydrologiques associées (Casenave et Valentin, 1989)
Ainsi des milieux dont les sols ont des caractéristiques générales similaires (profondeur, texture, composition, structure interne) vont présenter une aridité édaphique variable selon l'état de la surface, dont l'observation devient donc clairement un critère important pour le diagnostic écologique.

Surface du sol et biologie

La texture et la cohérence des matériaux pédologiques de surface ont aussi un impact connu sur le développement des plantes, particulièrement des annuelles. Cela affecte aussi bien le stockage des graines, leur humectation et que l'émergence des plantules. Là encore on peut souligner l'effet positif de la présence d'un voile sableux en surface, qui va permettre aux graines de s'enfoncer dans le sol, puis de germer et émerger dans un matériau meuble.

Cependant, ce recouvrement sableux n'est bénéfique que s'il est fixé, stabilisé, sinon les jeunes plantules seront déchaussées dès le prochain épisode venteux et criblées par le sable ne mouvement au raz du sol.

C'est ici qu'interviennent d'autres êtres vivants à la surface, particulièrement les cyanophycées, mousses et champignons formant les « croûtes biologiques » qui sont devenues ces dernières années des indicateurs très utilisés dans le diagnostic écologique des régions arides et semi-arides (notamment dans les terres de parcours d'Amérique du nord et d'Australie, voir Belnap & Lange, 2001).

Surface du sol et désertification

Le suivi de la désertification et de l'impact des méthodes de prévention et des programmes de lutte est devenu une préoccupation majeure en matière de gestion des milieux arides et semi-arides (UNEP, 1992). Il s'agit de diagnostiquer l'état de dégradation d'un milieu et son évolution positive ou négative par rapport à un état précédent (ou de référence), c'est un diagnostic écologique élargi, qui prend clairement en compte l'état des sols. Ainsi ce diagnostic est certainement amélioré par une approche intégrée considérant l'ensemble sol+végétation que constitue la surface des sols.

La surface des sols objet d'étude

Ainsi en prenant l'exemple de l'écosystème à *Rhantherium suaveolens* typique des steppes sableuses de la région de Menzel Habib, selon que le sable est stable avec un couvert en bon état, ou mobile parce que la végétation est peu couvrante ou absente, ou encore a été érodé par déflation au point que le matériau sablo-limoneux sous-jacent affleure, cela correspond à des états différents d'un même système sol-végétation, selon la séquence de dégradation décrite par Floret & Pontanier (fig.1). L'aspect général de la surface, sa composition et son organisation sont donc bien des éléments très utilisés pour le diagnostic de l'état du milieu, la conséquence logique a été de proposer que la caractérisation écologique sur le terrain comprenne désormais une description complète de la surface.

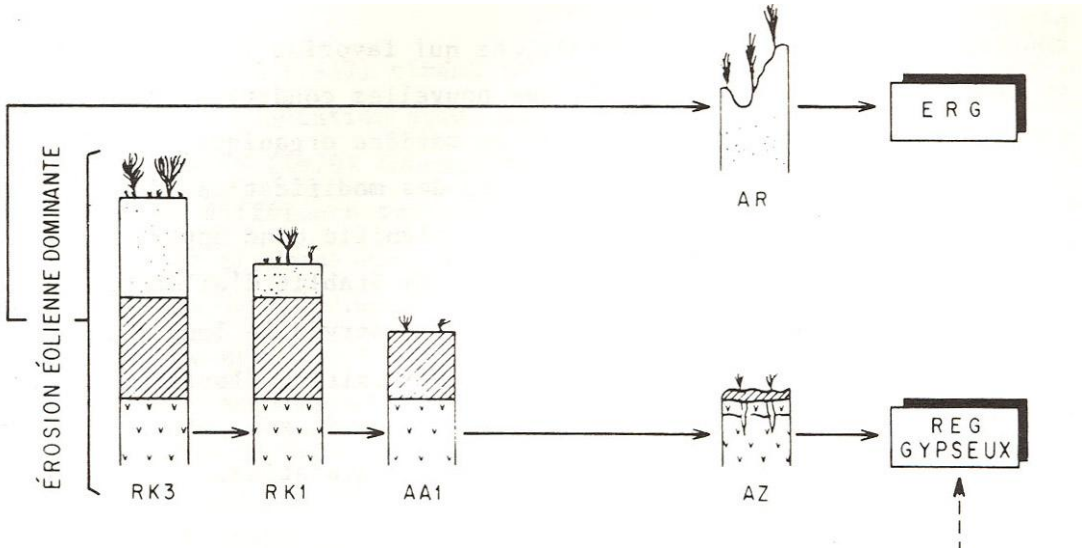


Figure 1. Dégradation des systèmes écologiques de Menzel Habib sous l'effet de l'érosion éolienne (extrait de Floret et Pontanier, 1982)

Proposition de définition de la surface

Dès lors que la nécessité de prendre en compte la surface s'est imposée, la surface des sols est devenu un objet d'étude en soi qu'il a fallu circonscrire. Pour ce qui concerne les régions arides où la végétation est peu couvrante, celle-ci forme un couvert très discontinu et il a été proposé de l'intégrer dans la notion de surface qui est alors simplement le volume de transition entre la géosphère et l'atmosphère (Escadafal, 1981). Cette définition peut-être précisée en ajoutant que la surface diffère du sol lui-même et particulièrement de son premier horizon par sa composition et/ou son organisation particulière, mais aussi et surtout par sa variabilité spatiale et temporelle nettement plus élevée.

Méthodes d'observation

Il s'agit maintenant de décrire les différents composants de la surface de façon aussi systématique et exhaustive que possible, au lieu de ne repérer que ceux qui semblent donner une information de diagnostic.

Pour l'appréhender dans ses différentes dimensions, les approches classiques peuvent être adaptées. Ainsi la surface du sol peut être décrite dans sa **dimension verticale** dans la logique de la description d'un profil de sol. En se focalisant sur la nature et l'organisation verticale des quelques millimètres ou centimètre à la surface des sols, on peut y décrire des micro-horizons plus ou moins continus (organisations pelliculaires, voiles sableux,...), les matériaux biologiques de surface (litière, croûtes algales, coprolithes..) et les végétaux supérieurs.

Cependant, la **distribution horizontale** des éléments de la surface est apparue comme un critère important spécifique à la surface méritant d'être décrit et caractérisé. Pour cela les différentes configurations que peut prendre la surface des sols arides ont été abordées comme des assemblages d'éléments plus simples, des *états de surface élémentaires* (tels que sol nu, butte sableuse, dépression à écailles argileuses, plage de gravillons,..). Leur distribution peut être caractérisée horizontalement, par exemple le long de transects selon la méthode des lignes intercepts (fig.2).

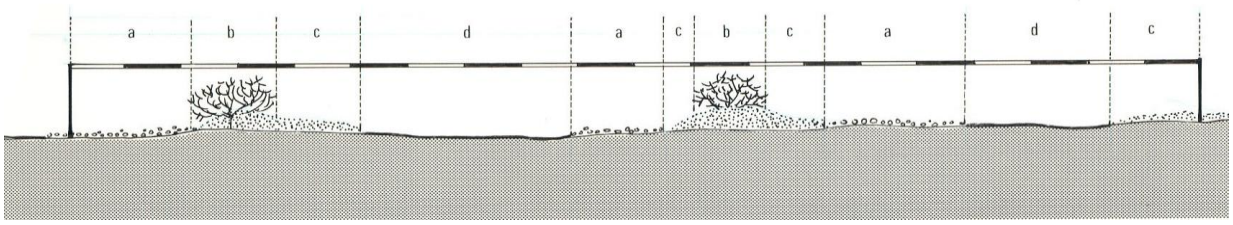


Figure 2. Quantification de la distribution des différents états de surface élémentaires par la méthode de la ligne intercept (extrait de Escadafal, 1987)

a) surface gravillonnaire, b) touffe d'*Arthrophytum*, c) sable fin (micronebka), d) sol nu battant

Mieux, l'organisation latérale en **deux dimensions** peut-être abordée par la cartographie des états de surface élémentaires d'un échantillon représentatif d'une surface donnée, aidée et/ou complétée par des photographies en visée verticale (Voir Photo couleur 1).

De ces description et photographies on peut déduire des informations quantitatives, telles le nombre d'états de surface élémentaires différents composant la surface, leur abondance relative et même des critères de distribution (la taille moyenne de chaque état élémentaire, par ex.) ou de forme (périmètre, élongation, orientation, connexité).

Nous allons voir que cette façon de caractériser et quantifier la composition et l'organisation des surfaces s'est avérée très pertinente au delà du seul champs scientifique des études écologiques.

SURFACE DES SOLS ET OBSERVATION DE LA TERRE

Premiers pas de l'utilisation de la télédétection en zone aride

Dès l'apparition des premières images des satellites civils d'observation de la Terre, l'intérêt de leurs images pour les études écologiques, et particulièrement le suivi de la végétation a été rapidement mis en évidence dans les régions tempérées et humides. Pourtant lorsqu'on s'est intéressé à l'application de la télédétection aux études écologiques en zones arides, des difficultés à identifier les formations végétales et leur degré de développement sont apparues (Long et al., 1978) Les images satellites et les indices de végétation qui en sont habituellement dérivés (ex. NDVI) se sont révélés inadaptés à l'étude des formations végétales steppiques qui ont un recouvrement faible et ne sont vertes (photosynthétiquement active et présentant une réponse spectrale typique correspondante) que pendant une courte période de l'année.

Pourtant de nombreux travaux continuent à proposer le NDVI et ses fluctuations comme indice de désertification. En réalité cela ne fonctionne bien que dans les milieux arides où les plantes herbacées sont dominantes, comme le Sahel africain (Milich and Weiss, 1997) où des liens ont été recherchés entre désertification et variations du couvert végétal (Nicholson et al., 1998)

La surface des sols observée par les satellites

De fait, les capteurs des satellites mesurent le rayonnement réfléchi par la surface terrestre, et dans les zones arides étudiées **les composants dominants sont les sols**. Ce sont en fin de compte les caractéristiques d'ensemble de la surface du sol que mesurent les satellites, incluant les plantes, le sol et les matériaux superficiels. Finalement, les satellites peuvent nous renseigner non pas tant sur la végétation seule, mais sur l'état de la surface dans son ensemble, selon un point de vue qui est commun avec l'écologie de terrain telle que discutée ci-dessus.

Cette convergence a été mise à profit pour établir les bases rigoureuses des relations entre les observations de terrain et par satellite. Mais elle est aussi un obstacle pour un diagnostic plus profond sur les sols et la végétation, dont les propriétés ne sont pas toujours bien corrélées avec l'état de surface (ex. : un sol paraissant sableux en surface peut être profond ou très superficiel). De plus ; certains états de la surface sont temporaires, voire fugaces (efflorescences salines).

Cependant ces mesures instantanées nous donnent une vision compatible avec celle des photographies aériennes ou des photographies de terrain en visée nadirale (voir fig.3).

C'est particulièrement flagrant dans le cas des images de satellite à haute résolution, tels que Quickbird, comme l'illustre la Photo couleur 2 qui représente un échantillon de surface des piémonts de l'Atlas marocain ; les différents composants, arbres, buissons, sol nu, ravines y apparaissent clairement (la piste donne l'échelle).

La surveillance écologique depuis l'espace

Même si à ce jour il n'existe pas encore d'indice de désertification obtenu directement par satellites, ceux-ci ont permis de constituer au fur et à mesure de leur déploiement des collections d'images qui apportent des mesures régulières et spatialisées de l'état de la surface des régions arides. Depuis les première images des satellites civils (Landsat 1 en 1972), il a été ainsi possible de constituer des séries temporelles, qui sous réserve de prétraitements appropriés (correction géométrique, intercalibration radiométrique) donnent pour chaque pixel (équivalent d'un échantillon de surface) une mesure des fluctuations de son état : couleur, albédo, taux de couverture végétale, composition minéralogique.

La puissance des relations entre images satellite et état de la surface des sols apparaît lorsqu'on s'intéresse à l'évolution des milieux, particulièrement pour déterminer si elle est négative (dégradation, désertification,..) ou positive (amélioration, restauration,..).

Il faut en effet un suivi régulier pour détecter ces tendances, et si les observations de terrain permettent de diagnostiquer les changements, dont ceux affectant le taux de couverture végétale, ou la nature des matériaux pédologiques de surface (Jauffret, 2001), seuls les satellites permettent de le faire sur de grandes surfaces et de manière régulière, voire rétrospective (Escadafal et al. 2005).

CONCLUSION :

UNE INTERFACE AU SENS ECOLOGIQUE ET EPISTEMOLOGIQUE

L'intérêt de Roger Pontanier envers la surface des sols arides s'est donc révélé une idée scientifique particulièrement féconde, qui est à la base d'une vision dynamique des ces milieux, et d'un meilleur diagnostic de leur état, de leur résilience et de la durabilité de leurs usages.

La surface des sols, interface entre l'atmosphère et la géosphère, porte les traces des phénomènes en cours dans les écosystèmes observés, elle subit des modifications saisonnières mais aussi à plus long terme, traduisant les grandes tendances, notamment l'état général des milieux (stabilité, désertification ou restauration). Cette interface, au sens physique du terme est également l'obje dont les satellites d'observations de la Terre mesurent les propriétés optiques depuis l'Espace. ¨Plus que la mesure instantanée, c'est leur capacité à assurer un suivi régulier dans le temps qui constitue leur apport essentiel à la surveillance écologique.

Ainsi la surface des sols est aussi une interface au sens épistémologique du terme, en établissant un pont conceptuel entre écologique et technologies spatiales, entre physique de l'interaction du rayonnement solaire avec la surface terrestre et écologie de biomes arides dont la fragilité recommande une surveillance étroite.

BIBLIOGRAPHIE

Belnap, J., and O.L. Lange, eds. 2001. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Vol. 150. Springer-Verlag, Berlin, 503 p.

Casenave A. & Valentin C. 1989 – *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration.* Orstom, Paris, 229 p.

Chaïeb M, C Floret, E Le Floc'h & R Pontanier 1991 - Life history strategies and water resource allocation in five pasture species of the Tunisian arid zone. *Arid Soil Research and Rehabilitation,* 6 : 1-10.

Escadafal R, Albinet F, Simonneaux V. 2005. Arid Land cover change trend analysis with series of satellite images for desertification monitoring in Northern Africa. *Proc. 31st Ints Symp.Rem.Sens.Env.* June 2005. St Petersburg (Russia).

Escadafal R. 1989 – *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications : exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*. Etudes et Thèses. Edition ORSTOM, Paris.

Escadafal R. 1994 – Soil spectral properties and their relation ships with environmental parameters – Examples from arid regions. In : Hill J. & Mégier J. (Eds), *Imaging spectrometry – a tool for environmental observations*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 71-87.

Escadafal R., 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides, Actes du colloque 'Informatique et traitement des données de sols, Paris, 1981, in : *Sols, n 5*, p. 21-27.

Floret C. & Pontanier R. 1982 – *L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement*. Travaux et documents de l'ORSTOM n°150, Paris. p. 544.

Floret C., Le Floc'h E. & Pontanier R. 1983 – Phytomasse et production végétale en Tunisie présaharienne. *Acta Oecologica / Oecologia Plantarum*, 4 (18) : 133-152

Floret C., Mtimet A. & Pontanier R. 1989 –Régime hydrique et sensibilité à l'érosion de systèmes écologiques de la zone aride (Tunisie). *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, XXV, 1-2 :53-69.

Girard M.C., Viellefon J. et coll. 1980 – *Glossaire pour la description des sols de Tunisie et de leur environnement*. Ministère de l'Agriculture de Tunisie, ORSTOM, Informatique et Biosphère,

Godron M., Daget PH., Emberger L., Le Floc'h E., Long G., Poissonet J., Sauvage CH. & Wacquant J.P. 1968 – Code *pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu*, CNRS, Paris 292 p.

Jauffret, S. 2001. *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien*. Thèse univ.Aix Marseille, 372 p.

Long G. 1974 - *Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire*. Tome premier : principes généraux et méthodes. Masson et Cie, Paris, 232 p.

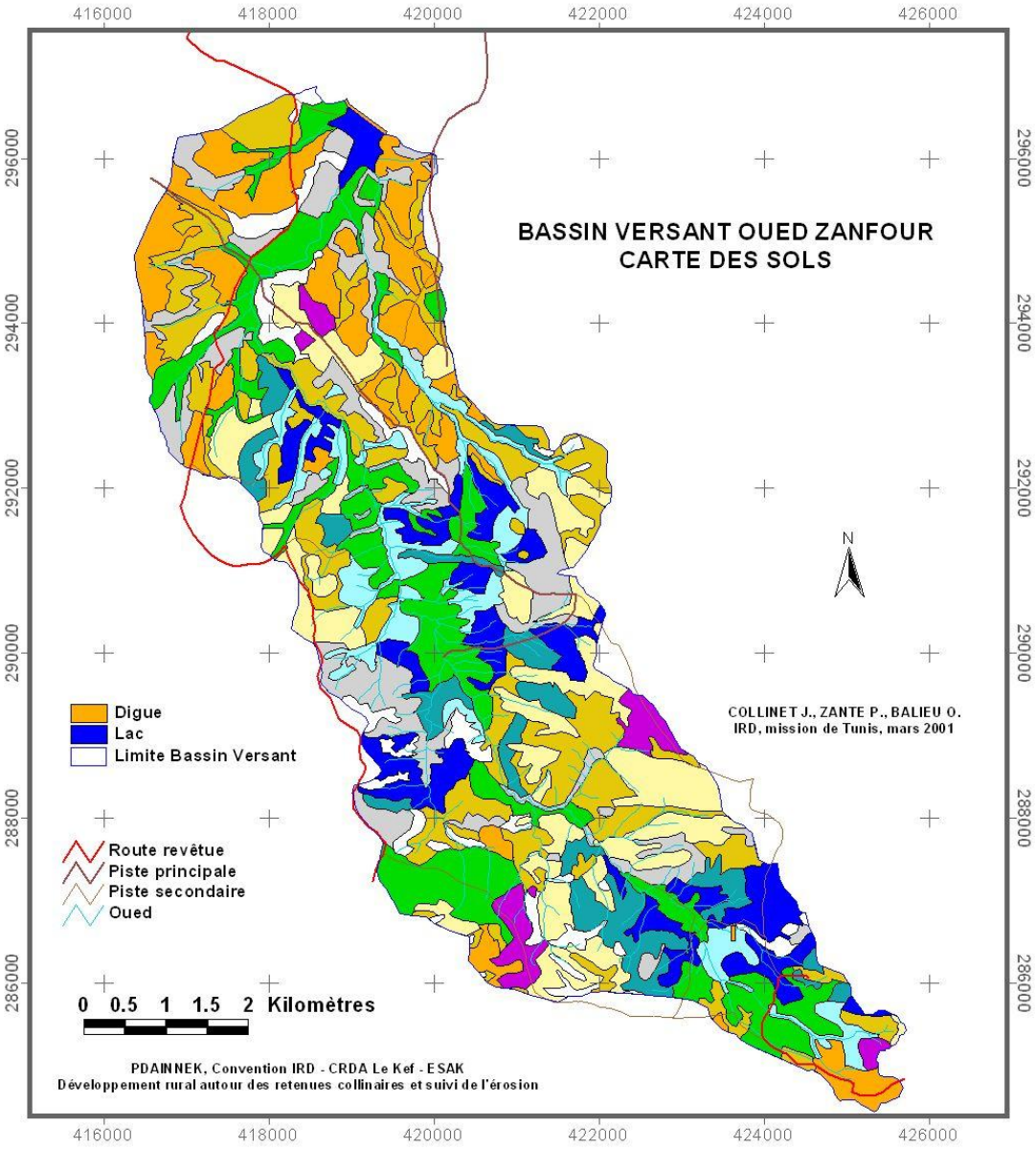
Long G., Le Floc'h E., Pontanier R., Debussche G. & Lacaze B. 1978 - *Contribution à l'analyse écologique des zones arides de Tunisie avec l'aide des données de la télédétection spatiale. Expérience ARZOTU*, rapport final 1975-1978. CEPE/CNRS Montpellier, CNES, INRAT Tunis et ORSTOM – Paris, 222 p.

Maignien R. 1980 – *Manuel pour la description des sols sur le terrain*. ORSTOM, Paris, 112 p.

Milich, L. and E. WEISS, 1997. Characterization of the Sahel: Implications of correctly calculating interannual Coefficients of Variation (CoVs) from GAC NDVI values. *International Journal of Remote Sensing* 18:18, 3749-3759.

Nicholson, S.E., C.J. Tucker and M.B. Ba 1998. Desertification, drought and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bull. Amer. Meteor. Soc*., 79, 815-29

UNEP, 1992. *World Atlas of Desertification*. Edward Arnold Publishers, London, U.K., 69 pp.



UC 1: Sols minéraux bruts, d'érosion, lithosoliques sur bancs calcaires et croûtes calcaires dures

U C 2: Sols minéraux bruts, d'érosion, régosoliques sur bancs marneux

U C 3: Sols minéraux bruts, d'apport colluvial et épandages d'éléments grossiers calcaires sur bancs rocheux

U C 4: Juxtaposition de sols peu évolués d'érosion, lithiques, sur calcaires durs et croûtes

U C 5: Sols peu évolués, d'érosion, ou d'apport colluvial, avec épandages d'éléments grossiers, sur matériaux meubles puis roches ou croûtes calcaires

U C 6: Sols peu évolués d'érosion, régosoliques, sur marnes

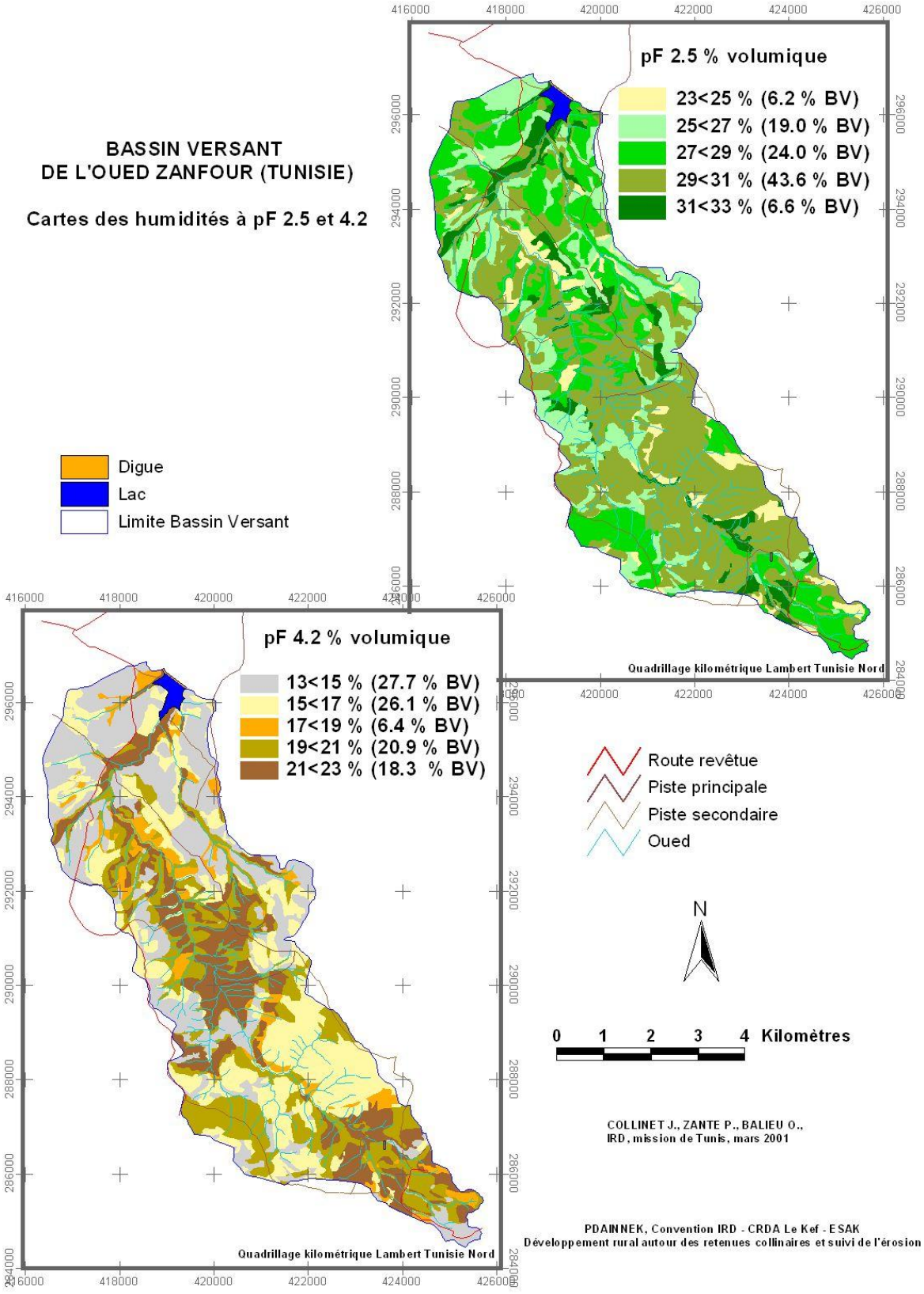
U C 7: Sols idohumiques à pédoclimats frais, marrons ou bruns modaux ou encroûtés sur roches carbonatées

U C 8: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à croûtes, et bruns calciques, sur marnes dominantes

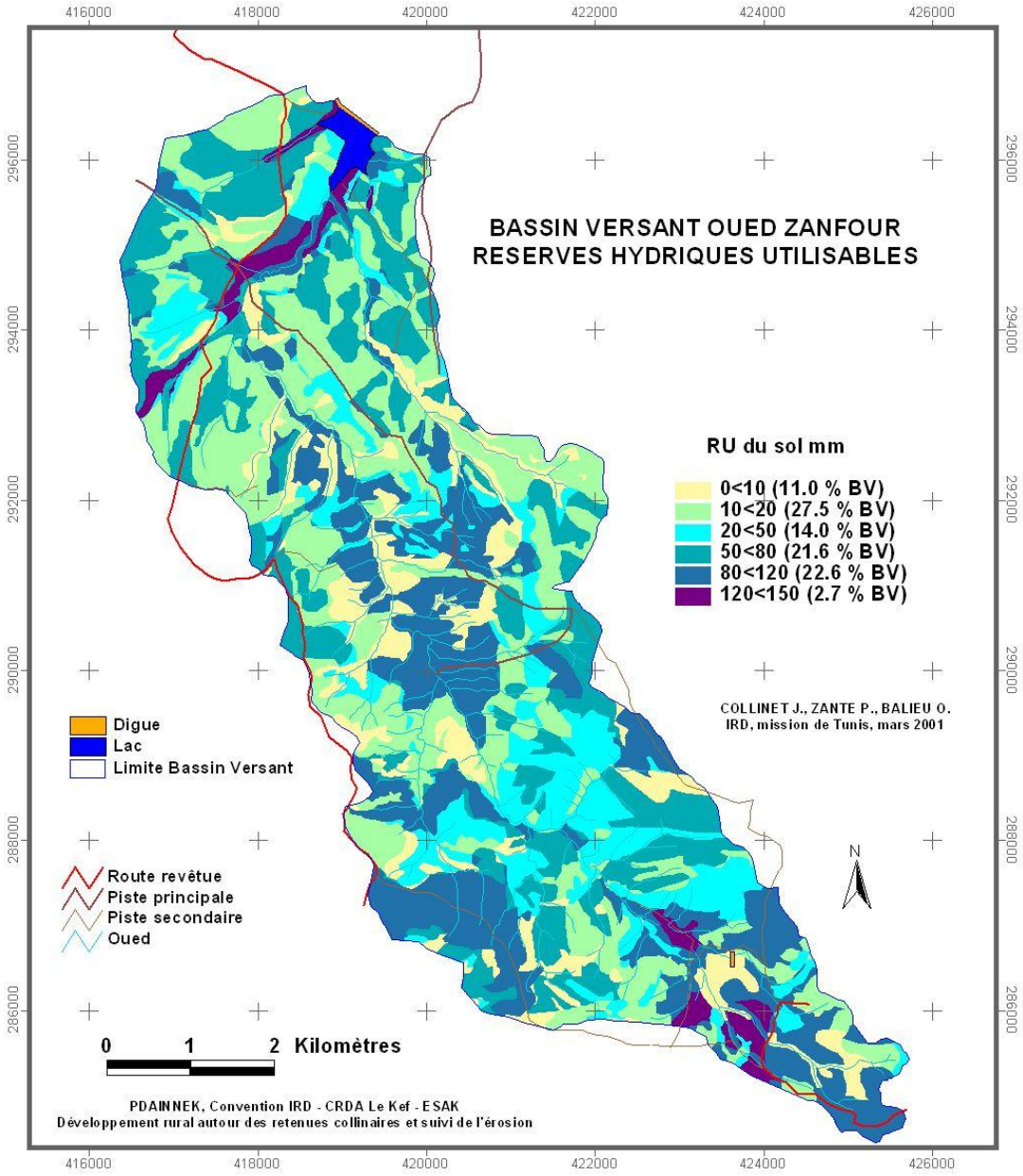
U C 9: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à croûtes, sur calcaires dominants

U C 10: Juxtaposition de sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires modaux, à encroûtements sur colluvions de comblements de vallées ou terrasses

Carte couleur 1 : Carte pédologique du bassin versant de Zanfour



Carte couleur 2 : Carte des humidités à pF 2,5 et à pF 4,2



Carte couleur 3 : Carte des réserves hydriques utilisables du bassin versant de Zanfour

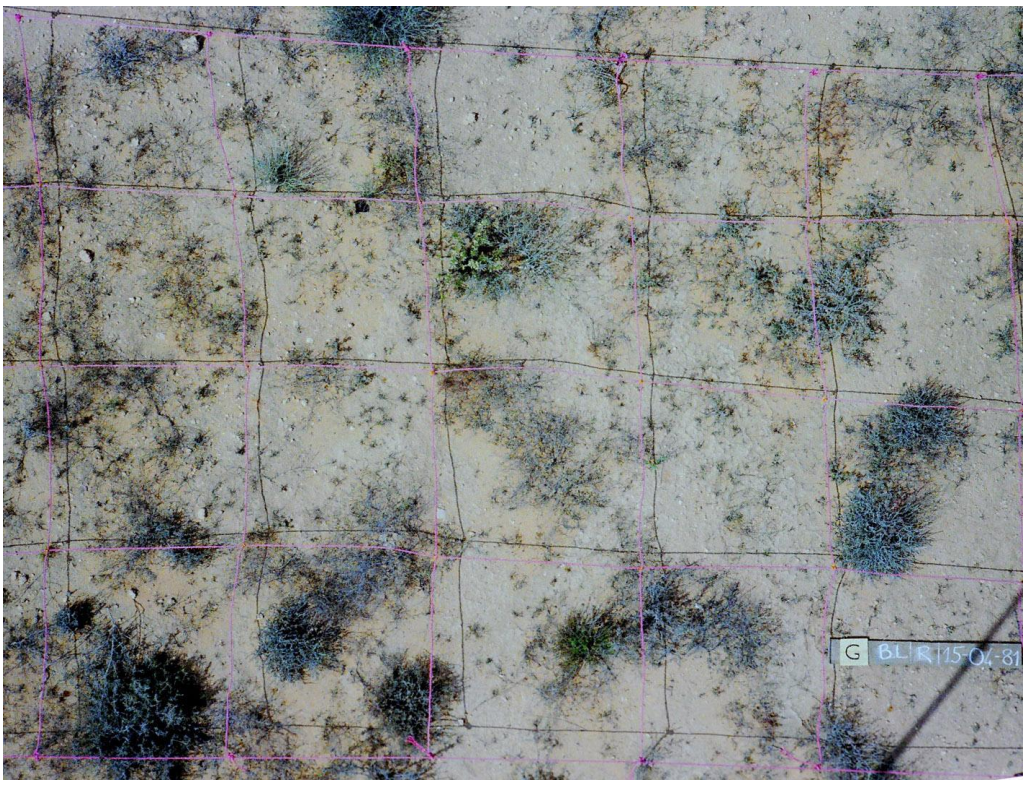


Photo Couleur 1- Exemple de photographie d'échantillon de surface du sud tunisien (sol limoneux, station de Bir Lahmar) en visée nadirale (selon un axe vertical, vers le bas)

Un maillage de carrés de 50 cm est matérialisé au sol

Photo couleur 2 - Exemple d'échantillon de surface aride (région de la Rerahya, sud marocain) sur une image satellite à haute résolution (Quickbird)

Largeur totale : 4,8 km (on reconnaît les composants de la surface, buissons, sol nu,…)

Photo couleur 3 - Défrichement et jachère. Culture extensive.

Photo couleur 4 - Terroir aménagé. Culture intensive.

Photo couleur 5 – Incendie au pied des grands arbres

Photo couleur 6 - Jachère améliorée

Photo couleur 7 - Enrichissement des parcs arborés

Photo couleur 8 - enquête au village

Photo couleur 9 – Emondage des branches

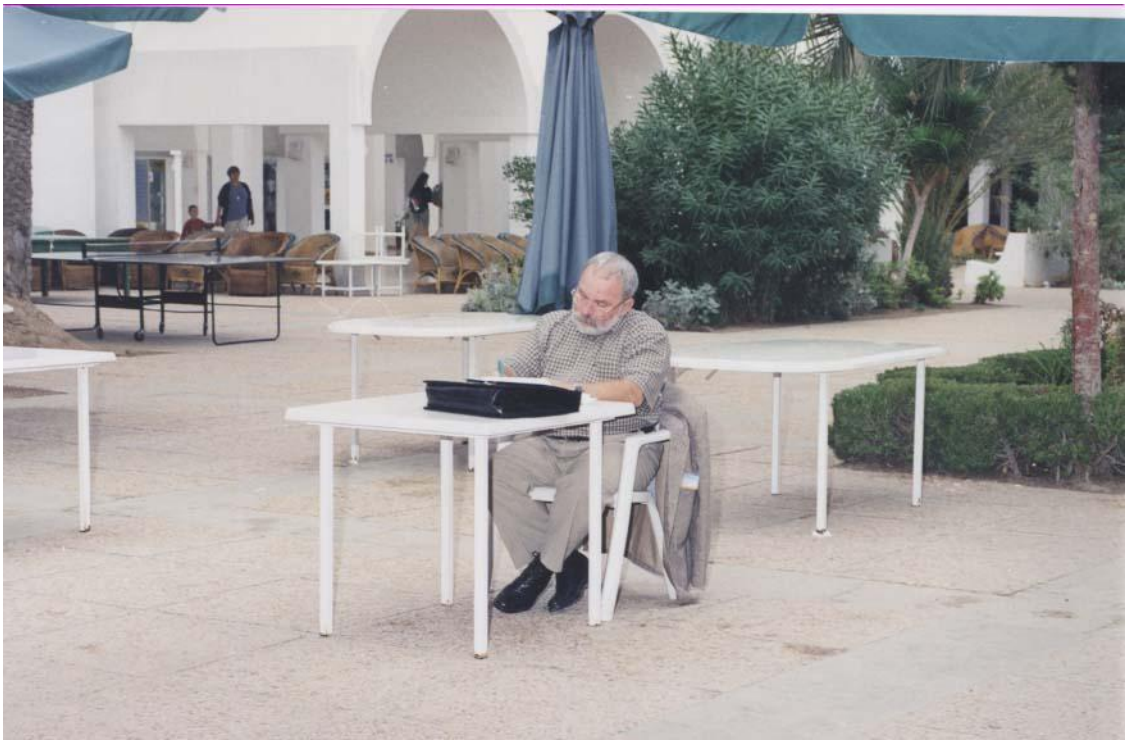


Photo couleur 10 – Hommage à Roger Pontanier Directeur de recherche IRD

« La qualité des liens de travail et d'amitié qu'il avait tissés avec les membres de communautés scientifiques nationales et internationales fera perdurer longtemps l'impact de ses travaux »

PARTIE II

La Jachère en Afrique

Le projet «La jachère en Afrique tropicale »

Christian Floret*, Victor Hien** et Roger Pontanier✞

* IRD, BP 1386, Dakar, Burkina Faso
** INERA, BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso

Préambule

Cette communication a pour objectif d'ouvrir la session jachère mais aussi de présenter le projet dans lequel Roger Pontanier a exercé ses activités durant les dix dernières années de sa vie.

Problématique de la jachère en Afrique

En Afrique tropicale, une utilisation courante des sols consiste en une phase de culture de quelques années, suivie, après la baisse des rendements, d'un abandon cultural de durée variable. Cette seconde phase, appelée jachère, permet la remontée de la fertilité des sols et des potentialités agronomiques et écologiques du milieu, grâce à un retour à la savane arbustive ou arborée. Par ailleurs, la jachère n'est pas considérée par les communautés rurales comme une simple mise en dormance de l'agriculture, mais aussi, comme un lieu de production où le paysan et l'éleveur exploitent des ressources fourragères, ligneuses, fruitières, ainsi que des plantes utilisées en pharmacopée. Le système culture/jachère apparaît ainsi comme un mode de gestion des ressources des savanes africaines.

Ce cycle culture-jachère, est perturbé aujourd'hui par l'accroissement de la pression démographique et de la demande en terre. Les durées de jachère se sont raccourcies, laissant parfois même la place à la culture continue. L'augmentation des prélèvements de bois, et l'intensification du pâturage sur des zones réduites diminue ses fonctions de production. Raccourcie, la régénération naturelle devient moins efficace, et s'accompagne d'une baisse de la biodiversité. Le dysfonctionnement hydrique ainsi que l'érosion ont tendance à s'installer sur des terres de plus en plus dégradées. Tous ces phénomènes créent, sur les terroirs traditionnels, une situation de crise aux conséquences socio-économiques très importantes.

Les techniques de restauration des terres épuisées, souvent coûteuses et trop sectorielles, ne prenant pas suffisamment en compte la dimension du terroir, les aspects sociaux ou fonciers, n'ont pas toujours répondu aux espoirs de sociétés déjà peu enclines à accepter les innovations, et ont ralenti la mise en place de la transition vers une agriculture continue durable

Le projet « Jachère »

L'objectif du projet « Jachère » était de réaliser un programme d'étude, d'amélioration et de gestion de la jachère au niveau de terroirs villageois dans des pays d'Afrique tropicale. Il s'agissait d'insérer le cycle culture-jachère, ou les modes de substitution à la jachère lorsqu'elle a disparu, dans une stratégie de développement durable. Le renforcement des capacités nationales d'intervention dans le domaine objet de l'étude était aussi un des objectifs affichés du projet.

Les pays concernés ont été : Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Niger, Sénégal.

Les actions entreprises ont privilégié des *recherches à caractère finalisé* pour l'amélioration, la valorisation ou la substitution de la jachère par d'autres pratiques. En effet face à la saturation de l'espace cultivable, des techniques de *"jachères améliorées"* ont été proposées avec des essais par les chercheurs dans les terroirs retenus, pour maintenir les fonctions indispensables de la jachère (fonctions de restauration de la fertilité, de production fourragère et de bois etc.). Le projet a reposé sur des recherches en station, mais surtout sur des terroirs villageois de 6 pays d'Afrique de l'Ouest et centrale entre 1994 et 2002 (figure1).

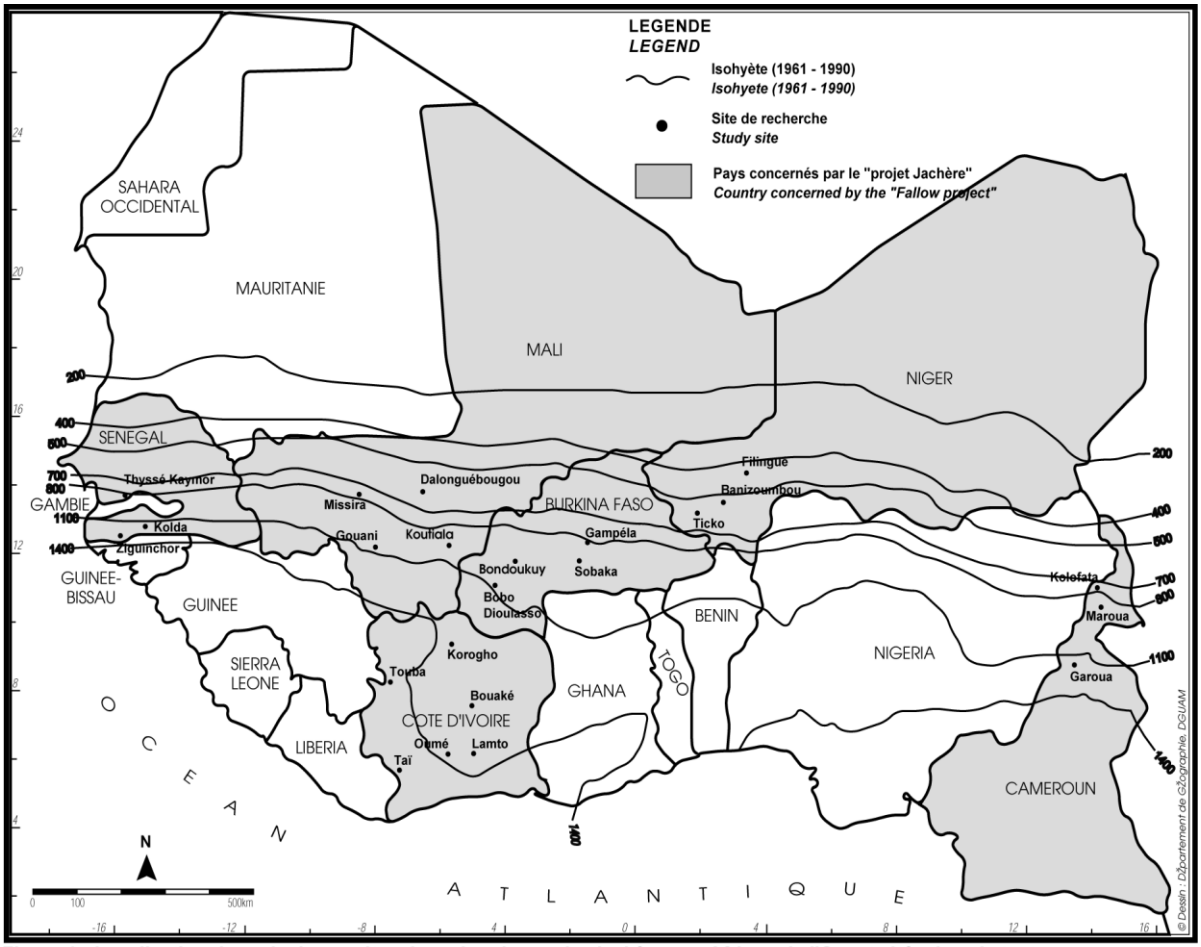


Figure 1 : Localisation des principaux sites de recherche sur les jachères en Afrique de l'Ouest cités dans le texte.
Figure 1 : Localisation of the main study sites on fallow systems in Western Africa quoted in the text.

Les bénéficiaires directs ont été les paysans d'une vingtaine de terroirs villageois. .

Le programme de recherche a été coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex ORSTOM, France) sous l'égide de la CORAF. Il a associé plusieurs institutions de recherche et d'enseignement supérieur : CNRST (Burkina Faso), IRAD (Cameroun), CNRA (Côte d'Ivoire), IER (Mali), Faculté d'Agronomie (Niger), ISRA (Sénégal), CIRAD (France), CEFE/CNRS (France), NRI (Grande Bretagne) et de nombreuses universités du Nord et du Sud.

Acquis scientifiques et techniques du projet

Les différentes thématiques abordées ont été:

(i). Jachère et fertilité où les travaux ont principalement concerné : (a) l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols dans le cycle culture-jachère, (b)

l'amélioration de la fertilité des terres agricoles par des plantes améliorantes (plantes de couverture, jachères agroforestières), (c) la mise au point de technologies éprouvées pour la réhabilitation des terres dégradées, (d) l'étude du fonctionnement des exploitations agricoles et de la gestion de la fertilité ;

(ii). Jachère et végétation naturelle dont les principaux thèmes abordés sont les suivants : (a) La succession végétale post culturale et biodiversité dans le cycle culture-jachère, (b) la régénération ligneuse et la gestion des ressources ligneuses des jachères, (c) rôle de la jachère dans la production non ligneuse, (d) l'impact des feux de brousse sur la végétation des jachères ; (e) écologie et biologie des espèces locales et de leurs organismes associés (rhizobium, mycorhize).

(iii). Jachère et élevage, dont les principaux aspects abordés sont : (a) la caractérisation et l'évaluation du potentiel fourrager des jachères, (b) l'utilisation pastorale des jachères, (c) le pastoralisme et l'évolution des sols, (d) la recherche participative sur la culture d'espèces fourragères, (e) la contribution des ligneux à la valeur pastorale des jachères, (f) l'amélioration fourragère par des techniques agroforestières.

(iv). Jachère et systèmes agraires avec comme principaux sujets abordés : (a) la problématique de l'intensification des cultures, (b) les stades d'évolution agraire, (c) la conception et la pratique de la jachère dans les sociétés traditionnelles et l'évolution de la pratique, (d) les modalités d'accès et de gestion des ressources de la jachère.

Face à la saturation de l'espace cultivable, des techniques de *"jachères améliorées"* ont été proposées dans les terroirs retenus, pour maintenir les fonctions indispensables de la jachère (fonctions de restauration de la fertilité, de production fourragère et de bois etc.

Recherches d'accompagnement

Des *recherches plus fondamentales* ou recherche d'accompagnement ont été très actives dans chaque pays en particulier grâce aux thèses et aux nombreux stagiaires que les chercheurs du projet encadrent chaque année dans le cadre des mémoires de DEA et du diplôme d'ingénieur. Beaucoup de ces recherches ont eu trait à la détermination et au suivi d'indicateurs physiques et biologiques d'état du système jachère/culture. Les disciplines concernées ont été : la sociologie, la démographie, l'agronomie, la géographie, l'écologie végétale et la biologie du sol.

Publications des résultats

Un premier volume publié sur les résultats du Programme Jachère représente les Actes du « Séminaire international sur la Jachère en Afrique tropicale » (Floret et Pontanier, 2000). Il contient les communications présentées, dans l'ordre des dix sessions et le texte des posters. Un second volume intitulé " De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances ", contient dix articles de synthèse (Floret et Pontanier, 2001).

Techniques transférables: une seconde phase pour le projet « Jachère »

Parmi tous ces résultats de recherche on a sélectionné un certain nombre de techniques qui peuvent être transférées en milieu paysan en prenant un certain nombre de précautions. Une réflexion a été menée sur les meilleures façons de procéder à ce transfert des résultats pour les rendre disponibles aux paysans de la région. Une Expertise collégiale (Hien et Masse, 2005) a été réalisée afin de rechercher les meilleures méthodes pour valoriser et transférer les résultats du projet jachère. Sur la base des conclusions de cette expertise des projets de valorisation des résultats sont en cours de mise en place avec des opérateurs du développement.

Le tableau 1 présente les acquis susceptibles d'être valorisés et transférés aux producteurs au cours d'une 2ème phase.

La démarche générale repose d'abord sur un questionnement des paysans pour faire apparaître les principales contraintes dans leur zone. Des partenaires de développement local sont mobilisés (ONGs, projets et programmes de développement, sociétés de développement, organisations de producteurs…). Les projets interviennent dans plusieurs sites par pays disposés selon un gradient agro-éco-climatique (300 à 2000 mm de pluviosité) et présentant une gamme très variée de systèmes agraires et de niveaux d'intensification. Les travaux tiendront compte des spécificités et des similitudes des différents pays.

Les différents partenaires de développement seront les principaux responsables des actions entreprises (valorisation des technologies, recherche-accompagnement). A ce titre ils piloteront les activités de diagnostic, de mise en place des expérimentations et la co-validation des protocoles avec les paysans et la valorisation des technologies.

De façon spécifique la mise en œuvre consiste à:

- conduire des activités de diagnostic dans les terroirs retenus et ciblés sur les fonctions de la jachère et les problèmes induits par sa régression. Ces diagnostics visent à une analyse des problèmes et contraintes qui se posent aux producteurs, et à une meilleure compréhension des conditions socio-économiques dans lesquelles le transfert des technologies peut être réalisé. On détermine ensuite quelles sont les techniques que le Projet peut introduire pour lever une partie de ces contraintes.

- mettre en œuvre des activités de valorisation de solutions disponibles (acquis de la première phase et innovations endogènes) par les différents partenaires de développement en rapport avec la demande de chaque acteur. Les institutions de recherche ayant contribué à la mise au point des techniques assument des fonctions d'accompagnement en participant, à la formation des paysans, à la mise en œuvre et à l'adaptation des dispositifs de valorisation des technologies, et au suivi-évaluation des résultats.

-entreprendre des activités de recherche-accompagnement en rapport avec les préoccupations ou demandes des producteurs pour lesquelles des solutions immédiates ou finalisées n'existent pas pour le moment. En rapport avec ces demandes clairement précisées lors des diagnostics thématiques, des expérimentations sont mises en œuvre avec les partenaires impliqués.

Tableau 1 -Techniques transférables (Projet jachère)

Zones agro-écologiques				
Sahélien (300-600)		**Soudanien (600-1200)**		**Guinéen (>1200)**
Zones cuirassées	**Zones sableuses**	**Zones arborées**	**Forêts claires**	**Forêt humide**
dispositifs mécaniques de CES-DRS travail du sol en sec (Zaï, Demi-lune, scarifiage) paillage gestion améliorée du fumier jachère herbacée (*A. gayanus***)** techniques de Lutte contre les plantes envahissantes mise en défens	travail du sol, paillage/ branchage, gestion améliorée du fumier, fumure organo-minérale jachère herbacée (*A. gayanus*), défrichement améliorée, parcs agro-forestiers, haies vives et brise-vents, dispositifs mécaniques de CES-DRS cordons pierreux, techniques de lutte contre les plantes envahissantes mise en défens plantes de couverture jachères agro-forestières	CES-DRS, jachère améliorée (plantes de couverture) compost, parc agro-forestier, paillage, brise-vents, haies vives jachères agroforestières mises en défens,	CES-DRS, jachère améliorée (plantes de couverture) compost, parc agro-forestier, paillage, brise-vents, haies vives jachères agroforestières mises en défens	jachères agro-forestières, CES-DRS, jachère améliorée (plantes de couverture) compost, parc agro-forestier, paillage, brise-vents
auto-dissémination et repiquage par éclats de souche de *A.gayanus* banques fourragères traitement de la paille à l'urée	auto-dissémination et repiquage par éclats de souches de *A.gayanus*, banques fourragères et soles fourragères traitement de la paille à l'urée	auto-dissémination et repiquage par éclats de souches de *A.gayanus*, gestion des jachères naturelles, **soles fourragères** banques fourragères traitement de la paille à l'urée	auto-dissémination et repiquage par éclats de souche de *A.gayanus*, gestion des jachères naturelles, soles fourragères banques fourragères	banques fourragères gestion des Jachères naturelles, soles fourragères *(Panicum maximum)*
CES-DRS et revégétalisation	technique de semis direct d'Acacia dudgeoni, Modes de gestion d'A.dudgeoni, CES-DRS et	CES-DRS et revégétalisation	revégétalisation	brise-vent

mise en défens techniques de pépinière (mychorization de ligneux, …)	revégétalisation défrichement sélectif et régénération assistée mise en défens haie vives brise-vent jachère agro-forestière gestion du parc techniques de pépinière	mise en défens haie vives brise-vent jachère agro-forestière gestion du parc défrichement sélectif et régénération assistée techniques de pépinière	haie vives brise-vents jachère agro-forestière gestion du parc techniques de pépinière	jachère agro-forestière techniques de pépinière
techniques de raccourcissement du temps de production : greffage, bouturage, cultivars performants de *Zizyfus mauritiana, Tamarindus indica, Adansonia digitata, Vitellaria paradoxa, Detarium microcarpum, Acacia* *dugeoni, Acacia senegal,* Plantes médicinales	techniques de raccourcissement du temps de production : greffage, bouturage, cultivars performants de *Zizyfus mauritiana, Tamarindus indica, Adansonia digitata, Vitellaria paradoxa, Detarium microcarpum, Acacia* *dugeoni, Acacia senegal,* Plantes médicinales	techniques de raccourcissement du temps de production : greffage, bouturage, cultivars performants de *Zizyfus mauritiana, Tamarindus indica, Adansonia digitata, Vitellaria paradoxa, Detarium microcarpum, Acacia* *dugeoni, Acacia senegal,* Plantes médicinales	techniques de raccourcissement du temps de production : greffage, bouturage, cultivars performants de Saba senegalensis, *Zizyfus mauritiana, Tamarindus indica, Adansonia digitata, Vitellaria paradoxa, Detarium microcarpum, Acacia* *dugeoni, Acacia senegal,* Plantes médicinales	techniques de raccourcissement du temps de production : greffage, bouturage, cultivars performants de *I. gabonencis, Ricinodendron heulolotii,* Plantes medicinales
techniques de régénération naturelle et assistée, techniques de domestication	techniques de régénération naturelle et assistée, techniques de sursemis sur jachère infestée par les plantes envahissantes, techniques de domestication	techniques de domestication, techniques de régénération naturelle et assistée, techniques de sursemis sur jachère infestée par les plantes envahissantes	techniques de domestication, techniques de régénération naturelle et assistée, techniques de sursemis sur jachère infestée par les plantes envahissantes	techniques de domestication, techniques de régénération naturelle et assistée, techniques de sursemis sur jachère infestée par les plantes envahissantes

Conclusions générales

A la suite de ces travaux de recherche-développement dans le cadre du projet « Jachère », on peut revenir sur un certain nombre de considérations générales pour l'établissement d'une agriculture durable en Afrique tropicale, tirées des résultats du Projet et des conclusions de différentes Conférences sur ce thème.

Il est normal que l'homme intervienne pour faire sa place. Le défrichement et la culture qui suit sont un processus minier dans un premier temps, durable dans un second temps sur un milieu appauvri.

La population du globe augmente rapidement ou bien on continuera à défricher pour la nourrir ou bien il faudra intensifier sur les surfaces déjà cultivées.

Il y a des réserves de terres encore importantes en Afrique, mais ce sont des terres forestières ou peu aptes à la culture.

Les marges de production sont encore importantes : sélection variétale, OGM, amélioration des filières, diminution des pertes, etc. Les systèmes irrigués engendrent des rendements 2,5 fois supérieurs à ceux de l'agriculture pluviale.

L'agriculteur n'a pas les mêmes objectifs que l'agronome ou l'écologue. Il vise la sécurité alimentaire et foncière du groupe familial, le calendrier alimentaire, la trésorerie du ménage, etc. Et le plus souvent il donne la préférence à la productivité du travail plutôt qu'à la productivité de la terre.

Il y a intérêt à intensifier et à aménager certains sols et à rester minier et extensif sur certains autres.

L'extensif rémunère mieux le travail, permet de mieux gérer le risque, donne une certaine emprise

foncière. (Photo couleur 3 et photo couleur 4)

Quelques solutions pour une agriculture durable:

-compenser l'appauvrissement du milieu par plus de mobilité, plus de travail, plus de coûts, un meilleur usage des ressources.

- intensifier dans des micro-environnements (horticulture, irrigation,...)

-éviter les gros travaux conservatoires financés de l'extérieur et les règlements globaux draconiens sur les feux, les défrichements, le pâturage, etc.

-favoriser les pratiques sociales participatives

-favoriser l'accès au micro-crédit

-augmenter la valeur des produits par la transformation sur place

-organiser les filières et la commercialisation (marchés du Nord)

-faciliter l'appropriation de la terre.

Il faut un continuum entre les recherches fondamentales et la pratique. La diversité des agrosystèmes et des sociétés est très grande. La recherche doit proposer un grand nombre de solutions. C'est ce qu'a essayé de faire le projet « Jachère ».

Références bibliographiques

Floret Ch., Pontanier R. (eds), 2001 Actes du Séminaire international " La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives ", Dakar 13-16 avril 1999. Paris, John Libbey Eurotext, 777 p.

Floret Ch., Pontanier R. (eds), 2001. La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances. Paris, John Libbey Eurotext, 356p.

Hien V., Masse D. (eds) 2005. L'expertise collégiale du Projet Jachère. Résultats de recherches transférables en milieu paysan dans 5 Pays d'Afrique de l'Ouest (2004),.Union Européenne, Coraf , Dakar, 130 p.

Comparaison de la composition botanique des régimes ingérés dans les champs, jachères et formations naturelles par les bovins du système d'élevage sédentaire en zone soudanienne nord du Mali

Moussa Karembé*, Harouna Yossi**, Fadiala Dembélé ***
Moussa Ballo**, Mahamadou Coulibaly**

* l'Université de Bamako, FAST, BP : 3206, Mali.
** Institut d'économie rurale, BP : 258, Bamko, Mali.
*** Institut polytechnique rural de formation et de recherche appliquée IPR/IFRA) de Katibougou, BP : 06, Koulikoro, Mali.

RESUME

La présente étude a été réalisée dans le terroir villageois de Missira, situé en zone soudanienne nord au Mali, avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 550 mm et 750 mm. Il se trouve à la périphérie de la réserve de biosphère de la boucle du Baoulé, à la latitude 13° 43 N et longitude 8° 27 W et couvre 175 km^2. L'objectif de l'étude est de caractériser la composition botanique du régime ingéré dans trois types de pâturages par les bovins du système d'élevage sédentaire, en vue de déterminer la place de la jachère dans leur alimentation.

L'approche utilisée est le suivi journalier des animaux aux pâturages à cinq périodes de l'année. Le suivi a porté sur trois animaux dans un troupeau monospécifique de 89 têtes. Les observations sont faites chaque quinze minutes au cours desquelles sont notées les espèces prélevées, leur fréquence, l'heure de prélèvement et la pénétrabilité de la végétation.

On retiendra de cette étude que la durée de pâture et la richesse floristique du régime ingéré sont beaucoup plus importantes dans les jachères que dans les champs et formations naturelles. Ces paramètres varient en fonction des périodes de l'année quelle que soit la formation. Quant à la contribution des groupes d'espèces au régime ingéré par les bovins, elle varie en fonction des périodes et des types de formations. Le nombre d'espèces prélevées par les bovins est aussi fonction de la pénétrabilité de la formation végétale.

Mots clés *:* Composition botanique, régime alimentaire, bovins, richesse floristique, formation végétale, soudanien-nord, Mali.

I. INTRODUCTION

Une des contraintes majeures des systèmes extensifs d'élevage des bovins en zone soudano-sahélienne d'Afrique est l'alimentation (Guérin 1987), qui était autrefois assurée par des graminées pérennes. Elles étaient abondantes dans les savanes et jachères et leurs repousses fournissaient du fourrage de bonne qualité surtout après le passage des feux précoces (Boudet 1978). Les jachères étaient longues et, sans contrainte majeure, l'évolution de leur végétation aboutissait à celle de la savane originelle. Actuellement avec les pressions anthropiques, surtout agricoles, ce processus est interrompu. Les jachères sont devenues courtes. Les graminées pérennes qui colonisaient les vieilles jachères ont cédé la place aux herbacées annuelles. Ces dernières constituent le potentiel fourrager de la zone. Ce raccourcissement du temps de jachère peut avoir une répercussion très importante sur la disponibilité et la qualité fourragère des terroirs villageois (Fournier 1996). Plusieurs études réalisées sur la végétation des jachères montrent que ces dernières sont plus riches en espèces végétales que leur formation

originelle. Cette richesse est plus marquée chez les jachères de moins de dix ans que les savanes originelles (Zoungrana 1993, Donfack 1993, Yossi 1996). Le régime alimentaire du bétail est autant lié à la disponibilité qu'à la qualité des espèces fourragères. En effet, avec la disparition des graminées pérennes et la raréfaction des jachères, dans bien des terroirs de la zone, il s'avère important de comparer, selon les périodes caractéristiques du régime alimentaire des ruminants domestiques, la composition botanique des régimes ingérés par les bovins dans les différentes formations rencontrées (champs, jachères et formations naturelles) dans les terroirs. C'est dans ce cadre que se situe la présente étude.

II. MATERIELS ET METHODE

Cette étude a été menée dans le terroir villageois de Missira, en zone soudanienne nord du Mali. Il couvre environ 173 km^2 de superficie et reçoit une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 550-750 mm (Karembé 2001, Diarra 1998 ; Dembélé 1996). Situé à 200 km et au nord ouest de Bamako, le terroir de Missira est périphérique à la réserve de biosphère de la boucle du Baoulé.

L'approche utilisée est le suivi des animaux au pâturage pendant cinq périodes caractéristiques du régime alimentaire des ruminants domestiques (Guérin 1987 ; Diallo 1997). Il s'agit du début de la saison pluvieuse (juin-juillet), de mi saison pluvieuse (août), de fin de saison pluvieuse ou début saison sèche (octobre-novembre), de la saison froide (décembre-janvier) et de mi saison sèche (avril-mai).

Avant le suivi, il avait été réalisé une étude de l'utilisation spatiale du terroir, pour mieux cerner les contours de toutes les unités d'occupation des terres. Cette étude révélait que les savanes, jachères et champs occupaient respectivement 61%, 20% et 19% de la superficie du terroir (Diarra 1998).

Ce suivi a consisté à choisir dans le troupeau trois individus (un mâle adulte, une femelle adulte et un jeune) dans le troupeau les espèces broutées seront identifiées *et leur fréquence notée*. Le troupeau suivi était mono spécifique et du type sédentaire avec 89 bovins. Les critères de choix de ces trois individus sont d'une part leur tolérance à l'approche de l'homme et d'autre part leur représentativité (en âge et sexe) dans l'échantillon. Chaque individu a fait l'objet d'un suivi journalier et cela pour chaque période, au cours duquel, à chaque quinze minutes, les espèces prélevées et leurs fréquences étaient notées. Des suivis similaires avaient été réalisés en vue de caractériser le comportement alimentaire des ruminants domestiques en zone sahélienne, au Mali (Dicko 1980, Dicko et Sangaré, 1984) et en zone guinéenne nord, en Côte d'Ivoire (Louppe *et al.* 2000). L'unité d'observation était la bouchée. Outre les espèces et leur fréquence à la bouchée, on notait le type de formation dans le quel s'est opéré le prélèvement, l'heure et la pénétrabilité. Les périodes d'abreuvement et de repos des animaux ont été aussi notées mais ne feront pas l'objet de traitement. La pénétrabilité (p), qui caractérise la densité relative des individus ligneux dans les pâturages, comportait 4 classes. Si la distance relative (dr) entre les individus est > 5m, p = 4 ; si dr est comprise entre 5 et 3 m p=3 ; si dr est comprise entre 3 et 1,5 m p=2 et si dr est <1,5 m p=1. Les suivis étaient effectués selon les trajets normaux de parcours des animaux. Les animaux étaient laissés à eux même, sauf pour les empêcher de pâturer dans les champs de culture pendant l'hivernage. L'application de cette méthode de suivi exige des observateurs une bonne connaissance du terrain, des parcours et des espèces végétales.

Le traitement des données a concerné à :

- L'évaluation de la durée de pâture des bovins du système sédentaire dans les différents pâturages du terroir villageois de Missira ;
- l'évaluation de la richesse floristique du régime ingéré suivant les périodes caractéristiques de l'alimentation des bovins ;
- la détermination de la contribution des groupes fonctionnels d'espèces, suivant les cinq périodes citées plus haut, au régime ingéré par les bovins dans les formations naturelles, jachères et champs.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Comparaison de la durée de pâture des bovins entre les différents types de pâturages

Pour toutes périodes confondues, les bovins passent plus de temps sur les jachères que dans les autres pâturages (figure 1) et cela bien que le taux d'occupation des savanes représente trois fois de celui des jachères sur ce terroir (61% contre 20%). Ceci dénote le rôle important de la jachère pour l'élevage des ruminants domestiques en général et celui des bovins en particulier. Un constat similaire avait été rapporté par Diarra et al. (1993) ; Banoin et Achard (1998) ; Ickowicz *et al.,* (1998) ; Karembé (2001). Ces auteurs soulignent que la jachère constitue aussi bien une réserve fourragère qu'un lieu de parcours préféré par les bovins. Cette préférence de types de pâturages (jachères, savanes ou formations naturelles et champs) varie, au cours de l'année, suivant les périodes caractéristiques d'alimentation de bovins (figure 2).

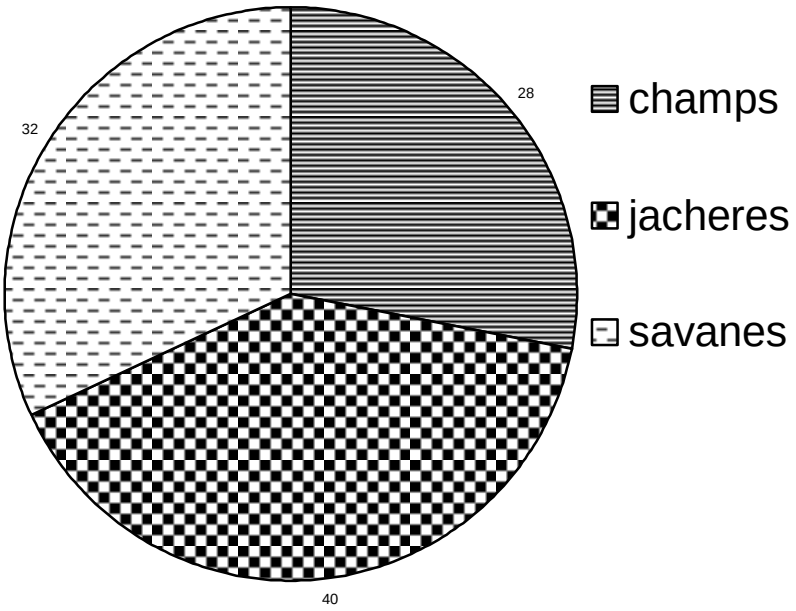


Figure 1: Variation de la durée (%) de pâture, toutes périodes confondues, dans les différents pâturages du terroir villageois de Missira
(Boucle du Baoulé)

Types de pâturages	champs	jachères	savanes
pourcentage de temps	28	40	32

Nos résultats confirment ceux de Ballo (1996). Ce dernier, après une enquête auprès des populations du même terroir, soulignait que 62% des unités d'exploitation agricole interviewées rapportaient que la jachère est la principale source d'alimentation du bétail dans la zone.

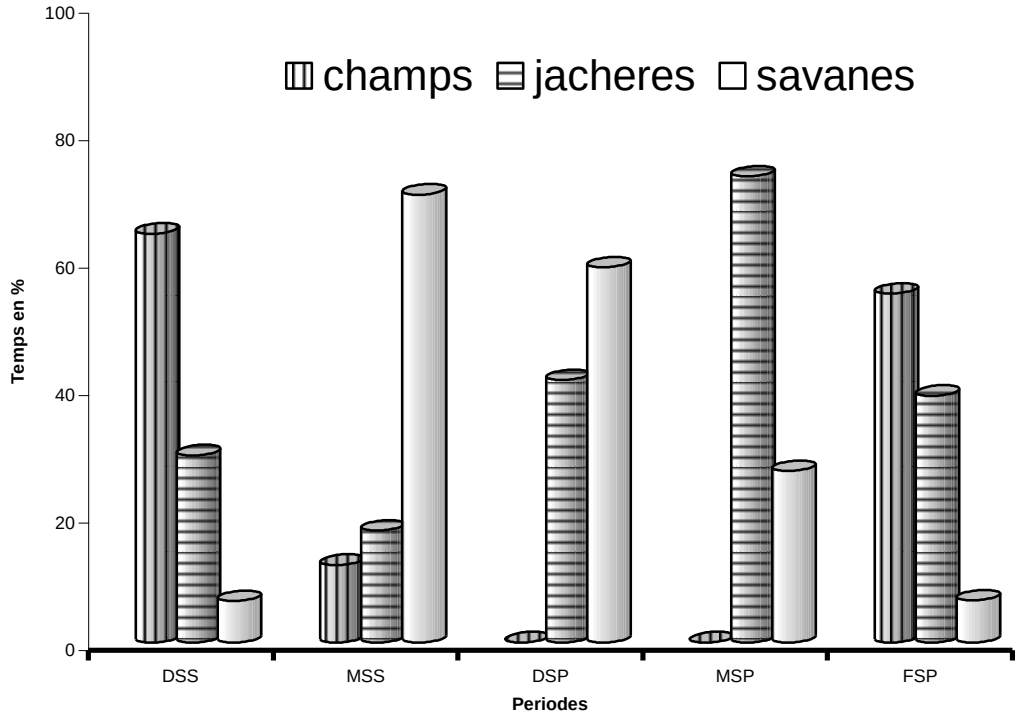


Figure 2: Variation de la durée de pâture en fonction en fonction des périodes de l'année
dans les différents pâturages rencontrés dans le terroir de Missira (boucle du Baoulé)

périodes		**Pâturages**	
	champs	jachères	savanes
DSS	64,13	29,35	6,52
MSS	12,16	17,57	70,27
DSP	0	41,18	58,82
MSP	0	73,12	26,88
FSP	54,72	38,68	6,6

Les champs de culture ne sont pas ouverts aux bovins pendant l'hivernage, c'est à dire au début et à la mi de la saison pluvieuse. Ceci fait que pendant ces périodes le temps de pâture y est nul. C'est uniquement dans les formations naturelles et jachères que prélèvent ces bovins leur ration alimentaire jusqu'en fin hivernage.

3.2. *Variation du nombre d'espèces prélevées dans les pâturages*

Sur 153 espèces végétales recensées (soit 61 espèces ligneuses et subligneuses, 29 graminées, 17 herbacées légumineuses et 46 herbacées diverses) dans les pâturages fréquentés par les bovins,

seulement 72 ont été prélevées. La liste des principales espèces refusées est présentée dans le tableau 1. Cette flore consommée sur le terroir de Missira est constituée de 35% de ligneux, 29% de graminées, 11% d'herbacées légumineuses et 25% d'herbacées diverses.

Tableau 1 : Liste des principales espèces végétales refusées par les bovins

Espèces	**Familles**	**Type biologique**
Waltheria indica	Sterculiaceae	Herbacée
Calotropis procera	Asclepiadaceae	Ligneux
Lannea velutina	Anacardiaceae	Ligneux
Cochlospermum tinctorium	Cochlospermaceae	Herbacée
Vernonia perrottetii	Asteraceae	Herbacée
Ziziphus mucronata	Rhamnaceae	Ligneux
Ximenia americana	Olacaceae	Ligneux
Combretum molle	Combretaceae	Ligneux
Sida stipulata	Malvaceae	Herbacée
Sida rhombifolia	Malvaceae	Herbacée

Le nombre d'espèces végétales prélevées par les bovins est variable selon le type de pâturage, de la période de l'année et de la pénétrabilité du milieu.

Cette variation de la richesse du régime a certainement des effets sur la qualité du fourrage ingéré par les bovins. Ainsi, pendant les périodes comme la saison sèche froide, la mi saison pluvieuse et la fin de la même saison, le nombre d'espèces prélevées est plus important dans les jachères que dans les formations naturelles et champs (figure 3). De même pour toutes périodes confondues, la plus grande richesse floristique du régime ingéré est observée dans les jachères (tableau 2).

Tableau 2 : Variation de la richesse floristique du régime ingéré par les bovins dans les différentes formations, toutes périodes confondues, dans le terroir de Missira

	Champs	**Jachères**	**Savanes**
Graminées	10	16	13
Ligneux	6	15	15
Légumineuses herbacées	3	6	1
Autres herbacées	12	10	6
Total	**31**	**47**	**35**

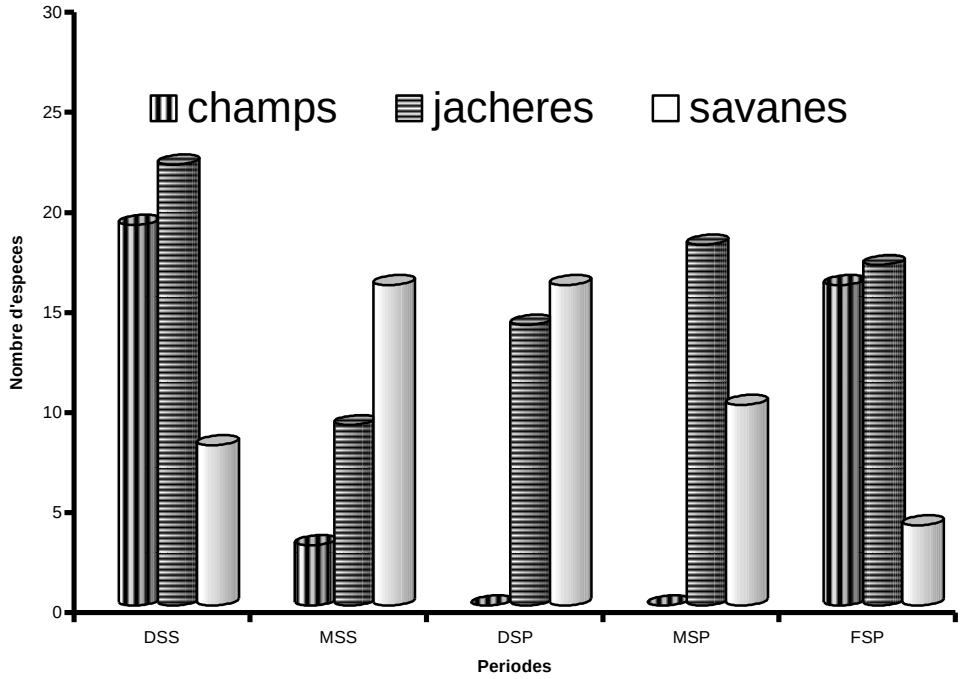


Figure 3: Variation de la richesse floristique du régime ingéré par les bovins, en fonction des périodes de l'année,
dans les jachères, champs et savanes dans le terroir villageois de Missira (boucle du Baoulé)

pâturages	**Périodes**				
	DSS	MSS	DSP	MSP	FSP
champs	19	3	0	0	16
jachères	22	9	14	18	17
savanes	8	16	16	10	4

Cela s'explique, par la diversité plus grande en espèces végétales des jachères par rapport aux autres formations d'une part et d'autre part par l'âge même des plantes. La germination des espèces herbacées est plus étalée dans le temps dans les jachères que dans les formations naturelles (Floret et Pontanier, 2000). Dans les jachères, quand certaines herbacées (comme *Dactyloctenium aegyptuim, Setaria pallidefusca, Digitaria spp.*) terminent leur cycle végétatif après fructification, d'autres (comme *Ipomea spp., Cucumus melo, Mitracarpus scaber*) sont en pleine végétation ou même germination. Ces dernières espèces, bien appétées par les bovins en fin de saison des pluies, sont caractéristiques des jachères. Les premières sont des graminées et les secondes sont des dicotylédones. Le cycle végétatif des dicotylédones en général peut se prolonger tant que l'humidité est encore présente dans le sol, contrairement aux graminées qui ferment leur cycle et meurent après fructification (Hiernaux, 1998, Cissé 1986).

Les listes de la composition botanique des régimes ingérés dans les formations naturelles ou savanes, jachères et champs par les bovins sont rapportées respectivement par les tableaux III, IV et V. La fréquence de prélèvement des plantes ou organes de plantes par les bovins est fonction de la période, du type de pâturage et de la pénétrabilité. Cela pourrait s'expliquer par l'abondance de telle ou telle plante herbacée dans le pâturage, de son stade phénologique mais aussi de la densité des

ligneux qui influence sur son accessibilité par l'animal consommateur. Plus la pénétrabilité est facile plus le nombre d'espèces prélevées par les bovins est élevé (figure 4).

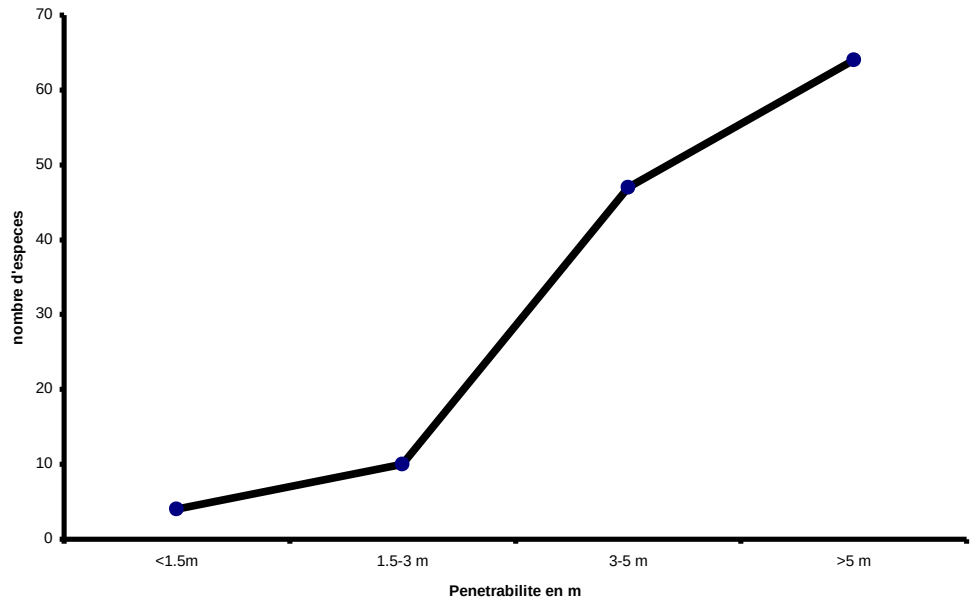


Figure 4: Evolution du nombre d'espèces végétales prélevées par les bovins en fonction de la pénétrabilité
des ligneux des pâturages du terroir de Missira (boucle du Baoulé)

pénétrabilité en m	<1.5m	1.5-3 m	3-5 m	>5 m
nombred'espèces	4	10	47	64

En ce qui concerne la phénologie, *Loudetia togoensis par exemple*, caractéristique des formations naturelles et jachères, est fortement prélevée (en début et mi saison pluvieuse) notamment aux stades de germination, tallage et montaison ; et par contre elle est totalement délaissée (dès la fin de saison de pluies) au stade épiaison-maturation par les bovins. Une fréquence élevée de prélèvement d'une plante, dans une formation riche en espèces, semble être un indicateur de la qualité fourragère de celle-ci. Cependant, cette qualité varie fortement en fonction de l'âge de la plante ou de son organe consommé (Rivière 1978, Fournier 1991, Penning De Vries et Djitèye (1982), Cissé (1986), Breman et de Ridder 1991). Elle est de fait liée au cycle phénologique de la plante.

L'importance de la richesse floristique du régime ingéré par les bovins pendant la saison sèche chaude et le début de l'hivernage dans les formations naturelles s'explique par deux phénomènes. Il s'agit de la précocité d'une germination généralement groupée des graminées au début de l'hivernage dans ces formations d'une part et de l'abondance en ligneux fourragers comparativement aux autres formations d'autre part. Il y a disette, donc faible disponibilité du fourrage au moment du besoin élevé en alimentation pour le bétail qui le pousse vers les ligneux. Toutefois, indépendamment du type de pâturage, le nombre moyen journalier et la richesse spécifique d'espèces prélevées ont la même tendance évolutive suivant les périodes (figure 5).

Tableau 3 : Espèces ingérées dans les savanes ou formations naturelles du terroir de Missira selon les saisons

	Savane				
Espèces	**DSS**	**MSS**	**DSP**	**MSP**	**FSP**
Combretum micranthum	*	0	0	0	0
Digitaria horizontalis	*	0	0	0	0
Ipomea triloba	*	0	0	0	0
Acacia seyal	0	*	0	0	0
Andropogon pseudapricus	0	*	0	0	0
Butyrospermum paradoxum	0	*	0	0	0
Combretum ghasalense	0	*	0	0	0
Combretum lecardii	0	*	0	0	0
Entada africana	0	*	0	0	0
Lannea microcarpa	0	*	0	0	0
Mitragyna inermis	0	*	0	0	0
Piliostigma reticulatum	0	* *	0	0	0
Pterocarpus erinaceus	0	* *	0	0	0
Pterocarpus lucens	0	*	0	0	0
Schizachyrium exile	0	*	0	0	0
Anogeissus leiocarpus	0	0	*	0	0
Bombax costatum	*	*	*	0	0
Borreria stachydea	*	*	* *	0	*
Brachiaria lata	*	0	* * *	* *	0
Brachiaria ramosa	0	0	*	0	0
Combretum aculeatum	0	0	*	0	0
Commelina forskaleii	0	0	* *	0	0
Dactyloctenium aegyptium	0	0	*	0	0
Digitaria chevalieri	0	0	* *	*	0
Diheteropogon hagerupii	0	0	* * * *	* *	0
Indigofera macrocalyx	0	0	*	0	0
Loudetia togoensis	0	0	* * *	* *	0
Rottboellia axaltata	0	0	*	*	0
Setaria pallidefusca	0	0	*	*	0
Tribulus terrestris	0	0	*	*	0
Digitaria debilis	0	0	0	*	0
Monechma ciliatum	0	*	0	*	0
Borreria choetocephala	0	0	0	0	*
Combretum nigricans	*	0	0	0	*
Pennisetum pedicellatum	*	* * * *	* * *	*	*

Légende: Ingestion * * * * très élevée; * * * élevée; * * moyenne; * faible; 0 très faible ;
D = début ; SS= saison sèche, M= mi ; F= fin ; SP= saison pluvieuse

Tableau 4: Espèces ingérées selon les saisons dans les jachères du terroir de Missira, au Mali

	Jachère				
Espèces	**DSS**	**MSS**	**DSP**	**MSP**	**FSP**
Acacia macrostachya	*	0	0	0	0
Albizzia chevalieri	*	0	0	0	0
Anogeissus leiocarpus	*	0	0	0	0
Brachiaria ramosa	*	0	0	0	0
Cassia obticifolia	*	0	0	0	0
Combretum glutinosum	*	0	0	0	0
Corchoris tridens	*	0	0	0	0
Eragrostis tremula	*	0	0	0	0
Monechma ciliatum	*	0	0	0	0
Stylosanthes hamata	*	0	0	0	0
Tribulus terrestris	*	0	0	0	0
Combretum ghasalense	*	* *	0	0	0
Piliostigma reticulatum	*	*	0	0	0
Borassus aethiopium	0	*	0	0	0
Guiera senegalensis	0	*	0	0	0
Prosopis africana	0	*	0	0	0
Pterocarpus erinaceus	0	*	0	0	0
Securinega virosa	0	*	0	0	0
Pennisetum pedicellatum	* *	*	* * * *	* * * *	*
Setaria pallidefusca	*	0	* *	*	*
Bombax costatum	*	0	*	0	0
Diheteropogon hagerupii	0	0	* * *	*	0
Commelina forskaleii	0	0	*	0	0
Andropogon pseudapricus	*	0	*	*	*
Brachiaria lata	0	0	* *	* *	*
Dactyloctenium aegyptium	*	0	*	*	0
Digitaria horizontalis	*	0	*	* *	0
Borreria choetocephala	0	0	0	*	*
Digitaria chevalieri	0	0	*	* *	0
Loudetia togoensis	0	0	*	* * * *	0
Brachiaria deflexa	0	0	0	*	0
Dichrostachys glomerata	0	0	0	*	0
Digitaria debilis	0	0	0	*	0
Digitaria gayana	0	0	0	*	0
Schoenefeldia gracilis	0	0	0	* *	0
Borreria stachydea	* *	0	*	*	* * * *
Combretum aculeatum	*	0	*	*	*
Ipomea triloba	*	0	*	0	*
Andropogon gayanus	0	*	0	0	*
Cassia mimosoïdes	0	0	0	*	*
Alysicarpus ovalifolius	0	0	0	0	*
Crotalaria gorensis	0	0	0	0	*
Cucumus melo	0	0	0	0	*
Hibiscus meckowii	0	0	0	0	*
Indigofera macrocalyx	0	0	0	0	*
Mitracarpus scaber	0	0	0	0	*
Sclerocarya birrea	0	0	0	0	*

Légende : Ingestion * * * * très élevée; * * * élevée; * * moyenne; * faible; 0 très faible

D = début ; SS= saison sèche, M= mi ; F= fin ; SP= saison pluvieuse

Tableau 5 : Espèces ingérées selon les saisons dans les champs, après récolte de cultures, dans le terroir de Missira

Espèces	DSS	M SS	FSP
Arachys hypogea	* *	0	0
Eragrostis tremula	* *	0	0
Hibiscus sabdarifa	* *	0	0
Digitaria horizontalis	*	0	0
Oryza sativa	*	0	0
Bombax costatum	*	0	0
Cassia obticifolia	*	0	0
Tribulus terrestris	*	0	0
Acacia nilotica	*	0	0
Borreria stachydea	*	0	0
Hibiscus asper	*	0	0
Schizachyrium exile	*	0	0
Sorghum bicolor	* * * *	0	* * *
Pennisetum typhoides	* * *	0	*
Zea mays	* * *	0	* *
Pennisetum pedicellatum	*	0	*
Corchoris tridens	* *	0	*
Mitracarpus scaber	*	0	*
Combretum ghasalense	*	*	0
Pterocarpus erinaceus	0	* *	0
Combretum glutinosum	0	*	0
Commelina benghalensis	0	0	* * * *
Cucumus melo	0	0	* *
Ipomea triloba	0	0	* *
Amaranthus spinosus	0	0	*
Cucurbuta sp	0	0	*
Dactyloctenium aegyptium	0	0	*
setaria sp.	0	0	*
Indigofera macrocalyx	0	0	*
Ipomea blepharophylla	0	0	*
Leucas martinicensis	0	0	*

Légende : Ingestion* * * * très élevée; * * * élevée; * * moyenne; * faible; 0 très faible
D = début ; SS= saison sèche, M= mi ; F= fin ; SP= saison pluvieuse

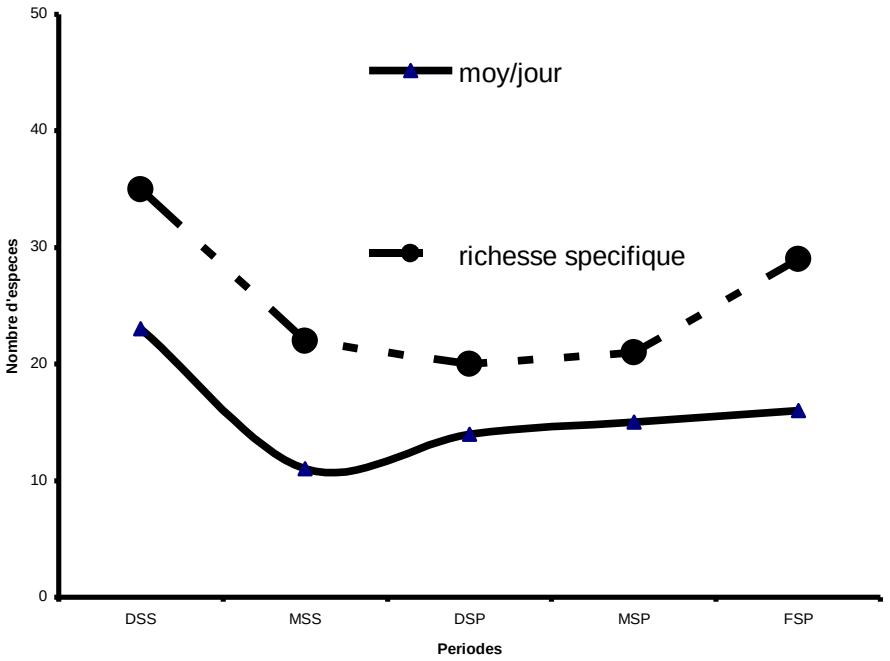


Figure 5: Evolution de la richesse spécifique et du nombre moyen journalier d'espèces prélevées par les bovins, suivant les périodes et tous pâturages confondus, dans le terroir de Missira (boucle du Baoule)

	DSS	MSS	DSP	MSP	FSP
moy/jour	23	11	14	15	16
richesse spécifique	35	22	20	21	29

3.3. Variation de la contribution de groupes d'espèces au régime ingéré par les bovins en fonction des pâturages

Nous avons regroupé les espèces ainsi : les graminées, les légumineuses herbacées, les ligneux et les autres herbacées.

Pour le même pâturage, la contribution de ces groupes d'espèces au régime alimentaire des bovins est très variable suivant les périodes.

Dans les jachères, les graminées contribuent plus au régime alimentaire des bovins que les autres groupes d'espèces et cela pendant le début et la mi de la saison pluvieuse. Le groupe de graminées est essentiellement composé de *Pennisetum pedicellatum, Loudetia togoensis* et *Diheteropogon hagerupii.* Par contre, c'est le groupe des autres herbacées qui constitue l'essentielle de la ration alimentaire en fin de saison des pluies avec plus de 70%. La principale espèce contribuant à cette ration est *Borreria stachydea*. La contribution des ligneux en mi saison sèche chaude est très importante et atteint 70% dans les jachères (Karembé 2001).

Dans les formations naturelles ou savanes, les contributions des groupes fonctionnels d'espèces au régime ingéré sont semblables à celles des jachères. Cependant, il y faut noter la contribution assez élevée des ligneux en fin de saison des pluies et en saison sèche froide (Ickowicz 1995, Onana 1995).

Les champs représentent des pâturages temporaires pour les bovins. De ce fait, leur contribution au régime ingéré des bovins n'est effective qu'après les récoltes des cultures. Elle est constituée des résidus de récolte et des adventices de cultures disponibles. En fin de la saison des pluies, la contribution du groupe des autres herbacées est très importante et elle sera dépassée par celle des résidus de récolte en saison sèche froide.

En saison sèche chaude, ce sont uniquement les ligneux qui constituent le régime alimentaire des bovins. C'est la période cruciale pour l'élevage, dans les zones arides et semi-arides, au cours de la quelle les ligneux jouent un rôle déterminant dans l'alimentation des ruminants domestiques en général et des bovins en particulier (Le Houérou 1980, Toutain 1980, Cissé 1987, Ickowicz 1995, Onana 1995, etc.). Ils permettent de fournir des protéines, des vitamines et souvent des éléments minéraux qui font défaut dans les pâturages herbacés pendant la saison sèche aux animaux.

IV. CONCLUSION

La jachère demeure, comparativement aux autres formations végétales, le pâturage le plus important pour les bovins surtout pendant l'hivernage et la saison sèche froide. Cela à cause de sa grande richesse floristique caractérisée par des graminées assez tendres et des dicotylédones ayant des cycles végétatifs étalés dans le temps. La richesse floristique du menu ingéré augmente sa qualité, donc ce qui pourrait avoir un impact positif sur la performance des bovins.

En effet, la variation de la qualité des fourrages est déterminée par la saisonnalité du système d'alimentation des bovins dans les terroirs soudaniens. Ceci se traduit par une contribution très élevée des graminées à la composition botanique du régime ingéré en saison humide qui sont abandonnées en début de la saison sèche au profit du groupe des dicotylédones (autres herbacées) et des résidus de récolte. Les bovins sont obligés en saison sèche chaude, suite à l'épuisement de ces espèces, de consommer les ligneux et cela quel que soit le type de pâturage où ils se trouvent.

A l'issue de cette étude, la principale interrogation qui se pose est : Quel serait l'impact de la disparition de la jachère sur l'alimentation des bovins du système d'élevage extensif sédentaire en zone soudanienne ?

Au regard du rôle très important de la jachère dans l'alimentation du bétail dans la zone soudanienne, il s'avère nécessaire de pérenniser le système de la pratique de la jachère pour la sauvegarde de l'élevage. A défaut cette pérennisation du système, une solution alternative qui passe par la culture fourragère s'impose.

BIBLIOGRAPHIE

Ballo, M. 1996. *Production et amélioration des ressources pastorales des jachères en zone soudanienne nord du Mali. Cas du terroir villageois de Missira*. Mémoire de fin de cycle IPR/IFRA, Katibougou, Mali, 53p.

Banoin, M., et Achard, F., 1998. Place des jachères dans les systèmes d'élevage et comportement alimentaire du bétail (Ticko, sud-ouest Nigérien), *in Floret et Pontanier : Actes de l'atelier « Jachère et systèmes agraires »***,** 97-110., IRD (ex ORSTOM)/Faculté d'agronomie (Niamey).

Boudet G. 1978. *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères***.** IEMVT. Ministère de la Coopération, Paris, 258 p.

Breman, H. et De Ridder N., 1991. *Manuel sur les pâturages des pays sahéliens***.** Ed. Karthala, ACCT, ABO-DLO et CTA, Paris, France, 484 p.

Cissé M. I., 1987. Aménagements sylvo-pastoraux au Sahel : Rôle des ligneux pour l'élevage. *Contribution au séminaire CILSS/FAO sur « L'aménagement des forêts naturelles »* Bamako, 21 mai au 2 juin 1987. CIPEA, Bamako, Mali. 22p**.**

Cissé, A. M., 1986. *Dynamique de la strate herbacée des pâturages de la zone sud-sahélienne***.** Thèse, Université agronomique, Wageningen, 211 p.

Dembélé, F., 1996. *Influence du feu et du pâturage sur la végétation et la biodiversité dans les jachères en zone soudanienne-nord du Mali. Cas des jeunes jachères du terroir de Missira (cercle de Kolokani).* Thèse de Doctorat de l'université d'Aix-Marseille III. Option biologie des Populations et Ecologie ; 182 p.

Diallo, M. S .1997. *Recherches sur l'évolution de la végétation sous l'effet de la pâture dans l'ouest du Burkina Faso (zone soudanienne) : Cas de Bondoukuy, Kassaho et Kourouma.* Thèse de troisième cycle .Sciences biologiques appliquées. Biologie et Ecologie Végétales, Université de Ouagadougou, 163 p.

Diarra, D. S., 1998. *Contribution à l'étude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation actuelle des terres du terroir villageois de Missira (Boucle du Baoulé, Zone soudanienne nord du Mali)***.** Mém. de fin d'étude de l'IPR/IFRA de Katibougou, Mali, 65 p.

Diarra, L., Coulibaly, Y., Ouologuem, B. et De Leeuw, P. N., 1993. Evaluation de la contribution des jachères à la production animale dans différents terroirs de la zone péri-urbaine de Bamako. Dans : Floret C. et Serpantié G. (Eds) : *La Jachère en Afrique de l'Ouest* 435-450 Collection Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris.

Dicko, M. S. et Sangaré M., 1984. *Le comportement alimentaire des ruminants domestiques en zone sahélienne***,** document de programme no.AZ101B, CIPEA, Bamako, 13 p.

Dicko, M. S., 1980. Contribution des fourrages ligneux à l'alimentation des bovins du système sédentaire de l'Office du Niger. In : *Les fourrages ligneux en Afrique*, H.N. Le Houérou, (éd). Centre International pour l'Elevage en Afrique (CIPEA), Addis Abeba, Ethiopie : 307-313.

Donfack, P., 1993. *Etude de la dynamique de la végétation après abandon de la culture au Nord Cameroun***.** Thèse de doctorat de 3ème cycle, Univ. de Yaoundé 180 p.

Floret, Ch. et Pontanier, R., 2000. *La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances.* Volume 2, JL ; CORAF/IRD. 339 p.

Fournier, A,. 1996. Dans quelle mesure la production nette de matière végétale herbacée dans les jachères en savane soudanienne est-elle utilisable pour le pâturage ? Dans *Floret C. (ed). La jachère, lieu de production* 101-111. Actes de l'atelier international, Bobo-Dioulasso 2-4 octobre. CORAF /UE /ORSTOM /CNRST.

Fournier, A., 1991. *Phénologie, croissance et production végétales dans quelques savanes d'Afrique de l'Ouest. Variations selon un gradient climatique*. ORSTOM, coll. Etudes et thèses, 312p.

Guérin, H., 1987. *Alimentation des ruminants domestiques sur pâturages naturels sahéliens et sahélo-soudaniens : étude méthodologique dans la région du Ferlo au Sénégal*, Montpellier, ENSA, thèse doct-ingénieur, 213 p.

Hiernaux, P., 1998. Effects of grazing on plant species composition and spatial distribution in rangelands of the Sahel. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. *Plant Ecology* 138 : 191-202.

Ickowicz, A., Usengumuremyi, J., Richard, D., Colleie, F. et Dupressoir, D., 1998. Interactions entre jachère et systèmes d'alimentation des bovins : choix techniques et dynamique de

développement (zone soudanienne, Sénégal). Dans Floret C. et R. Pontanier *« Jachère et systèmes agraires »* 123-138. IRD/ Faculté d'agronomie (Niger).

Ickowicz, A., 1995. *Approche dynamique du bilan fourrager appliquée à des formations pastorales du Sahel Tchadien*. Thèse de doctorat, Univ. Paris XII, Créteil, France.

Karembé, M., 2001. *Production végétale et utilisation des ressources pastorales des jachères en zone soudanienne au Mali*. Mém. Thèse de doctorat, ISFRA, Univ. du Mali, 159p+annexes

Le Houérou, H.N., 1980. Le Rôle des ligneux fourragers dans les zones sahélienne et soudanienne. In : *Les fourrages ligneux en Afrique*, H.N. Le Houérou, (éd). Centre International pour l'Elevage en Afrique (CIPEA), Addis Abeba, Ethiopie : 85-101.

Loupe, D., Ouattara N., Zoumana C. et César J. 2000. Influence du pâturage par trois espèces animales domestiques sur la dynamique de la végétation des jachères du nord de la Côte d'Ivoire. In : Floret C et Pontanier R. (éds.) 2000. *La jachère en Afrique tropicale*, actes du séminaire de Dakar, 13-16 avril 1999, John Libbey Eurotext, Paris (à paraître).

Onana, J., 1995. Les ligneux fourragers du Nord-Cameroun. I. Inventaire et phénologie. *Revue Elev. Med. Vét. Pays trop*. 48 (2) : 213-219.

Penning De Vries, F. W. T. et Djitèye, M. A., 1982**.** *La productivité des pâturages sahéliens : Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*. PUDOC Wageningen, Agric. Res . Rep. (Verel. Landbouvk, Onderz.) 918, 525 pages

Rivière, R., 1978. *Manuel d'alimentation des ruminants domestiques en milieu tropical*. « Manuels et Précis d'élevage » No 9, ministère de la coopération. CIRAD-EMVT, Maisons-Alfort, 527 p.

Toutain, B., 1980. Le rôle des ligneux pour l'élevage dans les régions soudaniennes d'Afrique de l'Ouest. In : *Les fourrages ligneux en Afrique*, H.N. Le Houérou, (éd). Centre International pour l'Elevage en Afrique (CIPEA), Addis Abeba, Ethiopie : 105-110.

Yossi H., 1996. *Dynamique de la végétation post-culturale en zone soudanienne du Mali*. Thèse doct. Option Population-Environnement, ISFRA, Bamako, Mali, 141 p.

Zoungrana, I., 1993. Les jachères nord-soudaniennes du Burkina Faso. II. Diversité, stabilité et évolution des communautés végétales. Dans : C. Floret et G. Serpantié (éds.). *La jachère en Afrique de l'ouest.* Colloques et Séminaires, Orstom, Paris.

Modélisation de la croissance des formations ligneuses de jachère.

Maguette KAIRE

Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) Centre National de Recherches forestières (CNRF) BP 2312 Dakar Sénégal

RESUME

La présente étude concerne la modélisation de la production ligneuse des jachères en zones soudanienne (Saré Yorobana et Guiro Yoro Bocar, 1200 mm), soudano-sahélienne (Sonkorong, 700 mm) et soudano-guinéenne (Boulandor, 1300 mm) du Sénégal. Les quatre sites étudiés s'opposent sur des critères climatiques et anthropiques. L'objectif principal de l'étude est d'estimer le niveau de production en biomasse ligneuse des jachères et de déterminer le modèle de croissance, compte tenu des usages actuels de cette ressource, et le temps de jachère nécessaire pour une production optimale.

Les estimations de production ligneuse ont été faites sur la base de relations allométriques (tarifs de biomasse) reliant la biomasse ligneuse et le diamètre des individus. Il apparaît que l'accroissement en biomasse ligneuse est important dans le jeune âge et faible dans les vieilles jachères. La production de biomasse ligneuse est 2 à 3 fois plus élevée en zone soudanienne et soudano-guinéenne qu'en zone soudano-sahélienne. Cette différence de niveau de production peut être attribuée aux facteurs édapho-climatiques et à la pression anthropique. Pour une production ligneuse propre aux différentes utilisations, 6 à 10 ans de jachère suffisent en zone soudanienne et soudano-guinéenne, et plus de 15 ans en zone soudano-sahélienne.

Mots clés: *Jachère ; production ligneuse ; modélisation ; Sénégal*

INTRODUCTION

En Afrique tropicale, la problématique de la gestion des formations ligneuses de jachère est la même que celle des formations forestières fortement anthropisées. Du point de vue de la structure et de la composition floristique, les vieilles jachères sont très proches des forêts sèches voisines. En zone sahélienne, cette problématique est très complexe et concerne la production de bois, la crise du bois d'énergie et la désertification.

La modélisation de la production des formations ligneuses en Afrique tropicale a fait l'objet de très peu d'études; le problème provient d'une part de la difficulté de se référer à un âge (ALEXANDRE, 1998), et d'autre part de la multiplicité des espèces. Elle constitue cependant un outil indispensable à la compréhension de la dynamique de ces peuplements ligneux dans une optique d'aménagement durable.

On a coutume de faire partir la datation des jachères de l'abandon cultural. Cette option n'est pas toujours justifiée. En fait la croissance des plantes de la jachère commence à partir de l'ouverture du couvert et elles évoluent différemment selon que les sarclages ou recépages sont intenses ou discrets. Dans de nombreux cas les rejets ligneux sont déjà grands lors des récoltes. Les espèces qui rejettent sont nombreuses et plus ou moins résistantes à la remise en culture répétée.

Il est cependant urgent de savoir si la jachère produit, en biomasse ligneuse, plus que ce qui est consommé par les populations, auquel cas le système peut se maintenir, ou moins et alors la consommation, en entamant le capital, amorce une spirale de dégradation. La mesure de cette productivité ligneuse pose d'énormes problèmes mal résolus et les résultats recensés montrent une certaine discordance.

Matériel et méthodes

Sites d'étude

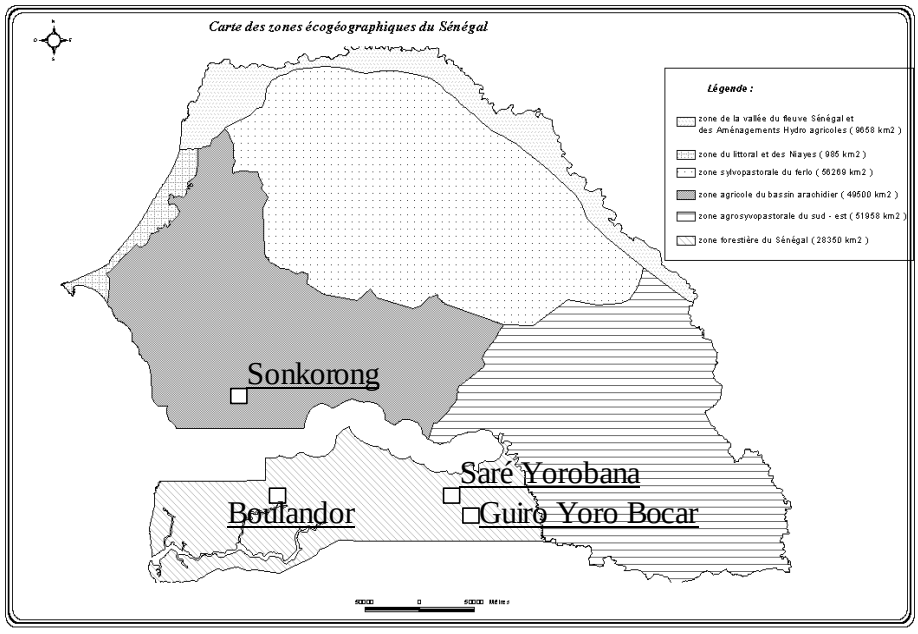


Figure 1: Situation des terroirs étudiés dans les différentes zones écogéographiques du Sénégal

Le sud du bassin arachidier (Sonkorong, 700 mm de pluviosité), la Haute-Casamance (Saré Yorobana et Guiro Yoro Bocar, 1100 mm), et la Basse-Casamance (Boulandor, 1200 mm), constituent nos zones d'étude. Elles correspondent respectivement aux domaines soudano-sahélien, soudanien, et soudano-guinéen. Les densités de population à l'échelle régionale sont estimées respectivement à 62 hbts /km², 40 hbts /km² et 53 hbts /km². Dans le découpage administratif, elles appartiennent respectivement aux régions de Kaolack, Kolda et Ziguinchor. Ces zones définissent ensemble un gradient de pluviosité et de pression anthropique (figure 1):

Choix des jachères à étudier et technique d'inventaire

La méthode d'observation est dite "synchronique" : dans chacun des sites, des parcelles d'âges d'abandon différents sont choisies et comparées entre elles.

Cinq à six jachères d'âges différents ont été retenues par site (tableau 1). Trois parcelles de 300 m² ont été inventoriées par âge de jachère. L'inventaire a consisté à mesurer les diamètres à 130 cm ou à la base (pour les jeunes individus) de toutes les tiges présentes dans les parcelles.

Tableau 1 : grappe d'échantillonnage des parcelles.

Zones et domaines	Sites	Ages de jachères inventoriés						taille parcelles
Sud Bassin Arachidier (soudano-sahélien)	**Sonkorong**	**1an**	**3ans**	**6ans**	**10ans**	**15ans**		**3x300m²**
Haute Casamance (soudanien)	**Saré Yorobana**	**1an**	**3ans**	**7ans**	**13ans**	**18ans**	**25ans**	**3x300m²**
	Guiré Yoro Bocar	**1an**	**2ans**	**4ans**	**9ans**	**17ans**	**27ans**	**3x300m²**
Basse Casamance (soudano-guinéen)	**Boulandor**	**1an**	**3ans**	**5ans**	**10ans**	**15ans**	**20ans**	**3x300m²**

Détermination de l'âge des jachères

Deux méthodes complémentaires ont été utilisées pour la détermination de l'âge des jachères: – L'enquête qui consiste à interroger le propriétaire de la parcelle sur l'année d'abandon cultural. Pour les vieilles jachères (10 ans et plus) les paysans essayent de situer la date d'abandon cultural par rapport à un événement local ou national. L'âge des jeunes jachères est toujours facile à obtenir par enquête.

– Le comptage des cernes de croissance sur des sections de tiges de *Combretum glutinosum* et *Detarium microcarpum* qui présentent des cernes nettement discernables (KAIRE, 1999).

Estimation de la biomasse aérienne ligneuse des parcelles

Elle a été effectuée à l'aide des tarifs de biomasse établis à partir des quatre principales espèces des jachères (*Terminalia macroptera, Piliostigma thonningii, Combretum glutinosum, Combretum gneitonophyllum*) qui occupent 70 à 80% des effectifs. 40 individus par espèce ont servi à l'élaboration des tarifs.

Modélisation de la production de biomasse des ligneux en fonction de l'âge des jachères

Différents modèles de croissance ont été testés sur la distribution de nos valeurs de biomasse en fonction de l'âge de la jachère : modèles de Von Bertalanffy, Gompertz, Chapman-Richards; tous ces modèles sont dérivés du modèle logistique de Verhulst. Le modèle de Chapman Richards a été retenu parce qu'il s'ajuste mieux à nos valeurs de biomasse. La validation du modèle détermine si le modèle est une représentation valable du système réel.

RESULTATS

La biomasse ligneuse des jachères

Les tarifs de biomasse aérienne

Les données obtenues, liant la biomasse ligneuse aérienne au diamètre (à 130 cm ou à la base) pour les quatre espèces ont été ajustées à une fonction puissance du type : $Y = a.X^{b}$ avec:

Y = biomasse aérienne ligneuse sèche (en kg) ; X = diamètre considéré (en cm) ; a et b = coefficients constants.

La figures 2 montre la régression globale toutes espèces confondues. La variabilité des biomasses est généralement proportionnelle à leur valeur, ce qui donne cette distribution en "trompette ou queue de comète" caractéristique de tous les tarifs de biomasse.

L'étude de la qualité du modèle (tarif unique) est réalisée à partir du coefficient de détermination (R^2) qui est très proche de 1, du biais moyen des prédictions et de l'examen graphique des résidus (KAIRE, 1999).

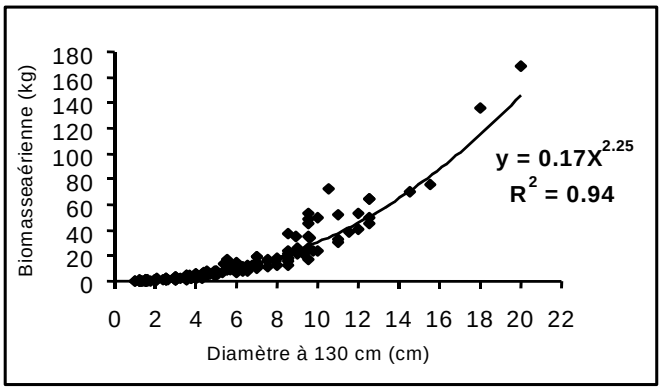


Figure 2: Relation entre la biomasse aérienne (kg) et le diamètre à 130 cm (cm) toutes espèces confondues

Modélisation de la croissance des peuplements ligneux des jachères.

La figure 3 donne les valeurs de biomasse aérienne mesurées dans les quatre sites, et les ajustements du modèle de Chapman-Richards aux nuages de points obtenus.

Selon PAVE (1994), la croissance jusqu'à un palier K est modélisée en fonction de celui-ci. Le freinage de la multiplication exponentielle, pouvant être vu comme une résistance du milieu à la croissance, doit être d'autant plus forte qu'on approche de la valeur limite.

Les modèles que nous avons testés sont des variantes du modèle logistique. Nous avons retenu le modèle de Chapman-Richards qui s'ajuste mieux à nos valeurs observées. Mais comme l'ont souligné COQUILLARD et HILL (1997), un modèle doit donner lieu à des interprétations biologiques et ainsi conforter son usage. L'équation de Chapman-Richards est la suivante: $Y=K[1-\exp(-2.r.t/K)]^2$. Elle traduit une croissance comprenant une partie initiale de type exponentiel positif, mais de durée plus courte que la partie suivante. La courbe sigmoïde est dissymétrique

contrairement à la courbe logistique. L'introduction du terme d'autolimitation aboutit à une courbe de croissance comprenant trois phases : une phase exponentielle positive en début de croissance, une phase linéaire d'accroissement maximal, et une phase où la biomasse se rapproche de sa valeur limite.

Pour comparer la croissance dans les différents sites, nous avons fait évoluer le modèle dans chaque site jusqu'à 30 ans (figure 4).

La phase initiale du modèle est peu ou pas visible selon les sites. Cette phase peut être située entre 0 et 3 ans dans les sites où elle est peu visible (Saré Yorobana et Sonkorong).

La deuxième phase (phase linéaire d'accroissement maximal) est située entre 3 et 7 ans à Saré Yorobana, 3 et 10 ans à Sonkorong, 0 et 3 ans à Boulandor et entre 2 et 5 ans à Guiro Yoro Bocar. Au-delà de cette deuxième phase, la croissance suit une exponentielle négative et tend vers un palier qui est atteint aux environs de 30 ans à Saré Yorobana, 20 ans à Guiro Yoro Bocar, 15 ans à Boulandor et au-delà de 30 ans à Sonkorong. Dans ce dernier site, la croissance semble être plus lente comparée aux autres sites.

A Boulandor et Guiro Yoro Bocar, le démarrage de la végétation est rapide et la croissance très forte au début, mais le freinage est violent ; ces deux sites présentent les meilleurs taux de croissance maximale qui sont d'environ 5,1 tonnes et 6, 7 tonnes/ha/an respectivement pour Boulandor et Guiro Yoro Bocar ; ce mode de croissance est caractéristique des jachères à dominance d'espèces buissonnantes à grande capacité de rejets comme *Guiera senegalensis* à Boulandor et *Holarrhena floribunda* (dont l'abondance est, selon les paysans, liée à la fréquence des feux) à Guiro Yoro Bocar. Saré Yorobana présente une croissance qui semble subir le moins les effets de l'action anthropique.

L'équation de croissance de Chapman-Richards dépend de K (palier), r (taux de croissance maximum) et t (âge de la jachère). Quand Y devient proche du palier, la différence entre la croissance atteinte et la valeur limite K obéit à une exponentielle négative (la production tend exponentiellement vers sa limite). La valeur de K traduit en réalité les potentialités du milieu.

K et r peuvent aussi être déterminés graphiquement à partir du diagramme de Ford-Walford (figure 5): Il consiste à représenter, un pas de temps étant choisi, la production à un instant t+1 en fonction de la production à l'instant précédent t. Cette relation est une droite de pente exp(-r) et de terme constant K(1-exp(-r)). Y_t et Y_{t+1} tendent tous vers K, donc à la limite $Yt = Y_{t+1}$.

Le modèle de Chapman-Richards considère que la biomasse est nulle au temps t=0 (phase culturale). Elle a donc plutôt tendance à minimiser la production des jachères de 1an. Or, nous savons que cette biomasse au temps t =0 n'est pas nulle (il y a de la biomasse aérienne même pendant la phase culturale). Selon PAVE (1994), dans de nombreux cas de modélisation, se pose le problème de la valeur initiale. Pour contourner ce problème, nous avons fait une transformation de variable en ajoutant 0,5 au temps t.

L'approche de K dans chaque site s'est faite par examen de l'évolution de l'accroissement annuel moyen pour déterminer à quelle période l'accroissement devient-il très faible. K est ensuite déterminé par itération à l'aide du solveur dans EXCEL : Il s'agit de trouver une valeur de K (r et t étant fixés) en ajustant les valeurs du modèle de façon à rendre minimaux les écarts entre les valeurs observées et celles du modèle.

Le tableau 2 présente les valeurs de K et r pour chaque site. A Sonkorong, les jachères les plus anciennes ont 15 ans d'âge et sont constamment rajeunies du fait de l'exploitation permanente ; ce qui laisse supposer qu'à ce rythme, la valeur de K (33 tonnes) ne sera atteinte que par une mise en

défens des parcelles de jachère. La valeur de r dépend de la fertilité de la station, des espèces dominantes et de leur densité.

Le modèle peut être validé en comparant ses résultats à ceux du système réel modélisé de manière à déterminer si le modèle est une représentation valable du système réel. Dans chacun des sites, la relation entre les valeurs de biomasse observées et celles calculées par le modèle est un nuage de points auquel on peut ajuster une droite de pente proche de 1 et passant à proximité de l'origine aux erreurs de mesure près (KAIRE, 1999).

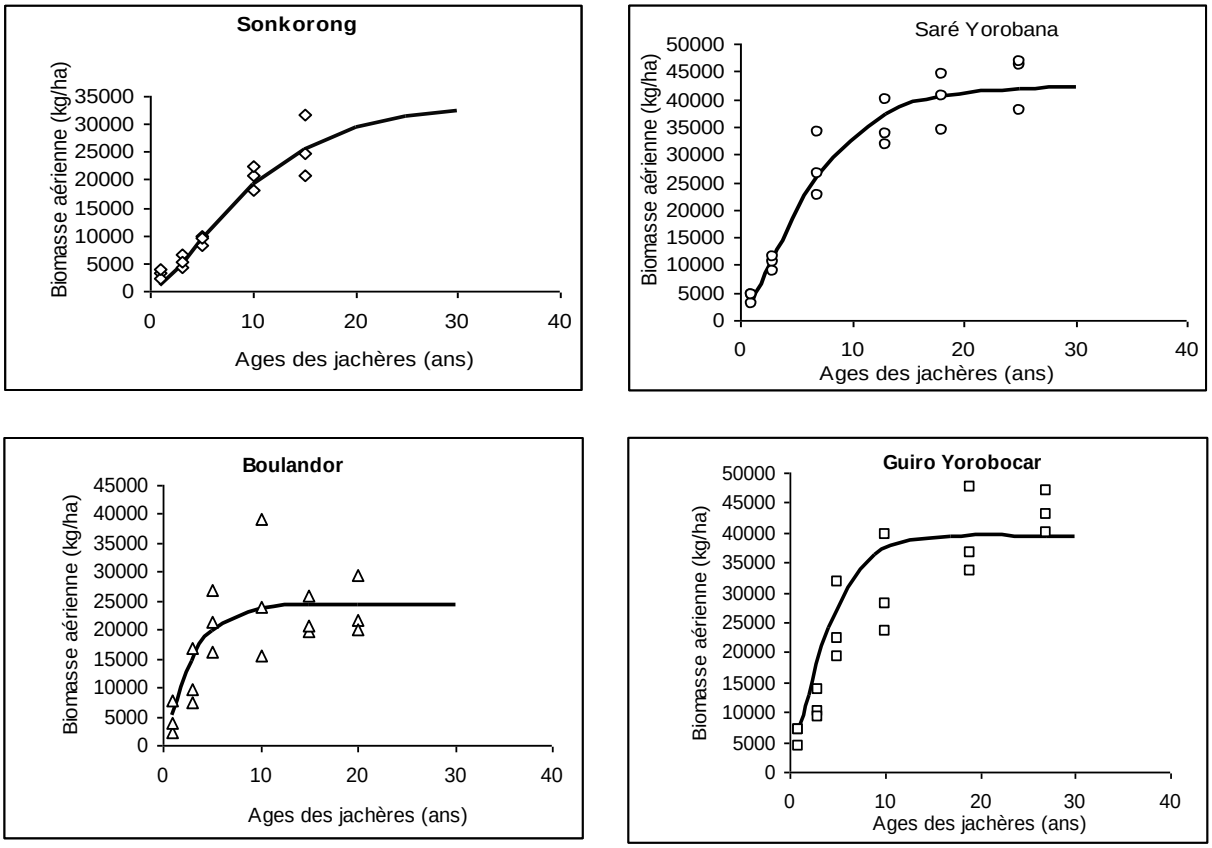


Figure 3: Biomasse ligneuse aérienne en fonction de l'âge des jachères et selon le modèle de Chapman-Richards ($Y = K[1–\exp(-2rt/K)]^2$)

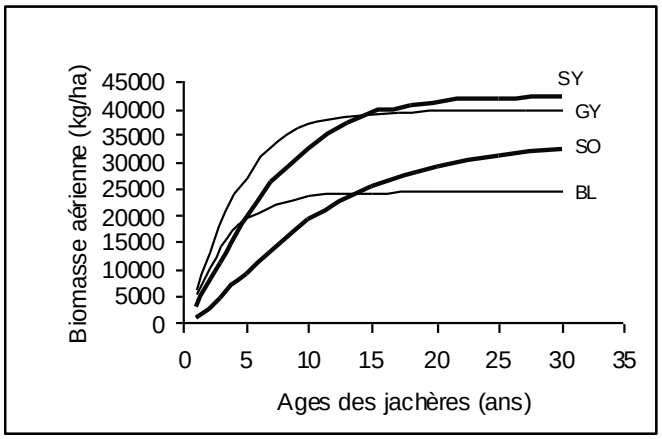


Figure 4: Comparaison de la croissance des peuplements ligneux des jachères étudiées selon le modèle de Chapman Richards : SY=Saré Yorobana ; GY= Guiro Y.Bocar ; SO=Sonkorong ; BL=Boulandor

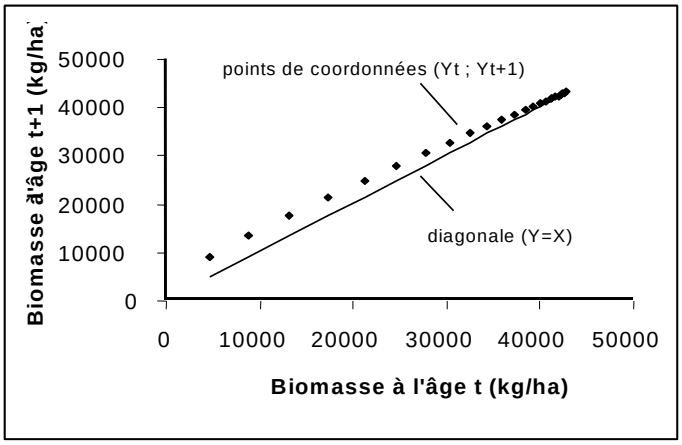


Figure 5: diagramme de Ford-Walford pour la détermination graphique de K et r

Tableau 2: Valeurs de K et r dans les peuplements ligneux des jachères étudiées

Sites	K	r
Sonkorong	33338	2245
Boulandor	24240	5111
Saré Yorobana	42353	4364
Guiro Yoro Bocar	39435	6700

Discussions

Les tarifs de biomasse

Pour les tarifs de biomasse, il est admis que la relation est du troisième degré du type $Y=aX^b + c$, où l'exposant b est compris entre 2 et 3, généralement de l'ordre de 2,5 ; la valeur de 2,66 correspondant au meilleur compromis poids / résistance ; le coefficient c, qui correspond théoriquement au poids d'un individu de 130 cm de hauteur, peut être négligé (ALEXANDRE et KAIRE, 1999). Cette relation est valable non seulement pour une espèce donnée (chaque espèce donnant un alignement précis), mais pour les différentes espèces dans une région donnée (l'ensemble des espèces dans une région donne un nuage de point assez étroit, caractéristique du climat local). Un des grands traits communs à ces nuages de points est la variabilité des biomasses qui est proportionnelle à leurs valeurs : plus les arbres sont gros, moins bien ils sont estimés.

La production ligneuse

La complexité de la mesure de la production fait que les données disponibles sont souvent disparates; les chiffres de production souvent très bas donnés dans la littérature, correspondent probablement à des peuplements très dégradés, qui ont perdu leur capacité de production. CLEMENT (1983) établit une corrélation entre la production en volume et la pluviométrie (valable entre 500 et 1600 mm): $I = 0,05 + 1,08\ P^2$ où I est la production en m^3/ ha / an et P la pluviométrie en mètres.

La corrélation entre pluviométrie et croissance a de bonnes bases écologiques. On admet en effet que la croissance des arbres est, pour un sol donné, étroitement corrélée à la longueur de la saison de croissance, qui elle même est en relation avec la hauteur de pluie, mais de manière plus lâche. Nos estimations de croissance donnent des augmentations maximales de biomasse de 2.25 t/ha/an pour la zone soudano-sahélienne (700 mm), 4 à 5 t/ha/an pour la zone soudanienne (1100 mm) et

environ 5 t/ha/an pour la zone soudano-guinéenne (1300 mm) ; et les productions estimées se situent bien dans la plage de valeurs de production de biomasse aérienne des savanes africaines (6-60 tonnes/ha) données par MENAUT, LEPAGE et ABBADIE (1995) dans une synthèse bibliographique.

Effets des prélèvements et des feux annuels

Lorsque les prélèvements sont effectués pendant la période de croissance maximale, on assiste à un rajeunissement de la biomasse: les arbres ont tendance à remplacer cette biomasse perdue par une croissance régénérative à partir des réserves accumulées par la plante (FRONTIER et PICHOD-VIALE, 1995). Il y a donc danger à maintenir la végétation au niveau du taux maximum de production car on risque alors de ralentir la reconstitution des réserves. Si les prélèvements importants sont effectués pendant la phase de faible croissance, le renouvellement de cette biomasse va être très lent et surtout quand les prélèvements sont supérieurs à l'accroissement annuel.

CONCLUSION

L'approche en mode synchrone présente bien entendu des inconvénients, mais reste difficilement contournable car il est difficile, compte tenu des contraintes de temps et de moyens, de suivre les mêmes parcelles durant plusieurs années.

Pour une production ligneuse propre aux différentes utilisations que ces populations en font, l'étude montre que 10 ans de jachère suffisent en zone soudanienne et soudano-guinéenne, alors qu'en zone soudano-sahélienne, même les jachères de 15 ans n'arrivent pas à produire toutes les dimensions de tiges recherchées du fait de la surexploitation permanente et des conditions difficiles de croissance. La mise en défens, même de courte durée, assure une meilleure production ligneuse et présente un grand intérêt pour la zone soudano-sahélienne.

Une exploitation rationnelle de la ressource ligneuse des jachères doit maintenir un équilibre dynamique entre production et prélèvement.

Dans un milieu dont le potentiel écologique est faible en raison des conditions naturelles et de la pression anthropique, la gestion de la jachère est ou sera incontournable pour assurer la durabilité du système.

BIBLIOGRAPHIE

Alexandre D.Y., 1998 – *La production des jachères soudaniennes, rappels dendrométriques,* (non publié), 5 p.

Alexandre D.Y. et Kaire M., 1999 : *Les productions des jachères soudaniennes (bois et produits divers*). Communication au séminaire « La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives », Dakar 13-16 avril 1999. 19p + annexes.

Clement J., 1983 : *Estimation de la biomasse et de l'accroissement des ligneux dans les formations mixtes forestières et graminéennes tropicales*. In « Mesures des biomasses et des accroissements forestiers ». Les colloques de l'INRA n° 19, 356p.

Coquillard P. et Hill D. R. C., 1997 – *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Edition MASSON, Paris, France, 273 p.

Frontier S. et Pichod-Viale D.,1995 - *ECOSYSTEMES: structure, fonctionnement, évolution. 2é édition* MASSON, Paris, France, 447 p.

Kaire M. 1999 *La production ligneuse des jachères et son utilisation par l'homme au Sénégal*. Thèse de Doctorat, Univ.Provence, Marseille, France, 141p.

Menaut J. C., Lepage M. et Abbadie L., 1995 : *Savannas, woodlands and dry forests in Africa*. In « Seasonally dry tropical forests » ; Bullock, Mooney and Medina, Cambridge University press , pp 65-92.

Pave A., 1994 – *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas Lyon, France, 559 p.

Pour une gestion intentionnelle de l'arbre par les agropasteurs du Nord Cameroun : Du champ au paysage

R. Peltier* ; J.M. Harmand* ; M. Ntoupka** ; F. Njiti** ; N. Sibelet* ; G. Smektala***

* Cirad Campus de Baillarguet, TA 10/B 34398 Montpellier Cedex 5, France
** IRAD Institut de Recherche Agricole pour le Développement, B.P. 222, Maroua, Cameroun
*** Engref BP 44494 – 34394 Montpellier Cedex 5, France

RESUME

Du fait de l'augmentation de la population et de la péjoration des conditions climatiques, des milliers d'agriculteurs quittent chaque année les zones sahéliennes du Nord-Cameroun pour s'installer, plus au sud, dans les zones soudaniennes.

Ils y défrichent progressivement les savanes arborées pour y installer leurs cultures. La grande faune est rapidement décimée. Les parcours des éleveurs se réduisent et des conflits apparaissent. Le nombre et la diversité des arbres diminuent rapidement et leurs produits se raréfient. Les sols perdent rapidement leur fertilité initiale et certains agriculteurs se voient contraints à poursuivre leur migration après une vingtaine d'années d'utilisation du milieu. Or l'espace devient rare et les services de protection de l'environnement s'opposent au défrichement des dernières aires protégées.

Il est donc impératif d'aider les populations à trouver des méthodes de gestion de l'environnement plus durables et plus conservatrices des sols et de la biodiversité.

De nombreux projets de recherche-développement ont montré toute l'importance de l'arbre pour conserver ou rénover la fertilité des sols à travers l'enrichissement des parcs arborés ou l'installation de jachères arborées améliorées.

Ces recherches, dont les résultats ont été diffusés par des projets de développement (DPGT, ESA...), ont permis la réinstallation de plusieurs millions d'arbres dans les champs des agriculteurs. Malgré cela, des études ponctuelles montrent que le nombre et la diversité des arbres continuent à diminuer au niveau des territoires villageois, car le nombre d'arbres conservés par quelques agriculteurs reste très souvent inférieur à celui de ceux qui sont abattus sur les espaces pas encore ou pas clairement appropriés.

Une modification des représentations individuelles et collectives de l'arbre et de sa gestion est un préalable indispensable à la mise en place d'une gestion intégrée de l'arbre dans l'ensemble des territoires.

Une étude réalisée par un groupe d'étudiants et d'enseignants chercheurs de l'IRAD, du CIRAD et de l'ENGREF, montre qu'il est possible de modéliser simplement l'évolution de la ressource arborée. Ceci peut aider les villageois à prendre conscience des futures pénuries et les inciter ainsi à prendre des mesures de conservation ou de régénération anticipées et à entamer un processus de négociation entre les groupes à intérêts contradictoires. On espère ainsi apaiser les conflits entre éleveurs, agriculteurs et bûcherons qui peuvent cohabiter même avec des densités de population égales ou supérieures à 100 habitant/km².

L'applicabilité de telles méthodes à grande échelle reste cependant à démontrer car il faudrait mettre en place, au niveau de cette région, une politique de sécurisation foncière et d'appui à la gestion collective des ressources.

Problématique : La migration des populations vers les zones soudaniennes entraîne des défrichements massifs des savanes arborées.

Au Nord Cameroun, comme dans la plupart des pays situés au sud du Sahara, du Sénégal au Tchad, l'essentiel de la population se concentrait jusqu'à ces vingt dernières années dans la ceinture soudano-sahélienne. Cette zone avait vu en effet se développer de vieilles civilisations et des Etats centralisés qui avaient des relations commerciales anciennes avec les pays du Maghreb et qui se sont progressivement islamisés au cours du dernier millénaire.

Le climat est de type monomodal avec une saison des pluies située en période chaude, entre juin et septembre et la pluviométrie varie de 600 à 900 mm en moyenne. Du point de vue géologique, on se situe sur le socle pré-cambrien mais l'essentiel des cultures est pratiqué sur des sols remaniés par l'érosion éolienne (plaquage sableux) ou hydrique (vertisols des grands bassins, comme le lac Tchad,...). Les conditions écologiques permettent à la fois l'élevage (zébus, taurins, chèvres, moutons) et la culture du mil (*Pennisetum spp*.) et du Sorgho (S*orghum spp*.), auxquels sont venus s'ajouter, au cours des siècles, de nombreuses plantes sélectionnées localement ou introduites. La plus importante, économiquement, depuis l'époque coloniale, est le coton, sans oublier le riz en zone irrigable.

Les zones situées plus au Sud et qui jouissent d'un climat plus humide de type soudano-guinéen (pluviométrie située en moyenne de 900 à 1200 mm/an), étaient paradoxalement moins peuplées pour des raisons historiques (les Etats situés plus au Nord les avaient en grande partie vidées par leur "razzias" et par la traite) et écologiques (les maladies des hommes, du bétail et des cultures étaient plus importantes). D'autre part, les sols peu évolués, issus pour la plupart de la dégradation des grés, étaient plus sensibles à l'érosion. De ce fait, cette bande de terre qui va du sud du Sénégal au sud du Tchad, qui était couverte par la savane arborée à Karité (*Vitellaria parodoxa*) (Arbonnier, 2000), et où vivait une faune importante d'herbivores (éléphants, buffles, antilopes,...) et leurs prédateurs (lions,...), avait été largement classée en aires protégées (parcs nationaux) ou en zones de chasses par les colonisateurs, dans les années 1940-1960.

Au cours de la fin du XXème siècle, l'augmentation de la population (de l'ordre de 2,5 % par an) et la péjoration des conditions climatiques (les zones qui recevaient 900 mm en 1960, recevaient en moyenne moins de 800 mm en 2000) ont fait que, chaque année, des milliers d'agriculteurs ont quitté la zone soudano-sahélienne du Nord-Cameroun pour s'installer plus au sud, en zone soudano-guinéenne (Peltier, 1991). Il en est de même dans tous les pays concernés du Sénégal au Tchad

Le cas du village de Mafa Kilda

C'est en particulier vrai pour le village de Mafa Kilda (voir figure 1) dont nous allons étudier le cas ci-dessous.

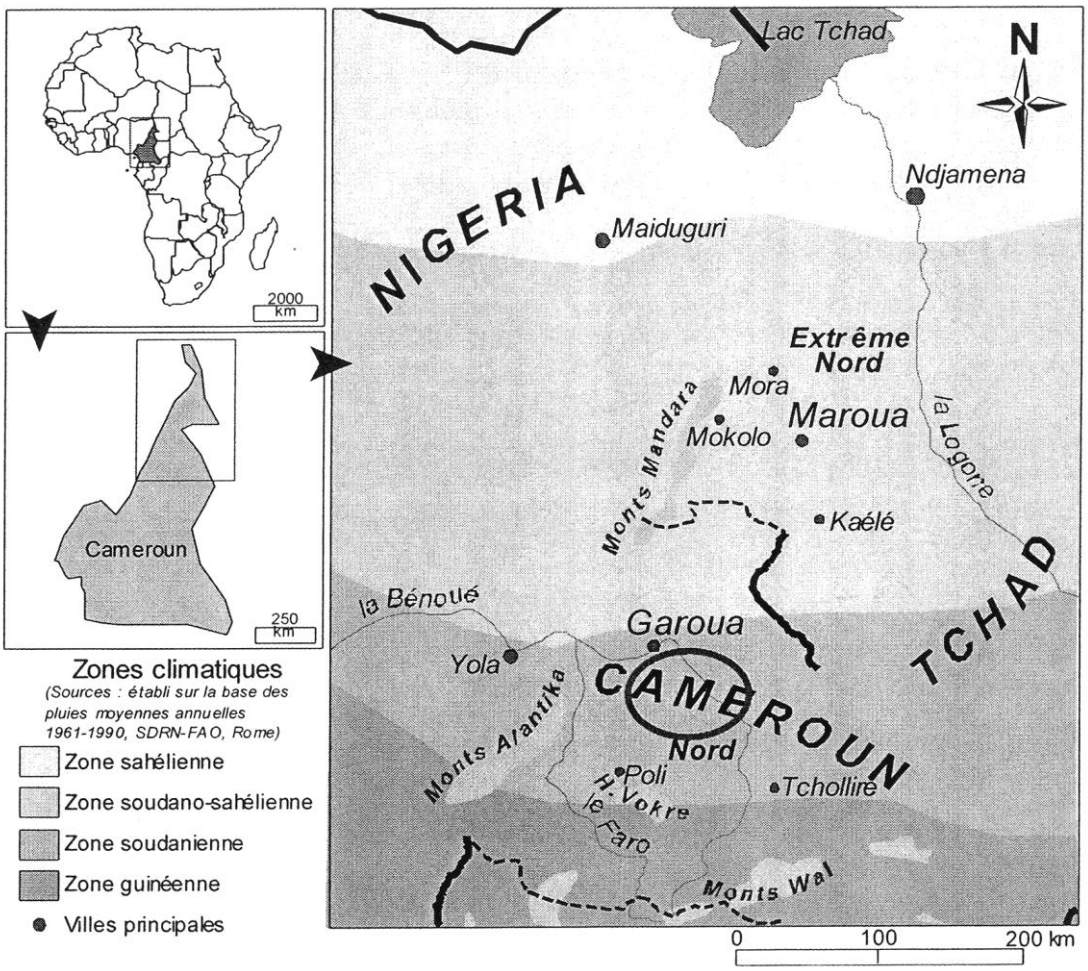


Figure 1 : Carte du Cameroun

Depuis 1980, les agriculteurs y défrichent progressivement les savanes arborées et déciment la grande faune pour y installer leurs cultures (ENGREF, 2001). Les zones de parcours, qui étaient utilisées en saison sèche par les éleveurs transhumants ou nomades, en général peuls, se réduisent, et les déplacements des troupeaux et l'accès à l'eau deviennent difficiles et sources de conflit. Le défrichement est en général progressif. Les agriculteurs coupent les petits arbres et entassent le bois au pied des grands, avant d'y mettre le feu (voir Photo couleur 5).

Même s'ils respectent certains arbres qu'ils jugent utiles, pour leur production de fruits ou de feuilles comestibles (comme le Karité, le Baobab,...), les agriculteurs finissent par réduire rapidement le nombre et la diversité des arbres, et leurs produits, dont le bois de feu et de construction, deviennent rares (ENGREF, 2005). Les sols, qui contenaient, au moment du défrichement, un taux acceptable de matière organique et d'éléments minéraux, perdent rapidement cette fertilité. En parallèle, des plantes, des insectes et des micro-organismes parasites des cultures se développent rapidement. De ce fait, certains agriculteurs, en particulier les jeunes qui souhaitent s'installer et fonder une famille et une exploitation, se voient contraints à poursuivre leur migration, après que la première génération ait épuisé les sols. Or l'espace devient rare et les services de protection de l'environnement s'opposent de plus en plus farouchement au défrichement des dernières aires protégées où les espèces les plus fragiles ont déjà disparu (rhinocéros noir, lamantin...).

Des solutions proposées par la recherche pour maintenir la fertilité et la biodiversité au niveau des parcelles et des exploitations.

Afin de maintenir la fertilité des sols et de satisfaire les besoins des populations en produits des ligneux, les services de la recherche camerounaise (IRAD) en collaboration avec le CIRAD, l'IRD et d'autres partenaires (et avec l'appui de divers projets : "Garoua I et II", Jachère, PRASAC,...) ont développé depuis le début des années 1980 différentes méthodes agro-forestières (Peltier et Eyog Matig, 1988). C'est le cas de la jachère améliorée, à base de légumineuses arborées comme *Acacia senegal* (Harmand et al., 1996). Grâce à ses symbiotes racinaires, cet arbre fixe l'azote atmosphérique et peut croître sur des sols particulièrement appauvris en cet élément. Il peut être planté dans un champ dont la production est devenue trop faible, aux yeux de son propriétaire. Celui-ci continue de cultiver encore pendant 2 ou 3 ans, tout en entretenant les jeunes arbres ; ensuite, il les laisse se développer, ainsi que la végétation herbacée spontanée. A partir de 5-6 ans et pendant une dizaine d'années, il peut pratiquer des saignées sur les branches des arbres pour récolter de la gomme arabique, qui reçoit un bon prix sur le marché international (elle est utilisée principalement comme épaississant alimentaire : boissons, yaourts,...). Son bétail peut pâturer les herbacées et brouter les branches basses. Ensuite, il peut abattre le peuplement, récolter le bois et remettre en culture (voir Photo couleur 6).

Dans ce dernier cas (jachère arborée), l'arbre est utilisé en rotation avec les cultures et ne se trouve associé avec celles-ci que pendant une courte période. Par contre, il est également possible d'associer certaines espèces d'arbres avec les cultures de façon continue (parc arboré), à condition que celles-ci n'aient pas un ombrage trop dense et un enracinement trop superficiel (Peltier, 1994 ; Raison, 1988 ; Bernard, 1999). C'est le cas du Karité qui peut être sélectionné et protégé sur les bandes anti-érosives qui cloisonnent les cultures et du *Faidherbia albida* qui perd ses feuilles en saison de culture et qui a un enracinement profond, mais qui ne peux se développer correctement que sur sols profonds, bien alimentés en eau en saison sèche (Boffa, 1999) (voir Photo couleur 7).

Ces techniques agroforestières ont été diffusées à grande échelle.

Les résultats de ces recherches ont été diffusés à large échelle en milieu rural, en particulier par les projets DPGT (Developpement Paysannal et Gestion de Terroir) et ESA (Eau-Sol-Plante). Ces projets ont mis en place un réseau de moniteurs, des journaux et des émissions de radio rurale. Ils ont créé un système de primes, qui bien que très peu élevées (0,15 euro/arbre en trois versements annuels) ont eu un effet incitatif certain (Gautier et al., 2002 a). Cet argent, fourni au départ par le projet, a ensuite été prélevé dans un grand nombre de villages sur les bénéfices des caisses des Associations Villageoises de Commercialisation du coton et a été reversé à des dizaines de milliers d'agriculteurs qui ont ainsi conservé dans leurs champs plusieurs millions d'arbres, en l'espace de 4 ou 5 années.

Cependant, les ressources naturelles continuent à se dégrader au niveau des territoires villageois.

Malgré cela, des études ponctuelles, comme celles menées par l'ENGREF à Mafa Kilda en 2000 et en 2001, montrent que le nombre et la diversité des arbres continuent à diminuer, au niveau de la majorité des territoires villageois. En effet, bien que certains agriculteurs "pilotes" se soient engagés dans une politique de conservation, de réintroduction et de gestion des arbres dans leurs concession d'habitation et dans leurs champs, la "course au défrichement" continue sur les espaces non appropriés. C'est en particulier le cas des brousses situées à la limite entre plusieurs villages. En effet, la tradition veut que les chefs de village autorisent leurs administrés à cultiver un certain espace, à l'intérieur de leur circonscription. L'administré doit verser un impôt à ce chef de 3ème

degré, qui en reverse une partie à ses supérieurs de 2ème et de 1er degré. Le dernier payant l'impôt au gouvernement. Mais ce système déjà ancien et bien codifié, ne s'applique qu'aux terres cultivées. Les "brousses" (espaces couverts de végétation naturelle : ici, savane arborée) ne sont pas appropriées, même par les pasteurs qui y pâturent depuis plusieurs générations (Gautier et al, 2002 b). Les agriculteurs, en particulier les jeunes sans terre ont tout intérêt à les défricher et à les mettre en culture, avec l'autorisation d'un des chefs de terre voisin, pour pouvoir ensuite continuer à les cultiver, voire à les louer ou à les vendre, puisqu'ils en deviennent de fait usufruitiers. Ce phénomène continue à se produire, même lorsque ces espaces naturels se font rares et que le bois, le pâturage et les produits divers des forêts commencent à devenir rares.

De même, des terrains situés autour des sources ou en amont des bassins versants sont défrichés alors que l'érosion et l'assèchement des cours d'eau sont préjudiciables à tous.

<u>Hypothèse</u> : Une modification des représentations individuelles et collectives de l'arbre et de sa gestion est un préalable pour le passage d'une gestion effective[1] à une gestion intentionnelle[2] (Mermet, 1991) de l'arbre, non plus seulement au niveau du champ individuel, mais de l'ensemble d'un territoire villageois. Pour cela, l'arbre doit être conçu comme un capital reproducteur (il produit du bois et du fourrage qu'il est possible d'exploiter périodiquement en conservant la tige au moins un certain temps), et des modalités de gestion collective du peuplement arboré à l'échelle du territoire villageois sont à instituer par le groupe social.

Au niveau du village de Mafa Kilda, une étude a été menée de 2000 à 2005 pour mettre au point une méthode co-construite par les chercheurs de l'IRAD (aidés par les étudiants et les enseignants de l'ENGREF) et par les villageois (regroupés en association villageoise).

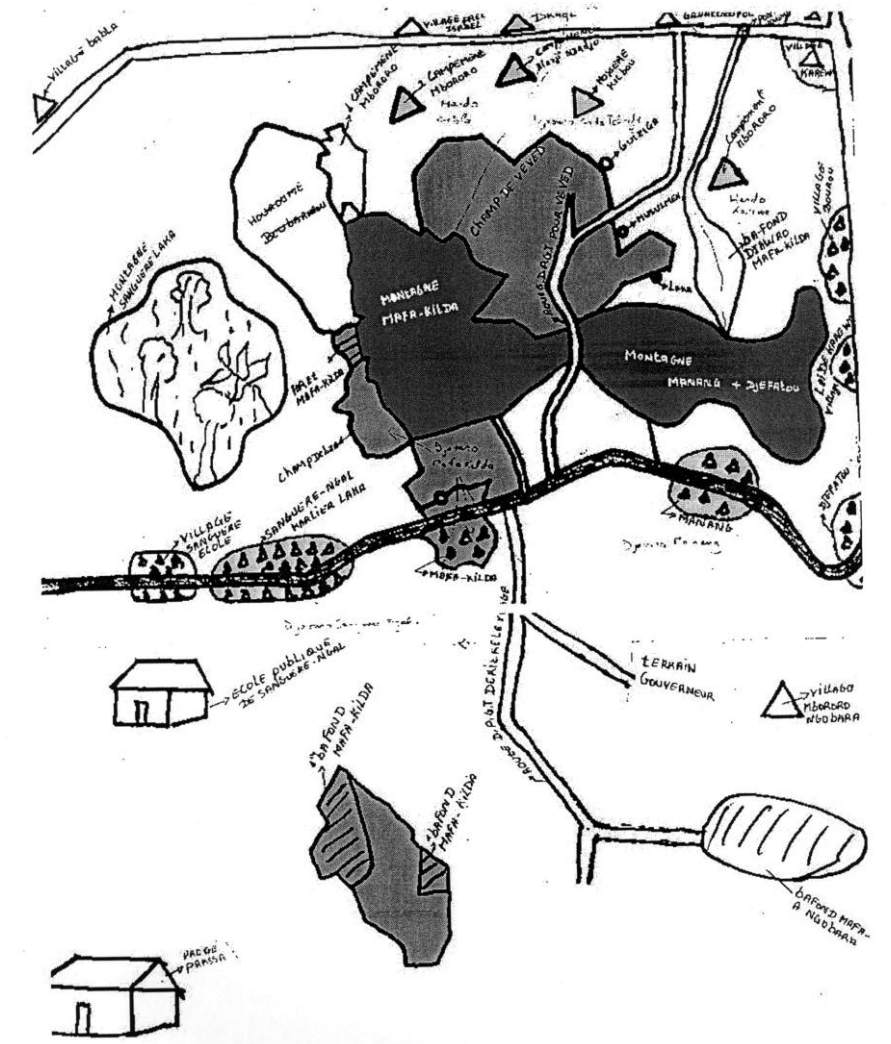
<u>Trois étapes de recherche-action :</u>

- **Etape 1 : détermination des usages et des besoins de la population par enquête**. Sur la base d'un recensement et d'une typologie de la population du village, une enquête statistique a été menée qui a permis de calculer les besoins annuels du village en bois de chauffage et en bois de construction (Photo couleur 8). Dans un premier temps, on s'est limité au bois, comme produit de la brousse, car celui-ci est le plus facile à quantifier et car sa récolte est, en théorie, régie par des textes. Il n'en est pas de même du pâturage et des produits de cueillette et de chasse, sur lesquels ont porté des enquêtes individuelles et collectives mais qu'on n'a pas cherché à quantifier précisément (on a plutôt utilisé des indicateurs). Il a été ainsi déterminé que **1100 habitants exploitaient annuellement 1100 tonnes de bois** pour l'ensemble de leurs usages (cuisine, construction, clôtures, brasserie traditionnelle, forge, artisanat, vente en bord de route pour les plus pauvres).

[1] Ensemble des actes de gestion subis concrètement par un milieu
[2] Ensemble des actions ayant pour but la résolution d'un problème d'environnement

- **Etape 2 : mesure et calculs sur les potentialités du milieu afin de modéliser l'état et la productivité de la ressource arborée.**

- Cette étape a nécessité la **cartographie** du territoire villageois. Pour cela, une carte "à dire d'acteurs" a été dessinée avec un groupe de villageois connaissant bien l'ensemble du territoire et représentant les principaux usagers (figure2) ;



Carte à dire d'acteur des villages et campements de la région de Mafa-Kilda.
(dessinée par Jeremy DJEKAYA)

Légende :

Village et champs cultivés de Mafa-Kilda

Montagnes et collines

Villages voisins étudiés par la suite

Figure 2 : Cartographie «à dire d'acteurs »

- Afin de vérifier et de pouvoir effectuer des calculs de surface, la limite des grandes unités d'occupation du sol a ensuite été levée au GPS, reportée sur base de données et représentée grâce à un système d'information géographique (SIG) ;

- Sur les principales unités homogènes, du point de vue morpho-pédologique, occupation du sol, groupe d'usagers et ancienneté de la mise en valeur, un **inventaire forestier statistique** a été réalisé au taux d'environ 1%. Celui-ci a été fait sur des parcelles de 40 x 100 m, alignées sur des layons qui traversent ces unités, en intégrant du mieux possible leur diversité (voir figures 3). Sur chaque parcelle, a été noté le type de sol et de culture pratiquée ; pour tous les arbres de plus de 2 m de hauteur, ont été quantifiés de nombreux paramètres, dont l'espèce, le diamètre du tronc et du houppier, les traces d'actions anthropiques..., pour la régénération arborée de moins de 2 m de haut, le nombre d'individu par espèce a été relevé sur un placeau central de 314 m² ;

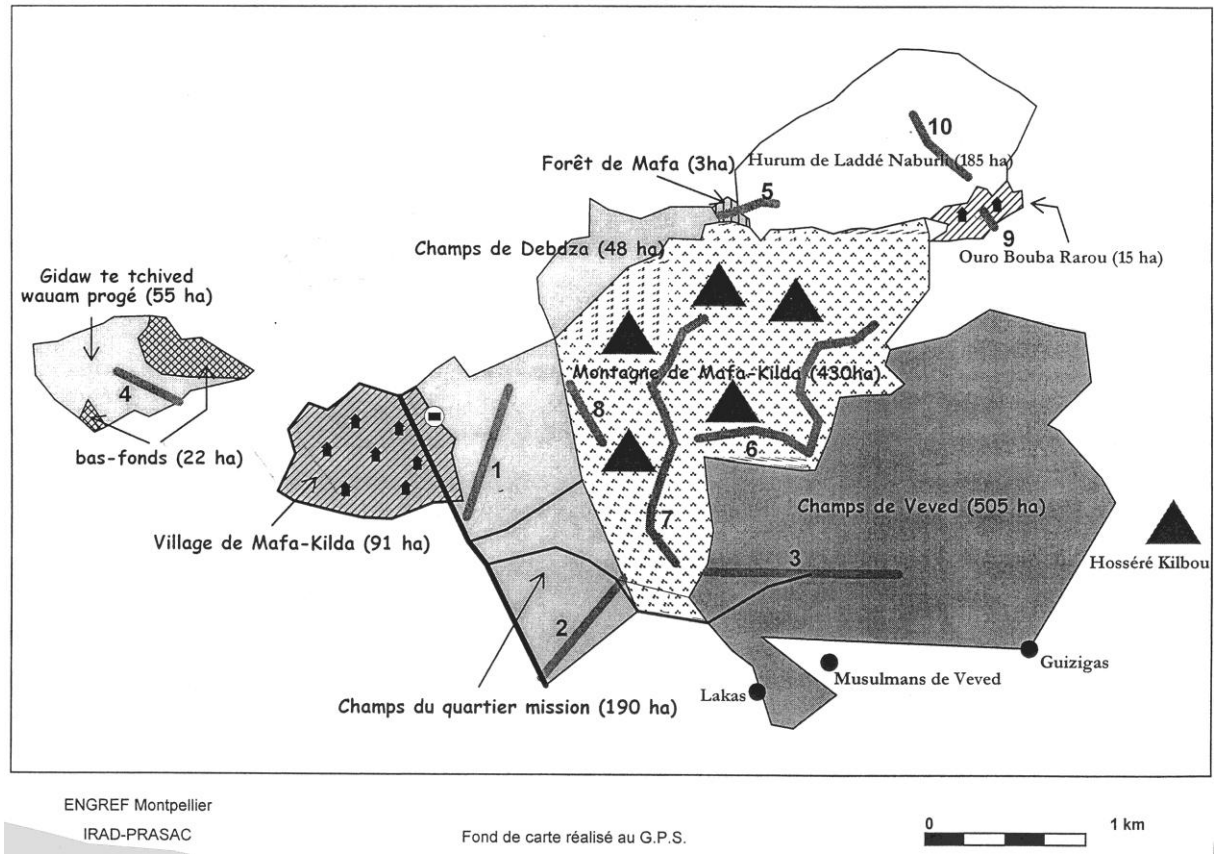


Figure 3 : Inventaire forestier statistique

- Enfin, la **productivité** d'un certain nombre d'arbres appartenant aux espèces et aux diamètres les plus représentés a été calculée (Manlay et al., 2002 ; Smektala et al, 2002). Pour cela, un émondage des branches de moins de 15 cm de diamètre a été pratiqué, en respectant le tronc, les branches "charpentières" et une petite branche "tire-sève" au bout de chaque charpentière (voir Photo couleur 9) ;

- Pour chaque branche, l'âge a été estimé par lecture des cernes d'accroissement, le poids frais de bois et de feuilles a été mesuré. Sur des échantillons, le rapport poids frais sur poids sec après étuvage a été calculé. L'ensemble des données mesurées a permis d'établir des courbes (tarifs) de productivité annuelles des arbres en bois et en feuilles en fonction de leur diamètre (voir exemple en figure 4).

- En appliquant ces calculs de productivité à l'ensemble des mesures effectuées lors des inventaires et en divisant par le taux de sondage, la productivité de chaque unité du territoire en bois et en fourrage aérien a été estimée (ENGREF, 2005). Il a été ainsi possible de déterminer que sur l'ensemble du territoire approprié par cette communauté (900 ha de champs et environ 400 ha de collines rocailleuses), **la végétation arborée** présente au moment de l'inventaire **pouvait produire environ 700 tonnes de bois sec par an**, à condition d'y appliquer une gestion durable (émondage des branches tous les 8 ans et en fait émondage d'un huitième des arbres tous les ans).

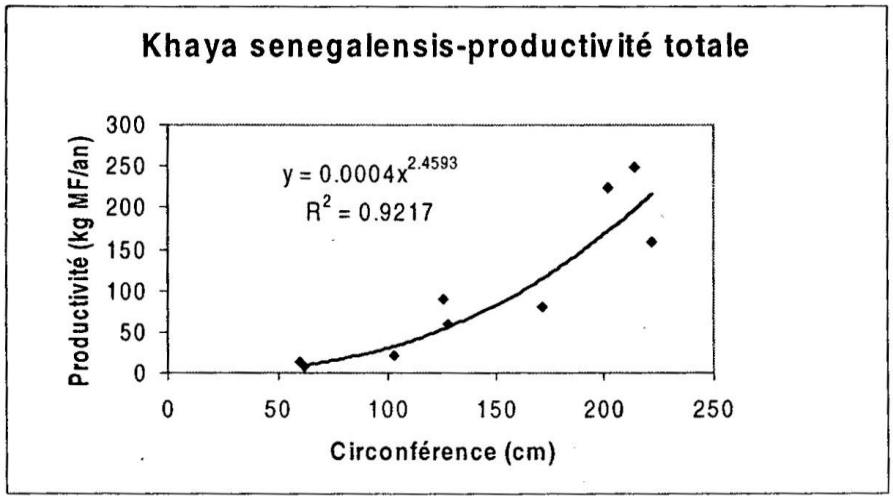
➢ **Etape 3 : Mise en discussion des résultats entre chercheurs et acteurs de la gestion.**

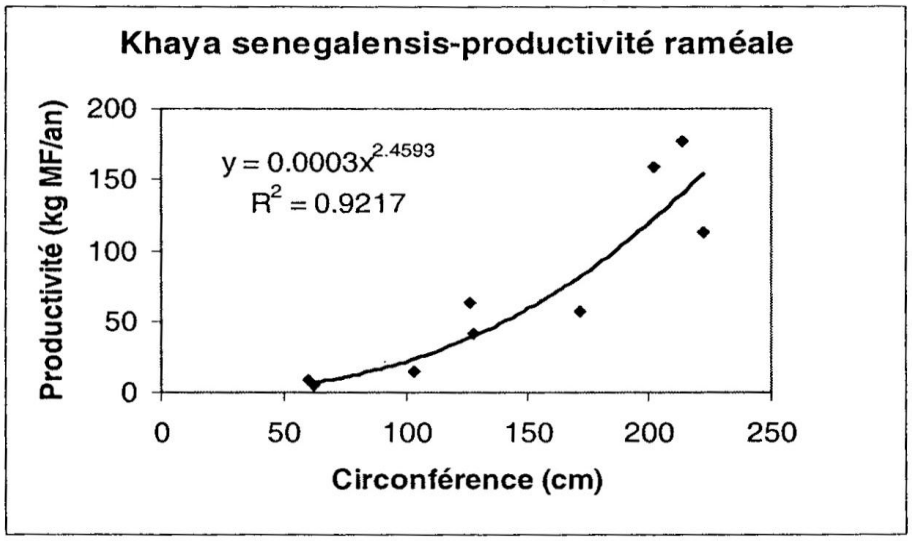
Au cours de réunions publiques, rassemblant autour du chef de village, des chercheurs et des représentants des différents groupes socio-culturels, ainsi qu'à l'occasion de marches effectuées en groupe à travers le territoire villageois, les principaux résultats des enquêtes, des inventaires et des calculs réalisés ont été présentés et discutés. Un des paramètres les plus évidents, a été la différence entre la récolte annuelle de bois (1100 t/an) et la productivité du territoire (700 t/an) qui se fait par exploitation minière du capital ligneux (coupe au ras du sol d'arbres entiers qui ne produiront plus dans l'avenir). Alors qu'ils étaient habitués à calculer la productivité de leurs champs individuels de céréales et de coton et de la mettre en relation avec leurs besoins annuels pour l'auto-consommation et la vente, les villageois se sont aperçus qu'ils n'avaient jamais envisagés de tels calculs sur la végétation naturelle, ni au niveau individuel ni, encore moins, au niveau collectif. La plupart d'entre eux estimaient que cette richesse était un don de Dieu et qu'il n'était ni nécessaire, ni utile, ni possible de la gérer de façon raisonnée.

Un appui technique des chercheurs sur lequel, peuvent s'appuyer les villageois, pour une gestion collective raisonnée.

Ce genre de calcul, même s'il n'est pas compris et surtout admis par tous, dans un premier temps, permet de lancer la réflexion sur la gestion des ressources naturelles (Wollenberg, 2000). Cela se fera sur des bases plus efficaces que lorsque des chercheurs (surtout s'ils sont étrangers à la région ou au pays) viennent proposer des solutions exogènes à des problèmes que les villageois ne ressentent pas comme prioritaires. De même, un certain nombre d'indicateurs d'état des ressources naturelles parlent différemment et ont des seuils d'acceptabilité différents, suivants les groupes socio-culturels (ENGREF, 2000). Par exemple, et de façon un peu caricaturale, le nombre d'heures que les femmes doivent utiliser pour aller récolter et ramener à la maison le fagot de 24 kg qui permettra au foyer de cuisiner pendant deux jours, n'interpelle pas trop les hommes, tant que celui-ci ne devient pas si élevé qu'ils doivent s'attendre à retarder l'heure de leur repas du soir !

La disparition de certaines espèces d'arbres ne devient évidente que lorsqu'on n'en trouve aucune autre pour avoir le même usage et qu'il faut modifier les méthodes de construction ou avoir recours à l'achat de bois d'autres régions.





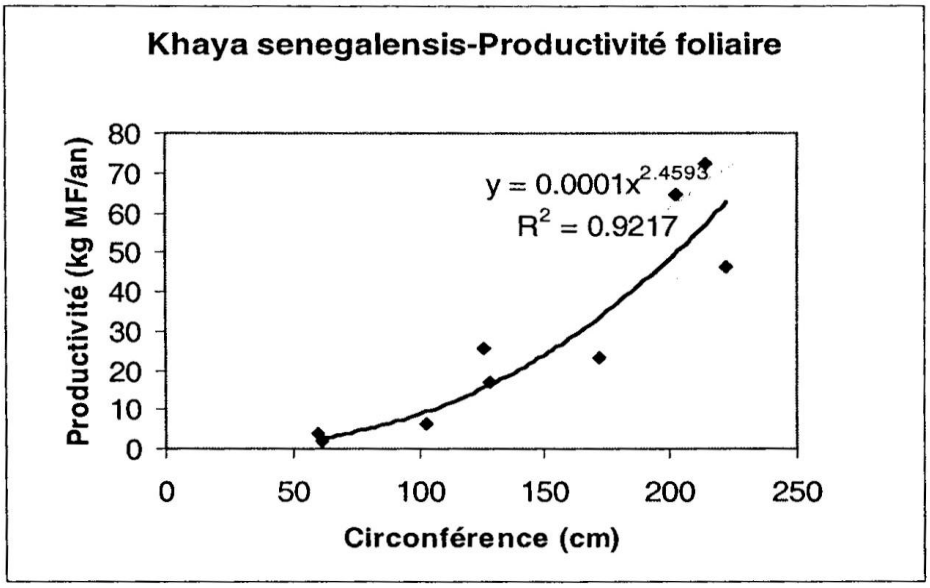


Figure 4 : Courbes de productivité annuelle

Grâce à la confrontation entre les chiffres et les notions abstraites des chercheurs et des cadres de l'administration et les soucis quotidiens des habitants de la zone, se "co-construit" une vision partagée de l'état des ressources naturelles (Walters, 2005).

Cependant, il serait naïf de croire que les villageois sont plus sages que le reste de l'humanité. Il arrive souvent que les conclusions dérangent trop les habitudes de certains groupes qui ont intérêt à piller la richesse, fut-ce aux dépens de groupes moins influents, quitte à abandonner le territoire lorsque celui-ci sera devenu improductif.

Du moins, de telles démarches permettent-elles aux plus sages et aux plus soucieux d'une gestion durable de maîtriser et de partager plus d'informations pour ne plus "piloter à vue" leurs ressources naturelles.

Dans le cas de Mafa-Kilda, dès la première restitution des résultats des enquêtes et des inventaires, certains agriculteurs plus disposés à l'innovation ont décidé de se lancer dans des actions de régénération de leur ressource arborée et de la fertilhté de leurs sols. Ceci s'est fait de façon clairement individuelle (plantation privée d'arbres producteurs de bois ou de fruits, ou de légumineuses en vue de l'amélioration du sol) ou prétendument collective (mise en défens de zone de brousse, sélection et protection d'arbres sur les ouvrages anti-érosifs). Cependant, au cours des années suivantes, la volonté de certains de ces acteurs s'est essoufflée, alors que d'autres ont admis que la démarche, qui les gênait au début, devenait une nécessité, car ils avaient vu, entre temps, nos tristes prévisions se réaliser.

Cependant, les actions sur les espaces collectifs se sont souvent révélées être des tentatives d'appropriation de ceux-ci par quelques individus et ont réveillé de vieilles querelles. Sur ces espaces, le manque de cadre juridique s'est cruellement fait sentir ainsi que l'absence de plate-forme de négociation crédible par les différents usagers, si bien qu'à ce jour, les ressources naturelles continuent d'y être sur-exploitées, au détriment de tous.

CONCLUSIONS

Pour les chercheurs, il est relativement facile de travailler avec des agriculteurs individuels et de trouver avec eux des solutions pour rendre leur gestion des ressources naturelles plus durable et plus conservatrice.

Par contre, sur des espaces collectifs, les conflits d'intérêt entre individus et entre groupes rendent ce travail particulièrement mal aisé. C'est ainsi qu'en Afrique Sud-sahélienne, agriculteurs et éleveurs se disputent les derniers vestiges de savane, y éliminent progressivement les arbres et en dégradent les sols. Une modification des représentations individuelles et collectives de l'arbre et de sa gestion est un préalable pour aller d'une gestion effective vers une gestion intentionnelle. Elle passe par la mise en relation des besoins des populations et des potentialités du milieu qui aboutit à la mise en évidence des futures pénuries. Ceci permet d'envisager des mesures de conservation ou de régénération anticipées et la mise en place de processus de négociation.

Cependant, une politique nationale d'appui à la gestion collective des ressources et de sécurisation foncière, comme celle concernant les forêts communautaires (MINEF, 1998), est nécessaire. Ceci demande des pouvoirs forts et reconnus et des moyens financiers non négligeables pour mettre en œuvre cette politique à grande échelle, conditions qui sont réunies dans peu de pays africains.

BIBLIOGRAPHIE

Arbonnier M. (2000) *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*, CIRAD - MNHN – UICN, Montpellier (France), 541 p.

Bernard C. (1999) *Structure, dynamique et fonctionnement des parcs agroforestiers traditionnels. Cas de Dolekaha – Nord Côte d'Ivoire et Holom – Nord-Cameroun,* Thèse de Doctorat en Géographie de l'Université de Paris I, Tome I, 353 p.

Boffa J.-M. (1999) *Agroforestry parklands in sub-Saharan Africa*, Cahier FAO Conservation 34, FAO, Rome, 230 p.

ENGREF (2000) *Contribution à la mise au point d'une méthode pour évaluer la ressource arborée d'un territoire villageois et l'utilisation qui en est faite par sa population*. Rapport de voyage d'étude. ENGREF – IRAD – CIRAD, 110 p.

ENGREF (2001) *Gestion des ligneux dans la région de Mafa-Kilda, Nord-Cameroun*, Rapport de voyage d'étude. ENGREF – IRAD – CIRAD, 55 p.

ENGREF (2005) *Evaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc arboré à karité en zone soudanienne du Nord-Cameroun*, Rapport de voyage d'étude, ENGREF – IRAD – CIRAD, Montpellier, 39 p.

Gautier D., Mana J., Rocquencourt A., Tapsou, Njiti C. F. (2002 a) Faut-il poursuivre l'opération Faidherbia du DPGT au Nord-Cameroun ? Editeurs scientifiques : Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Colloque *"Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis."* 27-31 mai 2002. PRASAC, Garoua, Cameroun. *in* C.D.Rom

Gautier D., Smektala G., Njiemoun A. (2002 b) Règles d'accès à la ressource ligneuse pour les populations rurales du Nord-Cameroun. Perspectives de la nouvelle loi forestière de 1994. Editeurs scientifiques : Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Colloque *"Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis."* 27-31 mai 2002. PRASAC, Garoua, Cameroun. *in* C.D.Rom

Harmand J-M., Njiti C-F., Brugiere D., Jacotot N., Peltier R. (1996) Plantations de *Faidherbia albida* au Nord-Cameroun. *in : Les Parcs à Faidherbia" (Acacia albida Parklands)*, Cahiers scientifiques du Cirad-Forêt n° 12, pp.269-282.

Manlay R., Peltier R., N'Toupka M., Gautier D. (2002) Bilan des ressources arborées d'un village de savane soudanienne au Nord Cameroun en vue d'une gestion durable. Editeurs scientifiques : Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Colloque *"Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis."* 27-31 mai 2002. PRASAC, Garoua, Cameroun. *in* C.D.Rom

Mermet L. *Dans quel sens pouvons-nous gérer l'environnement ?* Gérer et comprendre - *Annales des Mines*, mars 1991 : 68-81.

MINEF (1998) *Manuel des procédures d'attribution et des normes de gestion des forêts communautaires*. Editions CLE, Limbe, Cameroun. 101 p

Peltier R., Eyog-Matig O. (1988) "Les essais d'agroforesterie au Nord-Cameroun" (Agroforestry trials in North Cameroon), *in Bois et Forêts des Tropiques*, n° 217, 3ème trimestre 1988, pp 3-31.

Peltier R. (1991) "L'arbre dans les terroirs villageois, in Actes des rencontres internationales "Savanes d'Afrique, terres fertiles ? " (The tree in village farmlands in Proceedings of international

meetings *"African Savannah, fertile lands?"*), Montpellier 10-14 décembre, 1990, Ministère de la Coopération/C.I.R.A.D., Focal Coop, Paris, France, pp 507-530

Peltier R. (1994) "Du reboisement imposé à la prise en compte des savoirs traditionnels" (From mandatory reafforestation to the adoption of traditional techniques. Improvement of degraded land in North Cameroon), *in Nature Sciences Sociétés*, 1 vol 2, 1994, Dunod, Paris, France, pp. 67- 79

Raison J.-P. (1988) *Les parcs en Afrique: état des connaissances, perspectives de recherches*. Document de travail. Paris, Centres d'Etudes Africaines, EHESS. 117 pp.

Smektala G., Hautdidier B., Gautier D., Peltier R., Njiemoun A., Tapsou (2002) Construction de tarifs de biomasse pour l'évaluation de la disponibilité ligneuse en zone de savanes du Nord-Cameroun. – Editeurs scientifiques : Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Colloque *"Savanes Africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis."* 27-31 mai 2002. PRASAC, Garoua, Cameroun. *in* C.D.Rom

Walters B. B., Sagobal C., Snook L. K., de Almeida E. (2005) Constraints and opportunities for better silvicultural practice in tropical forestry : an interdisciplinary approach, Forest *Ecology and Management*, 209, pp. 3-18

Wollenberg L., Edmunds D., Buck L. (2000) *Anticipating Change: Scenarios as a Tool for Adaptive Forest Management - A Guide*, Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia,38p.

Matières Organiques et Activités Biologiques dans les sols tropicaux des cycle Culture-Jachère

Masse D.[*], Hien V.[**], Bilgo A.[**], Diatta M.[***], Manlay R.J.[****] Chotte J-L.[*****],

* IRD, BP182, Ouagadougou, Burkina Faso
** INERA, BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso
*** ISRA, BP 3120, Dakar, Senegal
**** ENGREF, BP 44494 - 34093 Montpellier Cedex 5, France
***** IRD, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France

RESUME

La jachère, état d'une de la terre d'une parcelle entre la récolte d'une culture et le moment de la mise en place de la culture suivante, est ainsi une phase de restauration d'un écosystème dont l'état final doit procurer des conditions de fertilité renouvelées pour la culture suivante, en particulier un milieu assaini et des éléments nutritifs plus abondants, plus disponibles et plus accessibles aux racines.

Dans le cadre des programmes régionaux coopératifs sur « la Jachère en Afrique Tropicale », de nombreux sites ont fait l'objet d'investigations concernant les bio-indicateurs de fertilité des sols dans le cycle culture-jachère. Les stocks de matière organique, l'abondance et la diversité des principales composantes biotiques des sols au cours des différents phases culturales ou de jachère ont été caractérisés sur plusieurs sites : Sare Yorobana et de Sonkorong au Sénégal, et de Bondoukuy dans la région Ouest du Burkina Faso.

Concernant l'évolution des teneurs en matière organique des sols, il est montré que les techniques culturales ou les modes de gestion pratiqués à l'échelle des cycles culture/jachère semblent plus importants à prendre en compte que les principales séries agro-écologiques décrites, que sont la culture itinérante ou permanente. Des modèles conceptuels ont été proposés pour interpréter la faible réponse des stocks de carbone des sols sableux à la jachère, en réévaluant le rôle biologique joué par le carbone. Dans ces sols tropicaux sableux, la biosphère contrôle fortement les propriétés physiques du sol et la disponibilité en éléments minéraux pour la plante. Les systèmes racinaires pérennes des ligneux, ou les apports de fumure organique exogène, sont nécessaires au maintien de l'intégrité fonctionnelle de l'écosystème sol. Les entrées de carbone que représentent ces systèmes assurent la fourniture de l'énergie et des éléments minéraux nécessaires à l'entretien des communautés biologiques des sols.

La dynamique des groupes microbiens ou fauniques apparaît contrastée. Alors que la biomasse microbienne ou la diversité des champignons mycorhiziens (relation avec une diminution de la diversité végétale) semblent diminuer, l'abondance des nématodes phytoparasites reste constante. Néanmoins, la structure du peuplement est fortement affectée, la jachère favorisant l'apparition d'espèces les moins pathogènes pour les cultures. Pour les termites, l'abondance des différents groupes trophiques évolue au cours des différentes phases du cycle culture-jachère. Les indicateurs de restauration des sols définis à partir de l'évolution de certains groupes biologiques apparaissent ainsi pertinents dans le cadre du cycle culture-jachère.

Concernant les alternatives au raccourcissement du temps de jachère, l'utilisation d'espèces végétales améliorantes basées sur des systèmes racinaires abondants comme les graminées pérennes ou la production de matières organiques de bonne qualité comme les légumineuses ligneuses a été testée.

INTRODUCTION

La gestion durable des sols est un thème majeur de la recherche agronomique et pédologique. L'identification d'indicateurs de la qualité des sols par rapport à un usage donné (agriculture, foresterie…) est nécessaire pour assurer cette gestion durable à la fois par les agriculteurs, les aménagistes ou les décideurs.

La matière organique est un constituant essentiel des sols. Elle lui confère des propriétés physiques en participant au maintien de sa structure, chimiques par la constitution de réserves disponibles pour les plantes et les animaux d'éléments nutritifs ou énergétiques. Pour ces raisons, la matière organique des sols est considérée comme un indicateur important participant à la définition de la fertilité des sols.

Le sol abrite de nombreux organismes vivants. Ils agissent sur les autres constituants des sols en consommant par exemple des matières organiques et en excrétant des produits organiques secondaires. Certains animaux, comme les termites, peuvent transformer les minéraux tel que les argiles. Ces organismes pour constituer leur habitat modifient également la structure des sols. Enfin, certains sont des pathogènes pour les plantes cultivées. Ces organismes vivants interviennent donc également dans la définition de la qualité d'un sol pour un usage agricole ou pour définir des aménagements durables.

Dans les régions soudaniennes et soudano-sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, la gestion de la fertilité était généralement basée sur l'alternance d'une phase de culture suivie d'une période de jachère plus ou moins longue. Ces jachères interviennent dans la reconstitution des éléments de fertilité des sols. Les modifications dans les jachères sont essentiellement du fait de la dynamique de la végétation après défriche : les productions ligneuse et herbacée définissent de nouveaux cycles des matières organiques, et de ses déterminants biologiques, la dynamique de la végétation après défriche élimine les adventices … etc. Toutefois, ces transformations pendant la période de la jachère sont déterminés par les modes de gestion de ces jachères : le pâturage, les prélèvements divers ou les feux modifient la dynamique végétale après abandon cultural (Figure 1). Les techniques agricoles utilisées au cours du précédent cultural à la jachère déterminent également les dynamiques des différents paramètres d'évolution de la qualité des sols : un dessouchage total après défriche d'une savane ou d'une jachère limite la capacité de régénération des ligneux. Enfin, à l'échelle du paysage, les jachères et les parcelles cultivées constituent une mosaïque jouant un rôle essentiel sur des déterminants environnementaux (ruissellement ou d'érosion, biodiversité).

Dans le cadre du programme Jachère mené entre 1994 et 2001 sous la direction de Roger Pontanier en tant que responsable d'unité de recherche de l'ORSTOM puis de l'IRD, des travaux ont été réalisé dans différents pays d'Afrique de l'Ouest sur la qualité des sols en fonction de leur mode de gestion. L'évolution des matières organiques du sol et des paramètres biologiques des sols au cours du cycle culture-jachère ont été des opérations de recherche majeures du programme Jachère. Cet exposé reprend les principaux résultats obtenus au cours de ces 10 dernières années sur les matières organiques et l'activité biologique dans les sols de jachère et de culture en Afrique soudano-sahélienne.

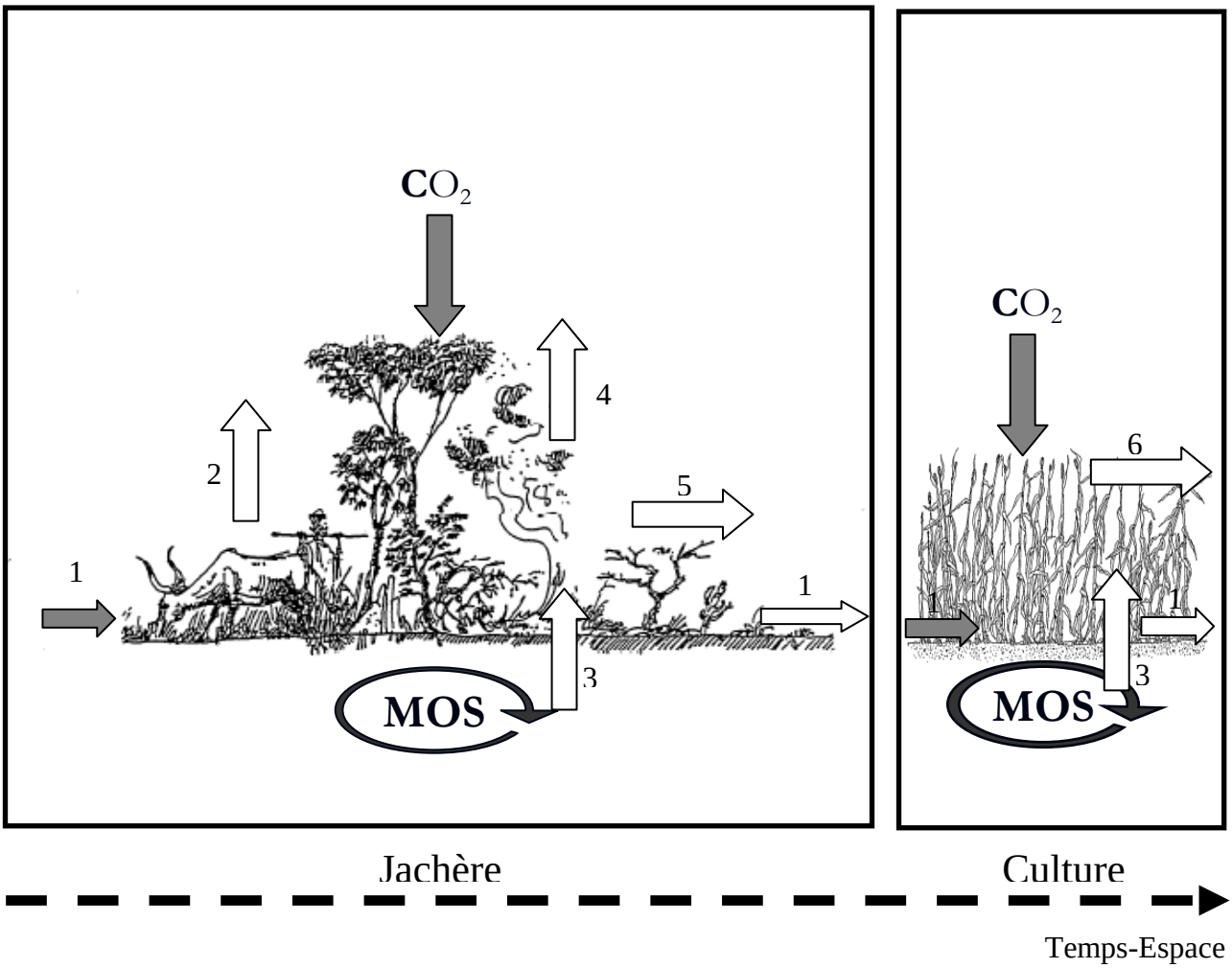


Figure 1 : Cycle Culture-Jachère dans les régions soudano-sahéliennes et soudaniennes en Afrique de l'Ouest. Représentation simplifiée du cycle du carbone.

1. Erosion
2. Activité biologique (notamment des animaux domestiques)
3. Activité biologique des sols
4. Feux
5. Prélèvements (cueillette, bois énergie, bois d'eouvre)
6. Récolte

Trois terroirs étudiés au Burkina Faso et au Sénégal

Le programme Jachère en Afrique de l'Ouest a fait l'objet de nombreuses investigations concernant différentes disciplines et surtout de nombreux modèles de terrain. Cependant, deux sites particuliers ont fait l'objet d'une approche systémique permettant entre autres d'obtenir des données sur diverses situations :

- Le terroir de Sonkorong représentatif du Bassin Arachidier dans le centre du Sénégal.

- Cette grande zone agroécologique appartient au domaine soudano-sahélien (pluviosité annuelle 500-800 mm). Cette zone caractérisée par une forte pression foncière liée à la culture de l'arachide. Elle présente de nombreuses contraintes au développement agricole et rural : sécheresse, érosion éolienne et hydrique, dégradation du couvert ligneux et herbacée, extension des terres dégradés. On assiste alors à une diminution des rendements, un déficit fourrager et une pénurie de bois-énergie et de bois d'œuvre.

- Le terroir de Sare Yorobana en Haute Casamance (Sénégal) appartient au domaine soudano-sahélien avec une pluviosité annuelle de 800 à 1000 mm. Elle est caractérisée par une pression anthropique relativement peu élevée avec des faciès végétaux encore diversifiés (jachère longue, savane boisée, forêt sèche). Dans cette zone à vocation agro-sylvo-pastorale, la production arachidière et cotonnière se développe rapidement.

- Le terroir de Bondoukuy au Burkina Faso, au climat nord soudanien au sud soudanien (800-1000 mm), est caractérisé par une pression foncière de plus en plus forte. Le système de production est à base de coton à l'Ouest et céréalier au Sud-Ouest. Le développement de la culture de coton attire des migrants en provenance de la zone nord. Les sols cultivés, en général de nature sablo-limono-argileuse plus ou moins lessivés perdent de plus en plus leur fertilité par appauvrissement de la matière organique.

Sur ces deux sites des études ont été menées sur les dynamiques agraires, ainsi que les dynamiques des sols et des végétations dans les parcelles de jachère ainsi que sur les parcelles cultivées. Dans le cadre de cet exposé on s'intéressera plus particulièrement aux teneurs en carbone des sols en tant qu'indicateur de mesure de la matière organique des sols. La partie supérieure des sols (0-10 cm) à l'interface du système sol-plante, et qui subit donc les modifications les plus importantes, est privilégiée dans notre analyse. Les méthodes d'analyse dans des sols tamisés à 2mm du carbone total sont identiques dans les deux études (méthode Walkey-Black).

Teneurs en carbone total dans les sols des parcelles de jachère et de culture

Les teneurs en carbone total des sols (0-10 cm) sont représentés sur la Figure 2 en fonction de la teneur en éléments fins du fait de la forte corrélation entre argile et teneur en carbone (Feller & Beare, 1997). Si on observe dans un premier temps les teneurs en carbone des sols des jachère de longue durée (>10 ans) des trois sites en y incluant tous les types de sol, on peut distinguer deux droites de régression entre carbone et éléments fins du sol. Ouattara & Serpantié définissent à travers l'analyse de l'occupation des parcelles comme deux séries agro-écologiques distinctes : l'une correspondrait à des parcelles proches de formations forestières et qui subissent peu de périodes de culture (« droite des forêts »), l'autre indiquerait un équilibre de savanes où la culture itinérante a été largement pratiquée (« droite des savanes ») (Ouattara *et al.*, 1997). Ces deux types de sol qui se distinguent par le mode de gestion conserveraient des matières organiques du sol caractéristiques de leur système. Si on représente les teneurs en carbone de jachère d'âge inférieur à 10 ans et de parcelles cultivées, on remarque que les points se répartissent autour de ces droites.

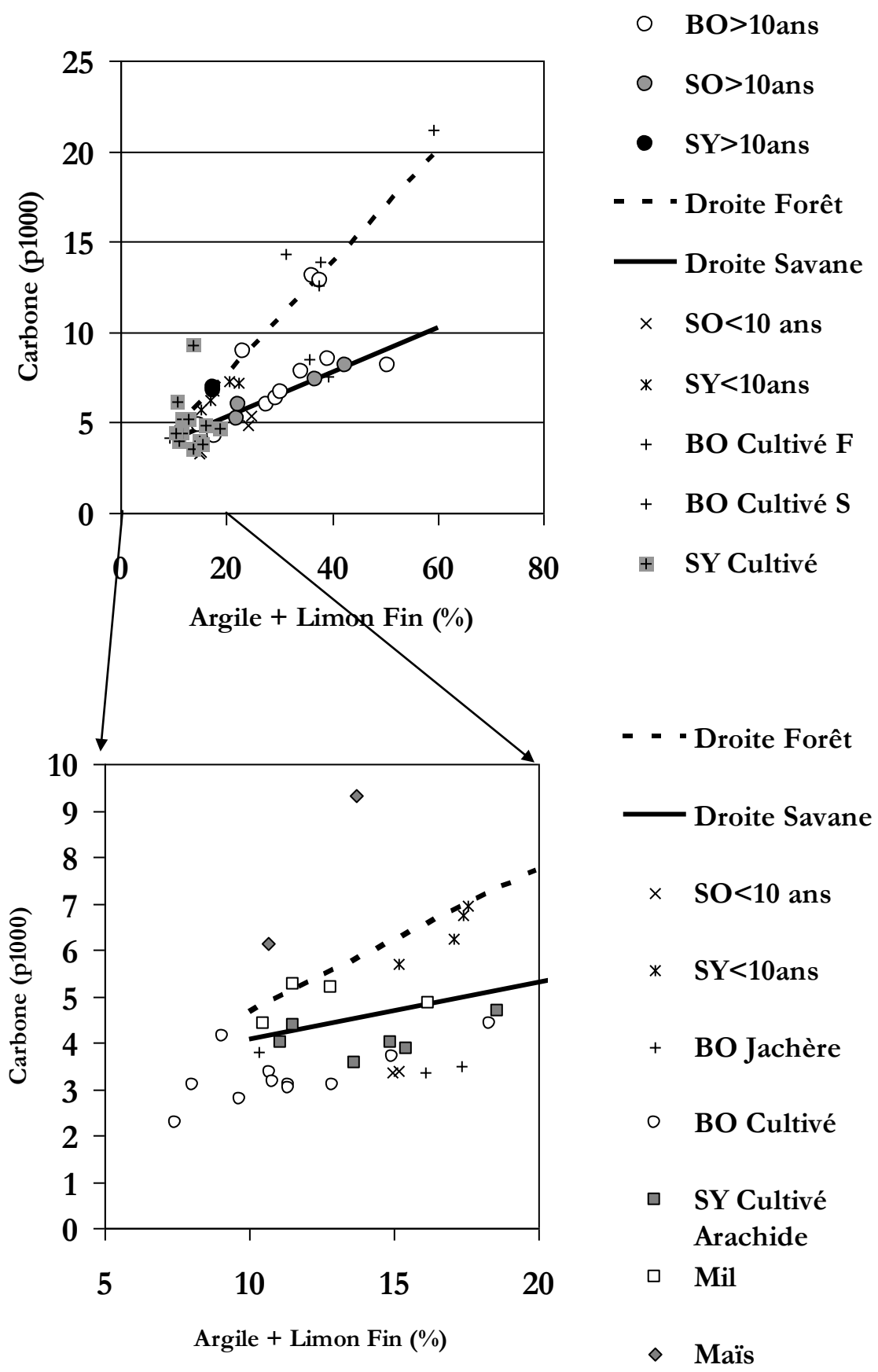


Figure 2 : Teneurs en carbone des sols (mg.kg-1) en fonction de la texture pour différentes parcelles de jachère et de culture sur les sites de Bondoukuy BO (Burkina Faso), Sonkorong SO et Sare Yorobana SY (Sénégal).

En revanche, n'apparaît pas de différences entre les occupations au moment du prélèvement ; parcelles cultivées ou jachère ne présentent pas de teneur en carbone significativement différente (relativement à leur teneur en éléments fins).

Si on se concentre sur les sols les plus sableux, qui sont les sols les plus représentés dans les zones étudiées, il apparaît que les différences sont peu significatives entre les différents modes d'occupation culture ou jachère. Seules deux points se distinguent avec des teneurs en carbone relativement élevé. Ils représentent des champs de case qui on t des sols fortement amendés en matières organiques provenant des habitations ou des animaux domestiques.

Ces résultats indiqueraient la mise en place d'un équilibre du statut organique des sols largement tributaire d'un passé cultural et écologique assez lointain, mais beaucoup moins influencé par le passé cultural récent (10-15 ans). Cette différence serait d'autant plus importante que les teneurs en argile et limon fin seraient élevées. Le retour d'un sol, qui a subit de nombreux cycles culturaux et qui se situerait dans un système de savane, à un équilibre originel semblerait alors extrêmement difficile qui ne pourrait pas être atteint après des jachères de moyenne durée (10-20 ans). Ces hypothèses restent à vérifier, de même qu'une caractérisation plus précises des formes de ces matières organiques dans les deux systèmes décrits.

L'autre interprétation de ces résultats est que les matières organiques dans les sols sableux étant peu protégées de la minéralisation (notamment physiquement), les sols de ces agro-systèmes ne sont pas en mesure de stocker de la matière organique. Les flux des matières dans les sols sont extrêmement rapides, et par conséquence fortement tributaire des entrées (en quantité et en qualité), et des acteurs biologiques de la décomposition. Les jachères ont donc un rôle majeure à l'échelle du terroir comme zone de production de matière organique (production primaire) qui sera transféré soit spatialement (transfert par les animaux domestiques, l'homme) soit temporellement (rotation culture jachère) (Manlay, 2000).

Flux de carbone à l'échelle d'un terroir agricole de Haute-Casamance

Une étude a été menée entre 1994 et 1999 sur le terroir de Sara Yorobana en Haute Casamance au Sénégal. Ce terroir agro-sylvo pastoral présente une organisation en auréole autour du village, assez classique en zone soudanienne et soudano-sahélienne.

L'observation du système complet sol-plante par classe d'âge de jachère montre que la succession postculturale est avant tout un processus cumulatif de biomasse, puisque de 26 $tCha^{-1}$ accumulées dans les jachères anciennes, une tonne provient du sol (Figure 3). Les propriétés physico-chimiques du sol évoluent peu. Le stockage du carbone a lieu aussi bien dans la fraction grossière sableuse que dans la fraction argilo-limoneuse, ce qui est inattendu dans ces sols sableux. La défriche, durant laquelle les herbes, les rameaux et les feuilles sont brûlés et les troncs exportés au village, entraîne un perte de plus de 50 % du capital minéral accumulé dans la biomasse.

A partir des mesures des stocks de matières organiques (sol, végétation) dans les différentes parcelles selon leur mode d'occupation, et une évaluation des transferts de matières organiques entre les différentes parcelles ou village, Manlay et al. (Manlay *et al.*, 2002a ; Manlay *et al.*, 2002b ; Manlay *et al.*, 2002c ; Manlay *et al.*, 2004b ; Manlay *et al.*, 2004c) ont pu établir un bilan de carbone, d'azote et de phosphore à l'échelle du terroir (Figure 4). L'auréole de brousse est la principale source de carbone du village, sous la forme de nourriture, de bois et de fourrage. Mais en raison de sa superficie étendue, les sorties de carbone ne représentent encore que 8,9 % des stocks de carbone dans la biomasse aérienne, litière non comprise (Manlay, 2000). Dans cette auréole, la perte de carbone est forte dans les champs cultivés (75 % du carbone dans la biomasse aérienne

BA) et faible dans les jachères (3,2 % de carbone dans la BA). Des valeurs élevées ont aussi été enregistrées pour les cultures vivrières des champs de case (65 %) et des rizières (68 %). Mais la redistribution du carbone bénéficie à l'auréole de case aux dépens des autres auréoles. Les apports en carbone dans les cultures vivrières de cette auréole (3,8 tC ha 1 an 1) sont plus importants que les quantités généralement préconisées pour compenser la minéralisation du carbone organique du sol.

Selon la dynamique des éléments minéraux, les sorties d'azote et de phosphore ont été bien équilibrées entre les champs de culture pluviale et les autres systèmes d'utilisation de l'espace, mais ces champs cultivés ont représenté 74 % des pertes d'azote et de phosphore, dont la presque totalité a bénéficié aux cultures vivrières, entraînant là un bilan positif en azote et en phosphore. Ainsi, le système actuel agit comme un impluvium pour le carbone et les nutriments, puisqu'il draine les ressources organiques des zones périphériques vers les cultures vivrières pluviales. En outre, le modèle d'organisation en auréoles permet une culture continue et durable de céréales à des rendements relativement élevés sur 7 % de la surface gérée par le village

D'un point de vue biogéochimique, la jachère et la fumure animale diffèrent dans le sens où la jachère constitue un processus vertical d'accumulation du carbone et, dans une moindre mesure, de l'azote et du phosphore, alors que la fumure est une simple redistribution de matière. Cependant, l'établissement de flux stables d'énergie, de carbone et de nutriments maintient aussi la durabilité du système agropastoral de Sare Yorobana à un niveau plus global que celui de la parcelle. Des transferts significatifs de matière organique sont nécessaires depuis les aires périphériques pour assurer l'équilibre minéral des cultures permanentes de l'auréole de case.

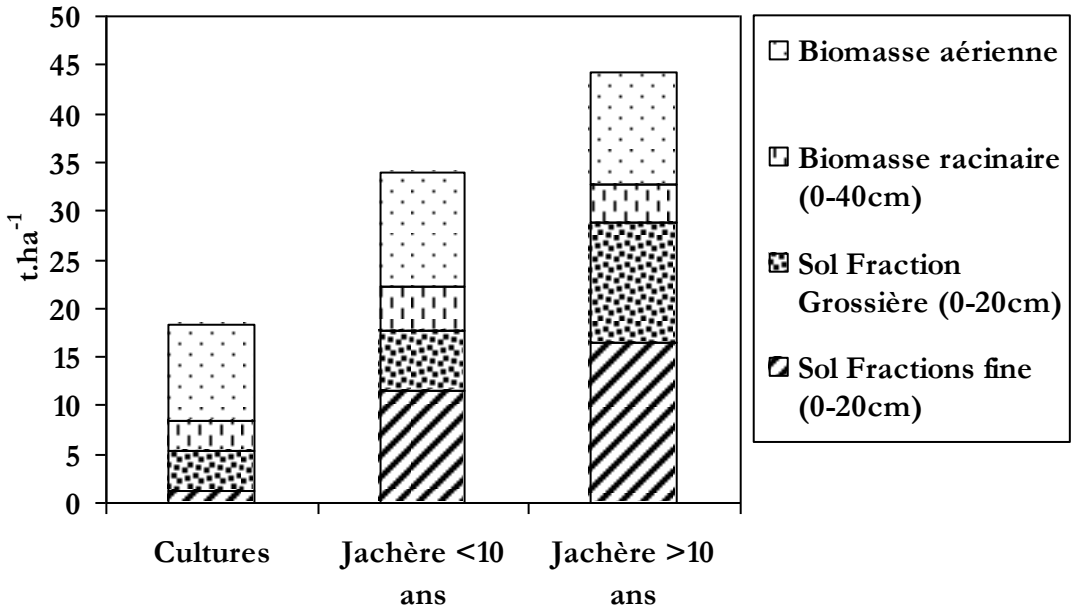


Figure 3 : Stocks de carbone (tCarbone.ha^{-1}) dans le système sol-plante des parcelles cultivées et en jachère sur le terroir de Sare Yorobana (Haute Casamance, Sénégal).

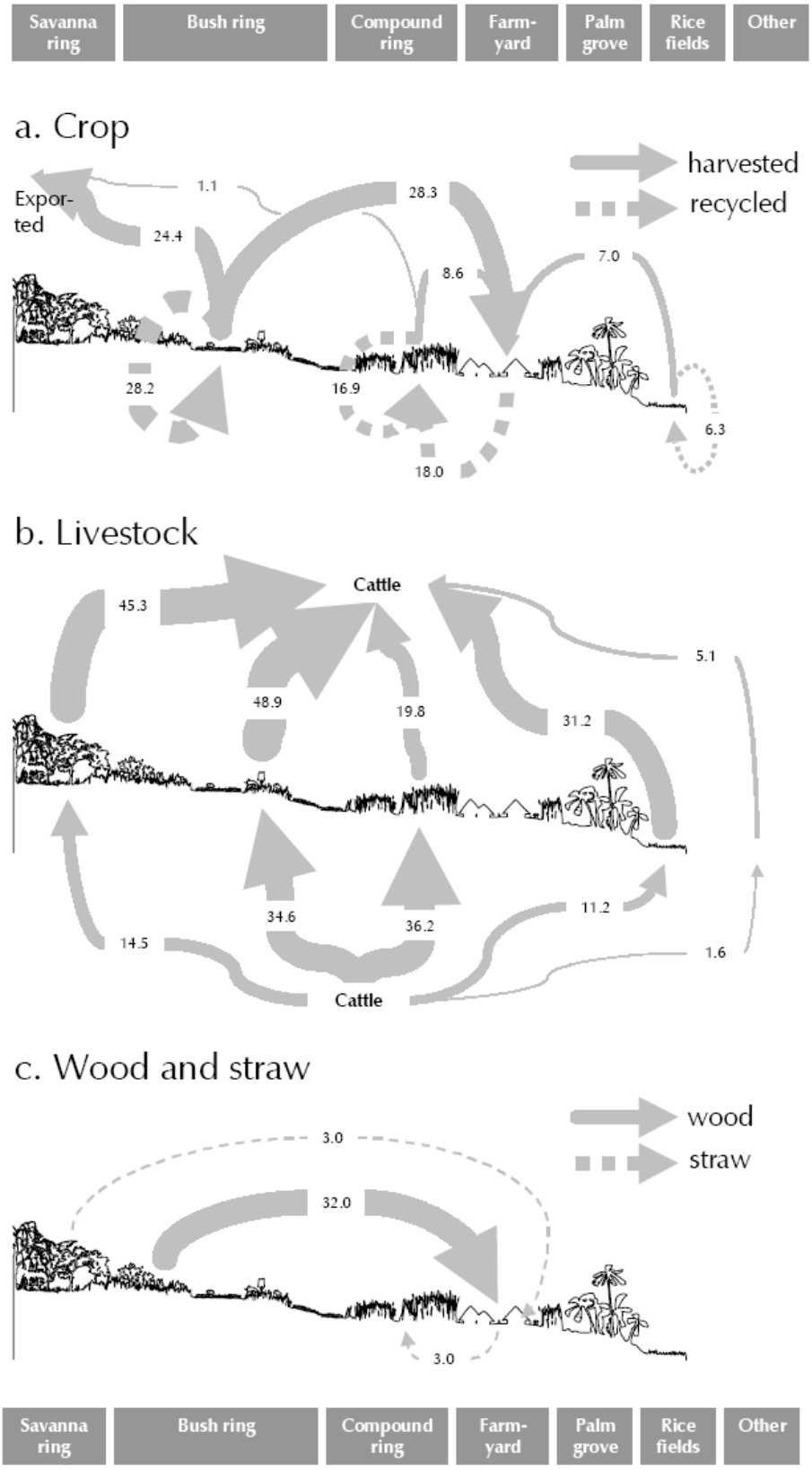


Figure 4 : Flux anthropogéniques de carbone (tonnes) établis de novembre 1996 à novembre 1997 à Sare Yorobana (Haute Casamance, Sénégal).

Les flux liés au bétail concernent la saison sèche uniquement. La largeur des flèches est proportionnelle à la valeur du flux. (d'après Manlay (2000).

Biodiversité dans les sols des jachères

L'augmentation limitée du carbone organique dans les sols sous jachère, voire dans les sols cultivées fortement fumées, ainsi que des décompositions racinaires très rapides mesurée in situ (Manlay *et al.*, 2004a), indique l'existence de puits biologiques de carbone important dans les sols des agrosystèmes (Manlay, 2000). L'activité biologique apparaît un élément essentiel dans le rôle des jachères sur les propriétés des sols et la définition de leur qualité. Plusieurs équipes participantes au programme Jachère ont effectuées des travaux sur différents groupes biologiques du sol dans les jachères.

Macrofaune du sol

Sur les sites expérimentaux de Sonkorong et Sare Yorobana au Sénégal, la macrofaune totale des sols de jachères d'âge différent a été évalué selon la méthode TSBF (Sarr *et al.*, 1998 ; Chotte *et al.*, 2000 ; Fall *et al.*, 2000 ; Lavelle *et al.*, 2000). (La figure 5) montre la forte variabilité de la densité totale de la macrofaune qui semble toutefois se stabiliser avec la durée de la jachère. Les groupes les plus abondants sont les termites et les fourmis. La densité des termites, ainsi que celles de la plupart des groupes, ont tendance à augmenter avec l'âge de jachère ainsi qu'avec la mise en défens des parcelles. Les groupes fonctionnels définis à l'intérieur des différents groupes taxonomiques présentent des dynamiques plus marquées par rapport au temps de mise en jachère (Figure 6). Ainsi, les vers endogés géophages apparaissent plus abondants dans les jachères anciennes avec toutefois une tendance à la diminution dans les jachères plus anciennes (30 ans). En revanche, les vers épigés qui vivent et se nourrissent principalement dans la litière sont plus présents dans les anciennes jachères comparativement aux jachères plus jeunes. De même pour les termites, la dynamique des différents groupes trophiques différent selon l'âge de jachère. Alors que les champignonistes, tel que *Microtermes hollandei* sont les plus abondants principalement dans les jachères de courte durée, les humivores comme *Ancistrotermes crucifer*, second groupe par leur abondance, sont particulièrement fréquents dans les jachères de longue durée (Figure 6).

La diversité des nématodes dans les jachères au Sénégal

Les jachères ont également un rôle d'assainissement des terres après une période de culture. Les adventices sont éliminées dès les premières années de jachère (Fournier *et al.*, 2000). De même, les nématodes phytoparasites constituent une des contraintes importantes dans la production agricole. L'influence de la jachère naturelle sur le développement des nématodes phytoparasites a été étudiée au Sénégal (Cadet & Floret, 1995 ; Cadet *et al.*, 2000 ; Cadet *et al.*, 2005).

Aucune variation significative du nombre totale de nématodes phytoparasites n'est enregistrée entre les différentes situations (culture ou jachère). En revanche la diversité spécifique s'accroît avec l'âge de jachère et surtout la structure spécifique des nématodes phytoparasites est profondément modifiée (Figure 7). Les espèces pathogènes dominantes dans les parcelles cultivées telle que *Scutellonema cavenessi* toujours présente dans les vieilles jachères mais sont nettement moins abondante. D'autres espèces dominent alors la population des nématodes telle que *Helicotylenchus dihystera*. Des essais ont permis de montrer que les cortèges d'espèces que l'on retrouve dans les jachères âgées sont beaucoup moins pathogènes que les populations des parcelles cultivées ou de jeunes jachères(Villenave & Cadet, 2000). L'accroissement de la diversité spécifique et le changement dans la composition spécifique sont synonymes de baisse de l'effet pathogène, indépendamment du nombre de parasites présents. Les résultats obtenus indiquent qu'il suffirait de maîtriser la composition spécifique d'un peuplement de nématodes pour diminuer son effet pathogène plutôt que de chercher par des moyens chimiques à éradiquer totalement les nématodes phytoparasites.

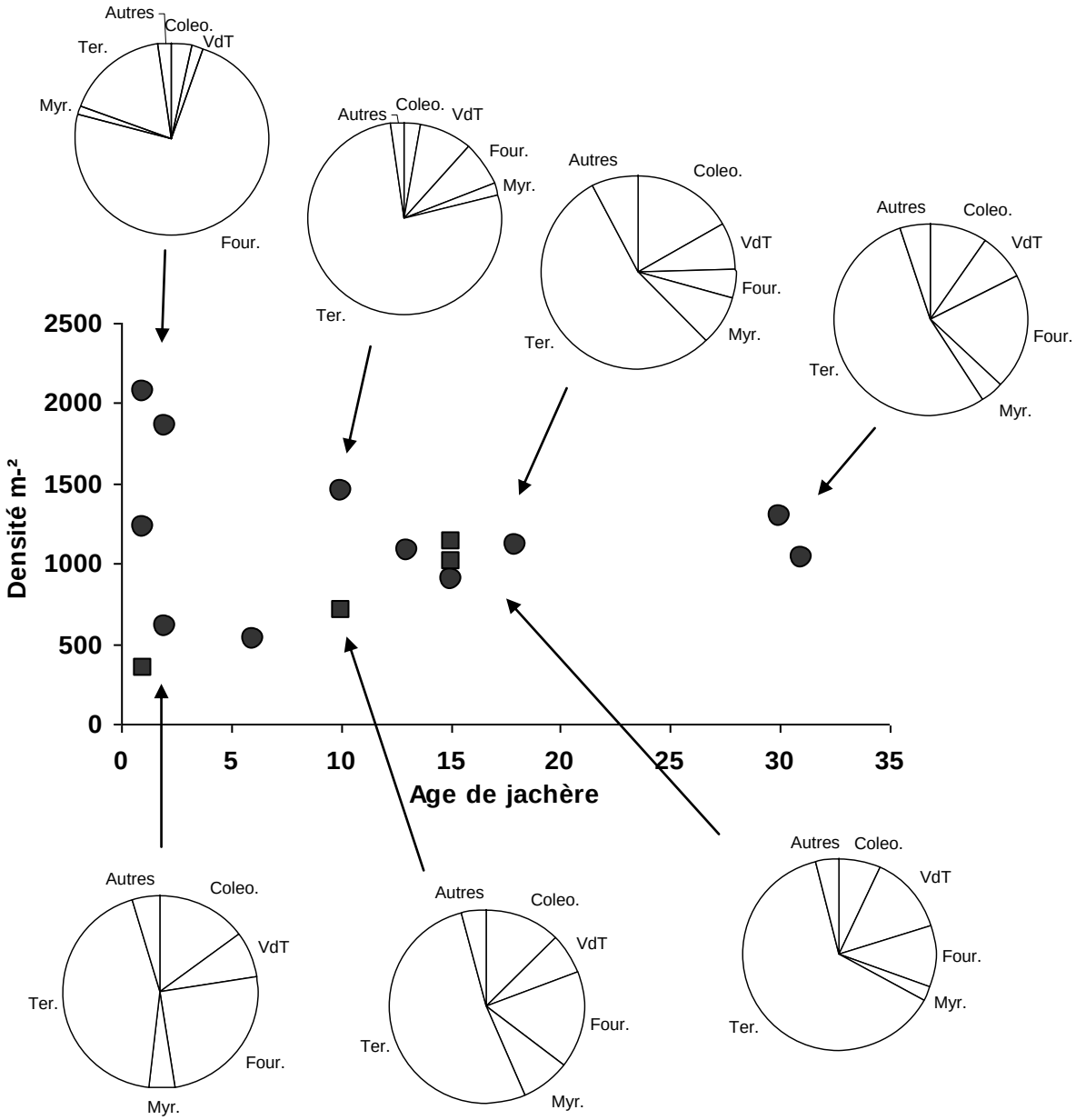


Figure 5 : Diversité et densité de la macrofaune totale en fonction du temps de jachère sur les terroirs de Sare Yorobana (rond noir) et Sonkorong (carré noir) évaluée par la méthode TSBF. Ter termites ; Myr myriapodes ; Four fourmis ; VdT vers de terre ; Coleo coleoptères. (d'après Fall et al. (2000), et Lavelle et al. (2000))

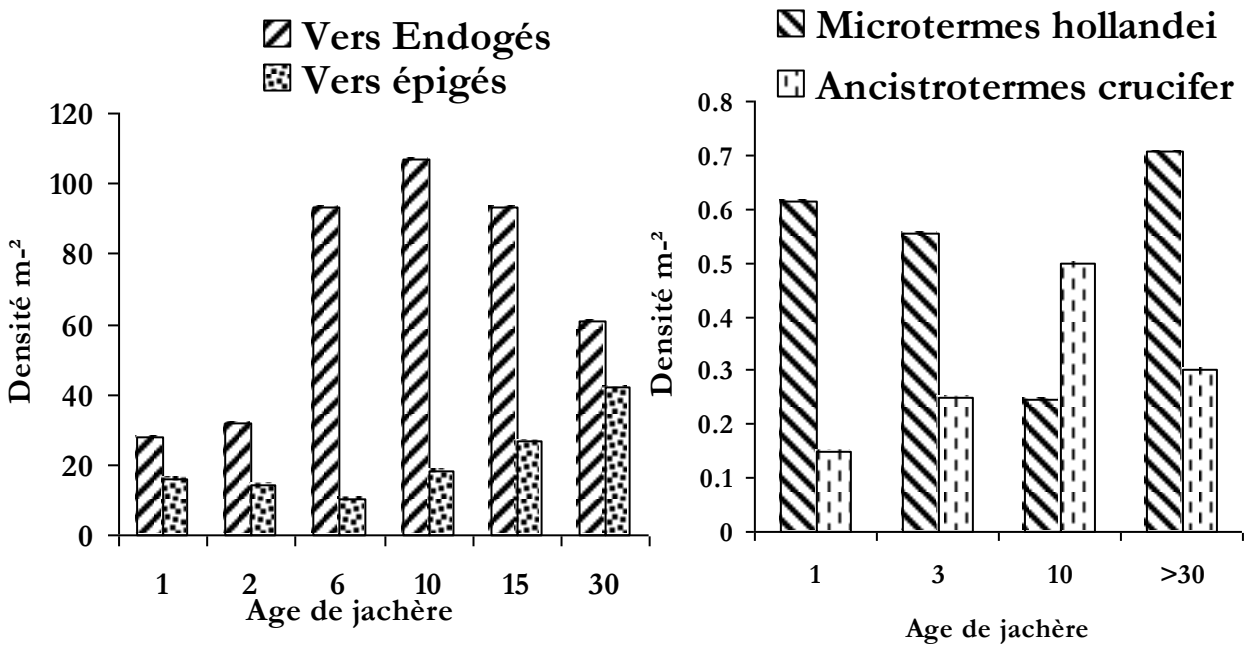


Figure 6 : Densité des groupes biolgoiques de vers de terre (graphe de gauche) et de termites (graphe de droite) en fonction de l'âge de jachère sur le terroir de Sara Yorobana (Sénégal) (d'après Fall *et al*. (2000) et Sarr *et al*. (Lavelle *et al.*, 2000 ; , 2000))

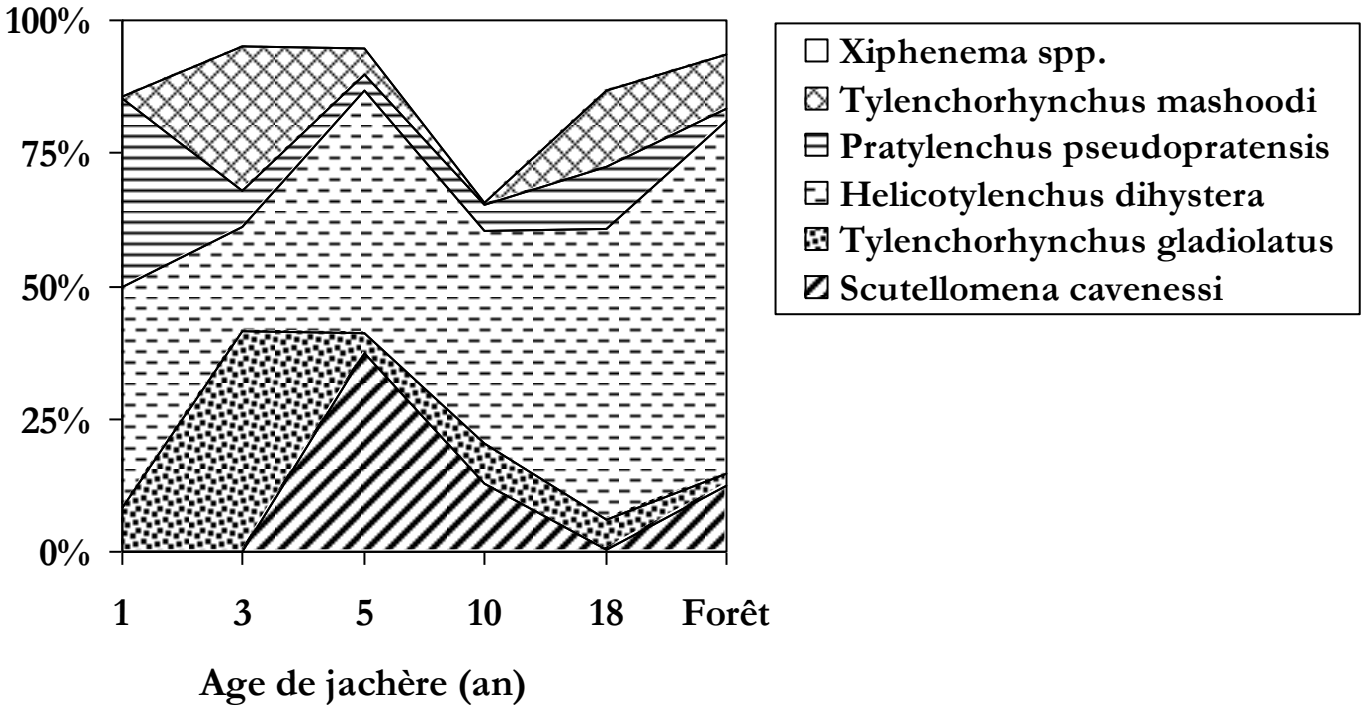


Figure 7 : Structure du peuplement de nématodes phytoparasites dans différentes jachères de différents âge et dans une formation forestière au Sénégal (d'après Cadet *et al.* (2000).

Activité et diversité microbienne dans les sols de jachère

Champignons mycorhiziens

Dans les sols des différentes jachères du site de Sonkorong, le genre Glomus, dont les spores sont marron à marron foncé, est le plus abondant ; il représente plus de 93% du nombre total moyen de spores (116,4 spores $100g^{-1}$ dans la jachère de douze ans anthropisée et de 418,8 spores $100g^{-1}$ dans la jachère de quatre ans protégée) (Duponnois *et al.*, 2000). Pour Glomus, le nombre moyen de spore le plus élevé a été enregistré dans les jachères de 4 ans (de 224 à 382,4 spores.100 g-1 de sol) et le plus bas dans la jachère de 12 ans (110,4 spores.100 g-1 de sol). *S. verrucosa* a été détecté en abondance dans le sol de la jachère protégée la plus ancienne (20 ans, protégée). L'abondance des spores est fortement corrélée à la texture et aux caractéristiques chimiques du complexe d'échange des sols des différentes jachères ; la présence de *S. verrucosa* est liée aux sols à texture grossière alors que les glomales sont observées dans des sols les plus argileux. L'abondance de ces groupes est aussi liée à certains éléments chimiques du sol ; la présence des glomales est corrélée positivement aux teneurs en magnésium, en calcium et en phosphore, alors que celle de *S. verrucosa* et de est corrélée positivement à la teneur en phosphore.

De longues périodes d'abandon des cultures aboutissent généralement à une diminution de la présence et de l'activité de la symbiose mycorhizienne. Les résultats obtenus dans ce programme indiquent que le nombre de spores est maximal dans les jachères de moins de cinq ans. Cela suggère que le phénomène symbiotique peut être optimisé sur une courte période lorsque la végétation est protégée de l'impact des populations (feux de brousse, passage de troupeaux, etc.).

Biomasse et diversité microbienne

Des mesures dans les sols de Sonkorong et de Sare Yorobana au Sénégal indiquent peu de variations dans les premiers centimètres de sol de modification majeure de la biomasse microbienne en fonction de l'âge de la jachère (Figure 8). Toutefois, une mise en défens total pendant plus de 10 ans révèle une augmentation de la biomasse microbienne. Cet effet de la jachère relativement faible peut être attribué, corrélativement à l'évolution de la matière organique des sols, à la nature sableuse des sols étudiés (N'Dour *et al.*, 2000).

L'activité enzymatique mesurée sur ces mêmes sols révèle une augmentation des activités phosphatases, hétérosidases (βGlucosidases) et polysaccharidases en fonction de l'âge de la jachère. L'effet est nettement plus important dans les sols prélevés sous la canopée des arbres dans les jachères anciennes (N'Dour *et al.*, 2001). L'activité potentielle de fixation d'azote a été comparée entre des jachères de 3 ans et des jachères de longue durée (19 ans). Le gain enregistré sur la durée de la jachère serait de l'ordre de 90% ; cette amélioration serait le fait d'une augmentation de l'activité potentielle de fixation de l'azote pour l'essentiel dans les fractions plus grossières de ces sols (>50µm) (Chotte *et al.*, 2002).

Conclusion

La biodiversité des organismes vivants dans le sol évolue au cours de la période d'abandon cultural dans les systèmes de rotation culture jachère. Si spécifiquement peu de changement significatif apparaissent, il semble bien que, pour la plupart des taxons, la structure des peuplements à l'image des nématodes soient modifiés et fasse apparaître la domination de certains groupes fonctionnels ou trophiques. Ces évolutions sont déterminées par la nature des sols. En ce sens, la dominance de sols sableux dans les régions soudaniennes et soudano-sahéliennes limite l'effet des jachères sur les modifications de la qualité biologique des sols. Enfin, les arbres ont un rôle important dans les transformations des sols notamment à travers la litière et le système racinaire qui créent des conditions favorables à une amélioration de la diversité et l'activité biologique ; les espèces

herbacées ayant moins d'effets sur les sols (Masse et al., soumis). Il apparaît donc que la gestion et l'amélioration des jachères passent par une manipulation de la végétation ; c'est ce que nous avons tenté dans le cas des études sur le raccourcissement du temps de jachère et l'amélioration par l'introduction d'espèces végétales améliorantes dés les premières années de mise en jachère.

Dynamique et amélioration des jachères de courte durée

Face aux évolutions démographiques, les besoins en production agricole ont eu pour conséquence une diminution des temps de mise en jachère dans les systèmes de rotation culture-jachère. S'est alors posé la question de l'intérêt d'étudier la dynamique des sols dans les jachères de courte durée et de tester des voies d'amélioration de leur capacité à modifier le propriétés physico-chimiques et biologiques des sols.

La végétation post-culturale jouant un rôle déterminant dans les modifications des sols sous jachère, il semblait que la première façon de transformer la jachère de courte était d'y introduire des espèces végétales améliorantes. A Sonkorong au Sénégal, un test comparant des jachères naturelles à des jachère où a été introduites d'une part une espèce ligneuse légumineuse et à croissance rapide (*Acacia holosericea*), et d'autre part une graminée pérenne (*Andropogon gayanus*) couramment rencontré dans les jachères de plus de 6 ans et les savanes (Masse *et al.*, 1998 ; Masse *et al.*, 2000 ; Masse *et al.*, 2004 ; Cadet *et al.*, 2005).

Après 4 années d'expérimentation, une évaluation sur la qualité des sols (0-10 cm) a été réalisée dont quelques résultats sont présentés sur la Figure 9. Après 4 années de jachère, les quantités de carbone organique dans les sols ne sont pas significativement différents entre jachère naturelle et améliorée. En revanche, l'activité microbienne apparaît fortement influencer par la présence des *A. holosericea*. Les jachères avec introduction d'espèces à forte production ont permis d'augmenter le stock de biomasse accumulée à l'image de la biomasse racinaire. En revanche, le peuplement des nématodes phytoparasites est très peu différent entre la jachère naturelle et les jachères à *Andropogon* ou *Acacia*. L'effet positif sur le rendement après défriche a été observé uniquement la première année. Ceci est du pour l'essentiel à la forte litière produite sous *Acacia*, et qui a été brûlée pour la mise en culture fournissant ainsi une dose importante d'éléments minéraux. La gestion de la biomasse accumulée pendant la jachère même de courte durée conditionnera ainsi en partie l'effet sur le rendement suivant la défriche. Toutefois, sur ces essais, il a été montré que les bilans de certains éléments minéraux du sol (phosphore, potassium, calcium) présentent des déséquilibres (diminution des stocks) qui peuvent ainsi accentuer une dégradation chimique des sols au cours des cycles culture jachère de courte durée (Masse *et al.*, 2004). Bilgo (2005) dans son étude sur les jachères de courte durée a également observé très peu d'effets sur les propriétés biologiques des sols sous *Andropogon gayanus*.

Conclusion générale

Les divers travaux menés dans le cadre du programme Jachère sur la gestion de la fertilité biophysique des sols dans les régions soudano-sahéliennes et soudaniennes ont révélés l'importance de la dynamique de la végétation dans le déterminisme de l'évolution de la qualité des sols au cours de la jachère. La végétation est à l'origine de l'accumulation de matière organique, permettant un recyclage et un stockage des éléments minéraux qu'ils proviennent des horizons supérieurs (immobilisation) ou des horizons en profondeur (remontée). Dans cette végétation, les ligneux apparaissent comme l'élément clé. Ils sont capables de fixer des éléments minéraux en profondeur, de modifier les sols par leur système racinaire et de favoriser la diversité des niches écologiques et par conséquent des organismes vivants du sol et de leur activité. Le temps nécessaire pour qu'une jachère atteigne un niveau qualitatif suffisant pour assurer un état du sol propice à la mise en culture sera donc tributaire de la vitesse de croissance des ligneux. De même certains graminées pérennes

sont capables de transformer les propriétés physico chimiques des sols (par exemple *Andropogon gayanus*) mais d'un point du vue du bilan minéral, ces plantes auront tendance à n'assurer qu'une immobilisation des minéraux se trouvant en surface et donc dans la zone cultivée. Seule les légumineuses peuvent apporter un surplus d'azote provenant de la fixation de l'azote atmosphérique.

Pour assurer leur efficacité sur la qualité des sols, les jachères doivent naturellement être gérées pour maximiser la production et la diversité végétale. Un contrôle des feux de brousse et des prélèvements (fourrage, bois) est ainsi nécessaire. De plus, les techniques de défriche peuvent également limiter l'efficience d'une jachère sur la période de culture suivante (brûlis , dessouchage, etc.). Le maintien de certaines souches peut être un gage pour un maintien de la diversité au cours des rotations culture-jachère successives. Enfin, le système racinaire apparaît déterminant étant la seule partie qui ne subit pas de prélèvements ou de brûlis. Les ligneux ou herbacées possédant un système racinaire conséquent permettraient donc à la jachère d'assurer une efficacité maximale sur la restauration d'une qualité biophysique des sols.

Cependant, les jachères de longue durée sont amenées à disparaître au profit de jachères de courtes durées. Dans la majorité des exemples, ces jachères de courte durée ne sont pas capables de modifier les propriétés physcico-chimiques et biologiques des sols. L'amélioration par des espèces à croissance rapide, ligneuse et légumineuse comme les Acacia, ou les graminées pérennes ne permettent pas de restaurer une qualité suffisante pour la mise en culture par rapport à une jachère naturelle. Il existe même un risque d'accentuation de la dégradation des propriétés minérales des sols si une mauvaise gestion de la biomasse végétale est faite au moment de la défriche. La jachère de courte durée peut alors devenir une pratique minière sur les stocks d'éléments minéraux du sol au même titre qu'une culture non fertilisée. Il peut alors également être intéressant de fertiliser ou amender un sol pendant la phase de jachère ; par exemple, on peut utiliser la capacité d'une végétation ligneuse à croissance rapide à solubiliser des phosphates naturels à travers les symbioses mycorhiziennes que peuvent établir ces plantes.

Cependant, le maintien de jachères de courte durée n'apparaît pas efficace au niveau de la gestion de la fertilité des sols d'un terroir sauf, si la jachère de courte durée s'inscrit dans un autre objectif par exemple une production fourragère ou une gestion foncière du terroir.

Il semble plus important de pouvoir intensifier les cultures à l'image des champs de case qui sont cultivés de façon permanente grâce à l'apport d'importantes quantités de matières organiques (déchets domestiques, fécès d'animaux). L'association agriculture élevage revêt ici toute son importance ainsi que toute les techniques favorisant les recyclage de matières organiques (gestion des résidus de récolte, fosses fumières, composts, etc.). Les techniques agroforestières doivent alors être associées pour réintroduire les arbres dans le système agricole. Ces arbres seront préférentiellement introduits sans qu'ils soient une contrainte à la culture permanente limitant ainsi l'immobilisation de surfaces cultivées pendant une période donnée. Deux options sont alors possibles : l'arbre sous forme de parcs arborés tels qu'ils existent dans de nombreuses régions (parcs à *Acacia albida*, *Cordyla pinnata*, *Vitellaria paraboxa*), ou l'arbre déplacés en limite de parcelles cultivées avec la création de haies vives et un embocagement du paysage.

Il est évident que toutes ces options doivent être confrontées aux autres rôles dévolus à la jachère dans les systèmes de production en Afrique de l'Ouest

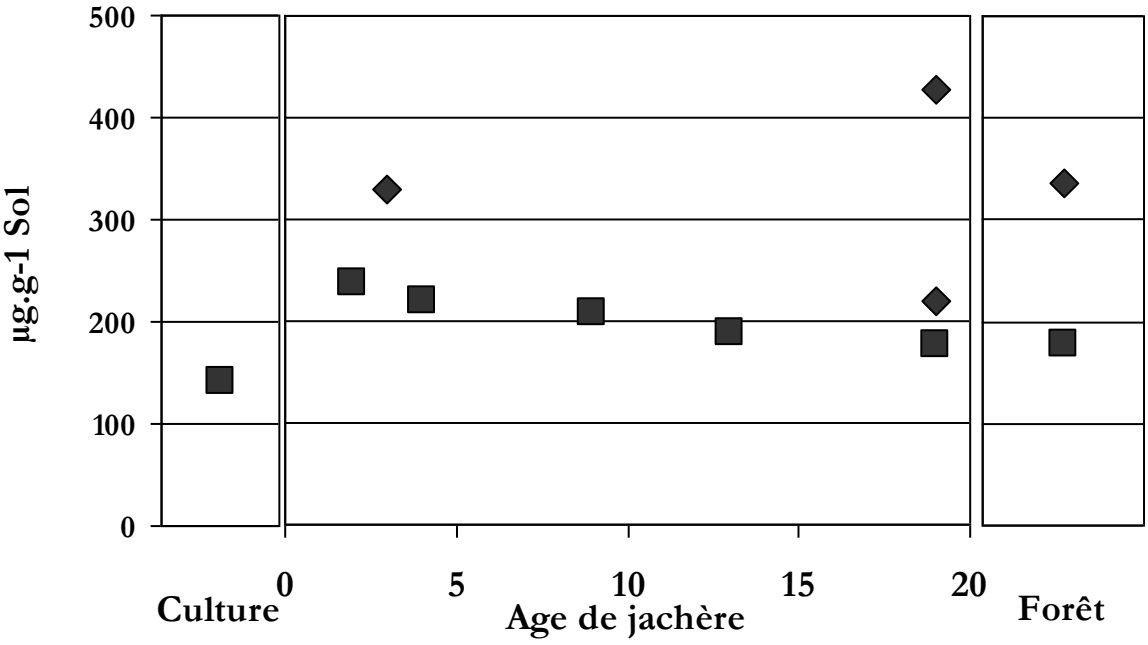


Figure 8 : Biomasse microbienne mesurée sur des sols (0-10 cm) cultivés, de jachère d'âge différent, et de forêt sur les terroirs de Sare Yorbana (losange) et Sonkorong (carré).

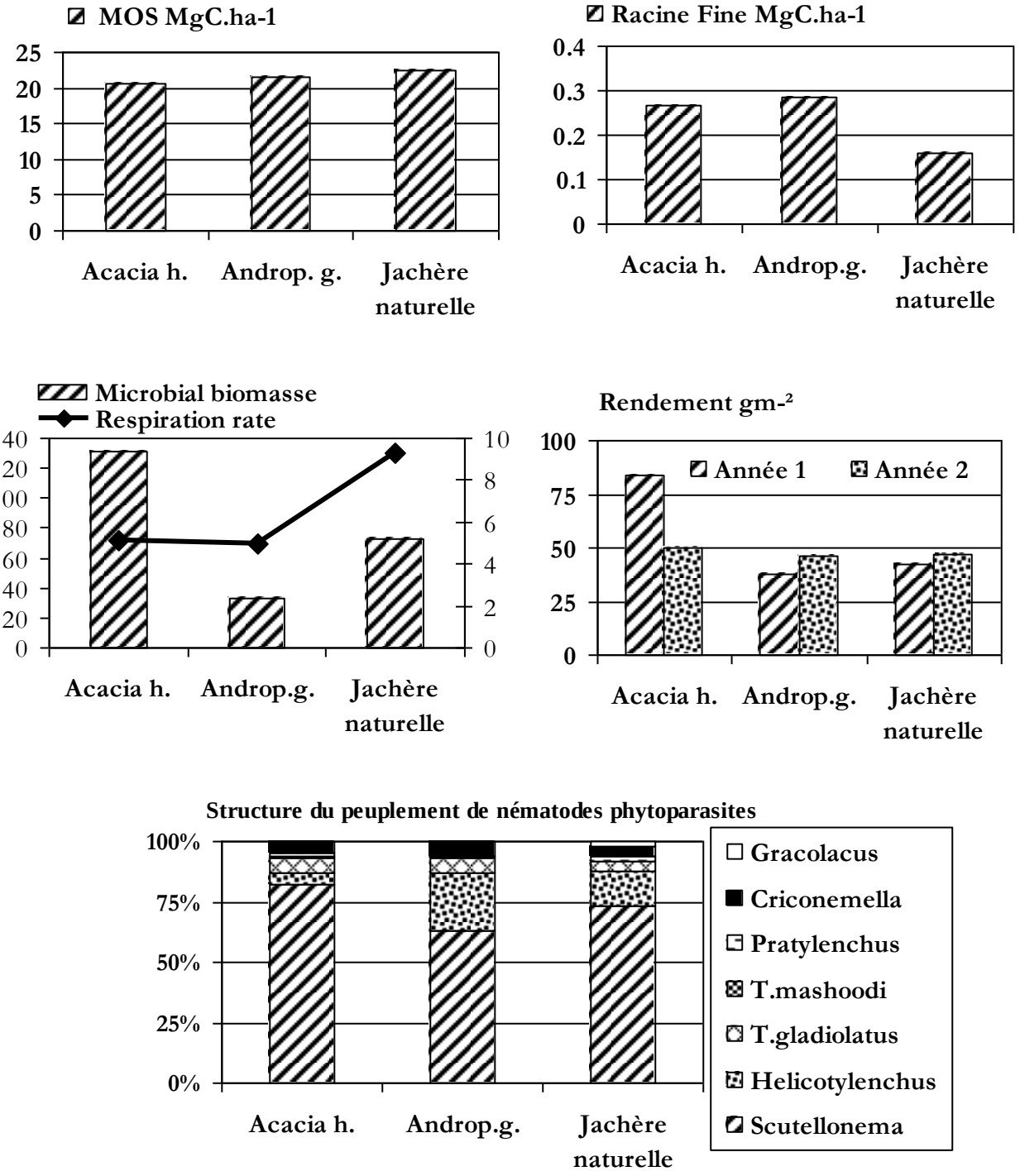


Figure 9 : Modification dans les sols (0-10cm) des jachères de courte durée (4 ans) naturelle, et après l'introduction d'une espèce ligneuse légumineuse (*Acacia holosericea*) ou d'une graminée pérenne (*Andropogon gayanus*) à Sonkorong, Sénégal.

BIBLIOGRAPHIE

Bilgo, A. 2005. *Statut organo-minéral et biologique des sols dans les systèmes culture-jachère naturelle de courte durée ou améliorée à Andropogon gayanus Kunth. Cas de Bondoukuy en zone sud soudanienne du Burkina Faso*. Université de Ouagdougou, Ouagadougou.

Cadet, P., Bois, J.-F., Pate, E., N'Diaye-Faye, N., & Floret, C. 2000. Diversité des nématodes phytoparasites et durabilité du système culture-jachère au Sénégal. In: *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 268-282. John Libbey Eurotext, Paris.

Cadet, P., & Floret, C. 1995. An initial study of fallow periods on the nematode community in the Soudanese-Sahelian zone of Senegal. *Acta Oecologica*, 16, 77-88.

Cadet, P., Masse, D., & Thioulouse, J. 2005. Relationships between plant-parasitic nematode community, fallow duration and soil factors in the Sudano-Sahelian area of Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108, 302-317.

Chotte, J.-L., Duponnois, R., Cadet, P., Adiko, C., Villenave, C., Agboba, A., & Brauman, A. 2000. Jachère et biologie du sol en Afrique tropicale. In: *La Jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 95-121. John Libbey Eurotext, Paris.

Chotte, J.L., Schwartzman, A., Bailly, R., & Jocteur Monrozier, L. 2002. Changes in bacterial communities and Azospirillum diversity in a tropical soil under 3yr and 19yr natural fallow assessed by soil fractionation. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1083-1092.

Duponnois, R., Ba, A.M., Plenchette, C., Thioulouse, J., & Cadet, P. 2000. Effet de la jachère sur des populations de champignons mycorhiziens à arbuscules au Sénégal. In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 325-332. John Libbey Eurotext, Paris.

Fall, F., Sarr, M., Rouland, C., Agboba, A., & Brauman, A. 2000. Effet de l'âge de la jachère et de la saison sur la densité et la diversité des termites (Haute-Casamance, Sénégal). In: *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives.* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 259-267. John Libbey Eurotext, Paris.

Feller, C., & Beare, M.H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Georderma*, 79, 69-116.

Fournier, A., Floret, C., & Gnahoua, G.M. 2000. Végétation des jachères et succession post-culturale en Afrique tropicale. In: *La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 123-168. John Libbey Eurotext, Paris.

Lavelle, P., Villenave, C., Rouland, C., & Derouard, L. 2000. Dynamique des peuplements de macro-invertébrés du sol aux diverses étapes de la Jachère en Afrique Tropicale. In: *La Jachère en Afrique Tropicale. Rôles, Aménagement, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 236-241. John Libbey Eurotext, Paris.

Manlay, R.e.l.J., Masse, D., Chevallier, T., Russell-Smith, A., Friot, D., & Feller, C. 2004a. Post-fallow decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant and Soil*, 260, 123-136.

Manlay, R.J. 2000. *Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the West African savanna: a village case study from south Senegal*. ENGREF, Paris.

Manlay, R.J., Chotte, J.-L., Masse, D., Laurent, J.-Y., & Feller, C. 2002a. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna; III. Plant and soil components under continuous cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 249-269.

Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Feller, C., & Richard, D. 2004b. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna--II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79, 83-107.

Manlay, R.J., Ickowicz, A., Masse, D., Floret, C., Richard, D., & Feller, C. 2004c. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna--I. Element pools and structure of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*, 79, 55-81.

Manlay, R.J., Kaire, M., Masse, D., Chotte, J.-L., Ciornei, G., & Floret, C. 2002b. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna: I. The plant component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 215-232.

Manlay, R.J., Masse, D., Chotte, J.-L., Feller, C., Kaire, M., Fardoux, J., & Pontanier, R. 2002c. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna; II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88, 233-248.

Masse, D., Cadet, P., Chotte, J.-L., Diatta, M., Floret, C., N'Diaye-Faye, N., Pate, E., Pontanier , R., Thioulouse, J., & Villenave, C. 1998. Jachères naturelles et restauration des propriétés des sols en zone semi-aride. Cas du Sénégal. *Agriculture et développement*, 18, 31-38.

Masse, D., Manlay, R.J., Diatta, M., Pontanier, R., & Chotte, J.-L. 2004. Soil organic matter dynamic and nutrients balance in a short-term fallows with different types of vegetation experiments in Senegal. *Soil Use and Management*, 20, 92-95.

Masse, D., Silva Da Conceicao, K., Diatta, M., & Madinan, I. 2000. Végétation des jachères de courte durée et rendement du mil après défriche au Sénégal. In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 127-134. John Libbey Eurotext, Paris.

N'Dour, N.Y., Chotte, J.L., Pate, E., Masse, D., & Rouland, C. 2001. Natural and improved fallows in tropical semi-arid zone (Sénégal) : variations in soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology*, 18, 229-238.

N'Dour, Y.B., Fardoux, J., & Chotte, J.-L. 2000. Statut organique et microbiologique de sols ferrugineux tropicaux en jachère naturelle (Sénégal). In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 354-360. John Libbey Eurotext, Paris.

Ouattara, B., Serpantié, G., Ouattara, K., Hien, V., Lompo, T., & Bilgo, A. 1997. Etats physico-chimiques des sols cultivables en zone cotonnière du Burkina Faso. Effets de l'histoire culturale et du type de milieu. Pages 17-32 *in* C. Floret & R. Pontanier, editors. Jachère et maintien de la fertilité. IER-ORSTOM, Bamako, Mali.

Sarr, M., Agboba, A., & Russel-Smith, A. 2000. Abondance et diversité des termites dans les jachères sahéliennes. Effets des termites et autres macrofaunes du sol sur l'infiltration de l'eau. In:

La jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives. (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 242-249. John Libbey Eurotext, Paris.

Sarr, M., Agbogba, C., & Russell-Smith, A. 1998. The effects of length of fallow and cultivation on termite abundance and diversity in the sahelian zone of Senegal : A preliminary note. *Pedobiologia*, **Vol.** 42, 56-62.

Villenave, C., & Cadet, P. 2000. Rôle particulier de *Heliconthylenchus dihystera* au sein des peuplements de nématodes phytoparasites (Sénégal). In: *La Jachère en Afrique tropicale. Rôles, Aménagements, Alternatives* (ed. C. Floret & R. Pontanier) pp. 291-299. John Libbey Eurotext, Paris.

PARTIE III

Restauration des terres dégradées

Restauration écologique des Ecosystèmes dégradés et des Paysages fragmentés Une approche hiérarchique

Edouard Le Floc'h & James Aronson

Cefe/Cnrs, Montpellier (France)

Depuis au moins deux siècles les agronomes, forestiers, pastoralistes ont été nombreux à tenter des interventions palliatives ou correctives pour faire obstacle à la dégradations de la 'nature' chaque jour plus évidente.

Plus récemment, les écologues prenant en compte le fait que l'on se trouvait le plus souvent, en présence d'écosystèmes à la fois complexes et dynamiques, ont tenté de rationaliser la mise en œuvre de ces expériences en faisant alors naître une nouvelle discipline scientifique l'*Ecologie de la restauration*.

Notre propos est ici, successivement de définir cette nouvelle discipline, de proposer les motifs d'y avoir recours et de décrire une approche hiérarchisée pour sa mise en œuvre. Cet exposé tentera également de définir un peu de vocabulaire et quelques concepts illustrés par des modèles. Il nous importe en effet que l'on puisse le plus largement possible partager les expériences concernant des tentatives de reconstitution des milieux dégradés, et ce quelque soit le biome dans lequel cela se passe.

Nous nous situerons tout d'abord vis à vis de la discipline en la définissant.

DEFINITIONS et RAISONS D'ETRE

Bien que l'écologie de la restauration soit une discipline récente plusieurs définitions ont déjà été proposées, avec plus ou moins de bonheur. Nous retenons la suivante : *la restauration écologique est définie comme étant le rétablissement des processus d'auto-régénération (résilience) des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits.*

Il s'agit donc de tentatives de palier aux problèmes à court et long terme des écosystèmes en intervenant activement ou passivement de façon à leurs permettre de retrouver un niveau suffisant de résilience. Afin qu'ils puissent, ensuite, poursuivre seuls (auto-régénération) leur retour vers un état assez semblable à celui qui préexistait.

L'Ecologie de la restauration doit-être distinguée de l'ensemble des techniques de l'ingénierie écologique qui elle consiste, par le recours à des solutions déjà connues, à répondre à des problèmes écologiques spécifiques.

L'ingénierie écologique se distingue à son tour de l'ingénierie des travaux publics par le fait qu'elle à recours à des matériaux naturels vivants.

Vocabulaire

a- les types de restauration

Pour plus de détails consulter Le Floc'h & Aronson (1995), Aronson *et al*. (1995).

<u>*Restauration*</u> (*sensu stricto*): Retour d'un écosystème dégradé mais n'ayant pas franchi de seuil d'irréversibilité (voir ce terme) vers un état ayant existé antérieurement (*écosystème de référence*) et dont la structure, la diversité, et le fonctionnement sont définis par un certain nombre d'attributs vitaux (voir ce terme). La restauration *s.s.* est peu exigeante en moyens (essentiellement réduction de la pression humaine).

<u>*Réhabilitation*</u>: Il s'agit de permettre à un écosystème, qui les avait perdues, de retrouver ses fonctions essentielles par le fait d'une intervention humaine forte et limitée dans le temps. Elle s'applique à des écosystèmes ayant franchi un ou des seuils d'irréversibilité et tend à leur restituer un niveau de résilience suffisant et à leur redonner un bon niveau d'autonomie.

<u>*Réaffectation*</u>: Ce terme désigne le fait de transformer un écosystème afin d'en faire un nouvel usage éventuellement totalement différent du précédent. Il est parfois possible lors d'une opération de réaffectation de modifier la destinée d'un écosystème en privilégiant particulièrement l'une de ses fonctions.

Vocabulaire

b- Mots-clefs et concepts

<u>*Attributs vitaux de l'écosystème (Indicateurs) :*</u> Paramètres utiles pour servir d'indicateurs de la structure et du fonctionnement d'un écosystème et ce, quel que soit son état de développement ou de dégradation.

<u>*Seuil d'irréversibilité*</u>: Une pression trop intense exercée sur un écosystème de manière trop prolongée peu entraîner l'incapacité pour cet écosystème de revenir à son état antérieur, même en cas de réduction ou de suppression de la pression qui s'y exerçait. Il s'agit d'une rupture. Un modèle, très général, a été développé par Hobbs & Norton (1996).

<u>*Ecosystème de référence*</u>: Ecosystème, ayant existé antérieurement et dont au moins quelques caractéristiques (attributs vitaux) sont connues. Il sera choisi comme étant la cible d'une opération de restauration.

<u>*Trajectoire d'écosystème*</u>: Ensemble des itinéraires qu'un écosystème peut suivre lors de son développement (succession) ou sous l'une des nombreuses pressions qui peuvent lui être appliquées.

<u>*Résilience (Elasticité)*</u>: Capacité d'un écosystème à retourner à son état antérieur ou à un état voisin, quand on modifie, réduit ou annule la pression ayant entraîné sa détérioration.

<u>*Le paysage*</u>: La définition proposée par (Forman & Godron, 1986) et selon laquelle le paysage est *Un assemblage d'écosystèmes qui interagissent d'une manière qui détermine des patrons spatiaux qui se répètent et sont reconnaissables.*

Attributs vitaux du paysage (Indicateurs): Ils ont au niveau du paysage le même rôle que d'autres attributs vitaux au niveau de l'écosystème. Ils sont en particulier nécessaires pour juger de l'état de développement des unités d'un paysage, de son éventuelle fragmentation mais également des progrès d'opérations de réintégration. (Aronson & Le Floc'h 1996b).

Fragmentation d'un paysage: Elle est marquée par la rupture de certaines relations entre les diverses entités du paysage déclenchant des modifications de la trajectoire naturelle des écosystèmes qui le composent.

Réintégration d'un paysage: Cette réintégration est marquée par une suite d'opérations permettant aux éléments de ce paysage de retrouver leur trajectoire naturelle ou une nouvelle trajectoire vers une nouvelle cible qui leur aurait été assignée. La réintégration d'un paysage exige éventuellement des opérations de restauration, de réhabilitation (ex. le cas de carrières interrompant les connexités dans un paysage), voire de réaffectation.

De nombreuses raisons peuvent être invoquées pour avoir recours à une telle discipline mais brièvement exposé il s'agit pour l'essentiel de réparer ou récupérer quelque chose qui a été perdu par manque de précaution, et de sens ou d'allégeance à une communauté intergénérationnelle. D'autres raisons économiques, de sécurité ou encore esthétiques peuvent également être évoquées. Ces raisons nous entraînent à distinguer les deux démarches principales suivantes.

DEUX DEMARCHES PRINCIPALES

Elles se distinguent essentiellement par les motivations majeures qui les sous-tendent. Ces différences sont énormes qui peuvent aller jusqu'à négliger ou au contraire privilégier les aspects économiques comme objectifs de ces opérations.

Démarche A.

Dans cette démarche les motivations sont plutôt d'ordre spirituel ou esthétique. Il s'agit de récupérer une authenticité historique ou naturelle suivant les mots-clefs : biodiversité originelle, authenticité, connectivité culturelle ou spirituelle. Cette démarche est souvent considérée, en partie au moins injustement, comme étant celle des écologistes protectionnistes.

Démarche B.

Ici les motivations sont essentiellement pragmatiques, cette démarche vise à préserver ou accroître le « capital-nature » renouvelable, au travers en particulier des produits et services que les écosystèmes peuvent rendre. Les mots-clefs sont alors : capital nature, durabilité, santé et intégrité des écosystèmes et des paysages, services et valeurs des écosystèmes.
Ces différences sont traduites dans les faits par les opérations. La démarche A s'ingéniant, par exemple dans une situation donnée, à rétablir la composition taxonomique initiale, alors que la démarche B conduirait à s'intéresser plutôt au rétablissement des fonctions de productions (biomasse d'intérêt pastoral…). Les moyens à mobiliser diffèrent donc, ce qui donne de l'importance à une bonne définition de l'écosystème de référence, autrement dit la cible à atteindre.

Services et valeurs des écosystèmes
Plusieurs typologies existent que nous ne traiterons pas ici. Evoquons cependant des catégories comme: biens de consommation directe (chasse, pèche, bois..) et indirecte (contrôle du régime des eaux…), valeurs d'option (sauvegarde de la diversité génétique..), valeurs d'existence.
A titre d'exemple nous ajoutons:
• Eau pure, air propre,
• Conservation des sols,
• Contrôle des incendies et des inondations,
• Retraitement des déchets,
• Biomasse consommable, *etc.*

D'autres paramètres méritent d'être discutés, dans le cadre d'une approche hiérarchisée visant à aider L'homme à refaire ce qu'il a défait.

APPROCHE HIERARCHIQUE DE LA RESTAURATION ECOLOGIQUE : SES FONDEMENTS

Il importe de se positionner vis à vis des niveaux d'espaces et des cibles c'est à dire de la référence retenue comme objectif de la restauration. L'approche hiérarchisée se définit également par le fait qu'elle reconnaît que toutes les unités d'un même paysage ne nécessitent pas obligatoirement la mise en œuvre d'un type unique d'opération. Elle permet donc d'envisager de mobiliser simultanément et judicieusement sur un même territoire, mais pour des écosystèmes différents (ou des portions du même écosystème à des stades différents de leur développement), l'ensemble des voies : restauration, réhabilitation et réaffectation déjà définies (voir encadré vocabulaire *a*. Il sera également et éventuellement pris en compte les efforts de gestion. L'ensemble correspond de fait en une combinaison des techniques de Conservation, Aménagement, Gestion, Restauration et ce, en donnant la priorité aux écotones.
L'approche retenue comprend également les éléments présentés dans la « méthodologie de suivi ».

Quels niveaux de la hiérarchie biologique et de l'espace.

La réflexion à ce sujet doit participer au choix du niveau '*biologique'* en tenant compte des relations de hiérarchies en allant globalement des communautés à la biosphère avec les niveaux intermédiaires que sont le paysage, la matrice, la région. De fait notre position consiste à opter, pour une bonne compréhension du niveau écosystème, et à considérer ce qui domine le paysage et ce qui le compose (communautés et populations).

Le paysage acquiert, dans cette approche, une importance particulière (approche hiérarchisée) et sa définition stricte doit répondre à quelques exigences afin de permettre que soient effectuées des mesures et des évaluations comparatives.

Pour ce qui est de l'espace plusieurs situations peuvent se présenter, les opérations de restauration concernant l'une ou l'autre des entités suivantes : placette (m^2), parcelle exploitation (hectares), bassin versant ou paysage (km^2), écorégion, biosphère. Il peut s'agir aussi par exemple d'une rive (km) ou encore de corridors. Bien entendu les efforts consacrés et les techniques employées dépendront de l'étendue et de l'intensité des dégâts à réparer.

Quelles références?

La cible (écosystème de référence Cf. encadré vocabulaire b) est fréquemment historique et dès lors, comme l'indiquent Egan & Howell (2001) *un aspect fondamental de la restauration des écosystèmes consiste à apprendre comment découvrir le passé et l'amener au présent.* De fait

White & Walker (1997) ont évoqué quatre possibilités majeures de constitution des références et ce en fonction du lieu et du temps :

. Lieu différent, même temps (refuges)
. Même lieu, temps différent (archéologie)
. Lieu différent, temps différent
. Même lieu, même temps (autoréférence)

La dernière situation paraît être la meilleure mais il n'est pas toujours possible ou souhaité, de la mettre en œuvre. L'histoire de l'occupation humaine nous éloigne parfois de la possibilité de concevoir avec un minimum de probabilité ce qui préexistait, mais ceci ne contraint pas à se priver nécessairement de toute cible objective et réaliste.

LES ETAPES :

1. Concepts, Modèles et objectifs

Les concepts ont pour la plupart été définis dans l'encadré 'vocabulaire' à savoir:

- Systèmes (écosystème ou paysage) de référence, trajectoire des écosystèmes (modèles),

- Seuil d'irréversibilité, capacité de charge,

- Histoire et mémoire des paysages, approche hiérarchique.

Divers modèles ont été élaborés plus ou moins complexes et généraux afin d'expliciter les relations entre la restauration des écosystèmes dégradés et les diverses disciplines concernées sur le terrain. Nous retenons le modèle proposé par Jackson *et al.* (1995) repris par Higgs (1977). Ce modèle élargit le nombre de domaines concernés en évoquant les aspects sociaux et culturels dont l'oubli est souvent cause d'insuccès des opérations par ailleurs bien pensées. Il s'agit là de promouvoir une approche qui de surcroît serait holistique si l'on omet pas le fait que les services des écosystèmes ne présentent pas tous de valeur marchande (Chassany 1999).

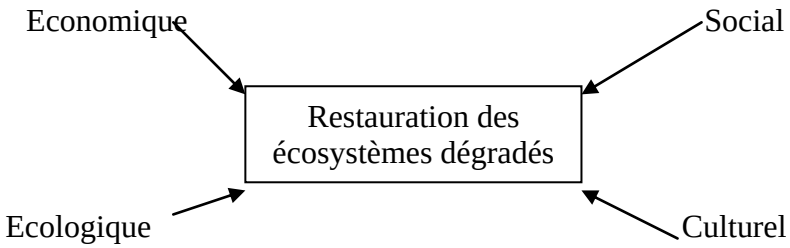


Fig. 1. Modèle de Jackson *et al.* 1995; Higgs 1997

Plusieurs modèles généraux présentent les notions élaborées dans des schémas dynamiques en deux dimensions prenant en compte par exemple :

- Le niveau de complexité par rapport à celle de la cible et le temps (Modèle de Hobbs & Norton, 1996). Les opérations de restauration peuvent être plus ou moins réussies par rapport à la cible *Etat espéré* (ou encore écosystème de référence). La complexité peut-être reflétée à la fois par la structure, la composition taxonomique ou les fonctions de l'écosystème. Cette complexité concerne donc les deux démarches précédemment esquissées.

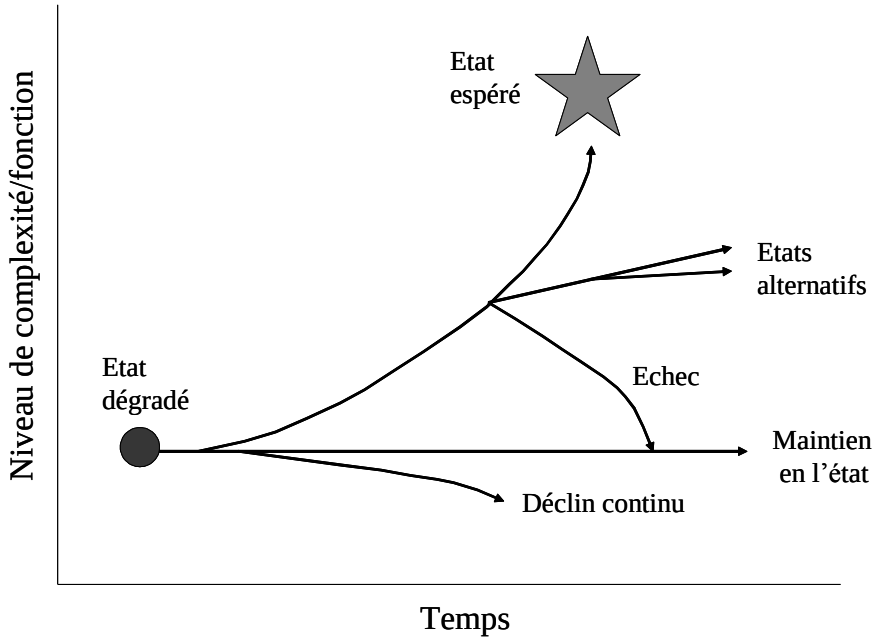


Fig. 2. Modèle de Hobbs & Norton, 1996

- Le niveau d'intervention volontaire de l'homme et éloignement de la cible (Modèle de la Fig. 3). Dans cette figure les trois voies d'intervention, que sont la restauration, la réhabilitation et la réaffectation, qui sont schématiquement différenciées dans une application à la situation d'écosystèmes pastoraux des zones arides nord africaines.

Il apparaît clairement que dans l'esprit des concepteurs du modèle l'intervention humaine est lourde et coûteuse au départ. Au fur et à mesure que l'écosystème retrouve de la résilience et qu'il devient à nouveau autonome, ce coût régresse et le bénéfice croît.

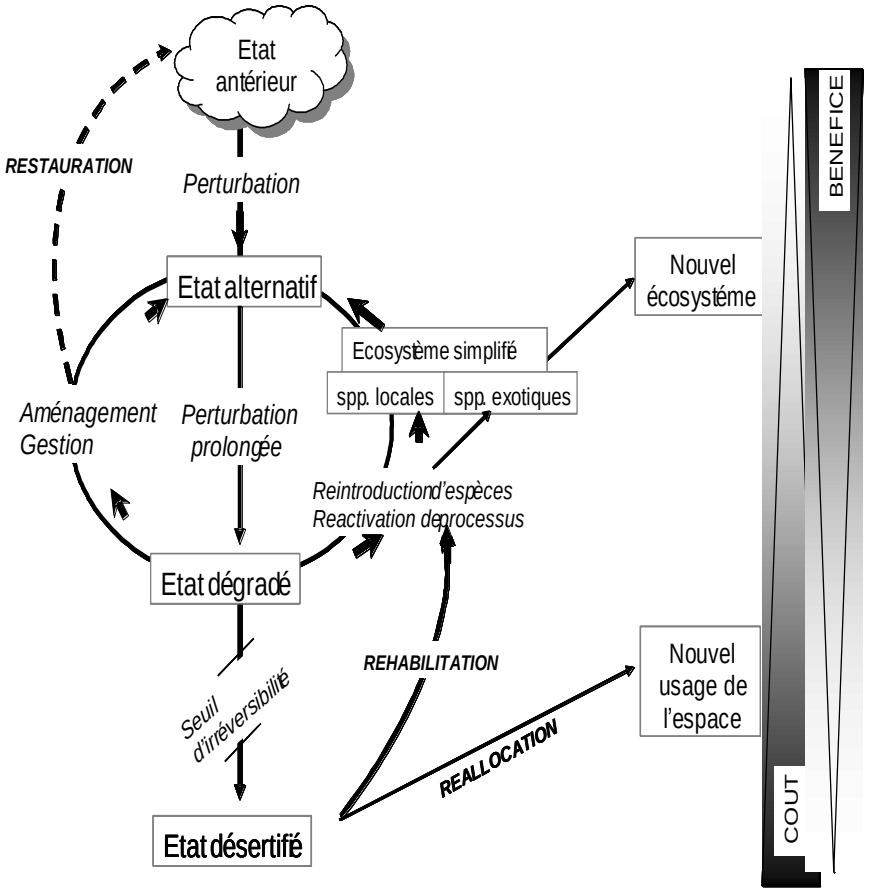


Fig. 3. Application du Modèle général de Aronson *et al.* 1993, modifié

2- Les outils

Les outils sont le plus souvent ceux que l'on connaît comme étant en usage en ingénierie écologique avec parmi d'autres :

- Le recours à l'association performante : Plante hôte-symbiote (rhizobium, mycorhize).

- Le rétablissement d'un écosystème simplifié présentant la structure et le fonctionnement de l'écosystème complexe qu'il est censé représenter: espèces clef de voûte, groupes fonctionnels végétaux et animaux, *etc*. Cette technique a été appliquée en Tunisie aride par semis d'espèces réputées clefs de voûte et que les essais de mise en germination avaient permis de considérer comme absentes du stock de graines viables du sol.

- La mise en œuvre des techniques éprouvées du génie écologique : travail du sol, remise en action du cycle hydrique, «nouvelle» foresterie.

3- Méthodologie de suivi

Effectuer des opérations de restauration n'est en soi pas une garantie de succès, aussi est-il impératif de disposer d'une méthode fiable et si possible rapide de suivi. Les éléments à engager doivent permettre à la fois d'évaluer le niveau de développement d'un écosystème mais également son niveau de détérioration éventuelle et, bien entendu, en cas de tentative de restauration le niveau de récupération atteint (voir le modèle de la fig. 2), afin de juger de la pertinence des moyens mobilisés.

La méthodologie de suivi fait donc partie intégrante de l'approche hiérarchisée, qui prend en compte les notions suivantes:

- les sites d'études écologiques à long terme,

- les transects
- les attributs vitaux (indicateurs) au niveau écosystème et au niveau paysage.

- Les sites d'études écologiques à long terme. Il peut se révéler fort utile, ou nécessaire, de disposer de sites expérimentaux permettant dans de nouveaux contextes ou biomes de tester la méthodologie de suivi que l'on souhaite mettre en œuvre.
- Les transects. L'approche hiérarchisée proposée accorde, ainsi que nous l'avons déjà exprimé, une grande attention au paysage. Cette prise en considération nous a amené à retenir de disposer sur des transects les sites d'évaluation et de mesures. L'étude de transects permet en effet de bien mettre en évidence des ruptures de connexités entre écosystèmes disposés sur une série de toposéquences par rapport aux situations les plus pertinentes d'un paysage

- Les indicateurs. L'évaluation de travaux de restauration peut-être grandement facilitée si l'on dispose d'une caractérisation, par le biais de paramètres pertinents (indicateurs, attributs vitaux), de l'état de développement dans lequel se trouve l'écosystème à restaurer et la cible (objectif, écosystème de référence ou espéré). Ces paramètres doivent présenter, si possible, plusieurs propriétés dont la pertinence, la fiabilité, la sensibilité, la simplicité et la capacité à permettre des généralisations. Ceux que nous évoquons sont relatifs à la composition taxonomique, mais aussi au fonctionnement et à la structure des écosystèmes ou aux services qu'ils rendent. Ils sont soit mesurés directement sur le terrain, soit issus de calculs effectués au laboratoire (indices, spectre, *etc*.) Nous donnons ci-après quelques exemples de ces indicateurs:

. Indicateurs vis à vis des écosystèmes (Attributs vitaux de l'écosystème)

Structure & composition

- Richesse spécifique
- Spectre de types biologiques

Fonctionnement

- Coefficient d'infiltration de la pluie
- Matière organique dans le sol
- Abondance de détritivores
- Infectivité de rhizobia / mycorrhizae

. Indicateurs vis à vis des paysages (Attributs vitaux du paysage)

- Nombre, proportions, dispositions et interactions des écosystèmes
- Vulnérabilité et fragilité
- Maladies, parasites, dépérissement

Il est de plus important, que certains indicateurs (richesse spécifique, coefficient de similitude floristique de Jaccard, *etc*.), relevés au niveau écosystème puissent aussi l'être au niveau paysage à défaut de quoi les changements d'échelles peuvent présenter des problèmes d'interprétation insurmontables.

Un cas concret

La mise en évidence de ruptures de connexité au niveau d'un paysage méditerranéen a été expérimentée au niveau d'une commune rurale de l'arrière pays de Montpellier (Le Floc'h *et al*. 1998 ; Aronson *et al*. 1998). Un grand nombre de sites (54) ont été décrits et leur évolution suivie le long de 10 toposéquences (transects) placées dans les situations majeures marquées par la pente, l'exposition, l'intensité des actions humaines, etc. Des résultats, exposés dans les travaux cités plus haut, nous extrayons la figure 4 relative aux variations du coefficient de similitude floristique de Jaccard de quatre stations sises le long de l'un des 10 transects choisis pour représenter ce paysage. Pour mémoire le coefficient de Jaccard (β) permet de calculer la proportion de taxons végétaux communs à deux stations, à deux paysages, etc. Une valeur élevée de ce coefficient atteste d'une grande ressemblance dans la composition floristique de

deux stations. S= nombre total de taxons présents, les trois chiffres qui suivent indiquent le pourcentage des ligneux, des herbacées pérennes et des annuelles dans cette flore.

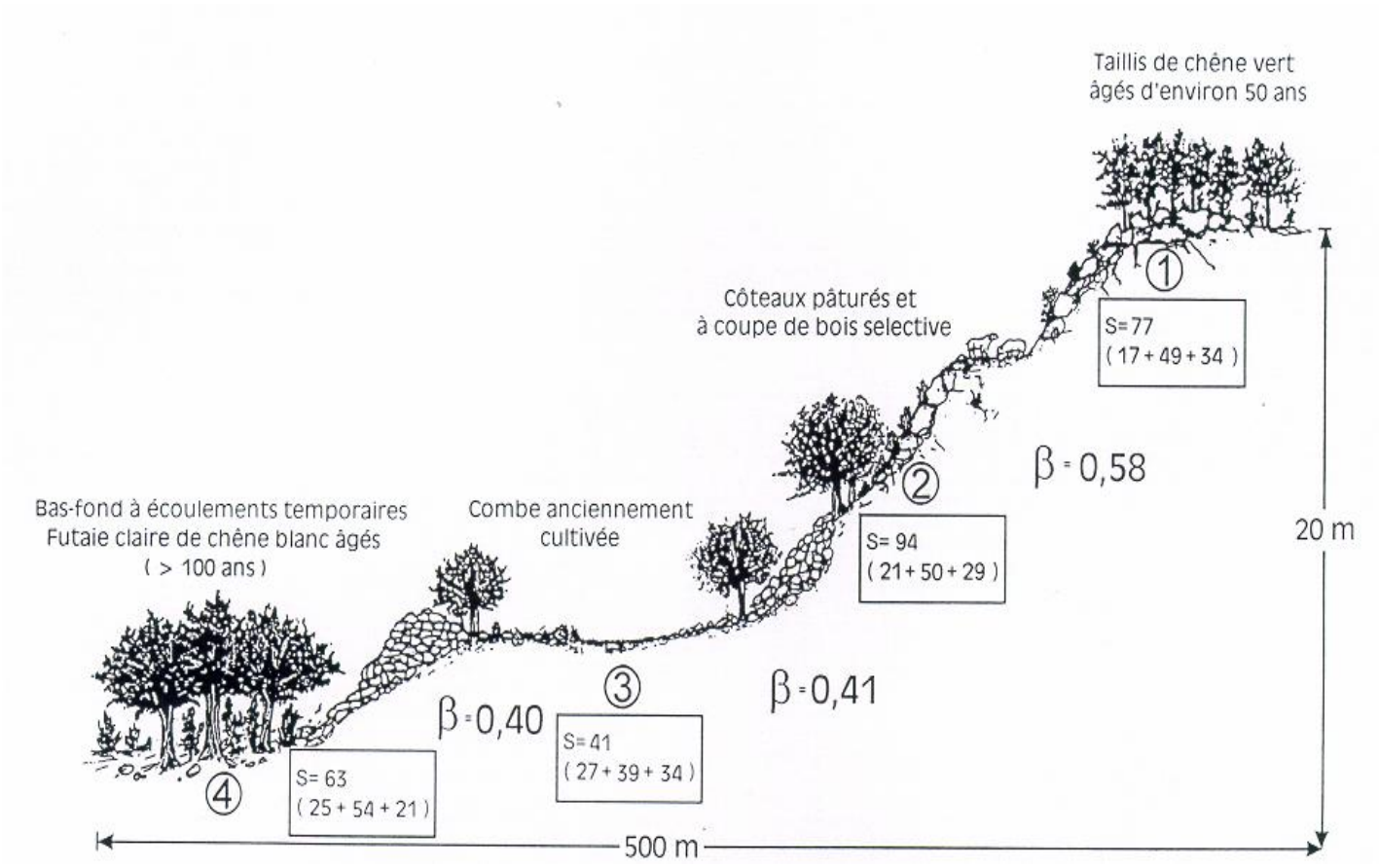


Fig. 4. Variations du coefficient de similitude floristique

Similitude floristique [(ß) = valeurs calculées selon le Coefficient de Jaccard]
le long d'un transect dans un paysage méditerranéen (Le Floc'h *et al*., 1998)

IV. Intégration, Education, Communication. *En guise de conclusion*

La restauration écologique constitue un vrai défi à relever pour notre temps. Modèles et analyses pluridimensionnels et multidisciplinaires peuvent être mobilisés dans cet objectif. L'une des difficultés réside de fait dans la planification des opérations puisque, ainsi que cela a été exposé il importe de combiner ou même d'intégrer à la fois les nécessités de Conservation, Aménagement, Gestion & Restauration active.

Le respect de la Nature, de ses contraintes et limites, est aussi une affaire d'éducation. Notre monde est un monde fini, limité où l'exploitation des ressources longtemps anarchique doit être raisonnée désormais afin que soit freinée leur destruction ou leur altération irréversible. L'ignorance des utilisateurs des ressources et des espaces doit être combattue. La communication devient impérative.

La Capital Nature et les autres formes de capital sont complémentaires mais non substituables en définitive et il apparaît de plus en plus fréquemment que le facteur limitant d'un développement est en réalité le capital nature. Ainsi par exemple la pêche est limitée par le volume des populations de poissons, et non par le nombre ou technicité des bateaux!! Bien entendu la logique économique dicte d'investir dans le facteur limitant.

BIBLIOGRAPHIE

Aronson J., C. Floret, E. Le Floc'h, C. Ovalle & R. Pontanier 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. I. A view from the South. *Restoration Ecology* 1: 8-17.

Aronson J, C. Floret, E. Le Floc'h, C. Ovalle & R. Pontanier R. 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems. II. Case studies in Chile, Tunisia and Cameroon. *Restoration Ecology* 1: 168-187.

Aronson J., C. Floret, E. Le Floc'h, C. Ovalle & R. Pontanier 1995. Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides. Le vocabulaire et les concepts. In : *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait* ? Pontanier, M'Hiri, Akrimi, Aronson & Le Floc'h (édits.) John Libbey Eurotext, Paris: 11-29.

Aronson J. & E. Le Floc'h 1996a. Que faire de tant de notions du paysage? *Natures, Sciences, Sociétés* 4: 264-266.

Aronson J. & E. Le Floc'h 1996 b. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. *Restoration Ecology* 4: 377-387.

Aronson J. & E. Le Floc'h 1996c. Hierarchies and landscape history: dialoguing with Hobbs and Norton. *Restoration Ecology* 4: 327-333.

Aronson, J., E. Le Floc'h, & C. Ovalle 2002. Semi-arid woodlands and desert fringes. In: *Handbook of Ecological Restoration*. Vol. 2. M. Perrow and A. Davy (eds.), Cambridge University Press: 466-485.

Chassany J.P. 1999. Economic and Social Appraisal of the Feasibility of Land Restoration, Rehabilitation, and Reallocation in Arid and Semiarid Zones: A Holistic Approach. *Arid Soils Research and Rehabilitation*, 13: 383-395.

Egan, D., and E.A. Howell, (edits.) 2001. *The Historical Ecology Handbook: a Restorationist's Guide to Reference Ecosystems*. Island Press, Washington. D. C., USA

Gondard, H., F. Romane, M. Grandjanny, J. Li & J. Aronson 2001. Plant species diversity changes in abandoned chestnut (*Castanea sativa* Miller) groves in southern France. *Biodiversity and Conservation* 10: 189-207.

Gondard, H., F. Romane, J. Aronson & Z. Shater 2003. Impact of soil surface disturbances on functional group diversity after clear-cutting in Aleppo pine (*Pinus_halepensis*) forests in southern France. *Forest Ecology & Management* 180: 165-174.

Hobbs R.J. & Norton D.A. 1996. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology* 4: 93-110.

Le Floc'h E. & Aronson J. 1995. Ecologie de la restauration, définition de quelques concepts de base. *Natures-Sciences-Sociétés*, hors série: 29-25.

Le Floc'h E., Aronson J., Dhillion S., Guillerm J.L., Grossman A. & Cunge E., 1998. Biodiversity and ecosystems trajectories: first results from a new LTER in southern France. *Acta Oecol*. 19: 283-293.

Vallauri D., J. Aronson & M. Barbéro 2002. An analysis of forest restoration 120 years after reforestation on badlands in the southwestern Alps. *Restoration Ecology* 10: 16-26.

White, P. S., and J. L. Walker 1997. Approximating nature s variation: selecting and using reference sites and reference information in restoration ecology. *Restoration Ecology* 5:338-249.

Diversité biologique et dynamique de la steppe à *Rhanterium suaveolens*, sous diverses conditions climatiques et niveaux de pression de pâturage, en Tunisie méridionale

Tarhouni Mohamed*, Ouled Belgacem Azaiez[*] et Neffati Mohamed[*]

[*] Laboratoire d'écologie pastorale. Institut des Régions Arides, 4119 Médenine – Tunisie

RESUME

Les formations steppiques dominent la végétation naturelle en Tunisie méridionale. Il s'agit schématiquement de formations graminéennes sur les hautes plaines méridionales et de formations chaméphytiques dans les basses plaines méridionales et la Jeffara. Depuis plusieurs décennies l'on assiste à la dégradation continue, sous l'effet de diverses activités anthropozoïques, du couvert végétal. Occupant une grande aire en Tunisie méridionale la steppe à *Rhanterium suaveolens*, qui constitue un pâturage très apprécié occupe en outre des milieux édaphiques très attractifs pour la pratique de l'agriculture. Ces faits sont à l'origine de la forte anthropisation de cette steppe qui a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques relatifs à sa dynamique, sa composition floristique, ses potentialités productives, etc.

Le présent travail a pour objectif de faire le point sur la dynamique de cette steppe sous différentes conditions édaphoclimatiques et différents modes d'exploitation. Pour ce faire, des suivis, par la méthode des points quadrats, de l'état du milieu et de la végétation ont été menés le long de plusieurs transects localisés à l'intérieur et à l'extérieur de trois sites le long d'un gradient d'aridité en Tunisie méridionale. Ces sites diffèrent en outre par la durée de leur protection. Il s'agit : i) du parc national de Bou Hedma (localisé au nord de la région et protégé depuis 25 ans), ii) du parc de Sidi Toui (situé au sud et créé en 1990) et iii) de la zone de Menzel Habib. Pour chaque situation, divers attributs vitaux de l'écosystème (Aronson et *al*., 1993) ont servi de base à l'évaluation, par des mesures de terrain: du recouvrement global de la végétation et des divers états de surface du sol, et par des calculs de la diversité floristique, la densité des espèces ainsi que la contribution des principales familles botaniques au recouvrement.

Les principaux résultats obtenus montrent que les caractéristiques édaphoclimatiques ont des incidences majeures sur le cortège floristique. Par ailleurs une longue durée de protection semble ralentir la dynamique de la steppe à *Rhanterium suaveolens*. Au parc national de Bou Hedma, ayant bénéficié d'une longue protection l'état de la végétation est considéré comme meilleur à l'extérieur (non protégé) qu'a l'intérieur. Par contre au niveau du parc de Sidi Toui l'extérieur du parc, soumis au pâturage, est en plus mauvais état qu'à l'intérieur (protection relativement récente).

Mots clés : Steppe à *Rhanterium suaveolens*, dégradation, restauration, attributs vitaux, Tunisie méridionale.

INTRODUCTION

Il est considéré que la région méditerranéenne, soumise à une sécheresse climatique et édaphique prononcée, ne renferme plus d'écosystèmes terrestres inaltérés par l'homme (Aronson et *al*., 1993; Ramade, 1997). En Tunisie présaharienne les conséquences de la désertification sont progressivement devenues, au cours des dernières décennies, un problème environnemental majeur (Ouled Belgacem & Neffati, 1996). Dans ces zones, la végétation naturelle, constituée essentiellement de formations steppiques très clairsemées (Floret et *al*., 1983), est plus ou moins fortement marquée par l'emprise d'activités humaines diverses (Le Floc'h, 1995). Ces activités mènent souvent au surpâturage, du fait de la régression de la superficie des pâturages (suite à la mise en culture) et de l'augmentation de la pression pastorale, manifestée d'abord par la dégradation de la couverture végétale (Floret & Pontanier, 1982). Ceci conduit à la disparition progressive des steppes au profit des jachères céréalières soumises à une érosion intense et une dénudation progressive de toutes les terres non labourables (Le Houérou, 1984 ; 1995). Une telle dégradation quantitative et/ou qualitative s'accompagne de changements irréversibles de la flore et, en conséquence, des physionomies végétales marquées par la dominance des espèces délaissées par les animaux (Ayyad & El-Kadi, 1982; Akrimi & Neffati, 1993; Le Floc'h, 1995).

En Tunisie, la steppe à *Rhanterium suaveolens*, la plus répandue est également la plus menacée de dégradation, car elle constitue parmi les meilleurs pâturages de la région et occupe des milieux sableux très attractifs pour l'agriculture (Floret & Pontanier, 1982). La régression du couvert végétal mène à la désorganisation des états physiques du sol, à la réduction de sa fertilité et à la disparition du voile éolien autant d'attributs qui assuraient la limitation des phénomènes de ruissellement en cas des pluies torrentielles (Le Houérou, 1969). La vitesse de dégradation de ce type de steppe laisse craindre sa régression et même sa disparition rapide ; il s'avère donc urgent d'en évaluer les capacités dynamiques.

La prise en compte des phénomènes de dégradation du couvert végétal, devrait rendre nécessaire la prise de mesures visant à la fois à alléger la pression anthropozoïque et à favoriser la régénération autogénique du milieu naturel. En effet en deçà d'un certain niveau de dégradation (notion de seuil d'irréversibilité) la reconstitution du couvert végétal naturel peut, le plus souvent, être assurée par la seule mise en défens temporaire, ou l'allégement de la pression pastorale, (régénération autogénique) ou par l'amélioration des conditions de fertilité du sol (Martiniello et *al*., 1995).

Il a été démontré que, pour ce type de steppe à *Rhanterium suaveolens*, le stade d'équilibre écologique est marqué par une certaine abondance des graminées pérennes et autres espèces très appétées qui sont vite raréfiées sous l'effet des différentes contraintes et perturbation (Floret & Pontanier, 1982). De son côté, Chaieb (1989) a constaté que l'extrême dégradation de cette steppe, par surpâturage, se caractérisait aussi par la raréfaction généralisée du couvert végétal et donc des chaméphytes. Considéré l'importance du cortège floristique naturel dans le maintien de l'équilibre écologique, la protection de ce patrimoine paraît d'une importance particulière. En effet la sauvegarde d'un certain niveau de dynamique positive naturelle (retour plus ou moins réalisable vers l'écosystème initial, pour des écosystèmes ayant conservé un certain niveau de résilience) est une donnée majeure de la gestion (minimisation de l'effet de la dégradation et maintien de la capacité de régénération naturelle). La conservation *in situ* des ressources phytogénétiques a été largement appliquée à travers le monde et principalement dans les pays européens (Ramade, 1997), dans les zones arides de l'Australie et des Etats-Unis (Unesco, 1990) et en Afrique tropicale sèche (Grouzis, 1988). En Tunisie, plusieurs mises en défens ont été réalisées à diverses fins et ont aboutit à des résultats plus ou moins encourageants en fonction des conditions de leur mise en application (Le Houérou, 1977; Floret, 1981; Telahigue, 1981; Telahigue et *al*., 1987).

C'est dans ce contexte que ce travail qui vise d'étudier la dynamique de la steppe à *Rhanterium* en Tunisie présaharienne sous différents modes de gestion est mené.

Matériel et Méthodes

1. Les sites d'étude : contexte géographique et climatique

Trois sites de la Tunisie méridionale, sur un gradient d'aridité climatique ont été retenus : i) le parc national de Bou Hedma, ii) la région de Menzel Habib et iii) le parc national de Sidi Toui (Figure 1). Ces sites diffèrent par plusieurs critères édaphoclimatiques ainsi que par la durée de leur protection.

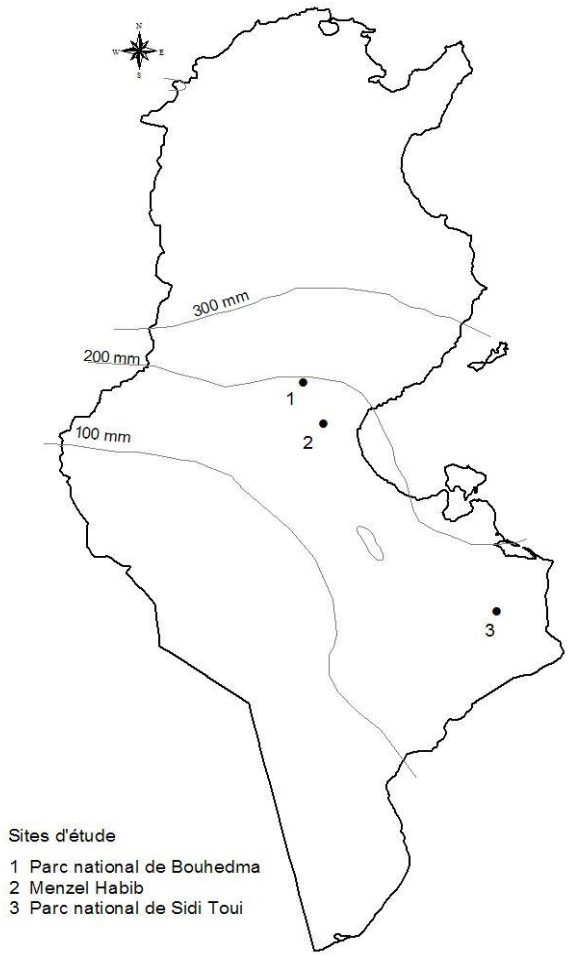


Figure 1. Localisation géographique des sites d'étude sur la carte de la Tunisie

Créé en 1980 (25 ans de protection), le parc de Bou Hedma est situé dans l'étage bioclimatique aride à la limite entre les sous étages supérieur à hiver tempéré et inférieur à hiver frais (Le Houérou, 1959, 1995, 2001). Comme les autres situations évoquées ici celle ci est caractérisée par une irrégularité spatio-temporelle des pluies dont la moyenne annuelle (P) est comprise entre 100 et 200 mm (Floret & Pontanier, 1982). La température moyenne annuelle (Tmoy.) enregistrée à Bou Hedma est d'environ 17.2°C avec une moyenne des maxima du mois le plus chaud (juillet, août) (M) de l'ordre de 36.2°C et une moyenne des minima du mois le plus froid (décembre, janvier) (m) de 3.8°C (Floret & Pontanier, 1982). La flore du ce parc englobe la dernière steppe arborée à *Acacia tortilis* susbsp. *raddiana* en Tunisie et se caractérise par une productivité biologique

importante et une richesse remarquable en espèces végétales (Abdallah, 1996 ; Zaafouri et *al.*, 1996).

La région de Menzel Habib se situe dans une région naturelle dite les 'Basses plaines méridionales orientales' (Le Houérou, 1959). Elle se compose d'un ensemble de glacis, plateaux, et dépressions fermées. De point de vue climat, cette zone est située dans l'étage bioclimatique aride inférieur à variante fraîche et se caractérise par une pluviométrie annuelle de l'ordre de 175 mm (Floret et *al.*, 1978). La végétation naturelle y est essentiellement steppique et caractérisée par une emprise forte des activités humaines.

Situé à proximité de la frontière tuniso-libyenne à 50 km au sud de la ville de Ben Guerdane, le parc de Sidi Toui, a été créé en 1990 (15 ans de protection) et couvre près de 6000 ha. Il est localisé à la limite entre les sous étages bioclimatiques méditerranéens saharien supérieur à variante tempérée et aride inférieur à variante fraîche (Le Houérou, 1959). La pluviométrie annuelle est très irrégulière fluctuant autour d'une moyenne annuelle de 100 mm. La Tmoy est de 19.4 °C, m (janvier) = 4,2 °C et M (août) = 55 °C. Le couvert végétal est dominé par le groupement à *Rhanterium suaveolens* sur les plaines, les associations à *Anthyllis sericea* et à *Stipagrostis plumosa* sur le piedmont. Les encroûtements calcaro-gypseux portent des formations à *Helianthemum kahiricum* et *Gymnocarpos decander* (Ould Sidi Mohamed, 2003).

La pluviométrie enregistrée au niveau de ces différents sites au cours de l'année biologique 2003 – 2004, qui correspond à l'année d'étude, est reportée dans le tableau 1.

Tableau 1. Pluviométrie (en mm) enregistrée pour les sites d'études au cours de l'année biologique 2003 – 2004.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Parc de Bou Hedma	63.5	22.5	20.5	57.8	0.3	36.5	7	6.7	1	0	0	0	215.8
Menzel Habib	51	14	21	44	4	0	16	0	0	0	0	0	150
Parc de Sidi Toui	13	0	4	88	54	52	37.5	0	0	0	0	0	248.5

Les pluies qui ont été précoces dans les trois sites ont assez bien été bien réparties dans le temps ce qui constitue donc, pour les trois sites, une année inégalement favorable permettant cependant un bon déroulement du cycle biologique des espèces végétales. Le parc de Sidi Toui a été caractérisé d'une part par un automne assez sec et un hiver pluvieux par comparaison aux deux autres sites. La quantité totale de pluie survenue au cours de cette année dépasse, de loin, les moyennes annuelles du parc de Bou Hedma (-) et de Sidi Toui (-) alors qu'à Menzel Habib cette quantité est proche de la moyenne (-). Le tableau 1 montre également que la quantité de pluie enregistrée au niveau du parc de Sidi Toui, le site le plus méridional, a été plus importante que celle enregistrée à Menzel Habib, site plus septentrional.

2. Méthodologie

La méthode d'étude adoptée, pour la caractérisation du couvert végétal et des états de surface du sol, est celle dite des 'points quadrats' telle que décrite par Daget et Poissonnet (1971) et Floret (1988). Des lignes permanentes de mesure ont été mises en place à l'intérieur et à l'extérieur de deux parcs étudiés. Dans la région de Menzel Habib, on s'est intéressé à l'étude de deux faciès de dégradation de la steppe à *Rhanterium* à savoir RK1 (steppe en mauvais état) et RK3 (steppe en bon état et protégée durant 16 ans) tels que définis par Floret et *al.* (1977). Les principaux attributs vitaux retenus pour la caractérisation des différents écosystèmes sont le recouvrement global de la

végétation, la diversité floristique, la contribution des familles botaniques au recouvrement de la végétation et l'état de la surface du sol.

La diversité intra relevés (*Alpha*), évaluée par les indices de diversité biologique (H') et l'équitabilité (régularité) de Shannon & Weaver (1949) et décrite par Frontier et Pichod-Vale (1991), est déterminée à partir des fréquences spécifiques de présence des espèces végétales au sein des sites d'étude. L'indice de diversité H' est défini par la formule suivante :

$\mathbf{H' = -\Sigma f_i \log_2 f_i}$ avec f_i : fréquence centésimale des espèces végétales.

L'équitabilité est définie par : $\mathbf{E = H'/H_{max}}$ avec $H_{max} = \log_2 S$ (S est le nombre d'espèces sur la ligne de lecture).

La similarité floristique entre les différents sites est, cependant, évaluée par l'indice de similarité de Jaccard (Roux & Roux, 1967) selon la formule suivante :

Pj (relevés x et y) = c/(a + b - c)

Avec: Pj = Indice de similarité.

a = nombre d'espèces rencontrées dans le relevé x,

b = nombre d'espèces rencontrées dans le relevé y,

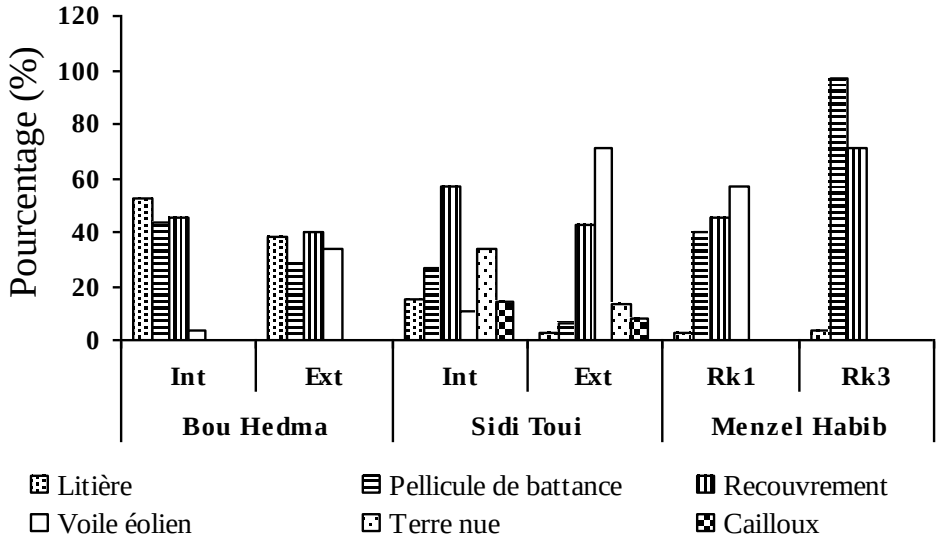
c = nombre d'espèces communes aux relevés x et y.

Résultats

Les résultats relatifs au recouvrement global de la végétation et aux états de la surface du sol, enregistrés au cours du printemps 2004 au niveau de la steppe à *Rhanterium suaveolens* aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des deux parcs (Bou Hedma et Sidi Toui) et dans les faciès de dégradation de cette steppe à Menzel Habib, sont présentés à la figure 2.

Le recouvrement global de la végétation varie de 40 à 45 % respectivement à l'extérieur et à l'intérieur du parc national de Bou Hedma. La contribution des espèces annuelles à ce recouvrement dépasse les 72 % à l'extérieur du parc ce qui montre la régression des pérennes au profit des plantes annuelles qui ont tendance à coloniser les milieux perturbés (Floret & Pontanier, 1982). Dans le parc national de Sidi Toui le taux de recouvrement de la végétation atteint 57 % dans la zone protégée et il n'est que de 43 % dans la zone pâturée (extérieur du parc). Ici encore la végétation est marquée par une abondance des annuelles et une moindre proportion des pérennes. La même observation peut être faite pour le faciès RK1 de Menzel Habib où les annuelles contribuent pour 82 % au couvert végétal qui atteint 45 % à cause de l'importance des pluies. Cependant au niveau de RK3 se caractérisant par une couverture globale de 71 %, les espèces pérennes dominent et contribuent avec 70 % à ce couvert.

Concernant l'état de la surface du sol, les résultats de la figure 2 montrent que l'intérieur du parc de Bou Hedma est dominé, d'une part, par la litière (53 %) qui ne couvre que 38 % en dehors du parc et, d'autre part, la pellicule de battance dont le recouvrement atteint, respectivement, les 43 et 28 % à l'intérieur et à l'extérieur. L'extérieur du parc est en outre



Int = Intérieur (protection) ; Ext = Extérieur (non protégé)

Figure 2. Recouvrement global de la végétation et état de la surface du sol, au cours du printemps 2004, dans la steppe à *Rhanterium suaveolens* à l'intérieur et à l'extérieur des parcs de Bou Hedma et de Sidi Toui et dans les deux faciès de cette steppe à Menzel Habib

caractérisé par la dominance du voile éolien (33 % des états de surface) qui ne représente que 3 % à l'intérieur. A Sidi Toui, l'état de la surface du sol à l'intérieur diffère considérablement de celui de l'extérieur. En effet, le voile éolien qui domine (71 %) à l'extérieur du parc ne représente que 10 % à l'intérieur. L'intérieur du parc est caractérisé par l'extension de la terre nue, de la litière et de la pellicule de battance dont les recouvrements atteignent respectivement de 33.6, 15 et 27 % alors qu'à l'extérieur les valeurs respectives de ces trois descripteurs sont de 13.4, 2.3 et 6 %. Dans les faciès de dégradation de la steppe à *Rhanterium* de Menzel Habib, on remarque une extension de la pellicule de battance au niveau du RK3 (steppe en bon état), tandis qu'au niveau de la RK1 (steppe en mauvais état) la surface du sol est essentiellement dominée par le voile éolien.

L'interprétation de ces résultats permet d'attester que la mise en défens affecte les attributs fonctionnels de l'écosystème. La protection, entraîne l'extension de la litière qui permet de stabiliser le voile éolien et, par voie de conséquence, de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette action accélère la remontée biologique qui se traduit, entre autre, par une augmentation du couvert végétal au sein de la zone protégée par rapport à celle soumise aux perturbations anthropozoïques (extérieurs des parcs et steppe RK1).

Les résultats relatifs à l'étude de la diversité floristique de ces écosystèmes, déterminée par le calcul de l'indice de Shannon & Weaver et de l'équitabilité, sont rapportés au tableau 2. Rappelons que la diversité spécifique ou la diversité *Alpha* (α) est définie, selon Whittaker (1972), comme étant la diversité des espèces dans des sites d'un même type de communauté végétale (diversité intra relevés). Cette diversité a été évaluée en utilisant des indices basés sur des paramètres relatifs (fréquence spécifique, abondance relative). L'abondance relative des espèces permet de déterminer l'équitabilité, composante de dominance de la diversité spécifique qui permet, par exemple, de détecter les changements d'origine anthropique dans la composition floristique (Jauffret, 2001). L'équitabilité tend vers zéro (0) quand la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur une espèce et elle est de l'ordre de un (1) lorsque toutes les espèces ont la même abondance (Daget, 1976 ; Magurran, 1988 ; Barbault, 1995).

Tableau 2. Valeurs des indices de diversité floristique et d'équitabilité de la steppe à *Rhanterium suaveolens* à l'intérieur et à l'extérieur des parcs de Bou Hedma et Sidi Toui et à Menzel Habib au cours du printemps 2004.

	Bou Hedma		**Sidi Toui**		**Menzel Habib**	
	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	RK3	RK1
Indice de Shannon & Weaver (H')	3,31	3,69	3,15	2,13	3.98	1,97
Equitabilité (E)	0,85	0,85	0,81	0,58	0,84	0,49

Les données de ce tableau illustrent le fait que la valeur de l'indice de la diversité floristique (H') et donc la richesse spécifique, est plus élevée à l'extérieur, qu'à l'intérieur, du parc national de Bou Hedma. Cette différence peut être imputable à l'abondance et la diversité des espèces annuelles à l'extérieur du parc régulièrement soumis au pâturage. Signalons toutefois que cet indice ne reflète pas la richesse spécifique totale puisqu'il est déterminé à partir de la fréquence spécifique de présence des seules espèces rencontrées, à une date précise. Le choix de l'emplacement de la ligne de lecture mais aussi de la date du relevé peuvent, en effet, influencer profondément les valeurs de cet indice. Cependant l'équitabilité, qui renseigne sur l'équi-répartition des effectifs entre les différentes espèces, mesurée à l'intérieur et à l'extérieur du parc ne montre pas une variation significative. Ce constat peut être dû au fait que le degré d'abondance (et non le type) des espèces présentes à l'intérieur et à l'extérieur de la zone protégée est équivalent.

Pour le parc national de Sidi Toui, les valeurs de H' varient de 3.15 à 2.13 respectivement à l'intérieur et à l'extérieur du parc alors que celles relatives à l'équitabilité varient de 0.81 à 0.58. Ces différences sont dues, d'une part, à une diversité floristique plus importante à l'intérieur (H' élevé) qu'à l'extérieur et d'autre part au fait qu'à l'intérieur du parc les espèces ont une abondance relative presque équivalente (équitabilité proche de 1). Inversement, à l'extérieur du parc, le couvert végétal est dominé par un nombre limité d'espèces diversement abondantes (équitabilité proche de zéro).

Concernant la région de Menzel Habib, la steppe en bon état (RK3) présente une valeur importante de H' (3.98) et une équitabilité élevée (0.84), la majorité des espèces végétales ayant une abondance relative comparable. Au niveau de la steppe RK1, la diversité floristique et l'équitabilité sont relativement plus faibles (H'= 1.97 et E = 0.49) ; dans cette situation les espèces de bonne valeur pastorale ont régressé, sous l'effet du surpâturage, et ont été remplacées par des espèces pérennes inappétées et des annuelles indicatrices de dégradation. Dans cette steppe RK1 le cortège floristique est composé d'un nombre réduit d'espèces pérennes compétitives (faible équitabilité) empêchant le développement des autres plantes et réduisant ainsi la diversité floristique (H' faible).

Les résultats obtenus dans les sites Menzel Habib et Sidi Toui montrent que la restauration favorise les espèces pérennes dites 'clés de voûte' au sens d'Odum (1969) (exemple : *Rhanterium suaveolens*) qui trouvent les conditions requises pour leur développement ce qui fait augmenter leur contribution au couvert végétal. L'installation de ces espèces favorise celle d'autres espèces plus sensibles aux perturbations anthropozoïques tout conformément à la théorie de la succession (Jauffret, 2001). De ce fait la diversité des espèces augmente (H' élevé) et leurs abondances deviennent semblables (équitabilité proche de 1). Ce résultat n'a pu être vérifié que dans le cas de la zone protégée de Sidi Toui et du faciès RK3 de Menzel Habib. Par contre, à Bou Hedma, il semble qu'une protection de relativement longue durée (25 ans) de la steppe à *Rhanterium suaveolens* pourrait induire des effets aussi néfastes (mais de nature différente) que ceux engendrés par une perturbation.

Au niveau des 3 milieux pâturés (extérieur des deux parcs et steppe RK1), les espèces hautement palatables régressent cédant leur place d'une part aux espèces les moins recherchées par les animaux qui deviennent dominantes et, d'autre part, aux annuelles qui envahissent le milieu

(dynamique régressive). De ce fait la diversité floristique (H') et l'équitabilité (E) diminuent et par voie de conséquence la dégradation du milieu se poursuit.

Afin de comparer ces résultats, nous avons eu recours au calcul de l'indice de similitude floristique entre ces différents écosystèmes (tableau 3). Ces résultats montrent que les indices de similarité entre l'intérieur et l'extérieur des deux parcs sont inférieurs à ceux enregistrés entre les deux faciès RK3 et RK1.

Tableau 3. Les indices de similarité floristique (indice de Jaccard) de la steppe à *Rhanterium suaveolens* à l'intérieur et à l'extérieur des parcs de Bou Hedma et Sidi Toui et à Menzel Habib au cours du printemps 2004.

		Bou Hedma		Sidi Toui		Menzel Habib	
		intérieur	extérieur	intérieur	extérieur	RK1	RK3
Bou Hedma	intérieur	-					
	extérieur	0,26	-				
Sidi Toui	intérieur	0,18	0,38	-			
	extérieur	0,10	0,23	0,47	-		
Menzel Habib	RK1	0,14	0,26	0,28	0,29	-	
	RK3	0,11	0,21	0,35	0,26	0,56	-

Les résultats du tableau 3 illustrent le fait que la durée de protection peut influencer la diversité inter–sites puisque le degré de similitude entre l'intérieur et l'extérieur du parc de Bou Hedma (0.26) est inférieur à ceux enregistrés à Menzel Habib (0.56) et à Sidi Toui (0.47). De plus, les conditions bioclimatiques peuvent également affecter l'évolution des écosystèmes puisque le degré de similitude entre RK1 et RK3 est plus important que celui enregistré à Sidi Toui (15 ans de protection) bien qu'elles aient les mêmes durées de protection (16 ans de protection à Menzel Habib). D'ailleurs, la classification de ces zones sur la base de leur degré de ressemblance (figure 3), permet de mettre en évidence la présence de trois différents groupes: i) le premier groupe est formé uniquement de l'intérieur du parc de Bou Hedma,

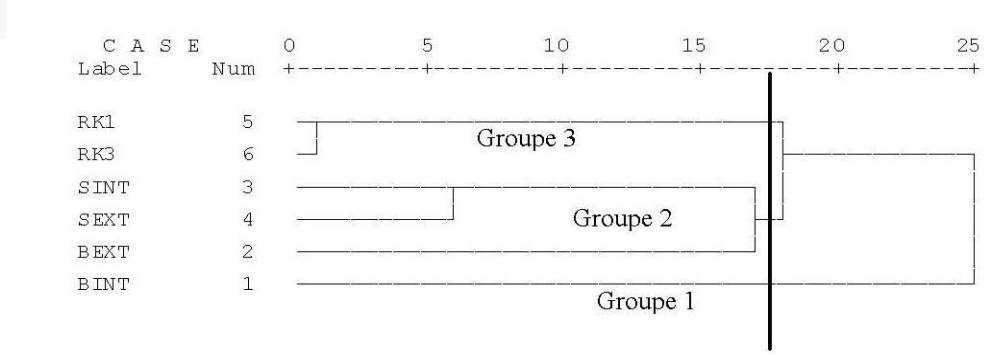


Figure 3. Classification hiérarchique de plusieurs faciès de la steppe à *Rhanterium suaveolens* en Tunisie méridionale en fonction de leurs richesses floristiques (RK3 et RK1 = sites à Menzel Habib ; SINT et SEXT = sites à l'intérieur et à l'extérieur du parc de Sidi Toui ; BINT et BEXT = sites à l'intérieur et à l'extérieur du parc de Bou Hedma).

ii) le second groupe rassemble l'extérieur de Bou Hedma, l'intérieur et l'extérieur de Sidi Toui et iii) un dernier groupe comprenant les deux sites (RK1 et RK3) de Menzel Habib.

Ces résultats montrent que l'effet, sur la dynamique du couvert végétal, de la durée de protection peut masquer voire avoir un poids plus important que celui du gradient d'aridité (Ouled Belgacem & Neffati, 1996).

La densité totale des espèces végétales déterminée dans les sites étudiés (figure 4) montre une extrême variabilité de ce descripteur entre 65 et 209 pieds/m² respectivement à l'intérieur et à l'extérieur du parc de Bou Hedma.

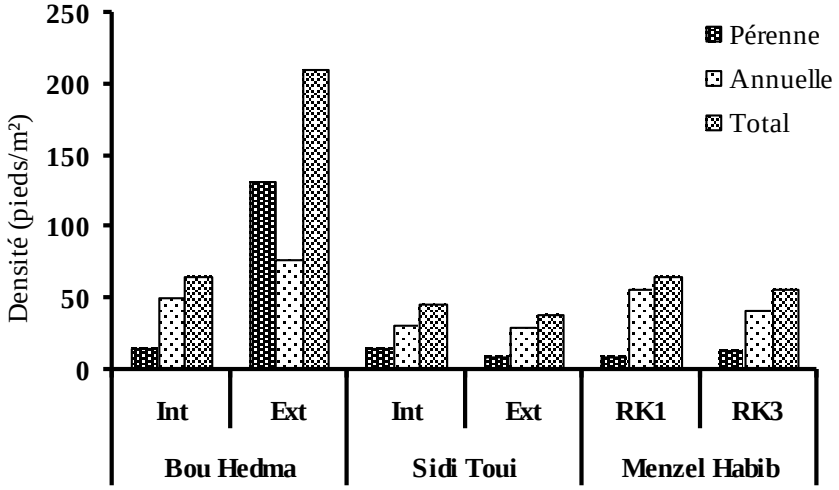


Figure 4. Densité des espèces végétales (pérennes et annuelles) au niveau d'une steppe à *Rhanterium suaveolens* à l'intérieur et à l'extérieur des parcs de Bou Hedma et de Sidi Toui et à Menzel Habib au cours du printemps 2004.

La densité végétale la plus élevée a été enregistrée à l'extérieur du parc de Bou Hedma et elle est due à l'abondance de l'*Argyrolobium uniflorum* (6.5 pieds/m²), de *Plantago albicans* (30.3 pieds/m²) et de certaines espèces annuelles comme *Diplotaxis* ssp. (2.5 pieds/m²). La densité élevée d'*Argyrolobium uniflorum* à l'extérieur de la zone protégée corrobore les résultats obtenus par Chaieb (1989) et Ould Sidi Mohamed et *al.* (2002) qui ont montré que cette espèce ne supporte que mal une mise en défens prolongée. L'extérieur du parc de Bou Hedma est aussi caractérisé par une densité élevée des annuelles et des pérennes. Ces dernières sont essentiellement des espèces liées à la dégradation ou bien celles qui se caractérisent par un cycle biologique nécessitant un transit des graines à travers le tube digestif des ruminants (pour lever la dormance des semences) comme c'est le cas de l'*Argyrolobium*.

Pour le parc de Sidi Toui, la densité totale des plantes est toujours plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur de la zone protégée. En effet l'intérieur du parc est marqué par la dominance des pérennes et une densité des annuelles comparable à celle de l'extérieur. Cette différence peut être attribuée au pâturage sélectif et à la forte densité de certaines graminées annuelles et pérennes et des herbacées pérennes à l'intérieur du parc telles que *Cutandia dichotoma, Bromus madritensis, Stipagrostis plumosa* et *Stipa parviflora* (Ould Sidi Mohamed, 2003). Par contre, à l'extérieur, la végétation, caractérisée par la dominance d'espèces annuelles et quelques pérennes affaiblies par le pâturage, est en voie de dégradation avec la modification de la physionomie de la végétation. De tels phénomènes ont des répercutions sur la biodiversité ainsi que sur les processus fonctionnels des phytocénoses et donc sur la résilience des systèmes écologiques (Jauffret, 2001 ; Visser, 2001). Au niveau de la région de Menzel Habib, la majeure partie du couvert végétal est dominée par *Stipa lagascae* et *Rhanterium suaveolens* dont les valeurs respectives passent de 0.4 à 1.1 pieds/m² et de 0.7 à 1.1 pieds/m² et ce respectivement au niveau de RK1 et RK3. La forte densité des annuelles au niveau de RK1 induit une densité totale plus élevée dans cette steppe par comparaison à celle de bon état (RK3) où les pérennes dominent et les annuelles raréfiées.

L'étude de la contribution de différentes familles botaniques au recouvrement de la végétation à l'extérieur et à l'intérieur des deux parcs et dans la région de Menzel Habib (figure 5) montre que dans les zones protégées (intérieur) des deux parcs les contributions des familles botaniques autres que les Asteraceae, Poaceae et Fabaceae sont par comparaison plus élevées que dans les zones non protégées (extérieur) à l'extérieur et aux faciès RK1 et RK3.

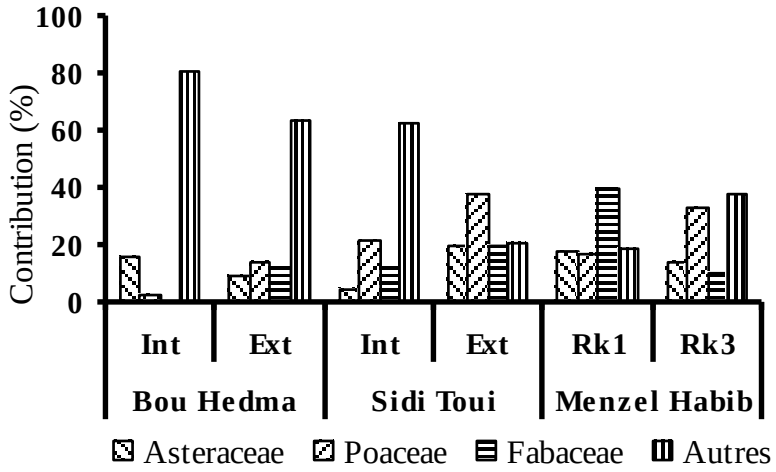


Figure 5. Contribution de différentes familles botaniques au recouvrement global de la végétation au niveau d'une steppe à *Rhanterium suaveolens* à l'intérieur et à l'extérieur des parcs de Bou Hedma et de Sidi Toui et à Menzel Habib au cours du printemps 2004.

La dominance des légumineuses (Fabaceae) dans les zones pâturées (cas de RK1) est due à l'abondance de certaines espèces qui s'opposent ou tolèrent le pâturage telle que *Astragalus armatus* ou dont la germination des graines est favorisée (Jauffret, 2001) par le transit à travers le tube digestif des animaux (cas d'*Argyrolobium*). A l'extérieur des deux parcs, les graminées annuelles sont dominantes alors qu'à l'intérieur ce sont plutôt les graminées pérennes qui dominent (surtout *Stipa lagascae*). Les composées (Asteraceae) sont à leur tour plus abondantes à l'intérieur du parc de Bou Hedma et à l'extérieur du parc de Sidi Toui avec une équi-répartition dans la région de Menzel Habib.

Discussion

L'effet bénéfique de la mise en défens sur la composition floristique du couvert végétal des milieux fortement anthropisés comme dans le cas de la steppe à *Rhanterium suaveolens* de la Tunisie méridionale a été mis en évidence par plusieurs auteurs (Floret & Pontanier, 1982 ; Waechter, 1982 ; Le Houérou, 1995 ; Ouled Belgacem & Neffati, 1996). De courtes périodes de pâturage alternées avec des périodes de repos sont toutefois plus favorables qu'une protection stricte de longue durée (Floret, 1981). Un tel résultat a pu être confirmé par notre étude qui a permis de montrer qu'au parc national de Bou Hedma, la mise en défens prolongée (25 ans) a fortement influencé la physionomie de la végétation. En effet chez certaines espèces des zones arides, où la demande évapotranspirative est élevée, le pâturage réduit la biomasse aérienne ce qui permet au système racinaire de subvenir aux besoins en eau de la partie aérienne (Le Floc'h, 2001). Par contre le surpâturage, en entraîne une très forte régression du couvert végétal, ce qui laisse les horizons de surface, sableux et ameublis, soumis à la déflation éolienne (Floret & Pontanier, 1982). Cependant dans les parcours où le niveau de pression pastorale n'a pas entraîné une raréfaction trop grave de la végétation, un arrêt de la perturbation permet un retour assez rapide des peuplements à leur état antérieur et ce par l'accroissement de densité des espèces pérennes. En effet Floret (1981) a mis en évidence une nette régression des annuelles au profit des pérennes après une mise en défens de 7 ans.

La restauration autogénique (sans intervention autre que la baisse de la pression anthropique) peut ainsi induire, d'une part, une augmentation du couvert végétal naturel qui participe à la fixation et au maintien du voile éolien favorisant l'installation des plantes et un meilleur bilan hydrique (Jauffret, 2001) et d'autre part l'accumulation de la litière qui peut avoir un effet de protection contre le dessèchement et un effet fertilisant. Une longue protection, sans ameublissement de l'horizon de surface, provoque cependant l'extension de la pellicule de battance susceptible de s'opposer à la croissance et au développement de certaines espèces végétales.

Il y a lieu cependant de signaler que les formations steppiques des zones arides méditerranéennes sont généralement dominées par les chaméphytes (surtout durant la période sèche) ou par les thérophytes en cas de forte dégradation anthropique (Floret & Pontanier, 1982). La diversité biologique, évaluée par les indices de Shannon & Weaver et d'équitabilité, ne peut pas traduire la véritable richesse des milieux puisque ces indices ne tiennent pas réellement compte de l'ensemble des espèces constituant le couvert végétal de la zone étudiée (Jauffret, 2001). Le suivi de l'évolution de la densité de la végétation pérenne donne cependant une idée assez fiable des tendances à l'installation ou à la disparition des individus et permet d'évaluer l'aptitude de l'écosystème à se régénérer (Floret, 1988). Plus le nombre d'individus est élevé, plus la capacité de résilience est, *a priori*, grande notamment à partir, par exemple, des espèces qui rejetant de souche (exemple : *Plantago albicans*) sont capables de coloniser assez rapidement les milieux protégés. En outre, un nombre d'individus élevé favorise l'accumulation et la fixation des particules de sol, ce qui entraîne l'amélioration du bilan hydrique et rend possible la réinstallation d'autres espèces, *etc*. (Floret & Pontanier, 1982 ; Jauffret, 2001).

CONCLUSION

De grande extension dans le sud tunisien et très attractive pour les activités humaines (pastoralisme et agriculture) la steppe à *Rhanterium suaveolens* est à présent la formation végétale plus menacée par la désertification ce qui nécessite une protection immédiate de ce patrimoine. L'étude de l'effet de la restauration sur la dynamique de cette steppe s'avère une nécessité afin de déterminer la réponse des espèces végétales et du milieu physique vis à vis de la protection. Réalisée au niveau de deux parcs nationaux localisés en Tunisie méridionale ainsi que dans deux faciès de dégradation de cette steppe localisée dans la région de Menzel Habib, cette étude a permis d'obtenir les principaux résultats suivants: i) la mise en défens semble avoir un rôle très bénéfique sur le taux de recouvrement et sur l'état de la surface du sol ; ii) la restauration de courte durée semble affecter positivement les divers attributs vitaux de la steppe à *Rhanterium suaveolens* ; iii) la diversité floristique est plus importante sous l'effet de la protection ; iv) la densité des pérennes est plus importante au niveau des sites protégés durant une courte période ; v) l'effet, sur la dynamique du couvert végétal, de la durée de protection peut masquer voire avoir un poids plus important que celui du gradient d'aridité.

BIBLIOGRAPHIE

Aronson J., Floret C., Ovalle C. & Pontanier R. 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid Lands. II. Case studies in Southern Tunisia, Central Chile and Northern Cameroon. *Restoration Ecology*, 1(3): 168-187.

Abdallah L. 1996. *Etude du comportement écophysiologique* «in situ» *d'*Acacia tortilis *ssp* raddiana. DEA. Fac. Sc. de Tunis, 96 p.

Akrimi N. & Neffati M. 1993. *Dégradation du couvert végétal en Afrique du Nord*. Cours des séminaires, Médenine (Tunisie)-Agadir (Maroc): 49-67.

Ayyad M. & El-Kadi H.F. 1982. Effect of protection and controlled grazing on the vegetation of a Mediterrenean ecosystem in Northern Egypt. *Vegetatio* (49): 129-139.

Barbault R. 1995. Le concept d'espèce-clé de voûte en écologie de la restauration : clé… ou impasse ? *Natures-Sciences-Sociétés,* Hors série: 19-28.

Chaïeb M. 1989. *Influence des ressources hydriques du sol sur le comportement comparé de quelques espèces végétales de la zone aride tunisienne*. Thèse Doct. Montpellier ; 293p.

Daget P. & Poissonet J. 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. *Annales Agronomiques,* 22 (1): 5-41.

Daget P. 1976. *Modèles mathématiques en écologie*. Masson, Paris, 170 p.

Floret Ch. 1981. The effect of protection on steppic vegetation of the Mediterranean an arid zone of Southern Tunisia. *Vegetatio,* 46: 117-129.

Floret Ch. 1988. *Méthodes de mesures de la végétation pastorale*. Pastoralisme et développement. Rabat-Montpellier ; 95p+annexes.

Floret Ch., Le Floc'h E. & Pontanier R. 1977. Carte de la sensibilité à la désertification en Tunisie centrale et Méridionale (Processus de dégradation en cours des sols et de la végétation). *Sols de Tunisie,* 8: 1-68.

Floret Ch., Le Floc'h E. & Pontanier R. 1978. Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agro-pastoral des régions arides. Application à la région de Zougrata. *Document technique n°2*. Division des Sols de la Tunisie. Institut des Régions Arides, Médenine, Tunisie.

Floret Ch., Le Floc'h E. & Pontanier R. 1983. Phytomasse et production végétale en Tunisie présaharienne. *Acta Oecologia, Oecol. Plant.,* 4 (18), n°2: 133-152.

Floret Ch., & Pontanier R. 1982. *L'aridité en Tunisie présaharienne : Climat, sol, végétation.* Travaux et documents de l'ORSTOM, 150: 544 p.

Frontier S. & Pichod-Vale 1991. *Ecosystème : Structure, Fonctionnement, Evolution*. Collection d'écologie. Masson, Paris ; 392p.

Grouzis M. 1988. *Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso). Collection études et thèses*, Edition de l'ORSTOM, IRD, Paris; 336p.

Jauffret S. 2001. *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien*. Thèse Doc. Ecologie, Univ. Aix-Marseille ; 360p.

Le Floc'h E. 1995. Les écosystèmes des zones arides du Nord de l'Afrique : Orientation pour l'établissement d'un réseau de réserves de biosphère. In : Nabli MA : Ouvrage collectif sur le milieu physique et la végétation. *Essai de synthèse sur la végétation et la phyto-écologie tunisienne,* Fac des Sci de Tunis, Agence de Coopération Culturelle et Tech., MAB, Tunisie; 5 et 6: 309-321.

Le Floc'h E. 2001. Biodiversité et gestion pastorale en zones arides et semi-arides méditerranéennes du Nord de l'Afrique. *Bocconea* 13: 223-237.

Le Houérou H.N. 1959. Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. 1ère partie : Les milieux naturels et la végétation 281p, 2ème partie : La flore. *Travx Inst de Rech. Sah,* Alger.; 277p.

Le Houérou H.N. 1969. La végétation de la Tunisie steppique (avec référence au Maroc, à l'Algérie et à la Libye). *Annales de l'INRAT,* Tunis, 42 ; 617p.

Le Houérou H.N. 1977. Biological recovery versus desertisation. *Economic geography*, 53 (4) : 413-420.

Le Houérou H.N. 1984. Forage and fuel plants in the aride zone of North Africa, Near and Middle East. *Plants for Arid lands*. G. E. Wikens, J. R. Goodin & D. V. Field. (eds.) London Mackays of Chatham Ltd. : 117-141.

Le Houérou H.N. 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, Développement durable et désertisation, *Options méditerranéennes*, Série B, CIHEAM/ACCT, Numéro 10 ; 396p.

Le Houérou H. N., 2001. Biogeographie of the arid steppeland north of the Sahara. *Journal of Arid Environments.* 48: 103-128.

Le Houérou H. N. & Gounot M. Carte des étages bioclimatiques de Tunisie dressée en 1958 et modifiée en 1985 *in Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale* (Le Houérou 1959).

Magurran A.E. 1988. *Ecological diversity and its measurements*. Croom Helm, London, 179 p.

Martiniello P., D'Agnano G., Padalino O. & Nardelli F. 1995. Effect of fertilization on flora, biomass and seed production and soil fertility in four natural pastures of the Mediterranean basin. *CIHEAM – Options Méditerranéennes*, 12: 87-90.

Odum E. P. 1969. The strategy of ecosystems development. *Science*, 164 p.

Ould Sidi Mohamed Y., Neffati M. & Henchi B. 2002. Effet du mode de gestion sur la biodiversité et la dynamique des phytocénoses en Tunisie présaharienne : Cas du parc national de Sidi Toui. *Sécheresse*, 13 (3): 195-203.

Ould Sidi Mohamed Y. 2003. *Biodiversité et suivi de la dynamique des phytocénoses en Tunisie présaharienne: Cas des observatoires de Sidi Toui et de Oued Dekouk*. Thèse doct. Fac. Sc. Tunis, 175p.+annexes

Ouled Belgacem A. & Neffati M. 1996. Etude de la dynamique de la végétation en milieu saharien. *Revue des Régions Arides*, numéro spécial: 252-257.

Ramade F. 1997. Conservation des écosystèmes méditerranéens. Les fascicules du plan bleu. *Economica*, France; 189 p.

Roux G. & Roux M., 1967. A propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie. *Revue de statistique appliquée*, 15 (2): 59-72.

Shannon C.E. & Weaver W. 1949. *The mathematical theory of communic ation*. Urbana, Chicago Ill., Univ. Illinois Press, 125 p.

Telahigue T., Floret C. & Le Floc'h E. 1987. Succession post-culturale en zone aride de la Tunisie. *Act. Oecologica*. *Oecol. Plant*., 8 (22), n°1: 45-48.

Telahigue T. 1981. *Contribution à l'étude des déséquilibres écologiques et agricoles en zones arides tunisiennes: le cas des friches post-culturales dans la région de Bir Lahmar*. Thèse Doc. Ing. en Ecologie générale et appliquée, Univ. Montpellier; 159p.

Unesco M. 1990. *Bases écologiques du développement rural intégré et lutte contre la désertification*. Univ. Chile, Facul. de Ciencias Agrarias y Forestales. Centro de estudios de zonas aridas, n°7: 244-248.

Visser M. 2001. *Production des semences autochtones pour réhabiliter des terres dégradées : Le cas de* Stipa lagascae *R. & Sch. en Tunisie présaharienne*. Thèse de doct. Fac. Landbouwkundige en Toegepaste, Univ. Gent ; 374p.

Waechter P. 1982. *Etude des relations entre les animaux domestiques et la végétation dans les steppes du sud de la Tunisie. Implications pastorales*. Thèse Doct. Ing., Univ. Sc. Tech. Languedoc, Montpellier ; 293p.

Whittaker R.H. 1972. Evolution and measurements of species diversity. *Taxon* (21): 213-251.

Zaafouri M. S & Chaïeb M. 1999. Arbres et arbustes de la Tunisie méridionale menacés de disparition. *Acta Bot. Gallica*, 146 (4): 361-373.

Zaafouri M.S., Zouagi M. & Akrimi N. 1996. La forêt steppique à *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* de la Tunisie aride : Dynamique et évolution. *Revue des Régions Arides*: 258-271.

Performance de deux *Poacea*, candidates pour la réhabilitation des écosystèmes dégradés en zone aride de Tunisie

Salma Derbel & Mohamed Chaieb*

*****U.R.Biologie & Ecophysiologie des végétaux en Milieu Aride Faculté des Sciences de Sfax, 3038, Sfax, Tunisie

RESUME :

Le présent travail concerne une analyse de la performance biologique de deux graminées pérennes de la zone aride de Tunisie. Il s'agit de *Cenchrus ciliaris* L.et *Stipa lagascae* Roem.& Sch. ayant des types biochimiques de photosynthèse en C_4 et C_3, *Cenchrus ciliaris* et *Stipa lagascae* sont considérées comme étant bien adaptées à l'aridité, puisqu'elles valorisent l'eau du sol pour une production végétale élevée. Le fait qu'elle présente une différence de type biochimique de photosynthèse est à l'origine de leur complémentarité fonctionnelle en particulier pour un partage adéquat des ressources hydriques du sol.

I. INTRODUCTION

Si sous bioclimats aride et saharien, la restauration artificielle du couvert végétal naturel au sein des écosystèmes est théoriquement réalisable ; elle se heurte cependant à maintes contraintes (climatiques, pédologiques, biologiques et socio-économiques). En effet, depuis le début du siècle, la sédentarisation des populations a généré des pratiques agricoles, ayant entraîné des modifications profondes au niveau du paysage (Arnaut 1999, Leroux 1993, Auclair & *al.* 1996). Il n'est dès lors pas aisé de mobiliser ces agriculteurs pour des initiatives de restauration artificielle de leurs parcours, le plus souvent très dégradés. La confiance dans le matériel végétal autochtone est si faible que même les semis ou plantations d'espèces spontanées sont encore, à priori, considérés 'hors d'intérêt'.

Au niveau biologique, les difficultés de la restauration artificielle des écosystèmes dégradés, résultent d'une faible connaissance de la performance du matériel végétal à employer (Chaieb *& al.* 1992, Le Floc'h *& al.* 1997). Ceci se justifie d'ailleurs par le faible succès de certaines actions précédentes d'amélioration artificielle de la steppe, notamment en Tunisie centrale, et où les espèces végétales utilisées étaient soit des espèces autochtones de faible performance, soit aussi des espèces allochtones, peu ou pas adaptées au contexte écologique de Tunisie (Chaieb & *al.* 1992).

Ainsi, pour réussir la restauration des écosystèmes par resemis d'espèces spontanées, au moins pour le cas de la Tunisie, il serait nécessaire de prendre en compte plusieurs aspects techniques, dont:

- le choix du matériel végétal à réintroduire,
- la date du semis en fonction des données climatiques de l'année,
- la profondeur du semis,
- la nature des mélanges à concevoir.

Le présent travail concerne l'étude de la performance de deux graminées pérennes considérées, comme pouvant être utilisées pour la réhabilitation artificielle des parcours dégradés en milieu aride de Tunisie. Il s'agit de *Stipa lagascae* R. & Sch. et de *Cenchrus ciliaris* L., espèces de grand intérêt pastoral, mais quasiment raréfiées dans les parcours de la Tunisie méridionale (Chaieb 1993).

Avant de présenter les caractéristiques des espèces retenues, il serait judicieux de présenter les principaux enjeux de la restauration artificielle des parcours dégradés (Chaieb 1993), en considérant particulièrement le cas de la Tunisie.

Pour rétablir un écosystème dégradé à un niveau de résilience convenable, il est nécessaire d'opérer, selon les situations, le choix judicieux de la méthode la mieux adaptée. Il s'agit d'opter entre la restauration autogénique et la réhabilitation artificielle, par réintroduction d'espèces raréfiées mais présentant à la fois un intérêt pastoral et des aptitudes de fixation en place du sol. Nous nous situons ici dans cette seconde perspective applicable aux écosystèmes très gravement dégradés.

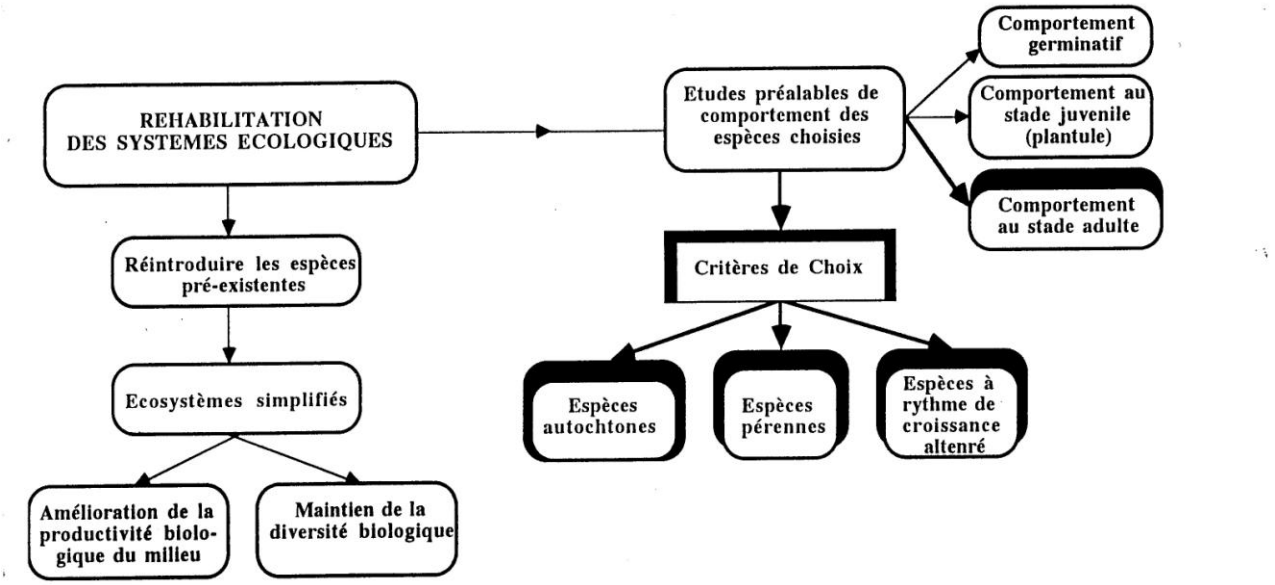


Figure1. Enjeux de la réhabilitation des parcours dégradés (Chaieb 1993).

Notre démarche se fonde sur le fait (figure 1), que le succès d'une réhabilitation artificielle d'écosystèmes pastoraux dégradés dépend du matériel végétal employé (adaptation écologique) et des performances de ces taxons (viabilité économique). Il faut bien évidemment, mais ce n'est pas le propos ici, se préoccuper également de la viabilité sociologique des opérations envisagées, autrement dit de la conformité des réponses apportées avec la demande sociale. Par comparaison le recours à la restauration autogénique des écosystèmes n'est possible qu'en cas de disponibilité dans le sol d'un stock semencier viable et diversifié suffisant pour répondre favorablement dès que les conditions pluviométriques sont satisfaisantes. Il s'agit de fait tout d'abord de faire baisser, ou du moins de contrôler, la pression pastorale. Suite à ses observations de terrain Derbel (en cours) a pu établir le modèle de restauration naturelle suivant (figure2). D'après ce modèle, le succès de la restauration apparaît comme étant lié d'une part au stock semencier du sol et d'autre part à l'aptitude du milieu physique à la stabilité édaphique.

L'examen de la figure 2 permet aussi de retenir que la restauration autogénique, conduit à plus long terme, l'écosystème vers la reconstitution de formations pluristrates, ce qui accentue les interactions entre les différentes espèces végétales. Ceci constitue aussi un objectif pour la réhabilitation artificielle qui vise au rétablissement dans une première phase d'un écosystème simplifié ayant à la fois la structure et le fonctionnement de l'écosystème complexe qu'il est censé rétablir.

Au travers de cette analyse de l'écologie de la restauration, nous entendons présenter les deux taxons, aujourd'hui largement considérés comme candidat pour la restauration de la valeur des terres à pâturage en milieu aride tunisien.

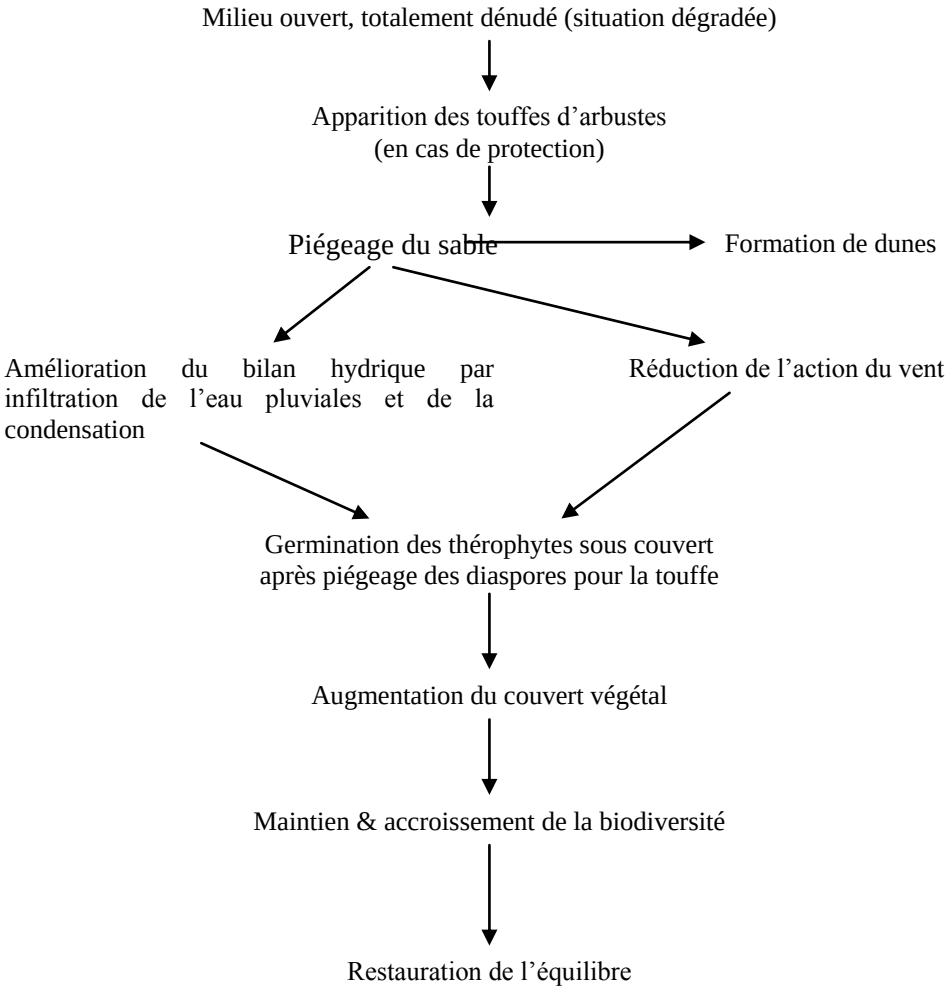


Figure2. Modèle schématique du mécanisme de la restauration naturelle au sein des écosystèmes arides et sahariens (Derbel en cours)

II. REPARTITION DES DEUX ESPECES ETUDIEES

Dans la brève synthèse qui suit nous évoquons les aspects essentiels des connaissances déjà acquises relatives à *Cenchrus ciliaris* et *Stipa lagascae*. Les deux taxons diffèrent singulièrement dans leur distribution (cartes établies par Le Floc'h in Chaieb 1993). On remarque que la distribution de *Cenchrus* est circum-saharienne alors qu'elle est plutôt méditerrannéenne pour *Stipa* (figures 3 et 4). En outre, la présence de *C. ciliaris* est signalée dans les différents continents et sous divers bioclimats. Ces succès dans son introduction dans divers habitats attestent aussi de sa grande amplitude écologique. *Stipa lagascae* paraît plus xérophile, du fait d'une présence limitée aux régions à faible pluviosité. De plus il est évident que, installés dans les mêmes conditions écologiques, la productivité (en phytomasse aérienne) de *S. lagascae* est plus faible que celle de *C. ciliaris*.

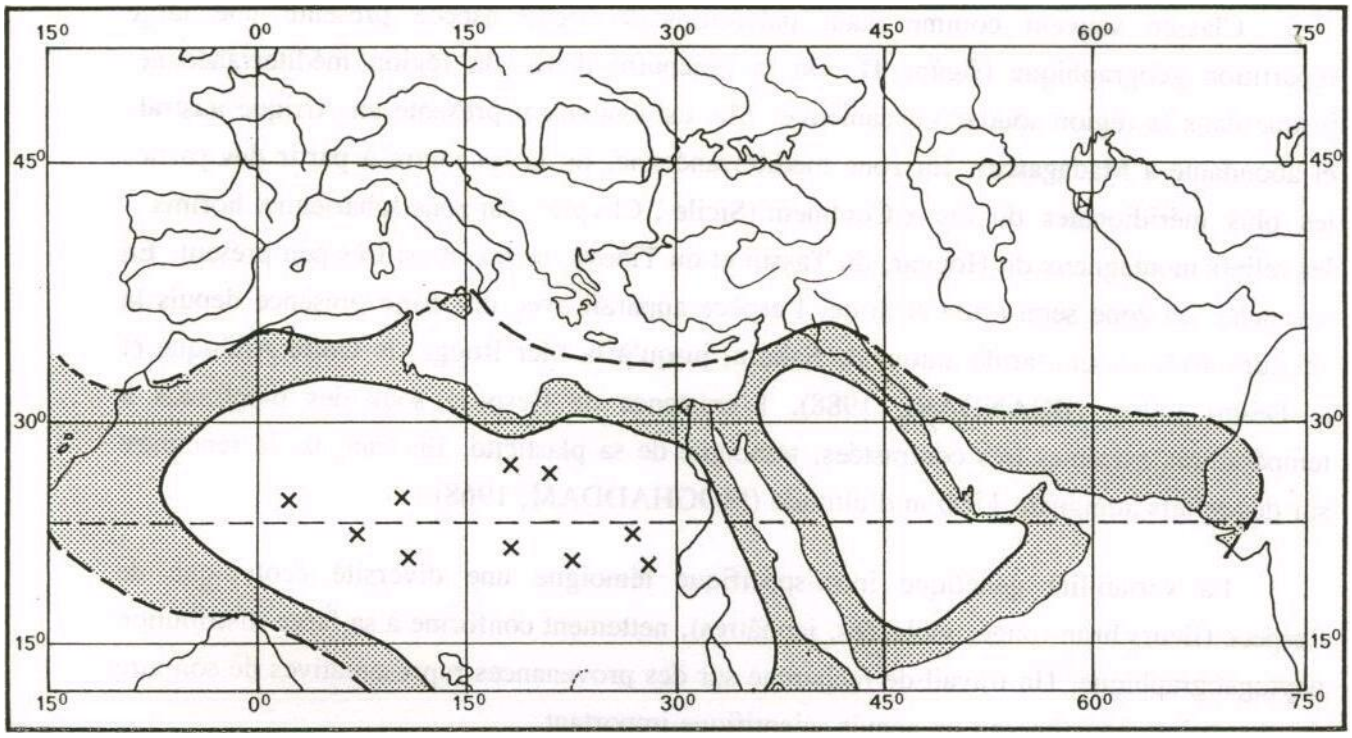


Figure 3. Aire de répartition biogéographique de *Cenchrus ciliaris* L. (Le Floc'h in Chaieb 1993).

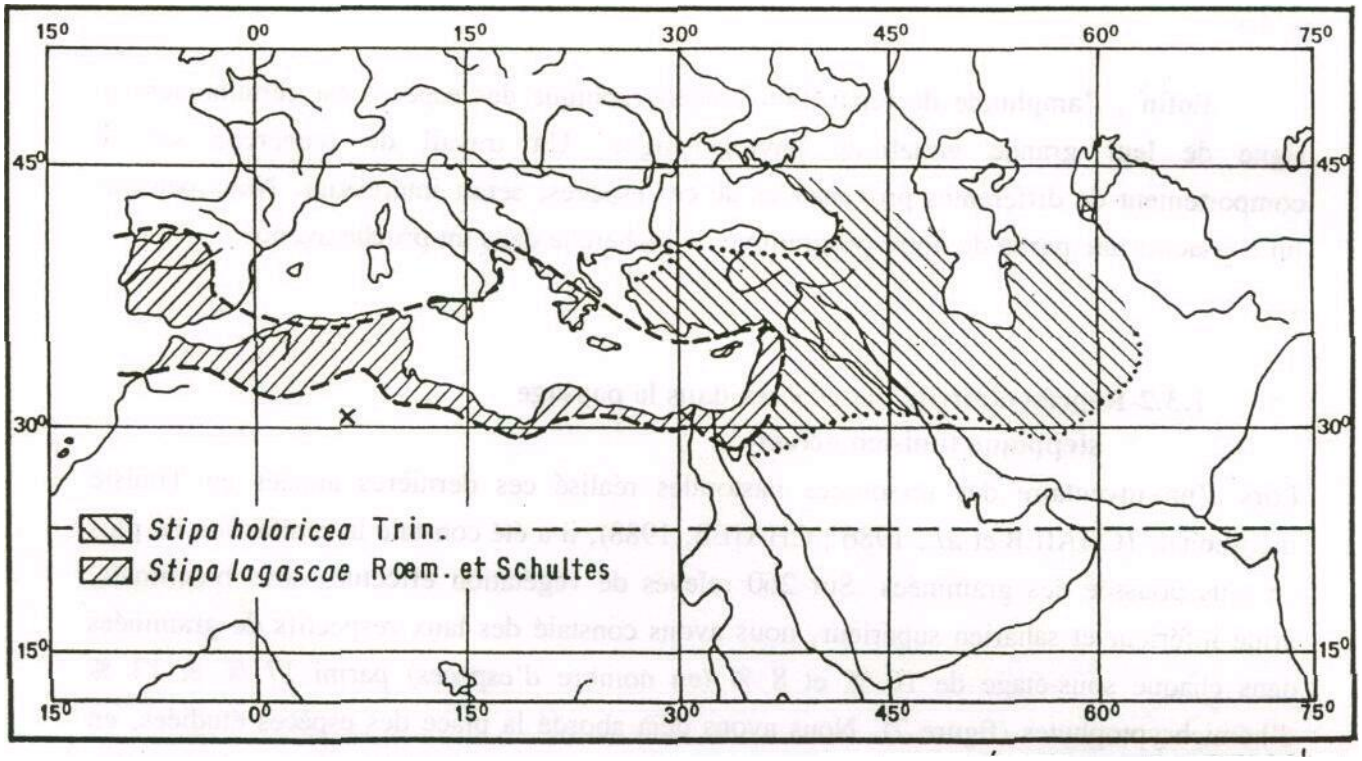


Figure 4. Aire de répartition biogéographique de *Stipa lagascae* Roem. & Schultes **.**(Le Floc'h in Chaieb 1993).

III. TRAITS BIOLOGIQUES DES ESPECES ETUDIEES:

Ces deux *Poaceae S. lagascae* et *C. ciliaris,* fonctionnent respectivement selon les types biochimiques de photosynthèse en C4 et en C3 et ont fait l'objet de plusieurs études en Tunisie centrale et méridionale (Chaieb 1989 & 1993 ; Chaieb et al 1992, etc…). Comme les autres Graminées ; *C. ciliaris* et *S. lagascae* présentent un mode architectural représenté par des modules de croissance, correspondant aux organes communément appelés talles (figure 5). Cependant, *C. ciliaris* est plus apte au tallage et de ce fait sa phytomasse aérienne est aussi plus importante que celle de *S. lagascae.* Cette différence de production est particulièrement visible quand ces deux espèces sont cultivées en irrigué (Chaieb 1989).

Stipa lagascae ***Cenchrus ciliaris***

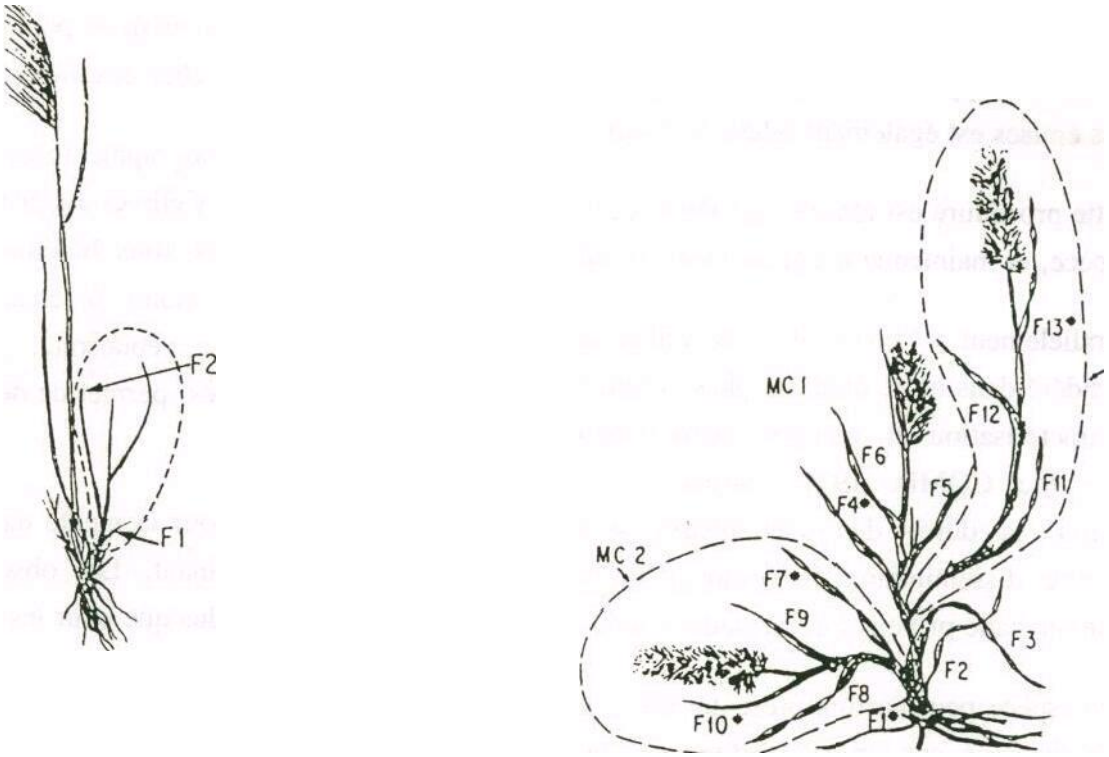


Figure 5. Modèle architectural de croissance des espèces étudiées (D'après Ozenda 1977 complété par Chaieb 1993)

D'après la figure 5, on remarque que les deux espèces présentent le même modèle de croissance, avec en particulier la succession des feuilles (F1, F2, ….Fn) apparaissant au niveau de chaque talle formée.

IV. EFFICACITE VIS-A-VIS DE L'EAU DU SOL DES ESPECES ETUDIEES

Il est couramment rapporté que sous bioclimat aride, où l'évapotranspiration potentielle est très élevée, l'eau constitue le facteur limitant de la production agricole (Hillel 1974, Le Houérou 1984). La performance des espèces végétales, en particulier les espèces spontanées, se manifeste donc à travers de leur faculté à valoriser la réserve hydrique du sol pour la production en biomasse. Dans

ce contexte, pour mieux connaître *C. ciliaris* et *S. lagascae*, nous avons mesuré leur efficacité vis-à-vis de l'eau du sol, ou encore leur 'Water Use Effeciency' (WUE). Ces essais ont eu lieu sur dispositif de cases lysimétriques ainsi que sur parcelle expérimentales, installés aux environs de Gabès (Chaieb 1989 & 1993). L'efficacité vis-à-vis de l'eau du sol exprimée en grammes de matière sèche par millimètre d'eau évapotranspiré (g.MS.mm^{-1} d'eau évapotranspiré**)** est calculée après une coupe au ras du sol des individus des deux espèces, installées ensemble sur le même site.

Espèce	Type biochimique de photosynthèse	WUE (g.MS.mm^{-1} d'eau évapotranspiré)
Cenchrus ciliaris	C_4	2,15
Stipa lagascae	C_3	1,81

Tableau 1. Efficacité vis-à-vis de l'eau du sol des espèces étudiées (Chaieb 1993).

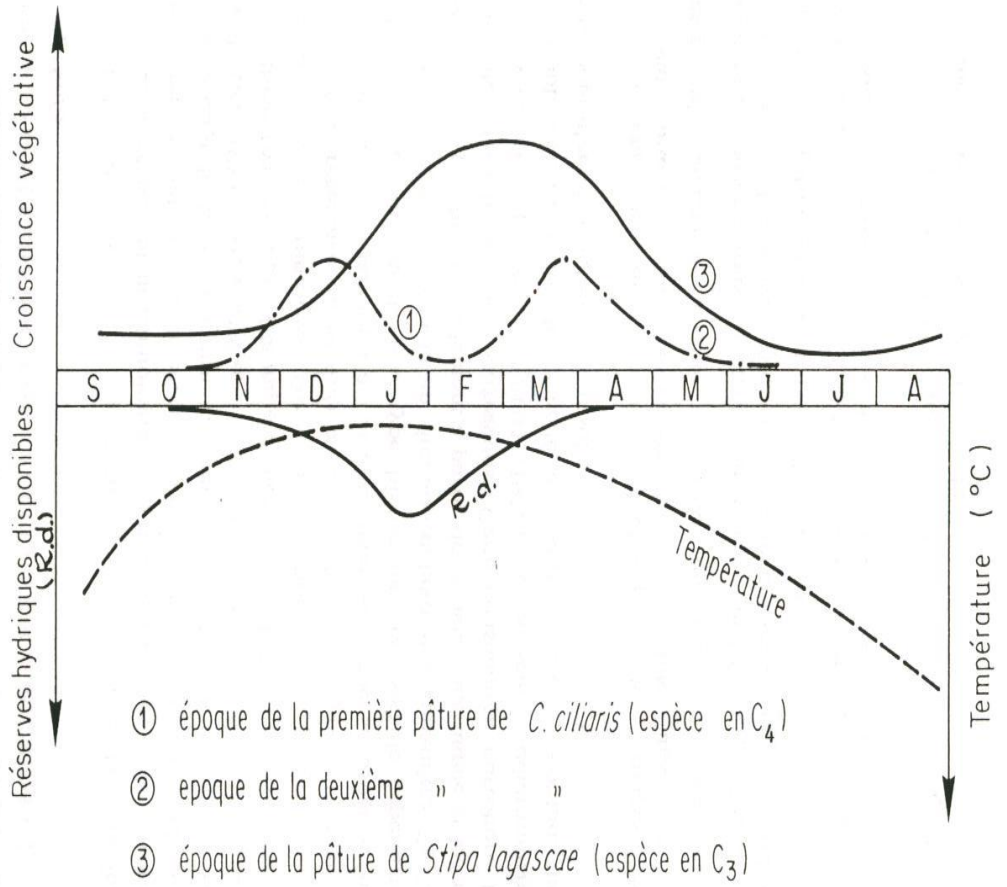
Les données du tableau 1, permettent de constater une bonne efficacité des deux taxons vis-à-vis de l'eau du sol avec cependant une meilleure performance de *C. ciliaris* (en C4). Cette particularité est d'ailleurs signalée par plusieurs autres auteurs, ayant travaillé sur ce taxon (Stanhill 1986, Szarek 1976). Toutefois, en cas d'épuisement de la réserve hydrique du sol, *C. ciliaris*, réagit par dessèchement total de sa partie aérienne, en particulier durant la saison de l'été. Il se comporte ainsi comme une arido-passive (Evenari *et a.l* 1975). En revanche, *S. lagascae*, bien que moins efficace vis-à-vis de l'eau du sol et étant plus adapté à la sécheresse, maintient ses tissus photosynthétiquement actifs durant toute la saison de l'été. Elle se comporte de ce fait comme étant arido-active.

V. INTERACTIONS ENTRE LES DEUX ESPECES ETUDIEES

Au travers de l'ensemble des caractéristiques des deux espèces ci-dessus évoquées, on constate qu'en plus de leur adaptation à l'aridité, les deux taxons se révèlent être biologiquement performants.

Ajoutons qu'à ces performances, qui peuvent s'expliquer par la différence de type biochimique de photosynthèse se surimpose un décalage dans le temps de leur fonctionnement (Chaieb *et al.* 1991). Il s'en suit, dans la nature, un partage adéquat de l'eau et des nutriments quand ils sont disponibles en quantité suffisante, laissant suggérer une complémentarité de leur activité fonctionnelle. Dans ce contexte, Chaieb (1993), a proposé un modèle théorique, illustrant l'interaction entre les deux taxons (figure 6). A remarquer sur ce schéma, que *C .ciliaris* présente deux périodes de croissance, permettant d'exploiter cette espèce durant deux saisons dans l'année, sans pour autant compromettre son rythme de reproduction. Ces deux périodes, automne et printemps, correspondent aux époques où la température est convenable pour un optimum de l'activité photosynthétique de l'espèce et où l'eau est généralement disponible. Par contre, *S. lagascae*, présente une seule période de croissance, mais plus étalée dans l'année, avec un maximum de croissance durant l'hiver et le printemps. L'exploitation pastorale de l'espèce a donc lieu en fin de printemps, c'est-à-dire après la dissémination des graines. Ainsi, en hiver, époque où la disponibilité hydrique est maximale, on assiste au fonctionnement de *S. lagascae* en C3. En revanche pour le reste de l'année, la température élevée favorise l'activité photosynthétique de *C .ciliaris* en C4. La complémentarité fonctionnelle des deux espèces est d'ailleurs signalée par d'autres travaux, notamment ceux de Kluge *et al.* 1978 et de Gifford, 1974.

En dépit des caractéristiques de chacune des espèces étudiées ici, il y a lieu aussi de signaler la complémentarité fonctionnelle qui existe entre-elles, en raison de la différence de leurs types biochimiques de photosynthèse (figure 6). Cette complémentarité serait à l'origine d'un partage



adéquat de la ressource du sol, en vue d'une meilleure efficacité pour la production. Cette particularité constitue en plus un paramètre de leur performance biologique**.**

Figure 6. Modèle théorique des interactions fonctionnelles entre *C. ciliaris* et *S. lagascae* (Chaieb 1993).

VI. CONCLUSIONS

Stipa lagascae et *Cenchrus ciliaris* sont donc deux espèces présentant une performance biologique. Ceci se justifie par leur adaptation à l'aridité en dépit du déficit hydrique auquel elles sont couramment soumises dans leurs écosystèmes d'origine. De ce fait, elles constituent deux bonnes candidates pour les opérations de réhabilitation des écosystèmes pastoraux dégradés. Toutefois, en dépit de leur importante production, leur complémentarité fonctionnelle et leur aptitude à l'installation par éclat de touffe, le succès de leur réintroduction dans les écosystèmes dégradés demeure soumis à un certain nombre d'obstacles parmi lesquels on cite les difficultés de leur installation, la détermination de l'époque propice à leur semis, la profondeur du semis, *etc*.

Des recherches complémentaires relatives au volet agronomique de leur utilisation demeurent nécessaires.

BIBLIOGRAPHIE

Arnaud J.C. 1999. Répartition de la population sédentaire. Évolution des densités de la population sédentaire (1977-1988). Les filières migratoires : les migrations dans le Trarza. In '*Atlas de Mauritanie'* LEDRA, Rouen et LERG, Nouakchott, eds. Coopération française: Planches 3, 5, 6e.

Auclair L. & Zaafouri M. S. 1996. La sédentarisation des nomades dans le sud tunisien : comportements énergétiques et désertification. *Sécheresse*, 7 (1) : 17-24.

Chaieb M. 1989. *Influence des réserves hydriques du sol sur le comportement comparé de quelques espèces végétales de la zone aride tunisienne*. Thèse de Doctorat, Univ. Sciences et Techn. du Languedoc, Montpellier, 292p.

Chaieb M. 1993. *Réponses écophysiologiques de trois graminées pérennes soumises a des conditions écologiques contrastées en milieu aride de Tunisie*. Thèse de Doctorat, Université de Sfax, Tunisie ; 238p.

Chaieb M., Floret Ch., Le Floc'h E. & Pontanier, R. 1992: Life history strategies and water resource allocation in five pasture species of the Tunisian arid zone. *Arid soil research and rehabilitation*, 6:1-10.

Chaieb M. & Henchi B. 1991. Influence de l'aridité sur le cycle de vie, l'état hydrique et le métabolisme de *Plantago albicans*. Comptes Rendus *V èmes Journées biologiques de Tunisie*, Sousse (8-10 nov. 1991).

Derbel S**.** (en cours). *Statut écologique et stratégies adaptatives de certains taxons du bioclimat saharien de Tunisie*. Thèse de Doctorat en Sciences biologiques en cours. Faculté des Sciences de Sfax.

Evenari M., Schulze E. D., Kappen L., Buschbom V. & Lange O. L. 1975. Adaptative mechanisms in desert plants. In '*Physiologicol adaptation to the environments*', ed. F.J. Vernberg, New-York.: 111-129.

Gifford R. M. 1974. A comparaison of potentiel photosynthesis productivity and yield of plant species with differing photosynthetic metabolism. *Aust.J.Plant Pysiol.* 1: 107-117.

Hillel D. 1974. *Soil and Water, Physical principles and processes*. Edit Academic Press, 288 p

Kluge M. & Ting I. 1978. Crassulaceam Acid Metabolism: Analysis of an ecological adaptation. *Ecological Studies*, Vol.30, Springer Verlag Berlin.

Le Houérou H.N. 1984. Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *J. of Arid Environment*, 7: 213-247.

Leroux M..1993. Sécheresse et dynamique de la circulation dans l'hémisphère Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6: 70-81.

Ozenda P. 1977. *Flore du Sahara*. Deuxième Edition (revue et complete). Edit du CNRS, 622 p.

Stanhill G. 1986. Water Use efficiency. *Advances in Agronomy*, 39: 53-85.

Szarek S. R. & Woodhouse R. M. 1976. *Gas exchange and productivity of Sonoran desert shrubs*. Project Desert Biome, IBP ;. Progress Report1975, Vol.3, Process Studies, Plant Section: 27-37.

Ministère de l'Agriculture et
des Ressources Hydrauliques
Direction Générale de l'Aménagement
et de la Conservation des Terres Agricole
30, Rue Alain Savary 1002 Tunis