




Le projet majeur africain
de la **Grande Muraille**
Verte

Concepts et mise en œuvre



Coordination scientifique
Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

Ouvrage préfacé par Son Excellence Maître Abdoulaye WADE
Président de la République du Sénégal

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

Concepts et mise en œuvre

Le projet majeur
africain
de la Grande
Muraille Verte
Concepts et mise en œuvre

Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Coordination
Corinne Lavagne

Mise en page
Aline Lugand – Gris Souris

Maquette de couverture
Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure
Pierre Lopez

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD, 2010

ISBN : 978-2-7099-1696-7

Sommaire

Préface	9
par Maître Abdoulaye WADE, Président de la République du Sénégal	

Le Projet Majeur de la Grande Muraille Verte de l'Afrique : contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance	11
Abdoulaye Dia & Amadou Moctar Niang	

Partie I	
Espèces végétales de la Grande Muraille Verte	29

Grande Muraille Verte : choix des espèces végétales	31
A.T. Ba	

Espèces prioritaires et options agroforestières pour la mise en valeur de la Grande Muraille Verte	39
M. Larwanou	

An idea for the selection of species for the Great Green Wall; from the views of plant nutrition and a possible contribution of plant molecular biology	53
K. Matsuoka	

Isohydric and Anisohydric Water Use Considerations in Species Selection for the Great Green Wall of Africa	66
R. Kjelgren	

Les arbres actinorhiziens de la famille des <i>Casuarinaceae</i> : utilisations et étude de la plasticité racinaire face aux contraintes abiotiques	73
V. Hocher, H. Gherbi, S. Svistoonoff, N. Diagne, V. Vayssaire, F. Auguy, J. Bonneau, L. Laplaze, P. Doumas, D. Bogusz & C. Franche	

Pruning of <i>Acacia salicina</i> trees irrigated with runoff water in arid zones	79
J. E. Ephrath, K. N. Sonko & P. R. Berliner	
<i>Acacia salicina</i> : espèce candidate par son cycle biologique et sa tolérance au déficit hydrique à l'édification de la Grande Muraille Verte	93
A. Ferchichi	
Peuplement sylvo-pastoral de l'espace saharien de la Tunisie méridionale. Perspectives	105
N. Chalbi	
Propagation de l'<i>Acacia senegal</i> (L) Willd. associant le bouturage horticole et la culture in vitro	113
S. Badji & G. Merlin	
Les vitrométhodes dans les stratégies de reboisement pour la Grande Muraille Verte	129
M. O. Sy	
La régénération naturelle assistée (RNA) : une opportunité pour reverdir le Sahel et réduire la vulnérabilité des populations rurales	151
E. Botoni, M. Larwanou & C. Reij	
Potential <i>Casuarina</i> species and suitable techniques for the GGW	163
Z. Chonglu, Z. Yong, C. Yu, C. Zhen, J. Qingbin, K. Pinyopusareerk & C. Franche	
Gestion et valorisation des ressources microbiennes des sols pour une revégétalisation durable des milieux sahéliens	171
R. Duponnois, M. Hafidi, I. Ndoye, A. Galiana, B. Dreyfus & Y. Prin	
Keep Africa Covered Trees-based options to combat land degradation in the Sudano Sahel: A contribution to the "Great Green Wall" of the Sahel Program	183
D. Pasternak, A. Nikiema, E. Haglund & J. Ndjeunga	
The Native Shrubs <i>Philiostigma reticulatum</i> and <i>Guiera senegalensis</i>: The unrecognized Potential to Remediate Degraded Soils and Optimize Productivity of Sahelian Agroecosystems	199
R.P. Dick, M. Sene, M. Diack, M. Khouma, A. Badiane, S.A.N.A Samba, I. Diedhiou, A. Lufafa, E. Dossa, F. Kizito, S. Diedhiou, J. Noller, M. Dragila	

Partie II	
Mise en valeur et suivi de la Grande Muraille Verte	215
A Remote Sensing Technique for Monitoring Temporal Dynamics of a Forest Located at a Desert Fringe	217
A. Karnieli	
Le couplage de la télédétection et de l'observation locale : outil fondamental pour toutes les étapes de la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte	227
N. Ben Khatra & M. Briki	
Geographic Information Science: Monitoring, Mapping, Modeling, and Decision Making for the Great Green Wall Initiative	235
J. Harrington & R. Ndiaye	
Pérenniser la Grande Muraille Verte par l'occupation adéquate des sols	241
R. D. Fall, A. Samoura, I. Deme & A. Dia	
Partie III	
Réalisations	261
L'analyse des expériences de mise en place de ceintures vertes au niveau du circum-Sahara	263
M. Briki & N. Ben Khatra	
La Grande Muraille Verte : espèces végétales et systèmes de valorisation et de gestion. Cas de la République de Djibouti	275
M. M. Moussa Ibrahim, M. A. Doualé Wais, & B. Houssein Ofleh	
Mise en œuvre du projet Grande Muraille Verte au Mali	289
Direction nationale de la Conservation de la Nature	
Mise en œuvre du projet Grande Muraille Verte en République Islamique de Mauritanie : tracé, choix des espèces et mise en œuvre de la composante nationale	297
A. Ould Abdel Fettah et M. Dine Ould Maloud	
Grande Muraille Verte : approches, types d'aménagement et cadre stratégique d'intervention par la République du Niger	303
H. Mamoudou & M. Abdou	
La mise en œuvre de la composante nationale Grande Muraille Verte du Sénégal : approches, réalisation et impact	321

M. Cisse & P. Sarr

Mise en œuvre du Projet de la Grande Muraille Verte (GMV) : la Composante Tchadienne	331
A. M. Zougoulou & D. Alrari	

Experience of Acacia operation project: support to food security, poverty alleviation and soil degradation control in the gum and resins producers countries	345
M. G. Musa	

Expérience du Burkina Faso en matière de réalisation de la Muraille Verte. Le projet Front de Terre	355
A. Drabo	

La Grande Muraille Verte : un corridor de suivi de la dynamique d'établissement et des changements d'état de la biodiversité au Sahel	361
B. Sinsin	



Partie IV Synthèses	375
--------------------------------------	-----

Végétations sèches des ceintures sahéliennes et soudaniennes du Sénégal à Djibouti	377
R. Spichiger	

Les champignons mycorhiziens : une composante microbienne majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux	421
R. Duponnois, A. M. Bâ, Y. Prin, E. Baudoin, A. Galiana & B. Dreyfus	

Préface

PAR SON EXCELLENCE MAÎTRE ABDOULAYE WADE

Président de la République du Sénégal,
Coordonnateur du Volet Environnement du Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique
NEPAD

La désertification ronge inexorablement nos terres arables et nos ressources naturelles. Elle contribue fortement à l'élargissement et à la multiplication des zones endémiques de pauvreté, d'insécurité alimentaire et de flux migratoires. Les impacts sur le développement de notre continent engagent toutes les populations africaines et la Communauté internationale à agir ensemble pour s'attaquer frontalement à ce fléau.

Désertification, Changements climatiques, Développement constituent les challenges majeurs de ce vingt-et-unième siècle qui nous interpellent tous, et nous Africains en particulier, et contre lesquels nous sommes en ordre par l'Initiative Grande Muraille Verte, ce projet majeur africain.

L'initiative d'édification d'un mur de verdure de Dakar à Djibouti, décidée par la Conférence des Chefs d'État et de Gouvernement de la Communauté des États Saharo-Sahéliens et endossée par l'Union Africaine, est née d'une idée de Son Excellence Olusegun OBASANJO, ancien Président de la République Fédérale de Nigeria ; idée que j'ai reprise et conceptualisée sous l'appellation de « Grande Muraille Verte » ou « Great Green Wall ».

L'Initiative Grande Muraille Verte témoigne de la ferme volonté et de l'engagement des Chefs d'Etat et de Gouvernement des pays Saharo-Sahéliens d'unir leurs efforts et leurs moyens, avec le soutien des partenaires techniques et financiers dans une synergie d'actions pour vaincre ce fléau. Elle est une réponse de l'Afrique à la grande coalition mondiale, face aux changements climatiques et à la désertification.

Dans sa conception, la Grande Muraille Verte est une approche écosystémique nouvelle de développement intégré des zones arides à semi-arides, une stratégie globale de restauration et de recolonisation des zones dégradées et déshéritées ainsi

que de lutte contre la pauvreté et les flux migratoires. La Grande Muraille Verte est aussi un projet porteur pour l'humanité et les générations futures par les impacts positifs de Mécanisme de Développement Propre MDP.

Le présent ouvrage « Projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : concepts et mise en œuvre » est un document-cadre de mise en œuvre opérationnelle de la Grande Muraille Verte. Il est édité sur la base d'importantes contributions scientifiques de divers spécialistes internationaux de haut niveau et d'experts nationaux en charge de la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte dans les pays du tracé. Il est subdivisé en quatre grands chapitres :

Contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance ;

Espèces végétales adaptées au tracé de la Grande Muraille Verte ;

Réalisations ;

Systèmes de suivi et de valorisation de la Grande Muraille Verte.

Cet ouvrage donne ainsi un bon aperçu sur l'historique de l'initiative, l'approche conceptuelle, mais aussi des orientations pertinentes sur le choix des espèces végétales et des systèmes de valorisation et de suivi les plus adaptés dans la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte. Il fait également le point sur les stratégies et l'état d'avancement de la réalisation de la Grande Muraille Verte dans les pays.

Je saisis cette occasion pour féliciter vivement l'ensemble des experts qui ont contribué à cet ouvrage ou participé à la réflexion scientifique durant tout le processus d'élaboration des modalités de mise en œuvre du projet et rendre un hommage bien mérité à la Commission Scientifique qui en a assuré la coordination.

Je souhaite que cet ouvrage de base soit un support efficace d'informations et de cadre d'orientation dans la réalisation des composantes nationales de la Grande Muraille Verte, sans oublier de rappeler que l'initiative Grande Muraille Verte est sous la tutelle de l'Union Africaine et la coordination régionale assurée par une Agence Panafricaine de la Grande Muraille Verte.

Je voudrais également saisir l'occasion de la parution de cet important ouvrage sur la Grande Muraille Verte pour lancer un appel aux noms de mes Pairs africains et à mon nom personnel aux Populations africaines, jeunes et femmes, à la Communauté internationale, aux Politiques et aux Scientifiques à une grande mobilisation citoyenne pour la Grande Muraille Verte, un Défi et une chance pour l'Afrique et l'Humanité entière.

Maître Abdoulaye WADE

Président de la République du Sénégal,
Coordonnateur du Volet Environnement du NEPAD



Le Projet Majeur Grande Muraille Verte de l'Afrique : contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance

ABDOULAYE DIA
Institut des Sciences de la Terre/UCAD, Académie nationale des Sciences et Techniques du Sénégal
abdia@ucad.sn

AMADOU MOCTAR NIANG
Centre de Suivi écologique, Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature, des Bassins de rétention et des Lacs artificiels du Sénégal

Contexte

Pendant plusieurs décennies, les pays de la zone sahélo-saharienne du Circum-Sahara ont été confrontés, à l'exception de quelques années à pluviométrie normale, à un déficit pluviométrique qui a eu comme effets une forte perturbation des grands équilibres écologiques, une descente des isohyètes vers le Sud et un processus quasi inexorable de désertification.

La désertification, phénomène certes quasi planétaire, revêt en Afrique et en particulier dans la partie au sud du Sahara un visage spécifique de calamité et de pauvreté qui installe progressivement un sentiment de désolation et de fatalité. Actuellement, plus des 2/3 de la superficie du continent africain sont couverts de zones désertiques ou fortement dégradées.

Par ses effets pernicieux et récurrents, la désertification a entraîné une forte dégradation des ressources naturelles, une baisse des productions agricoles, une situation d'insécurité alimentaire et un lourd bilan socio-économique qui impactent très négativement les efforts de développement économique de la plupart des pays de l'espace saharo-sahélien.

Depuis la signature de la Convention internationale de lutte contre la désertification à Paris en octobre 1994, divers plans d'action nationaux et sous-régionaux ont été élaborés et mis en œuvre et d'importantes ressources financières ont été mobilisées. De même, diverses institutions de lutte contre la désertification et la sécheresse ont été créées à cet effet. Il s'agit notamment du Comité Inter-Etats de Lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS), de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), de

l'Inter Governmental Authority for Development (IGAD), de la Commission des Forêts d'Afrique centrale (COMIFAC). Ces problématiques font également partie des préoccupations des Communautés économiques régionales telles que la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), la Communauté économique des États de l'Afrique centrale (CEEAC) et la Communauté des Etats sahélo-sahariens (CEN-SAD).

Dans ce cadre, divers programmes-cadres et plans d'action existent au niveau du continent et sont mis en œuvre pour lutter contre les menaces de dégradation des sols et de désertification dans les zones sahéliennes en marge du désert du Sahara. Il s'agit en particulier du PDDAA (*Programme détaillé de développement de l'agriculture en Afrique*), du Plan d'action du NEPAD pour l'Environnement en relation avec le Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE), des Programmes d'action régionaux, sous-régionaux et nationaux de lutte contre la désertification (PAR, PASR et PAN), des programmes TerrAfrica de Restauration et de Gestion des Terres Dégradées (GTD) ainsi que des importants programmes menés par les institutions intergouvernementales de lutte contre la désertification et de développement des zones arides. Cependant, malgré les efforts consentis et les avancées significatives obtenues çà et là, force est de reconnaître que les résultats escomptés sur la restauration des terres et de la biodiversité, les conditions économiques, sociales et environnementales des populations sont demeurés en deçà des attentes. Il s'y ajoute qu'une des leçons à tirer de ces expériences est qu'aucun pays, pris individuellement, n'a les moyens techniques, humains et financiers nécessaires pour faire face à ces contraintes majeures, d'où la nécessité d'une approche solidaire, intégrée et fédératrice.

Face à cette situation récurrente de défis environnementaux multiples et à l'état de forte dégradation des écosystèmes liés en grande partie aux changements climatiques et à la désertification, l'Afrique, condamnée à faire front, propose comme réponse la mise en œuvre d'une nouvelle approche dénommée « Initiative Grande Muraille Verte ». Dès juillet 2005, les chefs d'Etat et de Gouvernement des Etats sahélo-sahariens ont décidé d'apporter une réponse pertinente de l'Afrique pour faire face à la désertification et aux changements climatiques. Ainsi, au moment où la communauté internationale se mobilise et tente d'élaborer des cadres stratégiques de lutte contre le changement climatique et la détérioration de la biodiversité et de lutte contre la pauvreté et mène des consultations conjointes à travers la Banque mondiale et la Banque africaine de développement, il me semble important de relever l'anticipation de l'Afrique et en particulier des Etats au sud du Sahara, avec la naissance d'une « Nouvelle Stratégie Africaine de Lutte contre les Changements Climatiques » (NSAL/CC) dénommée « Grande Muraille Verte » (GMV) ou "Great Green Wall". Elle découle de la conviction forte et de la volonté des Africains à rompre avec la fatalité pour faire face à ces deux grands défis environnementaux.

S/E Maître Abdoulaye WADE, Président de la République du Sénégal, disait dans son allocution de la cérémonie d'ouverture du colloque scientifique international (CSI) « La Grande Muraille : Choix des espèces végétales et des Systèmes de mise en valeur et de suivi » tenu les 11 et 12 février 2009 : « *Le projet Grande Muraille Verte est un projet porteur pour l'humanité et les générations futures. Face aux*

échéances de 2030, où la population africaine atteindrait 1,7 milliard, nous n'avons plus le droit de regarder, impuissants, la destruction de notre patrimoine ». Et Son Excellence d'ajouter à propos des orientations et résultats majeurs du Colloque Scientifique International : « Je voudrais insister sur un certain nombre de résultats attendus :

- partager les informations sur les initiatives de mise en œuvre du programme dans chacun des pays concernés ;*
- partager les connaissances disponibles sur les espèces végétales potentielles, notamment sur la biologie, l'écophysiologie, la productivité, la phytopathologie, l'utilisation et le comportement d'espèces envisageables ;*
- établir, une liste d'espèces potentielles dont le choix définitif sera validé avec les populations concernées ;*
- enfin, affiner les stratégies et les techniques de mise en valeur en exploitant les leçons tirées d'expériences d'aménagements intégrés dans les zones arides. »*

Depuis l'adoption de l'idée d'édification de la Grande Muraille Verte et la responsabilité donnée au Sénégal de donner corps et réalité au projet par les chefs d'Etat et de Gouvernement, le processus de mise en œuvre est en marche. Le Sénégal, à travers une commission scientifique pluridisciplinaire constituée d'experts de très haut niveau, la Commission de l'Union africaine, le Secrétariat général de la CEN-SAD, en relation avec les Etats, les institutions régionales et sous-régionales de lutte contre la désertification ont dans une grande synergie d'approche défini un cadre stratégique et un plan d'action de mise en œuvre de l'Initiative africaine « Grande Muraille Verte ».

Historique

Face aux multiples défis environnementaux – notamment la désertification – auxquels l'Afrique est confrontée, Son Excellence Olusegun OBASANJO, ancien Président de la République Fédérale du Nigeria, a proposé lors de la 7^e Conférence des Leaders, Chefs d'Etat et de Gouvernement de la Communauté sahélo-saharienne (CEN-SAD) tenue à Ouagadougou au Burkina Faso les 1^{er} et 2 juin 2005, d'entreprendre l'édification d'un mur de verdure du Sénégal à Djibouti pour freiner le désert. Cette idée favorablement accueillie a été reprise et conceptualisée par Son Excellence Maître Abdoulaye Wade, Président de la République du Sénégal, sous l'appellation de « Grande Muraille Verte » ou « Great Green Wall.

Lors de cette conférence, les Leaders et Chefs d'État de la CEN-SAD ont demandé à S/E Maître Abdoulaye WADE, Coordonnateur du volet « Environnement » du Nouveau Partenariat pour le Développement en Afrique (NEPAD), d'aider à donner un contenu technique et les modalités opérationnelles de mise en œuvre de cette ambitieuse idée de « Muraille Verte ».

L'initiative Grande Muraille Verte est adoptée plus tard par la Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernement de l'Union africaine lors du 5^e Sommet ordinaire tenu en juillet 2005 à Syrte (Libye) et lors de la 8^e session ordinaire tenue les 29 et 30 janvier 2007 à Addis-Abeba (Ethiopie) par la déclaration 137 (VIII) approuvant l'initiative « Grande Muraille Verte du Sahara ».

Les chefs d'Etat et de Gouvernement africains ont salué l'initiative Grande Muraille Verte comme une stratégie appropriée pour soutenir efficacement les efforts nationaux, régionaux et internationaux de lutte contre la désertification et la pauvreté, de restauration des zones dégradées, et de lutte contre les changements climatiques. Ainsi pour marquer cet important engagement politique du Continent, ils engageaient dès lors l'ensemble des Etats saharo- sahéliens impliqués, les partenaires techniques et financiers et la société civile à entreprendre les actions et la mobilisation populaire nécessaires à la mise en œuvre rapide du programme de la Grande Muraille Verte.

Maître Abdoulaye WADE, Coordonnateur de la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte Dakar-Djibouti, en accord avec les autres chefs d'Etat et de Gouvernement des pays du tracé, les Présidents en exercice des conférences des chefs d'Etat et de Gouvernements de l'Union africaine et de la CEN-SAD, et en relation avec le Secrétariat général de la CEN-SAD et la Commission de l'Union africaine a tenu à l'initiative du Sénégal des rencontres d'experts et de ministres en charge de l'Environnement et une table ronde avec les Bailleurs (2005, 2006, 2008 et 2009). Elles ont permis d'aboutir à l'élaboration et à l'adoption des documents d'orientation stratégique de mise en œuvre, notamment le Schéma conceptuel, le Plan d'action, les Cadres institutionnel et d'exécution du projet majeur Grande Muraille Verte et d'obtenir l'engagement de la Communauté des bailleurs d'accompagner les actions de mise en œuvre. Ces divers documents sont approuvés par les experts et les ministres en charge de l'Environnement des pays du Tracé et sont transmis aux Chefs d'Etat et de Gouvernement des pays concernés, à l'Union africaine et la CEN-SAD.

La Commission de l'Union africaine a élaboré un document de définition du concept en étroite collaboration avec ses partenaires, notamment la Commission économique pour l'Afrique (CEA), le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), l'Organisation mondiale pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le Secrétariat de la Convention des Nations unies pour la lutte contre la désertification (UNCCD), l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) et le Programme alimentaire mondial (PAM). Ce document conceptuel a été soumis au Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement sur la sécurité alimentaire tenu à Abuja, au Nigeria, en décembre 2006.

Le Secrétariat de la CEN-SAD, en collaboration avec l'OSS, a également élaboré un document conceptuel et un plan d'action (2008–2010) qui repose sur une série d'études et de consultations techniques avec les États membres et les partenaires.

Une réunion restreinte d'un Comité Ad Hoc constitué de représentants de la Commission de l'Union africaine (CUA), de la République du Sénégal et du Secrétariat Général de la Communauté des Etats Sahélo- Sahariens (CEN-SAD) en présence de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) et du Comité inter-états de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) organisée le 15 mai 2008 à Tripoli (Libye). Le Comité vise à assurer la mise en œuvre du programme Grande Muraille

Verte dans un cadre unique et concertée. Il a entrepris la consolidation des divers documents relatifs à la Grande Muraille Verte et a élaboré un projet de Plan d'Action 2008-2010 de mise en œuvre du programme de la Grande Muraille Verte.

Dans le cadre de la coopération Commission européenne/Commission Union africaine, l'Union européenne a entrepris en janvier 2009, une « Etude de préfaisabilité pour la grande muraille verte à réaliser dans le contexte de l'Initiative pour le Sahara et le Sahel (GMVSS) ».

De l'analyse des documents de stratégies (cf. Bibliographie) et des résolutions issues des diverses consultations et rencontres entre les pays, les institutions et autres acteurs concernés par la GMV, il ressort un consensus sur :

- l'engagement politique des chefs d'Etat et de Gouvernement des pays africains, des institutions régionales et sous-régionales dans la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte ;
- l'objectif majeur du programme, qui est de contribuer à la lutte contre l'avancée de la désertification et à la mise en valeur des zones saharo-sahéliennes par une restauration et une gestion durable des ressources naturelles et à la lutte contre la pauvreté ;
- la nécessité de s'accorder sur les critères devant permettre d'affiner le tracé (pluviométriques, topographiques, démographiques, sociologiques, géographiques, écologiques, agronomiques, pédologiques, géologiques...)
- les multiples effets et impacts positifs attendus de la GMV et sur les nombreux bénéficiaires, en particulier les populations et l'environnement ;
- le caractère prioritaire de ce projet majeur et l'urgence de sa mise en œuvre pour les pays saharo-sahéliens ;
- la nécessité de partager les connaissances disponibles sur les espèces végétales et les systèmes de mise en valeur et de suivi de la Grande Muraille. Ce point constitue une étape cruciale garantissant le maximum de chances de réussite du programme de la GMV et a justifié la convocation par le Sénégal du colloque international sur le Choix des espèces végétales et des systèmes de mise en valeur et de suivi de la Grande Muraille Verte, tenu à Dakar les 13 et 14 février 2009.

Enfin, le Ministre d'Etat Monsieur **Djibo Leïty KA**, Ministre de l'Environnement, de la Protection de la Nature, des Bassins de Rétention et des Lacs Artificiels de la République du Sénégal, s'est rendu respectivement du 03 au 06 novembre 2008 et le 10 décembre 2008 au Mali, au Niger, au Tchad, à Djibouti, en Ethiopie et au Burkina Faso, porteur d'un message de Maître Abdoulaye WADE auprès des chefs d'Etat et de Gouvernement de ces pays, ainsi qu'auprès du Président de la Commission de l'Union africaine. Il s'agissait entre autres d'examiner le projet de convention portant création d'une Agence panafricaine de la Grande Muraille Verte, chargée de la coordination et du suivi du projet au niveau régional et de l'état de mise en œuvre du projet dans les pays respectifs. *Cette initiative a permis de noter avec satisfaction :*

- la totale adhésion des chefs d'Etat et de Gouvernement africains à l'initiative Grande Muraille Verte Dakar-Djibouti et à la création dans les meilleurs délais de l'Agence Pan- Africaine de la Grande Muraille Verte ;

– l’engagement de ces chefs d’Etat et de Gouvernement pour la mise en œuvre du projet Grande Muraille Verte, par la mobilisation préalable des moyens nationaux, à l’instar du Sénégal.

L’évaluation en 2009 des activités des Etats dans la mise en œuvre des composantes nationales de la Grande Muraille Verte, lors de la Conférence Scientifique Internationale à travers les rapports pays, permet de constater d’importantes réalisations dans la plupart des pays, notamment le Sénégal, le Niger, le Tchad, le Burkina Faso, Djibouti, le Soudan, le Mali et la Mauritanie. Les réalisations sont en termes d’activités de plantations, de capitalisation et de consolidation des actions existantes et de mise en place de cadres institutionnels d’opérations, de coordination et de suivi de la Grande Muraille Verte.

Approche stratégique de mise en œuvre de la Grande Muraille Verte

Approche régionale

L’initiative Grande Muraille Verte est un projet d’envergure continentale. Elle constitue l’une des réponses de l’Afrique aux défis auxquels elle est confrontée et également une proposition concrète d’actions dans le cadre de l’alliance mondiale contre les changements climatiques. Elle est sous-tendue par des mécanismes de coopération régionale et sous-régionale dans le cadre d’une approche globale concertée.

La particularité de la Grande Muraille Verte est d’unir tous les pays concernés dans un même combat de lutte contre la désertification et le changement climatique et selon une nouvelle approche de développement intégré des zones arides et semi-arides, souvent totalement déshéritées. Dans l’approche conceptuelle novatrice, « tout en créant et consolidant une ligne de défense par des activités de reboisement et d’aménagement », la Grande Muraille Verte met en synergie des actions de lutte contre la désertification, de restauration des terres et de la biodiversité, de développement de systèmes agricoles et pastoraux, de lutte contre la pauvreté par la réalisation d’activités génératrices de revenus favorables au repeuplement des zones sahélo-sahariennes du Circum-Sahara. Toutefois, les variations des contextes biophysiques, pédologiques et culturels imposent un développement global par la prise en compte des spécificités locales.

La mise en œuvre de la Grande Muraille Verte va capitaliser et valoriser les expériences et les données importantes issues des programmes nationaux et régionaux de lutte contre la dégradation des terres et la désertification, et de gestion durable des ressources naturelles. Elle établira les synergies nécessaires avec les divers programmes de développement en cours dans la zone du tracé.

Objectifs et impacts attendus de la Grande Muraille Verte

OBJECTIFS

L'objectif global de la Grande Muraille est la contribution à la lutte contre l'avancée du désert et à la mise en valeur des zones saharo-sahéliennes pour une gestion durable des ressources naturelles et à la lutte contre la pauvreté.

Les Objectifs spécifiques sont :

- la conservation/valorisation de la biodiversité ;
- la restauration/conservation des sols ;
- la diversification des systèmes d'exploitation ;
- la satisfaction des besoins domestiques (en produits ligneux et/ou non ligneux), l'accroissement des revenus à travers la promotion d'activités génératrices de revenus et l'installation d'infrastructures sociales de base ;
- l'amélioration des capacités de séquestration du carbone dans les couvertures végétales et les sols ;
- l'initiative « Grande Muraille Verte » intègre également divers mécanismes de développement humain, tels que le Développement durable, le Développement propre et la Lutte contre la pauvreté.

EFFETS ET IMPACTS ATTENDUS, ET LES BÉNÉFICIAIRES

L'édification de la Muraille Verte dans ces zones arides et déshéritées va engendrer des effets et impacts hautement positifs sur les populations et l'environnement. Par ses objectifs et les impacts attendus, elle intègre plusieurs mécanismes associés au développement et à l'environnement, en particulier : (i) le Développement durable, (ii) la Lutte contre la pauvreté, (iii) la Réduction des migrations écologiques et économiques et, enfin, (iv) le Développement propre.

L'importante production de biomasse attendue sur une superficie envisagée de 10 500 000 ha dans la bande sahéenne au sud du Sahara fait de la GMV un patrimoine pour l'humanité et un puits de carbone. Elle mettra ainsi à la disposition de la Communauté internationale un nombre considérable d'Unités de réduction certifiée des émissions et contribuera au respect des engagements en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

De façon spécifique, les effets et impacts attendus sont notamment :

- **la réduction de l'érosion des sols** : la présence de la couverture végétale amoindrit la vitesse des vents et favorise l'infiltration des eaux de pluie ;
- **la restructuration des sols dégradés** : l'accroissement de la matière organique, d'origine végétale et animale, entraîne une restructuration des sols ;
- **l'accroissement du taux de reforestation des pays traversés par la GMV** : pour, entre autres, restaurer les équilibres éco-climatiques et restaurer la biodiversité ;
- **la relance, le développement et la diversification de l'agriculture et de l'élevage**, tant par le volume des productions végétales et animales que par l'importance de la population active occupée par ces sous-secteurs ;

– **la restauration, la conservation et la valorisation de la biodiversité végétale et animale** : les mises en défens et autres surfaces boisées privées contribuent à la régénération de la végétation naturelle et au retour de la faune sauvage : oiseaux, petit gibier, serpents, etc.

– **l'accroissement de la couverture des besoins locaux en produits forestiers**, notamment en bois de feu et de service, mais aussi en produits non ligneux : gommés, résines, racines, feuilles, écorces, fruits, pharmacopée, etc. ;

– **l'amélioration du niveau de vie et de la santé** du fait d'une amélioration notable de l'alimentation, du cadre de vie et d'une plus grande disponibilité des besoins domestiques (eau, énergie, infrastructures sociales, etc.). La Grande Muraille Verte apparaît ainsi comme un instrument de lutte contre la pauvreté et devrait être intégrée comme une composante principale du Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (DSRP 2) et comme une grappe de la Stratégie de Croissance Accélérée (SCA) en cours dans la plupart des pays du tracé ;

– **l'inversion du phénomène de l'exode rural** : progressivement, les « émigrés écologiques » et les forces vives à la recherche de travail vont repeupler ces zones réhabilitées par la proximité de la GMV ;

– **la maîtrise des ressources en eau**, à travers la mise en place de bassins de rétention, de lacs artificiels et d'ouvrages hydrauliques qui contribueront à l'amélioration des systèmes de production.

Les opérations de valorisation des ressources naturelles et des pratiques de la GMV vont profiter à plusieurs catégories de bénéficiaires, dont :

– **la communauté internationale** : en effet, la Grande Muraille Verte s'inscrit parfaitement dans les préoccupations internationales de Mécanisme de Développement Propre (réduction des gaz à effet de serre et séquestration du carbone), la réduction des migrations écologiques et économiques ;

Tableau n°1
Taux annuel de régression du couvert forestier
(Source : Situation des forêts du monde ; FAO, 2005)

Pays concernés par la GMV	Taux de régression des forêts
1. Burkina Faso	- 15 000 ha/an
2. Mali	- 99 000 ha/an
3. Mauritanie	- 10 000 ha/an
4. Niger	- 62 000 ha/an
5. Nigeria	- 398 000 ha/an
6. Sénégal	- 45 000 ha/an
7. Tchad	- 82 000 ha/an
8. Soudan	- 956 000 ha/an
9. Ethiopie	- 40 000 ha/an
10. Erythrée	- 5 000 ha/an
11. Djibouti	—
Total	1 712 000 ha/an

- **les Etats** : ils trouvent là une opportunité de relancer leurs programmes de conservation et de restauration des écosystèmes, en particulier les terres et les forêts, mais également ceux de lutte contre la pauvreté et de sécurité alimentaire. En effet, comme le souligne le rapport 2005 de la FAO (tableau 1), les efforts de conservation des forêts dans les pays du Sahel sont très faibles par rapport au processus de déforestation, si bien que le taux de régression (**1 712 000 ha/an**) des forêts est alarmant.
- **les collectivités locales** : les régions, communes et communautés rurales trouvent, à travers la GMV, **un moyen d'améliorer le développement local, en relançant les productions** agricoles, en luttant contre le chômage et, de manière générale, en augmentant les revenus ;
- **les producteurs primaires** : agriculteurs, pasteurs, récolteurs de gomme, de miel, de résine, les guérisseurs, les chasseurs, les sculpteurs de bois, etc. Si pour les agriculteurs la GMV va accroître les zones cultivables et la productivité des zones cultivées, pour les autres acteurs primaires, la muraille va surtout augmenter la disponibilité de la matière première ;
- **les entrepreneurs privés** : initiateurs de parcs animaliers, fermes modernes, de sites écotouristiques trouvent là des opportunités économiques, etc. ;
- **les structures d'enseignement, de formation et de recherche** : la GMV sera un site privilégié de recherches transdisciplinaires à vocation régionale, favorisant une grande mobilité des scientifiques africains et renforçant la synergie dans l'exécution des programmes ;
- **les populations vivant dans la zone d'emprise de la GMV** : outre les facilités accrues pour le ramassage du bois de chauffe, le fourrage et l'accès à l'eau, elles trouvent d'importantes opportunités contre le sous-emploi, l'exode et la pauvreté.

Approche méthodologique et Tracé global indicatif (TGI) de la Grande Muraille Verte

Le projet Grande Muraille Verte dans sa conception est un modèle de lutte contre la désertification, de restauration et de développement intégré des zones arides. Elle implique en cela tous les domaines arides et semi-arides d'Afrique et en particulier ceux du Circum-Sahara. Cependant, le concept Grande Muraille Verte Dakar-Djibouti qui traduit l'idée de base se justifie également par le caractère prioritaire et l'urgence de la mise en œuvre du projet majeur GMV dans cette partie transcontinentale ouest-est de l'Afrique, allant de Dakar à Djibouti (*Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Ethiopie, Erythrée, Djibouti*) prenant en compte l'état fortement dégradé des écosystèmes et des ressources naturelles dans la bande sahélienne.

LOCALISATION ET DESCRIPTIF DE LA GRANDE MURAILLE VERTE

La mise en œuvre de la GMV est réalisée en particulier par l'installation et la mise en valeur intégrée *d'espèces végétales* à valeur économique bien adaptées aux terres arides, *de bassins de rétention*, de *systèmes de production agricoles* et diverses *activités génératrices de revenus*, ainsi que des *infrastructures sociales de base*.

Le tracé de la Grande Muraille Verte (GMV) est large de 15 km et va de Dakar à Djibouti (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Ethiopie, Erythrée, Djibouti). Il s'étire ainsi sur environ 7 000 km. Il n'affecte pas le désert du Sahara et est contenu dans le Sahel dans des zones écogéographiques à moyennes pluviométriques annuelles inférieures à 400 mm.

L'un des paramètres écologiques déterminants est la pluviométrie. Ainsi, les zones ciblées sont confinées dans les domaines à moyennes annuelles pluviométriques < à 400 mm. En effet, si une bonne partie de la GMV est située dans des zones habitées, une autre non moins importante sera située dans des zones non habitées et ne dépendra plus pour son maintien que des pluies. C'est pourquoi la Grande Muraille devra nécessairement être localisée à des latitudes à moyennes annuelles pluviométriques comprises entre 400 et 100 mm.

La réalisation, dans les zones appropriées, d'une bande de bassins de rétention ou d'un réseau de forages hydrauliques le long du tracé est prévue pour atténuer le déficit pluviométrique, rendre l'eau disponible pour les activités domestiques et autres activités génératrices de revenus.

« Notre conviction est que seul le développement des espaces pourra freiner la désertification, et l'une des contraintes majeures à lever pour arriver à cet espace de vie souhaité est la disponibilité de l'eau. C'est pourquoi il m'a semblé nécessaire d'intégrer dans cette Grande Muraille Verte un corridor de bassins de rétention qui devrait en être la source nourricière. » (Maître Abdoulaye WADE, Président de la République du Sénégal, février 2009).

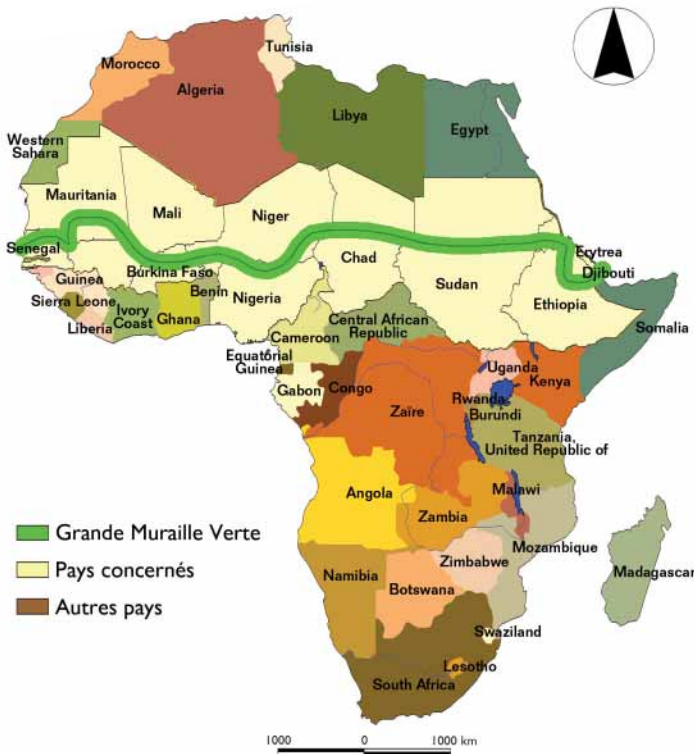
La GMV apparaîtrait alors comme une bande de végétation multi-espèces plus ou moins linéaire mais continue autant que possible et incluant divers systèmes d'occupation des sols, traversant des zones habitées (zones de terroirs villageois), des zones non habitées (forêts classées, parcs nationaux, parcs animaliers, réserves botaniques, réserves communautaires). Cependant, à cause de certains facteurs (plans d'eau, montagnes, collines rocailleuses, zones sacrées ou hantées), la Grande Muraille pourra être déviée vers le nord ou le sud.

La Grande Muraille Verte intègre ainsi dans sa structure plusieurs systèmes d'utilisation des terres, notamment :

- des formations naturelles : forêts classées (gérées par l'Etat), forêts communautaires (villageoises, communales, de communautés rurales, etc.), forêts privées (appartenant à des individus ou groupes privés) ;
- des plantations artificielles anciennes (résultats des projets de la zone) ou nouvelles (à créer, y compris les forêts privées) ;
- des unités agro-sylvo-pastorales : cultures annuelles sous verger, périmètres hydro-agricoles arborés, parcs arborés, bassins de rétention ;
- des zones de parcours : villageoises ou intercommunautaires ;
- des parcs animaliers ;
- des couloirs de migration de la faune ;
- des réserves communautaires de faune ;

- des parcs nationaux : entièrement ou en partie ;
- des réserves botaniques : pour la conservation de la biodiversité végétale ;
- des mises en défens : au niveau d'aires forestières plus ou moins dégradées ;
- des vergers : plantations fruitières ;
- un corridor de bassins de rétention longeant le parcours de la Grande Muraille ;
- des infrastructures sociales de base dans les zones d'emprise de la GMV.

Les unités vertes seront gérées par les populations locales individuellement ou en groupes, les producteurs privés, les structures de recherche /formation, les collectivités locales ou par les services forestiers.



Réalisation : Bureau Aménagement et Cartographie de la Direction des Eaux et Forêts

Figure 1.

Tracé régional indicatif de la Grande Muraille Verte le long de l'axe Dakar- Djibouti

TRACÉ GLOBAL INDICATIF, ESPÈCES VÉGÉTALES ET SYSTÈMES DE MISE EN VALEUR DE LA GRANDE MURAILLE VERTE

L'un des facteurs écologiques déterminants est le niveau de la pluviométrie. Le tracé indicatif général (TIG) donné ci-dessus a été élaboré en utilisant une base de données contenant les limites phytogéographiques du WWF, permettant de bien localiser le

zonage climatique, et une carte de l'occupation du sol permettant d'identifier les limites des grandes formations végétales et les limites des pays traversés par la GMV.

Le tracé définitif à la latitude de chaque pays (composante nationale GMV) sera affiné et validé pour par ses experts nationaux tenant compte des spécificités biophysiques, sociologiques et de priorité. Cependant, le tracé de la composante nationale devra nécessairement s'intégrer au tracé indicatif général (TIG) et tenir compte des paramètres définis, notamment de moyennes pluviométriques.

À titre indicatif, quelques critères pour le choix du tracé de la GMV sont donnés ci-après :

– compte tenu des objectifs assignés à la GMV (limitation de la progression du Sahara, conservation/valorisation de la biodiversité, restauration/conservation des sols, diversification des systèmes d'exploitation, satisfaction des besoins domestiques en produits ligneux et/ou non ligneux, promotion d'activités génératrices de revenus, séquestration du carbone, protection et sécurisation des infrastructures), des systèmes d'utilisation des terres prévus en son sein (plantations artificielles, unités agro-sylvicoles, zones de pâturage, parcs animaliers, réserves communautaires, forêts classées, parcs nationaux, réserves botaniques, mises en défens, vergers) et des acteurs/bénéficiaires de cette GMV (Etats, collectivités locales, producteurs primaires, entrepreneurs privés, structures d'enseignement et de recherche), un tracé indicatif a été proposé à partir de critères tant biophysiques, écologiques que socio-économiques,

– la GMV devrait donc traverser aussi bien des zones habitées (zones de terroirs villageois), où elle pourrait être entretenue par les populations rurales, que des zones non habitées (forêts classées, parcs nationaux, parcs animaliers, réserves botaniques, réserves communautaires), où elle pourrait être entretenue par les Etats, les collectivités locales ou des privés,

– le déficit pluviométrique étant apparu au Sahel comme une contrainte forte à la réalisation des activités prévues dans la GMV, celle-ci a été localisée dans des latitudes où la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 400 et 100 mm. La zone de transition entre les formations steppiques et les zones de savanes soudano-sahéliennes a été retenue. C'est une zone où les espèces locales sont dominées par les genres *Acacia* et *Balanites* qui présentent tous des mécanismes d'adaptation à la sécheresse. Malgré la longue saison sèche qui la caractérise, cette zone présente l'avantage d'avoir un potentiel végétal et écologique pouvant permettre le développement de projets de reconstitutions de la végétation. Sur le plan de l'occupation humaine, la zone sélectionnée correspond à une zone de faible densité, dominée par l'activité pastorale avec un élevage extensif et l'activité agricole,

– le tracé a été élaboré en utilisant une base de données contenant les limites phyto-géographiques de A. AUBREVILLE, permettant de bien localiser le zonage climatique et une carte de l'occupation du sol permettant d'identifier les limites des grandes formations végétales et les limites des pays dans la sous-région,

– la principale entrée pour proposer le tracé définitif est la carte d'occupation du sol.

CRITÈRES ET RECOMMANDATIONS

DANS LE CHOIX DES ESPÈCES ET DES SYSTÈMES DE MISE EN VALEUR DE LA GRANDE MURAILLE VERTE

Le choix et l'intérêt des espèces végétales adaptées à la sécheresse apparaissent comme des éléments stratégiques pour une meilleure réussite des opérations de plantation dans le tracé de la Grande Muraille Verte. Aussi il est demandé aux experts nationaux :

- d'étudier, d'amender et de compléter la liste indicative des espèces végétales les plus appropriées aux aires écologiques du tracé au niveau de leurs pays (liste élaborée par la Commission Scientifique du Sénégal et adoptée par les experts et les ministres en charge de l'Environnement) ;
- d'identifier les espèces les plus adaptées aux zones arides et semi-arides ainsi que des indications nécessaires sur les conditions de réussite de production et de repiquage des plants dans les zones éco-géographiques du tracé et en particulier celles au niveau de votre pays ;
- de promouvoir l'agroforesterie comme technique alternative viable de reboisement ;
- de favoriser les espèces existantes économiquement rentables et acceptées par les populations et en particulier les fruitières forestières qui contribuent à l'équilibre nutritionnel des populations et à la lutte contre la pauvreté ;
- de tenir compte des besoins des populations dans le choix des espèces pour mieux satisfaire leurs besoins en produits ligneux et non ligneux ;
- de prendre en compte les recommandations suivantes dans la sélection des espèces végétales utilisées dans la composante :
 - les espèces endémiques, qui s'y trouvent, s'y maintiennent et s'y développent et les aménagements doivent d'abord prendre en compte ces espèces résilientes pour la plupart,
 - les espèces à grande plasticité écologique qui leur permette de se maintenir et de se développer dans les zones écologiques allant jusqu'à 100 mm de pluviométrie ;
 - les espèces ayant une utilité qui répond aux besoins des populations,
 - les espèces communes à plusieurs pays contigus traversés par le tracé de la GMV.

ETUDES, SUIVI-EVALUATION DE LA COMPOSANTE NATIONALE DE LA GRANDE MURAILLE VERTE

La mise en œuvre de la Grande Muraille Verte donne une grande part aux pays du Tracé. Chaque pays est responsable de la réalisation opérationnelle de sa composante nationale sur la base du schéma global et de l'approche méthodologique adaptés suivant les spécificités locales.

Dans le cadre de la mise en œuvre, la gestion et le suivi de la composante nationale, il est recommandé de façon concomitante aux actions d'installation des éléments de la Grande Muraille, un certain nombre d'actions au niveau national, afin d'apporter les corrections nécessaires pour l'atteinte des objectifs et résultats attendus.

Les actions portent sur les volets suivants :

Situation de référence, cadre biophysique et écologique. L'analyse s'appuiera sur les domaines suivants :

- occupation des sols et le foncier ;
- systèmes agricoles et de production (produits forestiers, espèces fourragères) ;
- ressources hydriques et énergétiques ;
- élevage ;
- cadre biophysique ;
- zones écogéographiques et contraintes hydroclimatiques et édaphiques ;
- contexte culturel et socio-économique ;
- types d'infrastructures économiques et sociales ;
- techniques efficaces de DRS/CSE (Défense et restauration des sols / Conservation des Sols et des Eaux) ;
- tests d'introduction de nouvelles techniques agro-sylvo-pastorales : irrigation, gestion des troupeaux, techniques culturales, énergies nouvelles, etc.

Impacts sociaux et environnementaux attendus de la GMV

- inventaire des ressources naturelles (produits forestiers, miel, lait, fromage et, sols arables, ressources en eau, etc...), les infrastructures sociales et les opportunités d'activités génératrices de revenus ;
- identification et gestion des impacts environnementaux.

Conservation des sols, suivi pédologique et suivi environnemental

- établissement de l'état de référence et les cartes d'aptitude ;
- suivi pédologique ;
- analyse environnementale.

Micro-réalisations

Le succès de la recolonisation des zones arides et semi-arides d'Afrique sera fortement dépendant du recul de la pauvreté en milieu rural par l'amélioration des revenus à travers des activités génératrices de revenus au profit de groupements féminins, d'organisations des jeunes et l'accès aux besoins domestiques et aux infrastructures sociales de bases (santé, éducation etc.). À cet effet, des micro-réalisations seront développées grâce à la mise en place d'un Fonds d'Appui revolving de microcrédits et l'établissement de l'entreprenariat féminin pour appuyer et développer des activités Génératrices de revenus (AGR) et favoriser la création d'infrastructures sociales de base (Santé et éducation).

Justificatif et axes de financement de la Grande Muraille Verte

La GMV intègre de par les objectifs et les impacts attendus, plusieurs mécanismes associés au Développement et à l'Environnement. Il s'agit en particulier : (i) du Développement Durable, (ii) de la Lutte contre la Pauvreté, (iii) de la Réduction des

Migrations écologiques et économiques et enfin du Développement Propre. Aussi, la GMV apparaît comme un modèle de Développement Intégré des Zones Déshéritées, zones qui gagnent de plus en plus de superficies en Afrique et contribuent fortement à l'insécurité alimentaire de ces pays. La Grande Muraille Verte sera ainsi un patrimoine de l'Humanité et son financement doit intéresser la communauté internationale, à travers les divers mécanismes de financement des Conventions relatives notamment à la désertification, la biodiversité et les Changements climatiques

Par ailleurs, l'apport non négligeable de la GMV dans les politiques nationales de lutte contre la désertification, de conservation et de restauration de la biodiversité, de développement social et économique justifie pleinement l'engagement des pays à participer au financement de la grande Muraille verte à travers leurs budgets d'investissements.

Les axes majeurs de financement portent essentiellement sur les actions de mise en valeur, de suivi et d'évaluation de la Grande Muraille verte. Elles concernent en particulier :

- l'Agroforesterie. Ce volet porte sur la mise en place des systèmes de production avec tout le dispositif de protection. Elle inclut aussi tous les coûts de la communication, formation sensibilisation.
- le réseau de bassins de rétention et d'ouvrages hydrauliques,
- la Conservation des sols et le suivi pédologique,
- les microréalizations,
- le suivi environnemental,
- le renforcement de capacités des ressources humaines et d'équipement logistique et technique des structures nationales.

Dispositions institutionnelles et gouvernance

Coordination politique

La Commission de l'Union africaine et le Secrétariat général de la CEN-SAD assureront la tutelle et la coordination politiques de la mise en œuvre de l'Initiative en relation avec les Communautés économiques régionales (CER) telles que la CEDEAO, CEEAC et l'IGAD.

Coordination et Suivi au niveau régional

Compte tenu de l'envergure régionale du projet, la coordination et le suivi au niveau régional seront assurés par une Agence Pan-Africaine de la Grande Muraille Verte (APANGMV). Elle assure la coordination et le suivi au niveau régional de la mise

en œuvre de la Grande Muraille sous l'autorité du Conseil des Ministres constitué des Ministres en charge de l'Environnement des Etats membres. Elle comprend par ailleurs un Comité Technique d'Experts.

Réalisation, coordination et suivi au niveau national

La mise en place de la Grande Muraille Verte (GMV) se fera selon une approche participative ascendante, associant les populations à la conception, à la mise en œuvre et au suivi et à la conservation des réalisations. Ainsi au niveau national, la responsabilité de réalisation opérationnelle de la composante nationale est confiée à une structure nationale créée selon la législation du pays. Elle est le point focal de l'APANGMV.

Le Schéma présenté ci-après, donne l'organigramme de la structure nationale en charge de la mise en œuvre opérationnelle de la composante sénégalaise de la Grande Muraille Verte. L'Agence Nationale de la Grande Muraille Verte (ANGMV) est créée par décret sous la tutelle du Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature, des Bassins de Rétention et des Lacs artificiels. Elle est administrée par un Conseil de Surveillance composé de représentants des divers ministères susceptibles de participer dans les activités de la Grande Muraille. L'ANGMV s'appuie sur un Comité Scientifique et Technique et des Comités Techniques Régionaux installés dans les régions administratives traversées par la muraille verte.

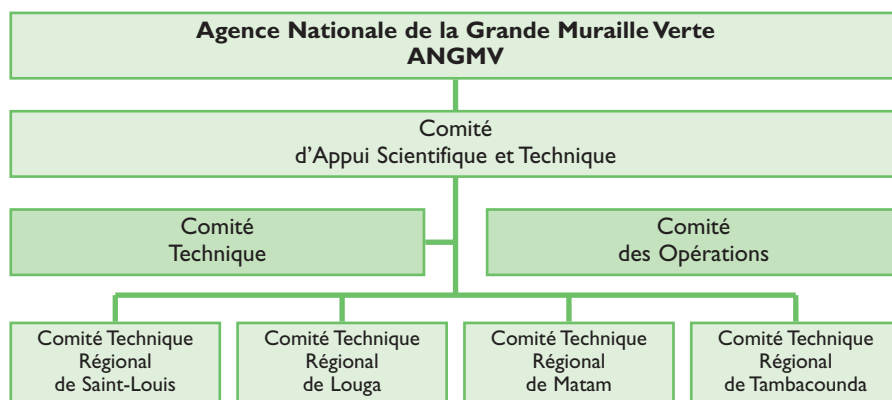


Figure 2.

Schéma de l'organigramme de la structure nationale de la Grande Muraille Verte au Sénégal

Bibliographie

- AU / CEN-SAD (2009)
Plan of Action for the Implementation of the Great Green Wall of the Sahara and Sahel Initiative. Draft for submission to the AU Executive Council Addis Ababa, Ethiopia, February 1 – 3, 2009
- Commission de l'Union africaine, Département de l'agriculture et de l'économie rurale, 2006 : La Grande Muraille Verte dans le cadre de l'Initiative Sahélo Sahélienne, plan d'action pour la mise en œuvre, 21 p.
- CEN-SAD et OSS, 2006 : La Grande Muraille Verte dans le cadre de l'Initiative Sahélo Sahélienne, brève analyse et directives préliminaires, 39 p.
- CEN-SAD et OSS, 2006 : la Grande Muraille Verte dans le cadre de l'Initiative Sahélo Sahélienne, programme d'action (2008-2010), 26 p.
- Commission de l'Union africaine, Département de l'agriculture et de l'économie rurale, 2007 : La Grande Muraille Verte dans le cadre de l'Initiative Sahélo Sahélienne.
- Commission Scientifique du Sénégal (2006) : Note Conceptuelle sur la Grande Muraille Verte, 11 p.
- Commission Scientifique du Sénégal (2006) : Note Conceptuelle sur la Grande Muraille Verte, 43 p.
- Commission Scientifique du Sénégal (2006) : Critères de présentation, de la GMV et liste indicative des espèces végétales, 8 p.
- Commission Scientifique du Sénégal (2008) : Financement du PGMVSS : éléments indicatifs de coûts de mise en œuvre, 6 p.
- Commission Scientifique du Sénégal (2008) : Document projet de la Grande Muraille Verte : Termes de Référence, 13 p.
- Commission Scientifique du Sénégal (2008) : Rôle des petits barrages dans la Grande Muraille Verte, 15 p.
- Comité Ad hoc Commission de l'Union Africaine, Secrétariat CENSAD et Gouvernement du Sénégal (2008) : projet de Plan d'Action 2008 – 2010 du programme de la Grande Muraille Verte, 16 p.
- Gouvernement du Sénégal (2008) : avant projet de convention portant création de l'Agence Pan africaine de la Grande Muraille Verte, 10 p.

Partie I

Espèces végétales de la Grande Muraille Verte

Grande Muraille Verte : choix des espèces végétales

AMADOU TIDIANE BA
Université de Ziguinchor, Département Biologie végétale, Fac. Sciences et Techniques,
Université Cheikh Anta Diop, Dakar Sénégal
ise@orange.sn, ba.atidiane@gmail.com

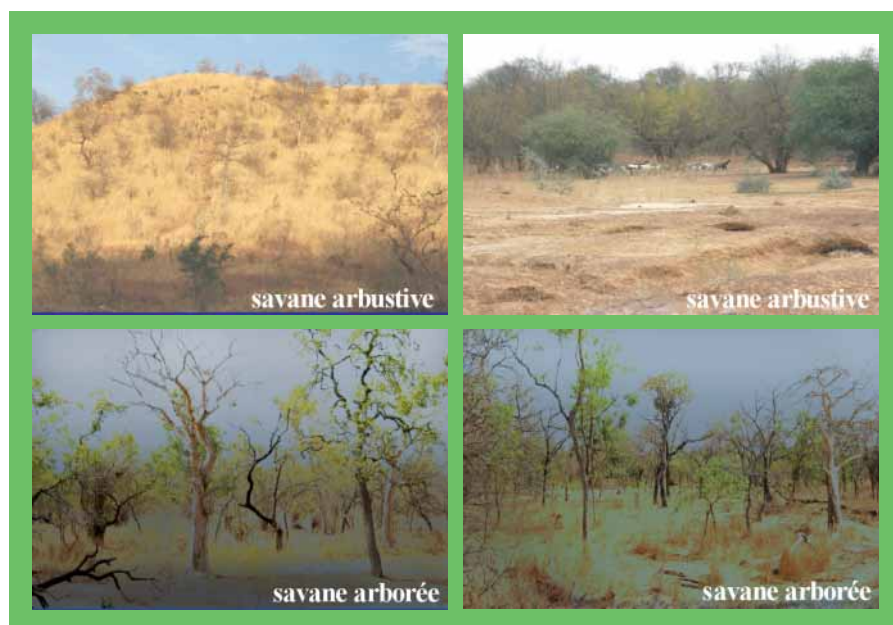
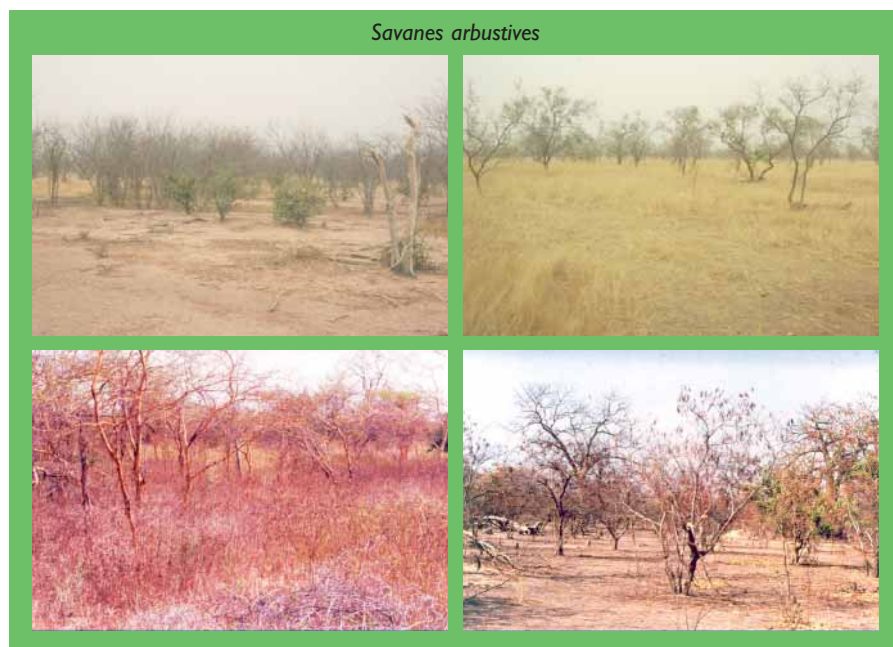
Introduction

La Grande Muraille Verte ou Great Green Wall doit être une bande de végétation constituée, d'unités naturelles, artificielles, de zones d'habitation, de culture et d'élevage dont le rôle premier est de constituer la première ligne de résistance et de défense contre la désertification dont souffre notre continent. Elle est une bande de végétation, multi-espèces, d'environ 7 000 km de long allant de Dakar à Djibouti et large de 15 km.

Elle est localisée dans la zone phytobio-géographique caractérisée par des moyennes pluviométriques annuelles comprises entre 100 et 400 mm. Elle traverse la zone de transition entre les formations steppiques et les zones de savanes soudano sahéliennes où la densité des populations est faible et les activités essentiellement pastorales et agricoles et se distingue par une végétation et une flore indigène typiques dont nous allons vous entretenir pour guider les choix dans les espèces.

Choix des espèces et du tracé

La végétation parfois très rare dans ces zones arides à semi-arides est à dominante Steppes (arbustives / arborées) et Savanes (arbustives / arborées / boisées). Les photos ci-après illustrent ces types de végétation.



Le choix global des espèces et du tracé s'appuiera sur les critères biophysiques, écologiques et socioéconomiques et sera affiné tenant compte des particularités de chaque zone géographique.

Dans ce cadre le choix devra se faire tenant compte :

- des espèces à valeur socio-économique (alimentaire, pastorale, commerciale, énergétique, médicinale, culturelle...);
- des espèces d'importance écologique (amélioration du cadre de vie, séquestration du carbone, protection et amélioration des sols, infiltration des eaux de pluies...).
- des espèces résilientes aux conditions climatiques et écologiques de la GMV (zone arides et semi-arides) marquées avec une plasticité écologique allant de 100 à 400 mm de pluviométrie ; notamment des catégories des ligneuses et des herbacées,

Listes indicatives des espèces proposées

Tableau I :
liste des espèces ligneuses

N°	Espèces	Usages	Ecologie	Distribution
1	<i>Acacia raddiana</i> Savi / <i>tortilis</i> (Forsk.) Hayne	Bois d'énergie, de service, fourrage, médicaments	- 50 à 1000 mm, - sols sableux (dunes fixées), ferrugineux tropicaux, limons sableux, éboulis latéritiques	Sénégal, Mali, Niger, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti
2	<i>Acacia senegal</i> L. (Willd.)	gomme (alimentation, médicaments,	- 100 à 800 mm, - sols sableux (dunes fossiles), cosmétiques) fourrage, bois d'énergie, de service	Sénégal, Mali, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti limoneux légers (dépressions), lithosols
3	<i>Acacia nilotica</i> (L.) Willd. ex Del. var. <i>adansonii</i> et var. <i>tomentosa</i> / <i>scorpioides</i> L. (A. Chev.) bordures cours d'eau var. <i>adstringens</i> Schum	bois d'œuvre, d'énergie, de service, fourrage, alimentation, gomme, tannins	- 100 à 1000 mm, - sols profonds sablo-limoneux (dunes fossiles), argileux,	Sénégal, Mali, Niger, Nigeria, Cameroun, Soudan, Djibouti médicaments,
4	<i>Boscia senegalensis</i> (Pers.) Lam. ex Poir.	alimentation, fourrage, médicaments	- 50 à 1000 mm - sols sablo-argileux (dunes consolidées), argileux, rocheux, pierreux	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Tchad, Soudan
5	<i>Acacia seyal</i> Del. / <i>stenocarpa</i> Hochst.	fourrage, gomme, bois d'énergie, de service, médicaments	- 250 à 1000 mm, - sols argileux, pierreux, dépressions inondables	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Nigeria, Cameroun, Soudan, Djibouti

Tableau 1 (suite)

N°	Espèces	Usages	Ecologie	Distribution
6	<i>Acacia laeta</i> R. Br.	gomme, fourrage, bois de service, d'énergie	- 250 à 750 mm, - sols sablo-argileux, rocheux, pierreux	Mali, Burkina, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti
7	<i>Boscia angustifolia</i> A. Rich.	bois d'énergie, de service, fourrage, alimentation, médicaments	- 250 à 1000 mm - sols rocailleux, latéritiques, argileux, bordures des mares	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Nigeria, Tchad, Soudan, Djibouti
8	<i>Boscia salicifolia</i> Oliv.	bois d'énergie, fourrage, alimentation	- 250 à 1000 mm - sols légers	Niger, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti, Sénégal
9	<i>Calotropis procera</i> (Ait.) Ait.	médicaments, fibres, fourrage	- 250 à 500 mm - sols dégradés	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Tchad, Soudan
10	<i>Leptadenia pyrotechnica</i> (Forsk.) Decne. / <i>spartium</i> Wright.	médicinale, fourrage chameaux, alimentation	- 250 à 500 mm - sols sableux, dunes	Sénégal, Mali, Niger, Tchad, Soudan
11	<i>Commiphora africana</i> (A. Rich.) Engl.	bois de service, d'énergie, fourrage, alimentation, médicaments, insecticide	- 250 à 800 mm - sols sableux, argileux, latéritiques	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Nigéria, Cameroun, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti
12	<i>Combretum aculeatum</i> Vent.	bois d'énergie, alimentation, fourrage, médicaments	- 250 à 800 mm - sols sableux, argileux, pierreux, sur termitières	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti
13	<i>Capparis decidua</i> (Forsk.) Edgew.	médicaments, fourrage	- 250 à 500 mm - sols sableux, berges cours d'eau et bordures mares	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Tchad, Soudan, Djibouti
14	<i>Maerua angolensis</i> DC.	alimentation, bois de service, fourrage, médicinale	- 250 à 800 mm - sols sableux, dunes	Sénégal, Mali, Soudan, Erythrée, Djibouti
15	<i>Maerua crassifolia</i> Forsk.	fourrage, bois service, fruits, médicinale, alimentation	- 250 à 500 mm - sols sableux, dunes	Sénégal, Mali, Soudan, Djibouti
16	<i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Del.	bois d'énergie, de service, fourrage, alimentation, médicaments	- 250 à 1000 mm, - grande amplitude écologique, sols sableux, pierreux, argileux, alluviaux, bordures mares	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Nigeria, Cameroun, Tchad, Soudan
17	<i>Cadaba farinosa</i> Forsk.	bois d'énergie, alimentation, fourrage, médicaments	- 250 à 500 mm - sols sableux (dunes consolidées), rocailleux, bordures de mares	Sénégal, Mali, Burkina, Niger, Cameroun, Tchad, Soudan
18	<i>Grewia tenax</i> (Forsk.) Fiori	fourrage, alimentation	- 250 à 500 mm - sols rocailleux, argileux, bordures de mares	Sénégal, Mali, Niger, Soudan
19	<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam.	fruits comestibles, médicinale, fourrage	- 250 à 500 mm - sols sableux, rocheux, bordures cours d'eau	Sénégal, Mali, Niger, Burkina, Tchad, Cameroun

Tableau 1 (suite)

N°	Espèces	Usages	Ecologie	Distribution
20	<i>Acacia mellifera</i> Benth.	fourrage, bois de service, d'énergie	- 250 à 500 mm - sols argileux	Nigeria, Tchad, Soudan, Erythrée, Djibouti
21	<i>Acacia</i> <i>Ehrenbergiana</i> Hayne / <i>flava</i> (Forsk.)Schwft.	fourrage	- 300 à 400 mm - sols sableux, argileux	Niger, Tchad, Cameroun, Soudan
22	<i>Cadaba glandulosa</i> Forsk.	fourrage	- 250 à 500 mm - sols pierreux	Burkina, Mali, Niger, Tchad, Soudan
23	<i>Ficus ingens</i> (Miq.) Miq.	médicament,	- 250 à 500 mm - rochers de sources,	Sénégal, Mali, Niger, Nigéria, Tchad
24	<i>Salvadora persica</i> L.	bois service, sel de cuisine, médicinale	- 250 à 500 mm - berges fleuves, lacs, mares	Sénégal, Mali, Niger, Tchad
25	<i>Grewia flavescens</i> Juss.	médicaments, alimentation, fourrage	- 250 à 500 mm - bordures mares, sols sableux, argileux, pierreux, latéritiques	Sénégal, Mali, Niger
26	<i>Grewia bicolor</i> Juss.	médicaments, fourrage, alimentation, bois de service, d'énergie	- 250 à 800 mm - bordures mares, sols sableux, pierreux, latéritiques	Sénégal, Mali, Niger
27	<i>Grewia villosa</i> Willd.	fourrage, médicaments, alimentation, bois de service	- 250 à 500 mm - sols sableux, rocheux, pierreux, cuirasses, bordures cours d'eau	Niger, Sénégal
28	<i>Tamarix</i> <i>senegalensis</i> DC. / <i>gallica</i> L.	médicinale, bois d'énergie	- 250 à 500 mm - sols sableux (dunes), salés, dépressions saumâtres, bordures des cours d'eau	Sénégal, Niger
29	<i>Guiera senegalensis</i> J.F Gmel	médicinal, fourrage, combustible, teinture	sols sableux lessivés,	Sénégal, Mali, Niger, Burkina Faso
30	<i>Hyphaena thebaica</i> (L) Mart	alimentation, médicinal	sols sableux, termitières, bas fonds inondables	Sénégal, Mali, Niger, Burkina Faso

Espèces ligneuses

Sur cette base on distingue trois groupes d'espèces ligneuses :

- Le premier groupe comprend des espèces qui peuvent se développer et se maintenir à 50 mm de pluie mais qu'on rencontre jusqu'à 1000 mm ;
- Le deuxième groupe comprend les espèces plus exigeantes qui ne peuvent se développer qu'au-dessus de 250 mm de pluie ;
- La limite entre ces deux groupes est moins nette que ne l'indique la pluviométrie ;
- Le troisième groupe a les mêmes caractéristiques écologiques que celles du deuxième groupe, mais il a une distribution géographique limitée soit à l'Est soit à l'Ouest.

Tableau 2.
Liste des espèces herbacées

N°	Espèces	Usages	Ecologie	Distribution
1	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.	Fourrage	250-700 Sols sableux, jachères	Sénégal, Mauritanie, Mali, Algérie
2	<i>Chloris prierii</i> Kunth	Fourrage	Sols sableux,	Sénégal
3	<i>Schoenofeldia gracilis</i> Kunth.	Fourrage	Sols sableux, sols sablo argileux	Sénégal
4	<i>Zornia glochidiata</i> Reichb ex DC.	Fourrage		Afrique du Sud
5	<i>Aristida mutabilis</i> Trin.	Fourrage	250-550 mm Jachères, bord des routes	Afrique tropicale
6	<i>Aristida adescensionis</i> L.	Fourrage	Bords des routes, sols rocheux, jachères	Sénégal, Mali
7	<i>Aristida hordeacea</i> Kunth (var. <i>Longiaristata</i> Hennard)	Fourrage		Afrique australe, Afrique du Nord
8	<i>Panicum laetum</i> Kunth.	Fourrage	300- 700 mm Prairies aquatiques, bas-fonds	Mali
9	<i>Panicum subalbidum</i> Kunth	Fourrage	300- 700 mm Prairies aquatiques, bas-fonds	Mali, Afrique australe
10	<i>Echinochloa colona</i> (L) Link	Fourrage	300- 700 mm Prairies aquatiques, bas-fonds, lacs et mares	Sénégal, Mali
11	<i>Aristida papposa</i> Trin et Rupr.	Fourrage		Afrique du Nord, Afrique tropicale
12	<i>Panicum turgidum</i> Forssk	Fourrage	Sols sableux,	Sénégal, Mali, Mauritanie, Algérie
13	<i>Eragrostis tremula</i> Hochst.ex Steud	Fourrage	250-500 mm Sols gravillonnaires, jachères, dépressions	Sénégal, Mali, Burkina Faso, Egypte
14	<i>Cymbopogon proximus</i> (A. Rich.) Maire et Weiller	Fourrage		Mauritanie, Algérie, Egypte
15	<i>Blepharis linariifolia</i> Pers.	Fourrage		Afrique du Nord, Afrique tropicale
16	<i>Aristida funiculata</i> Trin. & Rupr.	Fourrage		Mauritanie, Algérie
17	<i>Indigofera sessiliflora</i> DC.	Fourrage		Mauritanie Libye, Egypte
18	<i>Aristida pallida</i> steud	Fourrage		Afrique, du Nord, Afrique tropicale
19	<i>Cyperus conglomeratus</i> Rottb.	Fourrage	250-500 mm	Mauritanie, Maroc, Libye, Egypte

Tableau 2 (suite)

N°	Espèces	Usages	Ecologie	Distribution
20	<i>Brachiaria deflexa</i>	Fourrage	250-500 mm Sols sableux, jachères,	Sénégal, Mali, Ghana, Egypte, Afrique du Sud
21	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd	Fourrage	250-500 mm Sols sableux, jachères, champs	Sénégal, Afrique du Nord, Afrique du Sud
22	<i>Echinicloa stagnina</i> (Retz.) P. Beauv	Fourrage	250-500 mm	

Espèces herbacées

- Groupe d’espèces importantes à cause de leurs rôles dans les pâturages ;
- Une synergie devrait être développée avec le Pôle Pastoral Zone Sèche (PPZS) qui est une unité de recherche appliquée regroupant l’UCAD, l’ISRA, le CSE, l’ENEA et le CIRAD ;
- Ce pôle possède une documentation importante sur les espèces herbacées et leur utilisation dans le domaine pastoral ;
- La zone d’étude du PPZS recouvre exactement celle de la grande muraille verte. Les aménagements mis en place par le PPZS devraient être intégrés dans le programme de la GMV.

Conclusion

La Grande Muraille Verte est une initiative très importante avec des impacts et retombées positifs parce qu’elle devait contribuer à :

- limiter la désertification ;
- séquestrer le carbone ;
- restaurer l’environnement dans des zones presque désertiques ;
- créer un cadre de vie propice au développement d’activités génératrices de revenus mais aussi de bien-être économique et social.

Dans ce contexte, la flore et la végétation sont les premiers facteurs structurants pour la restauration de l’environnement. Le choix des espèces est une étape importante dans le mécanisme de mise en place de la grande muraille verte. Dans les choix opérés, une attention particulière doit être accordée aux espèces indigènes. L’utilisation d’espèces exogènes doit être faite avec beaucoup de prudence. L’utilité des espèces pour les populations est aussi importante à prendre en compte, c’est pourquoi la liste que nous avons donnée est indicative. Il revient à chaque pays de choisir les espèces les plus utiles.

Bibliographie

- Arbonier, M. 2000 –
Arbres, arbustes et lianes des zones sèches
d'Afrique de l'Ouest, CIRAD, MNHN, UICN,
539 pages.
- Aubréville, A. 1950.
Flore Forestière Soudano Guinéenne.
A.O.F. - Cameroun - A.E.F. ORSTOM, 523 p.
- Gillet, H. (1986) –
Desert and Sahel, laboratoire d'ethnobotanique,
57 Rue Cuvier, Paris, France, pp. 151-181,
in *Plant Ecology in West Africa ;
systems and processes*, 357 pages.
- Nees, R. R. (1977) –
A manual of Ghana grasses,
Natural Resources Institute, 261p.
- Thulin M. 1993.
Flora of Somalia. Vol. 1.,
Royal Botanical Garden Kew, 493 p.
- Trochain, J. (1940 ?). –
Contribution à l'étude de la végétation
du Sénégal, librairie LAROSE,
II rue Victor-Cousin, Paris V, 433p.
- UNESCO, 1981 –
Ecosystèmes pâturés tropicaux ;
rapport sur l'état des connaissances
préparé par l'Unesco,
le PNUE et la FAO, 675p.
- Von Maydell, H.-J. 1990.
Arbres et arbustes du Sahel.
Leurs caractéristiques et leurs utilisations.
Verlag Josef Margraf, 531 p.
- White, F. 1986.
La végétation de l'Afrique.
Mémoire accompagnant la carte de végétation
de l'Afrique. UNESCO/AETFAT/UNSO.
ORSTOM-UNESCO, 384 p.

Espèces prioritaires et options agroforestières pour la mise en valeur de la Grande Muraille Verte

MAHAMANE LARWANOU
African Forest Forum (AFF) C/o World Agroforestry Center (ICRAF)
United Nations Avenue
P.O. Box 30677 – 00100, Nairobi, Kenya
E-mail : m.larwanou@cgiar.org
Website : www.afforum.org

Résumé

Le Sahel connaît des sécheresses périodiques qui peuvent durer des années consécutives et entraîner la famine ; la saison sèche dure 9 mois par an. La pression foncière, liée à la démographie qui augmente rapidement, a entraîné la dégradation des sols et du couvert végétal, notamment les arbres qui ont toujours constitué des sources de sécurité alimentaire, nutritionnelle et économique. Depuis des années, des travaux de recherche ont été conduits au Sahel afin d'intégrer les connaissances paysannes dans le choix des espèces et aussi dans l'amélioration des techniques et technologies utilisées par les paysans dans la gestion de l'environnement et l'amélioration de leurs conditions de vie.

Sur la base de ces travaux, un certain nombre d'espèces ligneuses prioritaires ont été définies ainsi que les technologies agroforestières prometteuses. Certaines des espèces identifiées sont : *Adansonia digitata*, *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Moringa oleifera* et *Ziziphus mauritiana*. Ces espèces non seulement sont alimentaires mais procurent des revenus aux populations tout en préservant l'environnement. En plus, des techniques et technologies permettant leur gestion et assurant la diversification des cultures y ont été proposées. L'intégration de ces espèces et les technologies proposées pourraient contribuer à mieux prendre en compte la préoccupation des producteurs dans la mise en place de la Grande Muraille Verte.

Mots-clés :

SAHEL, ESPÈCES LIGNEUSES PRIORITAIRES, TECHNOLOGIES AGROFORESTIÈRES,
GRANDE MURAILLE VERTE.

Abstract

The Sahel region is known to have periodic droughts lasting for consecutive years and leading to famine ; the dry season could last up to 9 years. Land pressure due to increase in human population has led to soil and vegetation cover degradation, especially trees which constitute sources of food, nutritional and economic security. For many years, research works have been conducted in the Sahel in order to integrate farmer's knowledge in the selection of tree species and also in improving the techniques and technologies used by farmers in environmental management and improvement of their wellbeing.

Results from these research works have defined some priority tree species as well as promoting agroforestry technologies. Some of these tree species are : *Adansonia digitata*, *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Moringa oleifera* and *Ziziphus mauritiana*. These species, not only are food for local populations but also constitute source of revenues and play a vital role in environmental protection. In addition to that role, techniques and technologies for management of these species in parklands and ensuring the crop diversification were proposed. The integration of species and the proposed technologies could contribute to taking into account the concerns of local populations in the establishment of the great green wall.

Keywords:

SAHEL, PRIORITY TREE SPECIES, AGROFORESTRY TECHNOLOGIES,
GREAT GREEN WALL.

Introduction

Les pays sahéliens sont caractérisés par de faibles revenus, une démographie galopante et une insécurité alimentaire généralisée. Une grande croissance démographique, les périodes de sécheresse fréquentes et prolongées, une pauvre régénération naturelle des parcs agroforestiers font que les Sahéliens exercent une forte pression sur les écosystèmes conduisant généralement à une surexploitation et à une forte dégradation des ressources agroforestières (Vanderbelt, 1992).

La conséquence immédiate est une perte de la biodiversité agroforestière qui compose ces écosystèmes naturels, spécialement les espèces fruitières adaptées aux conditions du Sahel.

Pour les 50 millions de personnes vivant au Sahel, le grand défi est simplement comment se nourrir et améliorer leurs conditions de vie. La pauvreté est partout dans les pays sahéliens avec un revenu en dessous du seuil de pauvreté. À l'exception du Sénégal, tous les pays sahéliens sont classés comme « sous-développés » et la plupart sont en dernière position sur le tableau de l'indice du développement humain. L'insécurité alimentaire, la malnutrition et la dégradation de l'environnement sont endémiques en milieu rural où vive la majorité des pauvres. La forte pression due à l'augmentation de la population exacerbe la base de la pauvreté et la dégradation

des ressources naturelles ; cela est justifié du fait de la déforestation, la perte de la biodiversité, la réduction de la taille des champs par ménage, la baisse de la fertilité des terres et la réduction de l'emploi local.

Le défi qui est le nôtre est d'appliquer et intégrer la science avec les connaissances locales dans le souci d'améliorer les conditions de vie et de production des ménages d'une manière durable, en les permettant d'avoir accès à une alimentation suffisante et équilibrée tout en améliorant leurs revenus. Améliorer la productivité des aliments de base comme le mil ou le sorgho, ne permettra ni d'atteindre le besoin de subsistance et encore moins leur permettre d'avoir des opportunités de sortir du cycle vicieux de la pauvreté (Akinnifesi *et al.*, 2000a).

Par conséquent, tout effort sur le terrain – susceptible de contribuer directement à la réduction de la pauvreté et à l'amélioration de l'utilisation des terres, protégeant les ressources naturelles fragiles et luttant contre la désertification – est urgent et crucial pour l'avenir et la survie des habitants du Sahel.

La présente communication s'insère dans ce cadre.

Espèces agroforestières prioritaires

La majorité des pauvres agriculteurs sahéliens pour lesquels, l'insécurité alimentaire et la malnutrition chronique sont les maux quotidiens, les fruits et les autres produits locaux provenant des espèces agroforestières locales, constituent des sources riches et moins coûteuses sur lesquelles les couches les plus vulnérables (femmes et enfants) survivent. La contribution des fruits locaux sauvages et les feuilles (riches en minéraux, vitamines et les acides aminés) à la nutrition est importante principalement en période de soudure (fin de saison sèche et début de la saison hivernale) ainsi que pendant les grandes périodes de sécheresse.

Connaissant l'importance de ces espèces locales, l'ICRAF, en collaboration avec les systèmes nationaux de recherche agronomiques (SNRAs), (ISRA au Sénégal, IER au Mali, INERA au Burkina Faso et INRAN au Niger), a entrepris en 1995 dans des systèmes d'utilisations des terres de ces 4 pays un exercice extensif de priorisation participative. Cet exercice a impliqué des producteurs, les agents de vulgarisations de ces pays. A la fin de cet exercice, 15 espèces prioritaires ont été choisies par les paysans (tableau 1).

Parmi ces 15 espèces, les plus citées dans les 4 pays sont : le baobab (*Adansonia digitata*), le karité (*Vitellaria paradoxa*), le néré (*Parkia biglobosa*), le tamarin (*Tamarindus indica*) et le jujubier (*Ziziphus mauritiana*).

Ces espèces ont été choisies à cause de leurs potentialités alimentaires et nutritionnelles ainsi que pharmacologiques et génératrices de revenus.

Adansonia digitata : la pulpe blanche extraite des fruits de baobab est utilisée dans une gamme de boissons fraîches ou chaudes. Ces extraits sont très riches en vitamines C évaluée à plus de 10 fois que la teneur des oranges alors que les graines aussi contiennent de l'huile consommée par l'homme et riche en d'autres éléments.

Tableau 1.

Les 15 espèces classées premières dans les 4 pays du programme sahélien d'agroforesterie
 Espèces déterminées à partir des enquêtes réalisées auprès des paysans
 en utilisant les directives de ICRAF-ISNAR pour la définition des priorités
 (Franzal et al., 1995);
 seules 14 espèces ont été mentionnées au Sénégal
^a = espèces exotiques

Espèces	Classement par pays			
	Burkina Faso	Mali	Niger	Sénégal
<i>Acacia macrostachya</i>	14	-	-	-
<i>Acacia nilotica</i>	-	-	-	14
<i>Adansonia digitata</i>	5	2	1	1
<i>Azadirachta indica</i> ^a	-	-	-	10
<i>Balanites aegyptiaca</i>	8	11	2	6
<i>Bombax costatum</i>	6	-	-	-
<i>Borassus aethiopicum</i>	-	10	6	-
<i>Combretum nigricans</i>	-	-	13	-
<i>Cordyla pinnata</i>	-	9	-	2
<i>Detarium microcarpum</i>	11	14	15	9
<i>Diospyros mespiliformis</i>	10	-	3	-
<i>Faidherbia albida</i>	7	6	10	3
<i>Ficus gnaphalocarpa</i>	15	-	-	13
<i>Ficus iteophylla</i>	-	-	-	8
<i>Hyphaene thebaica</i>	-	-	9	-
<i>Khaya senegalensis</i>	-	8	14	-
<i>Landolphia senegalensis</i>	-	15	-	-
<i>Lannea microcarpa</i>	3	5	-	-
<i>Parinari macrophylla</i>	-	-	8	12
<i>Parkia biglobosa</i>	2	3	12	7
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	-	13	-	-
<i>Saba senegalensis</i>	13	-	-	-
<i>Sclerocarya birrea</i>	12	7	-	-
<i>Sterculia setigera</i>	-	-	-	11
<i>Tamarindus indica</i> ^a	4	4	11	4
<i>Vitellaria paradoxa</i>	1	1	4	-
<i>Vitex doniana</i>	-	-	5	-
<i>Ziziphus mauritiana</i>	9	12	7	5

Les feuilles de baobab sont utilisées fraîches ou sèches, riches en carotène beta, vitamines A, calcium, fer, potassium, magnésium, manganèse, molybdène, phosphore et zinc.

Vitellaria paradoxa : L'huile de cette espèce est utilisée dans la cuisine, la fabrication des savons, le cosmétique et dans les industries de chocolaterie. Elle est riche en vitamines A, D, E et F et a des qualités hydratantes, protectives et curatives.

Parkia biglobosa : les grains de néré sont fermentés pour faire du soumbala, un produit avec une bonne saveur et utilise pour manger le met local au Sahel (Touwo) fait à base du sorgho, du mil ou du maïs. Elle est riche en protéine, lipides, acide linoléique, et la vitamine B2 et commercialisée dans les marchés urbains. La poudre sèche est riche en carotène alpha et beta. La pulpe jaune de la gousse est mangée crue, sous forme de gâteau, utilisée dans les boissons et est riche en énergie.

Tamarindus indica : la pulpe du tamarin est utilisée dans une gamme de produits industriels et domestiques comme les jus, l'infusion, sirop, etc. C'est aussi un bon ingrédient dans les préparations culinaires. Les graines grillées sont consommées ainsi que les feuilles et les fleurs. Autres produits très utilisés dans l'industrie alimentaire est la poudre du tamarin qui contient 50 % de gomme et 100 % de gomme polysaccharide de tamarin (Vantomme, 1996).

Ziziphus mauritiana : les fruits du jujubier sont consommés frais ou séchés, bouillis avec du riz ou du mil, gâteau, jus, etc. une forte variation a été mise en évidence en termes de valeur nutritionnelle des fruits du jujubier ; d'une manière générale, les fruits sont riches en sucre, vitamines C et A, carotène, calcium et magnésium.

Ces espèces sont économiquement importantes tant au niveau local que national.

D'après Lamien *et al* 1996, les amandes de karité sont vendues à US\$ 150 par tonne au Burkina Faso en 1994-1995 et génèrent un revenu de US \$ 20-35 par ménage chaque année (Boffa *et al.*, 1996). Le prix des amandes du karité, fabriqué localement offre des produits avec des valeurs ajoutées comme beurre et huile qui sont commercialisés sur le plan international pour les cosmétiques, les buts pharmaceutiques et l'alimentation.

Une augmentation du revenu des ménages de US\$ 270 est obtenue chaque année à travers la vente des fruits du néré (ICRAF, 1997). Bonkoungou (1995) a indiqué une revenue de US\$ 55 par ha et par an pour un champ avec 8 arbres de *V. paradoxa* et *P. biglobosa* à l'hectare.

Technologies agroforestières prometteuses

Plusieurs technologies agroforestières ont été développées ou améliorées sur la base des pratiques paysannes et se sont avérées très prometteuses au Sahel en particulier et dans les zones arides en Afrique d'une manière générale. Certaines de ces technologies sont :

Les banques alimentaires à base de ligneux

Cette technologie innovatrice se compose des arbres cultivés de baobab et de moringa dans des parcelles semées, fertilisées et irriguées pour la production intensive et pendant toute l'année de feuilles fraîches. Le travail sur la production végétale de baobab intensif a commencé en 1995 par l'ICRAF et l'INRAN au Niger. Il a été utilisé des approches participatives de recherches et de développement avec des études socio-culturelles et économiques (croyance et perceptions du paysan). La technologie a été développée pour permettre aux ménages ruraux d'atténuer ou de réduire le coût annuel de subsistance. Cependant, une demande continue des feuilles, couplée avec la préférence du consommateur pour les feuilles fraîches, indique que les banques alimentaires à base de ces deux espèces ligneuses offrent des possibilités intéressantes du marché pour générer des emplois et des revenus aux producteurs ruraux.

Dans une grande partie du Sahel, et en particulier au Mali (les communautés de bambara, de Manding et de Soninke), au Burkina Faso (les Mossi), au Niger (les Djerma), les feuilles du baobab et du moringa sont consommées chaque jour sous forme de sauces avec les repas à base de céréales (Larwanou *et al.* 2003) ou sous forme de décoction. La consommation annuelle des feuilles sèches du baobab est estimée à 100 kg par personne par an. Au Mali, par exemple, les ménages dépensent environ 20.000 FCFA annuellement sur le baobab part. Les feuilles sont récoltées pendant 3-4 mois de saison des pluies, séchées et stockées pour être utilisées pendant 8-9 mois de saison sèche. Les feuilles fraîches de baobab sont également une source de vitamine A, indispensable pour la croissance et la vue humaines, et souvent déficiente dans le régime alimentaire dans l'ensemble de l'Afrique. Le séchage des feuilles de baobab réduit la teneur en vitamine A. Ainsi les jardins de baobab verts pendant toute l'année permettront de maintenir la teneur alimentaire en vitamine A et permettront de générer des emplois et des revenus aux populations rurales pauvres.

Un travail pilote a montré que les producteurs, particulièrement les femmes, adoptent la technologie rapidement quand le matériel végétal de haute qualité est disponible. Par exemple dans la région de Segou, plus de 300 producteurs ont adopté (plantation, récolte et consommation) les banques alimentaires à base de baobab entre septembre 2000 et mai 2001 après l'essai au champ et la diffusion de bas niveau. Ce travail a été dirigé par l'ONG APSRU et un projet de l'USAID de l'Office du Riz de Segou. En plus, l'analyse socio-économique et les études d'adoption montrent que la technologie est profitable et a une forte chance d'adoption une fois disséminée dans les secteurs avec la possibilité d'irrigation, une demande élevée des feuilles de baobab. Pour accélérer l'adoption de la technologie, il est envisagé des endroits irrigués, les zones de maraîchages et de cultures de contre-saison, les zones urbaines et péri-urbaines et les zones de grande demande de consommation.

Cultivars améliorés de jujubier

Les cultivars domestiqués et améliorés de *Ziziphus* (Seb, Gola et Umran, Katley, etc.) produisent de gros fruits, 19 grammes par rapport à 2 grammes du jujubier local (*Ziziphus mauritiana*). Ils produisent également le fruit plus tôt, seulement pendant six mois après greffe (ICRAF, 1999).

L'étude sur le *Ziziphus* a commencé en 1998 en collaboration avec l'INRAN avec des cultivars indiens greffés sur l'espèce locale. Trois cultivars (Seb, Gola et Umran) donnent bien en termes de production de fruits. En 1998, des matériels améliorés ont été distribués à 4 associations de développement pour tester au champ les stratégies de gestion. Une évaluation économique conduite en 2001 avec une évaluation des perceptions des producteurs a indiqué que ces derniers préfèrent le seb et l'umran en termes de production de fruit, goût et revenus générés. La demande de ces variétés est importante. L'année dernière, 3000 jeunes plantes ont été distribuées à 25 associations de développement. Au Mali, la vente du jeune plant du cultivar amélioré génère \$ 2-3 par plant aux producteurs. La demande est très importante à Bamako, à Dakar à Niamey et à Ouagadougou où la radio et les programmes de TV ont diffusé l'information au sujet des nouvelles technologies.

Dans l'ensemble de l'Afrique subdésertique, les fruits de *Ziziphus* sont mangés secs ou frais, bouillis avec du riz ou le mil. Ils sont également préparés sous forme de pain sec ou transformés en des gelées, des confitures et des conserves au vinaigre. **Le tableau 2** décrit l'impact économique potentiel de transférer les cultivars améliorés aux producteurs. En 2 ans, il est attendu que 10 cultivars améliorés de *Ziziphus* peuvent augmenter le revenu de ménage au Mali par exemple d'environ 28 000 CFA ou \$ 35 en considérant une période de fructification par an. Dans de bonnes conditions de gestion, ces cultivars produisent continuellement toute l'année. La production accrue de fruit peut diminuer les prix mais les études ont montré que les marchés absorbent des augmentations considérables de production, particulièrement pour des fruits d'une grande taille et de haute qualité, comme ceux des cultivars proposés.

Tableau 2.
Évaluations de la production des cultivars de *Ziziphus* sous différentes stratégies de gestion (fertilisation et irrigation) et revenu annuel brut estimé de la vente des fruits.

	Seb	Umran
Nombre de fruits/plant/an (sur-station)	438	227
Nombre de fruits/plant/an (sur les champs des fermiers)	372	193
Prix du marché d'un fruit (FCFA)	10	10
Revenu annuel par plant (FCFA)	3 720	1 930
Nombre de plants distribués aux producteurs (cultivars)	5	5
Revenu annuel pour 5 plants (FCFA)	18 600	9 650
Revenu estimé sur 2 ans de 5 plants (FCFA)	37 200	19 300

Banque fourragère à base de ligneux

La technologie de banque fourragère à base de ligneux a été développée en collaboration avec l'INRAN, suivie des études de gestion et des essais d'alimentation en utilisant les 2 espèces les plus prometteuses : *Kigelia africana* et *Bauhinia rufescens*. La technologie banque fourragère à base de ligneux est constituée par des arbres plantés à un écartement de 2,5 m x 2,5 m des jeunes plants et gérés à une hauteur de

50 cm. Cette banque fourragère à base de ligneux produit de grandes quantités de fourrage feuillu frais en pleine saison des pluies (6,4 –9,1 t/ha de MS) et pendant la saison sèche entre mars et juin (0,5 –2,0 t/ha de MS). Cette technologie a été développée pour adresser une des contraintes les plus importantes à la production animale dans le Sahel, manque de fourrage de qualité pendant la saison sèche. Le bétail joue un rôle important dans le système d'utilisation des terres au Sahel, contribuant jusqu'à 71 % de revenu en espèces pour les producteurs. Pendant la saison sèche, les herbes normales n'ont presque aucune protéine digestible et une teneur en minéraux très basse.

Les enquêtes conduites dans les villes maliennes par exemple ont évalué le potentiel du marché (demande et prix) pour la production de fourrage dans les systèmes urbains et péri-urbains. Entreprises pendant la saison sèche, ces études montrent une demande élevée de fourrage dans des secteurs urbains, en particulier à Bamako. Les évaluations hebdomadaires des revenus bruts par fournisseur des ventes des feuilles fraîches de *Pterocarpus erinaceus* étaient de \$30-\$57. Environ 357-1 406 tonnes de fourrage d'arbre de *Pterocarpus erinaceus* sont récoltées tous les ans des peuplements naturels autour de Bamako. Ceci est comparé aux 7 500-8 000 tonnes de fourrage d'arbres requises pour nourrir les 11 000 moutons estimés à Bamako. En fait, le potentiel du marché du fourrage est énorme pour la plupart des villes sahélienne car les gens élèvent et engraisent de petites quantités pour des buts socio-culturels et religieux.

La principale contrainte d'une large adoption de la technologie banque fourragère est celle de la protection contre les animaux en constante divagation.

Tableau 3.
Les espèces prometteuses pouvant servir de banques fourragères dans différentes conditions pédologiques et pluviométriques au Sahel

Sols	Pluviométrie annuelle (mm)		
	400-500	500-600	600-800
Sableux	<i>Ziziphus mauritania</i> <i>Gliricidia sepium</i> <i>Bauhinia rufescens</i>	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Albizia gauchapele</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i>	
Sableux limoneux			<i>Gliricidia sepium</i> <i>Grewia bicolor</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Acacia gauchapele</i> <i>Flemingia macrophylla</i> <i>Sesbania sesban</i> <i>Leucaena leucocephala</i> <i>Hardwickia binata</i> <i>Caesalpinia ferrea</i> <i>Cajanus cajan</i> <i>Acacia ampliceps</i> <i>Desmanthus virgatus</i> <i>Kigelia africana</i> <i>Bauhinia rufescens</i>

Récemment, la technologie a été modifiée pour accélérer l'adoption. La hauteur de coupe a été rehaussée pour atteindre des hauteurs inaccessibles aux animaux. Pour le taux d'adoption de la technologie, ce projet cible les endroits protégés dans les secteurs où la croissance des systèmes urbains et peri-urbains de production animale est intensive. Suivant les types de sols et les conditions climatiques, un certain nombre d'espèces ont été suggérées (Tableau 3).

Haies vives

Ce sont des rangées d'arbres plantés autour des champs capables de fournir une barrière efficace et durable en l'espace de 2 à 3 ans. Ces haies vives permettent ainsi aux agriculteurs d'économiser le temps qu'ils consacrent auparavant à la collecte de matériaux et à la construction de haies mortes. Après sélection des espèces, les plus performantes sont : *Acacia senegal*, *Acacia raddiana*, *Acacia nilotica*, *Acacia laeta*, *Bauhinia rufescens*, *Acacia macrostachya*, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia mellifera*.

Plantations d'arbres le long des courbes de niveau

Il s'agit de plantations de diverses espèces le long des courbes de niveau ou sur des diguettes existantes, destinées à lutter contre l'érosion hydrique provoquée par les pluies torrentielles et les effets dévastateurs des vents. Les espèces les plus prometteuses sont *Pterocarpus erinaceus*, *Bauhinia rufescens*, *Piliostigma reticulata*, *Acacia seyal* et *Acacia colei* et *A. holosericea*.

Jachères améliorées

Il s'agit de planter des espèces agroforestières à croissance rapide capables de produire une importante biomasse foliaire de qualité sur une période d'un à deux ans afin de restaurer la fertilité du sol et d'augmenter d'une façon significative les rendements des cultures. D'après les résultats obtenus au Mali, les espèces les plus performantes sont : *S. sesban*, *A. angustissima*, *S. spectabilis* et *G. sepium* avec des rendements de sorgho de l'ordre de 2000 kg /ha comparés à 500 kg/ha obtenus avec le témoin (culture continue).

Transferts de biomasse

Cela consiste à collecter et à transférer la biomasse foliaire d'espèces agroforestières sur une parcelle de culture et de l'utiliser comme engrais vert ou paillis. Les recherches effectuées sur le transfert de biomasse de plusieurs espèces agroforestières rencontrées dans les sites maraichers de Bamako ont fait ressortir des augmentations de rendement de plus de 100 % en utilisant l'engrais vert du *Tithonia diversifolia* sur la laitue, le kombo, le maïs et les amaranthus. Des augmentations de rendement de plus de 60 % ont été obtenues sur le mil avec les feuilles du *Prosopis africana* comme engrais vert en saison pluvieuse au Niger (Larwanou *et al.*, 2007).

Régénération naturelle assistée (RNA)

Le problème de la disparition des arbres ou perte du couvert arboré au Sahel, a été abordé à travers la promotion de la régénération naturelle assistée. C'est une méthode agroforestière dans laquelle les rejets naturels des souches après coupe sont gérés par les paysans (Larwanou et Saadou, 2006). La RNA se base sur la souche existante dans le champ à reverdir. Les nouveaux rejets sont sélectionnés et élagués pour améliorer la croissance à partir des souches. La pratique conventionnelle des paysans était de couper systématiquement les rejets lors de la préparation des champs. Avec un peu d'imagination, ces rejets de souches pourraient être valorisés sans porter préjudice au développement des cultures mais au contraire accroître la production. Ici, tous les rejets de la souche sont coupés excepté un. Les branches latérales sont coupées jusqu'à la tige principale. Ce rejet épargné pourrait se développer pour donner un bon arbre.

On pourra gagner plus en épargnant 5 ou plus de tiges saines (Larwanou, 2008). Les tiges indésirables sont coupées. Dans ce cas, si le paysan veut du bois, il pourra couper certaines et laisser les autres poursuivre leur croissance. Ces tiges restantes pourront grandir et ajouter de valeur chaque année, protégeront l'environnement et produiront des produits et services comme le fourrage, litière, habitat pour des animaux sauvages et protection contre le vent et le soleil.

La RNA présente beaucoup de bénéfices dont entre autres :

La nutrition humaine : beaucoup d'espèces régénérées (*Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus spp*, *Annona senegalensis*, *Sclerocarya birrea*, *Tamarindus indica*, etc.) offrent des fruits et feuilles pour la consommation humaine. Certaines de ces espèces sont celles de famine ou de soudure et d'autres consommées tout le long de l'année. Dans beaucoup de cas, les fruits et les feuilles de certaines espèces étaient les seules sources alimentaires qui ont épargné des communautés de la famine.

L'économie locale : en un an de RNA, le bois de chauffe pourrait être collecté par élagage. La seconde année, les branches coupées sont assez grosses pour la vente. En 5 ans de RNA, un paysan pourra vendre plus de 100 000 FCFA de bois pour le bois de chauffe et de service. Donc, les bénéfices augmentent avec l'âge de la RNA. Ceci n'était pas possible avant l'introduction de la RNA.

La RNA allège le problème de bois de feu et de construction : avant la pratique de la RNA, les paysans avaient des difficultés à obtenir du bois pour la construction des maisons et des greniers. A partir de la première année de pratique de la RNA, l'élagage permet d'avoir du bois de chauffe. Les femmes ne vont plus perdre de temps pour la collecte du bois de chauffe. Aussi, les résidus de récolte et les bouses de vache ne seront plus utilisés comme combustibles et pourront servir pour enrichir le sol et ainsi rehausser le niveau de fertilité des sols.

La nutrition animale : beaucoup d'espèces ligneuses produisent du fourrage aérien de qualité notamment les feuilles et les gousses qui étaient jadis très recherchées. Il est courant de voir des animaux à bon point dans les brousses et cela a augmenté le nombre de bœufs de trait et facilité l'adoption et la pratique de la culture attelée. Les

paysans qui épargnent des arbres avec une forte densité et en particulier des espèces comme *Faidherbia albida*, *Prosopis africana*, etc., obtiennent du fourrage pour leurs animaux et même de surplus pour vendre.

La santé et le taux de survie des animaux : il y a une réduction de la mortalité des jeunes animaux car les mères ont suffisamment de lait pour les nourrir. Ces animaux ne souffrent pas beaucoup pour l'obtention du fourrage aérien des ligneux.

Quelques opportunités pour ces espèces et options proposées

- **Les opportunités clés du marché** pour les technologies agroforestières proposées sont : une gamme de marchés, les pépiniéristes privés, les transformateurs des produits post-récolte et les nouveaux produits. Les marchés sont d'ordre régional, national et local.

- **Un environnement politique favorable pour les technologies proposées.** Au Sahel, ces technologies sont soutenues par le développement et l'exécution des politiques de décentralisation, qui placent la gestion des ressources naturelles, y compris la foresterie et les ressources agroforestières, sous la responsabilité des communautés locales. Confrontés à la dégradation rapide des formations naturelles et des ressources agroforestières provoquant la perte de la biodiversité, à la réduction de la productivité des terres et en plus de l'insécurité alimentaire et environnementale, la plupart des gouvernements qui se sont succédé au Sahel, ont adopté des stratégies de politique de développement visant à lutter contre la dégradation des terres, en conservant et en augmentant la biodiversité, allégeant la pauvreté et augmentant le revenu des producteurs ruraux. La plus grande priorité est accordée au secteur forestier avec le développement des plans d'action forestiers et de modification du code forestier pour accroître la participation des populations rurales, y compris le secteur privé, dans la protection et la gestion des agrosystèmes, particulièrement le système agroforestier (Larwanou, 2003). Avec le développement et l'exécution des programmes d'ajustement du secteur agricole au Sahel en général et sa libéralisation tout en le restaurant, ces mesures visent à améliorer la productivité et la compétitivité. Le programme d'allègement de la pauvreté a été développé au Sahel pour stimuler la croissance forte et durable par l'exécution des activités participatives entre les secteurs.

- **Opportunités complémentaires pour les technologies proposées**

Les opportunités complémentaires comprennent : **les marchés urbains naissants et croissants pour les fruits frais, les légumes et les produits d'alimentation du bétail.** Les populations urbaines croissantes estimées à 18 % au Niger ont occasionné une demande élevée des fruits et des légumes qui doivent être produits dans les jardins péri-urbains. Une autre opportunité complémentaire est la prévalence des communautés

rurales et les industries privées de transformation et de conservation des produits alimentaires (conserves). La prévalence des industries laitières autour des centres urbains présente une réelle occasion de l'acceptation de la technologie qui donne un fourrage de qualité. Cela est particulièrement vrai du fait que la demande de l'alimentation du bétail est loin d'être atteinte.

En plus, les technologies agroforestières proposées offrent des opportunités intéressantes considérables pour réduire le risque auquel font face les producteurs. Premièrement, les haies vives défensives offrent une protection complète que les haies mortes qui sont détruites par des insectes et ont besoin d'entretien et de remplacement annuels. Deuxièmement, les fruits aident à diversifier des sources de revenu des producteurs, réduisant le risque (la réduction de la période de fructification réduit également les risques). Troisièmement, les banques alimentaires à base de ligneux réduisent le risque de la mort du bétail en fournissant l'alimentation pendant des périodes de soudure.

Conclusion

La stratégie qui sera utilisée pour assurer une réussite dans la mise en valeur de la Grande Muraille Verte doit se baser sur l'expérience séculaire des paysans sahéliens en matière d'entretien des arbres dans les champs et intégrera cette tradition dans le nouveau contexte de la région, avec ses problèmes urgents, mais qui peuvent être résolus. En fait, nous apprenons des paysans – qui ont toujours réagi à ces changements dans leurs environnements physiques et socio-économiques et saisi les occasions offertes par l'agroforesterie comme une alternative en matière d'utilisation des terres, pour aider à garantir les moyens d'existence des populations du Sahel, au cours du prochain millénaire. Ces espèces et options agroforestières proposées constituent une contribution basée sur les expériences réussies de leur application.

Références

- Akinnifesi, F.K., Simons A.J. and Kwesiga F.R. (2000a). Strategies for Domesticating Indigenous Miombo Fruit Trees in Southern Africa. Proceedings 1st International Workshop on Fruit and Tree Crops, Mangochi Malawi, 10-15 December 2000.
- Boffa, J.M., Yaméogo, G., P. & Knudson, D. M (1996) : Shea nut (*Vitellaria paradoxa*) production and collection in agroforestry parklands of Burkina Faso. In R.R.B. Leakey , A.B. Temu, M. Melnyk & P. Vantomme, eds., Domestication and commercialization of Non-Timber Forest Products in Agroforestry Systems Non-Wood Forest Products, 9 : 110-122. Rome, FaO.
- Bonkougou, E.G. (1995) : Pratiques agroforestières traditionnelles et gestion des ressources naturelles dans les zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. In : Proceedings of the International Workshop for a Desert Margins Initiative, ICRISAT, Hyderabad, India.
- Franzel S, Jaenicke H, Janssen WD (1996) : *Choosing the right trees : setting priorities for multi-purpose tree improvement*. ISNAR Research Report No. 8. The Hague :ISNAR. 87 p.
- ICRAF (1995) : Annual Report 1994. Nairobi ; 157 p.
- ICRAF (1995) : L'agroforesterie pour la gestion des ressources naturelles et une production durable dans le Sahel : une stratégie de recherche, Nairobi.
- ICRAF (1998) : Annual Report : 1997. Nairobi. 135 p.
- ICRAF (1999) : Agroforestry Data Base : <http://198.93.235.8/cfdocs/examples/treesd/databases.htm>
- Lamien N., Sidibé A. and Bayala J. (1996) : Use and commercialization of non-timber forest products in western Burkina Faso. Domestication and commercialization of Non-Timber Forest Products in Agroforestry systems. Eds. R.R.B Leakey, A.B. Temu and M. Melnyk, Non-wood Forest Products N° 9, FAO, Rome Italy, pp. 51 – 63.
- Larwanou, M, Abase, AT, Niang, A et Djibo, A 2003 : Systèmes de production du Moringa oleifera le long du fleuve Niger : Quelles perspectives pour leur amélioration ? Sustainable Agriculture Systems for the Drylands. Proceedings of the International Symposium for Sustainable Dryland Agriculture Systems. 2-5 December 2003. Niamey, Niger. ICRISAT.162-263p.
- Larwanou, M (2003) : La gestion des parcs agroforestiers au Niger : Analyse des facteurs socio-politiques et institutionnels sur leur dynamisme de la période pré-coloniale à nos jours (cas du système fleuve). Rapport technique de la bourse de recherche ICRAF/CRDI. 26 p.
- Larwanou M. et Saadou M., (2006). Évaluation de la flore et de la végétation dans certains sites traités et non traités des régions de Tahoua, Maradi et Tillabéri, CRESA, Niamey « études sahéliennes », 90 p.
- Larwanou, M., Harouna, N.A., Abasse, T. et A. Niang (2007) : Prosopis africana (Guill., Perrot et Rich.) Taub and Entada africana (Guill. et Perrot.) leaf litter decomposition and impact of biomass transfer on millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) growth and development on station in Niger ; In : A. Bationo (eds.), Advances in Integrated Soil Fertility Research in Sub-Saharan Africa : Challenges and Opportunities, 815–825; 2007 Springer.
- Larwanou, M (2008) : Les techniques de régénération naturelle assistée au Sahel. Manuel de formation à l'intention des agents de vulgarisation et des producteurs sahéliens. Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey. 18 p.
- Vandenbelt, R.J. (ed) (1992) : *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics : proceedings of a workshop, 22-26 April 1991, Niamey, Niger.
- Vantomme, P. (eds) (1996) : *Domestication and commercialization of non-timber forest products in agroforestry systems*. FAO Non-Wood Forest Products, No. 9. 297 p.

An idea for the selection of species for the Great Green Wall; from the views of plant nutrition and a possible contribution of plant molecular biology

KEN MATSUOKA

Laboratory of Plant Nutrition, Department of Plant Resources, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan.

Abstract

The great green wall should be of the sustainable system with low input and maximum benefit for the local people. Based on such criteria, possible species of trees for the GGW should include legume trees as these species have root nodules with symbiotic bacteria, which can fix nitrogen from the air. Some of the legume species that are native in Sahel region are used not only for fuel or timber but also other applications. Seeds or other parts including secretory gums from these species are used for foods and industrial raw materials. Among them one of the ideal species on such criteria is *Acacia senegal*, a tree that extrude gum arabic. Compounds in gum arabic affect the quality. Biochemical process for the production of such compounds can be presumed from the knowledge of the biochemistry and molecular biology of other plant species. Using *A. senegal* as a model species the possible strategy for the contribution of molecular biology to select good trees (trees that can produce gum arabic with high protein content and low tannin content) just after seedling is discussed.

Keywords:

LEGUMES, *A. SENEGAL*, GUM ARABIC, SELECTION

Résumé

La grande muraille verte (GMV) peut constituer un système durable nécessitant de faibles intrants et assurant des ressources optimales pour les populations locales. Considérant ces critères, les espèces d'arbre potentiellement utilisables dans la GMV pourraient être des légumineuses puisque ces essences ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à leurs nodules racinaires habités par des bactéries symbiotiques. Certaines de ces légumineuses sont natives du sahel et ne sont pas uniquement utilisées comme bois de chauffe ou de construction mais aussi pour d'autres raisons. Les graines et les autres parties de l'arbre (incluant la production de gomme arabique par certaines essences) sont également valorisées dans l'alimentation et l'industrie. Parmi ces essences candidates figure l'*Acacia senegal*, un arbre produisant de la gomme arabique de haute qualité chimique. Le processus biochimique déterminant la composition chimique de la gomme peut être élucidé en utilisant les connaissances scientifiques (biochimiques et moléculaires) acquises avec d'autres espèces végétales. En utilisant A. Senegal comme modèle, la stratégie potentielle visant à sélectionner des individus d'arbres susceptibles de produire une gomme arabique de haute qualité (riche en tannins et en protéine) juste après la germination est discutée.

Mots clés :

LÉGUMINEUSES, A. SENEGAL, GOMME ARABIQUE, SÉLECTION

Introduction

In a classical agroforest system, farmers have for many generations maintained a traditional land-use system. In the semi-arid and sub-humid zones of west Africa such system is known as the 'agroforestry parklands' system (Pullan, 1974). The system is characterized by the deliberate retention of several-to-divergent species of trees on cultivated or recently fallowed land. Trees are an integral part of the system, providing food, fuel, fodder, medicinal products, building materials and saleable commodities, as well as contributing to the maintenance of soil fertility, water conservation and environmental protection. In contrast, the windy parts of the flat lands faced to sea, farmers developed windbreaker forest to protect farmlands from strong winds as well as salts from seawater. In this system, the cropping lands and the forests are clearly separated. The windbreaker is consisted with one or limited numbers of species causing the vegetation of such forest fairly uniform. Even in this case, the forests provide fuel for farmers and protect erosion.

In both cases the systems are sustainable when people keep living in the traditional household system. However, in the rapidly developing world people tend to gain

well sophisticated commercial products for the improvement of living status. To fulfill such demands it is essential to get cash income from the use of lands. In contrast, minimum request for the forests of great green wall (GGW) is to protect the expansion of Sahara Desert in the Sahel region and to maintain the cultivated fields in order to keep supplying foods for people. Thus it is better to keep the cultivated lands for the supply of foods and to use the tree zone not only the border of the Sahara Desert but also the area where products for the cash income can be harvested.

Based on such ideas and on knowledge of biotechnology and plant nutrition, the idea of selecting species and individual plants for the constitution of GGW is discussed in this report.

Supply of nitrogen

Plant growth requires carbon dioxide, water and macro and micronutrients from soils. The nutrients include minerals, phosphate, sulfur and nitrogen. Among them supply of nitrogen is critical for plant growth as this element is one of the major constituents in all living organisms. Because most plants cannot convert nitrogen gas in the air into bioactive form of nitrogen, such as ammonia, nitrite and nitrate, supply of active form of nitrogen is the limited factor to grow plants including trees. The exception is the legume plants. This family of plants tend to have nitrogen-fixing nodules that contain nitrogen fixing bacteria. In such nodules organic compounds, which are the products of photosynthesis, are supplied to bacteria from plants. Using such organic compounds as the energy source, bacteria fix nitrogen (i.e. convert nitrogen gas into ammonia or nitrate) and the fixed nitrogen is supplied to host plants. This nutritional exchange is the basis of the symbiosis between legumes and nitrogen-fixing bacteria.

There are many species of bacteria in soils that can fix nitrogen under an appropriate condition. However, nitrogen fixing activity in such soil bacteria is not usually high. In contrast, symbiotic nitrogen fixation is quite efficient. The bacteria that can make nitrogen-fixing nodules in legumes are classified into limited numbers of genus, including *Rhizobium* and related genus. Some of such bacteria have narrow host specificity. For example, soybean cannot grow efficiently in Africa as bacteria that can make nodules in soybean are not rich in soils in Africa. As soybean is originated from East Asia, this bad adaptation is not surprising. Moreover, the interaction of symbiotic bacteria and soybean is very complex. Some isolate of *Bradyrhizobium japonicum* can only make functional nodules in limited variety of soybean. Therefore, local adaptation of *Bradyrhizobium* population and variety of soybean in crop field can be found in some region.

The soybean case suggests that the legume species that will be used for GGW should be at least native to Africa and ideally the local species where the GGW

is made. Once such legume trees are grown in GGW, the detached leaves and dead branches on the ground is digested by soil bacteria. This digestion allows an accumulation of functional nitrogen to support the growth of other species. Therefore, the leaves and dead branches that fell off from the legume trees will not be harvested completely.

Legume trees and its use

In savanna area in West Africa, many species of *Leguminosae* trees are known to be valuable for people. Tamarind (*Amarindus indica*) is one of such trees. It is a native to tropical Africa but was introduced into India long ago, thus the name of the species is written as “indica”. The tree can grow up to 20m in height. Tamarind is used for both timber and foods. Timber consists of dark red heartwood yellowish sapwood. The fruit is a brown pod-like legume, which contains a soft acidic pulp and many hard-coated seeds. The hard green pulp of a young fruit is very sour and acidic and is often used as a component of savory dishes. The ripened fruit is less sour and somewhat sweeter. It is used in desserts and sweetened drinks, or as a snack.

Another legume trees useful for many purposes is *Parkia biglobosa*, which also grow up 20m in height. Seeds of this tree are used as protein-rich foodstuff in West Africa. After fermentation of its coked seed a seasoning called Netetu is generated. The fermentation process alters the physical state of the cooked and dehulled beans. The condiment is also an excellent preservative against mould. The spore-forming bacteria classified as *Bacillus* were the major bacteria use for fermentation.

Pterocarpus mildbraedii is also use for both the foodstuff and for timbers. This tree grows up to 35m in height. In Nigeria the leaves are used as vegetables. The timber is very hard and is used to make mortars. However, these trees are not so useful for the cash-income. A more useful tree legume native in West Africa is *Acacia senegal*, which is the source of gum arabic. The detail of this species, its use and possible future contribution of molecular biological techniques for the selection of good trees of this species is discussed from the next section.

Acacia senegal, a multipurpose tree

Acacia senegal is a small deciduous acacia tree. It is native from semi-desert regions of Sub-Saharan Africa, as well as Oman, Pakistan, and northwestern India. It grows to a height of 5-12m, with a trunk up to 30cm in diameter. This specie is very

drought resistant. It grows on sites with annual rainfall between 100-950 mm and 5-11 month dry periods. It tolerates high daily temperatures (mean maximum temperatures of up to 45°C or more), dry wind, and sandstorms. It prefers coarse-textured soils such as fossil dunes, but it will also grow on slightly loamy sands and skeletal soils such as Lithosols. Although generally soils are well-drained, there are exceptions: in the Kayers region, South-Kordofan, East-Sudan, *A. senegal* grows on heavy clay soils with approximately 800 mm annual precipitation. The best sites have pH of 5 to 8.

The gum produced from this species is known as gum arabic. The seeds are edible for humans and are rich in protein. The foliage and pods are browsed by sheep, goats, camels, impala, and giraffe. Leaves contain 10%-13% digestible protein and 0.12%-0.15% phosphorus, while the pods contain 15% digestible protein and 0.12%-0.14% phosphorus. *Acacia senegal* wood is locally valued for fuel wood and charcoal although biomass yield per unit land area is not sufficient to plant *A. senegal* purely for fuel wood. Wood is used in local construction for poles and fence posts, the light-colored wood for tool handles and dark heartwood for weaver's shuttles. Strong ropes are made from the bark fibers of the tree's long surface roots. In Sudan, this species is grown in agroforestry systems in "gum gardens" for gum as well as to restore soil fertility. After five years of growth from seedling, the tree can be used to harvest gum arabic for 7-15 years. When the rainy season ends the trunk of the acacia begins to ooze gum. Usually trunks are tapped to enhance the production. This gum is collected from December to June and is used to make commercial gum Arabic products. The primary export agent is a French company founded during the colonial period to process the gum, which maintains large processing facilities in Nigeria and Rouen, France. Total world gum arabic exports in 2008 are estimated at 60,000 tonnes, having recovered from crises caused by the destruction of trees by Desert locust several years ago.

Gum arabic, its use, composition and biosynthesis of major components

Gum arabic is mixture of saccharides and glycoproteins edible by humans. It is widely used in food industry and historically in other industries including paint production, printing and glues. Its solution is colorless, orderless and low viscosity even up to 20-40%. It is an acid-stable polymers consisted with polysaccharides and proteins. Its emulsification, adhesive and binding properties and good mouth feel characteristics directed this gum in many areas of food industry which include confectionary, beverages and emulsions, flavor encapsulation, bakery products and brewing. Increasing the economical status in these decades in China, India, Russia

and other countries and introduction of the Americanized way of foods and living in these countries, the net demands of gum arabic in food industry had increased. Although the recent world-wide crisis of economy will slow down the increase in consumption of such processed foods, the regain of economy in the near future will cause to increase the consumption.

The quality of gum arabic is classified with the content of purities. The gum tears picked from trees and dried before selection. Gums tears with less impurities showed light amber color and mainly transparent whereas low quality gum shows dark amber color. Such impurities mainly consisted with the presence of tannin, a class of polymerized phenolic compounds. The major components of the gum arabic are complex mixture of arabinogalactan, and arabinogalactosylated glycoproteins. In gum arabic, the content of proteins is one of the important criteria for the emulsification property.

Arabinogalactan is a complex carbohydrate polymer mainly consisted with or D-galactose and L-arabinose. The minor sugars in arabinogalactan are rhamnose, galacturonic acid and fucose, and sometimes the galacturonic acid makes a complex with pectin polysaccharide. Biosynthesis of arabinogalactan is predicted from the analysis of the arabinogalactan proteins. The synthesis of arabinogalactan starts from the synthesis of small oligo peptide that function the platform of the oligosaccharide assembly. Such peptide is called arabinogalactan peptide. The precursor of the arabinogalactan peptide contains amino-terminal signal peptide and carboxy-terminal peptide for the attachment of GPI-anchor; the former is removed co-translationally during the synthesis and translocation of and the latter is converted to GPI-anchor structure which attach to the inner leaflet of the membrane of the endoplasmic reticulum. Proline residues in the GPI-anchored arabinogalactan peptide are converted to hydroxyproline residue during the transport from the endoplasmic reticulum to the Golgi apparatus. At the same time the hydroxyproline residues are glycosylated with galactose. Thereafter the galactose chain is elongated branched. Then the branched chains are arabinosylated and sometimes other sugars, such as rhamnose, fucose, N-acetylglucosamine and glucuronic acids are transferred to the partially assembled oligosaccharides. Finally, after transport of the glycosylated peptide to the plasma membrane, GPI-anchor is cleaved by the action of phospholipase. This process causes the release of arabinogalactan to the intracellular space.

The protein-rich fraction from gum arabic is rich in hydroxyproline-rich glycoproteins known as gum arabic glycoprotein, which contains highly glycosylated hydroxyproline-rich region. Many of the hydroxyprolines in this region are glycosylated with arabinogalactan although some of the hydroxyprolines are arabinosylated with some extent. The biosynthesis of hydroxyproline-rich glycoproteins in plants so far analyzed resembles with the synthesis of arabinogalactan assembled on peptides. However, some of the precursors to glycoproteins do not have GPI-anchor.

The biosynthetic pathways of arabinogalactan described above indicated that the biosynthesis require many gene products, not only common in protein secretion but also unique to the biosynthesis of arabinogalactan and arabinogalactan proteins. These include peptidyl prolyl hydroxylase, peptidyl hydroxyproline galactosyltransferase

and many glycosyltransferases that are required for both the elongation of galactan chain in arabinogalactan and for the synthesis and assembly of the side chains consisted with galactose, arabinose, rhamnose, N-acetylglucosamine and glucuronic acid. Among these enzymes that are proposed to be involved in the biosynthesis, only peptidyl prolyl hydroxylases are characterized by our hands and with others at the molecular level (Yuasa et al., 2005; Tiainen et al., 2005). Most of the other enzymes are still yet characterized but we had recently found the activity of the core enzyme (Oka et al., 2008) and now we are purifying the enzyme. Although this scheme is proposed in the biosynthesis of arabinogalactan, little molecular mechanism for the biosynthesis of gum arabic has been investigated.

To date only partial amino acid sequence of the glycoprotein in arabic gum were reported (Goodrum et al., 2000) and characterization of arabinogalactan proteins in this gum is just started (Mahendran et al., 2008). However, no precise structure of the arabinogalactan oligosaccharides from gum arabic was solved. Therefore it is not clear how many genes are involved in the biosynthesis of gum arabic and how many protein backbone or platform are involved in the gum arabic biosynthesis.

Phenolic compounds biosynthesis and induction

Tannins are the major pigment of gum arabic and other gums from trees that prevent the use of for food industry. The tannins originated from the bark of the tree and are the common compounds for the protection from the injury. As the gum production usually takes place by the topping of trunks, this process can induce the wound response of trees to produce protective substances including gum and tannin. The contaminated tannin causes problems for industrial use and for human health. Therefore, the FAO suggestion of gum arabic for food additive is free of tannin (FAO, 1997).

The wound induction of the genes for the biosynthesis of phenolic compounds is well studied in many model plants. The primary products for the source of tannin are catechins, gallic acid and cyanidins, collectively called polyphenols. Such compounds are also known phenylpropanoids because of the biosynthetic pathway and precursor compounds. The key enzymes for the biosynthesis of phenylpropanoids are phenylalanine ammonia lyase, cinnamic acid dehydrogenase, chalcon synthase and so on. Many of these genes are induced by wounding and wound-related hormones such as jasmonate. Another enzyme that is related to the defense process that is induced by wounding is the anionic peroxidase which is involved in the formation of lignin, a polymerized polyphenols rich in hardwoods and wounded part of many woody plants. Therefore, the same sets of the genes in *Acacia senegal* will also be induced by topping at least with some extent.

Possible contribution of molecular biological technique

Once a legume species for GGW is selected, it is better to identify individual young plants to be planted to the place where the wall is to be made. For example, if *Acacia senegal* is chosen, the following criteria should be considered. 1) High growth rate. 2) High yield of gum arabic. 3) High content of proteins in the gum. 4) Low content of tannin in the gum. If these traits can be monitored before the planting of young trees the benefit for the farmers should be high. In contrast, if such trait can be monitored after planted trees are grown to enough size, i.e. five years of growth in the case of plantations in Sudan, the benefit is not so high.

One of the methods to produce many young trees that will be of highly valuable because these trees will have the traits listed above is to propagate the species using cutting of branches and rooting of these cut branches to obtain young trees. In this method, once a tree that has showed such phenotypes is identified, the clones of the same trees can be produced with very high number. Unfortunately however, such methods are not developed in many valuable trees in Africa, thus such methods should be developed for each species. Another method is the collect seeds from trees with such traits for propagation. However, this method can not be always applied because inheritance ways of such traits are unknown. The phenotype with low tannin in arabic gum can be considered to link multiple genes for the biosynthesis. Thus the offspring of the tree which produce gum with light brown color might not always produce high quality gums. Therefore, using seedling as the source of young trees it is required to establish such phenotypes before growing up the trees. One of the methods for this is to analyze genes that are involved in such traits. The first step for the identification of such genes is to identify mRNAs that is linked to the phenotype of interest. Until recently the screening of such mRNA species are time consuming and was not easy to carry out. However, recent development of high throughput DNA sequencers allows one to identify such mRNA species with only a short period of time.

The first step is to isolate mRNA from the trees under the condition for the production. From here the proposed case of *Acacia senegal* is discussed as a model. In order to assess genes that is linked to the production of high quality arabic gum, mRNAs from the barks of healthy and topped trees be collected. One of the trees used to recover mRNAs would produce light color of gum and the other should produce well pigmented gum. After preparation of cDNA from the mRNAs, nucleotide sequenced of the cDNAs will be determined. The DNA sequencer that can be use for this purpose is the 454 sequencer with Titanium kit. The combination of this machine with the kit allows one to analyze the sequence of about a million of clones within a day or two. As the average length of reading is roughly 400 bases, encoding protein from the mRNA can be easily predicted. Since most of the tissues express no more than twenty thousands of genes, analysis of millions of genes are enough to quantify the level of expression of each gene.

The comparison of the gene expression frequency will allow identifying genes that are linked to the trait. Then whole gene sequence will be determined from two individuals one of which will yield high quality gum and the other produce low quality one. After the comparison of the sequence of the genes polymerase chain reaction (PCR) primers for the amplification of good and bad genes will be generated. Thereafter, analyzing the genotype of young offspring from the good tree will be analyzed by PCR. The requirement of the samples for PCR is usually one leaves or less. Thus without disturbance of the young tress genotypes of each tree will be determined.

This is a proposed method for the identification of individual plants with higher production of valuable stuff. This approach will not only be applied to legume trees but also other species of trees with other important traits, such as the content of medicinal compounds. The minimum requirement to take this method is to have a method to identify the individuals with the phenotype and one should have at least two individuals showing good and bad phenotypes. The biggest problem for this method is the high cost of the initial investment for the characterization of genes (can be over ten thousand US dollars) as well as the characterization of genotype by PCR is a little bit costly (about a US dollar or less). Therefore proposed benefit to take this method should be higher than a dollar and supports of developed countries for this method should be essential.

References

- Cossalter, C. (1991).
Acacia senegal - Gum Tree with Promise
for Agroforestry. NFTA 91-02
- Goodrum LJ, P. A., Leykam JF,
Kieliszewski MJ. (2000).
Gum arabic glycoprotein contains
glycomodules of both extensin
and arabinogalactan-glycoproteins.
Phytochemistry 54, 99-106.
- Mahendran T, W. P., Phillips GO,
Al-Assaf S, Baldwin TC. (2008).
New insights into the structural characteristics
of the arabinogalactan-protein (AGP)
fraction of gum arabic.
J Agric Food Chem. 56, 9269-9276
- Oka, T., Saito, F., Shimma, Y., Yokoo, F.,
Matsuoka, K. and Jigami, Y. (2008).
Various nature of Arabidopsis hydroxyproline
galactosyltransferase involved in arabinogalactan
biosynthesis. In "2008 JSBBA", Nagoya.
- Pullan, R. A. (1974).
Farmed parkland in West Africa.
Savanna 3, 119-151.
- session, J. F. W. E. C. o. F. A. t. (1997).
Compendium of Food Additive Specifications.
Addendum 5. (FAO Food and Nutrition
Paper - 52 Add. 5).
WORLD HEALTH ORGANIZATION,
Rome.
- Tiainen P, M. J., Koivunen P. (2005).
Characterization of a second Arabidopsis
thaliana prolyl 4-hydroxylase
with distinct substrate specificity.
J Biol Chem. 280, 1142-1148.
- Yuasa, K., Toyooka, K., Fukuda, H.
and Matsuoka, K. (2005).
Membrane-anchored prolyl
hydroxylase with an export signal
from the endoplasmic reticulum.
Plant J. 41, 81-94.

Isohydic and Anisohydric Water Use Considerations in Species Selection for the Great Green Wall of Africa

ROGER KJELGREN
Dept. Plants, Soils, and Climate Utah State University, Logan, UT 84322

Abstract

The hydric model of plant water use behavior is potentially useful in selecting appropriate species in arid to semi-arid condition shelterbelts plantings like the Great Green Wall. Anisohydric species have high “use it or lose it” use at the cost of negative internal water potential, out-competing other plants but possibly inefficiently using water. Isohydic species “save it for a rainy day” strategy conserves water in non-competitive situations but may limit carbon gain and growth. Empirical testing of this model was conducted in two studies involving subtropical herbaceous and tropical woody plants. In Queensland, Australian, container grown *Orthosiphon aristatus*, *Dianella revolata* ‘Breeze’, and *Ptilotus nobilis* plants were stressed through cyclical dry downs or kept well watered while stomatal conductance, predawn water potential, and osmotic adjustment were measured. *O. aristatus*, a rainforest species, fit the anisohydric model of high water use and more negative water potential during soil drying until stomatal closure and leaf wilting. Deep rooted *D. revolata* native to *Eucalyptus* scrub forests fit the isohydric model of reduced transpiration under mild water stress. By contrast, shallow-rooted *P. nobilis* native to Australia’s very dry interior became water stress by anisohydric behavior to achieve osmotic adjustment that allowed subsequent isohydric behavior. In Bangkok, Thailand, stomatal conductance and predawn water potential was measured in three container-grown, well watered and water stressed monsoonal dry forest species, *Pterocarpus indicus*, *Lagerstroemia loudonii*, and *Swietenia macrophylla*. The deciduous *Lagerstroemia loudoni*, had very high water

use consistent with other deciduous species, but isohydrically closed stomata to moderate internal water potential. The obligate evergreen *Swietenia macrophylla* fit the isohydric model even more closely, moderating transpiration and water potential under a wide range of dry soil and air. *P. indicus*, nominally evergreen but deciduous when water stressed, fit the anisohydric model more closely, allowing internal water potential to become more negative during soil drying. Anisohydric species may be more suited for planting in deeper soils with high water holding capacity, while isohydric species may be more suitable for shallower and sandier soils in non-competitive plantings.

Key words

PLANT WATER USE; SELECTION; TRANSPIRATION; WATER POTENTIAL

Introduction

Selecting well-adapted species for establishing non or minimal irrigation tree plantings in arid-to-semi-arid habitats like the Great Green Wall is critical. Planting a given site with a species accession collected from that site ensures adaptation and improves but does not guarantee success. Physical or climatic conditions of a site, particularly land degradation, may have changed enough to fall outside the range of species adaptation. In the extreme, for geriatric stands of a given species that established under a wetter-but-vanished climate, replanting locally-sourced material into a drier climate may not be successful.

Success in establishing shelterbelt plantings in arid-to-semi-arid habitats where soil or climate conditions may have changed depends on identifying the key soil, biological, and climate conditions of a given site then matching with suitable plant material. Satellite or aerial spectral imaging and subsequent geographic information systems analysis is a critical tool for characterizing soil and biological conditions of a site. Key climate factors, rainfall and air temperature while more challenging, can be obtained from both remotely sensed and ground observations.

Matching plant material that meets other socio-economic criteria to a given site is a two-step process. The first is identifying species found in habitats similar to those being planted. If a given site to be planted has soil and vegetation degradation or changed climate, then habitats with similar or harsher conditions are candidates for selecting suitable species. The second and more difficult is identifying essential phenological, morphological, and physiological traits that can either enhance or diminish survival, establishment, and adequate growth.

Substantial variation in plant water use strategies among species can be exploited to enhance establishment success. In seasonal monsoonal regions drought deciduous species are often mixed with dry evergreen species. Drought deciduous species often are deep-rooted in fertile soils and drought avoiding, maximizing photosynthesis

during the wet season, with the greatest gas exchange rates among woody species (Wullschleger *et al.*, 1998). By contrast, monsoonal evergreen species are more drought tolerant and better adapted to infertile soils, with overall lower gas exchange rates that are sustained through the dry season (Choat *et al.*, 2005). How suited a dry deciduous or evergreen species may depend on isohydric versus anisohydric water use strategy (Schultz, 2003).

Iso-/aniso-hydric water use strategy is a conceptual model describes species that moderate internal water potential in dry soil and atmosphere by stomatal closure (isohydric) versus those that maintain open stomata as far as possible under dry soil and air at the cost of more negative internal water potential (anisohydric). Iso-/aniso-hydric strategies are not necessarily associated with habitat of a given species. Anisohydric “use-it-or-lose-it” strategy is found in both dry and wet habitats where a species has a fall-back water source such as frequent rainfall or deep rooting (West *et al.*, 2008). Isohydric “save-it-for-a-rainy-day” strategy is common in many temperate as well as arid habitat woody species where moderating internal water potential and soil water depletion is not a competitive disadvantage.

Inferential profiling can inform selection of potential woody species with a given set of planting site conditions up to a point. In a shallow soil a deciduous species may not be suitable, but in a deep soil one with anisohydric water use may grow less due to more rapid soil water depletion than one with isohydric use that grows better due to greater water use efficiency. This paper reports on studies of iso-/aniso-hydric water use in monsoonal dry tree species in tropical Thailand and herbaceous perennial species in subtropical Australia.

Material and Methods

Thailand Tree Study

This study was conducted at the Faculty of Forestry building located on the Kasetsart University (KU) campus in Bangkok, Thailand. We investigated water use of four species, *Cassia fistula* L. (golden shower tree), *Pterocarpus indicus* Willd. (Malay padauk), *Lagerstroemia loudonii* T. & B. (Loudon’s crape myrtle) and *Swietenia macrophylla* King (Honduras mahogany). We conducted two studies, the first in late January-early February, and then late March-early April, 2006, the hottest period in Bangkok. For both studies trees 30 mm in trunk diameter and 2-3 meter height were harvested balled-and-burlapped from a local field nursery and potted into 20 liter containers with composted bark growing substrate. Trees were allowed to establish for three weeks prior to data collection under shade and high frequency irrigation, at which time inspection showed that they had completely rooted into the growing medium. Three replicate trees were used in the first study, and four in the second.

Both studies were conducted on the roof of the KU Forestry building where a weather station (Weatherhawk Inc., Logan UT) was also located to collect incoming solar radiation, relative humidity, air temperature, and wind speed to calculate local reference evapotranspiration (ET_o) as a turfgrass reference (Walter *et al.*, 2000), as well as rainfall. The weather station air temperature sensor was calibrated to a separate sensor located over nearby turf to control for higher air temperature from greater longwave radiation and sensible heat effects from the tiled roof surface. Trees were arranged in a completely randomized design, spaced approximately 1.5 m from each other in a grid pattern.

Prior to each study period tree root zones were well watered the previous night and allowed to drain. The difference between daily gravimetric container weight yielded volumetric tree water. Total tree leaf area was measured at end of each study by harvesting all leaves from each tree, determining dry specific leaf area of a 20-leaf sub sample, then calculating the product of total leaf dry weight and specific leaf area. Half the trees of each species were progressively allowed to dry at 75%, 50%, and 25% of local ET. During the progressive drying daily measurements were stomatal conductance with a porometer (Decagon, Pullman WA) and predawn water potential with a pressure chamber (Soil Moisture Inc, Santa Barbara, CA).

Australia Perennial Study

This experiment compared plant responses during successive dry downs, conducted at The University of Queensland's Gatton plant nursery unit in a subtropical region characterized by dry austral winters (June-August) and high precipitation monsoonal summers (December-January). We used *Orthosiphon aristatus* (cats whiskers; Lamiaceae), a tropical rainforest species (Shibuya *et al.*, 1999) likely to have little drought tolerance; *Dianella revoluta* 'Breeze' (flax lily; Liliaceae), a species indigenous to dry sclerophyll woodlands in South Eastern Australia (Cunningham, 2000); and, *Ptilotus nobilis* (mulla mulla; Amarantaceae) collected in arid Western Queensland (Lee *et al.*, 2007).

Rooted cuttings of each species were transplanted in early October 2006 into 200-mm diameter (7 liter) pots containing a red ferrosol clay-loam soil (Biggs *et al.*, 2001). This clay-loam soil has a high water holding capacity (0.2 mm water /mm soil at field capacity), thereby reducing potentially confounding effects from rapid root zone drying in organic potting substrate. Temperatures during the experiment in mid spring were initially hot (30 - 36o C maximum) with humidity from 20-30%. A frontal system with clouds then moved through and cooled temperatures down to 21 - 25o C for several days. For the last 4 days of the experiment, temperatures rose to near 30o C, with similar low humidity.

Two treatments were imposed, well-watered (control) and water withheld variably over a 12-day stress cycle during November 2006. Each watering-treatment-by-species combination involved 10 single-plant replicates, for a total of 60 plants. The experiment was laid out on a concrete pad in a completely randomized design. All plants were irrigated daily for fifteen minutes with two 4 L. h-1 drip emitters per container during their establishment in October as they acclimated to full sun conditions.

All plants were watered by hand at the start of the dry-down cycle in addition to routine drip irrigation to ensure growing substrate at field capacity. Drip emitters were then withdrawn from plants in the no water treatment, which was allowed to deplete soil water until visible water stress symptoms (viz. wilting or leaf curling) were evident in at least half of the individual plants within the stress treatment. At this point, all plants within that species were re-watered to return the substrate to field capacity. Thus, each species had dry-down periods of different duration.

Stomatal conductance was measured as described above either each day or every other day during dry-down periods. Substrate water status was recorded concurrently using a time-domain reflectometer (HydroSense CS620, Campbell Scientific, Logan UT) probe with 200-mm long prongs that reached from the substrate surface to close to the container bottom. Internal plant water status was measured with a pressure chamber during the dry-down periods just prior to re-watering of the species then currently exhibiting the most drought-stressed symptoms on a four-plant subsample from each species x treatment combination.

Osmotic adjustment in terms of accumulation of organic solutes was estimated using the pressure-volume-curve analysis method as described by Robichaux (1984) at the end of the last drying cycle. Pressure volume curves were run over three days, one species per day starting with *Orthosiphon* and ending with *Dianella*. One leaf from each plant (well watered the night before) was excised early the next morning, weighed, immediately covered in plastic wrap and aluminum foil to eliminate confounding transpiration effects on leaf water potential, and then sealed into the pressure chamber for measurement of balance pressure. Leaves were then uncovered and allowed to bench dry under paper to minimize drying too quickly.

After pressure-volume data measurements were completed, all leaves were harvested from each of the plants, a 10-leaf sub-sample removed, and the remaining leaves dried at 60 °C for 24 hours and then weighed. The sub-sample was measured for average leaf area then dried. We used the leaf area: weight ratio (specific leaf area) to calculate total leaf area from total leaf mass. The root system of each plant was also harvested, the substrate washed away, drying, then the roots were dried at 60 °C for 24 hours and weighed.

Results and Discussion

Weather conditions got progressively hotter and drier during the monsoonal dry season due to longer days increasing the evaporation rate (Figure 1). During the first dry down period in early February, all species, including the deciduous *Lagerstroemia loudonii* exhibited similar transpiration rates. *Lagerstroemia* and *Swietenia macrophylla* showed no signs of water stress. *Pterocarpus indicus* had somewhat higher conductance rates compared to the other two species, but did close stomata in response to progressive drying, but did not have lower predawn water

potentials. During the second study later in the dry season when conditions were hotter, we reduced water application to 50% more rapidly, resulting in water stress and stomatal closure in all three species. More consistent with being a drought deciduous species (Ishida et al., 2006), *Lagerstroemia* increased conductance compared to the first study, probably because it had put on a new set of leaves after drought-induced dormancy earlier in the dry season.

Lagerstroemia is the only species with wet water potential became more negative in close alignment with the dry trees, a decline that suggested that *Lagerstroemia* leaves may be adjusting osmotically, and advantage in extracting more water from the root zone.

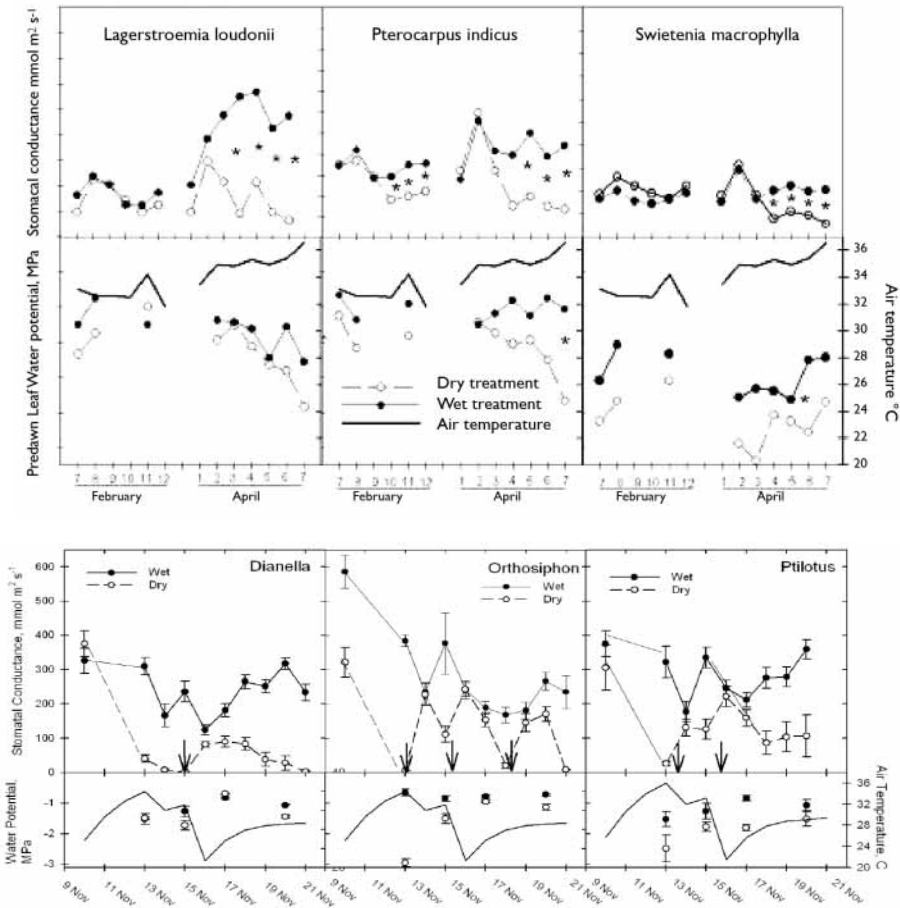


Figure 1.

Stomatal conductance and predawn leaf water potential, and air temperature, of three subtropical herbaceous perennial species grown in containers either well watered (wet) or water stressed (dry) where plants were not irrigated. Asterisks indicate significant differences between wet and dry treatments.

Pterocarpus conductance was marginally higher, but conductance of the dry trees was lower than the first study, possibly due to hotter conditions, while *Swietenia* conductance was the same, although closing in response to water stress.

An isohydric model was generally consistent with the water use strategy of these species. As stomatal conductance fell in response to declining substrate water content, predawn water potential remained relatively constant down to about 30% stomatal closure relative to well-watered levels (Figure 2). *Pterocarpus* was the exception, as its stomata were closed at 15% ratio, allowed predawn water potential to fall to 2.5 times, of the wet plants.

This fall may be in part from thinner *Pterocarpus* leaves that allowed cuticular transpiration even when stomata were closed, causing further decreases in water potential. *Pterocarpus* is actually a brevi-deciduous species, as it does drop all its leaves when water stresses, but is otherwise evergreen. Inability to regulate water potential through stomatal closure would explain its brevi-deciduous behavior, as severely stressed leaves would more likely senesce.

In the Australia study, *O. aristatus* the rainforest species was as expected more drought intolerant than either *D. revolata* or *P. nobilis*, but the latter two species appeared to differ in their drought tolerance mechanisms. Both *Ptilotus* and *Orthosiphon* showed signs of leaf curling (*Ptilotus*) or wilting (*Orthosiphon*) after several hot days without water. While stomata of all three species were nearly closed at this point, *Dianella* showed no visible signs of water stress and no differences in midday water potential, and thus was allowed to continue drying for two days further. The remaining days of the study were cooler and somewhat cloudy, progressively increasing in air temperature maxima from 21 to 29°C. Cooler temperatures and lower evapotranspiration were seen in reduced conductance which would have in turn reduced plant water use, and fewer visible signs of water stress.

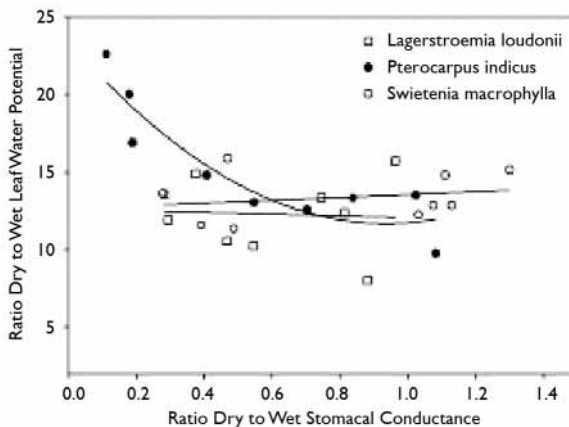


Figure 2.
Ratio of dry to wet water potential related to dry to wet ratio of stomatal conductance.

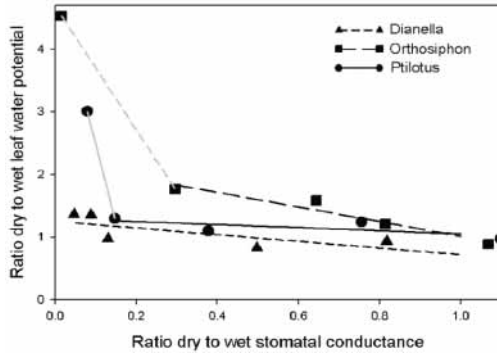


Figure 3.
Ratio of dry to wet water potential related to dry to wet ratio of stomatal conductance.

Interestingly, conductance of *Dianella* that had been dried down did not fully recover even after re-watering, and water potential differences between the stressed versus control treatments were negligible. By contrast, *Ptilotus* conductance increased to near well-watered levels after re-watering, but with a large water potential difference, and then declined, moderating water potential to levels similar to the well-watered plants.

By normalizing stomatal conductance and water potential of stressed relative to well-watered plants, stomatal conductance appeared to control leaf water potential in an isohydric pattern for *Ptilotus* and *Dianella* (Fig. 3). *Dianella* moderated leaf water potential to within 40% of well-watered (wet) values through nearly complete stomatal closure. *Ptilotus* stomata did not initially moderate leaf water potential as much, as it fell to three times more negative as well watered plants as stomata closed during the first drying cycle. Otherwise partial stomatal closure in *Ptilotus* maintained water potential within 40% of well watered levels. *Orthosiphon* stomata maintained less control in a more anisohydric pattern. Leaf water potential fell to four times more negative than well watered plants as stomata completely closed during the first drying cycle. Partial stomatal closure still allowed *Orthosiphon* water potential to decline to nearly twice as negative as well watered plants.

The results from these two studies indicate that both woody and herbaceous species show iso-/aniso-hydric water use strategies. The monsoonal dry forest species regulated internal water potential, even though they differed widely in their water use rates. Consistent with other reports (Choat *et al.*, 2005; Ishida *et al.*, 2006), the deciduous *Lagerstroemia* had higher conductance and transpiration rates that would allow it to maximize photosynthesis and growth during the monsoonal wet season, as well as progressively more negative water potential even in the well-watered plants. *Swietenia* was a more conservative, very isohydric pattern, of stomatal control, and with more negative water potential, hydraulic restrictions appear to be a major factor (Brodribb *et al.*, 2003). However, stomatal sensitivity to soil water depletion and high vapor pressure deficits and evaporative demand are likely to

increase with age when these trees are larger (Ishida *et al.*, 2006). Gravity will exert a greater pull, increasing the pull on internal water potential such that stomata will close at lower vapor pressure deficits to reduce the pull on internal water. In an arid zone shelterbelt planting an evergreen species such as *Swietenia* with a deep root system would be well suited. Monsoonal deciduous species, *Lagerstroemia* for example, would work in the higher rainfall zones of the Great Green Wall with a longer monsoonal wet season to maximize growth, but would probably not be suited for the drier areas.

Dianella and *Ptilotus* differed in the drought tolerance mechanism. *Dianella* did not osmotically adjust, appearing to follow a hydraulically controlled isohydric model more closely, and had a deeper root system that would extract water from a larger soil volume (Stewart *et al.*, 2004). These adaptations would suit *Dianella*'s slightly more mesic habitat compared to *Ptilotus* for survival between rainfall in a somewhat more non-competitive situation (Cunningham, 2000). *Ptilotus* did not fit the iso- and anisohydric models as well. Initial soil drying in the first study did not moderate water potential to the same degree as *Dianella*, but did appear to trigger osmotic adjustment (Davies *et al.*, 2005), consistent with the observed more negative midday leaf water potentials, and allowing more aggressive water extraction (Lenz *et al.*, 2006) with an observed finer and more shallow root system. This less conservative, moderately isohydric behavior would be consistent with its native range in the driest areas of Australia where extracting as much water, particularly surface water from infrequent rainfall, as possible while tolerating desiccation would be key to survival (Lee *et al.*, 2007). *Ptilotus* represents a model strategy that combines anisohydric and isohydric strategies to maximize osmotic adjustment that allows more opens stomata in drier soil.

Conclusion

The iso-/anisohydric model of plant water adds a useful element to consider when selecting species for shelterbelts in semi-to-arid conditions such as the Great Green Wall. Initial screening based on clear morphological traits that reduces transpiration such as small, thick, bluish, hairy foliage is a significant step. Another morphological factor is evergreen-ness. Deciduous species that tend towards anisohydric behavior may have very high transpiration rates that can be advantage in deep soils where photosynthesis and growth are maximized during the rainy season, but too long a dry season deciduousness could result in consumed water without enough compensating growth. Conversely, evergreen isohydric species that are particularly sensitive to dry air and soil may have very limited chances for optimal growth. *Ptilotus* offers a water use strategy if combined with deep rooting that rapidly achieves osmotic adjustment through anisohydric water use, but then maintains a more isohydric approach during soil.

References

- Brodribb, T. J., N. M. Holbrook, E. J. Edwards, M. V. Guitierrez. 2003. Relation between stomatal closure, leaf turgor and xylom vulnerability in eight tropical dry forest trees. *Plant, Cell, Environment* 26:443-450.
- Choat, B., M. C. Ball, J. G. Luy, J. A. Holtum. 2005. Hydraulic architecture of deciduous and evergreen dry rainforest tree species in north-eastern Australia. *Tree*:19-305-311.
- Cunningham, S. A. 2000. Effects of habitat fragmentation on the reproductive ecology of four plant species in mallee woodland. *Conservation Biol.* 14: 758-768.
- Davies, W. J., G. Kudoyarova, and W. Hartung. 2005. Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *J. Plant Growth Reg.* 24: 285-295.
- Ishida, A., Diloksumpun, S., Ladpala, P., Staporn, D., Panuthai, S., Gamo, M, Yazaki, K., Ishizuka, M., Puangchit, L., 2006. Contrasting seasonal leaf habits of canopy trees between tropical dry-deciduous and evergreen forests. *Tree Physiology* 26, 643-656.
- Johnson, D. A., R. A. Richards, and N. C. Turner. 1983. Yield, water relations, gas exchange, and surface reflectance of near-isogenic wheat lines differing in glaucousness. *Crop Sci.* 23: 318-325.
- Lampinen, B.D., K.A Shackel, S.M. Southwick, W.H. Olson, and T.M. Dejong, 2004. Leaf and canopy level photosynthetic responses of French prune (*Prunus domestica* L. 'French') to stem water potential based deficit irrigation. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 79: 638-644.
- Lee, K. K., D. K. Harrison, M. E. Johnston, and R. R. Williams. 2007. Molecular and taxonomic clarification of *Ptilotus exaltatus* and *Ptilotus nobilis* (Amaranthaceae). *Australian Systematic Biol.* 20:72-81.
- Lenz, T. I., I. J. Wright, and M. Westoby. 2006. Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients. *Phys. Plantarum.* 127:423-433.
- Martinez-Ferri, E., L. Belaguer, F. Valladares, J. M. Chico, and E. Manrique. 2000. Energy dissipation in drought-avoiding and drought-tolerating species at midday during the Mediterranean summer. *Tree Phys.* 20:131-138.
- Robichaux, R.H. 1984. Variation in the tissue water relations of two sympatric Hawaiian *Dubautia* species and their natural hybrid. *Oecologia* 65:75-81.
- Schultz, H. R. 2003. Differences in hydraulic architecture account for near isohydric and anisohydric behavior of two field-grown *Vitis vinifera* cultivars during drought. *Plant Cel, Env.* 26:1393-1405.
- Stewart, R., R. Kjelgren, P. Johnson, and M. Kuhns. 2004. Soil-water-use characteristics of precision-irrigated buffalograss and Kentucky bluegrass. *Applied Turfgrass Sci.* doi: 10.1094/ATS-2004-1118-01-RS.
- West, A. G., K. R. Hultine, J. S. Sperry, S. E. Bush, and J. R. Ehleringer. 2008. Transpiration and hydraulic strategies in a pinon-juniper woodland. *Ecological Applications* 18:911-927.
- Wullschleger, S. D., F. C. Meinzer, and R. A. Vertessy. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Phys.* 18:499-512.
- Zollinger, N., R. Kjelgren, T. Cerny-Koenig, K. Kopp, and R. Koenig. 2006. Drought responses of six ornamental herbaceous perennials. *Sci. Hort.* : 109:267-274.

Les arbres actinorhiziens de la famille des *Casuarinaceae* : utilisations et étude de la plasticité racinaire face aux contraintes abiotiques

VALÉRIE HOCHER, HASEN GHERBI, SERGIO SVISTOONOFF, NATHALIE DIAGNE, VIRGINIE VAYSSAIRE, FLORENCE AUGUY, JOCELYNE BONNEAU, LAURENT LAPLAZE, PATRICK DOUMAS, DIDIER BOGUSZ & CLAUDINE FRANCHE

Equipe Rhizogenèse, UMR DIAPC, IRD (Institut de Recherche pour le Développement), 911 avenue Agropolis, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France. <http://www.mpl.ird.fr/rhizo>. Email : Claudine.Franche@ird.fr

Résumé

Les plantes susceptibles d'établir une symbiose fixatrice d'azote avec l'actinomyète du sol *Frankia* sont appelées plantes actinorhiziennes. Ce sont principalement des plantes ligneuses, capables de coloniser des sols pauvres et de tolérer une grande variété de stress. Dans les régions tropicales arides et semi-arides, les arbres actinorhiziens de la famille des *Casuarinaceae* sont très utilisés pour réhabiliter les sols dégradés, protéger les zones côtières et les cultures de l'ensablement, et fournir du bois de chauffe. Les facultés d'adaptation de *Casuarina* aux sols carencés en éléments nutritifs sont liées à la plasticité racinaire remarquable de cet arbre qui adapte son programme de développement en fonction de son environnement. Les recherches entreprises dans notre laboratoire visent à comprendre les bases moléculaires de cette plasticité chez l'espèce *Casuarina glauca*. Des approches génomiques et des études d'analyse fonctionnelle de gènes candidats sont développées en partenariat avec des laboratoires du Sud.

Mots clés :

CASUARINA, FRANKIA, SYMBIOSE, NODULE ACTINORHIZIEN, GÈNE SYMBIOTIQUE.

Introduction

L'échange d'éléments nutritifs prend une importance critique quand la fertilité des sols et la disponibilité en eau sont réduites. Malgré la présence de grandes quantités d'azote dans l'atmosphère (78 % de diazote), sa disponibilité est l'un des facteurs limitants majeurs de la croissance des végétaux. La molécule d'azote est en effet très stable et aucun organisme supérieur n'est capable de la réduire en ammoniac pour la rendre assimilable. Seules des bactéries dites « fixatrices d'azote » sont capables de transformer le diazote atmosphérique en ammoniac (Postgate, 1998). Les systèmes fixateurs d'azote les plus efficaces sont les associations symbiotiques entre bactéries fixatrices d'azote et plantes, permettant un couplage entre photosynthèse et fixation. A côté de la symbiose *Rhizobium*-légumineuses, il existe un deuxième groupe de plantes symbiotiques toutes aussi importantes, appelées plantes actinorhiziennes. Celles-ci sont capables d'établir une symbiose fixatrice d'azote avec l'actinomycète du sol *Frankia*. L'établissement de la symbiose aboutit au développement d'un nouvel organe au niveau racinaire, l'actinorhize ou nodule actinorhizien, qui est le site de la fixation d'azote atmosphérique par le microorganisme symbiote (Duhoux *et al.*, 1996 ; Wall, 2000).

Une utilisation raisonnée des plantes fixatrices d'azote, et tout particulièrement des arbres fixateurs d'azote dans le contexte de la « grande muraille verte », est un enjeu majeur pour la réhabilitation des sols dégradés et le maintien de leur fertilité.

Casuarina, un arbre tropical actinorhizien

La famille des *Casuarinaceae* appartient à l'ordre des Casuarinales. Elle compte quatre genres, *Allocasuarina*, *Casuarina*, *Ceuthostoma* et *Gymnostoma*, et constitue un groupe d'environ 90 espèces d'arbres et d'arbustes dont l'aire d'origine s'étend de l'Australie aux îles du Pacifique et au sud-est de l'Asie (National Research Council, 1984). Les *Casuarinaceae* possèdent des rameaux chlorophylliens à activité photosynthétique et des feuilles réduites à des écailles verticillées cornées, limitant les pertes en eau et leur permettant de survivre dans des climats chauds et secs. En association avec *Frankia* et des champignons mycorhiziens, les *Casuarinaceae* peuvent croître sur des sols marginaux carencés en azote et en phosphore. La famille des *Casuarinaceae* comprend des essences tropicales, subtropicales ou méditerranéennes, adaptées à différents climats (arides à humides), à différentes altitudes (0 à 3 000 m) et à différents types de sols (acides à alcalins). L'ensemble de ces propriétés facilite l'introduction de ces arbres en zone tropicale, en dehors de leur aire d'origine.

Casuarina joue un rôle essentiel dans les zones tropicales arides et semi-arides pour la production de biomasse et de bois de chauffage (Sénégal, Vietnam) ; il contribue également à la restauration de la fertilité des sols (Inde, Chine), et intervient dans la protection des sols contre les formes d'érosion (fixation des dunes ou des sols érodés en Inde et en Chine) (National research Council, 1984 ; Diem et Dommergues, 1990 ; Diouf *et al.*, 2008).

La plasticité remarquable du système racinaire de *Casuarina*

L'environnement de la racine est un déterminant majeur de l'architecture racinaire. Comme toutes les plantes, les racines des Casuarinacées sont soumises à de nombreux stress abiotiques et interagissent avec des microorganismes du sol. Cependant, le système racinaire de ces plantes pionnières présente une aptitude particulièrement remarquable à adapter son programme de développement en fonction de son environnement :

- *Casuarina* s'associe à *Frankia* et développe des nodules racinaires qui contribuent à la nutrition azotée de l'arbre ;
- *Casuarina* s'associe également avec des champignons endomycorhiziens arbusculaires et ectomycorhiziens dont les rôles sont multiples : fournir des nutriments tels que le phosphore, améliorer l'absorption de l'eau dans le sol, protéger le système racinaire des pathogènes ; cette association est bénéfique à la fois à la fixation d'azote (augmentation de la biomasse des nodules) et à la croissance de la plante hôte ;
- Enfin, en condition de carence en phosphore ou en fer, un nouveau type racinaire se différencie sur *Casuarina* : les racines protéoïdes ou racines touffes ; ces structures, qui peuvent représenter jusqu'à 5 % de la biomasse racinaire, sont constituées de touffes de radicelles à croissance limitée (2 à 50 mm de long). Le rôle des racines protéoïdes est d'améliorer l'absorption des éléments peu solubles dans le sol ; on a pu montrer que, à mesure que les racines protéoïdes sont formées, la teneur en phosphore et en fer dans les tissus augmente (Neumann et Martinoia, 2002).

Cette plasticité racinaire joue un rôle majeur dans l'adaptation des Casuarinacées aux sols carencés en minéraux (phosphate, phosphore et fer en particulier) ou en azote combiné. L'étude approfondie des mécanismes moléculaires qui permettent la mise en place de ces différents programmes de développement, actinorhize, mycorhize et racine protéoïde, présente donc un intérêt évident au plan écologique et agronomique. Notre équipe a pour objectif de comprendre les bases moléculaires de cette plasticité, en développant à la fois des approches génomiques et d'analyse fonctionnelle de gènes candidats pouvant avoir une fonction clé dans l'adaptation aux stress abiotiques.

Génomique de l'interaction *Frankia-Casuarina*

Une analyse comparative globale des gènes exprimés (EST) dans les racines inoculées ou non par *Frankia* a été initiée dans l'espèce *Casuarina glauca*. Plus de 40 000 ESTs (séquençage Génoscope) ont été séquencées à partir de différentes banques d'ADNc de *Casuarina* issues des conditions suivantes : (i) nodules fixateurs d'azote induits par *Frankia*, (ii) racines témoins non infectées qui correspondent aux gènes exprimés de manière basale dans les racines, (iii) racines prélevées 2, 4 et 7 jours après l'infection par la bactérie et (iv) racines mycorhizées. Les premiers résultats indiquent que les gènes fortement exprimés dans les nodules appartiennent au métabolisme primaire, à la synthèse de protéines, à la division cellulaire et aux processus de défense (Hocher *et al.*, 2006).

Des puces à ADN "nodule" et "racine" ont été obtenues récemment, et des analyses globales d'expression sont en cours à l'aide de sondes correspondant aux ARNm des racines et de l'ensemble des organes dérivés des racines de *Casuarina* (nodules fixateurs d'azote, ecto et endomycorhizes, racines protéoïdes). Ces études permettront l'identification de gènes présentant des différences d'expression majeures.

Analyse fonctionnelle de gènes clés permettant l'adaptation du système racinaire

Afin d'aborder ensuite la fonction des gènes chez *C. glauca*, plusieurs outils ont été mis au point. Des techniques de transformation génétique basées sur l'utilisation des vecteurs *Agrobacterium tumefaciens* et *A. rhizogenes* ont été développés avec *C. glauca* (Obertello *et al.*, 2007). Ces avancées ont ensuite permis de développer des approches par ARN interférent aboutissant à éteindre de façon ciblée l'expression des gènes étudiés dans *C. glauca* (Gherbi *et al.*, 2008a). Un gène indispensable à l'établissement du processus symbiotique avec *Frankia* a ainsi pu être caractérisé (Gherbi *et al.*, 2008b).

Les enjeux de ces recherches

L'ensemble des recherches entreprises sur la symbiose *Casuarina-Frankia* a pour objectif de comprendre comment le système racinaire s'adapte aux sols carencés et modifie son architecture en réponse aux microorganismes du sol. Ces études vont avoir pour conséquence directe une meilleure maîtrise des conditions de nodulation par le microorganisme *Frankia* dans les plantations.

Un autre enjeu majeur est l'identification des molécules « signal » de *Frankia*. Si ces molécules aboutissent au processus symbiotique, elles permettent également une stimulation importante du système racinaire de l'arbre. Le développement d'inoculants bactériens enrichis en ces facteurs pourrait donc avoir des retombées appliquées importantes pour favoriser l'enracinement des arbres actinorhiziens, augmenter de façon significative le taux de nodulation et la croissance des arbres.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Il est effectué dans le cadre de collaborations avec l'Université Cheick Anta Diop de Dakar, le Laboratoire Commun de Microbiologie de Dakar IRD/ISRA/UCAD, le Research Institute of Tropical Forestry (RITF) de Canton, et l'Institute of Forest Genetics and Tree Breeding (IFGTB) de Coimbatore.

Références

- Diem, H.G., and Dommergues, Y.D. 1990. Current and potential uses and management of *Casuarinaceae* in the tropics and subtropics. In : Schwintzer, C.R. and Tjepkema, J.D. (eds.) *The Biology of Frankia and Actinorhizal Plants*. Academic Press, New York, pp. 317-342.
- Diouf, D., Sy, M-O., Gherbi, H., Bogusz, D., and Franche, C. 2008. *Casuarinaceae*. In « Compendium of Transgenic Crop Plants » : Transgenic Forest Tree Species, vol. 9, Kole, C.R., Scorza, R. and Hall, T.C. (eds), Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 279-292.
- Duhoux, E., Diouf, D., Gherbi, H., Franche, C., Ahée, J., and Bogusz, D. 1996. Le nodule actinorhizien. *Acta bot. Gallica* 143 : 593-608.
- Franche, C., Diouf, D., Le, Q.V., N'Diaye, A., Gherbi, H., Bogusz, D., Gobé, C., and Duhoux, E. 1997. Genetic transformation of the actinorhizal tree *Allocasuarina verticillata* by *Agrobacterium tumefaciens*. *Plant J.* 11 : 897-904.
- Gherbi, H., Nambiar-Veetil, M., Zhong, C., Félix, J., Autran, D., Girardin, R., Vaissayre, V., Auguy, F., Bogusz, D., and Franche, C. 2008. Post-transcriptional gene silencing in the root system of the actinorhizal tree *Allocasuarina verticillata*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 21 : 518-524.
- Gherbi, H., Markmann, K., Svistoonoff, S., Estevan, J., Autran, D., Giczey, G., Auguy, F., Péret, B., Laplaze, L., Franche, C., Parniske, M., and Bogusz, D. 2008b. *SymRK* defines a common genetic basis for plant root endosymbioses with AM fungi, rhizobia and *Frankia* bacteria. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 105 : 4928-4932.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Hocher, V., Auguy, F., Argout, X., Laplaze, L., Franche, C., and Bogusz, D. 2006. Expressed sequence-tag analysis in *Casuarina glauca* actinorhizal nodule and root. *New Phytol.* 169 : 681-688.
- Laplaze, L., Svistoonoff, S., Santi, C., Auguy, F., Franche, C., and Bogusz, D. 2008. Molecular biology of actinorhizal symbioses. *In Nitrogen-fixing actinorhizal symbioses.* Eds. K Pawlowski and W E Newton. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 235-259.
- National Research Council. 1984. *Casuarinas : nitrogen-fixing trees for adverse sites.* National Academic Press, Washington DC, USA.
- Neumann, G. and Martinoia, E. 2002. Cluster roots – an underground adaptation for survival in extreme environments. *Trends Plant Sci.* 7 : 162-167.
- Obertello, M., Santi, C., Svistoonoff, S., Hocher, V., Auguy, F., Laplaze, L., Bogusz, D. and Franche, C. 2007. *Casuarina glauca.* In : « Economic crops ». Pua, E.C. and Davey, M. R. (eds), Springer Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 433-445.
- Postgate, 1998. *Nitrogen fixation.* Cambridge University Press, 112 p.
- Wall, L.G. 2000. The actinorhizal symbiosis. *J. Plant Growth Regul.* 19 : 167-182.

Pruning of *Acacia salicina* trees irrigated with runoff water in arid zones

JONATHAN E. EPHRATH

Wylar Department of Dryland Agriculture, French Associates Institute for Agriculture and Biotechnology of Drylands, Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev Sede Boqer Campus Sede Boqer 84990, Israel
Corresponding author: yoni@bgu.ac.il

KEBBA N. SONKO

Albert Katz International School for Desert Studies, Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev Sede Boqer Campus Sede Boqer 84990
Department of Forestry, Gambia

PEDRO R. BERLINER

Wylar Department of Dryland Agriculture, French Associates Institute for Agriculture and Biotechnology of Drylands, Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev Sede Boqer Campus Sede Boqer 84990, Israel

Abstract

In arid and semi arid lands, forest and agricultural productions are declining due to water scarcity and drought. The objective of this study was to determine the effects of shoot pruning at different heights of *acacia salicina lindl.* grown in the Israeli Negev Desert and irrigated with runoff water. The specific objectives of this study were to examine the most appropriate pruning height, growth rate and biomass production, water use efficiency of *A. salicina* shrubs irrigated with floodwater and the water uptake rate and soil water content change at the different pruning height treatments. The trees were planted in 1993 in a 0.5 ha plot at a design of 1 m between trees within the rows and 4 m between rows (1,250 trees ha⁻¹). The trees were pruned at a height of 0.5m, 1.0m and 2.0m above soil surface and were compared to non-pruned trees (NP treatment, served as control treatment). Measurements of trunk diameter at a height of 0,3 m above soil surface, re-growth of new branches and soil water uptake by trees, using a neutron moisture gauge that has been previously calibrated in the field), were take every two weeks. Three pruning were carried out during the two years of the experiment. The first pruning was at the beginning of the experiment in March 2003, the second one in December 2003 and the third one in October 2004. Biomass measurements were taken after the second and the third pruning. A non-destructive biomass evaluation was carried out to the NP treatment by using a linear regression of cross Sectional Area (CSA) of trunk versus biomass yield developed from an adjacent plot of *A. salicina* of the

same age. The results of the experiment indicate that more biomass was obtained from the 2,0 m pruning treatment followed by the 1,0 m. Water Use Efficiency had the same pattern. Under the condition of this experiment, the most appropriate pruning height for *A salicina* trees irrigated with floodwater is 2,0 m.

Keywords

SOIL-WATER-CONTENT; RE-GROWTH; FLOODWATER; BIOMASS-PRODUCTION;
DESERTIFICATION; AFORESTATION

Introduction

Among the main leading causes of desertification in arid and semiarid zones of underprivileged countries in the world are deforestation and overgrazing (Middleton and Thomas, 1997; Eggleton, 2002; Cline-Cole *et al.*, 1990). As a result, short-rotation plantations of fast growing, multi-purpose nitrogen-fixing trees or shrubs, based on local water resources, may offer a solution to these problems and alleviate pressure on the local vegetation. The use of water for agricultural production in water scarce regions requires innovative and sustainable research and appropriate transfer techniques. In arid lands, uses of appropriate technologies that are economically viable and socially acceptable are areas of priority for the developing agricultural (Pereira 2002). Worldwide, dryland agriculture is generally rain-fed. Because of low precipitation, special farming techniques and well-adapted crops are needed to ensure successful and sustainable agriculture. Runoff generated during rainfall events flows by gravitation into the lower parts of the landscape and is retained in wall plots. In these plots, crops are planted and have an adequate water supply. Rainfall is characterized as short and intense rainstorms, which produce large amounts of water that are lost as runoff water. Furthermore, the crusted nature of most arid and semiarid soil limits its water infiltration capacity and increase runoff, exacerbating the scarcity of available soil water. The collection of runoff water in an infiltration basin is, however, a proven viable approach to produce food, fodder and firewood in arid and semiarid areas.

The growth of a tree is enhanced by the supply of assimilates. Trees having larger leaf mass fractions (leaf mass/total plant mass) can produce more assimilates per unit plant mass and invest proportionately more assimilates to growth (Zeng, 2003; Poorter, 1998).

Tree pruning is a common management practice in agroforestry for mulching, fuel wood, fodder and reducing competition between the annuals and perennial crops (Peter and Lehmann, 2000). The harvest of woody products often involves in partial or complete removal of canopy on a regular basis. The amount, frequency and quality of water supplied to the plant may significantly affect the regrowth and functioning of shoots and roots.

Pruning effectively reduces root development and decrease potential below-ground competition with intercropped plants (Peter and Lehmann, 2000). The reduction in roots also increases the danger of nutrients losses by leaching of mobile nutrients (Peter and Lehmann, 2000).

Tree pruning strongly decrease the root length density by lowering the supply of assimilates from the leaves and retranslocating sugar to above-ground organs. Therefore, pruning the above-ground biomass is an effective way of controlling below –ground growth. The lower root abundance and the laterally restricted root system after pruning decrease below-ground competition and result to positive crop yields in an intercropping system (Peter and Lehmann, 2000).

Droppelmann *et al.* (2000) stated in their study that tree pruning decreased water uptake compared to non-pruned. They also stated that after complete pruning, a large fraction of the whole active sapwood area of the trunk turns prematurely into heartwood and, replacement sapwood is formed in order to support the newly formed branches and leaves. Pruned trees spent a larger portion of their photosynthates on leaf growth than on biomass accumulation in the trunk (Droppelmann *at al.*, 2000).

There are two factors that may affect the rate of biomass accumulation after cutting over a given period: the technique used for the tree harvesting (e.g. Lopping, pruning, pollarding or coppicing) and the timing of harvesting (i.e. cutting intervals) (Droppelmann *at al.*, 2000).

Pruning changes the structure of tree crowns dramatically. The study of Zeng (2003) on pruning of a one year old *Pinus massoniana* trees gave interesting results: the Above Ground Leaf Mass Fraction (AGLMF) of twice-pruned *P. massoniana* trees one year after pruning was higher than the AGLMF of trees that were pruned once a year. The conclusion of that study revealed that pruned trees are able to adjust biomass partitioning within their shoot and recuperate their AGLMF quickly. This reaction would be beneficial to the re-growth and recovery of the pruned trees following pruning. In plants, early stage of shoot elongation is typical for the new leaves to receive photosynthates from storage tissues in the previous year's growth of the tree (old leaves). However, as the season of the growth progresses, the maturing leaves become more self-sufficient, and become the source of carbohydrate to the tissue (Lanner, 2002).

In arid and semi-arid regions of the world, there is a wide range of indigenous water harvesting (WH) techniques used. The two major types of WH systems utilize direct and the indirect methods. The direct WH system store runoff water in the soil profile of the planted area while the indirect WH system use tanks or reservoirs to collect runoff, which is applied, to the planted area with some form of irrigation system (Ojasivi, 1999).

Flooding affects soils by altering soil structure, depleting O₂, inducing anaerobic decomposition of organic matter, and, reducing iron and manganese (Prinz, 2001). In some cases, flooding increases stem thickness through the growth of bark tissue (Kozlowski, 1997). Flood tolerant varies greatly among plant species, genotypes and rootstocks, and is influenced by plant age, time and duration of flooding, condition of the floodwater and the site characteristics (Kozlowski, 1997).

The main objective of this study was to determine the effects of different pruning heights of *Acacia salicina* trees irrigated by runoff in an arid zone on growth, development and water use. More specifically, the objectives of the study presented here were (1) To determine the optimal height of pruning of fast growing trees (*A. salicina*) subjected to flood conditions and their rate of re-growth for maximum yield; (2) to determine the growth rate and biomass accumulation of *A. salicina* in terms of trunk diameter increment for four pruning treatments; (3) to determine yield (leaves and wood) of *A. salicina* trees as affected by irrigation from floods generated by runoff for all pruning treatments and (4) to monitor soil water uptake by the trees at the different pruning treatments.

Material and Methods

The experiment was carried out at the highlands of Israeli Negev Desert (31°08'N, 34°53'E;) at the runoff experimental farm located in Wadi Mashash. The site is at an elevation of about 400 m above sea level (m.a.s.l.).

The Climate in Wadi Mashash is classified as arid with a P/PET (ratio of precipitation over potential evaporation) of 0.04-0.05. The mean annual precipitation in the site of the experiment is 115 mm, most of which occurs between October and April. Maximal daily temperature is about 33°C during July and August, and minimal temperature is close to 5.0°C during January. The annual evaporation from a class A Pan is between 2500 to 3 000 mm per year.

The rainy season of 2003-04, began in October 2003 and ended in March 2004 with a total of 81.2 mm. During the period of this experiment, two flood events occurred, one in December 2003 and one in February 2004.

The soils in Wadi Mashash are characterized by two meters deep loessial deposit with a high water holding capacity (17% v/v). The profile is relatively homogenous with occasional thin layers of fine gravel or coarse sand starting at one meter depth. In deeper layers, more gravel is found with lime and flint stones (Lovenstein, 1993). The topsoil is slightly sandy loam with an average of 24% clay, 22% silt and 55% sand. The soil bulk density is 1.45 g/cm³. On average, this soil has an infiltration rate within the non-crustured upper layer close to 11 mm/hr. The soil type in the experimental site is mainly sandy clay loam and forms surface crust under the impact of raindrops conducive to runoff production (Eggleton, 2002).

The area of the experimental plot was 0.5 ha. It was planted with *Acacia salicina* in 1993. The plot, surrounded by walls from three sides formed a leveled water catchment basin.

At the end of the winter of 2002-2003 (February 2003), soil samples from two representative points in the basin were taken at 30 cm increment up to the depth of 210 cm with a soil auger and oven dried for determining initial soil moisture content.

Acacia salicina Lindl. belongs to the family Fabaceae. It is indigenous to mainland Australia. *A. salicina* is an evergreen fast growing tree, which attains a height of about 15 m, with a spreading crown of 4 m and a recorded trunk diameter of over a meter. The stem is erect and suckering, with a rounded crown and branches weeping almost to the ground. *A. salicina* plants were propagated from seeds and planted out in the field in 1994. At the beginning of the experiment in March 2003, the height of the trees ranged between 5-8 m with a crown width of 2-4 m with dropping crowns close to the ground. The diameter of tree trunks ranged between 11 cm to 70 cm. About 10 % the trees were branched about 1.0 m above ground level.

Four pruning treatments were carried out (Table 1). Each treatment was replicated three times. Three prunings were carried out throughout the experiment. First pruning was done in early March 2003 and re-growth count was carried out from May 22 until July 13, 2003. The second pruning was done in December 2003. Since right after the pruning a flood event occurred, the counting of re-growth (new branches) was carried out from April 3 to June 13, 2004. Third pruning was made at the end of the experiment in September 2004. The time period between the first and second pruning will be termed hereafter “First re-growth period “ and the period between the second and third pruning termed accordingly “: Second re-growth period”.

Soil moisture was estimated using a neutron probe. The neutron probe was field-calibrated against volumetric water content measurements. Separate calibration equations were developed for the top 0.15 m and the deeper soil layers. Two aluminum access tubes were installed to a depth of 6 m in each plot with a distance of 0.5 m and 2.0 m from two selected trees respectively. Soil moisture was determined at 0.15 m intervals down to the depth of 1.2 m and at intervals of 0.30 m increments thereafter down to the depth of approximately 6 m.

Results

Biomass production

Figures 1 and 2 shows the re-growth of new branches of the three pruning treatments (0.5 m, 1.0 m and 2.0 m) for the first and second re-growth periods respectively.

In both growing periods, the 2.0 m pruning treatment produced the highest number of branches followed by 1.0 m and 0.5 m pruning treatments respectively. A significant difference (Turkey HSD comparison test, alpha = 0.05) in the number of new branches was found between all three pruning treatments with the exception of day 52 after pruning of the first re-growth period for which no significant differences between the 1.0 m and 0.5 m was found. Results of the experiment in the second re-growth period indicate that there were more new branches from the 2.0 m pruning treatment followed by 1.0 m and 0.5 m treatments. There was a significant difference (Turkey HSD comparison test, alpha = 0.05) between all the

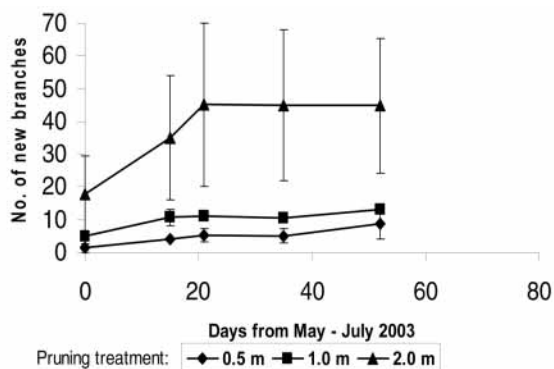


Figure 1.
Number of new branches during the first re-growth period.
Bars denote one standard deviation.

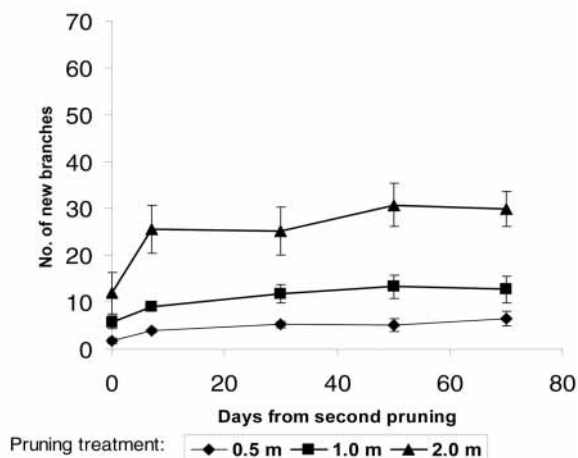


Figure 2.
Number of new branches during the second re-growth period.
Bars denote one standard deviation.

three treatments. The number of new branches in the second re-growth period was smaller when compared to the first re-growth period.

Tree trunk cross-sectional area increment for the four pruning treatments is presented in Figures 3 and 4. In both years, the largest increment was measured in the NP treatment and was significantly higher (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) than that of the other three pruning treatments. No significant differences in the trunk increments were found among the remaining the pruned treatments. Comparing the increment of the trunk in the two growing seasons of the experiment showed a significant difference in the trunk cross sectional increment during the second year when compared with the first year in all pruning treatments.

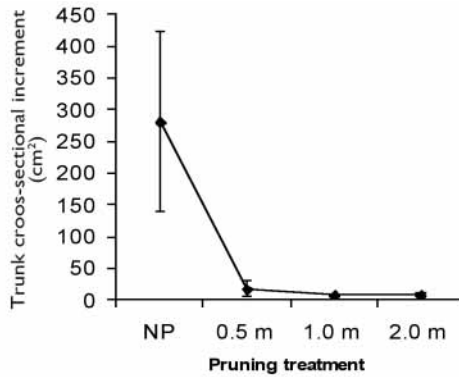


Figure 3.

Trunk cross-sectional area increment of *A. salicina* during the first re-growth period. Bars denote one standard deviation.

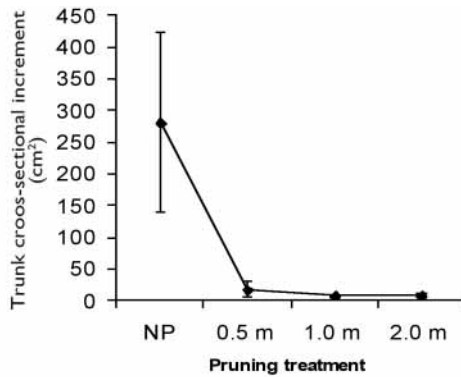


Figure 4.

Trunk cross-sectional area increment of *A. salicina* during the second re-growth period. Bars denote one standard deviation.

The second and third pruning events were carried out at the end of each of the re-growth periods. The fresh biomass (leaves, branches and twigs) was weighted directly in the field. A sub-sample of branches and leaves were then oven dried in the laboratory at a temperature of 65°C for two weeks and was used to estimate the total dry weight (Figures 5 and 6).

In both years, the 2.0 m pruning treatment gained the highest dry biomass both in leaves and twigs with branches. In the first year, there was a significant difference between the leaf dry weight of the 2 m pruning treatment and the 1 and 0.5 m pruning treatments. No significant difference was found between the 1.0 m and 2.0 m pruning treatments in the total biomass but a significant difference was found between the two treatments for leaf biomass. A significant difference (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) was found between the 2.0 m and 0.5 m for both branches and leaves. No significant differences were found between the 1.0 and

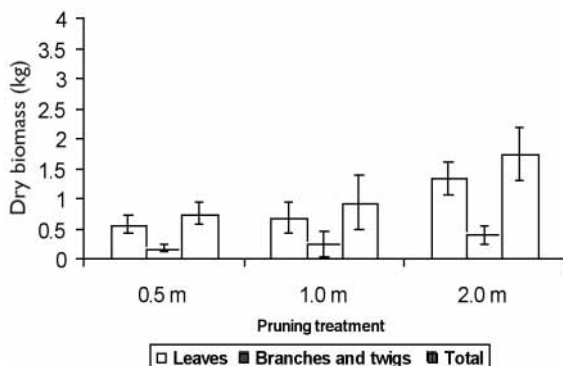


Figure 5. Leaves, branches with twigs and total dry biomass (destructively sampled) produced during the first re-growth period. Bars denote one standard deviation.

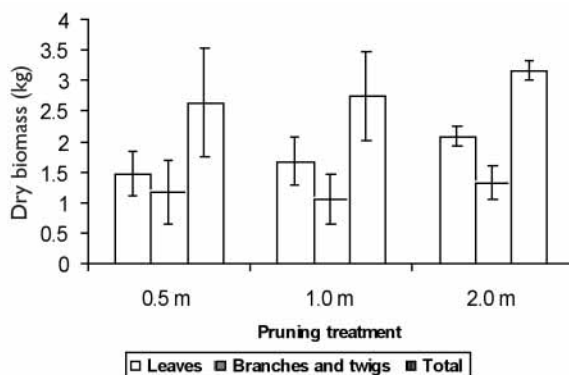


Figure 6. Leaves, branches with twigs and total dry biomass (destructively sampled) produced during the second re-growth period. Bars denote one standard deviation.

0.5m pruning treatments. The final pruning of the trees of this experiment was conducted from September 26 to October 3, 2004. The result on biomass production for second re-growth period is presented in Figure 3. Leaves dry biomass of the 2.0 m treatment was significantly higher (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) than that of the 1.0 and 0.5 m pruning treatment

WATER UPTAKE

The precipitation in Wadi Mashash experimental farm during the winter of 2002-3 and 2003-4 is presented in Figure 7.

The total soil water content was computed to a depth of 4.2 m. The changes in the total water content during the first re-growth period showed relatively little change and are presented in Figures 8 and 9.

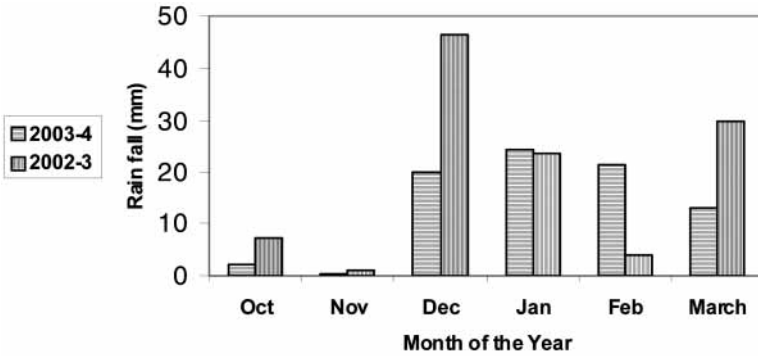


Figure 7.
Monthly rainfall (mm) recorded in Wadi Mashash Experimental farm during the winter of 2002-03 and 2003-2004

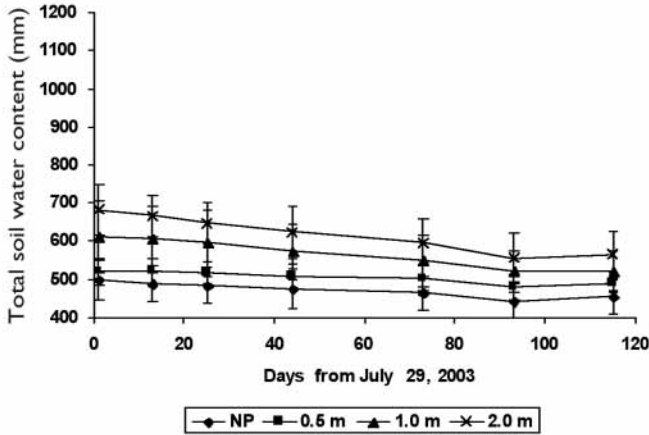


Figure 8.
Total soil water content to a depth of 4.2 m during the first re-growth period. Bars denote one standard deviation.

For all the pruning treatments, water in the soil profile was higher at the beginning of the experiment in July and declined gradually until the end of October 2003. The highest amount of water was found in the 2.0 m followed by 1.0 m, 0.5 m and lowest in NP treatments. There was a significant difference (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) between NP and 1.0 m and 2.0 m pruning treatments. There was no significant difference (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) between NP and 0.5 m pruning treatment. The 1.0 m and 2.0 m pruning treatments were not significantly different. The 0.5 m pruning treatment was significantly different to 2.0 m.

Water in the soil profile for second re-growth period (June –September 2004), is presented in Figure 9. Since two flood events occurred during the winter of 2003/4, the amount of water in the soil in the second re-growth period was higher than

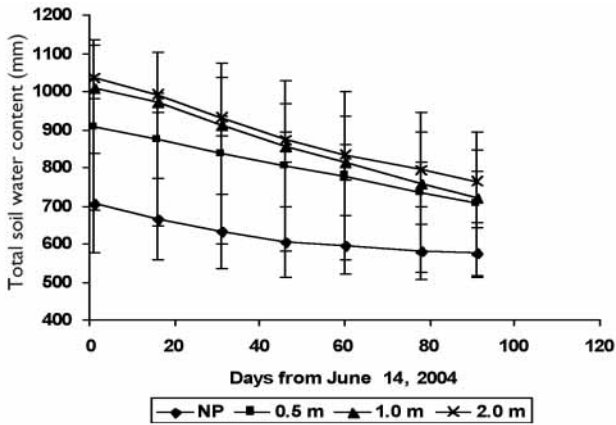


Figure 9.
Total soil water content to a depth of 4.2 m during the second re-growth period
Bars denote one standard deviation.

that of the first year. In all the pruned treatments soil water content decreased at a constant rate throughout the second re-growth period of the experiment. The rate of decrease in soil water content in the NP treatment changed in the middle of July and it became more moderate. A significant difference (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) in soil water content was found between the NP treatment and the 1 and 2 m pruning treatments.

Soil Water-uptake

Water uptake during the last five months of the first re-growth period is presented in Figure 10. The highest soil water uptake was found in 2.0 m treatment and the lowest in 0.5 m. treatment.

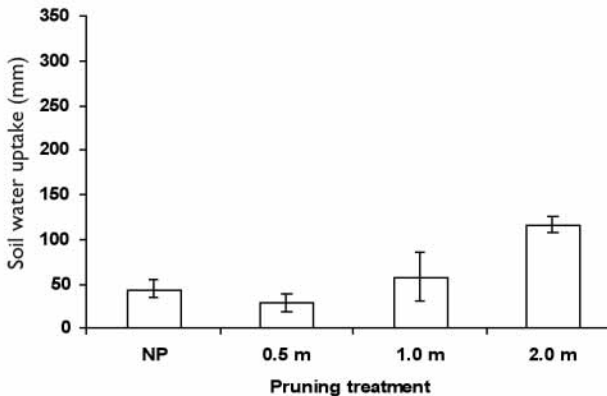


Figure 10.
Water uptake to a depth of 4.2 m during the last five months of the first re-growth period.
Bars denote standard deviation.

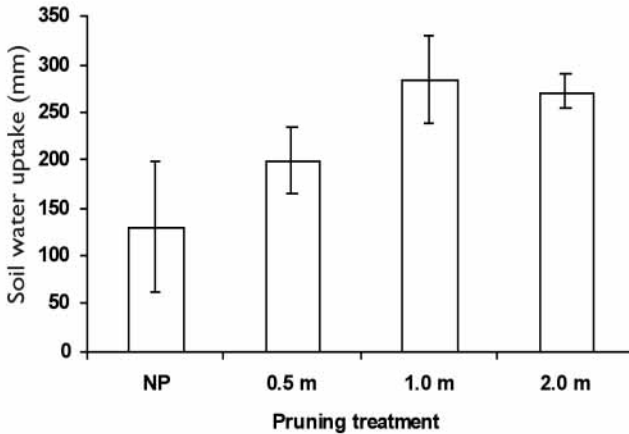


Figure 11.
 Water uptake to a depth of 4.2 m
 during the last four months of the second re-growth period
 Bars denote one standard deviation.

A significant difference at the 5% level (Turkey HSD comparison test) was found between the 2.0 m treatment and the other pruning treatments. No significant difference in water uptake was found between the NP, 0.5 m and 1.0 m treatments.

Water uptake during the second re-growth period (June – September 2004) is presented on Figure 11. The 1.0 and 2.0 m pruning treatments had no significant difference in their water uptake. Water uptake in these two treatments was significantly higher (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) when compared to the 0.5 m and the NP treatment. No significant difference was found between the NP and 0.5 m

Water Use Efficiency (CSA Measured Biomass from Trunk)

WUE changed according to the different pruning heights (Figure 12). The lowest WUE in the first year was measured in the 2.0 m pruning treatment. The highest one was found in the 0.5 m pruning treatment. A significant difference (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) was found only between the 2.0 m pruning and the other pruning treatments.

WUE during the second re-growth period are presented in Figure 13. Low WUE values were measured for the 1.0 and 2.0 m pruning treatments. Unlike the first year, the NP treatments had the highest WUE values. Those values were significantly higher (Turkey HSD comparison test, $\alpha = 0.05$) than those of the 1.0 m and 2.0 m pruning treatments but were not significantly different than those of the 0.5 m pruning treatment.

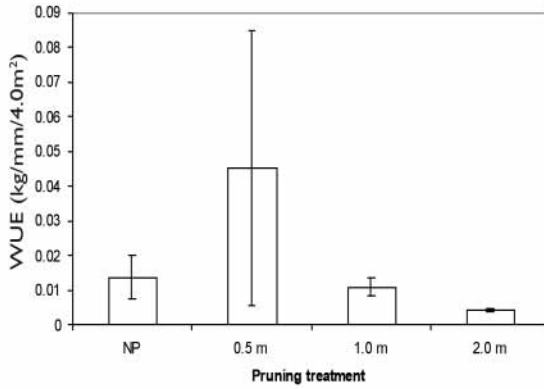


Figure 12.
WUE (kg/mm/ 4 m²) for the last five months of the first re-growth period.
Bars denote one standard deviation.

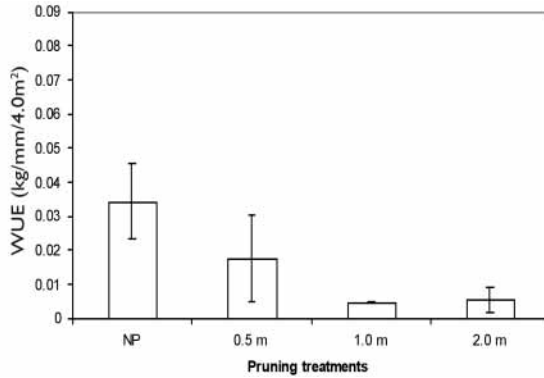


Figure 13.
WUE (kg/mm/ 4 m²) for the last four months of the second re-growth period.
Bars denote one standard deviation.

Conclusion

The result of this experiment was based purely on data collected on the field at Wadi Mashash. It is worth noting that even though trees of the same age for these pruning treatments were selected, there were a few big trees that were problematic in the analysis.

Re-growth

Re-growth of the various parts of the trees were according to the pruning height: The best growth was of the 2.0 m pruning and as the pruning height decreased, the new re-growth decreased as well (Figures 1 and 2).

Water in Soil Profile

Water use efficiency during the first year, which can be characterized as dry year (Figure 8, July to November) was the highest in treatment 0.5 m. During the second re-growth period, which was characterized with high soil water content for a longer period of time (Figure 9), the highest WUE was found in treatment 2.0 m. In relation to these results, pruning height should be done according to the amount of water available in the soil profile.

Water Use Efficiency

In this experiment, the best pruning height for trees was 2.0 m, followed by 1.0 m and 0.5 m, for the period after the floods (February to September 2004). This is based on the fact that higher pruning height treatments produced more biomass and having almost the same WUE (Figure 17) than lower pruning height (Figure 12 and 13).

Pruning and Biomass Production

The best height to prune based on biomass yields (leaves and wood) in this experiment after the flood were 2.0 m, 1.0 m and 0.5 m respectively (Figs 3-6) Additional water increased the biomass of the treatments in order of their pruning heights from high to low. However, more water is needed to produce more biomass relative to the heights of pruning mentioned above. Therefore, in water scarce regions, one has to be mindful of pruning height against water use in terms of yield production because the trees pruned at higher heights in our experiment used more water. The results of this pruning experiment on height and water use was important because it determined the level of water uptake and the biomass produced by the trees. The results on biomass production in this experiment also supported the work report by Droppelman (2000) that as trees take more water as they produced more biomass.

References

- Cline-Cole, R., J.A. Falola, H.A.C Main, M.J. Mortimore, J.E. Nichol and F.D.O'Reilly, 1990. Wood Fuel in Kano, United Nations University Press, Tokyo, Japan. 124 p.
- Droppelmann, K.J., Lehmann, J., Ephrath, J.E., and Berliner, P.R., 2000. Water Use Efficiency and Uptake Pattern in a Runoff Agroforestry System in an Arid Environment. *Agrofor Syst* 49: 223-243
- Eggleton, M. D., 2002. The Effect of Water Quality, Irrigation Frequency and Runoff Flooding on Shoot and Root Development of Pollarded *Acacia salicina* Shrubs in an Arid Environment. M.Sc. Thesis, Albert Katz International School of Desert Studies, Ben Gurion University, Israel, pp. 1-97.
- Kozlowski, T.T., 1997. Responses of Woody Plants to Flooding and Salinity. *Tree Physiology Monograph* No.1- Heron Publishing Victoria, Canada, pp1-29.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Lanner, R. M., 2002.
Why do Trees Live so Long:
Ageing Research Reviews, 1: 653-671.
- Middleton, N. and D. Thomas (eds.), 1997.
World Atlas of Desertification. Second Edition.
United Nations Environment Programme,
Arnold Publishers, U.K., 181 p.
- Ojasivi, P.R., R.K. Goyal., J.P. Gupta., 1999.
The Micro-catchment Water Harvesting
Technique for the Plantation of jujube
(*Ziziphus mauritiana*) in an Agroforestry
System under Arid Condition:
Agricultural Water Management 41: 139-147.
- Pereira, L. S., Oweis, T., Zairi, A., 2002.
Irrigation Management under Water Scarcity:
Agricultural Water Management, 57: 175-206
- Peter, I., and Lehmann, J., 2000.
Pruning Effects on Root Distribution
and Nutrient Dynamics in an *Acacia*
Hedgerow Planting in Northern Kenya.
Agrofor Syst 50: 59-75.
- Poorter, L., 1998.
Seedling growth of Bolivian Rain Forest
Tree Species in Relation to Light
and Water Availability. PhD Thesis.
Utrecht University, Utrecht.
- Zang, B., (2003).
Aboveground Biomass Partitioning
and Leaf Development of Chinese
Subtropical Trees following pruning:
Forest Ecology and Management 173:
135-144.

Acacia salicina : espèce candidate par son cycle biologique et sa tolérance au déficit hydrique à l'édification de la Grande Muraille Verte

ALI FERCHICHI

Institut des Régions Arides, 4119 Médenine, Tunisie.
Tél : 216 75 633 846. Fax : 216 75 633 006 ; E-mail : ferchichi.ali@ira.rnrt.tn

Résumé

Le cycle biologique, la croissance ainsi que l'effet du stress hydrique et salin sur la germination et le développement d'*Acacia salicina* ont été étudiés. La phénologie de cette espèce est marquée par un stade de végétation passive qui débute en novembre et s'étale jusqu'à mai. Vers mi-mai, l'arbre entre en végétation active. Les stades de floraison, de fructification et de dissémination ont lieu au cours de la période de mars-novembre. Tous ces stades phénologiques interfèrent et ne sont pas synchrones. L'effet du déficit hydrique a montré qu'*Acacia salicina* tolère des déficits hydriques sévères. Au stade germinatif, cette espèce tolère une salinité de 9 g/l de NaCl et un potentiel osmotique de -7 bars. Au-delà de cette limite, l'inhibition de la germination est probablement de nature osmotique. Au stade végétatif, la croissance n'est affectée qu'en présence de 6 g/l de NaCl. La tolérance à la contrainte saline est associée à trois caractéristiques physiologiques essentielles : (1) une bonne compartimentation vacuolaire de Na⁺ et Cl⁻ au niveau des feuilles, (2) une utilisation efficace de ces ions dans l'ajustement osmotique et le maintien de la turgescence, et enfin (3) une sélectivité d'absorption et de transport en faveur de K⁺, malgré l'excès de Na⁺ dans le milieu de culture.

Mots clés

ACACIA SALICINA, CYCLE PHÉNOLOGIQUE,
DÉFICIT HYDRIQUE, SALINITÉ, GERMINATION, CROISSANCE

Abstract

Phenological cycle, growth and water deficit effect on germination and growth of *Acacia salicina* was studied. This cycle is presented by a passive vegetative phase which starts in November and spread to May. In mid-May, the tree enters in active vegetation. The flowering, fructification and dissemination phases, take place during the period of March-November. All these different phenological stages interfere with each other and are not synchronous. Water stress effect shows the tolerance of *Acacia salicina* to severe hydric deficit. During germination, this species is able to tolerate salinity of 9 g/l of NaCl and an osmotic potential of -7 bars. Beyond this limit, the germination was inhibited probably because of an osmotic process. In vegetative stage, the growth was decreased in presence of 6 g/l of NaCl and this inhibition is observed too when the plant were subjected to a drought stress.

According to these results, tolerance to the saline constraint is associated to three essential physiological features : (1) a good vacuolar compartmentation of Na^+ and Cl^- accumulated particularly in leaves, (2) the effective utilization of these ions in osmotic adjustment to keep turgescence and finally (3) a selectivity of uptake and transport in favour of K^+ , inspite of Na^+ excess in culture medium.

Key words

ACACIA SALICINA, PHENOLOGICAL CYCLE,
DROUGHT TOLERANCE, SALINITY, GERMINATION, GROWTH

Introduction

La majorité des territoires du Sahara et du Sahel, se caractérisent par de longues périodes sèches (9 à 12 mois) et par l'irrégularité des précipitations et la rareté et la mauvaise qualité des eaux d'irrigation souterraines. Ainsi, la contrainte hydrique se pose comme facteur limitant au développement de toute forme de plantation ou de revégétation.

L'une des stratégies utilisées pour la réhabilitation de ces terres est l'introduction d'espèces adaptées aux contraintes du milieu et à valeur économique et fourragère appréciable. Le succès d'une telle opération est tributaire donc d'une meilleure connaissance des conditions d'installation et des aptitudes de ces espèces à s'acclimater à cet environnement à contraintes.

Parmi les espèces candidates à un tel rôle figure *Acacia salicina* qui est une espèce fourragère d'origine australienne, dont les phyllodes, les fleurs et les gousses servent surtout pour l'alimentation des caprins, ovins et bovins. Elle représente également une source de production du bois et contribue à la fixation des dunes.

Le présent travail, qui s'inscrit dans ce cadre vise à déterminer les limites de tolérance d'*Acacia salicina* aux contraintes saline et hydrique, aux stades germinatif et végétatif. Sont également étudiés la chronologie des stades phénologiques de cette espèce dans l'objectif d'une meilleure indication de sa productivité potentielle.

Matériel et méthodes

Etude de la phénologie et de la croissance

L'étude du cycle phénologique d'*Acacia salicina* a porté sur une plantation âgée de dix ans et a été réalisée par des observations qualitatives (stades phénologiques et des mesures quantitatives : longueur des nouvelles pousses, nombre de fleurs et de gousses, diamètre etc.). Ces mesures sont effectuées sur des pousses marquées au préalable au niveau de ces arbres. Chaque stade phénologique est présenté par 3 phases marquant son début jusqu'à sa fin. C'est le cas par exemple du stade végétatif (V) qui est marqué par 3 phases : V1 : début du stade végétatif, qui se manifeste par l'apparition des nouvelles pousses ; V2 : mi- stade végétatif où les nouvelles pousses se transforment en des jeunes rameaux et V3 : pleine végétation où les jeunes rameaux se développent et se ramifient.

Comportement vis-à-vis de la contrainte saline et hydrique au stade germinatif et de la croissance

Afin d'étudier le comportement d'*A. salicina* vis-à-vis de la contrainte saline et hydrique, des graines d'*A. salicina* sont mises à germer à 25 °C, dans des boîtes de Petri tapissées de papier filtre imbibé de solutions à différentes concentrations de NaCl (0, 3, 6, 9 et 12 g/l) ou d'un *osmoticum* induisant un stress hydrique : le PEG 6000 (-1, -3, -7, -10, -16 et -20 bars). Les pourcentages de germination sont estimés toutes les 48 heures pendant 26 jours.

L'étude de l'effet du stress hydrique sur la croissance est réalisée sur des jeunes plantules issues de semis et âgées de six mois et soumises à 4 régimes d'irrigation : capacité au champ (CC) ; 3/4 CC ; 1/2 CC et 1/2 CC. L'effet de la contrainte saline sur la croissance est étudié sur des jeunes plantules irriguées, à partir de l'âge de 2 semaines, avec des solutions à différentes concentrations de NaCl : 3 g/l (témoin agronomique) ; 6 g/l ; 9 g/l et 12 g/l, à raison de 0,5 l/semaine/pot. Au terme de 5 mois de traitement, les plantes sont récoltées et séparées en feuilles, tiges et racines. Les biomasses fraîches et sèches de ces organes sont estimées par pesées, respectivement avant et après dessiccation à 60 °C pendant 72 h, et leurs teneurs en Na⁺, K⁺, Cl⁻ et en sucres solubles sont ensuite déterminées.

Les ions Na⁺ et K⁺ sont dosés avec un photomètre à flamme (type Corning), et Cl⁻ avec un chloridomètre (type Haake Büchler), sur le produit d'une extraction acide. Les sucres solubles sont dosés avec un spectrophotomètre à 640 nm.

Résultats

Phénologie appréciée

Le stade végétatif (figure 1) d'*A. salicina* s'étend sur toute l'année avec une phase passive (V1/V2) qui débute en novembre. La végétation active (V3), se déroule à partir de mi-mai. Le stade début floraison (FL1/2) a lieu en deux périodes : la première pendant février-mars, et la seconde commence de septembre et dure 2 mois, alors que la pleine floraison (FL3) s'observe dès mi-novembre. Les différentes phases de la fructification aux cours desquelles les fleurs se transforment en gousses, chevauchent chez *A. salicina*. Ce stade se déroule durant presque toute l'année, probablement à cause de la floraison qui a lieu en deux périodes. La dissémination des graines (ouverture des gousses), commence en mars et s'achève en novembre. Ces différents stades chevauchent. En effet, on peut observer au niveau d'un même arbre la pleine végétation, la pleine floraison, la fructification et parfois des anciennes gousses en dissémination. En outre, ils ne sont manifestement pas synchrones car certains individus semblent effectuer leur cycle plus rapidement que d'autres.

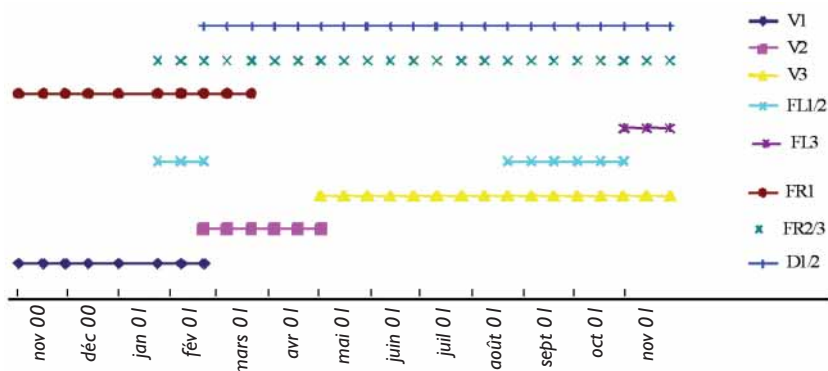


Figure 1.
Cycle phénologique moyen d'*Acacia salicina*.
(Les lettres désignent les différents stades phénologiques :
V, Végétatif ; FL, Floraison ; FR, Fructification ; D, Dissémination).

Quantification des stades phénologiques (Phénologie mesurée)

LONGUEUR DES NOUVELLES POUSSES

La figure 2a, ci-dessous montre l'évolution de la longueur des nouvelles pousses. Il en résulte que la cinétique de la croissance des nouvelles pousses décrit une allure à trois phases : la première phase s'étend sur la période allant de novembre jusqu'à février et correspond à la végétation passive (V1/V2). Une deuxième phase qui s'étale de février en juin, est marquée par une augmentation lente de la longueur. La troisième phase de la croissance est rapide. Elle se déroule en juin-septembre et coïncide avec la végétation active (V3) de l'arbre, où les nouvelles pousses passent de 6 à 8 cm.

LE NOMBRE DE FLEURS ET DE GOUSSES

La figure 2b montre l'évolution du nombre de fleurs, au cours de la période d'observation. Ce nombre varie de 3 en moyenne par pousse, en novembre, jusqu'à s'annuler en février. Cette diminution est due à la fructification de l'arbre pendant septembre-avril. Durant ce stade le nombre de gousses (figure 2c), au niveau des nouvelles pousses, commence à augmenter à partir de novembre, et atteint son maximum en janvier (2 gousses par jeune pousse). La période février-septembre est marquée par une baisse du nombre de gousses. Cette baisse serait non seulement due à la dissémination (mars-novembre), mais aussi en grande partie, au vent qui coupe les jeunes pousses et abîme les nouvelles gousses.

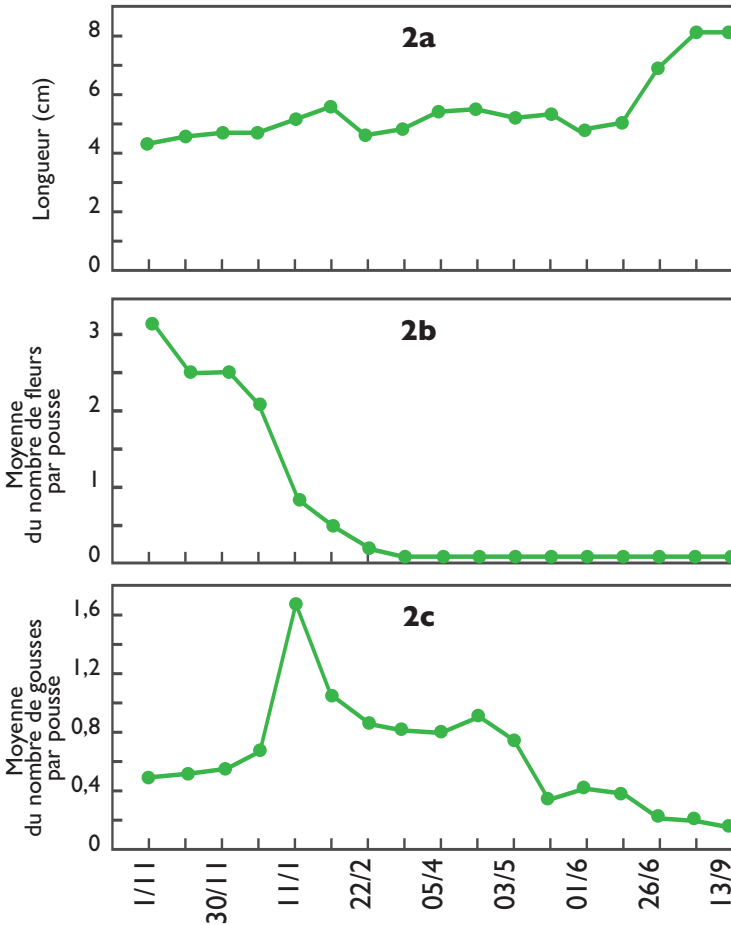


Figure 2. Longueur (2a), nombre de fleurs (2b) et de gousses (2c) par pousse, estimé au niveau des nouvelles pousses d'Acacia salicina. (Moyennes de 18 répétitions et intervalles de sécurité au seuil de 5 %).

Réponse aux contraintes saline et hydrique au stade germinatif

Les courbes d'évolution du pourcentage de germination en fonction de la concentration de NaCl et des potentiels osmotiques décrivent une allure à trois phases (figure 3). Une première phase de latence, suivie d'une seconde phase d'accélération de la germination puis d'un palier qui indique la capacité germinative maximale.

Sur milieux témoins, le taux de germination atteint en 10 jours une valeur maximale de l'ordre de 80 % à 0 g. l⁻¹ NaCl, et de 90 % à 0 bar. Ce taux baisse de 10 % par rapport au témoin à 3 ; 6 et 9 g. l⁻¹ NaCl (figure 1A) alors que des potentiels compris entre -1 et -7 bars retardent la germination sans affecter la capacité germinative, qui finit par atteindre le niveau du témoin (figure. 1B). Toutefois, des potentiels encore plus bas retardent davantage la germination et diminuent la capacité germinative de 35 et 52 % respectivement à -16 et -20 bars. L'effet dépressif de la contrainte hydrique à des potentiels bas rappelle celui observé à une salinité de 12 g. l⁻¹ NaCl.

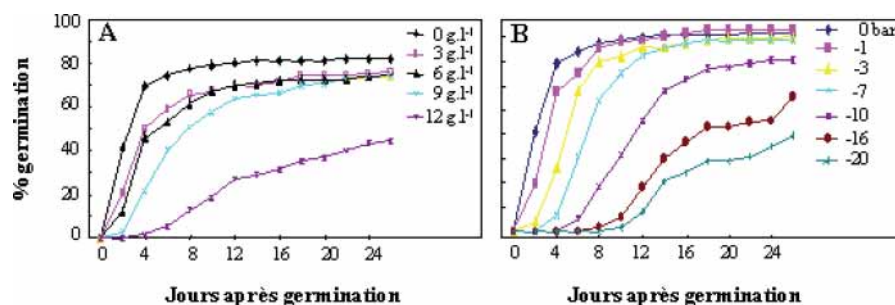


Figure 3.

Variation du pourcentage de germination (%) des graines d'*Acacia salicina* en fonction du temps (jours), de la salinité (A) et du potentiel hydrique (B) du milieu.

Effet de la contrainte hydrique sur la croissance au stade plantule

LA CROISSANCE EN LONGUEUR

Les variations de la croissance en longueur de la partie aérienne des plantules d'*A. salicina* en fonction du temps et du régime d'irrigation (1,6 ; 1,2 ; 0,8 et 0,4 litres tous les 15 jours) sont enregistrées sur la figure 3a. L'examen de cette figure montre que les plantules soumises à un régime témoin croissent, durant les 11 mois de culture, selon une cinétique à deux phases : Une première phase qui s'étale jusqu'au mois d'avril et au cours de laquelle la longueur de la partie aérienne augmente de moitié (elle passe de 30 à 45 cm), et une seconde phase où la croissance se poursuit plus lentement, avec des variations de la longueur ne dépassant pas au maximum les 10 cm. Le déficit hydrique engendré par la baisse du régime d'apport d'eau conduit à une modification de cette cinétique, plus ou moins marquée selon son intensité. Son effet se traduit surtout par un arrêt de la croissance en longueur pendant la seconde phase (figure 4a), chez les plantes du régime 3/4 CC. Pour les régimes

plus contraignants (1/2 CC et 1/4 CC), cet effet plus précoce et nettement plus marqué, a conduit finalement à une inhibition totale de la croissance en longueur des plantules.

LE DIAMÈTRE DE LA TOUFFE

Le suivi du diamètre de la touffe des plantules *d'A. salicina* soumises aux différents régimes d'irrigation, révèle que la croissance des touffes (figure 4b) est maximale au régime témoin (CC). Elle atteint une valeur minimale au régime hydrique le plus faible (1/4 CC) et finit par s'arrêter à cause de la perte des phyllodes. Enfin, l'extension de la touffe aux régimes d'irrigation de 3/4 CC et 1/2 CC, demeure voisine de celle du témoin au cours de la première phase de croissance, et varie d'une façon plus significative par la suite, probablement à cause du renouvellement continu des phyllodes.

LE NOMBRE DE NOUVELLES POUSSES

Le dénombrement des nouvelles pousses est un autre descripteur de croissance qui renseigne sur la capacité des plantes à générer de nouveaux rameaux. Les variations de ce paramètre en fonction du temps et du régime d'irrigation montrent qu'en condition d'irrigation normale, les nouvelles pousses ne commencent à apparaître sur les plantes qu'au début de la seconde phase de la croissance en longueur (figure 4a), qui correspond à la période « fin avril-début mai ». Elles atteignent un maximum au bout des 45 jours suivants et subissent une baisse par la suite. L'effet du déficit hydrique se manifeste par une forte inhibition de l'initiation des nouvelles pousses, notamment chez les plantes soumises au régime d'irrigation le plus sévère (1/4 CC). Au régime modéré (3/4 CC), le nombre de pousses augmente à une vitesse plus lente que celle des plantes témoins jusqu'à atteindre son maximum à la fin de la culture.

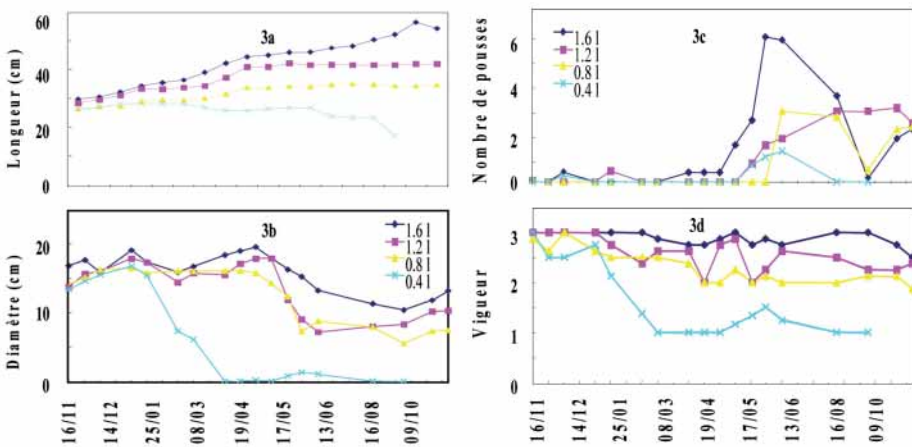


Figure 4. Variations de la croissance en longueur (4a), du diamètre de la touffe (4b), du nombre de pousse (4c) et de la vigueur (4d) des plantules *d'A. salicina* en fonction du temps et du régime d'irrigation

LA VIGUEUR

Les plantes témoins du régime CC montrent une vigueur pratiquement stable durant toute la période de culture et manifestent un léger dessèchement à la fin de cette période, qui est probablement lié à une entrée en sénescence de ces plantes (figure 4d). En outre, la diminution de l'apport d'eau au milieu de culture s'accompagne d'une diminution de la vigueur et d'une intensification du dessèchement, d'autant plus importantes que l'apport soit plus faible. Il en résulte des effets nettement plus marqués et qui se manifestent très précocement (après deux mois de culture environ) chez les plantes soumises au régime le plus sévère (1/4 CC).

Réponse de la croissance aux contraintes saline

Les masses de matière sèche des parties aériennes et des racines d'*Acacia salicina* après 5 mois de traitement sont diminuées par le NaCl (figure 5A). Cet effet, significativement plus important à la plus forte dose (9 g. l⁻¹), est d'environ 65 % du témoin. Les valeurs du rapport PA/R, pratiquement invariables même à cette dose de NaCl, indiquent que les biomasses, aérienne et racinaire, sont impliquées de la même manière dans cette baisse de croissance (figure 5A). En outre, l'augmentation de la concentration de NaCl dans l'eau d'irrigation entraîne une amélioration nette de l'hydratation des parties aériennes et demeure pratiquement sans effet sur celle de ses racines (figure 5b).

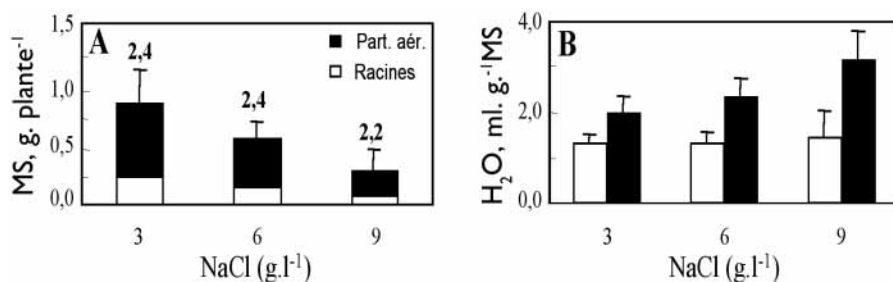


Figure 5.

Variations des masses de matière sèche (A) et des teneurs en eau (B) des parties aériennes et des racines en fonction de la concentration de NaCl, après 5 mois de traitement.

Les chiffres accolés aux histogrammes sont les valeurs du rapport PA/R estimé sur la base de la matière sèche.

Effet de la contrainte saline sur l'accumulation des solutés

SOLUTÉS INORGANIQUES

Les teneurs en Na⁺, Cl⁻ et K⁺ déterminées à la fin de la période de traitement dans les parties aériennes et des racines d'*Acacia salicina* (figure 6a) montrent que l'accumulation de Na⁺ et de Cl⁻ augmente avec la concentration de NaCl dans le milieu de culture, et d'une manière beaucoup plus importante dans les parties aériennes que dans les racines, si bien que les niveaux atteints à la plus forte dose

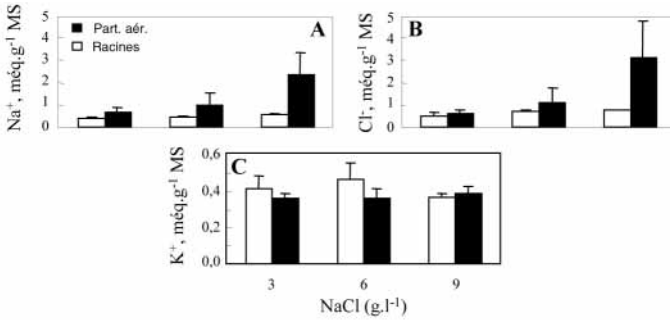


Figure 6.

Variation des teneurs en Na⁺ (A), Cl⁻ (B) et K⁺ (C) dans les parties aériennes et les racines en fonction de la concentration de NaCl dans le milieu.

(9 g. l⁻¹) sont environ 4 fois plus élevés dans le premier que dans le second type d'organes. En dépit de ces fortes accumulations de Na⁺ et de Cl⁻, les teneurs en K⁺ demeurent invariables dans les parties aériennes, et à un degré moindre dans les racines, quel que soit le traitement (figure 6b). Toutefois, dans ces derniers organes, les teneurs en K⁺ accusent une légère augmentation sur le traitement à 6 g l⁻¹ par comparaison avec les 2 autres traitements (figure 6C).

SOLUTÉS ORGANIQUES

Les teneurs en sucres solubles et leur répartition entre parties aériennes et racines d'*Acacia salicina* (figure 7) permet de constater que pour une concentration en NaCl de 3 g. l⁻¹ (témoin), les teneurs en sucres sont plus élevées dans les racines que dans les organes aériens. Ce résultat ne peut pas résulter d'une allocation plus importante des composés glucidiques aux organes d'absorption, puisque ces derniers ne reçoivent pas plus que 40 % du total produit par les feuilles. Il est plutôt dû à une biomasse réduite par comparaison avec celle des parties aériennes. Pour les concentrations de NaCl supérieures (6 et 9 g. l⁻¹), ces organes semblent s'enrichir davantage en sucres solubles aux dépens des racines qui s'en appauvrissent.

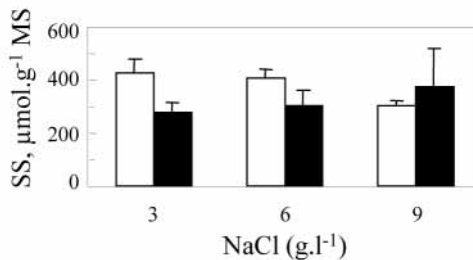


Figure 7.

Accumulation des sucres solubles dans les parties aériennes et les racines en fonction de la concentration de NaCl dans le milieu.

Discussion et conclusion

L'étude de la phénologie d'*A. salicina* montre que la phase de végétation passive (V1/V2) débute en novembre et s'étale jusqu'à mai. Au cours de cette phase, la cinétique des nouvelles pousses évolue d'une manière très lente. Cette cinétique de croissance devient plus rapide durant juin-septembre annonçant l'entrée de l'arbre en végétation active. Il faut toutefois, mentionner qu'une grande variabilité a été notée au niveau des différents individus d'*A. salicina*, objets de cette observation, notamment au niveau de la chronologie des phases de la végétation. La végétation active pour *A. salicina* semble durer plus longtemps que celle de la plupart des espèces des zones arides. Les résultats obtenus concernant la floraison montrent qu'elle a lieu en deux périodes : la première débute en février pour s'achever en mars, la seconde s'étale de septembre en novembre. Parallèlement, une chute du nombre de fleurs observé en novembre, pourrait être en particulier attribuée à l'entrée de l'arbre en phase de fructification. Ce comportement a été mentionné par Yahiaoui *et al.* (2000) chez 3 espèces fourragères du genre *Scorpiurus*. Quant à la fructification, elle se déroule en novembre-avril et atteint son optimum en février-mars. Le nombre de gousses commence à augmenter à partir de novembre, et baisse durant février-septembre. Cette baisse serait probablement due à la dissémination qui s'étale sur une longue période allant de mars en novembre. Les observations de la cinétique de la croissance concernant la longueur des pousses, les nombres de feuilles, de fleur et de gousses par pousses, confirment celles de l'étude phénologique. Cette corrélation a été mentionnée par Sulas *et al.* (2000). D'après ces auteurs, la chronologie des stades phénologiques constitue un indicateur de la productivité potentielle. Ceci a été confirmé chez *A. cyanophylla*, par Zaafouri (1993). Selon cet auteur, la synchronisation des phases et des stades de développement n'est pas parfaite au cours d'une même année et dans le même milieu pour les individus d'une même espèce. Cette variabilité du comportement phénologique chez *A. salicina* serait probablement l'expression propre de chaque individu en réponse aux facteurs environnementaux.

Nos résultats suggèrent que le seuil de tolérance d'*A. salicina* au stade de la germination est le même pour les deux contraintes osmotiques : saline et hydrique. Il se situe aux environs de 9 g. l⁻¹ de NaCl et de -7 bars (potentiel équivalent à la même concentration de NaCl.), respectivement pour la première et la seconde contrainte. Au delà de cette limite, l'effet dépressif se traduit par un retard de la germination et par une baisse de la capacité germinative. Ces résultats sont en accord avec ceux d'autres travaux. Par exemple, Ben Ahmed (1995) a noté qu'une concentration de 20 g. l⁻¹ de NaCl retarde la germination chez *Atriplex halimus* sans affecter la capacité germinative, alors que Belkhoja et Slotani (1992) ont signalé que des concentrations élevées en sel réduisent le taux de germination. Dans le même contexte, Grouzis (1987) a montré que le pouvoir germinatif des graines de *Zornia glochidiata* passe de 96 % pour un potentiel de -8.6 bars à 3 % pour -21.7 bars. L'inhibition de la germination d'*A. salicina* par NaCl est probablement de nature osmotique comme c'est le cas de l'orge (Bliss *et al.*, 1986).

Au stade végétatif, les limites de tolérance au déficit hydrique s'expriment à un régime de 1,2 l/15 jours. Des régimes plus sévères, inhibent la croissance en hauteur et intensifient le dessèchement. Des effets similaires sont observés par Sall *et al* (1991), chez *Eucalyptus camaldunensis*. La salinité tolérée par *A. salicina* au stade végétatif est de 6 g. l⁻¹ de NaCl. Des concentrations plus élevées réduisent la masse de matière sèche, mais améliorent l'hydratation des parties aériennes. Ce comportement rappelle ceux de certains halophytes (Gorham., 1995) et serait lié à une succulence foliaire (Levitt, 1972). L'accumulation de Na⁺ et de Cl⁻ augmente avec la salinité et elle est plus importante dans les parties aériennes que dans les racines. Cette accumulation préférentielle, concomitante d'une amélioration de l'hydratation, traduirait une aptitude d'*A. salicina* à compartimenter les ions Na⁺ et Cl⁻, notamment dans les vacuoles des cellules foliaires (Levignerou *et al.*, 1995), et à les utiliser pour l'ajustement osmotique et le maintien de leur turgescence.

Par ailleurs, la capacité de maintenir une nutrition potassique correcte, en dépit des fortes accumulations de Na⁺ dans les parties aériennes et les racines est aussi un critère de tolérance. Lachaâl (1998) a signalé l'existence d'une corrélation positive entre la tolérance au sel et la teneur des feuilles en K⁺ chez des populations de lentille. Selon cet auteur, le maintien d'une teneur en K⁺ suffisamment élevée pour soutenir la croissance des plantes en condition de salinité, est permis par une sélectivité d'absorption et de transport en faveur de K⁺

Notons enfin que l'accumulation significative de sucres solubles dans les parties aériennes d'*A. salicina*, suggère que ces composés puissent être utilisés pour le maintien de l'équilibre hydrique entre cytoplasme et vacuole, comme c'est le cas d'*Hordeum vulgare* (Haouala, 1999).

Références

- Aussenac G. et Finkeldein D. ; 1983.
Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre.
Ann. Sci. For., 40(1), p 66 - 77.
- Aussenac G., Lévy G., 1983.
Influence de dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrl.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cas de végétation.
Ann. Sci. For., 40, 251 - 263.
- Belkhouja M. et Soltani N., 1992.
Réponse de la fève (*Vicia faba*) à la salinité : étude de la germination de quelques lignées à croissance déterminée.
Bull. Soc. Bot. Fr., 139-357.
- Ben Ahmed H., 1995.
Physiologie de la tolérance de *Atriplex halimus* L. au chlorure de sodium.
DEA de physiologie végétale, FST, Univ. Tunis II, 85p.
- Bliss RD. et Platt. Aloia KA. et Thomson WW., 1986.
The inhibitory effect of NaCl on barley germination.
Plant. Cell. Environ., 9, 727-733.
- Dagba E., 1993.
La teneur en eau du sol dans deux bananeraies (Var. *Gros michel*) de balila (Congo).
Revue du Réseau pour l'amélioration de la production Agricole en milieu aride. Vol. 5, 191-211.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Ferchichi A., 1995.
Restauration et réhabilitation des terres des parcours en Afrique du nord.
Projet Med-CAMPUSB, 251, 64p.
- Floret C. et Pontannier R. ; 1982.
L'aridité en Tunisie présaharienne : climat, sol, végétation et aménagement.
Trav. Docum. ORSTOM. Paris : p544.
- Fourrier A., 1990.
Variation de la dynamique foliaire chez les graminées pérennes le long d'un gradient climatique en Afrique de l'Ouest.
Mitt. Inst. Allg. Bot. Hamburg. Comptes rendus de la XII^{ème} réunion plénière de l'AETFAT. 23b. 823 - 839.
- Gorham J., 1995.
Mechanisms of salt tolerance of halophytes.
In Chouk-Allah, CV. Malcom, A Hamdy, Eds
Halophytes and biosaline agriculture.
Marcel Dekker. In New York, 31-53.
- Grouzis M., 1987.
Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (Mare d'oursi, Burkina Faso).
Thèse. Univ. Paris XI, Orsay, 149-162.
- Haouala R, 1999.
Effets du NaCl sur la croissance, les caractéristiques hydriques et les activités photochimiques et enzymatiques d'un blé dur et d'une orge cultivée.
Thèse de Doctorat en biologie.
Fac. Sci. Tunis, 231p.
- Issoufou. M., 2001.
Essai de réhabilitation par semi et plantation d'espèces autochtones et exotiques en milieu aride Tunisien.
DEA de Sciences de l'environnement.
Fac. Sci. Bizerte. 134p.
- Kramer PJ., 1980.
Drought stress and the origin of the adaptation. Adaptation of the plants to water and high temperature stress.
Wily-Interscience pub, 7-20.
- Lachaâl M., 1998.
Variabilité de la réponse à la salinité chez la lentille, et variation en fonction du stade de développement.
Thèse de Doct. Etat. Es- Sci. Nat. Fac. Sci. Tunis, 226p.
- Levigneron A, Lopez F, Vansuyt G, Berthomieu P, Fourcroy P, Casse-Delbart F. 1995.
Les plantes face au stress salin.
Cahiers Agricultures, 4, 263-273.
- Levitt J. 1972.
Reponses of plants to environmental stresses.
Acad. Press. New York and London, 697 p.
- Sall PN., Aussenac G., Dreyer E. et Granier A. 1991.
Limitation par la sécheresse d'*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
En climat sahélosoudanien au Sénégal.
Rev. For. Fr., XLIII(4), 309-316.
- Sulas L., France A. et Carredd S., 2000.
Persistence and regeneration mechanisms in forage legume.
Options méditerranéennes, 45. 331 - 342.
- Yahiaoui-Younsi A., Abdelguerfi A et Bouazza L., 2000.
Etude de la floraison de trois espèces du genre *Scorpiurus* L : relation avec les conditions du milieu d'origine.
Op, med. vol 45. p 245 - 248.
- Zaafouri MS, 1993.
Contraintes du milieu et réponses de quelques espèces aubustives exotiques introduites en Tunisie présaharienne.
Thèse. Doct. Sci. Tech. Langue doc.

Peuplement sylvo-pastoral de l'espace saharien de la Tunisie méridionale. Perspectives

NOUREDDINE CHALBI

Faculté des Sciences de Tunis, Campus Universitaire, 2091, Tunis
noureddinechalbi@yahoo.fr
216-98-262 032

Résumé

Les perspectives du peuplement forestier du territoire tunisien situé dans la zone saharienne sont liées à l'insuffisance des ressources hydrologiques, la coercition des conditions climatiques et édaphiques et le nombre limité d'espèces économiquement intéressantes aptes à s'adapter. Dans ce qui suit, trois expériences réalisées en Tunisie donnent une idée sur certaines possibilités d'action dans ce domaine saharien.

Le reboisement en milieu désertique. Il s'agit d'un projet pour valoriser les eaux résiduelles et de drainage venant de l'Oasis de Chamsa. Le peuplement se situe en dehors de l'Oasis, en plein désert. Chaque année, une aire de plusieurs hectares, de sol sablonneux dunaire, calcaire, gypseux ou salé, est nivelée et plantée selon différentes espèces. Les espèces utilisées sont *Prosopis sp.*, *Acacia horrida*, *Parkinsonia aculeata*, *Atriplex sp.*, *Jojoba*, *Eucalyptus sp.*, *Casuarina glauca*, *Tamarix aphylla* ;

Résultats des essais d'introduction du genre *Eucalyptus* et adaptation à l'aridité. Des efforts de reboisement sont menés en Tunisie en vue d'améliorer la couverture végétale dans le pays. Le matériel végétal utilisé et mis en observation dans des arboreta appartient au genre *Eucalyptus*. Ce genre a montré, au sein de sa diversité intragénérique une plasticité considérable de l'aptitude adaptative aux différents écosystèmes du pays. On note, en particulier, que dans cinq stations du sud du pays caractérisées par une pluviométrie allant de 233 à 89 mm par an, sur sols gypseux, calcaires, sableux ou salés, les meilleures performances ont été affichées par les espèces *E. torcata*, *E. microtheca*, *E. lessouiffi*, *E. occidentalis*, *E. astringens*, *E. salmonophloia*, *E. gracilis*.

La souplesse adaptative du genre Atriplex. Cette partie repose sur une grande série de travaux conduits en Tunisie sur le genre *Atriplex* et plus particulièrement sur la richesse spécifique, sa répartition éco-géographique. L'espace saharien de la Tunisie méridionale est concerné par différentes espèces du genre *Atriplex* telles que *Atriplex halimus*, *Atriplex dimorphostegia*, *Atriplex mollis*

Introduction

Les efforts développés pour le peuplement forestier du territoire tunisien situé dans la zone saharienne répondent aux besoins, d'assurer une meilleure protection du milieu, d'accroître la production en produits forestiers, de créer de nouveaux parcours sylvo-pastoraux. Ces orientations sont assujetties à la nécessité de la prise en compte de la rareté de l'eau d'où l'intérêt qu'il y a à valoriser les eaux de drainage des oasis qui sont, par ailleurs, le plus souvent chargées

Les objectifs des efforts de reforestation visent donc l'accroissement de la production pour intéresser et fixer les populations et la réduction de la dégradation du milieu particulièrement. Mais les progrès attendus pour atteindre ces résultats sont dépendants de trois déterminants majeurs : l'insuffisance des ressources hydrologiques, la coercition des conditions climatiques et édaphiques et surtout l'étroitesse de la marge de manœuvre quant à l'étendue de la diversité biologique végétale caractérisée par une aptitude à s'adapter à de tels milieux coercitifs.

C'est pour cela que des essais d'acclimatation de nouvelles espèces introduites ont été réalisés. Pour certaines de ces espèces, celles qui ont été notamment installées dans un réseau de pépinières aménagées dans toutes les zones du pays (certaines d'entre elles sont installées depuis une quarantaine d'années), des mesures de comportement ont été réalisées au niveau quantitatif (production de biomasse sur courte période) et au niveau qualitatif (bonne qualité du bois ; divers produits).

Dans ce qui suit, trois expériences complémentaires menées dans le pays contribueront à éclairer le choix des espèces dans les conditions similaires de *l'espace saharien*.

Expérience de reboisement en milieu désertique

La rareté des ressources naturelles a poussé à la valorisation des eaux de drainage dans l'oasis de Chamsa près de Tozeur. Le projet consiste à créer un peuplement forestier qui se situe en dehors de l'Oasis, en plein désert. Il est mené par la

Direction Générale des Forêts et certains suivis scientifiques sont assurés par les laboratoires de l'Institut National des Recherches en Génie Rural et Eaux et Forêts, notamment concernant l'utilisation et la valorisation des eaux résiduelles de drainage venant de l'Oasis de Chamsa, située à plus de 7 kilomètres au sud de Tozeur.

D'une manière générale, les oasis tunisiennes subissent des contraintes qui menacent leur durabilité comme la rareté des eaux, l'ensablement par progression des dunes, la rigueur du climat (pluviométrie faible et fluctuante, par années jusqu'à moins de 100 mm). Ces oasis sont alimentées à partir des eaux de nappes peu renouvelables. Mais l'évaporation estivale et la salinité des eaux entraînent l'hydromorphie des sols mal drainants et leur salinisation. La plupart des oasis sont souvent situées dans les compartiments bas du paysage et les exutoires sont constitués par des dépressions endoréiques appelées *Sebkha* ou *Chott* qui reçoivent d'importantes quantités de sels. L'effort de reforestation constitue donc également une solution pour valoriser les eaux de drainage, souvent chargées. Parmi les critères de la sélection pour les peuplements forestiers, le choix et l'utilisation d'espèces végétales adaptées à la sécheresse du milieu nécessite également l'examen de l'aptitude à s'adapter à la salinité et, dans certains cas, au sol gypseux.

À noter que la végétation spontanée est riche en plantes dont certaines ont un rôle important pour fixer le sol. Ce sont :

- *Zygophyllum album* : C'est un sous-arbrisseau vivace, une Zygophyllacée à rameaux blanchâtres ;
- *Arthrophytum schmittianum* : C'est une espèce ligneuse basse de la famille des Amaranthacées qui est très apétible et consommée par les Camelins.
- *Retama retam* : c'est un arbrisseau vivace de la famille des Fabacées. Il est très ramifié et son port peut atteindre 2 mètres. Il joue un rôle important dans la fixation du sol dans la lutte contre la désertification.

Dans le projet de reboisement de Chamsa, chaque année, une aire de plusieurs hectares, de sol sablonneux dunaire, calcaire, gypseux ou salé, est nivelée, plantée et mise systématiquement en défens (allant jusqu'à cinq ans), avec une protection individuelle des jeunes plants contre le vent et le froid assurée par des feuilles de palme. Le sevrage de l'arbre (arrêt de sauvegarde) se fait lorsque les racines des arbres ont atteint la nappe (estimation empirique). L'irrigation se fait par planches, l'eau étant transportée en conduites en PVC enterrées, minimisant la perte d'eau par évaporation ou par infiltration.

Les espèces végétales utilisées sont :

(i) *Prosopis* sp. Plantes dicotylédones de la famille des mimosacées. Il existe plusieurs espèces de *Prosopis*. On les considère comme des plantes envahissantes dans plusieurs biotopes du monde et notamment dans les régions chaudes et arides de l'Afrique saharienne de l'Ouest où l'espèce *Prosopis chiliensis* est devenue très invasive. Cette espèce est d'ailleurs l'objet de plusieurs projets économiques notamment :

- abattre de grandes quantités pour en faire du charbon de bois, dans des projets soutenus par les Pays-Bas et le PNUD,

- réaliser une expérimentation financée en 2008 cherchant à valoriser le végétal en aliment du bétail (le fruit est sucré et riche en vitamines, mais n'est pas ou mal digéré en l'état par les herbivores en raison de sa cuticule résistante),
- réaliser un Projet de fabrication de farine pour l'alimentation humaine,
- mettre en place un Projet de fabrication d'agro-carburant.

Ce sont des espèces qui ont de grandes aptitudes d'adaptation au sol. Ils poussent bien en sol drainant et sec.

(ii) *Acacia horrida*, Arbres et arbustes appartenant à la famille des fabacées (sous-famille des Mimosoidées).

Parkinsonia aculeata : C'est une espèce qui résiste au gel et possède une très bonne résistance à la sécheresse. Elle est conseillée pour la plantation en milieux arides et désertiques.

Atriplex sp. : Dans le reboisement de Chamsa, deux espèces d'*Atriplex* ont été utilisées. Il s'agit de (i) *Atriplex nummularia* qui se développe sur le sol bien drainé, même sableux ou salin. Cette espèce est adaptée à la sécheresse et offre une bonne résistance au froid, (ii) *Atriplex halimus* qui est une espèce halophyte. Cette espèce se développe sur les sols mal drainés et supporte parfaitement la sécheresse.

Simmondsia chinensis : C'est le **jojoba**. C'est une espèce d'arbuste de la famille des Simmondiacées. Cette espèce est originaire des déserts de l'Arizona et du Mexique et elle est cultivée pour divers produits et en particulier pour la cire appelée communément huile de Jojoba qui est contenue dans ces graines. Cette espèce est encore appelée Or du désert du fait qu'elle pousse dans les lieux arides, en plein soleil. Son feuillage rappelle celui de l'olivier. Son port arrive à 2,5 m à l'état naturel, mais on estime que ses racines sont très longues, pouvant aller jusqu'à 30 m ou plus, ce qui lui permet d'aller chercher l'humidité très loin et très profondément dans le sol.

Eucalyptus sp. : C'est un genre comprenant un très grand nombre d'espèces qui sont assez adaptées aux sols mal drainés et à la sécheresse. Nous allons en parler plus loin.

Casuarina glauca : C'est une espèce originaire d'Australie qui possède une remarquable faculté d'adaptation à des sols difficiles, pauvres en éléments minéraux. Elle tolère le calcaire, le sel et le froid. Elle est utilisée également dans les programmes de réhabilitation des sols pauvres et pour freiner l'avance des dunes de sables et la remontée des sels. En agroforesterie, cette espèce a été utilisée d'abord comme brise-vent. Par la suite, son utilisation a été élargie au peuplement forestier et à l'exploitation pour le bois.

Tamarix aphylla : C'est une espèce que l'on trouve dans tout le Sahara sauf dans la partie occidentale. Elle est d'origine saharo-arabique. La taille de cette espèce peut aller de 2 à 8 mètres. Le bois est utilisé pour faire des *zériba* (hutttes, abris). L'espace est souvent utilisé en brises vent ou en palissades. Les produits, et en particulier, les graines sont utilisés par les populations pour diverses choses (tannage, pharmacopée traditionnelle, etc.).

Les plantes installées dans ce reboisement ont été suivies régulièrement. Des relevés ont été effectués sur le taux de survie moyen ainsi que sur son coefficient de variation.

Le comportement morphogénétique des plantes a été caractérisé par plusieurs mesures relatives à la croissance, notamment en considérant la hauteur des plantes et le diamètre. Un suivi a été également réalisé concernant l'évolution du sol, la qualité des eaux et le recouvrement sableux du milieu.

Compte tenu de l'interprétation des résultats observés, les conclusions tendent à montrer, qu'en ce qui concerne l'adaptation aux conditions sahariennes qui caractérisent le milieu de Chamsa, *Prosopis* vient en tête, suivi à la fois en second lieu par *Acacia horrida*, *Eucalyptus sp*; et *Parkinsonia aculeata*.

Résultats des essais d'introduction du genre *Eucalyptus* et adaptation à l'aridité

Des efforts de reboisement sont menés en Tunisie en vue d'améliorer la couverture végétale dans le pays. Le taux de couvert végétal, de moins de 4,5 % de la superficie totale du pays à l'époque de l'indépendance, s'élève aujourd'hui à 12,8 % de la superficie du pays. Ce taux devra atteindre, selon les prévisions du XI^e Plan, 16 % en 2011.

Le matériel végétal utilisé et mis en observation dans des *arboreta* dispersés sur tout le pays est constitué de 208 espèces dont 117 appartiennent au genre *Eucalyptus*. Ce genre a montré, dans tous les projets du Programme National de Reboisement, du fait de sa grande variabilité intra générique, une souplesse adaptative qui lui confère une plasticité considérable de l'aptitude adaptative aux différents écosystèmes du pays.

On note, en particulier, une adaptation dans cinq stations du Sud du pays caractérisées par une pluviométrie allant de 233 à 89 mm par an, sur sols gypseux, calcaires, sableux ou salés. Ces stations sont situées dans un milieu saharien et plusieurs espèces du genre *Eucalyptus* se sont classées en tête pour ces milieux en affichant les meilleures performances.

Arboretum/Station	Altitude	Pluviométrie	Bioclimat	Nature des sols
Souaï-Ben Nsib	345	152	Arde inférieur	Gypseux
Méthouia	40	175	Arde inférieur	Calcaire gypseux
Zrig Barania	50	175	Arde inférieur	Sableux salé
Bouhedma	175	239	Arde inférieur	Sableux calcaire
Khbaïet	60	89	Saharien	Salé

Voici selon la liste des stations, les espèces désignées pour la meilleure adaptation aux conditions sahariennes :

Souaï-Ben Nsib : *Eucalyptus torquata*, *E. microtheca*, *E. lessoueffi*, *E. occidentalis*.

Méthouia : *Eucalyptus astringens*

Zrig Barania : *Eucalyptus occidentalis*, *E. astringens*, *E. salmonophloa*, *E. gracilis*.

Bouhedma : *Eucalyptus microtheca*

Khbaïet : *Eucalyptus astringens*, *E. gracilis*, *E. occidentalis*, *E. salmonophloa*

Ces résultats soulignent la grande variabilité intra-générique et les potentialités adaptatives du genre *Eucalyptus* aux conditions sahariennes et présahariennes.

La souplesse adaptative du genre *Atriplex*

Atriplex est le nom d'un genre de plantes de la famille des *Chenopodiacees*, ou des *Amaranthacees* selon la classification phylogénétique, comprenant environ une centaine d'espèces des régions tempérées et chaudes.

Cette partie repose sur une grande série de travaux conduits en Tunisie sur le genre *Atriplex* et plus particulièrement sur la richesse spécifique, sa répartition éco-géographique. En effet, le genre *Atriplex* contient un nombre élevé d'espèces naturelles constituées en peuplements dans les parcours pastoraux et les basses steppes. On constatera, sur la carte du pays, que l'espace saharien de la Tunisie méridionale est concerné par différentes espèces du genre *Atriplex*.

– *Atriplex halimus*, qui est une espèce d'une souplesse adaptative considérable et dont les diverses populations naturelles se retrouvent pratiquement dans tous les biotopes du pays

– *Atriplex dimosphostegia* et *Atriplex mollis* que l'on ne retrouve que dans les Milieux sahariens dunaires à moins de 89 mm d'eau de pluie par an.

Les études quantitatives conduites en pépinière et en micro-essais ont montré une grande variabilité des populations collectées dans tous les milieux. Cette variabilité caractérise la plupart des caractéristiques morphogénétiques et les composantes du rendement (hauteur, nombre de ramifications, biomasse exprimée en poids de matière verte et de matière sèche etc.). Cette variabilité constitue un potentiel adaptatif qui pourrait déboucher sur une sélection de populations ayant une aptitude à s'acclimater aux conditions sahariennes *optimisées*.

Références

- Bezzaouia, M.A. : 1993 :
Diversité génétique, répartition et adaptation
au niveau du genre *Atriplex*, L. :
cas d'espèces en Tunisie. Diplôme d'études
approfondies, Faculté des Sciences de Tunis.
- Bezzaouia, M.A. et Chalbi, N. -1995 :
Polymorphisme et répartition d'espèces du genre
Atriplex en Tunisie ; cas d'*Atriplex halimus* ;
V^e Journées du Réseau Biotechnologies
et Génie génétique des Plantes de l'UREF ;
Dakar, 13-15 décembre.
- Bezzaouia, M.A., Chalbi, N.
et El Gazzah, M. 1995 :
Méthodologie d'estimation des indicateurs
métriques du polymorphisme dans les populations
d'*Atriplex halimus* (L.) de Tunisie ;
Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie 94/95, t 24 ; 24-26.
- Hachicha and al., 2008 :
Valorisation forestière
des eaux de drainage salées
dans un contexte tunisien oasien désertique ;
*Actes des journées scientifiques de l'INRGREF,
Hammamet 11,12 et 13 novembre, 2008*
La biodiversité dans les aires protégées,
Annales de l'INRGREF, 12, numéro spécial ;
pp. 453-476, 2008.
- Khouja, M.L. and al., 2001 :
Results of the Eucalyptus
Introduction Trials in Tunisia ;
Proceedings of the International Conference
Eucalyptus in the Mediterranean Basin ;
perspectives and utilization ;
october 15-19, 2000 ;
Taormina, Italy.

Propagation de l'*Acacia senegal* (L) Willd. associant le bouturage horticole et la culture *in vitro*

SIMON BADJI

Commissariat Après-Barrages, Dakar, Sénégal
Direction des Eaux et Forêts, Dakar, Sénégal

GILLES MERLIN

SPINDAL SARL, BP 102 – Rue Emile Zola, 77450 Montry, France

Résumé

Acacia senegal, fournissant la gomme arabique ou gomme dure, produit atoxique et non polluant aux nombreuses applications industrielles, est l'une des espèces végétales spontanées de la zone sahélienne dans laquelle s'étire la grande muraille verte.

Les perspectives d'utilisation du gommier *Acacia senegal* dans la lutte contre la désertification, l'amélioration des sols, la mise en valeur des écosystèmes et son importance économique et sociale, nécessitent son optimisation en vue d'améliorer les systèmes agrosylvopastoraux utilisant l'espèce comme composante arborée principale.

La méthode de propagation décrite ici nous a permis de produire des individus élites en associant le bouturage à partir de fragments de rameaux prélevés dans le houppier d'arbres adultes sans leur destruction et le micro-bouturage des bourgeons issus du matériel végétal mobilisé en serre.

Le matériel le plus réactif est constitué de boutures de 12 à 15 cm de long (8 à 15 nœuds) et d'environ 10 mm de diamètre (bois de deux à quatre ans) enrobées à la base avec de l'acide *B-indole butyrique* (AIB) en poudre de commerce (Rhizopon AA) à 4 % ou 8 %. Celui-ci est aussi influencé par la date de prélèvement des boutures et les meilleurs résultats (70 % et plus) sont obtenus sur des fragments collectés en saison des pluies (juin-octobre). Les individus sont mobilisés en pépinière ou au mieux en serre sous hygrométrie comprise en 70 % et 100 % pour amplifier leur rajeunissement physiologique en vue de leur clonage *in vitro*.

Les fragments uninodaux issus des rejets des jeunes pieds-mères bouturés et maintenus en phase active de végétation, produisent trois à quatre vitroplants dans le milieu de multiplication Murashige et Skoog modifié (MS mod) auquel on ajoute de la Zéatine à la concentration de $5 \cdot 10^{-7}M$. Pour obtenir un taux d'enracinement proche de 100 %, il faut procéder en deux étapes. La première, dite d'induction, consiste en un passage de 6 à 12 jours sur le milieu de Jordan modifié auquel on a incorporé de l'ANA à la concentration de $5 \cdot 10^{-5}M$. La seconde étape, dite d'expression racinaire, nécessite un passage des microboutures sur le milieu de Jordan modifié dépourvu de phytohormone.

Le sevrage et l'acclimatation en serre s'effectuent avec un taux de réussite voisin de 100 % lorsque les vitroplants enracinés sont transférés dans des pots renfermant un mélange de vermiculite et de terreau (1:1 ; v/v).

Mots clés :

ACACIA SENEGAL, VEGETATIVE PROPAGATION, CUTTING, MICROPROPAGATION, ADULTE TREES

Abréviations :

AIB : ACIDE INDOL-3-BUTYRIQUE ;
ANA : ACIDE NAPHTALÈNE ACÉTIQUE ;
BAP : 6-BENZYL-AMINOPURINE ;
JN : MILIEU DE JORDAN ;
MS : MILIEU DE MURASHIGE ET SKOOG.

Introduction

Acacia senegal (L) Willd est une espèce écologiquement et économiquement importante répartie sur une vaste zone écogéographique de l'Atlantique à la mer rouge à travers tout le Sahel et également présente entre autres en Afrique du sud, en Arabie, en Inde et au Pakistan (Ross, 1975).

En effet *A. senegal* participe à l'amélioration et la fertilité des sols grâce, d'une part, à la fixation de l'azote atmosphérique par les *Rhizobium* des nodosités racinaires et, d'autre part, par la chute des feuilles et des gousses dans les écosystèmes naturels (Gerakis et Tsangarakis, 1970). Il est, de ce fait, utilisé au Soudan dans le cadre de cycles d'assolement appelés "bush-fallow" dans les activités traditionnelles agroforestières (Obeid et Sheif-El-Din, 1970). Il contribue également à protéger les sols contre l'érosion éolienne et hydrique grâce à son système racinaire très ramifié, situé dans les parties superficielles du sol, (N.R.C., 1979), diminue le déficit de saturation et l'évaporation de l'eau du sol, produit du fourrage au bétail et fournit du bois comme combustible (Fig. 2).

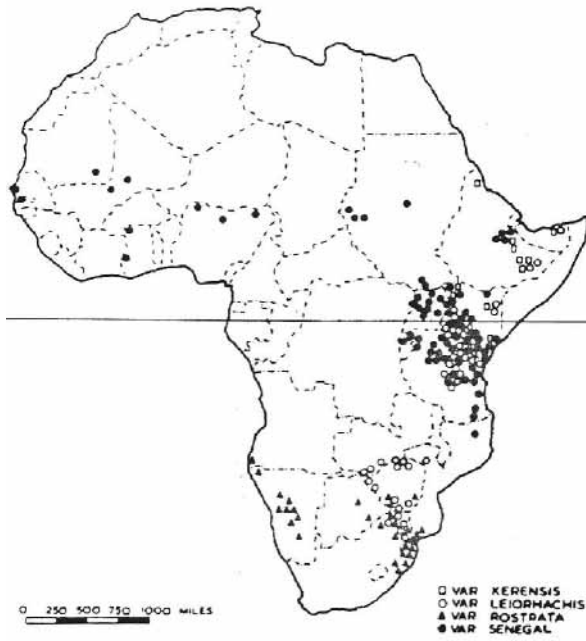


Figure 1.
Répartition naturelle de Acacia senegal en Afrique



Figure 2.
Acacia senegal dans son aire de distribution au Sahel (Ross, 1975)

La gomme arabique ou gomme dure produite par cette espèce est très recherchée pour ses qualités organoleptiques dans divers domaines industriels (CCI, 1978) et présente une grande valeur économique. Un pied de gommier fournit annuellement, en moyenne 500 à 800 g de gomme, encore que certains sujets aient donné jusqu'à 3 kg.

Du fait de ces divers intérêts, l'espèce apparaît comme une des essences ligneuses autochtones les plus utilisées dans le renforcement des activités dans les programmes de mise en valeur des écosystèmes agrosylvopastoraux et de lutte contre la désertification en zone semi-aride

Afin d'améliorer les systèmes agrosylvicoles qui utilisent l'espèce comme composante arborée principale, il faut disposer d'individus à hauts rendements. La sélection individuelle et la mise au point de technique de multiplication végétative constituent une voie qui pourrait permettre d'atteindre cet objectif. Les travaux de Badji *et al.* (1991), de Ndiaye *et al.* (1991a) et de Danthu *et al.* (1992) ont montré la faisabilité de la propagation de *l'Acacia senegal*.

Les techniques de propagation, souvent pratiquées avec succès pour la multiplication des plantes herbacées, constituent aussi une voie appropriée aux exigences de multiplication conforme et rapide d'individus élites. En effet deux types d'intérêts s'attachent à la propagation des essences forestières :

- la possibilité de reproduction conforme comme les techniques traditionnelles de multiplication végétative avec les avantages supplémentaires, notamment la réduction des risques d'infection virales, l'indépendance de la multiplication par rapport aux cycles saisonniers et le fort coefficient de multiplication ;
- la possibilité d'accroître la variabilité génétique dans le cas de reproduction non conforme.

Les techniques de micropropagation ont été appliquées à plus de 1 000 espèces végétales, dont environ 100 essences forestières (Thorpe *et al.*, 1991). Il faut signaler toutefois que la réaction des micropropagules issues de matériels prélevés sur des individus adultes est souvent très difficile à obtenir par cette méthode (Bonga, 1982), même si des résultats encourageants ont été obtenus à partir d'individus matures comme *Sequoia sempervirens* (Boulay, 1980), *Tectona grandis* (Gupta *et al.*, 1980) ou *Faidherbia albida* (Gassama et Duhoux, 1987). En général, il est nécessaire de passer par une phase de rajeunissement du matériel végétal (Franclet, 1980, Ndiaye *et al.*, 1991b) pour mettre au point une méthode de clonage de sujets adultes.

Nous proposons une procédure de multiplication de *l'A. senegal* qui, alliant le bouturage et le microbouturage, peut déboucher sur des applications pratiques à grande échelle.

Du bouturage on peut espérer tirer les avantages classiquement attendus notamment la mobilisation et le regain de vigueur du matériel végétal. Quant au microbouturage, il peut permettre d'obtenir un taux de multiplication élevé sur un espace réduit.

Matériels et méthodes

Mobilisation du matériel de bouturage

La mobilisation est conçue en vue de créer des pieds-mères pour la multiplication clonales *in vitro* à travers le bouturage. On cherche à éviter les phénomènes de maturation. Dans ce cas, plusieurs possibilités sont examinées :



Figure 3.
Rameau âgé de 20 j environ,
formé après recépage d'un pied mère âgé de 5 ans poussant en serre.
On peut observer l'état peu aoûté ou non
du rameau pouvant servir à la culture *in vitro*.

- la première autorise des coupes de rajeunissement *in situ* effectuées durant la période de mai à septembre. Cette opération permet d'obtenir après le recépage d'individus âgés des rejets capables de fournir des boutures réactives et viables (Diaité, 1986).
- la deuxième approche consiste à prélever des fragments de ramets lignifiés de gros diamètres (Danthu *et al.*, 1992) ou de faibles diamètres (Badji *et al.*, 1991), en période hivernale, dans le houppier d'individus adultes. Dans ce cas de figure, le matériel présentant encore des caractères de maturité, nécessite des opérations de rajeunissement physiologique en vue d'un clonage *in vitro* (Fig. 3).

Préparation et conditionnement du matériel végétal

LES BOUTURES

Les boutures sont constituées de tronçons feuillés (4 feuilles environ) de 12 cm de long (8 nœuds) et de diamètre inférieur à 4 mm. La collecte de boutures peut également se faire sous forme de fragments de rameaux de 50 cm de long (bois de 2 à 4 ans). Il est alors possible de conserver ce matériel pendant 8 jours dans une toile maintenue humide et d'y couper des boutures effeuillées ou non constituées de 12 à 15 nœuds (15 cm de long) et 10 mm de diamètre au moment de la mise en place en pépinière.

Avant leur mise en place, les boutures, taillées en biseau à leur base, subissent un traitement fongique par trempage rapide dans une solution de cryptonol à 0.28 % (solution aqueuse contenant 140 g. l⁻¹ de sulfate double d'hydroxy-8-quinoléine et de potassium. Homologation 6900224). La base des boutures est ensuite enrobée avec de l'acide indol-3-butyrique (AIB) en poudre de commerce (Rhizopon AA) à 4 % ou 8 % sur une hauteur d'environ 0,5 cm.

Les boutures sont mises à enraciner soit (i) dans des germeoirs de culture portant un lit de gravier que recouvre une couche de poudre de basalte concassé ou (ii) dans des sachets de polyéthylène perforés contenant un mélange de poudre de basalte, du sable et du sol riche en humus, ou encore (iii) dans les plateaux de polystyrène à alvéoles où sont insérés des godets Fertil remplis du mélange à parts égales de terreau fertiligène à base de tourbe de sphagnum et de carex. Ces trois substrats sont apparus comme couches favorables à la survie et au développement des boutures (Badji *et al.*, 1991 ; Danthu *et al.*, 1992 ; Ndiaye *et al.*, 1991a).

Les conditions de cultures sont caractérisées des températures constantes situées entre 30 °C et 45 °C et d'hygrométrie comprise entre 70 °C et 100 °C. A cet effet, il est nécessaire de maintenir le matériel végétal dans une serre-tunnel sous ombrage (à environ 50 %) et brumisation (*mist system*). Le temps de vaporisation de l'eau est fixé à 6 min au rythme quotidien de trois pulvérisations de 8h à 16h. Les boutures subissent un traitement hebdomadaire au *benlate* à la concentration de 0,07gl⁻¹.

LES MICROBOUTURES

Le matériel de départ est constitué de jeunes rejets des pieds-mères bouturés maintenus en phase de végétation active et traités régulièrement avec un fongicide pour limiter au maximum les risques d'infection au moment de la culture en tube.

La décontamination constitue le premier obstacle à franchir pour réussir la micro-propagation. Parmi les différentes méthodes utilisées, la plus efficace, puisqu'elle peut conduire à 100 % de décontamination est celle qui constitue à plonger les rameaux privés de leurs feuilles pendant 4 à 7 min dans une solution de chlorure de mercure (HgCl₂) à 1 % dans de l'alcool à 70° additionné à quelques gouttes de Tween 20 et pendant 30 s dans l'alcool à 70°. Après plusieurs rinçages à l'eau distillée stérile, les rameaux sont débités en boutures de nœud de 15 à 20 mm de long et placés *in vitro* dans des tubes ou bouchons, sur milieu gélosé. Toutes les manipulations ont lieu sous hotte à flux laminaire.

Deux milieux de base ont servi à la culture des fragments, suivant les objectifs recherchés, à savoir l'élongation des rameaux néoformés ou leur enracinement :

– Pour l'élongation des rameaux néoformés de première génération, le milieu de culture contient les éléments minéraux de Murashige et Skoog (1962) modifié (MS mod.). La modification consiste à diluer de moitié la teneur en macroéléments. On ajoute à ce milieu de base soit de la 6-(4-hydroxy-3-méthylbut-trans-2-enyl)-aminopurine (Zéatine) à la concentration de $5.10^{-7}M$, soit de la 6-benzyl-aminopurine (BAP) à la concentration de $5.10^{-6}M$.

Pour l'enracinement, la solution minérale de Jordan *et al.* (1978) modifié (JN mod.) en diluant de moitié ses macro-éléments est préconisée. Les explants uninodaux, prélevés sur des rameaux en phase d'élongation sur le milieu MS mod. + zéatine à $5.10^{-7}M$, séjournent pendant 12 jours dans un milieu d'induction racinaire JN mod. renfermant de l'acide naphthalène acétique (ANA) à la concentration de $5.10^{-5}M$. Ils sont ensuite transférés dans un milieu d'expression racinaire constitué par un milieu JN mod. ne contenant pas de substance de croissance. Les milieux utilisés contiennent 20 g de saccharose par litre et ont été solidifiés par 6 g par litre de gélose DIFCO et stérilisés par autoclavage à 120° durant 15 min. Le PH est ajusté à 5,8 avant autoclavage.

Les cultures sont placées dans une salle climatisée à une température de $30^{\circ} \pm 2^{\circ}C$ et une humidité variant de 20 à 40 %. Elles sont exposées à une lumière artificielle (tubes fluorescents Sylvania GroLux F 40 W) à raison de 12,5 W. m⁻² sous un régime photopériodique de 16h de jour et 8h de nuit.

Les plantes enracinées *in vitro* sont acclimatées en serre sur un substrat horticole (mélange de terreau et de vermiculite à parts égales) contenu dans des godets. Ils sont maintenus sous cloche en plastique pendant 7 à 10 jours et ensuite sous tunnel de confinement afin de leur assurer l'humidité nécessaire au niveau caulinaire pendant tout le temps (au moins 30 jours) que le servage aura duré.

Résultats et Discussion

Bouturage horticole

Les résultats des expériences sur le bouturage à partir de ramets récoltés dans les conditions énoncées au § 2.1. (Mobilisation) ont montré que la réactivité du matériel végétal est influencée par de la date de prélèvement et à la nature physiologique de l'explant (Diaité, 1986, Badji *et al.*, 1991, Danthu *et al.*, 1992). Les performances observées durant la période hivernale sont nettement supérieures à celle de la période sèche (Fig. 4).

La présence de feuilles constitue également un élément fondamental dans la survie et l'enracinement pour les boutures à faible diamètre, inférieur à 4 mm, alors qu'elle n'est pas nécessaire pour les boutures de diamètre égal ou supérieur à 10 mm.

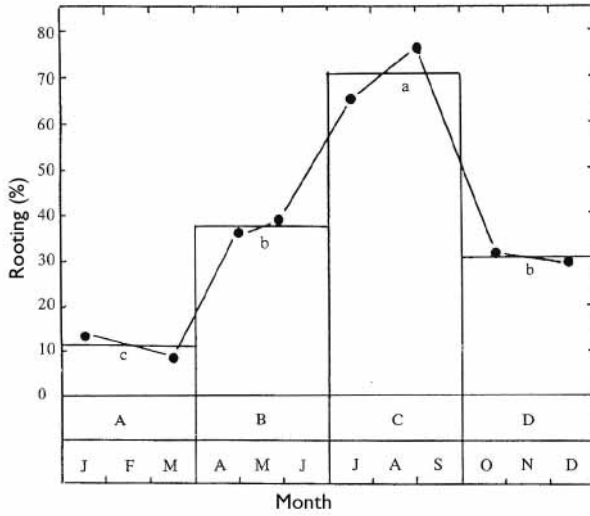


Figure 4.

Enracinement des boutures d'A. senegal

(L: 15 cm, Ø: 10-15,9 mm) 90 j après plantation, en fonction de leur période de récolte.

A: mi-saison sèche; B: fin saison sèche; C: Saison des pluies; D: début saison sèche (Danthu et al., 1992).

L'usage de l'AIB (Rhizopon AA) favorise la rhizogénèse de manière différente selon le substrat en augmentant, soit le pourcentage d'enracinement (sur terreau), soit le nombre de racines formées par la bouture (sur sable).

Dans tous les cas, l'AIB accélère la rhizogénèse (Fig. 5).



Figure 5.

Enracinement, au moyen de Rhizopon AA 4 (AIB 4 %), des boutures de fragments issus de recépages réguliers sur A. senegal adultes mobilisés en serre.

L'effet déprimant de l'AIB sur le développement caulogène durant les premiers stades de développement (30 premiers jours) est souvent noté dans les expériences où cette auxine est utilisée. Cependant, on observe une restitution rapide de la croissance caulogène à partir de 40 jours environ (Ndiaye *et al.*, 1991).

Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'influence de la balance hormonale cytokinine-auxine dont dépendent les stades végétatifs des plantes ; les auxines perturbant la multiplication cellulaire et la différenciation des tissus axillaires alors que les cytokinines les favorisent au détriment des cellules rhizogènes.

Microbouturage

DÉVELOPPEMENT CAULOGÈNE *IN VITRO* DES MICROBOUTURES

Pour que le développement d'une microbouture de nœud soit complet, certaines précautions doivent être prises, notamment l'état sanitaire de l'explant, la taille, l'existence d'un nœud pouvant se développer en tige feuillée et la possibilité d'une formation de racine à la base de la bouture.

Les bourgeons prélevés sur des rameaux d'arbres matures constituent des explants difficiles à désinfecter et peu de travaux font état d'expérimentations effectuées avec des explants adultes. Hormis les difficultés de désinfection à surmonter, l'explant mature est réputé récalcitrant à la régénération *in vitro*. Ce phénomène de diminution de la capacité à la multiplication végétative liée à l'âge chronologique du matériel végétal est souvent signalé dans la littérature (Bonga, 1987). Si pour *A. senegal* une induction racinaire est observée, par contre une élongation caulinaire se manifeste rarement à partir du débourrement des bourgeons qui devrait se traduire par le dégagement de nouvelles feuilles. L'utilisation du matériel juvénile est la voie la plus sûre pour induire un fort taux d'organogénèse.

La microbouture doit avoir une taille minimale pour que les chances de reprise ne soient pas compromises. Les tests réalisés sur *A. senegal* ont montré qu'un fragment uninodal est réactif lorsqu'il mesure au moins 10 mm. Si la taille est inférieure, outre les difficultés de manipulation qui en résultent, la reprise devient incertaine du fait d'un brunissement plus ou moins important du sommet et de la base de l'explant qui lèse en partie le nœud. Si la taille est suffisante, le nœud reste intercalé dans une portion de tige vivante suffisante. La meilleure chance de survie, constatée dans ce cas résulterait aussi bien de la faible proportion de la partie lésée par rapport à la partie saine de l'explant, que d'autres facteurs tels que les réserves de nutriments endogènes ou de régulateurs de croissance, d'ailleurs quantitativement liées à la première cause avancée.

Comme la plupart des *Acacia* (Duhoux *et al.*, 1998), c'est la voie par bourgeonnement axillaire qui est plus utilisée chez *A. senegal* (Fig.6). Le développement d'une seule tige est le plus couramment observé chez l'espèce, contrairement à ce qui se produit chez *Casuarina equisetifolia* où Duhoux *et al.* (1986) ont noté une prolifération de pousses pouvant donner des tiges de 40 à 50 mm de long.

La tige néoformée au départ du bourgeon de la microbouture s'allonge pour atteindre 29 mm en 60 jours et produire en moyenne 4 nœuds bouturables d'une longueur minimale de 10 mm sur milieu de culture MS mod. contenant de la Zéatine.

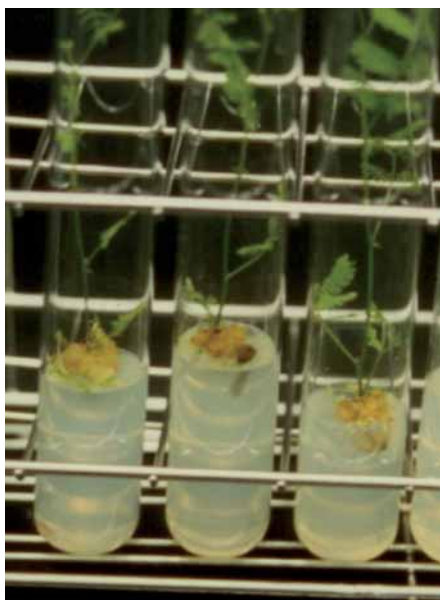


Figure 6.
Développement caulogène des microboutures d'*A. senegal* âgés de 60 j,
sur milieu de multiplication.
Les fragments cultivés sont issus de pieds-mères de 4 ans. (Badji, 1991)

Zéatine (Conc. mol. l-1)	BAP	Nombre de survivants	Hauteur du rameau formé issu de bourgeon (mm)	Explants ayant développé un rameau égal ou supé- rieur à 10 mm* (%)	Taux de multiplication (TM)**
0	0	18/24	10,90 ± 4,18	38,88	1,14 ± 0,31
1 . 10 ⁻⁷	0	17/24	20,10 ± 9,22	47,05	1,87 ± 0,81
5 . 10 ⁻⁷	0	17/24	29,20 ± 14,78	41,17	3,28 ± 1,02
1 . 10 ⁻⁶	0	22/24	14,70 ± 8,48	27,27	2,33 ± 0,54
0	1 . 10 ⁻⁷	19/24	11,92 ± 8,34	31,57	1,50 ± 1,27
0	5 . 10 ⁻⁷	12/24	10,18 ± 5,77	41,66	1,40 ± 0,64
0	1 . 10 ⁻⁶	16/24	17,25 ± 7,76	50,00	2,12 ± 0,52

* Rapporté au nombre de survivants.
** Taux de multiplication (TM) = nombre d'explants uninodaux bouturables de 10 mm ou plus, par microbouture.
Chaque valeur représente la moyenne pour 24 individus.
Les intervalles de confiance ont été calculé au seuil de 5% (test de "T").

Tableau 1.
Influence, après 60 j de culture in vitro, des concentrations de zéatine et de BAP
sur le développement des microboutures prélevées sur des plantes-mères recépées
d'*A. senegal* âgés de 4 ans.

Elle atteint 17 mm pour la BAP avec 2 nœuds bouturables en moyenne et 11 mm sur milieu sans hormone (Tabl.1).

Le taux de multiplication obtenu sur le milieu MS mod. + Zéatine est comparable à celui réalisé en général dans le genre *Acacia*. Il atteint, par contre, des valeurs élevées (entre 20 et 40) de manière exceptionnelle chez *A. mangium* (Galania *et al.*, 1991).

Il faut noter que le taux de multiplication peut varier d'une génération à l'autre car dépendant de l'importance de la croissance de la tige produite *in vitro* à chaque génération, donc du nombre de nœuds dont on disposera pour le repiquage et du temps nécessaire pour obtenir le développement de cette tige. S'il peut augmenter chez certaines espèces végétales herbacées comme les menthes (Geslot *et al.*, 1989), il a tendance à diminuer chez les végétaux ligneux comme *A. senegal*.

ENRACINEMENT *IN VITRO* DES MICROBOUTURES

En l'état de nos conditions de culture permettant le développement caulogène au départ des bourgeons des microboutures primaires, il n'est pas nécessaire que les racines apparaissent. D'ailleurs l'unique présence de la Zéatine n'est pas favorable à la rhizogénèse. Généralement il faudra procéder à l'enracinement des microboutures au bout de la nième génération pour en faire de jeunes plants prêts à la mise en place au champ.

Les essais sur *A. senegal* ont montré que le développement du bourgeon de la 2^e génération est moins satisfaisant que celui de l'explant primaire. Ce développement devient très faible en 3^e génération et quasiment nul en 4^e génération. De plus les microboutures de 3^e et 4^e génération ont totalement perdu leur aptitude à s'enraciner même en présence d'auxines réputées rhizogènes.

Pour conserver un intérêt pour la multiplication *in vitro* vis-à-vis des techniques de bouturage, il a été nécessaire d'envisager une approche permettant une subordination du développement caulogène à celui des racines. Pour cela, les étapes font intervenir des conditions de milieux différents et de repiquages plus nombreux :

- obtention de rameaux à partir du nœud de l'explant primaire ;
- enracinement de l'explant secondaire uninodal provenant d'un rameau produit par l'explant primaire (phase d'induction racinaire) ;
- obtention d'un développement satisfaisant des racines et des rameaux (phase de croissance générale : caulinaire et racinaire) ;
- enracinement de l'explant tertiaire uninodal provenant d'un rameau produit par l'explant secondaire ;
- ainsi de suite...

En soumettant les boutures de 2^e génération à un traitement inductif de courte durée dans un milieu à forte concentration d'auxine (JN mod + ANA $5.10^{-5}M$), on leur assure un taux maximal d'enracinement de 100 % (Tabl. 2). Le transfert de ces microboutures dans un milieu minéral dépourvu de phytohormone permet une bonne expression et un développement vigoureux des racines. Plusieurs auteurs, en procédant à la séparation des processus de rhizogénèse en différentes phases sont arrivés à des résultats similaires. C'est cas notamment pour Depommier (1981) sur *Eucalyptus sp.* et Amerson et Mott (1982) sur *Pinus monticola*.

Durée induction	Milieu	Plants enracinés (%)	Diamètre des racines*	Nombre de racines par explants
6 jours	JOR/2 + ANA**	100,00	+ +	3,0 ± 0,76
	EAU + ANA	50,00	+	1,5 ± 0,23
12 jours	JOR/2 + ANA	100,00	+ + +	4,0 ± 0,81
	EAU + ANA	66,00	+ +	2,0 ± 0,27

* Le diamètre des racines est estimé à l'oeil nu : (+) racines fines, (+ +) racines moyennes, (+ + +) racines grosses.
 ** L'ANA est utilisé à la concentration de 5.10⁻⁵ M.
 JOR/2= Milieu de JORDAN dont la solution minérale est diluée de moitié.
 Chaque valeur représente la moyenne pour 24 individus.
 Les intervalles de confiance ont été calculé au seuil de 5% (test de "T").

Tableau 2.
 Influence de la durée de séjour sur milieu d'induction avec auxine sur la rhizogénèse après 30 j sur milieu d'élongation.

Au cours de la phase d'élongation des racines, il est observé que la qualité de l'enracinement a une influence considérable sur le développement caulogène des boutures. En effet, les rameaux portés par les boutures enracinées se développent beaucoup mieux que ceux obtenus sur des boutures très peu enracinés ou pas du tout. L'élongation des rameaux réalisés en même temps que l'enracinement au cours de cette étape en l'absence de phytohormone offre l'avantage de poursuivre la multiplication *in vitro* de l'*A. senegal*. On peut ainsi réintroduire dans le cycle *in vitro* les explants obtenus sans que des problèmes inhérents à la dégénérescence ou à la diminution du taux de multiplication au cours des générations suivantes ne se posent.

ACCLIMATATION EN SERRE DES VITROPLANTS

L'acclimatation et l'élevage en serre sont des étapes importantes et très liées qui devront préparer les jeunes plants à résister aux difficultés qu'elles peuvent rencontrer dans le milieu naturel.

Durant cette étape, il est nécessaire de réunir toutes les conditions susceptibles de leur garantir une émission suffisante de racines nouvelles plus adaptées aux conditions du substrat de servage qui viennent se substituer aux racines dégénératives formées *in vitro* ; l'examen du système racinaire montre une dégénérescence partielle des racines formées *in vitro*. Le substrat généralement utilisé (mélange de terreau et de vermiculite) permet un démarrage rapide des racines et la plante peut y trouver les éléments nécessaires à son bon développement (Fig. 7). Il faut également une reprise de la croissance qui devra permettre un élevage en plein air des plants.



Figure 7.
Sevrage des vitroplants d'*Acacia senegal*.

Conclusion

Les expérimentations sur *A. senegal* nous permettent de retenir les enseignements suivants :

- Il apparaît que la mobilisation par le bouturage et même le greffage (Ndiaye *et al.*, 1991) des individus sélectionnés est une étape importante dans le processus de multiplication végétative. La propagation *in vitro* du gommier *A. senegal* a été optimisée à travers l'acquisition de matériel végétal réactif et assaini par le bouturage, le recépage régulier des rameaux néoformés et le maintien d'un bon état phytosanitaire des souches élevées en serre ;
- En induisant le bourgeonnement axillaire sur des explants uninodaux, il a été possible d'obtenir des pousses pouvant produire des microboutures de 2^e génération et éventuellement de 3^e génération. Si la première génération offre un taux de multiplication d'environ 4, la génération suivante, toutefois, en offre difficilement 2 et ce taux est souvent inférieur à 1, voire même nul pour les générations suivantes. De plus si les microboutures primaires s'enracinent relativement bien sur les milieux d'enracinement, les microboutures des générations suivantes s'enracinent de plus en plus mal au fur et à mesure des générations successives jusqu'à ne plus le faire du tout.
- Pour contourner les difficultés d'induction et de croissance racinaire des subcultures, il convient de procéder à un traitement transitoire à l'auxine. Pour cela, deux milieux de culture sont utilisés, l'un à base d'auxine (ANA), à forte concentration, induisant la rhizogénèse, l'autre dépourvu de substances de croissance où la rhizogénèse s'amplifie spontanément. Dans ces milieux, la croissance des microboutures de 2^e génération est nettement améliorée et autorise au même titre que dans la situation précédente (1^{re} génération) un taux de multiplication acceptable.

Les techniques de multiplication mises au point laissent envisager une réelle possibilité de multiplier les acacias gros producteurs de gomme en permettant une conformité de copies qui préservent les caractéristiques génétiques des arbres élites sélectionnés.

Références

- Amerson HV and Mott RL (1982).
Improved rooting of western white pine
(*Pinus monticola*) shoots from tissue culture.
Forest Sci. 28 : 822-825.
- Badji S (1991).
La symbiose *Acacia senegal* (L.) Willd. –
Rhizobium sp. : Etudes des partenaires
et optimisation du fonctionnement de la symbiose.
Thèse de Docteur en Sciences, Université
Paul Cézanne (ex Université Aix-Marseille III)
France. 197 p.
- Badji S, Ndiaye I, Danthu P,
and Colonna JP (1991).
Vegetative propagation studies of gum Arabic
trees. 1. Propagation of *Acacia Senegal* (L.) willd
using lignified cutting of small diameter
with eight nodes.
Agroforestry systems 14 : 183-191.
- Badji S, Mairone Y, Ndiaye I, Merlin G,
Danthu P, Neville P and Colonna JP (1993).
In vitro propagation of gum Arabic tree
(*Acacia Senegal* (L.) Willd.).
1. Developing a rapid Method for producing plants.
Plant Cell Reports 12 : 629-633.
- Bonga JM (1982).
Vegetative propagation relation to juvenility,
maturity and rejuvenation.
In : Tissue culture in forestry. Bonga JM and
Durzan DJ (eds) Martinus Nijhoff /Dr W. Junk
publishers, The Hague, pp 387-412.
- Bonga JM (1987).
Clonal propagation of mature trees.
Problems and possible solutions.
In : Cell and tissue culture in forestry.
BONGA JM and DURZAN DJ (eds)
Martinus Nijhoff / DR W. Junk publishers,
Dordrecht, 1, pp 249-270.
- Boulay M(1980).
Multiplication et clonage rapide du *Sequoia*
sempervirens par la culture *in vitro*.
Annales Afocel 1979 : 49-56.
- CCI (Centre du Commerce
International)/CNUCED-GATT (1978).
Le marché de la gomme arabique.
CNUCED Ed. Genève, 181 P.
- Danthu P. Leblan JM, Badji S
and Colonna JP (1992).
Vegetative propagation studies
of gum Arabic trees.
2. Vegetative propagation of adult
Acacia senegal (L.).
Agroforestry Systems 19:15-25.
- Depommier D (1981).
Micropropagation d'Eucalyptus résistant
au froid. Influence de quelques facteurs
sur l'allongement et l'enracinement des plantules.
In : Colloque international sur la culture
In vitro des Essences Forestières.
IUFRO, Fontainebleau, France. Afocel (Ed.),
pp. 127-132.
- Diaite I (1986).
Multiplication Végétative en serre
et en laboratoires des arbres forestiers sahéliens ;
Rapport d'exécutions techniques.
Programmation 307.02/ISRA/CNRF
et CRDI. Octobre 1986.
- Duhoux E, Sougourafa B
and Dommergues YR (1986).
Propagation of *Casuarina equisetifolia*
through axillary buds of immature female
inflorescences cultured *in vitro*.
Plant cell Reports 3 : 161-164.
- Duhoux E, Galiana A, Ahee J
et Franche C (1998).
Application des cultures *in vitro* dans le genre
Acacia. *In* : Actes de la réunion thématique
sur l'*Acacia* au Sénégal, Dakar (Sénégal),
3 -5 Décembre.
Eds : Campa C, Grignon C, Gueye M
et Hamon S.
Edition de l'Orstom/Collections Colloques
et Séminaires, Paris, 1998, pp 237-255.

- Francllet A (1980).
Rajeunissement et propagation végétative des ligneux. *Annales Afocel* 1980: 12-40.
- Galiana A , Tibok A, Duhoux E (1991).
In Vitro propagation of the nitrogen-fixing tree legume *Acacia mangium* Willd.
Plant Soil 135 : 151-159.
- Gassama YK et Duhoux E (1987).
Micropropagation de l'*Acacia albida* Del (*Leguminosae*) adulte.
Bull. IFAN 46 A : 314-320.
- Gerakis PA and Tsangarakis CZ (1970).
The influence of *Acacia senegal* on the fertility of the sand sheet (GOZ) soil in the Central Sudan.
Plant and Soil 33 : 81-86.
- Geslot A, Connault C, Merlin G, El Maataoui M et Neville P (1989).
Multiplication *in vitro* de Menthes associant la culture d'apex et le microbouturage.
Bull. Soc. bot. Fr.136 Lettres bot. 1989 (1) : 31-38.
- Gupta PK, Nagir AL, Mascarenas AF and Jagannathan V (1980).
Tissue culture of trees : Clonal multiplication of *Tectona grandis* L (Teak) by tissue culture.
Plant Sci. Lett. 17 :259-268.
- Jordan M, Apablaza G and Lippi P (1978).
Obtencion de plantas de papa libres de virus X e Y por cultivo de apices caulinares *in vitro* y deteccion serologica por la prueba Elisa.
Ciencia e Investigacion Agraria 5 (4) : 207-211.
- Ndiaye I, Badji S, Geslot A, Merlin G et Neville P (1991). Recherches de conditions favorables à l'enracinement des boutures d'*Acacia senegal* (L.) Willd.
In : Physiologie des Arbres et Arbustes des Zones Arides et Semi-arides. Séminaire Paris-Nancy, 20 Mars - 6 Avril 1990. Groupe d'Etudes de l'Arbres (GEA) et Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Eds : Riedacker A, Dreyer E, Pafadam C, Joly H et Bory G. John Libbey Euritext Press, pp. 315-322.
- Ndiaye I, Guindo H, Geslot A, Mairone Y, Neville P et Palma B (1991b).
Greffe d'*Acacia senegal* (L.) Willd. adulte sur jeune et son influence rajeunissante exprimée par l'aptitude rhizogène des boutures provenant du greffon.
In : Physiologie des Arbres et Arbustes des Zones Arides. Séminaire Paris-Nancy, 20 Mars-6 Avril 1990. Groupe d'Etudes de l'Arbre (GEA) et Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Eds : Riedacker A, Dreyer E, Pafadam C, Joly H et Boy G. John Libbey Eurotext Press, pp. 309-313.
- National Research Council (NRC) (1979).
Tropical legumes : Resources for the future. National Academy of Sciences. Washington DC, 332 p.
- Obeid M and Seif-El-Din AG (1970).
Ecological studies of the vegetation of the Sudan.
J. Appl. Ecol. 7: 507-518.
- Ross JH (1975).
The *Acacia senegal* Complex.
Bothalia 11 (4) : 453-462.
- Thorpe TA, Harry IS and Kumar PP (1991).
Application of micro propagation to forestry.
In : Micropropagation technology and application. Debergh & Zimmerman eds. Kluwer Academic Press, Dordrecht, Boston, London, pp.311-336.

Les vitrométhodes dans les stratégies de reboisement pour la Grande Muraille Verte

MAME OURÈYE SY

Laboratoire Campus de Biotechnologies Végétales, Département de Biologie Végétale,
Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, BP 5005, Dakar-Fann, Sénégal
Email : oureyesy1@yahoo.fr; oureyesy@ucad.sn

Résumé

Les stratégies de production des espèces ligneuses reposent sur l'utilisation de méthodes culturales classiques telles que le bouturage horticole, le marcottage ou la germination des semis. Les plantations établies avec des graines non sélectionnées "tout-venant", conduisent à une hétérogénéité considérable. Dans les pays du Sud, comme ceux du Sahel, où il manque cruellement de vergers à graines sélectionnées, il serait judicieux de recourir à des techniques de culture *in vitro* simplifiées pour assister les programmes de reboisement. En effet, les potentialités des biotechnologies demeurent sous exploitées dans les pays en développement alors que leurs impacts positifs ont été démontrés dans les pays développés dans plusieurs secteurs comme l'agriculture, l'agroforesterie et l'industrie agro-alimentaire.

Les espèces ligneuses forestières sont pour une large part caractérisées par une grande variabilité dans leur vitesse de croissance. Par conséquent, l'identification d'individus performants en vue d'une sélection clonale permettra d'améliorer dans un premier temps la qualité du matériel végétal. À l'issue de cette sélection préliminaire, les arbres-mères qui donnent une descendance-élite seront propagés par des techniques de multiplication plus puissantes comme la micropropagation.

Parmi les stratégies de production de plants destinés à l'établissement de la grande muraille verte, trois différentes techniques de **micropropagation** en masse sont proposées. Il s'agit du microbouturage ou clonage *in vitro*, de l'organogénèse directe

par néoformation de bourgeons et de l'organogénèse indirecte par embryogénèse somatique. Les avantages et les inconvénients de chacune de ses vitrométhodes sont présentés.

Mots-clés :

ESPÈCES LIGNEUSES, CLONAGE *IN VITRO*, MICROBOUTURAGE,
ORGANOGENÈSE, EMBRYOGENÈSE SOMATIQUE, REBOISEMENT.

Introduction

Les stratégies de production et de multiplication des arbres reposent sur l'utilisation de méthodes culturales classiques qui exploitent le processus de multiplication végétative, mode de propagation très fréquent dans le règne végétal. Ainsi, les horticulteurs ont développé depuis des siècles des techniques artificielles de multiplication végétative comme le bouturage, le greffage et le marcottage. Par ces techniques, ils reproduisent des individus génétiquement identiques à la plante-mère, créant ainsi des populations homogènes. Les graines, issues de la fécondation, sont aussi très utilisées pour la production de plants dans les programmes de reboisement. Si la multiplication végétative est économiquement possible, il est préférable de l'appliquer comparativement à la propagation par voie sexuée car les caractéristiques génétiques des plantes sont mieux conservées (Murashige, 1974). En effet, les plantations établies avec des graines "tout-venant" conduisent à une hétérogénéité considérable de la descendance.

Depuis quelques décennies, l'introduction des techniques de multiplication végétative *in vitro* ou **vitrométhodes** a bouleversé complètement la production végétale. Ces techniques offrent de vastes possibilités pour les études fondamentales et appliquées à la micropropagation d'espèces économiquement importantes ou utiles pour le reboisement de zones atteintes par la désertification. En outre, pour les pays du Sud, comme ceux du Sahel, où l'on manque cruciallement de vergers à graines sélectionnées, des techniques *in vitro* simplifiées permettront aussi de répondre concrètement à la demande lors des campagnes de reboisement.

En effet, cet outil répond à trois objectifs majeurs :

- l'amélioration de l'état phytosanitaire des plantes,
- l'accroissement du taux et de la vitesse de multiplication des arbres-élites,
- et la propagation végétative d'espèces forestières qui ne se reproduisent pas par cette voie en conditions naturelles.

Méthodes de multiplication

Dans cette étude, nous proposons trois méthodes de micropropagation en masse des essences forestières. Il s'agit :

- de la multiplication végétative *in vitro* ou microbouturage *in vitro*,
- de la multiplication par organogenèse directe *i.e.* la néoformation de bourgeons ou multiplication par bourgeonnement adventif,
- et, de l'organogenèse indirecte par embryogenèse somatique.

Les deux premières techniques aboutissent à une production conforme de vitroplants et de plants génétiquement conformes au pied mère choisi tandis que la dernière va donner une production non conforme qui peut induire des instabilités génétiques. Toutefois, ces modifications génomiques peuvent être exploitées en génétique d'amélioration des plantes car elles peuvent générer des caractères intéressants et exploitables sur le plan agronomique ou agroforestier.

Quelle que soit la technique proposée, les principales étapes de la micropropagation *in vitro* d'espèces ligneuses comportent une phase en laboratoire, une phase en serre et une phase au champ en conditions naturelles.

Multiplication végétative *in vitro* ou micropropagation *in vitro*

Caractéristiques des espèces ligneuses

Chez les ligneux, la durée de vie de la plante peut être parfois considérable. En effet, la plupart des arbres forestiers sont caractérisés par une grande variabilité dans leur vitesse de croissance. Par conséquent, l'identification d'individus ayant des caractéristiques forestières requises doit se faire par sélection clonale, ce qui permettra d'améliorer dans un premier temps la qualité du matériel végétal. A l'issue de cette sélection clonale préliminaire, les arbres-mères qui donnent une descendance élite, seront propagés par des techniques plus performantes issues de la culture *in vitro*, comme la micropropagation.

Le stade de développement est aussi un des aspects les plus importants dans la micropropagation des espèces ligneuses car les sujets adultes perdent progressivement leur aptitude à la propagation végétative du fait de leur vieillissement. Les explants juvéniles ou rajeunis réagissent mieux en culture *in vitro* que ceux provenant de matériel adulte. En effet, la morphogenèse et la croissance des tissus des explants sont fortement dépendantes du génotype et du statut physiologique de ces explants au moment de leur mise en culture (Duhoux, 1988 ; Duhoux *et al.*, 1995).

Les autres difficultés rencontrées dans la multiplication *in vitro* des ligneux tiennent :

- aux fortes contaminations des explants et à la difficulté d’obtenir une culture axénique
- à la libération de substances phénoliques dans le milieu de culture,
- au statut de la plante-mère à savoir son génotype et son état nutritionnel,
- à la phase d’enracinement qui présente toujours des difficultés chez les ligneux,
- et enfin, à l’âge ontogénique et physiologique de l’arbre (Walali Loudyi, 1993).

Techniques de multiplication

Les techniques de multiplication sont analogues à celles appliquées sur les espèces herbacées. Elles consistent à mettre en culture des microboutures, puis à stimuler le débourrement des bourgeons axillaires qui renferme un méristème et à les faire proliférer tout en maintenant l’intégrité génétique des clones. Toutefois, cette technique comporte quelques particularités qui sont des facteurs spécifiques aux espèces ligneuses. Elles concernent la composition du milieu de culture, la phase d’initiation *in vitro*, l’acquisition de certains caractères juvéniles, résultant d’un rajeunissement progressif au cours de la culture et l’induction de l’enracinement adventif (Walali Loudyi, 1993).

Les tissus des plantes ligneuses se développent mieux dans des milieux dérivés du milieu de Murashige et Skoog (1962) dont les macro-éléments sont dilués de moitié ou au quart. Pour ce faire, un milieu de culture spécifique aux espèces ligneuses « Woody Plant Medium » a été mis au point par Mc Cown et Lloyd (1981).

Qu’il s’agisse d’une multiplication végétative par bourgeonnement axillaire ou par bourgeonnement adventif, il existe quatre stades-clés essentiels à respecter durant la phase en laboratoire. Ce sont :

- Stade 0 : il correspond à la désinfection et à la préparation du matériel végétal à ensemercer *in vitro*,
- Stade 1 : il concerne l’établissement de la culture aseptique initiale,
- Stade 2 : c’est la phase de clonage *in vitro* ; elle consiste en une multiplication des microboutures ou des bourgeons néoformés. Cette étape de subcultures sera exécutée autant de fois que nécessaire selon le nombre de vitroplants final désiré. Elle peut comporter une sous-étape d’allongement des microboutures selon les espèces.
- Stade 3 : il équivaut à l’enracinement des vitroplants. Cette phase rhizogène peut se dérouler au laboratoire ou en serre.

Pour des raisons économiques et étant donné que la phase d’enracinement *in vitro* constitue l’étape la plus coûteuse et la plus délicate dans un procédé de multiplication. Elle revient à 35 voire 15 % du coût total de la technique, elle est souvent réalisée en même temps que la phase de sevrage sous serre (Deberg et Maene, 1981).

Multiplication par bourgeonnement axillaire

PRINCIPE

Il s’agit de régénérer dans de brefs délais et de façon accélérée des milliers de plantes entières conformes génétiquement au pied-mère sélectionné et de constituer ainsi

une population d'individus tous semblables que l'on appelle clone (Duhoux, 1988). Les fragments d'organes mis en culture sont dénommés explants et sont prélevés directement sur les plantes à propager. Il s'agit d'entrenœuds renfermant un bourgeon axillaire à l'aisselle d'une feuille. Ces explants sont cultivés *in vitro* dans un milieu synthétique approprié contenant des éléments minéraux essentiels pour leur maintien en survie et des régulateurs de croissance. Les concentrations hormonales déterminent l'expression et l'orientation morphogénétiques. Le repiquage s'effectue sous des conditions aseptiques rigoureuses (cf. Figure 1).

EXPLANTS JUVÉNILES

Les différentes étapes de la multiplication par débourement des bourgeons axillaires juvéniles sont schématisées sur la figure 1 (voies 1 et 2).

Les explants juvéniles sont constitués par des boutures monodales portant un bourgeon axillaire ou des apex terminaux de tiges de jeunes plantes sélectionnées (1.1) ou par des bourgeons cotylédonaire (1.2) issus de semis de graines que l'on met en culture. Le bourgeon se développe en une tige feuillée par réactivation et croissance du méristème caulinaire qu'il renferme car l'explant n'est plus soumis à l'influence des corrélations physiologiques inhibitrices de la plante. La réactivation et le développement du méristème sont induits par une phytohormone de nature cytokininique à faible concentration (1.1) qui est incorporée dans le milieu nutritif approprié.

La tige feuillée néoformée peut être fragmentée en **microboutures monodales** constituées d'entrenœuds. Les entrenœuds sont transférés aseptiquement et individuellement dans le même milieu de culture neuf. Ils redonnent au bout de 3 à 4 semaines d'incubation autant de nouvelles tiges feuillées dont chaque entrenœud forme potentiellement un nouvel explant. Ce cycle de multiplication peut être répété autant de fois que nécessaire.

Si l'explant initial est ensemencé dans un milieu plus riche en cytokinines, le méristème caulinaire se transforme en une tige feuillée qui se ramifie intensément pour donner des rameaux secondaires voire tertiaires (1.2). Les touffes de bourgeons sont isolées et découpées puis la phase de multiplication intensive est effectuée à ce stade. Dès que le taux de multiplication voulu est atteint, on procède à l'enracinement des tiges feuillées par transfert sur un milieu enrichi ou non en une hormone rhizogène, en l'occurrence de l'auxine. Par la suite, les vitroplants enracinés sont acclimatés en serre ou en pépinière où ils évoluent en plantes normales.

NB : Dans le cas d'explant juvénile, il est possible d'obtenir une tige feuillée qui porte en moyenne 4 entrenœuds en 4 semaines. Ceci résulte d'un taux de multiplication égal à 4. A titre d'exemple, si la culture est initiée à partir d'une tigelle à 4 noeuds le 1^{er} janvier, 12 mois plus tard (soit le 31 décembre) on pourra obtenir une **progression géométrique** de l'ordre de **4¹²**. Ce facteur exponentiel correspond à une production de **16 777 216 vitroplants**.

Cette vitrométhode a été appliquée avec succès sur des espèces ligneuses tropicales en partant de noeuds prélevés sur de jeunes plants immobilisés en serre comme *Anacardium occidentale* L. (Sy, 1990) et des acacias sahéliens (Borgel *et al.*, 1998) ou en utilisant des bourgeons cotylédonaire de semis de graines d'*Eucalyptus*

camaldulensis Dehnh. (Diallo & Duhoux, 1984), *d'Acacia albida* Del. (Duhoux et Davis, 1985) et *d'Acacia mangium* Willd. (Galiana *et al.*, 1991).

L'intérêt du microbouturage *in vitro* est que cette technique accélère *in vitro* le fonctionnement normal des méristèmes des bourgeons préformés sur les plantes (Gaspar, 1988).

EXPLANTS PRÉLEVÉS SUR DES ARBRES ÂGÉS

Multiplication à partir d'explants juvéniles

La multiplication des arbres âgés présente des difficultés liées à la reprise de croissance des organes et à leur port souvent plagiotrope. Afin d'éviter ces obstacles, on procède au "rajeunissement" de l'individu-élite sélectionné ou bien on recherche sur l'arbre âgé, des organes encore jeunes ou l'on utilise des rejets. Une telle méthode a été utilisée au Sénégal pour micropropager *in vitro* des pieds âgés de *Casuarina equisetifolia* L. La technique consiste à collecter des inflorescences femelles immatures prélevées 3 semaines au plus tard avant l'épanouissement des fleurs de *C. equisetifolia* et à les introduire dans un milieu nutritif approprié (Duhoux *et al.*, 1986).

Multiplication à partir d'explants rejuvenilisés

Le rajeunissement du matériel végétal est recherché avant l'introduction *in vitro* car les explants jeunes ou juvenilisés s'organisent mieux en culture *in vitro* que ceux provenant de matériel adulte. Par conséquent, le choix de l'explant sur un arbre adulte doit porter sur la partie de la plante qui a subi un rajeunissement. Celle-ci peut être naturelle (rejets émis à la base du tronc) ou provoquée artificiellement par recépage du tronc, par microgreffage en cascade *in vitro* sur des semis (cf. figures 1.3 et 2) ou par applications de régulateurs de croissance.

Le microgreffage *in vitro* de la plupart des espèces ligneuses forestières est inspiré de la technique mise au point par Murashige *et al.* (1972) et Navarro *et al.* (1975) sur des *Citrus* L. Il permet de reconstituer des clones à partir de plantes âgées virosées ou inaptes au bouturage à cause des difficultés d'enracinement (Monteuuis, 1989). Le microgreffage d'apex de tige provenant de sujets âgés sur des porte-greffes juvéniles a permis le rajeunissement physiologique de diverses espèces en facilitant leur enracinement et leur clonage *in vitro*. Parmi ces espèces citons *Persea americana* Mill. (Murashige, 1978), *Eucalyptus camaldulensis* (Francklet, 1979 ; 1981), *Citrus reticulata* Blanco. (Huang *et al.*, 1992a), *Sequoia sempervirens* Endl. (Huang *et al.*, 1992b), *Sequoia giganteum* Bucholz. (Monteuuis & Bon, 1989), *Acacia tortilis* (Forssk.) Hayne (Detrez, 1994) et *Zizyphus mauritiana* Lam. var. Gola (Touré, 2001).

La technique consiste à insérer les greffons, issus de la cime de l'arbre âgé, sur des porte-greffes juvéniles élevés en Motte Milcap *in vitro*. Le greffon formé par un apex est taillé à sa base en biseau et introduit dans la fente du porte-greffe que l'on a décapité au départ sous les cotylédons. Après débourrement et élongation des greffons, certains sont transférés sur un milieu d'enracinement puis acclimatés en serre pour l'endurcissement et l'appréciation des caractéristiques juvéniles (vigueur, port orthotrope, aptitude au bouturage, aptitude à l'enracinement, croissance, etc.).

Cette opération de microgreffage en cascade *in vitro* est répétée autant de fois que nécessaire *i. e.* jusqu'à la rejuvenilisation du clone. Dès que les plants microgreffés présentent des caractères juvéniles, on procède à la phase intensive de microbouturage *in vitro* (Danthu *et al.*, 2000).

L'accroissement du taux de multiplication suite à plusieurs cycles de subculture dans des milieux riches en cytokinines induit aussi des caractères juvéniles qui peuvent être une réponse à la culture *in vitro*.

Multiplication par organogenèse directe : bourgeonnement adventif

PRINCIPE

Cette technique de micropropagation permet d'obtenir des bourgeons et pousses adventifs directement sur les tissus des explants blessés et mis en culture sans passer par une phase de callogénèse. Les bourgeons néoformés se forment à partir des cellules épidermiques, sous-épidermiques ou des cellules du système vasculaire (Boxus *et al.*, 1995).

La multiplication par bourgeonnement adventif est très utilisée pour la propagation d'espèces ornementales comme le *Saintpaulia* Wendl. ou le *Ficus lyrata* Warb. mais aussi pour la production d'essences forestières d'intérêt (Boxus *et al.*, 1995). Ainsi, le manque de semences sélectionnées de *Pinus radiata* D. Don en Nouvelle Zélande a conduit à la production par néoformation de bourgeons de milliers de plantes. L'application de cette technique a permis d'obtenir 50 à 1000 vitroplants à partir d'une graine sélectionnée en 20- 25 semaines. En 17 mois, Smith *et al.*, (1980) ont obtenu 80 % de plantes enracinées prêtes à être transférées au champ.

ETAPES DE LA TECHNIQUE

Les principales étapes sont schématisées sur la figure 1, voie 4.

La culture peut être initiée à partir de n'importe quel type de fragment d'organe (feuille, tige, racine, etc.) ou même à partir de cellules isolées. Partant d'un milieu nutritif enrichi en cytokinine, des bourgeons apparaissent à la surface des explants au bout de quelques semaines d'incubation. Ces bourgeons néoformés peuvent se développer en une tige feuillée sur le même milieu ou être transférés sur un milieu d'allongement. Le cycle de microbouturage *in vitro* peut être entrepris à ce niveau et donner ultérieurement des plantes enracinées prêtes à être sevrées en serre.

Multiplication végétative par embryogenèse somatique

Cette technique nécessite une étape initiale qui consiste en la production de cellules indifférenciées *i. e.* la formation d'un cal pouvant présenter un danger d'instabilité génétique. Aussi, l'embryogenèse somatique est-elle limitée aux espèces possédant un génome très stable et aux espèces pour lesquelles la reproduction conforme n'est pas toujours exigée. C'est le cas des plantes forestières.

PRINCIPE

L'embryogenèse somatique désigne l'ensemble des événements provoqués *in vitro* et conduisant à la formation d'un embryon à partir de cellule somatique ou germinale sans passer par la fusion gamétique *i.e.* la fécondation. En conséquence, les embryons formés sont issus d'une embryogenèse asexuée (Monnier, 1995). Ce procédé permet d'obtenir des clones d'embryons à partir d'un génotype et de régénérer des plantes à partir de ceux-ci (Paques & Bercetche, 1995).

ÉTAPES DE LA TECHNIQUE

La procédure peut être décomposée en 5 phases principales : l'**induction** d'embryons à partir d'un génotype sélectionné, la **multiplication**, la **maturation**, la **germination** des embryons en plantules et leur **conversion** en plantes normales.

Les principales étapes de l'embryogenèse sont résumées sur la figure 3.

À partir d'un fragment d'organe quelconque (feuille, tige, tissu, cellules isolées, etc.) qui constitue l'explant (3.1), on induit la callogénèse (3.2). Le cal est une structure indifférenciée qui se forme sur l'explant (tissu différencié) suite à un choc initiateur provoqué par la présence d'une auxine forte mutagène dans le milieu de culture. Pour ce faire, on incorpore généralement du 2,4-D dans le milieu nutritif mais d'autres types d'auxine peuvent aussi être employés. Le cal primaire est isolé et maintenu en subculture dans le même milieu (3.3) afin qu'il se développe. Dès que des structures globulaires qui évoquent des amas pro-embryogènes apparaissent sur le cal (3.4), celui-ci est dissocié pour être ensemencé en milieu liquide. Il constitue le milieu d'expression ou de multiplication, il est généralement pourvu de très peu ou dépourvu d'auxine. L'hormone est substituée par une cytokinine. Le cal se multiplie (3.4a) et constitue un tissu embryogène. Ce dernier forme une suspension cellulaire maintenue en agitation orbitale (3.5). Les embryons somatiques ont un développement plus synchrone en milieu liquide. Il est aussi possible de retransférer la suspension cellulaire en milieu solide (3.4b) où elle redonnera un cal.

Sous certaines conditions, les suspensions cellulaires s'organisent en structures bipolaires qui sont des embryons somatiques (3.6). Ils possèdent un méristème caulinaire et un méristème radicaire analogues à ceux d'un embryon zygotique.

À ce stade, les embryons somatiques peuvent être enrobés, sans altérer leur viabilité, dans un gel d'alginate de sodium contenant les éléments nutritifs essentiels à leur germination ultérieure et être encapsulés dans un film de résine en polyox qui les protège contre la dessiccation. On peut les conserver ainsi sous forme de semences artificielles (3.6a) (Kitto & Janick, 1985). La cryoconservation de ces semences dans de l'azote liquide est envisageable en appliquant le procédé mis au point par Derreudre *et al.*, 1990. Telle a été la méthode développée pour sauvegarder des embryons somatiques de palmier à huile issus de têtes de clones d'arbres-élites (Engelmann *et al.*, 1984 ; 1985).

Le transfert des embryons somatiques dans un milieu de culture approprié va permettre l'achèvement de leur maturation et de leur germination (3.7). Ils se présentent souvent sous forme d'embryons somatiques cotylédonaire, qui repiqués sur le milieu dépourvu d'hormone ou enrichi en charbon actif, vont développer une

racine pivotante qui prolonge l'hypocotyle. Ils pourront par la suite assurer leur conversion en plantes enracinées (3.8) qui seront acclimatées en serre pour leur développement en plantes normales (3.9).

L'embryogenèse somatique est une alternative intéressante pour la propagation des espèces forestières surtout si le système peut être automatisé par culture en bioréacteur (Pétiard *et al.*, 1993). Ce mode de propagation très efficace a permis la multiplication végétative et la diffusion d'espèces agronomiques à haut intérêt commercial mais qui ne présentent aucun rejet au cours de leur cycle végétatif ; autrement dit, elles ne possèdent qu'un méristème terminal. C'est le cas du palmier-dattier (Tisserat *et al.*, 1979), du palmier à huile (Rabéchault & Martin, 1976 ; Durand-Gasselino *et al.*, 1991) et du cocotier (Verdeil *et al.*, 1992 ; 1994). Cette technique a aussi été appliquée pour la régénération d'espèces qui présentent un taux d'hétérosis élevé dans leur descendance. Citons des espèces telles que le manguier (Litz, 1984b), l'anacardier (Sy *et al.*, 1991), le caféier (Sondahl *et al.*, 1984) et le cacaoyer (Pence *et al.*, 1980).

Dans le but d'évaluer le potentiel fixateur d'azote et d'améliorer génétiquement le complexe acacia dans les systèmes agroforestiers contrastés de la zone sahélienne, cette technique de régénération par embryogenèse somatique a aussi été appliquée avec succès chez *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* (Savi.) Brenan chez *Acacia nilotica* (L.) Del. subsp. *tomentosa* Willd. et chez *Acacia nilotica* subsp. *adstringens* A. Cunn. (Borgel *et al.*, 1993 ; Sané, 1998 ; Sané *et al.*, 2000).

Phase d'acclimatation : phase en serre

Définition

On appelle acclimatation ou sevrage, la phase de croissance qui succède aux conditions *in vitro*. C'est une phase durant laquelle les vitroplants subissent un stress hydrique puisque vivant au préalable en atmosphère confinée. Ils peuvent souffrir d'un stress pathologique puisqu'ils vivaient en conditions aseptiques et ils vont subir également un stress physiologique puisqu'ils étaient élevés sur des milieux riches en sucres dans lesquels ils n'effectuaient pas ou peu de photosynthèse (Boxus *et al.*, 1995).

La réussite de la culture *in vitro* pour une propagation massive dépend de la capacité de gestion à grande échelle des plantes en serre pendant leur période d'adaptation, avec un taux élevé de reprise, et à faible coût. En effet, l'aptitude des plantes *in vitro* à survivre pendant la période de transition peut être un facteur limitant de l'efficacité de la méthode.

Caractéristiques des plantes propagées *in vitro*

Les plantes cultivées *in vitro* diffèrent des plantes propagées conventionnellement car elles ont été élevées dans un environnement où tous les paramètres étaient contrôlés. En effet, suite aux conditions de confinement créées *in vitro*, les vitroplants présentent de profondes modifications morphologiques, anatomiques et physiologiques. Ces dernières sont essentiellement dues aux conditions de croissance en milieu saturé d'eau (Capellades *et al.*, 1990).

Les modifications principales résident dans la morphologie et l'anatomie des feuilles des vitroplants ainsi que dans leur système racinaire. En effet, les feuilles des vitroplants sont peu recouvertes de cire au niveau de leur épiderme, ce qui les rend plus sensibles à la déshydratation (Grout & Aston, 1977a et b). Les feuilles des vitroplants sont minces et ressemblent en général à des feuilles d'ombre ; elles sont constituées d'une seule couche de cellules palissadiques qui aménagent entre elles de grands interstices et qui contiennent peu de chloroplastes (Wetzstein & Sommer, 1982 ; 1983). Elles possèdent aussi peu de stomates (Brainerd *et al.*, 1981). En conséquence, les plantes sont très sensibles en une perte en eau.

Les racines qui se développent dans l'agar sont dépourvues de poils absorbants et sont peu ramifiées, il est donc nécessaire de stimuler leur conversion en racines fonctionnelles pourvues de poils absorbants indispensables à l'absorption des substances minérales du sol. Dans cette perspective, Gianinazzi *et al.* (1989) préconisent une inoculation des vitroplants avec des champignons mycorhiziens à arbuscules pendant la phase d'acclimatation. Ces micro-organismes, du fait de l'association symbiotique qu'ils réalisent avec les plantes, assurent une meilleure nutrition hydrominérale des plantes dans le sol. Ces dernières deviennent plus résistantes au choc de transplantation et aux maladies des racines. L'endomycorhization se traduit aussi par une forte augmentation de la croissance des rameaux et du poids de matières fraîches aérienne et racinaire.

Conditions d'acclimatation

Les conditions de sevrage des vitroplants peuvent se résumer en 4 facteurs essentiels évoqués ci-dessous.

PRÉCONDITIONNEMENT AU REPIQUAGE

La sortie des récipients de culture contenant les vitroplants dans la serre est préconisée quelques jours avant le repiquage afin de pré-adapter les plantes aux conditions physiques qui y prévalent. Il est toutefois nécessaire d'ôter les couvercles afin d'éviter un double effet de serre (Carreto, 1992). Dans les pays tropicaux, le sevrage est souvent réalisé sous ombrière du fait des fortes températures. Il est aussi nécessaire de maintenir un degré hygrométrique relativement élevé *i. e.* proche de la saturation pour prévenir tout risque de dessiccation des feuilles. Les résidus du milieu de culture sont aussi éliminés par simple lavage à l'eau courante et sont éventuellement substitués par une solution nutritive diluée pour empêcher une contamination microbienne importante du système racinaire (Takakori *et al.*, 1968).

SUBSTRATS D'ACCLIMATATION

Le substrat choisi dépend de l'espèce à acclimater. On utilise généralement des substrats équivalents aux substrats conventionnels mais la qualité et la stérilisation de celui-ci sont des paramètres importants. La plupart des espèces ligneuses se développent bien sur un substrat qui assure un bon drainage et qui a une bonne porosité. Il doit aussi être bien aéré et avoir un pH pas trop élevé. Il est aussi possible d'employer des substrats artificiels du type polyuréthane, laine de roche, etc. (Brochard, 1991). L'arrosage des vitroplants avec une solution qui contient les sels organiques du milieu de culture originel est aussi préconisé mais certaines espèces peuvent préférer des solutions nutritives spécifiques.

Prévention des maladies

Les plantes issues de culture *in vitro* sont très sensibles aux attaques des micro-organismes pathogènes puisqu'ayant été élevées dans un environnement aseptique. Par conséquent, la stérilisation du substrat quelques semaines avant la transplantation est une condition *sine qua non* à la survie des vitroplants. On emploie aussi fréquemment des fongicides pour prévenir l'attaque de champignons pendant le processus d'adaptation. Les fongicides peuvent être pulvérisés directement sur les plantes, mélangés au substrat ou appliqués en alternance avec la solution d'arrosage.

Contrôle des paramètres physiques

Trois paramètres physiques doivent être strictement maîtrisés ; il s'agit de l'humidité, de la température et de la lumière.

HUMIDITÉ

Durant la phase de préadaptation, les vitroplants peuvent être maintenus à « l'étouffée » sous un film plastique à cause de leurs conditions anatomiques et physiologiques. Mais, le volume de la bêche plastique doit être bien proportionné au volume du substrat pour éviter tout engorgement et asphyxie du système racinaire (Boxus *et al.*, 1995). Le maintien d'une humidité relative supérieure à 90 % est obligatoire pendant les 15 à 21 jours qui succèdent au repiquage.

Une nébulisation qui assure une micro-aspersion intermittente contrôlable par une minuterie peut aussi être effectuée après la phase de préconditionnement. En période estivale, l'application d'anti-transpirants ou de cires du type Acropol à 1 % peut contribuer efficacement à diminuer le flétrissement des feuilles (Mc Comb & Newton, 1981).

TEMPÉRATURE

La majorité des espèces ligneuses tropicales se développe mieux à des températures comprises entre 25 °C et 28 °C ; les mêmes conditions thermiques sont requises durant la période de sevrage. En général, un thermostat est utilisé pour maintenir et vérifier la stabilité de ce facteur car les fluctuations thermiques ont une incidence négative sur la croissance des plantes. Celle-ci se ferait de façon irrégulière.

LUMIÈRE

Au début de la période d'adaptation aux conditions *ex vitro*, il est nécessaire de maintenir une faible intensité lumineuse car les feuilles des vitroplants ont des caractéristiques de feuilles d'ombre. Pour ce faire, les plantes sont souvent protégées par un filet à maille pour créer un ombrage. La photopériode doit aussi être identique à celle adoptée durant la phase en laboratoire et elle doit être maintenue pendant toute l'acclimatation.

En définitive, pour réussir une phase d'acclimatation, il faut garder les vitroplants « pieds au chaud et têtes au froid » (Boxus *et al.*, 1995).

Phase au champ

Après une phase d'acclimatation en serre qui peut durer 2 à 3 mois selon l'espèce, les plantes sont transférées au champ ou en conditions naturelles. Dans la mesure où les plantes sont prêtes à passer dans un écosystème naturel, elles peuvent servir au reboisement des zones éco-géographiques ciblées.

Avantages et inconvénients de la multiplication végétative *in vitro*

Avantages

La micropropagation ou multiplication végétative par culture *in vitro* présente **plusieurs avantages** sur les méthodes conventionnelles de propagation que nous avons répertoriées sur la figure 4.

Tout d'abord, cette technique permet la production massive de copies conformes d'individus-élites en un délai court comparativement au cycle de développement des espèces ligneuses forestières. L'efficacité de la méthode réside dans l'augmentation à l'infini du nombre de plantes génétiquement identiques, copiées à partir d'un seul plant mère et qui sont des plants de qualité. Cette possibilité est offerte par le microbouturage *in vitro* (4.1). Elle a rendu possible le clonage, là où il n'existait pas. En effet, il est envisageable de multiplier *in vitro* des espèces récalcitrantes aux techniques horticoles classiques (bouturage, greffage, etc.) ou chez lesquelles les semences sont rares et/ou germent mal (4.2).

La production de copies non conformes par embryogenèse somatique permet d'appliquer des pressions de sélection dans le milieu de culture et de régénérer des

variants somaclonaux adaptés à des conditions de stress telles que la salinité ou la sécheresse (4.3).

La production massive de plants nécessite peu d'espace à cause de la miniaturisation du système et peut être programmée indépendamment des saisons puisque tous les paramètres physiques sont maîtrisables en module de culture (4.4).

La qualité phytosanitaire des plantes reproduites *in vitro* est généralement supérieure à celle des plantes obtenues à partir de techniques traditionnelles pour plusieurs raisons (4.5) :

- des exemplaires conformes aux individus-élites soigneusement choisis sont uniquement reproduits,
- tout vitroplant contaminé est automatiquement éliminé car des sélections successives sont opérées au cours de la production *in vitro*.
- la culture en milieu aseptique fournit des individus vigoureux et plus résistants aux infections diverses et aux conditions climatiques défavorables,
- le clone introduit est automatiquement assaini *i. e.* débarrassé des viroses et des bactérioses si la culture est initiée à partir de méristèmes.

Le coût de revient des plantes micropropagées est faible pour diverses raisons (4.6) :

- le grand nombre de plantes produites par rapport à l'unité de surface et au coût des matières premières utilisées, par exemple le milieu de culture, amortit le prix de revient,
- l'application de la technique ne nécessite pas une main-d'œuvre spécialisée et coûteuse. En effet, l'apprentissage et l'assimilation de la technique de bouturage *in vitro* peut se faire en quelques jours de formation.

Si l'on produit des embryons somatiques, il est possible de les conserver sous forme de semences artificielles réutilisables à la demande (4.7).

L'autre avantage indirect est que l'on peut conserver du matériel génétique *in vitro* sur un espace réduit plutôt qu'en serre (4.8). Ex. banques d'espèces ou de variétés en voie d'extinction conservées pendant plusieurs années (Boxus *et al.*, 1995).

Inconvénients

L'utilisation de ces techniques pour la production massive de plants présente aussi des inconvénients que nous avons résumés sur la figure 5.

Au niveau phytosanitaire, on connaît les risques de monoclonie (5.1) si la production massive de plants est initiée à partir d'un seul clone. En effet, les copies conformes ayant le même pool génétique peuvent être rapidement attaquées et la production décimée en un temps record lorsque les plants sont transférés en conditions naturelles (ex. : attaques foudroyantes de *Marsonina brunea* sur certains clones de Peuplier). C'est pourquoi les généticiens forestiers préconisent l'emploi et l'introduction d'un grand nombre de clones dans les cas de multiplication végétative conforme (Boxus *et al.*, 1995). Aussi, la notion de variété multiclonale a-t-elle été introduite.

Dans ces conditions, eu égard au danger que représente la monoclonie, il est impératif pour les essences forestières de pratiquer une **multiplication polyclonale *in vitro*** (5.2). Cela permet de conserver une certaine variabilité dans les plantations et de prévenir une perte importante de plants en cas d'épidémie.

La plupart des individus-élites forestiers sont des sujets âgés qui ne possèdent pratiquement plus de parties juvéniles ou qui ne donnent pas de rejets de souches. Dès lors, il est obligatoire de procéder au rajeunissement *in vitro* de l'espèce (5.3). La rejuvenilisation peut durer quelque temps, ce qui rallonge le délai d'obtention des vitroplants.

La phase d'acclimatation est l'un des facteurs limitants de la culture *in vitro*. Au cours de cette étape de sevrage en serre, le taux de mortalité des plantes issues de conditions *in vitro* peut être élevé, de l'ordre de 10 à 30 % ce qui représente une perte notable et non négligeable. Sauf si l'on dispose d'une serre adéquate où tous les paramètres physiques sont parfaitement contrôlés et que l'on ait une capacité de gestion pour une production à grande échelle (5.4).

La production de plants par embryogenèse somatique induit inmanquablement une variation somaclonale (5.5) à cause de l'emploi de régulateur de croissance mutagène. Le nombre de variants somaclonaux ne doit guère dépasser 2 à 5 % de la production si l'on maîtrise le procédé. Autrement, l'utilisation de cette technique devient coûteuse et inintéressante pour une production en masse. De plus, le risque d'instabilité génétique des plantes (5.6) peut être masqué si les anomalies génétiques ne s'expriment qu'au stade adulte. Ainsi, chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), du fait de la floraison tardive de l'espèce (18 mois à 2 ans après transfert au champ), les anomalies du système de reproduction n'ont pu être décelées que tardivement (Corley *et al.*, 1986 ; Duval *et al.*, 1988). Les anomalies ont conduit à la formation de fruits anormaux ou à la stérilité partielle ou complète des arbres.

Conclusion

Tous ces procédés de multiplication ont été développés pour les essences forestières du type Casuarina, Palmier à huile, Palmier-dattier, Hévée, *Maurea crassifolia*, etc., les espèces ornementales arborescentes et arbustives (*Ficus sp.*). La méthode de prolifération par bourgeonnement axillaire est la plus généralisée comparativement au bourgeonnement adventif et à l'embryogenèse somatique.

La supériorité du clonage sur la voie sexuée réside dans le fait de multiplier des individus sans modifier en quoi que ce soit les caractéristiques génétiques de la tête de clone originelle. Cette production de masse concerne aussi les porte-greffes (ex. *Citrus*).

Les sujets élités de certaines essences forestières sont aussi multipliés de cette manière quand les problèmes de rajeunissement sont surmontés (ex. *Zizyphus* Tourn. ex L.). De plus, l'acquisition de la vigueur et le retard d'entrée en production de certaines espèces multipliées *in vitro*, conséquence de la juvénalisation, sont des caractères intéressants à exploiter pour la multiplication en pépinière et pour la biomasse des essences forestières. Dans le cas particulier de *Eucalyptus*, des sujets élités multipliés *in vitro* ont présenté une grande uniformité et un taux de croissance 3 fois supérieur à celui des plants issus de semis (Gupta & Mascarhenas, 1987).

Le rajeunissement *in vitro* a eu aussi pour effet une plus grande facilité d'enracinement pour des sujets difficiles à multiplier en pépinière. Par ailleurs, l'hétérozygotie dominante chez les espèces ligneuses rend la manipulation sexuée hasardeuse et longue. Aussi, les régénérations de clones à partir de cals constituent des voies de recherche de variants possédant des qualités intéressantes comme l'adaptation à des conditions de stress telle que la sécheresse (Walali Loudyi, 1993).

En juin 1989, un symposium organisé conjointement par la C.E.E. et la FAO au Luxembourg, soulignait l'indispensable nécessité des pays en voie de développement de disposer au plus tôt de technologies de micropropagation nécessaires au développement de leur agriculture et de leur programme de reboisement (Boxus, 1995).

Le schéma d'intégration et récapitulatif des techniques de clonage *in vitro* dans un programme d'amélioration génétique des arbres forestiers (Cheliak & Rogers, 1990) montre que les vitrométhodes peuvent être appliquées à quatre niveaux différents au cours de cette procédure (figure 6).

Toutefois, il est nécessaire de mettre des gardes fous au cours d'une multiplication *in vitro* intensive. En effet, il est préférable de limiter le nombre de multiplication pour ne pas affaiblir la vigueur des plants. Il faut renouveler à intervalles réguliers le nombre de souches d'origine. Il est également impératif de contrôler régulièrement les plants après acclimatation pour limiter et éliminer les variations somaclonales indésirables.

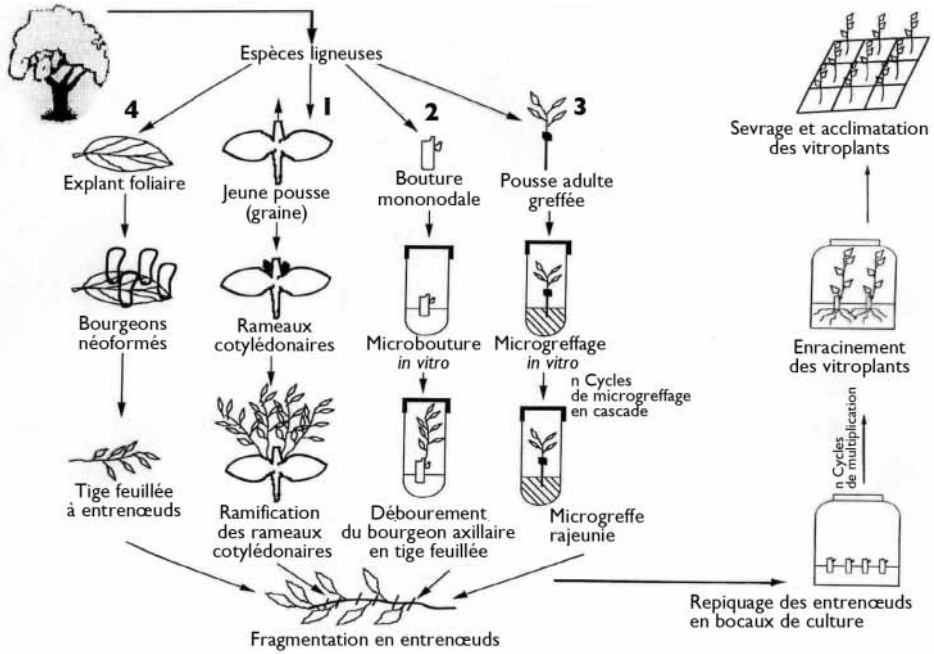


Figure 1.

Principales étapes de la multiplication végétative in vitro appliquées aux essences forestières ligneuses

– Multiplication par bourgeonnement axillaire

Voie 1 :

explant juvénile constitué par une bouture monodale renfermant un méristème en attente

Voie 2 :

explant juvénile constitué par des bourgeons cotylédonaire issus d'une germination de graine

Voie 3 :

explant constitué d'apex prélevé sur arbre mature et rejuvenilisé par microgreffage en cascade in vitro.

– Multiplication par bourgeonnement adventif : organogenèse directe

Voie 4 :

explant constitué par un fragment d'organe quelconque (exemple : un explant foliaire)

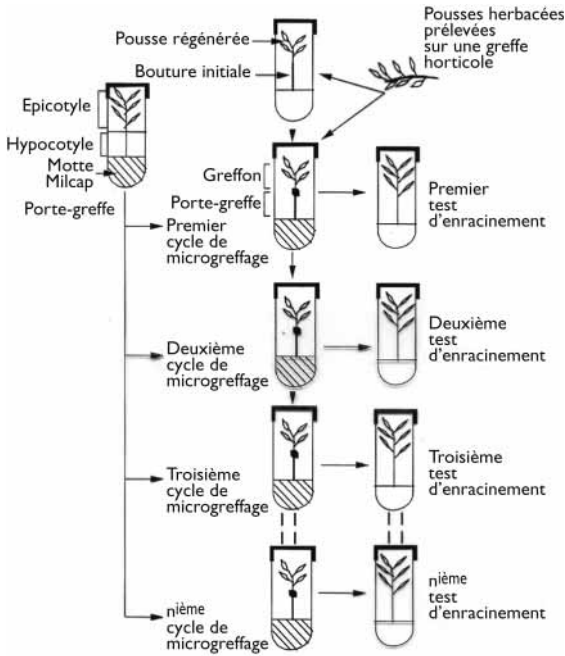


Figure 2.

Schéma de la technique de rajeunissement ou de juvenilisation d'explants âgés par microgreffage en cascade in vitro (d'après Murashige et al)

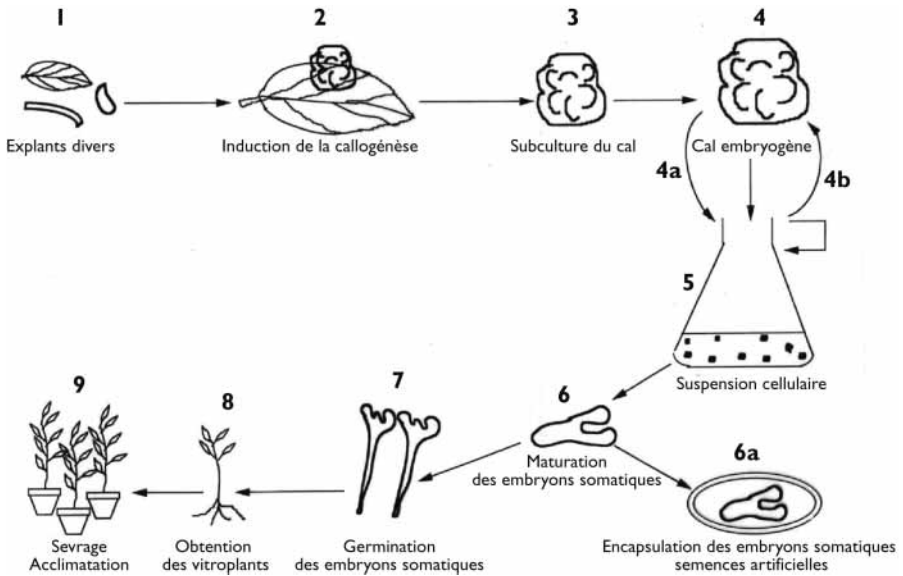


Figure 3.

Multiplication végétative in vitro par organogénèse indirecte : embryogénèse somatique

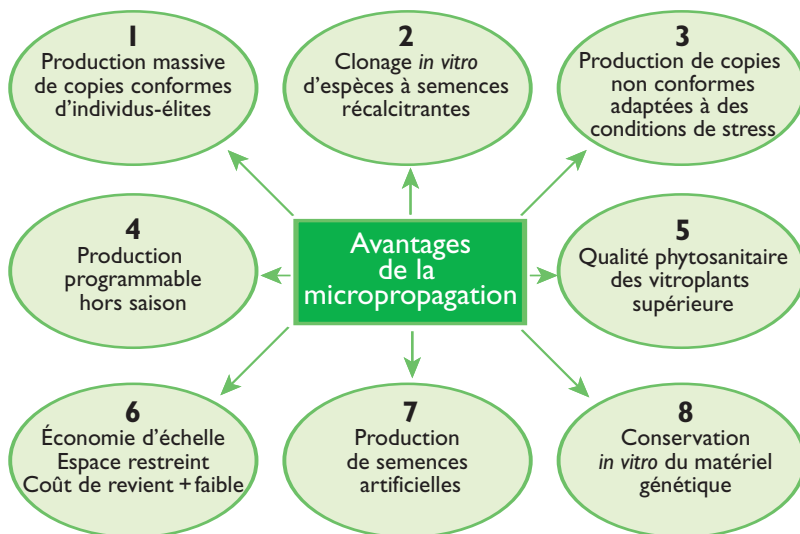


Figure 4.
Principaux avantages de la multiplication végétative *in vitro*

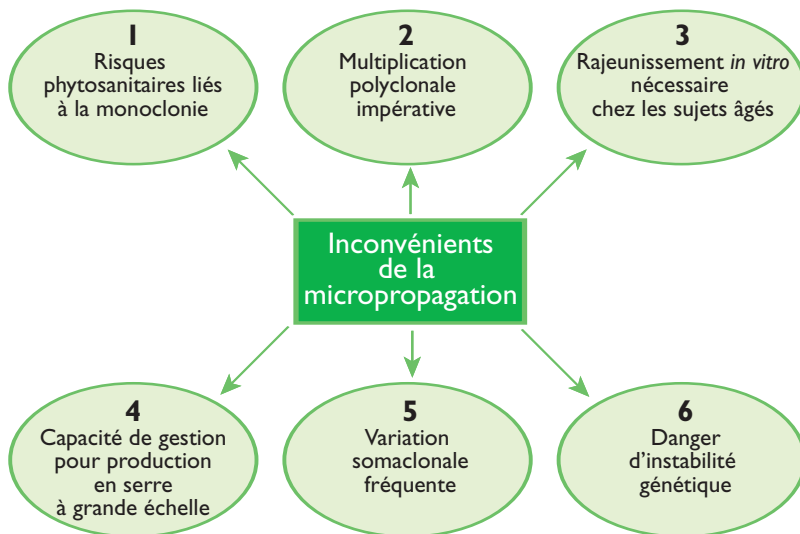


Figure 5.
Principaux inconvénients de la multiplication végétative *in vitro*

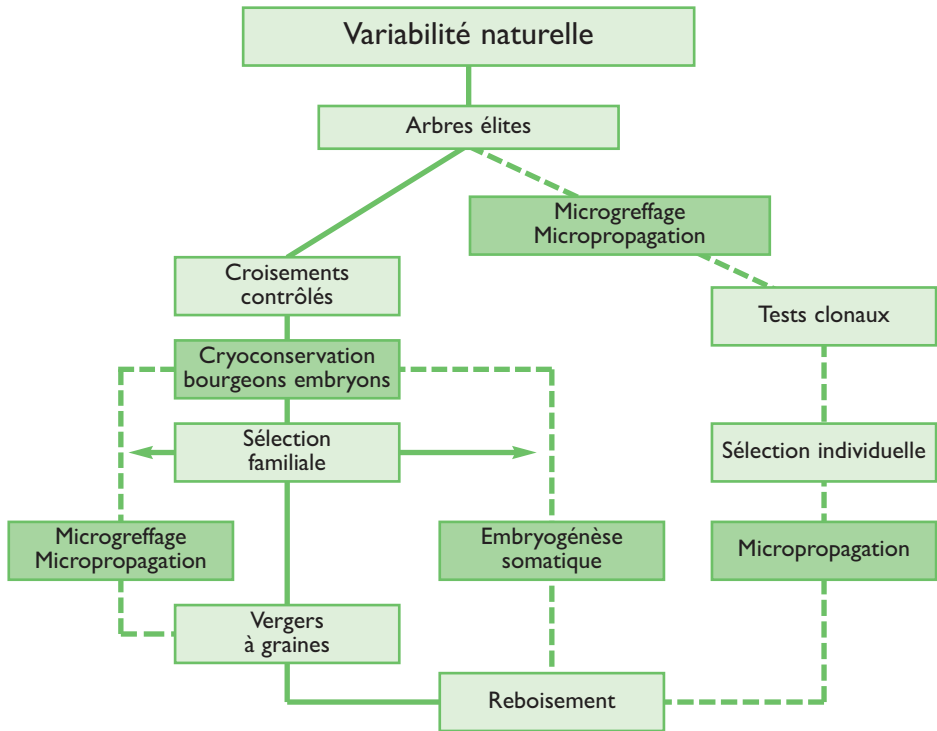


Figure 6.

Schéma d'intégration des techniques de clonages in vitro dans un programme d'amélioration génétique des arbres (d'après Cheliak & Rogers, 1990)

Références

- Borgel A., Brizard J.P., Aberlenc F., Huet C. and Hamon S. (1993) - Obtention de cals embryogènes et d'embryons somatiques d'acacias sahéliens : études histologiques comparées avec l'embryogénèse zygotique. "L'embryogénèse somatique : approches cellulaires et moléculaires". XIIème colloque de la section française de l'IAPTC, Montpellier, France : p 48.
- Borgel A., Sané D., Kparé Y., Diouf M. et Chevalier M.H. (1998) – Culture *in vitro* d'acacias sahéliens : aspects du microbouturage et de l'embryogénèse somatique. In : L'Acacia au Sénégal. Colloques & Séminaires de l' ORSTOM (eds.), Actes de la réunion thématique sur l'Acacia au Sénégal, 3-5 décembre 1996, Dakar, Sénégal : 157-272.
- Boxus P. (1995) – Introduction à la multiplication végétative : Micropropagation et Embryogénèse somatique. In : Biotechnologies végétales. Demarly Y. & E. Picard (eds.). UNISAT, CNED/AUPELF-UREF, BV 93, Fascicule U : p.11.
- Boxus P., Jemmali A. et Piéron S. (1995) – Multiplication végétative : La Micropropagation. Chapitre X. Stade II : Multiplication par organogénèse ou néoformation de bourgeons. In : Biotechnologies végétales. Demarly Y. & E. Picard (eds.). UNISA T, CNED/AUPELF-UREF. BV 93. Fascicule U : 63-78

- Brainerd K.E., Fuchigami L.H., Kwiatkowski S. and Clark C.S. (1981) – Leaf anatomy and water stress of aseptically cultured “Pixy” plum grown under different conditions. *Hort. Science* 16 : 173-175.
- Brochard P. (1991) – Use of artificial substrates for *in vitro* propagation. In : Biotechnology in agriculture and forestry. Vol. 17. High-tech and micropropagation I. Bajaj Y.P.S. (ed.), Springer-Verlag, Berlin : 270-284.
- Capellades M., Fontarnau R., Carulla C. and Debergh P. (1990) – Environment influences anatomy of stomata and epidermal cells in tissue-cultured of *Rosa multiflora*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115 : 141-145.
- Carreto L.G. (1992) – Manipulation des plantes en serre. In : Fondements théoriques et pratiques de la culture des tissus végétaux. Etude FAO, Production végétale et protection des plantes. Rosell C.H. & V.H. Villalobos (eds.), 105. : 121-126
- Cheliak W. M. and Rogers D.L. (1990) – Integrating biotechnology into tree improvement programs. *Can J. For. Res.* 20 : 452-463.
- Corley R.H.V., Lee C.H., Law L.H. and Jones L.H. (1986) – Abnormal flower development in oil palm clones. *Oil Palm News* 22 : 2-8.
- DanThu P., Hane B., Touré M., Sagna P., Bâ S., De Troyer M.A. et Solviev P. (2000) – Microgreffage de quatre espèces ligneuses sahéliennes (*Acacia senegal*, *Faidherbia albida*, *Tamarindus indica* et *Zizyphus mauritiana*) en vue de leur rajeunissement. *Tropicultura* (soumis).
- Deberg P.C. and Maene L.J. (1981) – A scheme for commercial propagation of ornamental plants by tissue culture. *Sci. Hortic.* 14 : 335-345.
- Detrez C. (1994) – Shoot production through cutting culture and micrografting from mature tree explants in *Acacia tortilis* (Forsk.) Hayne subsp. *raddiana* (Savi.) Brenan. *Agroforest. Svst.* 25 : 171-179.
- Derreudre J., Scottez C., Arnaud Y. and Duron M. (1990) – Effects of cold hardening on cryopreservation of axillary pear (*Pyrus communis* L. CV Beurre Hardy) shoot tips of *in vitro* plantlets. *Biotechnologies* 310 : 265-272.
- Diallo N. et Duhoux E. (1984) – Organogénèse et multiplication *in vitro* chez l'*Eucalyptus camaldulensis*. *J. Plant Physiol.* 115 : 177-182.
- Duhoux E. (1988) – Organogénèse et multiplication végétative chez les arbres. chapitre V. In : Cultures de cellules, tissus et organes végétaux. Fondements théoriques et pratiques. Zryd J.P. (ed.). Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse : 59-66.
- Duhoux E. et Davis D. (1985) – Caulogénèse à partir des bourgeons cotylédonaire d '*Acacia albida* et influence du saccharose sur la rhizogénèse. *J. Plant Physiol.* 121 : 175-180.
- Duhoux E., Sougoufara B. and Dommergues Y. (1986) – Propagation of *Casuarina equisetifolia* through axillary buds of immature female inflorescences cultured *in vitro*. *Plant Cell Rep.* 3 : 161-164.
- Duhoux E., Franche C. and Galiana A. (1995) – Amélioration des arbres fixateurs d'azote par les Biotechnologies végétales. Chapitre II. In : Biotechnologies végétales. Intégration chez les plantes tropicales 1. Demarly Y. & E. Picard (eds.). UNISA, CNED/AUPELF-UREF, BV 9C. Fascicule U : 27-44.
- Durand-Gasselín T., Le Guen V., Konan K. and Duval Y. (1991) – Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations in Côte d'Ivoire obtained through *in vitro* culture. First results. *Oléagineux* 45 : 1-11.
- Duval Y., Durand-Gasselín T., Konan K. et Pannetier C. (1988) – Multiplication végétative du palmier à huile par culture *in vitro*. Stratégies et résultats. *Oléagineux* 43 (2) : 39-44.
- Engelmann F., Duval Y. and Derreudre J. (1984) – First successful cryopreservation of oil palm somatic embryos. *Proc. 41st Conf. Plant tissue cult. and Agric. appl.*, Nottingham, U.K : p. 96.

- Engelmann F., Duval Y. and Derreudre j. (1985) – Survie et prolifération d’embryons somatiques de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) après congélation dans l’azote liquide. *C. R. Ac. Sci. Paris* 301, *série III* : 111-116.
- Francklet A. (1979) – Rajeunissement des arbres adultes en vue de leur propagation végétative. *In* : Micropropagation des arbres forestiers. *Annales Afocel, Etudes et Recherches* : 2-18.
- Francklet A. (1981) – Rajeunissement et micropropagation des ligneux. *In* : Colloque international sur la culture *in vitro* des essences forestières. *IUFRO, Afocel* : 55-65.
- Gaspar T. (1988) – Multiplication végétative des plantes supérieures par culture *in vitro*. Chapitre III. *In* : Cultures de cellules, tissus et organes végétaux. Fondements théoriques et pratiques. Zryd J.P. (ed.). Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse : 31-49.
- Galiana A., Tibok A. and Duhoux E. (1991a) – *In vitro* propagation of the nitrogen-fixing tree-legume *Acacia mangium* Willd. *Plant Soil* 135 : 151-159.
- Gianinazzi S., Gianinazzi.Pearson V. and Trouvelot A. (1989) – Potentialities and procedures for the use of endomycorrhizas with special emphasis and high values crops. *In* : Biotechnology of fungi for improving plant growth. Whipps J.M. & R.D. Lurndsen (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom : 41-45.
- Grout B. W.W. and Aston M. J. (1977a) – Transplanting of cauliflower plants regenerated from meristem culture. I : Water loss and water transfer related to changes in leaf wax and to xylem regeneration. *Hort. Res.* 17 : 1- 7.
- Grout B.W.W. and Aston M.J. (1977b) - Transplanting of cauliflower plants regenerated from meristem culture. II : Carbon dioxide fixation and the development of photosynthetic ability. *Hort. Res.* 17 : 65-71.
- Gupta P.K. and Mascarhenas A.F. (1987) – Cell and Tissue culture in Forestry. *In* : Bonga J.M.& Durzan D.J. (eds.). Dordrecht, The Netherlands Martinus Nijhoff : 385-399.
- Huang L.C., Hsiao C.K., Lee S.H., Huang B.L. and Murashige T. (1992a) – Restoration of vigor and rooting competence in stem tissues of mature *Citrus* by repeated of their shoot apices onto freshly germinated seedlings *in vitro*. *In vitro Cell. Dev. Biot.* 28 : 30- 32.
- Huang L.C., Liu S., Huang B.L., Murashige T., Mahdi E.F.M. and Van Gundy R. (1992b) – Rejuvenation of *Sequoia sempervirens* by repeated grafting of shoot tips onto juvenile rootstocks *in vitro*. *Plant Physiol.* 98 : 166-173.
- Kitto S.L. and Janick J. (1985) – Production of synthetic seeds by encapsulating asexual embryos of carrot. *J. Amer. Soc. hortic. Sci* 110 : 283.
- Litz R.E. (1984b) – *In vitro* somatic embryogenesis from nucellar callus of monoembryonic mango. *Hortscience* 19 : 715-717.
- Monnier M. (1995) – Embryogenèse zygotique et somatique. Chapitre X. *In* : Cultures de cellules, tissus et organes végétaux. Fondements théoriques et pratiques. Zryd J.P. (ed.). Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse: 119-126.
- Monteuuis O. (1989) – Méristèmes, vieillissement et clonage d’arbres forestiers. *Ann. Rech. Sylvicoles.* 1988 -AFOCEL : 7-53.
- Monteuuis O. and Bon M.C. (1989) – Rejuvenation of a 100 year old sequoia (*Sequoia giganteum* Bucholz) through *in vitro* meristem culture. *Annales Sci. For. Suppl.* 46 : 1835- 1865.
- Mc Comb J.A. and Newton S. (1981) – Propagation of kangaroo paws using tissue culture. *J. Bort. Sci.* 56 : 181-183.
- Mc Cown B. and Lloyd G. (1981) – Woody plant medium (WPM), a mineral formulation for microculture of woody plant species. *Hortscience* 16 : 453.
- Murashige T. (1974) – Plant propagation through tissue culture. *Ann. Rev. Plant. Physiol.* 25 : 135-166.
- Murashige T. (1978) - The impact of tissue culture in agriculture. *In* : Frontiers of plant tissue culture. Thorpe T.A. (ed.). Calgary Univ. Press, Calgary, Alberta, Canada : 15-26.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Murashige T. and Skoog F. (1962) – A revised medium for a rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15 : 473-497.
- Murashige T., Bitters W.P., Rangan T.S., Nauer E.M., Roistacher C.N. and Holliday P.B. (1972) – A technique of shoot apex grafting and its utilization towards recovering virus-free *Citrus* clones. *Hortscience* 7 : 118-119.
- Navarro L., Roistacher C.N. and Murashige T. (1975) – Improvement of shoot-tip grafting *in vitro* for virus free *Citrus*. *Soc. Hort. Sci.* 100 : 471-479.
- Paques M. et Bercetche J. (1995) – L'embryogenèse somatique chez les conifères : limites et perspectives. IIème partie. *In* : multiplication végétative : Micropropagation et Embryogenèse somatique. *In* : Biotechnologies végétales. Demarly Y. & E. Picard (eds.). UNISAT, CNED/AUPELF-UREF, BV 93, Fascicule U : 117-181.
- Pence V.C., Hasewa P.M. and Janick J. (1980) – Initiation and development of asexual embryos of *Theobroma cacao* *in vitro*. *Z. Pflanzenphysiol.* 98 : 1-14.
- Pétiard V., Ducos J.P., Florin B., Lecouteux C., Tessereau H. and Zamarripa A. (1993) – *In* : Proceedings of the 4th international Workshop on seeds : basic and applied aspects of seed biology, Côte D. & Corbineau F. (eds.), 20-24 July 1992 : 175-191.
- Rabéchault H. and Martin J.P. (1976) – Vegetative propagation of oil palm (*Elaeis guineensis*) by means of leaf tissue culture. *Compte Rend. Acad. Sci., Paris* 283 D : 1735- 1737.
- Smith D.R., Morgan K. and Aitken J. (1980) – Micropropagation. A new aid in tree improvement? What's new in forest research. *Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand*, 87 : 4 p.
- Sané D. (1998) – Etude des facteurs physiologiques et cytogénétiques de l'embryogenèse somatique chez *Acacia nilotica* (L.) subsp. *tomentosa* Brenan, *Acacia nilotica* (L.) subsp. *adstringens* Brenan et *A. tortilis* subsp. *raddiana* (Savi.) Brenan. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Université cheikh Anta Diop, FST/BV, Dakar : 150 p.
- Sané D., Borgel A., Verden J. L. et Gassama-Dia Y. K. (2000) – Régénération de vitroplants par embryogenèse somatique à partir d'embryons zygotiques immatures chez une espèce adaptée à la sécheresse : *Acacia tortilis* subsp. *raddiana* (Savi.) Brenan. *Acta Bot. Gallica* 147 (3) : 257-266.
- Sondahl M.R., Nakamura T., Medina-Filho H.P., Carvalho A., Fazuoli L.C. and Costa W.M. (1984) – Coffee. Chapter 21. *In* : Ammirato *et al.* (eds.) : 564-590.
- Sy A. (1990) – Microbouturage *in vitro* de l'anacardier (*Anacardium occidentale* L.). Mémoire de 3ème année, option Biologie-Physiologie ENITEF/ Station des cultures fruitières & maraîchères de Gembloux, Belgique : 63 p.
- Sy M.O., Martinelli L. and Scienza A. (1991) – *In vitro* Organogenesis and regeneration in Cashew (*Anacardium occidentale* L.). *Acta Horticulturae* 289 : 267-268.
- Takakori F.H., Murashige T. and Stillman J.I. (1968) – Vegetative propagation of *Asparagus* through tissue culture. *Bort. Science* 3: 20-22.
- Tisserat B., Foster G. and De Masson D. (1979) – Plantlet production *in vitro* from *Phoenix dactylifera* L. *Date Growers' Inst. Repo* 54 : 19-23.
- Touré M.A. (2001) – Rajeunissement et micropropagation de *Zizyphus mauritiana* var. Gola par microbouturage et microgreffage *in vitro*. Mémoire de DEA, UCAD/FST/BV : 60 p.
- Verdeil J.L., Huet C., Grosdemange F., Rival A. and Buffard-Morel J. (1992) – Somatic embryogenesis in coconut (*Cocos nucifera* L.) : obtention of several ramet clones. *Oléagineux* 47 (7) : 465-469.
- Verdeil J.L., Huet C., Grosdemange F. and Buffard-Morel J. (1994) – Plant regeneration from cultured immature inflorescences of coconut (*Cocos nucifera* L.) : evidence for somatic embryogenesis. *Plant Cell Reports* 13 : 218-221.
- Walali Loudyi, (1993) – 3 Journées Scientifiques du réseau Biotechnologies végétales ; Rabat (Maroc), 14-18.
- Wetzstein HY & Sommer HE. (1982) – Leaf anatomy of tissue cultured *liquidambar styraciflua* (*hamamelidaceae*) during acclimatization. *Am. J Bot* 69(10) : 1579-1586.
- Wetzstein HY & Sommer HE. (1983) – Scanning electron microscopy of *in vitro*-cultured *liquidambar styraciflua* plantlets during acclimatization. *J Am Soc Hortic Sci* 108(3): 475-480.

La régénération naturelle assistée (RNA) : une opportunité pour reverdir le Sahel et réduire la vulnérabilité des populations rurales

EDWIGE BOTONI

Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS)
(edwige.botoni@cilss.bf, www.cilss)

MAHAMANE LARWANOU

ICRAF Forum Forestier Africain (AFF) (Kenyan /Nairobi)

CHRIS REIJ

6 Université Libre d'Amsterdam

Résumé

La régénération naturelle assistée (RNA) est une pratique agroforestière qui, par la suite s'est étendue à la foresterie. Elle est peu onéreuse et les effets potentiels sur l'amélioration de l'environnement et des conditions de vie des populations rurales ont été largement documentés et établis dans certains pays comme le Niger.

Dans ce pays, le processus a commencé dans certaines régions au milieu des années 1980 et est à l'origine du reverdissement dont l'échelle est évaluée à au moins cinq (5) millions d'hectares et en particulier dans des régions ayant de fortes densités de population où les paysans ont presque littéralement « construit » de nouveaux parcs agroforestiers avec des densités, qui varient de 20 à 80 arbres/ha. Ce phénomène de reverdissement spectaculaire relevé par l'Etude Sahel¹(2006) et d'autres publications était jusque-là passé complètement inaperçu.

La régénération des arbres sur les champs produit des impacts socio-économiques et biophysiques, mais est aussi un moyen d'adaptation aux changements climatiques. En investissant dans les arbres sur leurs champs, les paysans des régions de Zinder et de Maradi au Niger ont créé des systèmes de production plus complexes, plus productifs et plus durables, qui contribuent à une réduction de la pauvreté rurale, réduisent la vulnérabilité aux années de sécheresse et augmentent la biodiversité. En raison de son potentiel de reconstitution rapide d'un couvert arboré et arbustif à peu de frais, ce type de cas de succès pourrait être une bonne option pour la mise en œuvre du programme Grande Muraille Verte au Sahara et au Sahel (GMVSS).

1- Etude Sahel : Etude régionale de capitalisation initiée en 2005 par le CILSS et ses partenaires.

Introduction

Les épisodes de sécheresse des années 1970 et 1980 et la forte pression sur les terres ont eu comme conséquence partout au Sahel une forte réduction du couvert végétal. Pour y faire face, de nombreuses techniques de lutte contre la désertification ont été testées au Sahel. Dans les choix politiques opérés par plusieurs pays, l'accent a été mis au cours de ces années sur des projets gigantesques de reboisement. Au moment du bilan, on évalue à plusieurs milliards de francs CFA qui ont été investis dans ces projets et programmes de reboisement avec des résultats souvent mitigés et en particulier dans les zones éco-climatiques difficiles telles que la bande d'intervention retenue pour la Grande Muraille Verte du Sahara et du Sahel (100 à 400 mm de pluie).

Au Niger des efforts considérables ont été réalisés depuis la fin des années 1980s pour réhabiliter des terres dégradées surtout en utilisant des techniques simples de collecte des eaux de ruissellement (zaï, cordons pierreux, demi-lunes, tranchées, banquettes). Ainsi environ 250 000 ha de terres fortement dégradées ont été réhabilitées. Les paysans ont également protégé les jeunes arbres dans leurs champs. Cette technique connue sous le nom de Régénération Naturelle Assistée (RNA) a commencé dans la région de Maradi (Niger) au milieu des années 1980, et s'est propagée à d'autres régions du Niger. Elle s'est même exportée vers les pays sahéliens voisins (Burkina Faso, Tchad, Sénégal, Mali) et dans d'autres régions d'Afrique, le Kenya et l'Éthiopie.

La présente communication a pour objectif de partager avec les pairs cette technique de Gestion des Ressources Naturelles, identifiée comme très prometteuse, et qui pourrait être promue dans la bande géographique d'intervention de la grande muraille verte du Sahara et du Sahel (GMVSS). Elle décrit la technique avant de s'appesantir sur les multiples avantages et les conditions de sa démultiplication à une grande échelle.

Qu'est-ce que la régénération naturelle assistée ?

La Régénération Naturelle Assistée (RNA) est une technique d'agroforesterie qui consiste à protéger et gérer les repousses naturelles (pousses) que produisent les souches d'arbres et arbustes dans les champs. Des ensemencements par semis directs peuvent également être opérés pour permettre d'enrichir la biodiversité. Cette option d'enrichissement par semis directs en espèces d'intérêt a été introduite plus tard dans les forêts sèches en aménagement pour le ravitaillement des villes en bois de feu. Cette pratique est utilisée depuis les années 1980 pour accélérer la

réhabilitation ou favoriser la recolonisation d'espèces d'intérêt ou leur enrichissement dans les parcelles exploitées dans les forêts aménagées pour la production du bois ou les champs.

Le principe et fondement de la RNA

Les différentes étapes de la réalisation de la RNA à partir de souches existantes sont (Larwanou et Tougiani, 2008) :

- Repérage et sélection des rejets à protéger ;
- Coupe des rejets non sélectionnés ;
- Entretien et élagage des rejets sélectionnés chaque année ;
- Exploitation raisonnée des branches issues des arbres régénérés en fonction des espèces et des besoins (fourrages, bois, matière organique, etc.).

La gestion des repousses consiste à éliminer les branches latérales pour ne conserver que quelques tiges principales, ce qui permet une meilleure allocation des éléments nutritifs. Les tiges épargnées peuvent ainsi poursuivre leur croissance et avoir une bonne conformation.

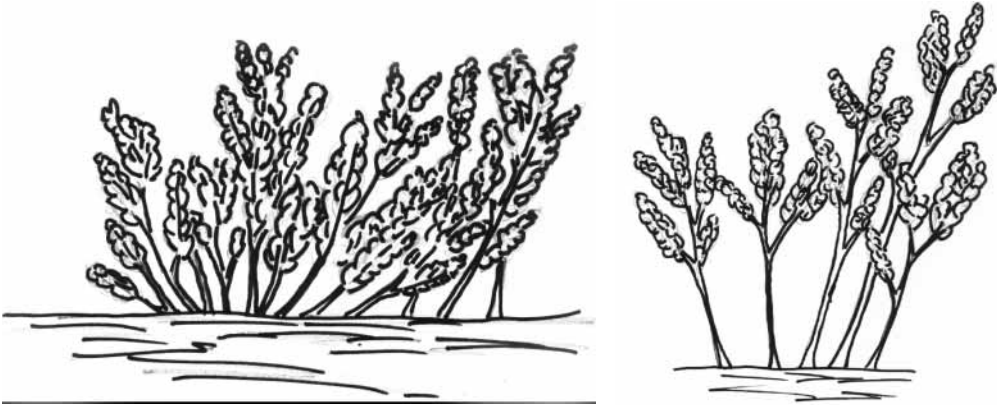


Figure 1.

Technique de la RNA schématisée (source www.echotech.org)

Dès la quatrième ou cinquième année, les tiges qui ont été épargnées atteignent une taille imposante pour fournir des biens et services environnementaux : fourrage, bois de chauffe, litière, habitat pour des animaux sauvages et protection contre le vent et le soleil etc.

Une technologie qui valorise les essences locales

Les espèces protégées proviennent essentiellement du stock d'arbres existant et des semences qui se trouvent dans le sol. Il s'agit le plus souvent d'espèces locales qui présentent le double avantage d'être écologiquement adaptées aux milieux. Il s'agit principalement de *Faidherbia albida*, *Piliostigma reticulatum*, *Sclerocarya birrea*, *Guiera senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*, *Andansonia digitata* etc.

Le choix porté sur ces espèces s'explique par les bénéfices que les populations en tirent : alimentation humaine et animale (fruit, feuilles, fleurs), pharmacopée, fourniture du bois (service, œuvre, feux) ou leur rôle fertilisant

Une technologie qui permet de contourner les interdits fonciers

Dans de nombreuses sociétés africaines, des terres sont prêtées moyennant quelques cadeaux symboliques à la fin de la récolte. Toutefois dans ce type de transaction foncière, planter un arbre sur une terre prêtée est très vite interprétée par le propriétaire comme une velléité d'appropriation et peut être à l'origine d'un retrait de la parcelle.

Un paysan dans la région de Ouahigouya a expliqué qu'il a pu ainsi se déjouer de la méfiance du propriétaire, en jetant les graines de baobab sur une terre qui lui avait été prêtée. Aujourd'hui sa parcelle est devenue une vraie forêt de baobab (photo-ci dessous) qui lui procure des revenus substantiels de la vente de feuilles sur environ 3 mois de l'année.



Photo 1.

Un parc agroforestier à baobab dans la région de Ouajigouya (installé à partir de semis direct)

Une technologie à la portée de tous les paysans

La plupart des projets de reboisement classiques sont très peu appropriés par les populations parce qu'ils sont coûteux et leur mise en œuvre assez contraignante car demandant une certaine technicité pour conduire des pépinières. Selon la FAO (2000), le coût moyen d'un reboisement industriel classique à partir de cette technique varie entre 380 000 FCFA et 450 000 FCFA par hectare.

À la différence, la RNA est peu exigeante en termes d'investissement monétaire au départ (cf coûts d'implantation dans le tableau 1). Dans la pratique, chaque paysan peut adapter ce système d'agroforesterie à ses besoins et à sa situation. Il suffit pour conduire la RNA d'avoir des souches d'arbres vivants dans les champs.

La structure des coûts comprend le petit matériel à acheter (coupe-coupe ; râteau ; peinture), la main-d'œuvre (2 H/j), et l'encadrement.

Tableau 1 :
Coût des investissements en fonction de la variante de RNA
Source : (Larwanou et Tougiani, 2008)

Variantes de RNA	Coût (frs CFA/ha)
Défrichement amélioré	11 000
Repérage et entretien de la régénération naturelle	3 500
Conduite de la régénération naturelle	7 500

Potentiel du reverdissement du Sahel à partir de la RNA : exemple du Niger

Dans les régions de Maradi et Zinder la majorité des champs avaient peu d'arbres dans les années 1970 et début des années 1980. Une vingtaine d'années plus tard plusieurs études indiquent une augmentation du nombre d'arbres sur les champs dans ces régions (Joet, *et al.*, 1998, Luxereau et Roussel, 1998, Mortimore *et al.* 2001, Larwanou et Saadou, 2006)

La surface couverte par cette RNA a été évaluée à au moins 5 millions d'ha en 20 ans soit une moyenne de 250 000 ha plantés/an (Toudou *et al.*, 2006) avec une densité variant 20 à 80 pieds/hectare.

En prenant l'exemple sur une densité moyenne de 40 arbres/arbustes à l'hectare, on évalue à 200 millions l'effectif de nouveaux arbres sur ce pas de temps de 20 ans. L'effort du gouvernement du Niger en termes de reboisement classique est évalué à environ 60 millions d'arbres plantés avec un taux de survie qui atteint très rarement 70 % (CNEDD, 2003).

Ailleurs au Sahel les mêmes processus ont eu lieu, mais à des échelles plus modestes qu'au Niger. C'est le cas par exemple dans la partie Nord du Plateau Central au Burkina où une comparaison de photos aériennes et d'images satellitaires de quelques villages entre 1968 et 2003, montre une augmentation du nombre d'arbres sur les champs à partir du milieu des années 1980 (Reij *et al.*, 2005). Dans cette région aux sols latéritiques, cette augmentation semble surtout liée à l'introduction à bonne échelle des techniques de collecte des eaux de ruissellement (zaï et cordons de pierre sur courbes de niveau).



Photo 2.
un exemple d'un parc agroforestier dans la région de Zinder (Niger)
*dominé par de jeunes *Faidherbia albida* (Chris Reij, juin 2006)*



Photo 3.
RNA sur les plaines entre le Plateau Dogon et la frontière avec le Burkina
(Chris Reij, février 2007)

Quels sont les avantages et bénéfices de la RNA ?

Les résultats de l'Etude Sahel au Niger (Toudou *et al*, 2006) ont montré que la pratique de la RNA pouvait procurer d'énormes avantages environnementaux, économiques et sociaux. Ces impacts varient en fonction des situations. Par exemple, les paysans dans la région de Maradi font souvent un effort pour diversifier les essences afin d'obtenir une diversité de produits et services. Dans la région de Zinder, par contre, les paysans ont souvent mis l'accent sur la protection de

Faidherbia albida, et ils ont créé ce qui ressemble une monoculture de cette espèce. Il est donc important de toujours avoir à l'esprit les contextes historique et agro-écologique dans lesquels les arbres sont préservés et les rôles que les différentes espèces jouent dans les systèmes de production.

Les impacts environnementaux de la RNA

Les campagnes de reboisement classiques ont longtemps mis l'accent sur des plantations mono-spécifiques avec des espèces exotiques à croissance rapide. La biodiversité perdue est ainsi rarement reconstituée.

La pratique montre également que la RNA entraîne souvent une amélioration de la biodiversité à partir des espèces locales adaptées aux conditions du milieu et qui avaient tendance à disparaître du fait de la pression de prélèvement exercés sur elles. Ceci est particulièrement vérifié dans le cas où des ensemencements c'est-à-dire des apports de graines sont opérés.

Par exemple, dans le village de Dan Saga et Aguié (région de Maradi) il y avait peu d'arbres et peu espèces dans les années 1980, mais à présent le village compte au moins 30 espèces d'arbres et les villageois sont en train de réintroduire des espèces qui avaient disparu dans les années 1970 et 1980 (Marou A Zarafi, 2002, Larwanou & Saadou, 2006). Bien que la RNA, améliore la biodiversité, ceci n'est pas toujours le cas. Dans quelques régions, le *Faidherbia albida* est l'espèce dominante car protégé avec priorité par les paysans pour améliorer la fertilité des sols et pour sa production de bonnes quantités de fourrage (des gousses et des feuilles).

Selon les enquêtes conduites par l'équipe de l'Etude Sahel en 2006 dans les régions de Maradi et Zinder (Niger), les paysans perçoivent une amélioration sensible du microclimat. Ils ont déclaré ne plus souffrir des effets néfastes des vents poussiéreux très forts comme cela était le cas il y a 20 ans. La présence d'arbres diminue la violence des vents de poussière et atténue les impacts négatifs des vents sur les cultures

Avant le développement de la RNA il fallait en effet souvent re-semer 4 ou 6 fois avant de réussir à cause de l'effet des vents forts chargés de sable.

Enfin la RNA, à travers le développement d'un arbre adulte, et partant de volume de bois et d'un système racinaire développé participe à la réalisation d'autres services environnementaux comme la séquestration du carbone.

Impacts agronomiques de la RNA

La présence des arbres protège contre le vent, atténue l'érosion, et l'évaporation et enrichit le sol à travers la décomposition de la litière mais également à partir des nutriments apportés par les animaux qui se réfugient à l'ombre des arbres.

Les systèmes de production deviennent ainsi plus complexes et plus productifs du fait d'une intégration « agriculture, foresterie et élevage ». La plus grande disponibilité de fourrage aérien autorise une gestion plus intensive du bétail. La quantité et la qualité de fumure augmentent conséquemment, ce qui permet d'améliorer la

fertilité des sols. La plus grande disponibilité du bois de chauffe épargne la bouse de vache jadis utilisée comme combustible par les paysans dans les départements de Magaria et de Matameye. Ainsi, les résidus de récolte et les bouses de vache utilisés comme combustibles pourront servir pour enrichir le sol et conséquemment rehausser le niveau de fertilité des sols.

Le paillage et les mulching effectués à partir des produits d'élagage et des brindilles permettent de réhabiliter la fertilité des glacis en favorisant le travail des termites qui ameublissent le sol, digèrent la matière organique et la retournent au sol sous forme d'éléments minéraux. Des centaines d'hectares de terres incultes ont été restaurés à travers cette méthode.

La RNA peut réduire aussi la dépendance aux pesticides. Le retour des prédateurs naturels d'insectes comme les oiseaux, les lézards et certains insectes (mante religieuse, guêpe, etc.) qui trouvent refuge et des habitats adéquats pour se reproduire, contribuent indirectement à l'amélioration des rendements des cultures en réduisant les populations de ravageurs.

Impacts sur la sécurité alimentaire et la réduction de la vulnérabilité des ménages

Les résultats de l'Etude Sahel Niger (Toudou *et al.*, 2006) montrent ainsi que les rendements sont meilleurs sur des champs bénéficiant de la présence des ligneux. La présence des arbres permet d'obtenir des rendements de mil variant de 100 à 370 kg/ha, pendant que les rendements sur les champs témoins sans arbres sont de l'ordre 50 à 270 kg/ha. La présence de l'arbre permet ainsi d'augmenter la production de 50 à 100 kg/ha.

Cette augmentation de la production totale se traduit dans une amélioration des revenus non-matérielles (auto-consommation) et/ou dans des revenus matériels. Une augmentation de la production agricole de 10 % se traduit en Afrique dans une réduction de la pauvreté rurale de 6 à 9 % (Irz, *et al.* 2001).

Beaucoup d'espèces régénérées (*Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus spp*, *Annona senegalensis*, *Sclerocarya birrea*, *Tamarindus indica*, etc.) offrent des fruits et feuilles couramment ou occasionnellement consommés par les populations. La RNA contribue ainsi à améliorer la nutrition humaine **par la diversification des sources et des qualités.**

La plupart des espèces ligneuses protégées (*Faidherbia albida*, *Prosopis africana* etc) produisent du fourrage aérien de qualité notamment les feuilles et les gousses qui sont utilisées dans l'alimentation animale. Les animaux souffrent ainsi moins de la pénurie alimentaire courante en saison sèche. La plus grande disponibilité de fourrage ligneux limite également les conflits.

La RNA permet ainsi de réduire la vulnérabilité des ménages pendant les périodes difficiles. Ainsi en 2005, alors que le Niger était durement confronté à une crise alimentaire, les paysans qui pratiquaient la RNA ont été moins durement frappés et ont enregistré des taux de mortalités infantile relativement plus faible grâce à la vente du bois et d'autres produits forestiers (Toudou *et al.*, 2006).

La RNA contribue à améliorer la qualité de la vie

On peut également affirmer que la qualité de la vie s'est grandement améliorée grâce à la RNA. Dans les zones où l'on pratique cette technique, la vitesse et la charge de poussière des vents sont substantiellement réduites. Avant l'introduction de la RNA, il était même difficile de trouver de l'ombre. Dans les zones où la RNA s'est développée, le paysage a beaucoup changé et la vie rurale beaucoup plus agréable.

En raison de la plus grande disponibilité de fourrage, les risques de conflit entre les bergers nomades et les paysans sédentaires ont été significativement réduits.

La RNA contribue à l'allégement des tâches des femmes. Le temps consacré à la collecte de bois a été sensiblement réduit grâce à la RNA. Elles en tirent également des revenus à partir de la vente du surplus de bois.

Evaluation de la rentabilité économique

La RNA contribue significativement à l'économie locale grâce à la vente du bois et autres produits forestiers non ligneux. Les revenus générés par la vente du bois deviennent de plus en plus importants avec l'âge de la RNA. Larwanou et Abass Tougiani (2008) estiment qu'en 5 ans de RNA, un paysan peut vendre plus de 100 000 FCFA de bois de chauffe et de service.

La rentabilité économique de la RNA a été calculée par l'équipe de chercheurs dans le cadre de l'Etude Sahel Niger (2006). Les résultats font ressortir une nette supériorité en termes de rentabilité économique de la RNA comparée à des reboisements classiques. Les plantations ne sont vraiment rentables que si l'accent est mis sur des espèces à haute valeur économique telle que la gommeriaie :

- RNA : 31 %
- Reboisement classique : 13 %
- Reboisement à partir de gommeriaie : 37 %

Une approche plus simpliste qui consiste à donner une valeur de 0,5 Euro/arbre donne une valeur monétaire de 5 millions d'euros de revenus générés par an sur la base d'une superficie de la RNA évaluée à 5 millions d'ha avec une densité moyenne de 40 pieds/an.

Les leviers de cette révolution verte et les clefs pour porter à l'échelle cette technique

La question que l'on se pose logiquement est la suivante « Qu'est-ce qui a incité les paysans au Niger à protéger et gérer les arbres dans leurs champs et comment faire en sorte que les cas de succès puissent être largement répandus à travers le Sahel ? » Quelques arguments et pistes de solutions sont proposés.

La crise écologique et économique des années 1970 et 1980

L'accroissement de la demande énergétique due à la forte croissance démographique, la surexploitation des ressources naturelles pour répondre aux besoins de production agricole et pastorale ont abouti dans plusieurs zones de la région du Niger à un processus de dégradation de la base de production dont les conséquences sont : l'érosion hydrique et éolienne, la baisse de la fertilité des terres, la rareté du bois de chauffe, etc.

L'évolution de la végétation a été discutée avec environ 400 paysans (groupes et individus au cours d'une étude exploratoire en juin 2006 (Larwanou *et al.* 2006) dans la région de Zinder caractérisée par de fortes densités de population.

La majorité des paysans ont déclaré qu'ils avaient commencé à protéger et à gérer les jeunes arbres sur leurs champs pour réagir aux crises écologiques et économiques des années 1970 et 1980. Ils ont avancé qu'il fallait « lutter contre le Sahara », qui à leurs yeux se manifestait par les grands vents de poussière et de sable au début de la saison pluvieuse, qui détruisaient les cultures après semis. Il fallait réagir à cette crise écologique, mais en même temps les interlocuteurs étaient parfaitement conscients du fait qu'il fallait réagir à la croissance démographique. « Nous avons plus de bouches à nourrir » et ceci les incite à intensifier davantage leurs systèmes de production.

Face à cette situation la population a réagi dans certaines zones comme Aguié avec l'appui de divers partenaires dont le Projet de Développement Rural dans l'Arrondissement d'Aguié en adoptant massivement la technique du défrichement amélioré ou régénération naturelle assistée (RNA).

Le rôle catalyseur joué par les projets

Quelques projets ont largement contribué au développement et à la diffusion de la régénération naturelle (RNA). Dans la région de Maradi, Tony Rinaudo de "Sudan Interior Mission" (SIM) a promu la RNA pendant les années de sécheresse de 1984 et 1985. Il a utilisé de l'aide alimentaire comme incitation. Mais la pratique a été abandonnée par la plupart des paysans après l'arrêt de distribution des vivres, mais elle a tout de même persisté chez les plus persévérants et a même fait tâche d'huile.

Il est important de mentionner que quelques ONG (CARE) de part leurs actions de sensibilisation des populations, ont joué un rôle d'éveil des consciences, de transfert de connaissance et compétences, d'appui matériel et enfin de suggestions de nouvelles options techniques.

Les activités de RNA continuent à être appuyées par des projets (projet FIDA dans le département d'Aguié et aussi le SIM à Maradi), mais la diffusion de la RNA est pour une bonne partie devenue un processus spontané.

L'échange d'expérience et la valorisation de l'expertise paysanne

Des projets ont contribué au milieu des années 1980 au processus de diffusion de la RNA par l'organisation et le financement des voyages d'étude.

En effet pour les paysans, « voir c'est croire ». Ceux qui ont eu l'occasion de voir de visu la RNA dans les champs de leurs frères qui travaillent dans les mêmes conditions, ont tendance à au moins essayé à leur tour.

Un des paysans innovateurs dans la région de Ouahigouya (Burkina Faso), affirme qu'il aurait appris cette technique de la RNA lors d'une visite de paysans à Maradi organisée par un projet. La technique s'est également répandue dans les autres régions du Niger grâce aux voyages d'étude. C'est dire le rôle important des échanges entre paysans, et de la formation de paysans à paysans souvent comme facteur démultiplicateur de la RNA et des bonnes pratiques de GRN d'une façon générale.

Le changement du statut de l'arbre : une clé de la transformation ?

Dans la seconde moitié des années 1980 et les années 1990 le Niger a traversé une crise politique et économique très grave, ce qui a affaibli l'Etat et entraîné la disparition quasi-totale des agents forestiers de beaucoup de régions (surtout celles sans projets de reboisement ou de gestion des formations naturelles). Pendant cette période la perception de la propriété et des règles d'accès ont changé et les paysans ont commencé à se comporter comme s'ils avaient un droit exclusif aux arbres sur leurs champs.

Les changements apportés récemment au code forestier en 2004 ont créé un environnement plus favorable à la RNA. A partir du moment où les paysans ont pris conscience qu'ils avaient le droit de gérer à leurs arbres, les élaguer, les ébrancher et même les éclaircir sans être amendés par les services forestiers, cela les a encouragés à protéger les repousses des arbres dans leurs champs.

Il est donc important que les politiques nationales incitent les paysans à la protection et la gestion de leurs arbres et ne posent pas d'obstacles ou de freins.

Une technique à adapter selon le niveau de mécanisation

La mécanisation de l'agriculture peut constituer un frein à l'expansion de la RNA. On peut en effet constaté aussi bien au Niger que sur les plateaux dogons que cette technique a eu plus de succès dans les zones où les cultures se font de façon manuelle. Aussi, pour les régions à forte mécanisation agricole il faudra certainement adapter la technique en proposant des semis directs selon les lignes de façon à ne pas gêner le travail mécanisé.

Conclusion

Au regard de la croissance démographique galopante au Sahel, les actions de reboisement classique à elles seules seront incapables de renverser la tendance actuelle de déboisement/déforestation et de perte généralisée du couvert forestier. Il faut certes des investissements plus soutenus, mais aussi promouvoir des techniques qui soient, à la portée des populations en terme de coût.

La régénération naturelle assistée est une technique qui se présente comme une alternative à moindre coût pour le reverdissement tant attendu du Sahel. Elle est entrain de prendre de l'ampleur dans beaucoup de pays et mérite d'être promue encore. Dans le cadre de la grande muraille verte, qui se présente comme un vaste programme de développement, la régénération naturelle assistée pourrait servir de tremplin dans la mise en œuvre de cette initiative. La RNA permet à la fois de protéger l'environnement, tout en améliorant les conditions d'existence des populations rurales.

Références

- CNEDD, 2003 –
Evaluation des actions menées au Niger dans le domaine de l'environnement (reboisement, récupération/restauration de terre) pendant les vingt (20) dernières années. 138 p.
- Baoua, I. (2006) –
Analyse des impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles sur le secteur élevage dans les régions de Tahoua, Maradi et Tillabéry au Niger. Etude Sahélienne, CRESA, Niger.
- FAO, 2000 –
Etude prospective du secteur forestier en Afrique : Rapport du Burkina Faso
- Irz, X, L. Lin, C. Thirtle and S. Wiggins (2001) –
Agricultural productivity growth and rural poverty alleviation.
Development Policy Review. 19, 449 – 466.
- Larwanou, M., M. Abdoulaye et C. Reij (2006) –
Etude de la Régénération Naturelle Assistée dans la Région de Zinder (Niger). USAID/IRG-FRAME.
- Larwanou, M. et M. Saadou (2006) –
Evaluation de la flore et de la végétation dans les sites traités et non dans les régions de Tahoua, Maradi et Tillabéry. Etude Sahélienne, CRESA, Niger.
- Larwanou M. et Abass Tougiani, 2008 –
Manuel de formation à l'intention des agents de vulgarisation et des producteurs sahéliens
- MAROU A ZARAFI, 2002 –
Analyse de la régénération naturelle assistée dans la région de Maradi.
2e atelier régional sur les aspects socio-économique de la RNA au Sahel. Bamako 4-6 mars 2002.
- Mortimore, M., M. Tiffen, Y. Boubacar et J. Nelson (2001) –
Synthèse sur les évolutions à long terme dans le département de Maradi, Niger 1960 – 2000.
Drylands Research Working Paper 39f
- Reij, C., G. Tappan and A. Belemviré (2005) –
Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968 – 2002).
Journal of Arid Environments 63, 642 – 659.
- Tahirou, A. et G. Ibro (2006) –
Analyse des impacts socio-économiques des investissements dans la gestion des ressources naturelles : étude de cas dans les régions de Maradi, Tahoua et Tillabéry au Niger. Etude Sahélienne, CRESA, Niger.
- Toudou, A. and a team of national researchers (2006) –
Impacts des investissements dans la gestion des ressources naturelles au Niger : rapport de synthèse. Etude Sahélienne, CRESA, Niger.

Potential Casuarina species and suitable techniques for the GGW

ZHONG CHONGLU, ZHANG YONG, CHEN YU, CHEN ZHEN, JIANG QINGBIN
Research Institute of Tropical Forestry,
Chinese Academy of Forestry, Longdong, Guangzhou, 510520, P.R. China;
Email: zclritf@gmail.com

K. PINYOPUSAREK
CSIRO Plant Industry, Canberra, Australia;
Email: khongsak.Pinyopusarek@csiro.au

CLAUDINE FRANCHE
Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, France;
Email: Claudine.Franche@ird.fr

Abstract

Casuarina tree species belong to the Casuarinaceae family, which includes 4 genera and 96 species. Casuarina trees are native from Australia, Southeast Asia and Pacific archipelagoes. Casuarinas develop symbiotic associations with Frankia, ectomycorrhizal and endomycorrhizal fungi. They have been introduced into tropical and subtropical zones in the world. Casuarinas are economically and ecologically important. They are multipurpose tree species providing a wide range of goods and services, such as windbreaks, sand stabilization, agroforestry and general rehabilitation for difficult sites. Casuarinas can be planted as pioneer species in hot-dry river valley, dry sandy soil, rock mountain and around desert. The wood is a main source of fuelwood and charcoal, for general construction, fiber-wood, and other wood-based industries.

In this presentation, the potential of Casuarina species for the GGW will be described, together with silvicultural techniques and Casuarina uses. A simple propagation technique that has been developed in China to produce a large number of the best Casuarina seedlings will be presented. Following field experiments, we will show that ectomycorrhizal (ECTM) or arbuscular mycorrhizal (AM) fungi or Frankia-tree genotype symbiotic associations play an important role in improved management of Casuarina forest plantations.

Key words

CASUARINA, SPECIES, MYCORRHIZA, FRANKIA, DEGRADED LAND

Introduction

The family *Casuarinaceae* is a group of 96 species of multipurpose trees and shrubs that grow naturally in South-East Asia, Malaysia, Australia, and the Melanesian and Polynesian regions of the Pacific. Casuarinas are characterized by a conifer-like appearance due to morphologically distinctive foliage with the leaves reduced to tiny teeth on green, jointed, needle-like branchlets.

Casuarinaceae are tolerant to adverse edaphic and climatic conditions and most species tolerate extreme heat. They grow in a wide range of different environments, from tropical forests to arid woodlands and coastal dunes. They grow in a wide range of different environments, from tropical forests to arid woodlands and coastal dunes. They frequently occur as pioneer vegetation at early stages of plant succession following disturbances such as fire, landslides, volcanic eruption and flooding. (El-Lakany *et al.*, 1990; Midgley *et al.*, 1983; Pinyopusarerk and House, 1993). Vast plantings of *C. equisetifolia* have been established in China along the coast fronting the South China Sea. They form a green belt that stretches for 3000 km and varies from 0.5 to 5 km in width.

Uses of Casuarina trees

Taken collectively, Casuarina trees have many uses (Diem and Dommergues, 1990; Diouf *et al.*, 2008). They are capable of stabilizing shifting sand dunes, stabilizing eroding hillslopes, and reclaiming marshy soils that are periodically inundated. Because of their resistance to salt-laden winds, many species such as *C. glauca* and *C. equisetifolia* are widely used to stabilize coastal sand dunes (Zhong and Zhang, 2003). They are also planted as windbreaks to protect crops. Casuarina trees have proved to be one of the most effective shelter trees during typhoons and Tsunami in Asia. Some species such as *C. equisetifolia* and its hybrids grow rapidly (a growth rate of 3 m per year has been reported in India) and have an attractive dense crown; consequently, these species are often planted as ornamental plants for urban beautification, parks and seaside resorts, and along roadsides.

Another important use of Casuarina in the tropics is the production of firewood. In comparison to other fuelwood crop species, Casuarina ranks well for calorific value in relation to wood volume (about 5000 kcal.kg⁻¹). People in China use the stumps and even litter for fuel. Because Casuarina wood splits on drying, it is difficult to use the wood for lumber and furniture making. However, it can be used in rural construction as poles for house construction, electric poles and the masts of boats. The wood is very hard, with a density of 1000 kg.m³⁻¹, and is resistant to decomposition in soil and saltwater. Thus, Casuarina poles are used in Asia for anchoring fishing nets in the mouths of the rivers. In India, the wood of *C. equisetifolia* is also pulped for paper, and in Madagascar, the bark is extensively used for tanning leather (Midgley *et al.*, 1983; Pinyopusarerk and House, 1993; Diouf *et al.*, 2008).

Potential *Casuarina* species for GGW

The *Casuarinaceae* family includes four genera, *Allocasuarina* L. Johnson with 59 species, *Casuarina* L. Johnson with 17 species, *Ceuthostoma* L. Johnson with 2 species and *Gymnostoma* L. Johnson with 18 species (Wilson and Johnson, 1989; Turnbull, 1990). *Allocasuarina* is a large group of shrubs and trees, native to Australian and most of them can grow on poor soils. The potential of *Casuarinaceae* species for the GGW are shown in Table 1.

Casuarina Propagation Techniques

Casuarinas can be propagated by seed, cutting and tissue culture.

Propagation from seeds

Seed propagation is a common method used for most *Casuarina* species. The quality of the seedlings depends on the degree of seed maturity, the condition of seed storage and the genetic quality of the mother trees. In China, *Casuarina* trees bear seeds from 3 or 4 years of age, and can continue to fruit good quality seeds for many years. The seeds are easily extracted from cones after 3-7 days under shade. Experiments in China have shown that *Casuarina* seeds do not store well and lose their viability after 1-2 years when stored at room temperature. For long-term storage it is suggested to store seeds at 4-5°C. At CSIRO Australian Tree Seed Centre, seeds of *C. equisetifolia* and *C. junghuhniana* still maintained good germination after 15 years of storage in cool room conditions (4-5°C) (K. Pinyopusarerk, personal communication). Each species has its optimum germination temperature, usually ranging between 20°C and 30°C. Propagation by seed takes advantage of the fact that seeds are easy to obtain, but the disadvantage is the unreliable genetic quality. To obtain seeds of high genetic quality, seed orchards or seed production areas need to be established.

Propagation by cuttings

Water culture is now a common method for the propagation of *Casuarina* cuttings in China (Liang and Chen, 1982). The vegetative material is the young needle-like branchlet, preferably less than three months old taken from stock plants in hedge orchards. The procedure consists in soaking the bottom part of the 8-10 cm long branchlet in 50-100 ppm of NAA (naphthalene-acetic acid) or IBA (indole-butyric acid) solution for 24 hours. The plant material is then washed and soaked for 7-10 days in water, which is renewed every day, and placed near sunlight. At 25-32°C water temperature, cuttings will root after 7-10 days, and after 15 days, the rooting percentage is over 80%. If the water temperature is lower than 25°C, it may take

15-30 days to root. The rooted branchlets are then transplanted in growth containers filled with standard potting mix. This technique has been extended to county foresters and farmers. At present, private nursery managers can produce *Casuarina* cuttings using the water culture method, but they have to rely on local forest farms or research organizations to obtain new clonal genetic resources.

Rooting in moist, fine sand, and applying the same hormone treatment than as that previously described above for water culture, is an alternative method. Generally, a sand bed 15-18 cm in depth, 80-100 cm in width and 5-10 m in length, is built with brick. A plastic sheet is placed inside the bed to keep the sand clear from soil, and water pipes are laid at one end to supply water. The sand bed is always kept moist and is covered with clear plastic sheet to increase the temperature in winter. This method is suitable for mass production.

Both water culture and sand culture are used successfully for *C. equisetifolia*, *C. cunninghamiana*, *C. glauca* and *C. junghuhniana*. Other species such as *C. cristata*, *Allocasuarina littoralis* and *A. torulosa* are more difficult to root.

In Vitro Tissue Culture

Since the 1980s, tissue culture methods have been used for *Casuarinas* by many workers (Duhoux *et al.*, 1990; Abo El-Nil, 1987; Duhoux *et al.*, 1990; Cao *et al.*, 1990; Zhong, 2000; Liu *et al.*, 2003). Tissues include slender branches, young buds, immature male inflorescence spikes, female flower buds and seeds. The success of the approach depends on appropriate disinfection of the plant material, the composition of the nutrient medium, rooting hormone (NAA, 6-BA or IBA), temperature, light, and the biological characteristics of the species. Generally, tissue-cultured material is easier to root than cuttings material. In 2000, Chinese researchers started to work on *Casuarina in vitro*. Up to now, *in vitro* plants of *C. cunninghamiana*, *C. equisetifolia* and *C. glauca* have been obtained, but there are considerable differences in organogenesis among species (Liu *et al.*, 2003).

Inoculation of *Casuarina* by Mycorrhizal Fungi and *Frankia*

Mycorrhizal fungi and *Frankia* can improve the growth and biomass production of *Casuarina* seedlings or saplings. Chinese researchers have been working on the selection of *Casuarina* symbiotic genotypes (Zhong, 1993; Zhong *et al.*, 2003).

Mycorrhizal fungi tree genotype associations were studied under nursery conditions for *C. equisetifolia* (23 provenances) and under glasshouse conditions for *C. junghuhniana* (10 individual families). The results of *C. equisetifolia* and *C. junghuhniana* showed that inoculation with ectomycorrhizal fungus significantly improved the diameter and height of seedlings. There was also variation among seedlots in response to the inoculation (Zhong *et al.*, 2003).

Table 1
Potential *Casuarina* species for the GGW

No. Species	Main Characteristics			
	Native Distribution	Rainfall (mm)	Soils	Height (m)
1 <i>Allocasuarina decasineana</i>	swales between sand dunes, arid climate, Australia	0-300	Desert sand soils	10-16
2 <i>A.inophloia</i>	QLD, Australia	450-800	sandstone or laterite ridges	3-10
3 <i>A. littoralis</i>	East Australia	700-2000	sandy and other poor soils	5-15
4 <i>A.verticillata</i>	grassy woodland, rocky sea-coasts and dry rocky hill and ridges inland, Australia	150-800	a range of soils	4-10
5 <i>A.dielsiana</i>	lateritic hilly country, Australia	200-400	Lateritic soil	4-9
6 <i>A.helmsii</i>	WA, northwest Vict., Australia	0-300	a wide range of soils	1-5
7 <i>A.luehmannii</i>	QLD, NWS, SA., Australia	700-2000	Non-calcareous soils	5-15
8 <i>A.torulosa</i>	oastal hills and ranges as understory in open forest to tall open-forest, Australia	700-1600	A range of soils	5-20
9 <i>A. huegeliana</i>	Western Australia	300	Rocky soils from 450 to sea level	4-14
10 <i>Casuarina pauper</i>	WA, SA., NSW, Australia	100-400	red-brown soils with light-textured topsoil and calcareous subsoil	5-15
11 <i>C.equisetifolia</i>	North and East of Australia	700-2000	Sandy and rocky sea coasts,	6-35
12 <i>C.cunninghamiana</i>	Along fresh water stream, East Australia	800-2000	A range of soils	15-35
13 <i>C. obesa</i>	West Australia	200-800	Brackish or saline soils	8-20
14 <i>C.cristata</i>	South QLD, NSW, East Australia	800-1600	Clayey grey or brown soils with calcareous nodules	10-20
15 <i>C.glauca</i>	East Australia	700-1600	Exposed headlands	8-20
16 <i>C.junghuhniana</i>	from 3100 m highland to 100 m above sea level. Native in Indonesia and East Timor	700-1500	A wide range of soils. It is tolerant of a wide pH range, from 2.8 to 8	25-35

In another glasshouse study on *C. junghuhniana*, seedlings were inoculated with three endomycorrhizal fungi (AMF) and six ectomycorrhizal fungi (ECMF). Seedling height, root length, ground diameter, dry weight underground and above ground and total biomass were measured. The results showed that both fungi significantly improved the growth of *C. junghuhniana* seedlings. The AMF had a more obvious effect in improving drought resistance of *C. junghuhniana* than ECMF according to the nine mycorrhizal fungi used in this experiment. Five isolates were selected from the AMF and ECMF tested, including *Glomus caledonium* 90068, *G. caledonium* 90036, *G. versiform* 9004, *Scleroderma flavidum* 0207 and *Laccaria* sp E439. They could be used as inoculants of *C. junghuhniana* seedlings (Zhang *et al.*, 2006). Since 2001, we have introduced *C. equisetifolia*, *C. glauca*, *C. cunninghamiana*, *C. junghuhniana*, *C. obesa*, *C. cristata* and *A. littoralis* in the hot dry river valley in Yuanmou, Yunnan Province, which is characterized by degraded soil, low annual rainfall (634 mm) and high evaporation (3848 mm). The first five species showed potential at some sites. A *Frankia* inoculation experiment on *C. cunninghamiana* was carried out in the hot dry river valley in Yuanmou, Yunnan province. Survival after planting of inoculated seedlings increased by 10.0-20.6% compared with uninoculated seedlings. Tree height after two years differed significantly among *Frankia* treatments. However, not every *Frankia* strain improved tree growth (Yang *et al.*, 2007).

Since 1989, many field inoculation trials have been conducted in Hainan, Guangdong and Yunnan Provinces, China. More than 18 years of experience of applying Casuarina inoculum in China have shown that application of a symbiotic microorganism (*Frankia* and mycorrhizal fungus) can effectively improve survival and biomass productivity of Casuarina plants and is recommended when Casuarina trees are planted at sites where Casuarinas have not previously been planted. In China, pure culture strains or isolate inoculants in liquid form are used to inoculate seedlings in the nursery. In general, seedlings or cuttings that have just developed lateral roots are suitable for inoculation.

Consideration of rehabilitation measurement and strategy for the GGW

Tree improvement

Significant genetic variations of casuarinas trees exist among tree species, provenances, families and/or clones. Selection of appropriate Casuarina genetic resources will undoubtedly lead to valuable benefits. In the GGW zones, the first criteria for selection will be trees adapted to environmental conditions, and then economic or social benefits will have to be considered. Casuarinas introduction should take benefit of the wide genetic diversity; in a second stage, casuarina tree productivity will be increased by tree improvement or selection techniques.

Sylvicultural techniques

Water is one of the limiting factors successful to successful tree plantation. Every feasible site management practice to keep runoff water under control should be used. Short raining season is a good time to plant trees. A range of planting models should be assessed for the GGW. On degraded land, a mixed model with grass or shrub-grass or tree-shrub-grass should be tested. In the early stages, it will be very important to plant suitable tree species adapted to degraded lands. They will artificially build successful and convincing forests that will then simulate natural forest population for environmental rehabilitation.

Sustainable management and rehabilitation strategy

The needs of local communities must be balanced with the urgent need to rehabilitate degraded land, through extensive community consultations. It will be necessary to promote technical capabilities of local citizen in all relevant management techniques and practices of vegetative rehabilitation. Another key in the success of the GGW will be to develop successful demonstrations and implement a continual program of extension and education among local communities in order to raise awareness of the importance of vegetative rehabilitation.

Conclusion and suggestion

- Casuarina trees can be easily propagated by seeds or cuttings.
- Casuarina trees are valuable species to improve degraded lands, which can be used as pioneer species, particularly with mycorrhizal fungus or *Frankia*- tree associations.
- Casuarina trees should be considered in the GGW project.

References

- Abo El-Nil, M.M. 1987.
Micropropagation of Casuarina.
In: Cell and Tissue Culture in Forestry, Vol.3,
Case histories: Gymnosperms, Angiosperms
and Palms. Bonga, J.M. and Durzan, D.J. (Eds),
Artinus Nijhott Publishers, Dordrecht,
pp. 400-410.
- Cao, Y.H., Phleph, M. and Duhoux, E. 1990.
Effects of Same Organic Compounds
(Maltose, Sucrose, Vitamins) on the shoot
biomass of *Allocauarina verticillata*
(Casuarinaceae) grown *in vitro*.
Bulletin de la Société Botanique Française, 137:
7-13.

- Chen, L., Bo, X., and Peng, Y. 1996. Isolation and cloning of *Frankia* gene. Journal of Guangxi Agroculture University, 15: 46-49.
- Diem, H.G., and Dommergues, Y.D. 1990. Current and potential uses and management of *Casuarinaceae* in the tropics and subtropics. In: Schwintzer, C.R. and Tjepkema, J.D. (eds.) *The Biology of Frankia and Actinorhizal Plants*. Academic Press, New York, pp. 317-342.
- Diouf, D., Sy, M-O., Gherbi, H., Bogusz, D., and Franche, C. 2008. *Casuarinaceae*. In « Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Forest Tree Species, vol. 9, Kole, C.R., Scorza, R. and Hall, T.C. (eds), Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 279-292.
- Duhoux, E., Leroux, C., Pheleph, M., and Sougoufara, B. 1990. Improving *Casuarinaceae* using *in vitro* methods. In: *Advances in Casuarina Research and Utilization*. El-Lakany, M.H., Turnbull, J.W. and Brewbaker J.L., eds. Cairo, Egypt, pp. 174-187.
- El-Lakany, M.H., Turnbull J.W. and Brewbaker J.L. 1990. *Advances in Casuarina Research and Utilization*. DDC, AUC, Cairo, Egypt. 241 p.
- Liang, Z., and Chen, Bi. 1982. Vegetative propagation method on *Pseudomonas solanacearum* resistant clones of casuarina plants. *Scientia Silvae Sinica* 18: 199-202.
- Liu, Y., Zhong, C., Bai, J., Zhang, Y., and Chen, J. 2003. The salt resistance experiment on four clones of *Casuarina equisetifolia* in tissue culture. *Guangdong Forestry Science and Technology*. 19: 47-50.
- Midgley S.J., Turnbull J.W., Johnson R.D. 1983. (Eds), *Casuarina Ecology, Management and Utilization*. CSIRO, Melbourne. 286 p.
- Pinyopusarek, K., and House, A.P.N. 1993. *Casuarina: an Annotated Bibliography*. CSIRO, Nairobi. 298 p.
- Turnbull, J.W. 1990. Taxonomy and genetic variation in casuarinas, pages 1-11, In: M.H.El-Lakany, J.W.Turnbull, and J.L.Breybaker (eds). *Advances in Casuarina Research and Utilization*. Cairo, Egypt, pp. 1-11.
- Wilson, J.L. and Johnson, L.A.S. 1989. *Casuarinaceae*. In: *Flora of Australia Hamamelidales to Casuarinales*. Australian Government Publishing Service, Canberra, Vol.3, pp.100-203.
- Yang, Z., Zhong, C., and Zhang, Y. 2007. *Casuarina* introduction trial in hot-dry river valley region. *Journal of Nanking Forestry University* 31: 57-60.
- Zhang Y., Chen, Y., Guobiao, L.I., Chen, Z., and Zhong, C. 2006. Mycorrhizal Fungal Screening and Inoculant Effectiveness for *Casuarina junghuhniana*. *Forest Research* 19: 342-346.
- Zhang, Y., Chen, Y., Zhong, C., Fang, F., Cai, X., and Yun, W. 2003. Effect of mycorrhizal fungi on growth of *Casuarina* clones. *Tropical Forestry* 31: 21-23.
- Zhong, C., Gong, M., and Kang, L.. 1998. Relationship between soil factors and tree growth or VAM infection in casuarina plantations in southern China. *Forest Research* 11: 135-141.
- Zhong, C., Gong, M., Bai, J., Chen, Y., Wang F., Pinyopusarek, K. 2003. Study on Genetic Variation of *Casuarina* Provenances /Family Seedlings After inoculating with Ectomycorrhizal fungus. *Forest Research* 16: 588-594.
- Zhong, C., Gong, M., Chen, Y., and Wang, F. 1995. Inoculation of *Casuarina* with mycorrhizal fungi and *Frankia*. In: *Mycorrhizas for Plantation Forests in Asia*. Brundrett, M., Dell, B., Malajczuk, N., and Gong, M. (eds). ACIAR Proceedings No.62, CSIRO, Canberra. pp.122-126.
- Zhong, C., and Zhang, Y. 2003. Introduction and management of *Casuarina* tree species in China. *China Forestry Science and Technology* 17: 3-5.
- Zhong, C.1993. Study on the optimum *Frankia*-genotype associations of casuarina seedlings. *Forest Research* 6: 654-660.

Gestion et valorisation des ressources microbiennes des sols pour une revégétalisation durable des milieux sahéliens

ROBIN DUPONNOIS

IRD. UMR 113 CIRAD/INRA/IRD/AGRO-M/UM2.
Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM), Montpellier: France
Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD.
Centre de Recherche de Bel Air: Dakar: Sénégal

MOHAMED HAFIDI

Laboratoire Ecologie et Environnement. Faculté des Sciences Semailia.
Université Cadi Ayyad. Marrakech. Maroc

IBRAHIMA NDOYE

Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD.
Centre de Recherche de Bel Air: Dakar: Sénégal
Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD).
Faculté des Sciences et Techniques. Département de biologie végétale. Dakar: Sénégal

ANTOINE GALIANA

IRD. UMR 113 CIRAD/INRA/IRD/AGRO-M/UM2.
Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM), Montpellier: France

BERNARD DREYFUS

IRD. UMR 113 CIRAD/INRA/IRD/AGRO-M/UM2.
Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM), Montpellier: France

YVES PRIN

IRD. UMR 113 CIRAD/INRA/IRD/AGRO-M/UM2.
Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM), Montpellier: France

Résumé

Les perturbations observées dans la structuration du couvert végétal (diversité spécifique, abondance) permettent généralement d'évaluer l'impact des phénomènes de désertification dans l'évolution spatio-temporelle de la strate herbacée, arbustive et arborée. Parallèlement, la dégradation du couvert végétal aggrave les effets néfastes des processus d'érosion éolienne et hydrique sur la qualité des sols, en altérant leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Plus particulièrement, la structure et la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique, composante fondamentale dans la dynamique des principaux cycles biogéochimiques des sols

(C, N et P), sont significativement modifiées et peuvent ne plus remplir leur rôle quant au maintien durable de la fertilité des sols et en conséquence, une productivité optimale de l'agro-système ou de l'écosystème. Parmi les composantes microbiennes majeures particulièrement sensibles à la désertification figurent les champignons mycorhiziens, microorganismes évoluant en symbiose avec les plantes et qui sont considérés comme des éléments clés dans le bio-fonctionnement du sol. Ces symbiotes fongiques optimisent la nutrition minérale des plantes (N, P) ainsi que leur résistance aux stress biotiques et abiotiques environnementaux.

La gestion de cette ressource microbienne pour améliorer la croissance des plantes dans des sols dégradés est généralement envisagée selon deux approches : (i) une gestion du potentiel mycorhizien par des plantes hautement mycotrophes (ou plantes facilitatrices) ou (ii) un apport en masse d'une souche mycorhizienne préalablement sélectionnée pour un caractère donné (mycorhization contrôlée).

Cet article présente les principaux acquis scientifiques et techniques obtenus au cours de ces dernières années montrant l'importance de la symbiose mycorhizienne dans la croissance des arbres et dans la réussite des plantations expérimentales en milieu aride, dans les zones méditerranéennes et sahéliennes. Ces résultats permettent également de proposer certains aménagements dans les itinéraires sylvicoles classiques pour valoriser pleinement les propriétés de la symbiose mycorhizienne afin d'assurer un maintien durable des opérations de revégétalisation des milieux dégradés.

Mots clés

SYMBIOSE MYCORHIZIENNE, MICROFLORE DU SOL, REFORESTATION, DÉSSERTIFICATION

Introduction

Dans les milieux arides et semi-arides, le phénomène de désertification des terres a pris une ampleur croissante au cours de ces dernières décennies du fait de conditions climatiques particulièrement drastiques (longues périodes de sécheresse, précipitations irrégulières) conjuguées aux activités anthropiques (surexploitation des ressources naturelles, irrigation, surpâturage, etc.) (Francis & Thornes, 1990). La désertification est liée à une altération de la structure du couvert végétal (diversité spécifique, abondance) mais aussi des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols (structure du sol, biodisponibilité en éléments nutritifs, activité microbienne, etc.) (Garcia *et al.*, 1997 ; Requena *et al.*, 2001). En effet, du fait de l'exposition des sols à l'érosion éolienne et hydrique, la diversité génétique et fonctionnelle de la microflore tellurique se trouve particulièrement affectée par ces dysfonctionnements d'ordre biotique et abiotique. Parmi les composantes microbiennes des sols sensibles à la désertification figurent les champignons mycorhiziens dont la diversité et l'abondance sont significativement réduites (Bethlenfalvay &

Schüepp, 1994). Les champignons mycorhiziens jouent un rôle majeur dans l'évolution spatio-temporelle des écosystèmes végétaux terrestres (Boucher *et al.*, 1982). Outre leur impact direct sur le développement de la plante *via* principalement une amélioration de la nutrition minérale de la plante hôte, il a été récemment démontré que la structure du couvert végétal ainsi que son développement étaient intimement liés à l'établissement de la symbiose mycorhizienne (Odum, 1959 ; Van der Heijden *et al.*, 1998). La capacité d'une espèce végétale à tolérer un stress d'origine biotique ou abiotique est également fortement dépendante du degré d'établissement et de fonctionnement des relations symbiotiques entre le champignon et la plante hôte (Odum, 1959 ; Barea *et al.*, 1997). Il est aussi maintenant parfaitement démontré que la symbiose mycorhizienne conditionne le fonctionnement microbien des sols *via* son influence sur certains groupes bactériens impliqués dans le déroulement des principaux cycles biogéochimiques (N, P et C) (Frey-Klett *et al.*, 2005).

Afin de réhabiliter ces sols dégradés et d'installer durablement un couvert végétal, un axe d'intervention serait de remédier à ces carences en propagules mycorhiziennes en (i) inoculant en masse une souche de champignon lors de la phase d'élevage des plants en pépinière (mycorhization contrôlée) (Duponnois *et al.*, 2005, 2007) et/ou (ii) en augmentant le potentiel mycorhizien des sols par l'introduction dans les itinéraires sylvicoles de plantes hautement mycotrophes et rudérales (plantes nurses) susceptibles de stimuler le développement des symbiotes fongiques dans le sol (Duponnois *et al.*, 2001 ; Azcon-Aguilar *et al.*, 2003). Le choix entre ces deux pratiques repose sur le degré d'infection naturelle de la zone à revégétaliser. Un faible niveau d'infection peut être dû à l'absence ou à la rareté des champignons mycorhiziens dans le sol (sites perturbés, remblais, etc.) et l'apport artificiel de souches fongiques efficaces sera nécessaire pour procurer un gain significatif de production. Si le niveau d'infection est plus élevé (sites peu perturbés, etc.), il sera alors possible d'augmenter l'abondance des propagules mycorhiziennes infectieuses *via* l'introduction de plantes pionnières hautement mycotrophes.

Les conditions environnementales rencontrées sur le tracé de la « Grande Muraille Verte » (aridité, carences minérales des sols, etc.) représentent un champ expérimental exceptionnel pour valoriser les propriétés de la symbiose mycorhizienne selon les différents processus d'intervention décrits précédemment. Toutefois l'effet bénéfique de la symbiose mycorhizienne sur la croissance de la plante hôte et sur le rôle potentiel du champignon dans l'amélioration de la tolérance de la plante vis-à-vis de stress d'origine biotique et abiotique a souvent été étudié en conditions contrôlées (expériences en serre ou en conditions axéniques). Il n'existe actuellement que très peu d'exemples où cette biotechnologie a été testée en conditions naturelles et ceci plus particulièrement dans les régions arides et semi-arides.

Le principal objectif de cet article sera de présenter des résultats d'expériences de mycorhization contrôlée ou de gestion du potentiel mycorhizien des sols par des plantes nurses, menées dans des zones arides (Ex : Sénégal) ou méditerranéennes (Ex : Maroc) et de démontrer l'intérêt d'introduire dans les itinéraires sylvicoles le facteur « mycorhizes » afin d'optimiser les performances des formations forestières naturelles ou artificielles.

La mycorhization contrôlée : mode opératoire et impact sur le développement de l'arbre

En ce qui concerne le domaine de la foresterie, de nombreux résultats expérimentaux ont montré que (i) le développement normal des arbres était atteint lorsque le taux d'infection mycorhizienne est élevé et (ii) l'efficacité de la symbiose en terme de bénéfice pour la plante hôte dépendait du champignon associé (Smith & Read, 2008). Ces acquis scientifiques ont permis d'envisager une « mycorhization contrôlée » des plants forestiers lors de la phase d'élevage en pépinière en sélectionnant des souches fongiques performantes pour les introduire dans les systèmes culturaux forestiers. Deux facteurs déterminent l'efficacité de la mycorhization contrôlée : la fertilité chimique du sol et le potentiel mycorhizien du sol de la zone à reboiser.

La relation entre le niveau de fertilité chimique du sol (P assimilable, N total) et la réponse de la plante hôte à l'inoculation mycorhizienne est schématisée dans la figure 1. L'effet positif du champignon se manifeste principalement lorsque la fertilité des sols est très faible. L'utilisation de la mycorhization contrôlée est donc particulièrement adaptée aux opérations de réhabilitation de sols dégradés qui présentent généralement de fortes carences en éléments minéraux et plus particulièrement en phosphore assimilable. D'autre part, les sols exposés aux phénomènes d'érosion présentent également un déficit en propagules mycorhiziennes (Duponnois *et al.*, 2001). Cette carence permet indirectement une meilleure efficacité de l'apport artificiel de champignon mycorhizien qui procure un gain significatif de production pour la plantation.

Exemples d'expériences de mycorhization contrôlée réalisées au Sénégal (Duponnois *et al.*, 2005, 2007)

L'effet de la mycorhization d'un acacia australien, *Acacia holosericea*, par des champignons ectomycorhiziens appartenant aux genres *Pisolithus* et *Scleroderma* a été étudié au Sénégal en conditions contrôlées (expériences en serre) et en conditions naturelles. Les résultats obtenus montrent que l'inoculation fongique stimule de manière spectaculaire la croissance des plants pendant leur phase d'élevage en pépinière mais également l'établissement de la symbiose fixatrice d'azote (Symbiose résultant de l'association entre la légumineuse et des bactéries du groupe des rhizobia) (Tableau 1). Ces interactions symbiose mycorhizienne/symbiose fixatrice d'azote ont été très étudiées chez les arbres du genre *Acacia* et de nombreux résultats témoignent des liens très étroits qui régulent le fonctionnement de ces 2 types de symbiose (André *et al.*, 2003, 2005).

Les plants inoculés ont été transférés dans 2 sites localisés au sud du bassin arachidier au Sénégal (site A : village de NGane, 14°10'N-17°50'W ; site B : village de Sonkorong, 13°45'N-15°40'W). La crise de transplantation, fréquemment observée dans les opérations de reboisement en milieu aride, était très limitée chez les plants mycorhizés (3 % de mortalité chez les plants mycorhizés alors qu'elle était de 19 % chez les plants non mycorhizés) (Duponnois *et al.*, 2005). L'effet bénéfique de

l'inoculation fongique sur la croissance des arbres a été mesuré dans toutes les plantations expérimentales (Tableau 2). En prenant comme exemple l'expérience EC13 (18 mois de plantation) et en considérant le rendement à l'hectare pour une densité de plantation de 1 100 plants à l'hectare, la production ligneuse chez les plants mycorhizés était de 18,4 t ha⁻¹ alors que chez les plants non mycorhizés, elle était de 3,2 t ha⁻¹ soit un coefficient multiplicateur de 5,75 (Duponnois *et al.*, 2007). Pour l'ensemble des plantations, les gains procurés par l'inoculation mycorhizienne ont varié de x 1,35 (EC11) à x 5,75 (EC13) (Tableau 2).

Exemple d'une expérience de mycorhization contrôlée réalisée au Maroc (Ouahmane *et al.*, 2007)

Cette expérience de mycorhization contrôlée a été réalisée dans la vallée de N'Fis (Haut Atlas, Maroc) au niveau de la station forestière d'Idni (8°17'02'' W, 31°54'34'' N, Altitude : 1 700 m) en utilisant le cyprès de l'Atlas (*Cupressus atlantica*), inoculé ou non lors de la phase d'élevage en pépinière par un mélange de souches de champignons mycorhiziens à arbuscules. L'effet mycorhizien a été de nouveau observé au terme de la phase pépinière (stimulation de la croissance des parties aériennes et racinaires, augmentation des teneurs en N et P des parties aériennes, etc.) (Ouahmane *et al.*, 2007). Une année après la mise en place de la plantation, la mortalité cumulée des plants mycorhizés était de 15 % alors que celle des plants témoins (non inoculés) était de 38 %. La croissance en hauteur des plants a également été suivie au cours de cette période. La figure 2 montre que l'accroissement en hauteur est significativement plus élevé chez les plants mycorhizés, plus particulièrement à la sortie de la période estivale lors de l'apparition des premières pluies. Ce résultat montre que la symbiose mycorhizienne permet une meilleure utilisation des réserves hydriques du sol. Cet effet bénéfique du champignon sur l'alimentation hydrique de la plante résulte vraisemblablement du fait que les plants mycorhizés ont une meilleure croissance racinaire, qui, en association avec le mycelium extramatriciel, leur permet de prospecter un volume plus large de sol (Fitter, 1985 ; Koide, 1993). Ainsi, outre un effet bénéfique de la symbiose mycorhizienne sur la croissance de la plante *via* une amélioration de la nutrition minérale (principalement pour le phosphore, principale carence des sols tropicaux), ce processus symbiotique permet également aux jeunes arbres d'avoir un meilleur accès à l'eau et ainsi de mieux résister au stress hydrique, plus particulièrement dans les premiers mois de la plantation.

Utilisation de plantes nurses pour accroître les performances des plantations forestières

Le couvert végétal des zones arides et semi-arides est généralement organisé suivant une mosaïque de poches de végétation (patchy distribution) constituées par des espèces végétales pionnières (Francis & Thorne, 1990). Ces plantes étant particulièrement

adaptées aux conditions de stress rencontrées dans ces régions, il a été envisagé de les utiliser en tant que « plantes facilitatrices » pour favoriser le développement des essences forestières retenues dans les programmes de reboisement au Maroc. L'hypothèse scientifique sur laquelle reposent les modalités de cette pratique culturale est « *qu'il est possible de simuler l'évolution naturelle d'un écosystème forestier tout en raccourcissant les différentes étapes de ce processus* ».

Ainsi des arbustes fréquemment observés dans les écosystèmes forestiers dégradés ont été identifiés dans le Haut Atlas Marocain. Il a été ensuite démontré que le sol influencé par ces plantes (Ex : *Lavandula multifida*) constituait un substrat de culture hautement favorable à la croissance du cyprès (Tableau 3) (Ouahmane *et al.*, 2006a). Afin d'évaluer les possibles interconnexions susceptibles de s'établir entre les 2 types de plantes, plante nurse/essence forestière, des co-cultures associant *L. multifida* et une espèce de Cyprès (*C. arizonica*) ont été réalisées en conditions contrôlées (Ouahmane *et al.*, 2006b). L'effet bénéfique de la présence de la plante nurse (*L. multifida*) sur la croissance en hauteur des plants de cyprès étant comparable à l'effet du champignon mycorhizien, *Glomus intraradices* (Fig. 3), il est hautement probable que l'arbuste exerce un effet promoteur sur le développement du potentiel mycorhizien des sols qui profitera au cyprès. Ainsi, des ponts mycéliens pourront associer les 2 plantes partenaires et permettront des échanges de type trophique entre les 2 espèces végétales. Toutes ces expériences ont été réalisées en conditions contrôlées et les résultats obtenus doivent être vérifiés en milieu naturel. Des plantations expérimentales associant le cyprès et certaines espèces de plantes « nurses » sont en cours de réalisation au Maroc.

Conclusion

L'ensemble des résultats qui ont été présentés dans ce document montre clairement l'intérêt de valoriser la symbiose mycorhizienne dans les opérations de reboisement des zones dégradées.

Pour chaque date, les valeurs indexées par une même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Newman-Keul ($p < 0,05$).

Son potentiel se manifestant préférentiellement dans des sols carencés en éléments nutritifs et faiblement colonisés par une microflore mycorhizienne, la symbiose mycorhizienne apparaît comme un « outil » fondamental pour assurer l'installation durable d'un couvert forestier et optimiser sa productivité. Toutefois, malgré les nombreux travaux qui ont démontré tout l'intérêt de ce phénomène symbiotique pour la croissance de la plante dans des environnements dégradés, l'introduction dans les itinéraires sylvicoles de cette dimension microbiologique est encore très discrète. Il convient alors de s'interroger sur les raisons de ce manque d'intérêt de la part des acteurs du monde de la foresterie pour cette biotechnologie. Le

facteur limitant majeur semble être le surcoût financier occasionné par l'inoculation fongique. Il est ainsi nécessaire de limiter les apports de biomasse fongique afin de rentabiliser cette pratique. L'utilisation de poudre de termitière dans le processus de mycorhization contrôlé peut diminuer de manière significative la quantité d'inoculum fongique requise (Duponnois, 2008). En conséquence, des actions de démonstration et de sensibilisation sont à entreprendre rapidement en s'appuyant sur des plantations expérimentales de démonstration qui manquent cruellement en Afrique de l'Ouest et en Afrique du Nord.

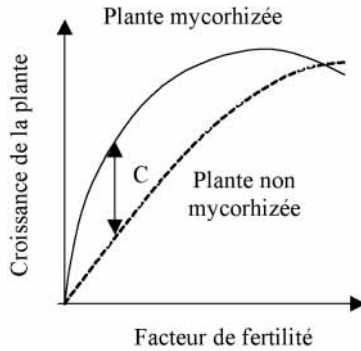


Figure 1.

Effet de la fertilité du sol sur l'efficacité de la mycorhization en terme de gain de croissance (C) pour la plante hôte (d'après Garbaye, 1988).

Tableau 1.

Effet de l'inoculation par différentes souches de champignons ectomycorhiziens sur la croissance de *Acacia holosericea* et sur la symbiose fixatrice d'azote après 4 mois de culture en conditions contrôlées (D'après Duponnois et al., 2005).

Paramètres mesurés	Traitements			
	Témoin	<i>Pisolithus albus</i> CO1024	<i>P. albus</i> IR100	<i>Scleroderma dictyosporum</i> IR109
Biomasse aérienne (mg poids sec)	652 a ⁽¹⁾	1310 b	1515 b	1382 b
Biomasse racinaire (mg poids sec)	378 a	470 a	762 b	494 a
Nombre de nodules de Rhizobium par plant	9,5 a	14,8 a	11,2 a	34,6 b
Poids total des nodules de Rhizobium par plant	3 a	34 b	8 a	58 c
Taux de mycorhization (%)	-	20,8 a	25,2 a	53,4 b

⁽¹⁾ Les données d'une même ligne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Newman-Keul ($p < 0,05$).

Tableau 2.
Diamètre, hauteur et paramètres de croissance des arbres inoculés ou non par *Pisolithus albus* souche IR100 dans les différentes plantations expérimentales de *Acacia holosericea* réalisées au Sénégal.
D'après Duponnois et al. (2007)

Plantations	Sites	Durée	Paramètres de croissance							
			SD ⁽¹⁾	H	PB	SBB	VB	TB	LiB	
EC7	A	30 mois	Non inoculé	9,9 a ⁽²⁾	4,39 a	13,2 a	11,8 a	17,9 a	42,6 a	1,7 a
<i>P. albus</i> IR100			13,8 b	4,93 b	27,4 b	24,7 b	42,5 b	91,6 b	3,6 b	
EC8	B	18 mois	Non inoculé	2,7 a	2,49 a	0,77 a	0,64 a	0,60 a	2,11 a	0,08 a
<i>P. albus</i> IR100			3,3 b	2,82 b	1,20 b	1,00 b	1,02 b	3,37 b	0,13 b	
EC9	B	18 mois	Non inoculé	2,6 a	2,43 a	0,71 a	0,59 a	0,55 a	1,94 a	0,07 a
<i>P. albus</i> IR100			3,5 b	2,87 b	1,36 b	1,15 b	1,19 b	3,86 b	0,15 b	
EC10	B	18 mois	Non inoculé	2,5 a	2,37 a	0,65 a	0,54 a	0,49 a	1,77 a	0,07 a
<i>P. albus</i> IR100			4,3 b	3,15 b	2,14 b	1,82 b	2,03 b	6,21 b	0,24 b	
EC11	B	18 mois	Non inoculé	5,7 a	3,63 a	3,96 a	3,42 a	4,24 a	11,89 a	0,47 a
<i>P. albus</i> IR100			6,5 b	3,81 a	5,28 b	4,59 b	5,97 b	16,11 b	0,64 b	
EC13	A	18 mois	Non inoculé	3,1 a	2,60 a	1,04 a	0,88 a	0,86 a	2,91 a	0,11 a
<i>P. albus</i> IR100			6,6 b	3,81 b	5,46 b	4,75 b	6,21 b	16,68 b	0,66 b	

⁽¹⁾ SD : Diamètre du tronc (cm) ; H : Hauteur (m) ; LB : Biomasse foliaire (kg par arbre) ; SBB : Biomasse des branches (kg par arbre) ; VB : Biomasse ligneuse (kg par arbre) ; a TB : Biomasse totale (kg par arbre) ; LiB : Biomasse de la litière (kg m⁻²). ⁽²⁾ : Pour chaque expérience, les données d'une même colonne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes (p < 0,05).

Tableau 3.
Croissance de *C. atlantica* dans des sols prélevés sous *L. dentata*, *L. stoechas*, *T. satureioides*, *C. atlantica* ou hors couvert (témoin) après 6 mois de culture en conditions contrôlées
(D'après Ouahmane et al., 2006a).

	Origines des sols				
	Hors couvert	<i>L. dentata</i>	<i>L. stoechas</i>	<i>T. satureioides</i>	<i>C. atlantica</i>
Hauteur (cm)	14,2 a ⁽¹⁾	18,6 b	21,0 cd	23,0 d	19,4 bc
Biomasse aérienne (mg poids sec)	330 a	634 bc	738 c	666 bc	486 ab
Biomasse racinaire (mg poids sec)	76 a	176 c	157 bc	115 abc	104 ab
N (mg par plant)	0,785 a	1,559 b	1,823 c	2,029 d	1,480 b
P (mg par plant)	0,033 a	0,107 c	0,115 c	0,147 d	0,090 b
K (mg par plant)	3,71 a	9,54 b	26,53 c	25,16 c	8,58 b
Taux de mycorhization (%)	35 a	48 b	50 b	75 c	54 b

⁽¹⁾ Les données d'une même ligne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes d'après les test de Newman-Keul ($p < 0,05$).

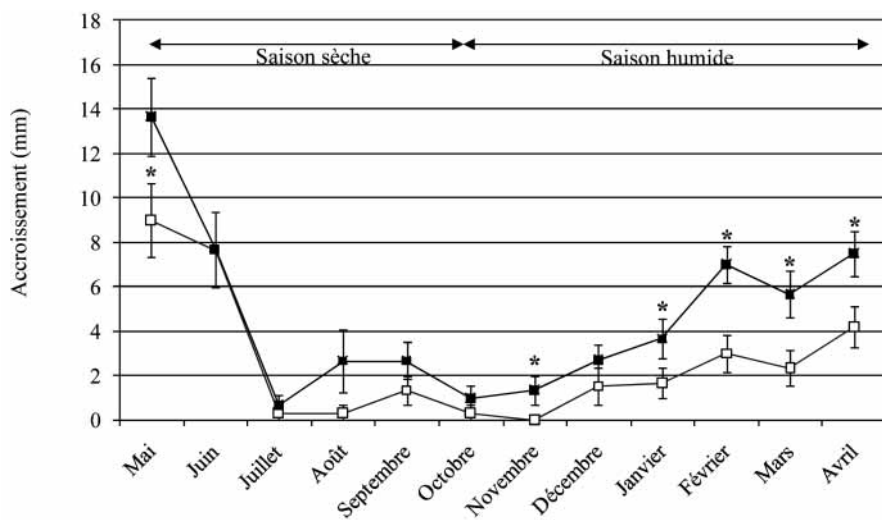


Figure 2.

Accroissement en hauteur des plants de *Cupressus atlantica* préalablement inoculés ou non (plants témoins) par un mélange de champignon mycorhiziens arbusculaires au cours de la première année de plantation.

□ : plants non inoculés, ■ : plants inoculés.

Pour une date donnée, les mesures indexées par un astérisque signifient que les données sont significativement différentes ($p < 0,05$).

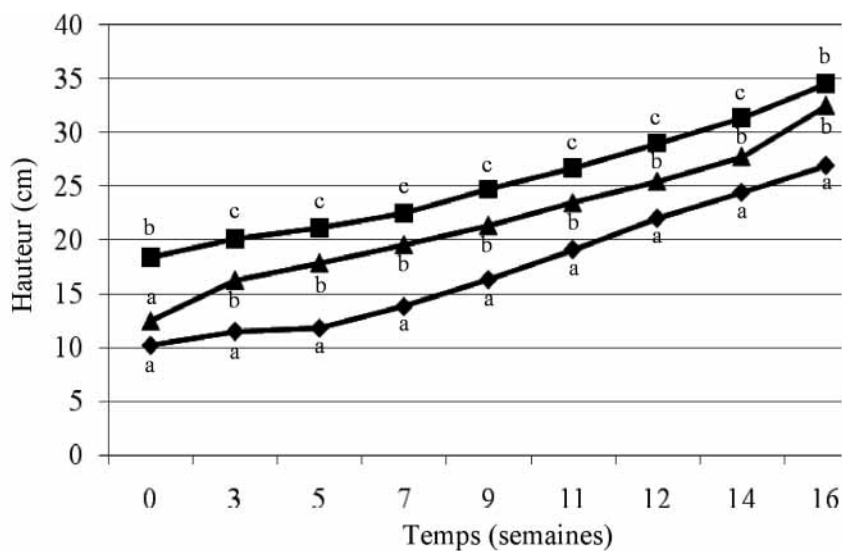


Figure 3.

Evolution de la croissance de *C. arizonica* dans différents traitements.

◆ : *C. arizonica* cultivé seul,

■ : *C. arizonica* cultivé en association avec *L. multifida*

et ▲ : *C. arizonica* inoculé par le champignons mycorhizien *Glomus intraradices*.

D'après Ouahmane et al. (2006b).

Références

- André, S., Neyra, M. & Duponnois, R. (2003). Arbuscular mycorrhizal symbiosis changes the colonization pattern of *Acacia tortilis* ssp. *raddiana* rhizosphere by two strains of *Rhizobia*. *Microb. Ecol.*, 45 :137-144.
- André, S., Galiana, A., Le Roux, C., Prin, Y., Neyra, M. & Duponnois, R. (2005). Ectomycorrhizal symbiosis enhanced the efficiency of inoculation with two *Bradyrhizobium* strains and *Acacia holosericea* growth. *Mycorrhiza*, 15 : 357-364.
- Azcon-Aguilar, C., Palenzuela, J., Roldan, A., Bautist, S., Vallejo, R. & Barea, J.M. (2003). Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. *Appl. Soil Ecol.*, 22: 29-37.
- Barea, J.M., Azcon-Aguilar, C., Azcon, R., 1997. Interactions between mycorrhizal fungi and rhizosphere micro-organisms within the context of sustainable soil-plant systems. In : Gange, A.C., Brown, V.K. (Eds.), *Multitrophic Interactions in Terrestrial Systems*. Blackwell Science, Cambridge, pp. 65-77.
- Bethlenfalvay, G.J. & Schuëpp, H. (1994). Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability. In : Gianinazzi, S., Schuëpp, H. (Eds.), *Impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems*. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 171-313.
- Boucher, D.H., James, S. & Keeler, K.H. (1982). The ecology of mutualism. *A. Rev. Ecol. Syst.*, 13 : 315-347.
- Duponnois, R., Plenchette, C., Thioulouse, J. & Cadet, P. (2001). The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Appl. Soil Ecol.*, 17 : 239-251.
- Duponnois, R., Founoune, H., Masse, D. & Pontanier R. (2005). Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semi-arid site in Senegal : growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity. *For. Ecol. Manage.*, 207 : 351-362.
- Duponnois, R., Plenchette, C., Prin, Y., Ducouso, M., Kisa, M., Bâ, A.M. & Galiana, A. (2007). Use of mycorrhizal inoculation to improve reafforestation process with Australian *Acacia* in Sahelian ecozones. *Ecol. Eng.*, 29 :105-112.
- Duponnois, R. (2008). Nouvelles compositions d'inocula fongiques, leur procédé de preparation et leur application à l'amélioration de la croissance des cultures. Brevet d'invention N°06 06793.
- Fitter, A.H. (1985). Functioning of vesicular-arbuscular mycorrhizas under field conditions. *New Phytol.* 99, 257-265.
- Francis, D.F. & Thornes, J.B. (1990). Matorral : erosion and reclamation. In : Albaladejo, J., Stocking, M.A., Diaz, E. (Eds.), *Soil Degradation and Rehabilitation in Mediterranean Environmental Conditions*. CSIC, Murcia, Spain, pp. 87-115.
- Frey-Klett, P., Chavatte M., Clause, M. L., Courrier, S., Le Roux, C., Raaijmakers, J., Martinotti, M. G., Pierrat, J. C. & Garbaye, J. (2005). Ectomycorrhizal symbiosis affects functional diversity of rhizosphere fluorescent pseudomonads. *New Phytol.*, 165 : 317-328.
- Garbaye, J. (1988). Les plantations forestières tropicales. *Bois & Forêts des Tropiques*, 216 : 23-34.
- Garcia, C., Hernandez, T., Roldan, A. & Albaladejo, L. (1997). Biological and biochemical quality of a semiarid soil after induced revegetation. *J. Environ. Qual.*, 26 : 1116-1122.
- Koide, R. (1993). Physiology of the mycorrhizal plant. *Adv. Plant Pathol.*, 9: 33-54.
- Odum, E.P. (1959). *Fundamentals of Ecology*. Saunders, Philadelphia, 546 pp.
- Ouahmane, L., Duponnois, R., Hafidi, M., Kisa, M., Boumezzough, A., Thioulouse, J. & Plenchette, C. (2006a). Some Mediterranean plant species (*Lavandula* spp. and *Thymus satureioides*) act as potential "plant nurses" for the early growth of *Cupressus atlantica*. *Plant Ecol.*, 185 : 123-124.

- Ouahmane, L., Hafidi, M., Kisa, M., Boumezouch, A., Thioulouse, J. & Duponnois, R. (2006b). *Lavandula* species as a source of arbuscular mycorrhizal propagules facilitating the early development of *Cupressus arizonica*. *Appl. Soil Ecol.*, 34 : 190-199.
- Ouahmane, L., Hafidi, M., Thioulouse, J., Ducouso, M., Kisa, M., Prin, Y., Galiana, A., Boumezzough, A. & Duponnois, R. (2007). Improvement of *Cupressus atlantica* Gaussen growth by inoculation with native arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Appl. Microbiol.*, 103 : 683-690.
- Requena, N., Perez-Solis, E., Azcon-Aguilar, C., Jeffries, P. & Barea, J.M. (2001). Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Appl. Environ. Microbiol.* 67 : 495-498.
- Smith, S. & Read, J. (2008). Mycorrhizal symbiosis, 3rd edn. Clarendon Press, Oxford
- Van der Heijden, M.G.A., Klironomos, J.N., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf-Engel, R., Boller, T., Wiemken, A. & Sanders, I.R. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396: 69-72.

Keep Africa Covered Trees-based options to combat land degradation in the Sudano Sahel: A Contribution to the “Great Green Wall” of the Sahel Program

D. PASTERNAK, A. NIKIEMA, E. HAGLUND AND J. NDJEUNGA
International Crops Research Institute for the Semi Arid Tropics (ICRISAT-Niger)

Abstract

The paper is a contribution from the crops and systems diversification team at the International Crops Research Institute for the Semi Arid Tropics (ICRISAT-Niger). It starts by describing in brief the major causes for land degradation in the Sudano Sahel. The causes are divided into natural and human induced causes. Natural causes are weathering of the soil, droughts and torrential rains. Human induced causes are the result of a crop-livestock production system that exposes the land to wind and water erosion, trees prospecting for firewood, and destruction of young trees sprouts by grazing animals and by bush fires. Wind and water erosion are the main reasons for land degradation.

The paper presents six potential trees systems suitable for the Sudano-Sahel: Traditional agroforestry (parklands), farmers managed natural regeneration (FMNR), *Acacia senegal* plantations, Sahelian Eco-Farm, Bio-reclamation of Degraded Lands and dryland fruit trees plantations. It gives the advantages and constraints of each system and conditions for success. It is recommended concentrating efforts on agricultural lands where most land degradation (desertification) is taking place. The FMNR system seems to be the one to yield best results with minimal investment.

Key words

CULTURAL SYSTEMS, SOIL DEGRADATION, RESTAURATION,
MANAGED NATURAL REGENERATION

Introduction

The Sudano Sahel is the region south of the Sahara delineated by the 300-900 rain Isohyets. It stretches from Senegal by the Atlantic Ocean to Eritrea by the Red Sea. It covers an area of about 12 million km². About 60% of the land of this region is classified as degraded land (Lal, 1988). ICRISAT Niger studied over a period of 20 years the drives for desertification in the Sudano Sahel. These studies served as the basis for the development and improvement of trees-based systems to both stop the land degradation process and to reclaim highly degraded lands.

Causes of land degradation in the Sudano Sahel

Two major causes for land degradation (desertification) in the Sudano Sahel: Natural and human induced.

Natural causes

With the exception of Ethiopia's highlands, the Sudano Sahel is geologically old and its soil is highly weathered. Over the ages tropical and desert climate alternated. When the tropics prevailed acid rains resulted in leaching of soluble bases, phosphorus and nitrogen compounds. Silica was removed and iron and aluminum-rich duricrusts were formed. These are the lateritic soils typical to the tropics. (Lal, 1988). When the tropics retreated the laterite was covered by sand. Both the sandy soils and the laterite have a low pH (4.0-5.5) and are aluminum saturated resulting in aluminum toxicity in many crop species (Woomer *et al*, 1994). Droughts are another 'natural cause' for desertification. The severe droughts that periodically occur in the Sahel result in the death of many perennial plant species thus indirectly bringing about land degradation. The frequent very high rain intensity (up to 200 mm/hr) results in run off and flush floods that erode the soil. This is yet another natural cause for desertification.

Human induced causes

The Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD) clearly demonstrate that most of the land degradation in Africa occurs in agricultural lands (65%), less in the permanent pasture land (31%) and only 19% in the forest and woodland (Sivakumar and Wills 1995).

In the Sudano Sahel agriculture is practiced in the 400-900 mm rainfall region. Efforts to combat desertification should therefore be concentrated in this belt.

The agriculture system of the Sudano Sahel can be described in general as an agro-sylvopastoral system (crops + trees + livestock). Rain-fed annual crops (millet, sorghum, cowpeas and groundnuts) are produced during the “rainy season”. Trees are kept in farmland to provide products such as fruits, vegetables wood and fodder while livestock graze crops residues exposing the predominantly sandy soil to erosion by wind.

Livestock graze young trees and seedlings preventing the establishment of a tree cover. Woodcutting for firewood particularly in the vicinity of cities is also a big threat to the environment.

Dry season bush fires that in most cases are initiated by farmers also destroy trees seedlings.

Overexploitation of the land for crops production without replenishing nutrients through the use of fertilizer or manure (the so called “land mining”) is also a major driver for land degradation (Schlecht et al 2006)

Effects of wind and water erosion in agricultural lands

In the dry season the “Harmatan” blows with speeds up to 70 km/hr. Rainy season sand storms are even more severe. Sterk *et al.* (1996) measured during a three months period soil and nutrient loss due to wind erosion. During this period a total of 45.9 tons/ha of topsoil was lost. The amount of nutrients that were removed equals the recommended rates of fertilizer application for a millet crop in the Sahel.

The main causes for water-induced soil erosion are by order of importance lack of vegetation cover, cultural practices and slope management (Roose, 1989). Bationo *et al.* (1996) summarized measurements of water induced soil erosion in various regions of the Sudano Sahel. The rate of soil loss was a function of water runoff intensity, slope and ground cover. For example in Ouagadougou with an annual rainfall of 850 mm a slope of 0.5% and a runoff rate of 40.6% soil loss in a sorghum field was 10.2 tons/ha.

Both wind and water erosion eventually removes the sand cover exposing the laterite layer. As long as the laterite is covered by sand or when it is protected by vegetation, it is a soft and permeable soil with better properties (water and cation holding capacities) than the sandy soil. When alternately exposed to sun and rain the laterite hardens through aluminum-iron cementation into an impermeable crust that reduces water infiltration and turns the land useless for conventional agriculture exploitation. (Lal, 1988). Crusted laterites comprise most of the degraded lands of the Sudano-Sahel.

Measures to curb land degradation

Wind and water erosion can be controlled either through physical barriers such as stone lines, earth bunding, stone terraces etc or through biological means such as

mulch, hedges, wind breaks (shelterbelts) agroforestry and trees plantations (Reij *et al.*, 1996). Perennial plants are more effective than annuals in nutrient recycling and in improving subsoil conditions. Trees protect the land from both wind and water erosion. Recently Pender and Ndjeunga (2008) conducted a thorough study on the economic, socio-economic and environmental impacts of various approaches for Sustainable Land Management (SLM) in Niger. They demonstrated that trees planting gave the highest economic returns among a range of land management options (area closure, micro-catchments, planting pits etc). The internal rate of return from tree planting ranged from 27-45%.

This article will concentrate on trees as a measure for sustainable land management (desertification control) and for rehabilitation of degraded lands

Trees systems for the Sudano Sahel

TRADITIONAL AGROFORESTRY SYSTEMS

Agroforestry is the predominant agricultural production system in the Sudano Sahel, which allow farmers to grow trees together with annual crops. These trees provide various products; fruits, vegetables, firewood and fodder, which are essential for the livelihood of rural farmers. In a traditional agroforestry system farmers do not plant the trees. They rather allow the regeneration in their croplands of trees that they consider useful. Agroforestry in each agro-ecological zone has its own trees species composition.

Species diversity in agroforestry systems is influenced by ecological and socio-cultural environment. In the West Africa Sudano region the major trees components of the agroforestry parklands are *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Adansonia digitata*, *Tamarindus indica*, and *Faidherbia albida*. The main tree components of agroforestry systems in the Sahelian agroforestry systems are *Acacia senegal*, *Faidherbia albida*, *Sclerocarya birrea*, *Prosopis africana*, *Piliogstima reticulate*, *Ziziphus spina christi* and *Balanites aegyptiaca* (Nikiema, 2005). Even though these species were selected by farmers mostly for their economic benefits they have a significant effect on maintenance of soil fertility and prevention of soil erosion (Sturm, 1997; Ouedraogo, 1995). Agroforestry parkland is a traditional agricultural land use system that is sustainable as long as the overexploitation by increasing population does not prevent restoration of soil fertility and vegetation cover. Table 1 that was compiled by Nikiema (2005) gives the main trees species present in the Sudano Sahel parklands. It ranks them according to their importance to farmer, the frequency of their presence and the degree of threat for their extinction. Recommendations are given for steps to be taken to ensure sustainability.

FARMERS MANAGED NATURAL REGENERATION (FMNR)

FMNR is an exciting new approach for tree regeneration in the Sudano Sahelian region. This technology is based on encouraging the natural regeneration of trees as an alternative to reforestation efforts using nursery-raised trees or direct seeding. The practice was introduced in the 1980's by an NGO called SIM-Maradi (Rinaudo 2007) and its spread in the Maradi-Zinder region has been largely spontaneous, *with*

Table 1.

Species presence, uses and needs for management actions in the agroforestry parklands:
 H= high; M= medium; L= low; - = not available; ● = Farmer's managed natural regeneration;
 ○ = Planting and/or direct seeding; * = Tree management.
 (Source: Nikiema 2005 modified)

Species	Market value	Presence in parklands		Present in Natural Forest		Sensitivity to threats		Proposed actions in the parklands	
		Sah	Sud	Sah	Sud	Park-land	Forest	Sah	Sud
<i>Acacia macrostachya</i>	M	M	L	M	-	H	L	●○*	○
<i>A. senegalensis</i>	H	M	L	L	-	H	L	●○*	○*
<i>Adansonia digitata</i>	H	M	L	M	L	H	M	○*	○*
<i>Annona senegalensis</i>	L	-	L	-	L	H	H	●	*
<i>Balanites aegyptiaca</i>	L	M	L	L	L	M	L	●*	*
<i>Bombax costatum</i>	H	L	M	L	L	H	M	○*	○*
<i>Borassus aethiopum</i>	H	-	L	-	L	H	M		○*
<i>Detarium microcarpum</i>	L	-	L	-	M	H	L		●*
<i>Diospyros mespiliformis</i>	L	L	M	-	L	M	L	○	○*
<i>Ficus sycomorus</i>	L	L	-	-	L	H	H	○*	○*
<i>Parkia biglobosa</i>	H	L	M	-	L	H	M	○*	○*
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	L	L	L	L	M	H	H	○*	○*
<i>Saba senegalensis</i>	H	-	L	-	M	H	L	○*	○*
<i>Sclerocarya birrea</i>	L	M	L	L	L	M	H	○*	○*
<i>Tamarindus indica</i>	H	L	M	-	L	H	L	○*	○*
<i>Vitellaria paradoxa</i>	H	H	H	-	H	L	L	○	●*
<i>Vitex doniana</i>	L	-	-	-	L	H	L		○
<i>Ziziphus mauritiana</i>	M	L	L	L	L	M	M	●	●

minimal external assistance. The area covered today by trees from FMNR is estimated to be more than 3 million hectares (Larwanou *et al*, 2006). FMNR is based on pruning and protection of regenerated trees from seeds or from trees sprouts. ICRISAT with the assistance of Bioversity International and World Vision is carrying a survey in the Maradi zone to identify the drivers behind this exceptional rate of adoption of a technology. We are presenting here preliminary results of this survey. These results still need final verification.

For the purposes of this study, FMNR was defined as the practice of pruning and protecting naturally occurring seedlings and/or sprouts with the goal of encouraging

the establishment of mature trees. The survey data indicate that 93 percent of households practice pruning, 27 percent practice protection, and 26 percent practice both (those we define as FMNR practitioners or adopters).

A Note on the Survey Methodology

The survey data was gathered during the month of April 2008, in Niger's Maradi region where a number of development programs have promoted FMNR. Secondary data were used to stratify all villages in the region according to market access (greater or less than 6 km from village) and agro-climatic zone (growing period of greater or less than 75 days). The sample of 41 villages to be surveyed was drawn in proportion to the number of villages in each stratum. Within each stratum, an equal number of program and non-program villages were selected at random¹. Ten households² per village were selected by random draw for a detailed interview. Overall, 410 households participated.

Initial Results

Tree Preferences

The level of importance that farmers place on different tree species is assessed using a methodology adapted from Tschakert's (2006) study of Sahelian farmers' views on climatic and other stressors. Respondents were asked to list the most important trees for the well being of their household among the trees found in their fields. After generating a list of species, respondents were asked to rank their choices from most to least important. For each species mentioned, an incidence index (I) was calculated, ranging from zero to one, representing the proportion of participants who identified that particular species. Additionally, an importance index (P) was calculated based on the order in which the species was ranked. The importance index of species s to respondent i is defined as:

Where r_s is the rank of the species and n_i is the total number of species listed by that participant. The mean of P_s was then calculated for the subset of respondents who listed the particular species. These two indexes were combined into a joint, "value index", V , using the equation:

The ten most valuable species, in rank order of value index, are presented in the table below. The final column gives, in order of frequency reported, the most commonly reported used of each species.

Economic aspects

The table below summarizes some preliminary results on the impact of adoption of FMNR on several livelihood outcomes. Two estimation techniques were used. Propensity Score Matching (PSM) is a technique that "matches" similar farmers based

1. "Program" and "non-program" villages refer to villages where FMNR has been formally promoted by a program or project.

2. Researchers familiar with this part of the world have found it problematic to perform these kinds of analyses at the level of the "household", given the complexities of polygamous and broadly defined families. The "production unit" is an often-used alternative, defined as family members who work together in the same fields. The distinction between this and other common definitions of the household (e.g., that used by the FAO, 2003) is that the production unit is defined by the sharing of productive resources rather than the sharing of consumption good. Throughout this discussion, household and production unit should be considered as synonymous.

Table 2.
Value index, Incidence index and Importance index
for most common trees species in farmer's fields

Scientific Name	Most Commonly Reported Uses	Value Index (rank)	Incidence Index (rank)	Importance Index (rank)
<i>Ferdherbia albida</i>	1. Animal food 2. Fuel 3. Construction 4. Dye	.5136837 (1)	.6878049 (2)	.6610343 (8)
<i>Piliostigma reticulate</i>	1. Animal food 2. Fuel 3. Construction 4. Medicine	.5116776 (2)	.7121951 (1)	.6081176 (15)
<i>Guiera senegalensis</i>	1. Fuel 2. Medicine 3. Construction 4. Animal food	.4256825 (3)	.6146342 (3)	.5561206 (20)
<i>Balanites aegyptiaca</i>	1. Human food 2. Fuel 3. Construction 4. Animal food	.240623 (4)	.3658537 (4)	.4795564 (29)
<i>Azadrachta indica</i>	1. Construction 2. Fuel 3. Medicine	.2012786 (5)	.2731707 (6)	.6428227 (11)
<i>Combretum glutinosum</i>	1. Fuel 2. Construction 3. Animal food 4. Medicine	.183944 (6)	.2926829 (5)	.4088481 (38)
<i>Prosopis africana</i>	1. Animal food 2. Construction 3. Fuel 4. Medicine	.1657454 (7)	.2292683 (7)	.616744 (13)
<i>Sclerocaria birrea</i>	1. Fuel 2. Animal food 3. Human food 4. Medicine	.1381296 (8)	.2243902 (8)	.3755094 (42)
<i>Boscia senegalensis</i>	1. Fuel 2. Animal food 3. Human food 4. Medicine	.1332003 (9)	.2195122 (9)	.3520145 (47)
<i>Acacia nilotica</i>	1. Fuel 2. Medicine 3. Construction 4. Animal food	.1317911 (10)	.2170732 (10)	.3528999 (46)

on observable characteristics and then makes one-to-one comparisons between adopters and their matched non-adopters³. Econometric estimation involves constructing a model specifying the effect of marginal changes in explanatory variables on the outcome variable of interest (in this case, the livelihood outcome, using FMNR adoption as one of a set of explanatory variables). A precise theoretical model must underlie econometric estimates for them to be considered as valid, a step that has not been taken here. These econometric estimates are merely intended as a very rough way of checking the PSM results for consistency. The results of the two techniques are not identical, but the table below demonstrates that they are generally consistent in sign and magnitude.

All figures below refer to the 2007-2008 agricultural season.

From these preliminary results it appears that the FMNR has a significant positive economic impact for the practicing households (higher yields, higher income), this probably being the major driver for the adoption of this practice

*Table 3.
Impact of FMNR on a number of economic indicators at the household level*

Variable (unit)	PSM Estimates			Econometric Estimate
	FMNR Practitioners	Non-Practitioners	Difference	Difference II
Tree Density on Farmland (trees/ha)	45,573	29,252	16,321**	15,255**
Annual Gross Income per Capita (FCFA)	100,048	63,474	36,573**	34,049**
Annual Total Value of Crop Production per Hectare per Capita (FCFA)	12,959	8,918	4,041**	2304.32*
Annual Cereal Production per Capita (kg)	233.6	157.1	76.5**	39.9
Annual Value of Wood Production per Hectare (FCFA)	4,107	2,607	1,499	1,358**
Total Value of Livestock Holdings (FCFA)	466,130	534,651	-68,520	-30,953
Total Value of Household Assets (FCFA)	365,969	379,322	13,352	62,708

* - difference significant at 90% confidence level
 **-. difference significant at 95% confidence level

3. The matching method and other specifications can greatly impact the final results. The results produced here used a radius matching method and a "minima-maxima" comparison to impose common support. See Caliendo and Kopeinig (2005) for more on PSM.

ACACIA SENEGAL PLANTATIONS

Acacia senegal is a drought tolerant tree of the family *Mimosaceae* native to the Sahelian and Sudano-Sahelian regions of Africa. In many Sahelian countries *A. senegal* plantations is initiated by programs and projects for reclamation of degraded land and for generation of income from gum arabic production. Gum arabic is defined as the dried exudates from the trunk and branches of *Acacia senegal*, *A. leata* or *Acacia seyal*. The gum of the latter species is of lower quality than the gum of *A. senegal* and is collected from wild plants only. Gum is produced only under the stressful conditions typical to the dry season of the Sahel. Thus the Sahel has a competitive advantage for the production of gum Arabic over other regions of Africa. The main producers of gum arabic are Sudan, Chad, Nigeria and Niger but the potential area of production covers the entire Sahelian belt.

Currently *A. senegal* is the major plantation tree in the Sahel. It takes between 3-5 years from planting *Acacia* trees to gum production. Production peaks after 15 years and remains stable for 10 additional years. Coppicing the trees at this latter age will result in the rejuvenation of the plantation. The International market for gum Arabic is estimated at 80,000 metric ton per year. *This means that significant expansion of the area planted with Acacia senegal must be accompanied by a significant growth in gum arabic demand.* Gum arabic exports are growing at a pace of 5% a year.

At an average value of \$2,000/ton this gives a total international market of \$160 million. Most of the income from gum Arabic goes into the hands of traders and processors. Producers can get as little as 50 FCA per kg (Macrae and Merlin, 2002). There is huge variability in gum production among various provenances. The accepted annual gum yield for a Sahelian tree is about 150 g. However yields up to 4 kg/tree have been reported in Chad (Macrae and Merlin, 2002).

Nikiema and Pasternak (2008) compared gum yields from 10 years old local trees with that of 10 years old trees of a Sudanese provenance and found out that the local trees produced on the average 50 g/y of gum whereas average yield of the Sudanese provenance was 400 g/y.

The current low gum yields in the Sahel and the low prices received by producers do not justify planting commercial plantations of A. senegal.

A typical plantation with a density of 400 trees/ha gives after 7 years from planting an average yield of 50 kg. At a maximum value of 400 FCFA/kg, the total value from one-hectare plantation will be only 20,000 FCFA that is about half the value for an average yield of millet. *A. senegal* plantations have additional benefits such as firewood, improved soil fertility resulting in increased forage, and feed value from the *Acacia* seeds and pods.

ICRISAT-Niger started on 2003 a long-term research project aiming at increasing gum production leading to the improvement of the profitability of *A. senegal* plantations.

Selection of superior germplasm

About 200 ten-years old *A. senegal* trees from Sudan were randomly selected in a commercial plantation near Niamey. Gum yield was sampled from these trees during

four consecutive years. Results are presented in Figure 1. Four years average yield of 9 elite trees ranged from 500 to 900 grams compared with 350 g/tree-the average yield of the whole plantation.

Scions taken from the plus trees were grafted on local *A. senegal* seedlings and grafted trees were planted in 2006 at ICRISAT station for yield evaluation. Gum arabic harvesting from the grafted plants started in 2009 three years after planting.

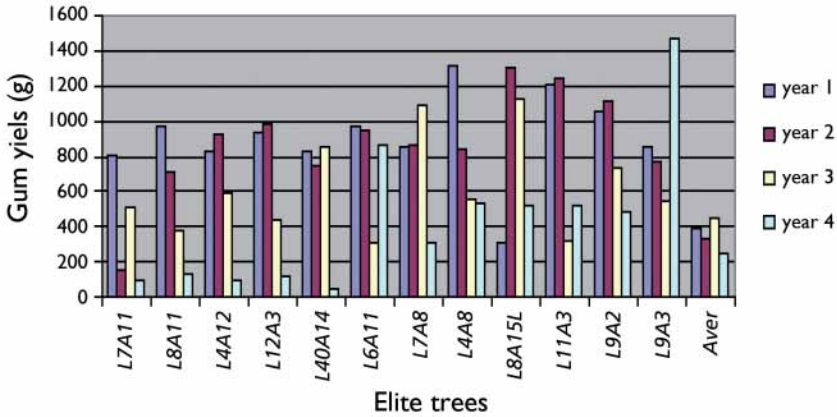


Figure 1.

Gum Arabic yield from 9 elite trees in a commercial plantation compared with the average of the 300 sampled trees (from Nikiema and Pasternak, 2008)

Effect of Ethylene

Bhatt and Ram (1990) demonstrated that application of Ethylene in the form of Ethepon markedly increased gum arabic yields of *A. senegal* trees.

Current trials using local Acacia trees (Nikiema and Pasternak, 2008) show that Ethepon can more than double gum yields of local provenances (Fig.2).

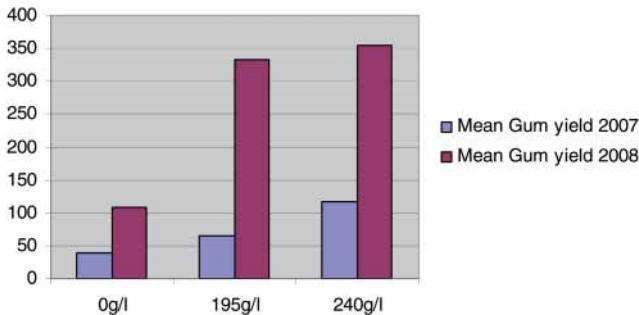


Figure 2.

Effect of three concentrations of Ethepon on Gum Arabic yields (grams) over a two years' period

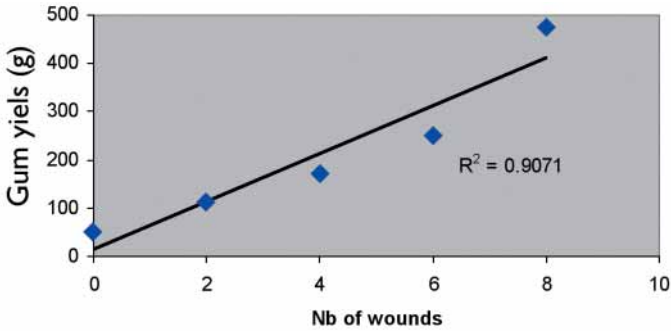


Figure 3.
Relationship between number of wounds inflicted on *A. senegal* trees and gum arabic yield

In spite of the fact that *A. senegal* is an old tree crop there is not enough information on best management practices for this tree in a plantation. One of the important questions is the effect of the number of wounds per trees on gum arabic yield.

As it can be seen in Figure 3, there was a liner correlation between the number of wounds inflicted on 10 m years old trees and gum arabic yield

The above work indicates that there is good scope for significantly increasing gum yield in *A. senegal* plantations. It appears that a yield of 400 kg/ha is attainable. This should give an annual revenue of 160,000 FCFA/ha. If and when and this goal will be reached *A. senegal* plantations will become a feasible undertaking.

SAHELIAN ECO-FARM (SEF)

ICRISAT-Niger is developing new tree-based agriculture production systems with the objective of arresting land degradation while increasing household income. One of these systems is called the Sahelian Eco-Farm (SEF).

The SEF is a rain-fed trees-crops production system. Two models were developed: Model 1 comprising the domesticated *Ziziphus mauritiana* called “Pomme du Sahel” planted inside micro-catchments (demi lunes) and intercropped with high value annuals. In the Sahel these annuals are dual-purpose cowpeas and watermelons.

Model 2 comprising of hedges of *Acacia coleii* and of Pomme du Sahel intercropped with traditional crops such as pearl millet and dual-purpose cowpeas. The objectives of the *A. coleii* hedges are to reduce wind erosion, increase soil fertility and provide renewable firewood.

After six years of research, an analysis was carried out to compare the economics of the two systems with that of a traditional pearl millet-cowpeas system. The results are given in Fig. 4.

The Net Present Value of model 2 over a time horizon of 50 years is not different than that of a traditional millet-cowpeas system. However model 1, because of the incorporation of high value crops, is much more profitable than traditional systems and its adoption should be encouraged.

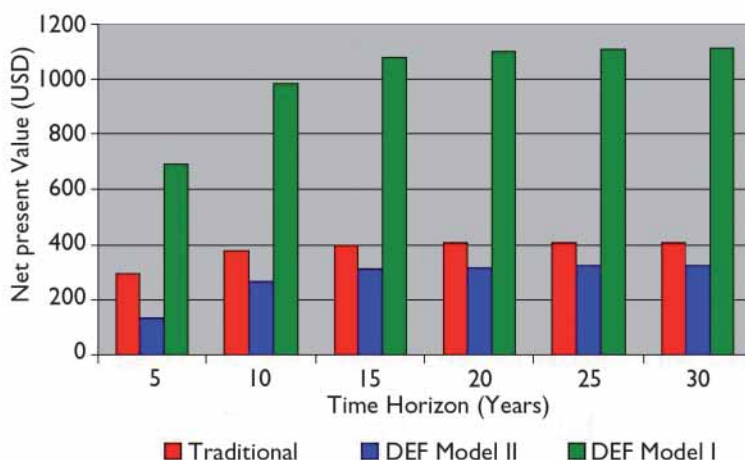


Figure 4.
Net present value of the two SEF models
compared with traditional pearl millet-cowpeas system

BIORECLAMATION OF DEGRADED LANDS (BDL)

Crusted laterites occupy much of the landscape of the Sudano-Sahel. Productivity of these degraded lands is very low because the crust prevents water infiltration. This land is used for grazing and for firewood harvesting. The degraded laterites are potentially more fertile than the prevailing sandy soils and also hold more water than the sand.

One can distinguish two types of laterites: Hard laterites and soft laterites. The hard laterites are difficult to cultivate. These can be used for trees plantations. Soft laterites should be selected for the BDL.

Indigenous technologies such as planting pits (called Tassa in Niger or Zaï holes in Burkina Faso), micro-catchments called demi-lunes and trenches that harvest run-off water have been developed over the years and are slowly expanding in Burkina Faso and in Niger (Reij et al 1996). The Zaï hole is the most popular of these technologies. Tender and Ndjeunga (2008) found out that the water harvesting technologies used in Niger have a low internal rate of return probably due to the high cost-benefit ratio. Digging of zaï holes and preparing demi-lunes are labor consuming and the monetary return received from the coarse grains is relatively low.

In the BDL these structures are used to grow high value crops that give a high monetary return. The two main trees planted in the demi-lunes are Pomme du Sahel and *Moringa stenopetala*. This *Moringa* originates in Ethiopia and can grow and produce when planted in the demi-Lunes without the need of supplementary irrigation. The main vegetable species that are intercropped in zaï holes among the trees are okra and roselle. Additional species such as pigeon pea, sesame and cassava are being tested.

The BDL gives a good opportunity for Sahelian women to own land. In this region women usually do not have ownership rights for croplands but can receive from the village authority patches of degraded lands.

A 3-5 hectares plot of degraded land at the vicinity of the village is identified and fenced. Soil is scarified and the demi-lunes, trenches and zai holes are constructed and planted. Each woman cultivates her individual plot (about 300 m²) inside the BDL complex.

The BDL is still under development. Only data for annual crop yields are available. Okra yields from women fields were 1000 kg/ha. At 200 FCF per kg of okra the revenue from the okra can be as high as 200,000 FCFA /ha. It is estimated that when Moringa and PDS will start bearing fruit the revenue per hectare could amount to 400,000Fcf.

This system has high potential for dissemination because of the relatively low set up cost. It is easy to manage and it provides women a source of livelihood.

DRYLAND FRUIT TREES PLANTATIONS

In the savannah and the Sudano regions of Africa one can find large areas covered with two fruit trees crops; cashew (*Anacardium occidentale*) and mango (*Mangifera indica*). The nuts of the cashew are being processed and exported in increasing quantities. In the region of Bobo Dioulassou in Burkina Faso a new fruit-juice company called Dafani is purchasing all the mango fruit produced in the area for juice production.

Dryland fruit trees plantations can also be established in the Sudano Sahel region using hardy fruiting tree species. Their fruit could be processed into juices, nuts and oils. The three most promising species are: Tamarind (*Tamarindus indica*), marula (*Sclerocarya birrea*) and Pomme du Sahel (*Ziziphus mauritiana*).

Tamarind is a large tree belonging to the Caesalpinaceae family. Its pods are used for juices and sauces seeds are used for gum production. Tamarindus juice is very popular in many markets of the world. The wild tamarind has a sour fruit. However the sweet tamarind varieties selected in Thailand are superior in taste and apparently also in yield.

Sclerocarya birrea is a wild tree of Africa semi arid tropics. It is very drought tolerant and grows in regions of 300 mm/y rainfall. The juice is very tasty and rich in Vitamin C and in antioxidants. The kernels have high oil content (about 50%). This oil is used in cosmetics. The kernels are eaten as nuts.

The domesticated *Ziziphus mauritiana* called "Pomme du Sahel" can grow in regions of 500 mm rain/y and above without irrigation. A mature dryland tree can produce about 15 kg of fruit per year. The juice of PDS is tasty and high in vitamin C.

The fruit of the above tree species can be processed into juices, dried fruit, oil and nuts.

If a viable industry to utilize the products of these trees is put in place than fruit tree species could be planted over a large area of the Sudano-Sahel.

Discussion and conclusions

Massive tree planting or tree regeneration should have a very significant impact in combating desertification in the Sudano Sahel.

We will try here to lay down some principles to improve the success of tree planting in the Sudano-Sahel region.

Increased tree population should be implemented mostly in the agriculture production area of the Sudano Sahel (rainfall from 400-900 mm/y) because agriculture practices are the major drive for desertification.

Tree planting should be done in a diversified manner. Either as components of traditional agroforestry systems, as pure plantations of high value trees, and as components of new trees-crops system

The practice of community plantations should be reconsidered. The failure or only part success of many past trees plantations was due to communal ownership, taking away the responsibility from the individual for tree maintenance and protection

The Farmers Managed Natural Regeneration (FMNR) process that is spreading in eastern Niger is perhaps the easiest, cheapest and most sustainable option for augmentation of the tree population in the Sudano Sahel.

The traditional agroforestry systems of the Sudano Sahel can be improved through grafting of superior germplasm into existing trees, by increasing the number of trees in the system and by adding additional high value trees.

Sufficient research resources should be allotted to help the finalization of the current research with *Acacia senegal* aiming at the increase in gum arabic yield per tree and the identification of best practices for gum tapping. This research can be completed in a short period of time. If results will be as expected than a massive drive for the establishment of *profitable A. senegal* plantations should be undertaken. Additional effort should be given to solving the problem of the current high transaction costs in the gum arabic trade.

Pilot programs for testing the new integrated trees-crops system (SEF and BDL) developed at ICRISAT should be undertaken. The BDL in particular is a very exciting approach for combating desertification because it integrates land reclamation with women empowerment, improved nutrition and increasing income.

References

- Bationo, A., Buekert, M. P., Smaling, E. M. A. and Visker, C. 1996. Technologies for restoring soil fertility. In A. Uzo Mokwunye, A. de Jager and E.M. A. Smaling (eds). Restoring and Maintaining the Productivity of West African Soils: Key to Sustainable Development>IFDC-Africa, LEI-DLO and SC-DLO. Miscellaneous Fertilizer Studies No. 14. International Fertilizer Development Center.
- Bhatt-J. R.; H.Y.M. Ram 1990. Ethephon-induced gum production in *Acacia senegal* and its potential value in the semi-arid regions of India. *Current-Science* 59: 1247-1250
- Caliendo, M. and S. Kopeinig. 2005. Some Practical Guidance for the Implementation of Propensity Score Matching. IZA Discussion Paper No. 1588.
- FAO. 2003. *Advancing assisted natural regeneration (ANR) in Asia and the Pacific*. Accessed online at <<http://www.tssconsultants.com/Files/ANR.pdf>> on December 1st, 2008.
- Lal, R. 1988. Soil degradation and the future of agriculture in sub-Saharan Africa. *J. Soil and Water Conservation* 43: 445-451
- Larwanou, M., M. Abdoulaye, C. Reij. 2006. *Etude de la Régénération Naturelle Assistée dans la Région de Zinder (Niger)*. USAID/EGAT and IRG, 48 p.
- Macrae, J and Merlin, J. 2002. The Prospects and Constraints of Development of Gum Arabic in Sub-Saharan Africa. Report submitted to World Bank
- Nikiema, A. 2005. Agroforestry parkland species diversity: uses and management in semi-arid West Africa (Burkina Faso). PhD thesis, Wageningen University. 102 pp.
- Nikiema, A. and Pasternak, D. 2008. Intensification of *Acacia senegal* plantation in the Sahel. Annual Report submitted to the International Foundation. ICRISAT, Patancheru, A.P.
- Ouedraogo, S.J. 1995. Les parcs agroforestiers au Burkina Faso. Rapport AFRENA/SALWA No 79, ICRAF, Nairobi, Kenya. 76 pp.
- Reij, C. Scoones, I. and Toulmin, C. 1996. Sustaining the Soil. Indigenous Soil and Water Conservation in Africa. Earthscan Publications Ltd. UK. 260 pp.
- Rinaudo, T. 2007. The Development of Farmer Managed Natural Regeneration. *Lisa Magazine*, 23(2), June 2007, pp. 32-34.
- Roose, E. Gestion conservatoire des eaux et la fertilité des sols dans les paysages Soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. ICRISAT, Soil, Crop and Water Management systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahel zone> Proceedings of an International Workshop, 1-6 Jan.1987. ICRISAT Sahelian Center, Niamey, Niger, A. P. 502324, India
- Schlecht, E., Buekert, A., Tielkes, E. and Bationo, A. 2006. A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 76: 109-136
- Sivakumar, M. V. K. and Wills, J. B. (eds.) 1995. Combating Land Degradation in sub-Saharan Africa: Summary proceedings of the International Planning Workshop for a Desert Margins Initiative.
- Sterk, G.,Hermann, L. and Bationo A. 1996. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation and Development* 7: 325-335.
- Sturn, H. J. 1997. The importance of agriculture parks for soil fertility management. In, G. Renard, A. Neef, K.Becker and M. von Oppen (eds.) *Soil Fertility Management in West Africa Land Use systems*. Mrgraf Verlag, Weikersheim, Germany. pp. 293-298.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

Tender, J. and Ndjeunga, J. 2008.
Impact of Sustainable Land Management
Programs on Land Management and Poverty
in Niger (69 pp). Submitted to the World Bank
TerrAfrica and the PAC programs.

Tschakert, P. 2006.
Views from the Vulnerable: Understanding
Climatic and other Stressors in the Sahel.
Global Environmental Change, vol. 17 : 381-396.

Woomer, P. L., Martin, A.,
Albrecht, A., Resck, D. V. S.
and Sharpenseel, H. W. 1994.
The importance
and management of soil organic
matter in the tropics.
In. P.L. Woomer and M.J. Swift (eds)
The Biological Management
of Tropical Soil Fertility.
John Willey and Sons.

The Native Shrubs *Philiostigma reticulatum* and *Guiera senegalensis*: The unrecognized Potential to Remediate Degraded Soils and Optimize Productivity of Sahelian Agroecosystems

R.P. DICK

School of Environment and Natural Resource, Ohio State University, Columbus, OH, USA

M. SENE

Sciences du Sol, Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
(ISRA)/ CERAAS, BP 3320 Thiès : Escale, Thiès, Sénégal

M. DIACK

University of Gaston Berger, St. Louis, Sénégal

M. KHOUMA

UNOPS Dakar, Sénégal

A. BADIANE

USAID/ Sénégal, Dakar, Sénégal

S.A.N.A SAMBA

University of Thiès, Thiès, Sénégal

I. DIEDHIOU

University of Thiès, Thiès, Sénégal

A. LUFABA

World Bank, Washington, D.C. USA

E. DOSSA

International Fertilizer Development Center, Accra, Ghana

F. KIZITO

California Water Board, Davis California, USA

S. DIEDHIOU

Oregon State University, Department of Crop and Soil Sciences, Corvallis, OR USA

J. NOLLER

Oregon State University, Department of Crop and Soil Sciences, Corvallis, OR USA

M. DRAGILA

Oregon State University, Department of Crop and Soil Sciences, Corvallis, OR USA

Abstract

The global objective of this study was to determine the unrecognized role of shrubs as key determinants in sequestration of C, water relations, and soil degradation mitigation in semiarid climatic regimes of Senegal that are representative of much of Sub-Saharan Africa. The results showed that shrubs are the dominant controllers of hydrology, C biomass on the landscape, microbiology, and crop productivity in agroecosystem of Senegal. The major findings were:

- Shrubs residues decompose rapidly enough to allow non-thermal management.
- Shrub residues promote crop growth but it takes 2 years of incorporation before beneficial impacts on crops were measured.
- Both shrubs are doing hydraulic lifting of water from wet subsoils to dry surface soils
- Shrubs are non-competitive with crops for water and increase water and nutrient efficiency.
- During periods of excess rainfall shrubs promote groundwater recharge and therefore reduce surface runoff losses.

G. senegalensis had the most profound impact on yields which after four cropping the declining yields in the absence of crops resulted in a 242% difference in yield between plots with and without this shrub. These positive impacts occurred even in the absence of fertilizer applications

Key words

PILIOSTIGMA RETICULATUM, *GUIERA SENEGALENSIS*,
SOIL REMEDIATION, SAHEL, CROP PRODUCTIVITY

Introduction

The Sahel is experiencing landscape and soil degradation that reduces food and economic security of rural, underprivileged communities that depend on ecosystem services. In cropped fields, the Parkland system of randomly distributed trees is an approach to address these challenges. However, trees are slow growing and can compete with crops for water and nutrients. Conversely, two native shrubs, *Piliostigma reticulatum* and *Guiera senegalensis*, coexist in farmers' fields throughout the Sahel and until recently have been largely overlooked components of parkland systems in semi-arid Sub-Saharan Africa (Lufafa *et al.*, 2005).

Organic matter input to the soil has been shown to be critical for improving soil quality and optimizing nutrient and water efficiencies, and ultimately crop productivity in these degraded agroecosystems (Woomer *et al.*, 1994; Sanchez *et al.*, 1997; Badiane *et al.*, 2000; Sinaj *et al.*, 2001; Tschakert *et al.*, 2004). Various non-indigenous

vegetative systems to increase organic matter input to soils of the Sahel have been proposed, but received limited rates of adoption due to socio-economic constraints (Rhoades, 1997; Buresh and Tian, 1998; Bationo and Buerkert, 2001). Consequently, technologies that build upon farmers' indigenous practices are most likely to have greater impact at the landscape level which is the case for these shrubs being locally available. Unfortunately, the current management, to coppice and burn the shrub biomass each spring to prepare for the cropping season, is not utilizing this organic matter effectively.

Our team hypothesized that these two shrubs would be much more important than trees or other organic inputs such as animal manure at the landscape level in regulating C inputs/sequestration and hydrologic processes. *Therefore the global objective was to determine the unrecognized role of shrubs as key determinants in sequestration of C, water relations, and soil degradation mitigation in semiarid climatic regimes of Senegal that are representative of much of Sub-Saharan Africa.*

Results & Discussion

Carbon Stocks and Plant Biomass of Native Shrubs as Landscape Levels

LANDSCAPE LEVEL CARBON AND BIOMASS

Accurate and reliable estimates of carbon (C) storage in landscapes are critical to the development of effective policies and strategies to mitigate atmospheric and climate change. Carbon stocks of two native woody shrubs (*Guiera senegalensis* J.F. Gmel and *Piliostigma reticulatum* (DC.) Hochst) communities and associated soils within Senegal's Peanut Basin were determined and the spatial structure of soil C quantified.

Peak-season shrub biomass C was measured in forty-five fields in 0.81 ha sampling plots at 8 villages across the Peanut Basin of Senegal. Direct density counts were supplemented with allometric calculations to determine biomass per hectare. Soil samples to a depth of 20 cm were taken and analyzed for total C using a Leco C analyzer at 4 sites.

Table 1 shows that organic C and N as well as total P is higher beneath the canopy than outside the influence of the canopy. This follows the concept of islands of fertility or spatial patchiness of nutrients due to woody vegetation in unmanaged arid and semiarid environments (Schlesinger et al. 1996). The increased soil organic matter beneath the shrubs are likely due to the greater litter input and the root turnover. This show the ability of shrubs to remediate degraded soils.

Estimates of peak-season aboveground biomass C ranged from 0.9 Mg C ha⁻¹ to 1.4 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ with an overall mean of 1.12 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in the *G. senegalensis* sites and from 1.3 to 2.0 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in the *P. reticulatum* communities. The dominant crop residues are peanut for which the aboveground biomass is entirely

harvested for livestock forage and pearl millet residue of which 50-100% is removed or consumed by livestock (0 to $\sim 0.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) (Badiane *et al.*, 2000). Thus this leaves only animal manure as a source of organic inputs which based on Badiane *et al.*'s (2000) field surveys showed a typical amount of $0.048 \text{ Mg manure-C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (based on being evenly spread on all millet fields of a village or 50% in a given year). Although trees practically contain more biomass C than do the shrubs (Tschakert *et al.*, 2004; Woomer *et al.*, 2004), the overall fraction of tree C applied to soils is only the leaf material whereas in theory, the entire shrub aboveground biomass could be returned to soils upon pruning. Furthermore, these current measurements (0.9 to $2.0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) are based on current shrub densities of (200-600/ha) which is relatively low (we have done studies as reported below that have 1200 plants/ha). **Consequently, our results show that not only are these shrubs the dominant C source to soils in the Peanut Basin of Senegal, but with optimized densities have great potential to more than double the C inputs.**

Lufafa *et al.* (2005), showed the potential distribution of the shrubs across the Peanut Basin to have approximate areal coverages of 2.34×10^6 and 9.14×10^5 ha, respectively, for *G. senegalensis* and *P. reticulatum*. Tottrup and Rasmussen (2004) reported an average cultivation density of 49% in sections of the Peanut Basin in 1999. Using this rather conservative cultivation density estimate and areal coverage of the shrubs reveals that these systems annually lose about $3.51 \times 10^5 \text{ Mg}$ of biomass C, an equivalent of $2.11 \times 10^5 \text{ Mg}$ of CO_2 per year (Brady and Weil, 1999).

LANDSCAPE BIOMASS ESTIMATING MODELS

Allometric equations and community biomass stock estimating models are needed as a means to quickly assess the biomass of *Guiera senegalensis* J.F. Gmel and *Piliostigma reticulatum* (DC.) Hochst (Pr). **This is important not only for research but ultimately to develop optimized management systems and to be able to verify C levels for Carbon Trading Schemes.** In Year 1, best predictors of aboveground biomass were height and number of stems (*G. senegalensis*) and crown diameter (Pr); and for belowground biomass were height and basal diameter (Gs) and basal diameter (Pr). In Year 2, height and crown diameter were the best predictors of aboveground biomass (R^2 1/4 0.90 for *G. senegalensis* and 0.87 for Pr), whereas basal diameter and number of stems (Gs) and basal diameter (Pr) were best predictors of belowground biomass. Peak-season biomass estimates ranged from 0.44 to 4.58 ton ha^{-1} (mean - 1/4 2.38 Mg ha^{-1}) in the *G. senegalensis* sites and from 0.33 to 7.38 ton ha^{-1} (mean 1/4 3.71 Mg ha^{-1}) in the *P. reticulatum* communities. Both species exhibited unusually large root:shoot ratios (4.5:1 for *G. senegalensis* and 10.2:1 for Pr). Although models differ between years, allometric relationships provide reasonable biomass estimates for *G. senegalensis* and *P. reticulatum*.

Water Balance and Hydrology of Native Shrubs

WATER RELATIONS

Soil water is an important resource that imposes limitations on optimal plant performance in semiarid regions. In the Sahel, shrubs are a component of farmers'

fields and would be expected to affect water relations with the adjacent crops. Consequently, a 2-year study on soil water dynamics and shrub rooting patterns was conducted during the dry season and transition into the wet season with fields having Pearl millet intercropped with shrubs.

Millet roots predominantly exploited the 0.2–0.5m depth with 95% of shrub roots in the upper 0.5 m. Soil volumetric water content (soil water content) decreased with greater radial distance from shrubs up to 2m but progressively increased with soil depth. During the dry season, soil surrounding shrub roots was consistently wetter than adjacent bare soil. Soil moisture content declined steadily in the 0.9–1.2m depth range due to depletion by shrub roots. On the contrary, the 0.2 and 0.4m zones had slight increases in soil moisture which could be attributed to soil water redistribution by shrub roots (Kizito *et al.*, 2009).

During the rainy season, shrub presence had a considerable impact on the fate of the field soil moisture regime with shrub roots serving as pathways for deep profile recharge. Shrubs exploited the deeper profile (0.9–1.2 m) as opposed to the Pearl millet (0.2–0.5 m) suggesting that intercropping of annual crops with shrub stands could serve as an innovative and viable agronomic option in these vulnerable Sahel agro-ecosystems.

HYDRAULIC LIFT

Hydraulic redistribution (HR) is the process of passive water movement from deeper relatively moist soil to shallower dry soil layers using plant root systems as a conduit. We hypothesized that one of the mechanisms implicated in the facilitation observed between two shrub species (*Guiera senegalensis*; *Piliostigma reticulatum*) and annual food crops in Sahelian systems is HR. Although soil water potential (Ψ_s) at the 20 n Ψ_s of approximately 0.6 to 1.1 MPa, resulting in rewetting of the drier upper soil layers overnight. Shrubs exhibited significant leaf water stress with eventual stomatal closure after midday with rehydration ceasing before midnight. This suggests that these shrubs have evolved to take advantage of the redistributed water from HR during dry periods. Neighboring annual crops exhibited stomatal closure before shrubs and recuperated after their shrub counterparts. Sap flow measurements on both tap and lateral shrub roots indicated daily reversals in the direction of flow. During the peak of the dry season, both positive (toward shrub) and negative (toward soil) flows were observed in lateral shrub roots with sap flow in the lateral roots frequently negative at night and rapidly becoming positive soon after sunrise. Flow in the larger descending tap root remained positive at this time. The negative sap flow at night in the superficial lateral root and the periodic positive flow in the descending taproot are also indicative of soil water redistribution. *HR thus appears to be an important mechanism for drought stress avoidance and a mechanism to maintain plant physiological functions. This unique phenomenon has major implications for the understanding how Sahelian Agroecosystems function. First it seems reasonable that in the shrub rhizosphere the year around release of water at night from HR supports microbial populations and drives biogeochemical processes even in the dry season. This represents a major paradigm shift as conventional theories would predict all biological processes would shut*

down in the dry season. Secondly, the superior performance of crops in the presence of shrubs (as presented below) may in part be related to HR and better water relations of crops (HR may assist crops through drought periods). Lastly enhance shrubs enhance ground water recharge. Our conclusion is that the net effect of these shrubs is very positive in terms of water availability/efficiency for crops and for conserving water, precious commodity in this semiarid environment.

Shrub Litter Decomposition and Microbial Diversity

DECOMPOSITION AND MICROBIAL ACTIVITY OF SHRUB RHIZOSPHERES

The parkland systems of Sahelian regions have woody shrubs that randomly grow in farmers' fields and provide litter inputs and likely promote microbial communities beneath their canopies. However, farmers currently burn shrub residues.

We hypothesized that thermal management could be replaced by microbial degradation of these residues. To test this hypothesis several studies were done to assess the influence of shrub canopies/rhizospheres and residue quality on microbial communities and rates of decomposition. This information will be important for practical management considerations to develop non-thermal management of residues.

Diack *et al.*, (2000) compared decomposition under field and lab conditions for *P. reticulatum*. Residue placed in the soil at the beginning of the rainy season (June) resulted in 80% losses after 8 months compared to a lab incubation that only had a 50% loss for the same period. Specific surface area of the shrub residue in relation to mass loss was 15×10^{-5} to 45×10^{-5} which was similar to crop residues. The elevated decomposition rate under field conditions was attributed to the presence of termites that were not present in the lab incubation.

A second study was done to develop fundamental information about non-thermal residue decomposition of shrub residues in relation to microbial dynamics. The experiment was a 2 X 3 X 2 factorial design with two soil treatments (0-5 cm depth beneath and outside the influence of the shrub), three residue amendments (leaf, leaf+stem and stem), and 2 litterbag mesh size treatments (<0.7 mm to exclude macrofauna and >2 mm to permit entry by macrofauna). Litterbags were destructively sampled at 15, 30, 60, 120 and 210 days after the first rain of June 30, 2005. At each sampling, litter mass loss was measured and soil was assessed for microbial carbon biomass (MBC), inorganic N and enzyme activities. When macrofauna were not restricted in decomposing litter, there were greater rates of mass loss, MBC, enzyme activities, and mineral N. Rates of decomposition and microbial response were higher with soils beneath canopy than outside the canopy influence. , -glucosidase had a high correlation with mass loss and MBC. Chitinase showed a strong correlation with mass loss. The results provide evidence that non-thermal management has potential for practical use of coppiced shrub residues.

The results from two decomposition studies indicates that under field conditions, about 80% of the shrub residues, when placed in the soil at the beginning of the

rainy season, are decomposed within 9 months. This suggests non-thermal management of these residues should be possible and allow farmers to prepare seed beds to enable successful crop establishment.

SHRUBS AND MICROBIAL DIVERSITY

The Sahel is dominated by the presence of permanent shrubs, regardless that they may be coppiced many times during the year. The hydraulic lifting of water reported above for *Guiera senegalensis* and *Piliostigma reticulatum* - where water from deep soil is lifted to the surface which benefits other plants should also affect microbial communities. However, the influence of these shrubs through root exudates and hydraulic redistribution on the soil microbial communities remains unknown. This study was carried out to determine the impact of the shrubs on the activity, structure and composition of the microbial communities and how those communities are modified during the dry season as well as the wet season.

There were two experimental site locations in an area with 300 mm of rainfall a year and an area with 700 mm a year. The experimental design was a 2 x 2 factorial design with three soil treatments (rhizospheric soil, bulk soil and non-rhizospheric soil sampled two meters away from the shrub) and two seasons (wet season and dry season); the wet season lasts only 3 months. The rhizospheric soil was separated depending on the age of the roots for the denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) analysis of 16S rDNA and 28S rDNA. Additionally, the soil was subject to phospholipids fatty acid (PLFA) analysis, enzyme activities, microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (N) mineralization. For the DGGE profiling, the bacterial community responded more to the rhizospheric effect whereas the fungal community was more sensitive to the season. There were strong rhizospheric and seasonal effects as a result of analysis from PLFA, MBC, enzyme activities and N mineralization. Furthermore, *the rhizospheric communities during the dry season were quite similar to the one during the wet season. This study showed the profound modification of the microbial communities due to the presence of shrubs through root exudate input and hydraulic redistribution.*

Crop Productivity

EFFECT OF SHRUB RESIDUES

Plots were established at the ISRA Bambey Research station on a field that had no shrubs grown on it for > 50 years with various crops grown over this period. A 3 X 3 X 2 factorial with: 3 residue rates (0, 1.5 or 3.0 Mg biomass ha⁻¹); 3 residue treatments (shrub leaves, shrub stem, or leaf/stem mix); and 2 plant residue types (*G. senegalensis* or *P. reticulatum*) was started in 2004. All residues (whole leaf material and stems chopped to ~10 cm lengths) were incorporated with light tillage similar to tillage practices of farmers and crops received a standard fertilizer application (peanut - 9, 30 and 15 kg N, P, and K ha⁻¹; millet - 14, 7 and 7 kg N, P, and K/ha plus 45 kg urea-N ha⁻¹).

The results from this experiment are profound. The first 2 years of the experiment there was no effect of residues on crop productivity. However, by the fourth year

on millet there was as much as a 32% increase in yields at the high rate of *G. senegalensis* over the control (Table 3). These results are very important for several reasons. First it reinforces the previous findings that regular inputs of organic matter are critical for crop productivity in the Sahel. But secondly and ***most importantly this is one of the few if only studies to show that low quality residue (i.e. limited nutrient value) can be effective in stimulating this crop response in the Sahel.*** The other important consideration from a management perspective is that the addition of residues must take place for several years before the benefits can be seen.

PRESENCE OR ABSENCE OF SHRUBS

Two native perennial shrubs (*P. reticulatum* and *G. senegalensis*) form an important vegetation component of parkland systems in Senegal. However, their biophysical interactions with soil and crop are largely uninvestigated. Hence, a four-year study was started in 2004 to investigate effects of the two shrub species at separate sites on crop productivity and extractable N and P dynamics. The design at both sites was a split plot factorial experiment with presence or absence of shrub as the main plot and fertilizer rate as the sub plot (0, 0.5, and 1.0 of the recommended N P K fertilizer where 1.0 is millet at a rate of 68.5 kg N, 15 kg P and 15 kg K ha⁻¹ and for peanut it is 9 kg N, 30 kg P and 15 kg K ha⁻¹).

Crop biomass and N and P uptakes in biomass significantly increased with increasing fertilizer rate and were always higher in presence of shrubs, even in the absence of fertilizer. Contrary to P, mineral N in soils had a very rapid change, reaching very low levels by the end of growing season. Nutrient use efficiency was low in general but was improved in presence of shrubs.

For peanut in 2004 and pearl millet in 2005 yields in the presence of *P. reticulatum*, yields were significantly higher in plots with shrubs than in sole crop plots across all fertilizer rates (data not shown). In 2006 (peanut) and 2007 (millet) yields were not significantly different or slightly higher in the absence of *P. reticulatum*.

The most dramatic effect on yields occurred in the presence of *G. senegalensis* (Table 2). Here there was a consistent and significant effect across all fertilizer treatments for 4 years – even in the absence of any fertilizer applications. In the absence of shrubs yields steadily decreased *G. senegalensis* site. We believe this is due to the fact that the year before the experiment was started the no shrub plots had shrubs removed – thus in the first years there was residual effects of shrubs that had been in the plots previously. However, by the fourth year the soils were so degraded in the non-shrub plots that it was very difficult to establish a stand. So by Year 4 there was on average across fertilizer treatments a 242% yield increase in shrub plots over the no shrub plots.

G. senegalensis dominates sandy soils and is in a drier region (~400 mm yr⁻¹) compared to the *P. reticulatum* site that has soils with higher clay content and greater rainfall (~800 mm yr⁻¹).

We conclude that there is no competition of shrubs with crops for water and for *G. senegalensis* there is very dramatic and positive impacts on crop yields. Indeed it

seems that in the northern Senegal with its dry environment and sandy soils – this shrub appears to be essential for maintaining crop productivity. *These profound findings, particularly for G. senegalensis indicate that these shrubs are a key vegetative component for stopping and reversing desertification and sustaining crops.*

Conclusions

Our global conclusion is that shrubs are the dominant controllers of hydrology, C biomass on the landscape, microbiology, and crop productivity in agroecosystem of Senegal. The major findings were:

- Shrubs residues decompose rapidly enough to allow non-thermal management.
- Shrub residues promote crop growth but it takes 2 years of incorporation before beneficial impacts on crops were measured.
- Both shrubs are doing hydraulic lifting of water from wet subsoils to dry surface soils
- Shrubs are non-competitive with crops for water and increase water and nutrient efficiency.
- During periods of excess rainfall shrubs promote groundwater recharge and therefore reduce surface runoff losses.
- *G. senegalensis* had the most profound impact on yields which after four years cropping the declining yields in the absence of crops resulted in a 242% difference in yield between plots with and without this shrub. These positive impacts occurred even in the absence of fertilizer applications

The increase of rural populations and associated harvesting of these perennial woody components may be decreasing the density of these woody species in the semi-arid Sahel. Loss of these shrubs on the landscape could potentially reduce profile recharge while accelerating runoff, increasing surface soil temperature and soil evaporation, resulting in long-term detrimental impact to agricultural productivity and greater land degradation. We believe it is imperative that these shrubs be actively managed for optimal and sustainable crop production in the Sahel.

Future directions

These results are very promising but considerable more work is needed before full scale management systems can be recommended. First these experiments need to be repeated in other regions of the Sahel to verify these findings. Studies are needed to

determine the optimal density of shrubs per hectare. The experiments we conducted were at about 1200 plants per hectare which is well above what we found in farmers' fields where they could be near zero or more typically in the 200 to 500 plants ha⁻¹. More closely controlled studies are needed to determine the amount of water uptake there is from hydraulic lifted water to surrounding crops (using deuterium tracing studies). Shrub rhizospheres need to be characterized for beneficial microorganisms that may assist crops for drought tolerance, stimulate plant growth by releasing hormones, fixing atmospheric N₂, and suppressing diseases (even when nutrient limitations are removed and there is high rainfall there is an unexplained yield response with shrubs which could be due to beneficial microbes). Another question is whether *P. reticulatum*, a non-nodulating legume could be converted to a nodulating legume to increase N fixation and provide more N for adjacent row crops.

We have developed simple ways for propagating and establishing shrubs in farmers' field. Hence, pilot studies should be initiated where farmers manage an optimized, non-thermal system in comparison to the traditional coppice and burn system. There should be close monitoring of the biophysical and socio-economic performance of these systems to develop practical shrub-crop systems that can be widely adopted.

Table 1.
Chemical properties of soils beneath and outside the influence of native shrubs (n=4)
(adapted from Dossa et al., 2008)

Soil location	Total C	Total N	Total P	pH
	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
<u>Nioro (<i>P. reticulatum</i>)</u>				
Beneath canopy	5.77	0.21	0.86	6.4
Outside canopy	3.23	0.19	0.82	5.8
<u>Keur Mata (<i>G. senegalensis</i>)</u>				
Beneath canopy	3.35	0.20	0.89	5.2
Outside canopy	2.51	0.18	0.93	5.4

#HM, % hemicellulose ††ns, not significant at *P* <0.01

Table 2.
Crop yield as affected by presence or absence of shrub (*G. senegalensis*),
and fertilizer rate at Keur Mata.
Values within columns followed by the same superscript letter are not significantly different at $P < 0.05$.

†Rate	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		
	Shrub	No shrub	Mean	Shrub	No shrub	Mean
	<u>2004 season (<i>Arachis hypogaea</i>)</u>			<u>2005 season (<i>Pennisetum glaucum</i>)</u>		
0	697a	637a	667	854de	651e	752
0.5	639a	551ab	595	1304bc	1072cd	1188
1.0	699a	461b	580	1563b	1492b	1527
1.5	606a	522ab	564	1678ab	1869a	1773
Mean	660a	543b		1350a	1271b	
	<u>2006 season (<i>Arachis hypogaea</i>)</u>			<u>2007 season (<i>Pennisetum glaucum</i>)</u>		
0	384a	273b	328	197a	5b	101
0.5	541a	449b	495	403a	84b	244
1.0	555a	578a	567	378a	200b	289
1.5	708a	532b	620	622a	174b	398
Mean	547a	458b		400a	116b	

Table 3.
Crop yield as affected by shrub residue rates with and without fertilizer from 2004 to 2007
(Bambey)

Factor	Rate ha ⁻¹	2004 (peanut pods kg ha ⁻¹)	P value	2005 (millet grain ha ⁻¹)	P value	2006 (peanut pods kg ha ⁻¹)	P value	2007 (millet grain ha ⁻¹)	P value
Fertilizer	0 rate	514a	0.07	101a	0.001	922a	0.07	665a	0.001
Fertilizer	0.5 rate	945b		669b		972a		1587b	
Fertilizer	1 rate	789b		1107c		965a		1928c	
Biomass	No residue	816a		537a		712b		1197c	0.03
Biomass	G 1,500 kg	766a		664a		912b		1296c	
Biomass	G 3,000 kg	857a		755a		1116a		1609a	
Biomass	P 1,500 kg	615a		583a		908b		1385b	
Biomass	P 3,000 kg	691a	588a	1116a	1479b				

G = *G. senegalensis* residue

P = *P. reticulatum* residue.

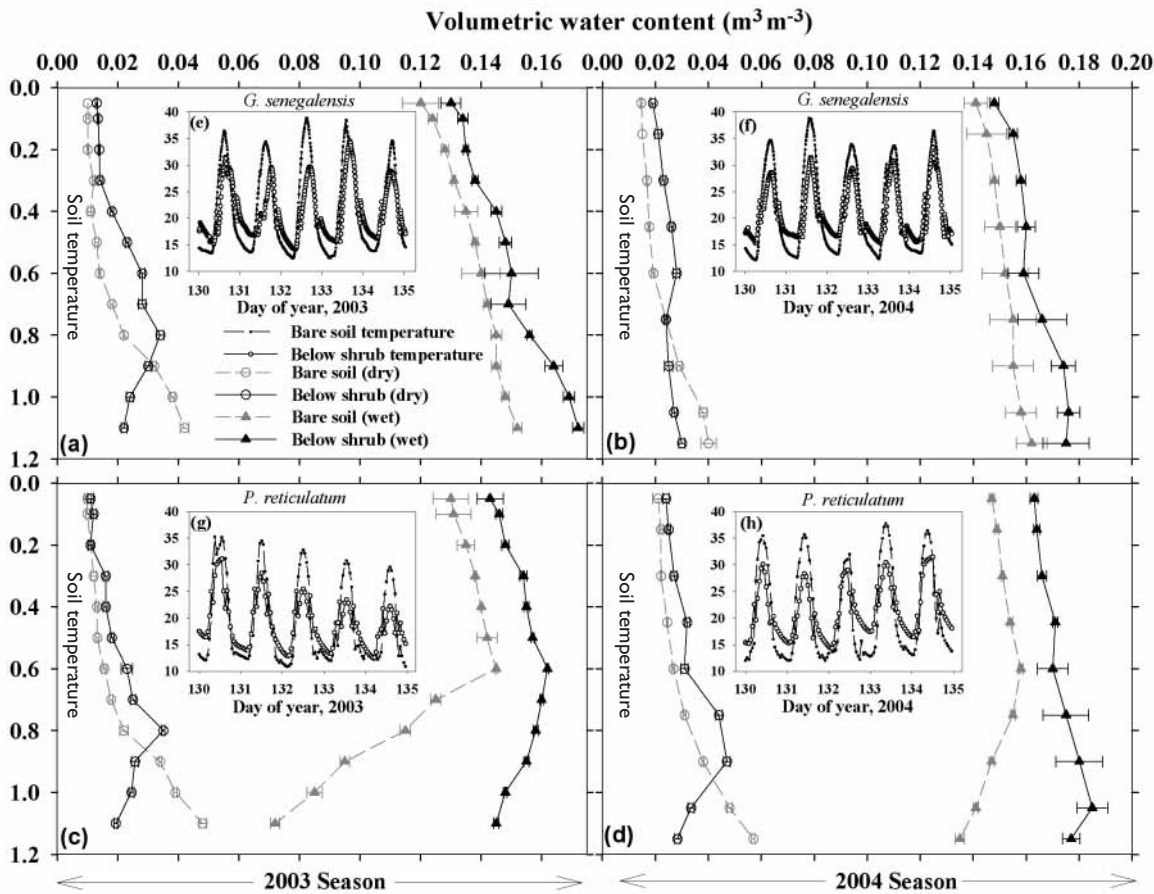


Figure 1. Variation of mean volumetric moisture content (a) vertically, below *G. senegalensis* root zone and an adjacent bare soil matrix in the 2003 season; (b) vertically, below *G. senegalensis* root zone and an adjacent bare soil matrix in the 2004 season; (c) vertically, below *P. reticulatum* root zone and an adjacent bare soil matrix in the 2003 season; (d) vertically, below *P. reticulatum* root zone and an adjacent bare soil matrix in the 2004 season. Inset graphs are variations of soil temperature 10 cm below shrubs and bare soil at both sites and are labeled as (e) *G. senegalensis* for the 2003 season; (f) *G. senegalensis* for the 2004 season; (g) *P. reticulatum* for the 2003 season; (h) *P. reticulatum* for the 2004 season (adapted from Kizito et al., 2006)

Références

- Badiane, A.N., Khouma, M., Sene, M., 2000. Région de Diourbel: Gestion des sols. Drylands Research Working Paper 15, Drylands Research, Somerset, England. 25 pp.
- Bationo, A., Buerkert, A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 61: 131-142.
- Buresh, R.J., Tian, G., 1998. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. *Agrofor. Syst.*, 38: 51-76.
- Diedhiou, S., A.N. Badiane, I. Diedhiou, M. Khoum, A.N.S Samba, M. Sène and R.P. Dick. 2009. Succession of Soil Microbial Communities during Decomposition of Native Shrub Litter of Semi-Arid Senegal. *Pedobiologia* (in press).
- Diack, M., M. Sene, A. N. Badiane, M. Diatta, and R. P. Dick. 2000. Decomposition of a native shrub (*Ptilostigma reticulatum*) litter in soils of Semiarid Senegal. *J. of Arid Soil Research and Rehabilitation* 14(3):205-218.
- Diangar, S., A. Fofana, M. Diagne, C.F. Yamoah, and R. P. Dick. 2004. Pearl millet-based intercropping systems in the semiarid areas of Senegal. *African Crop Science J.* 12:133-139.
- Dossa, E.L., J. Baham, M. Khouma, M. Sene, F. Kizito, R.P. Dick. 2008. Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils incubated with native shrub residues in semiarid Senegal. *Soil Science* (in press).
- Dossa, E.L, M. Khouma, I. Diedhiou, M. Sene, F. Kizito, A.N.. Badiane, S.A.N. Samba, R.P. Dick. 2008. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of semiarid Sahelian soils amended with native shrub residues. *Geoderma* 148:251–260.
- Iyamuremye, F., V. Gewin, R.P. Dick, M. Diack, M. Sene, A.N. Badiane, and M. Diatta. 2000. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization of agroforestry plant residues in soils of Senegal. *J. of Arid Soil Research and Rehabilitation* 14:359-371.
- Kizito, F., M. Senè, M. I. Dragila, A. Lufafa, I. Diedhiou, E. Dossa, R. Cuenca, J. Selker, R. P. Dick. 2006. Soil water balance of annual crop-native shrub systems in Senegal's Peanut Basin. *Ag. Water Management* 90:137–148.
- Kizito, F., M. Dragila, M. Sène, A. Lufafa, I. Diedhiou, E Dossa, R.P Dick, M Khouma, A. Badiane, and S. Ndiaye. 2006. Seasonal soil water variation and root dynamics among two semi-arid shrubs coexisting with Pearl millet in Senegal, West Africa. *J. of Arid Environments* 67:436.
- Kizito, M. I. Dragila, R. Brooks, M. Senè, M. Diop, R. Meinzer, A. Lufafa, I. Diedhiou, R. P. Dick. 2009. Hydraulic redistribution by two semi-arid shrubs: Implications on agro-ecosystems. *J. Arid Environments* (in press).
- Lufafa, A., I. Diédhiou, S. Ndiaye, M. Séné, M. Khouma, F. Kizito, R.P. Dick, and J.S. Noller. 2008. Carbon stocks and patterns in native shrub communities of Sénégal's Peanut Basin. *Geoderma* 146: 75-82.
- Lufafa, A., Wright, D., Bolte, J., Diédhiou, I., Khouma, M., Kizito, F., Dick, R.P., Noller, J.S., 2005. Regional carbon stocks and dynamics in native woody shrub communities of Senegal's Peanut Basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128:1–11.
- Lufafa, A., I. Diedhiou, S.A.N. Samba, M. Sène, F. Kizito, Ph.D.; R. P. Dick, and J. Stratton Noller. 2009. Allometric relationships and peak-season community biomass stocks of native shrubs in Senegal's Peanut basin *Journal of Arid Environments* (in press).
- Rhoades, C. C., 1997. Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural and savanna ecosystems. *Agrofor. Syst.*, 35: 71–94.
- Sanchez, P.A., Shepherd, K.D., Soule, M.J., Place, F.M., Buresh, R.J., Izac, A-M.N., Mokwunye, A.U., Kwesiga, F.R., Ndiritu, D.G., Woomer, P.L., 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capitol. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F. (Eds), *Replenishing Soil Fertility in Africa*. Soil Science Society of America Special Publication 51, pp. 1-46.

Schlesinger WH, Raikes JA, Hartley AE, Cross AF (1996).
On the spatial pattern of soil nutrients
in desert ecosystems. *Ecology* 77:364-374.

Sinaj, S., Buerkert, A., El-Hajj, G.,
Bationo, A., Traoré, H., Frossard, E., 2001.
Effect of fertility management strategies
on phosphorus bioavailability
in four West African soils.
Plant Soil, 233: 71-83.

Tschakert, P., Khouma M,
Sene, M., 2004.
Biophysical potential for soil carbon
sequestration in agricultural systems
of the Old Peanut Basin of Senegal.
J. Arid Environ., 59: 511-533.

Woomer, P. L., Touré A.
and Sall, M., 2004.
Carbon stocks in Senegal's Sahel Transition.
Journal of Arid Environments 59, 499-510.

Partie II

Mise en valeur et suivi de la Grande Muraille Verte

A Remote Sensing Technique for Monitoring Temporal Dynamics of a Forest Located at a Desert Fringe

A. KARNIELI

The Remote Sensing Laboratory, Jacob Blaustein Institutes for Desert Research, Ben Gurion
University of the Negev, Sede Boker Campus, 84990, Israel.
karnieli@bgu.ac.il

Abstract

Drought years are a very frequent phenomenon in Israel. Between the years 1994/5 and 2001/2, Israel experienced four (non-consecutive) years of drought. Consequently the Yatir forest, a pine forest located in the desert fringe, suffered from a notable water shortage. The aim of this research is to detect and assess seasonal/phenological changes and inter-annual changes in the forest trees with respect to the drought effect. The use of a spectral vegetation index, namely the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to detect stress conditions was implemented by using eight Landsat TM and ETM+ images. In addition, the change detection NDVI Image Differencing technique was applied for assessing seasonal and inter-annual variations in vegetation. Considerable NDVI decline was observed between 1995 and 2000 due to the drought events during these years, enabling assessment of the spatial and temporal effects of such a disaster. NDVI image differencing has proven to be a useful and accurate method for tracing physiological changes in the Yatir forest, which serves as a case study for a manmade forest in the desert fringe.

Keywords

REMOTE SENSING; LANDSAT; NDVI; CHANGE DETECTION;
DROUGHT; FOREST; DESERT FRINGE; ISRAEL

Introduction

The recurrence of severe droughts in the Sahel and other regions around the world has led to extensive discussions on the effect of droughts on the life of people and plants, particularly in the arid and semi-arid climatologic zones. Forest planting on the desert fringe represents an attempt to combat desertification and rehabilitate of drylands. In Israel, the Yatir forest is such a manmade pine forest situated in the transition between the semi-arid and sub-humid zones (275 mm mean annual rainfall). In order to explore changes and the effects of drought in the forest, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used. The NDVI is the most widely used vegetation index, and it is based on the ratio between the maximum absorption of radiation in the red (R) spectral band vs. the maximum reflection of radiation in the near infrared (NIR) spectral band. Lacking the plants' absorption/reflectance mechanisms, soil spectra typically do not show such a dramatic spectral difference. NDVI is formulated as:

$$NDVI = \frac{\rho_{NTR} - \rho_R}{\rho_{NTR} + \rho_R}$$

where R is the reflectance value in the indicated spectral bands. NDVI values range between -1.0 to +1.0 but are usually positive for soil and vegetation. Denser and/or healthier vegetation have higher values.

NDVI values of vegetation usually offer an efficient and objective mean for evaluating phenological characteristics (e.g., Justice *et al.*, 1985; Reed *et al.*, 1994; Running *et al.*, 1995) and have long been used to monitor vegetation conditions and changes in vegetation cover (e.g., Lyon *et al.*, 1998; Mas, 1999; Woodcock *et al.*, 2001).

Change detection has become a major application of remotely sensed data because of repetitive coverage at short intervals and consistent image quality (Mas, 1999). Two categories are recognized for the change detection assessment (Yuan *et al.*, 1998). The first is conversion from one land cover type (class) into another and the other is transformations within a given land cover type. The latter can be used for examining the effect of water shortage on the land use of a single renewable natural resource. Several methods for detecting land cover changes were reviewed by Yuan *et al.* (1998) and Mas (1999). The Vegetation Index Differencing method, and particularly the NDVI Image Differencing, was found to be suitable for the current investigation. NDVI Image Differencing ($\Delta NDVI$) is a change detection technique that has been used for several applications such as studying the effect of extensive flooding on forest ecosystems (Michener and Houhoulis, 1997), monitoring the impact of urban development (Fung and Siu, 2000), and monitoring the regeneration of Mediterranean shrubland (Svoray *et al.*, 2003). The following equation is applied:

$$\Delta NDVI = NDVI_{t1} - NDVI_{t2}$$

where the subscripts t1 and t2 are NDVI images from dates 1 and 2, respectively.

The results of this operation correspond to an increase or decrease in vegetation state or cover.

Nelson (1983) showed that using the Δ NDVI technique has stronger relationship to the phenomena of interest in the scene than any single spectral band alone.

The objective of this research is to apply remote sensing and geographic information system (GIS) techniques to monitor changes in the forest on two temporal scales - seasonal and inter-annual changes. The hypothesis is that the NDVI provides a suitable tool to assess changes in the Yatir forest that are related to drought periods due to decrease in vegetation cover and consequent increase of soil background. Spatial data of the forest, coupled into a GIS, can provide a better understanding of the areal changes within the forest during the same hydrological year and patterns of change between the years.

Material and methods

Study area

The forest area to be studied is located between the Mediterranean and Dead Seas, approximately 31° 20' N 35° 00' E and 650 m above mean sea level (Fig. 1). This southern part of the mountain chains in Israel is situated between two climate zones: the dry desert with less than 200 mm rainfall per annum and the semi-arid desert that receives between 200 mm and 300 mm rainfall per annum. In addition to its location on the desert fringe, its relative high elevation plays an important role in defining the climatic characteristics of the forest (Fig. 2). The mean annual temperature is about 17.6°C (ranging between 12.8 and 22.4°C).

The mean winter temperature (November–March) ranges from 9.1 to 12.7°C, while in summer (June–September) the temperatures range from 23.2 to 24.3°C (Eshel, 2000). The long-term mean annual rainfall in this region (275 mm) is limited to the winter months

(October – April) and characterized by high annual fluctuation, unequal distribution of the events within the rainy season, and above all its general scarcity. The current research covers a 7-year period (Fig. 3). The hydrological year 1994/5 is characterized by much more rainfall than the annual mean (360 mm). The next two years, 1995/6 and 1996/7 were drought years with 158 and 232 mm of rain, respectively. 1997/8 was an average year with 274 mm of rainfall. The following two years, 1998/9 and 1999/2000 were again drought years with 138 and 157 mm, respectively. Lastly, 2000/1 was a wet year with 297 mm. In summary, during five years (1994/5 – 1999/2000) the forest suffered four drought years and one average year. The trees in the forest were planted during four decades: 1960s (28% of the forest); 1970s (38%); 1980s (13.5%); and 1990s (20%).

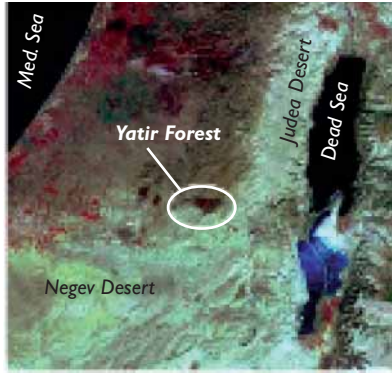


Figure 1.
 A Landsat-TM image of central Israel.
 Note the location of the Yatir forest on the desert fringe,
 visible as the sharp contrast between bright tones (semi-arid zone)
 and dark tones (sub-humid zone).



Figure 2.
 Ground photograph of the Yatir forest at the desert fringe.

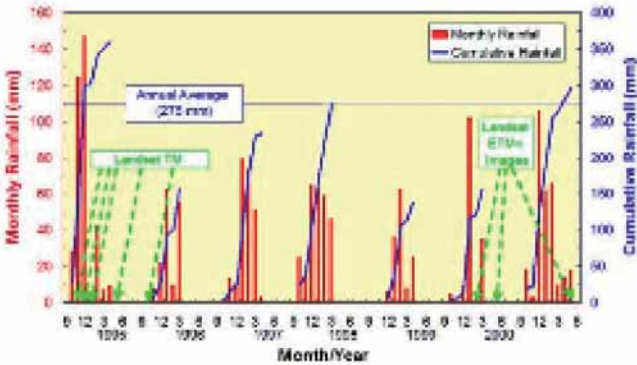


Figure 3.
 Yearly distribution of rainfall amounts, cumulative rainfall, and dates
 of Landsat-TM and ETM+ images.

Dataset

Assessment of drought effect was implemented by using eight Landsat TM and ETM+ images dating from: winter and spring 1994/5; fall 1995; winter and spring of 2000; and spring 2001. Fig. 3 shows the distribution of Landsat images with respect to monthly and cumulative yearly rainfall.

Image pre-processing

The aim of the pre-processing operation was to bring all images to the same comparable format. Raw digital numbers of the images were converted to radiance values using the procedure published by EOSAT (1986). In order to perform atmospheric correction and to convert the radiance values to surface reflectance values, the Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) (Vermote *et al.*, 1997) was implemented. For this code aerosols and watervapor contents were acquired from a sunphotometer located at Sede-Boker Campus, about 50 km from the research site. All images were then registered to the New Israeli Grid using 20 ground control points with a root mean square error (RMSE) of less than one pixel. The area of interest (AOI), namely the Yatir forest, was extracted from the geometric corrected images. Finally, a masking of the areas with no trees was performed in order to provide NDVI images with a minimal effect of bare soil and/or annuals that grow in clear-cut plots. Landsat-derived NDVI, for selected dates in winter and spring 1995 and winter and spring 2000 is presented in Fig. 4.

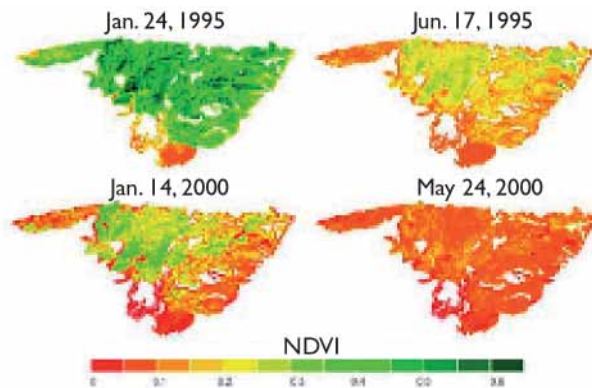


Figure 4.
NDVI images in similar seasons (winter and spring) but for a wet year (1995) and a drought year (2000).

Change detection

The NDVI Change Detection method (Eq. 2) was selected for implementing the research goals. Changes within the same hydrological year were computed in order to assess the dynamics of NDVI during the phenological cycle of the trees. In addition, images from the same season in different years were computed to characterize the

drought effect on vegetation cover due to differing rainfall regimes. Note that the 1994/5 hydrological year, which represents a wet year with above-mean annual rainfall, occurred after several wet years. Conversely, the 1999/2000 hydrological year represents a drought year, the fourth drought year in a five-year period. A common way to assess changes is based on determination of thresholds in terms of standard deviation levels from the mean $\Delta NDVI$ ($NDVI \Delta$) (Fig. 5A). In this manner, one can distinguish between changed and unchanged pixels as well as between negative and positive changes (Jensen, 1986). In the current study, in the cases in which the entire forest changed in only one direction, the threshold is determined in the minimal NDVI value (≈ 0) and not in adjacency to the mean in order not to lose meaningful information (Fig. 5B). Steps of 0.5 standard deviation (STDV) from the $NDVI \Delta$ determined the magnitude of the change in both case studies described above.

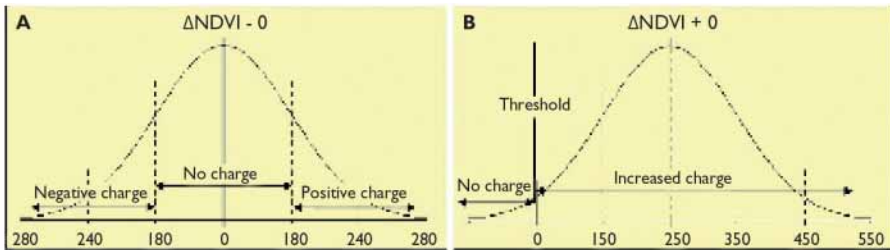


Figure 5. Schematic illustration of two change detection approaches used in the study.

Results and discussion

Inter-annual dynamics of NDVI

Fig. 6 represents the NDVI transects across the forest (8.5 km) during the rainy year in 1994/5 (360 mm) and the drought year 1999/2000 (130 mm of rain after three non-consecutive years of drought). The curve of January 1995 shows the highest values of NDVI that are related to the photosynthetic activity of a healthy forest. The curve of June 1995 shows lower NDVI values, as expected due to closing of the stomata during the late spring and summer. Looking at the same months five years later reveals the effect of water shortage on the NDVI due to four years of drought. The January 2000 curve has higher NDVI values than May of the same year, however compared to January 1995 these values are significantly lower. Note that the NDVI values of January 2000 almost perfectly match the ones of June 1995. Also note that the effect of rainfall amounts, after four years of drought, is less profound than the effect of rainfall on the forest during a rainy year. The amount of rain required to recover the trees into the growing mode needs to be greater than the amount of rain needed in 1994/5.

Δ NDVI images

Numerous change detection products were computed in order to observe the magnitude of the change along the phenological cycle of different years and in the same season but between years. According to the previous discussion, a threshold value was derived from the image as one standard deviation (SD) from the Δ NDVI mean in cases where the mean was between -0.1 and +0.1. Otherwise, when the mean was either smaller -0.1 or greater than +0.1, Δ NDVI was set to 0 as the reference point. Table 1 summarizes the mean and SD of the nine case studies. Positive mean indicates recovery of the forest while negative mean indicates degradation.

Table 1.

Pairs of images used for the change detection analysis along with the change statistics – mean and standard deviation (STDV).

Position mean indicates recovery of the forest while negative mean indicates degradation.

Change period		Comments	ANDVI	
Image 1	Image 2		Mean	STDV
Nov. 21, 1994	Dec. 7, 1994	Monitoring phenology, same season	0.203	0.107
Dec. 7, 1994	Jan. 24, 1995	Monitoring phenology, same season	0.0018	0.114
Jan. 24, 1995	Jun. 17, 1995	Monitoring phenology, different seasons, same (wet)	-0.232	0.105
Jun. 17, 1995	Oct. 7, 1995	Monitoring phenology, different seasons, same (wet)	0.045	0.06
Jan 14, 2000	May 21, 2000	Monitoring phenology, different seasons, same	-0.247	0.11
Jan. 24, 1995	Jan 14, 2000	Inter annuel change, same (winter) season	-0.1	0.091
Jun. 17, 1995	May 21, 2000	Inter annuel change, same (spring) season	-0.116	0.057
Jun. 17, 1995	May 24, 2001	Inter annuel change, same (spring) season	-0.112	0.062
May 21, 2000	May 24, 2001	Inter annuel change, same (spring) season	0.004	0.038

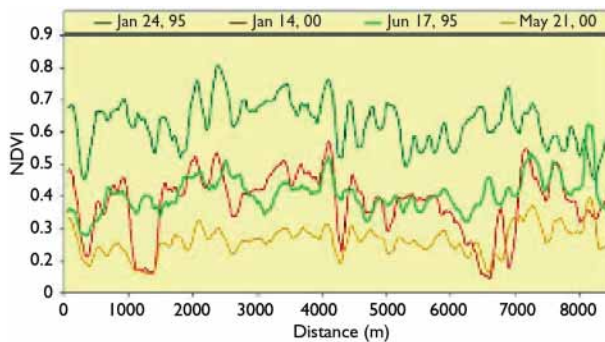


Figure 6.

NDVI values across the forest (west – east transect) for winter and spring of 1995 and 2000.

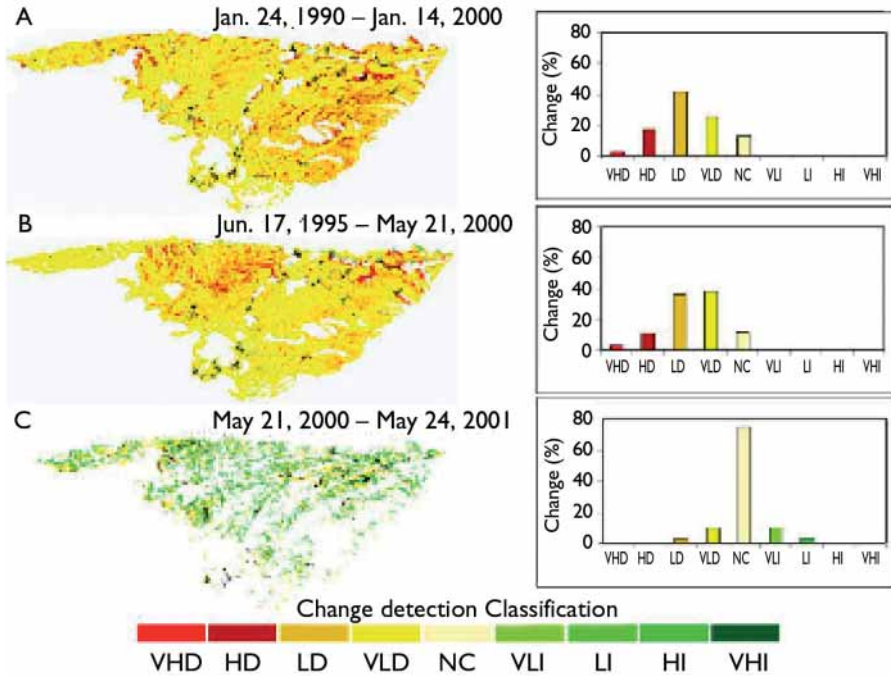


Figure 7.

NDVI Image Differencing products for selected images of inter-annual analysis along the phenological cycle along with the respective frequency histograms of the change categories.

Each category represents 1 step of standard deviation.

(A) January 24, 1995 – January 14, 2000;

(B) June 17, 1995 – May 21, 2000;

(C) May 21, 2000 – May 24, 2001.

Note the matching of colors between the images and the histograms.

VHD = Very High Decrease;

HD = High Decrease;

LD = Low Decrease;

VLD = Very Low Decrease;

NC = No Change;

VLI = Very Low Increase;

LI = Low Increase;

HI = High Increase;

VHI = Very High Increase.

Inter-annual changes are illustrated in Fig. 7. The largest negative change is observed between January 1995 and January 2000 due to the droughts in-between the two years (Fig. 7A, Table 1). The change between June 1995 and May 2000 was less pronounced since both images represent the season with less photosynthetic activity (Fig. 7B, Table 1). The moderate recovery of the forest as a result of a new wet year expressed as positive change, is demonstrated in Table 1. Note however that most of the pixels remain unchanged.

Conclusions

The aim of this study was to monitor temporal changes in NDVI values in the Yatir forest drought conditions. Despite limitations caused by the effect of differences in bare soil reflectance and a relatively low number of images it can be concluded that changes of NDVI values during the growing season show that changes in forest physiology could be detected due to changes in photosynthetic activity. During the winter, high photosynthetic activity values are detected due to the relatively low temperature (in comparison with summer temperatures) and the high water availability. Conversely, during the summer, stomata close and photosynthetic activity decreases as a result of high temperature and absence of water. All those variables affect the state of the forest greenness and are reflected in the NDVI fluctuations along the year. This result shows the changes in phenotype in Pines trees with their immigration from Europe to Israel: a change from high photosynthetic activity in the summer months in Europe to high photosynthetic activity in the Israeli winter. In summary, NDVI image differencing has proven to be a useful and accurate method for tracing physiological changes in the Yatir forest, which serves as a case study for a manmade forest in the desert fringe.

References

- Fung, T. Siu, W., 2000. Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI. *Int. J. Remote Sens.* 21 (5), 1011-1024.
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., Tucker, C.J., 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sens. remote sensing*, 6, 1271-1318
- Lyon, G.J., Yuan, D., Lunetta, R.S., Elvidge, C.D., 1998. A change detection experiment using vegetation indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 64, 143-150.
- Markham, B.L., Baker, J.L., 1986. Landsat-MSS and TM post calibration dynamic ranges, atmospheric reflectance and at-satellite temperature. *EOSAT Landsat Notes 1*, August 1986,
- Earth Observation Satellite Company, Lanham, Maryland, USA. pp. 3-8.
- Maselli, F., Conze, C., Petkov, L., and Gilabert, M.A., 1993. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986 -89. *Int. J. Remote Sens.* 14, 3471-3487.
- Mass, J.F., 1999. Monitoring land - cover changes: a comparison of change detection techniques. *Int. J. Remote Sens.* 20, 139-152.
- Michener, W.K. Houhoullis, P., 1997. Detection of vegetation changes associated with extensive flooding in a forested ecosystem. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 63, 1363-1374.
- Nelson, R.F., 1983. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 49, 1303-1314.

- Nicholson, S.E., Davenport, M.L., Malo, A.R., 1990.
A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using NDVI from NOAA AVHRR. *Climatic Change*. 50, 107-120.
- Nicholson, S.E., Farrar, T.J., 1994.
The influence of soil type on the relationship between NDVI, rainfall, and soil moisture in semi-arid Botswana. *Remote Sens. Environ.* 50, 107-120.
- Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S. E., 1999.
Diversity. Biology of Plants, Worth Publishers. 875 p.
- Reed, B.C., Brown, J.F., Vanderzee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W., Ohlen, D.O., 1994.
Measuring phenological variability from satellite imagery. *J. Veg. Sci.* 5, 703-714.
- Richard, Y., Pocard, I., 1998.
A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sens.* 19, 2907-2920.
- Running, S.W., Loveland, T.R., Pierce, L.L., Nemani, R. Hunt, E.R., 1995.
A remote-sensing based vegetation classification logic for global land-cover analysis. *Remote Sens. Environ.* 51, 39-48.
- Svoray, T., Shoshany, M., Perevolotsky, A., 2003.
Monitoring the response of spatially complex vegetation formations to human intervention: A case study from Mediterranean rangelands. *J. Mediterr. Ecol.* 4, 3-12.
- Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J., 1997.
Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.* 35, 675-686.
- Woodcock, C.E., Macomber, S.A., Pax-Lenney, M., Cohen, W.B., 2001.
Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sens. Environ.* 78, 194-203.
- Yuan, D., Elvidge, C.D., and Lunetta, R.S., 1998.
Survey of multispectral methods for land cover change analysis. In: Lunetta, R.S., Elvidge, C.D. (Eds.) Remote Change Detection. Environmental Monitoring Methods and Applications. Ann Arbor Press. Chelsea, Michigan, pp 21-39.

Le couplage de la télédétection et de l'observation locale : outil fondamental pour toutes les étapes de la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte

NABIL BEN KHATRA & MOURAD BRIKI

Observatoire du Sahara et du Sahel, Bd leader Yasser Arafat - BP 31 - Tunis 1080 - www.oss-online.org
nabil.benkhatra@oss.org.tn et mourad.briki@oss.org.tn

Résumé

La dégradation des terres constitue un important fléau entravant la mise en œuvre de stratégies de développement durable au niveau du circum-Sahara. Découlant d'une vision politique éclairée, l'initiative Grande Muraille Verte représente une réponse au constat fait sur l'état des ressources et les conditions des populations au niveau de la partie concernée de la région.

Processus continu et durable portant sur de vastes étendues très peu cartographiées et documentées, l'initiative Grande Muraille Verte exige le recours à l'utilisation du tandem observation spatiale – surveillance locale. En effet, le recours aux techniques de la télédétection, couplant l'exploitation des images satellitaires et des données de terrain, est incontournable à toutes les étapes de la mise en œuvre de l'initiative. Des études préparatoires aux différentes phases de réalisation des activités, l'observation spatiale offre des avantages considérables en termes de coût et de délais. Ces avantages sont d'autant plus importants que l'espace considéré est très vaste et difficile d'accès.

Les pays et les différentes institutions de la région ont mis en place des structures techniques compétentes en matière de télédétection. Certains de ces pays disposent de satellites d'observation de la terre et ont affiché leur engagement à valoriser leurs images au profit d'initiatives sous régionales et régionales. Parallèlement, et à différents niveaux, des réseaux d'observatoires de surveillance environnementale ont été mis en place. D'autres démarrent sur la base de leurs acquis. Tant d'acquis sont

à valoriser pour appuyer les initiatives et les programmes dédiés à la réhabilitation des terres au niveau de la région. La grande muraille verte constitue un enjeu majeur pour le circum-sahara, mais également une opportunité permettant la mobilisation de tous partenaires et la valorisation de leur savoir au service du développement durable.

Mots clés

GRANDE MURAILLEVERTE, DÉGRADATION DES TERRES, TÉLÉDÉTECTION, OBSERVATION LOCALE

Introduction

Les pays de l'aire d'action de l'OSS sont, au niveau mondial et africain, parmi ceux qui connaissent des mutations profondes très préoccupantes pour les ressources naturelles et l'environnement. Ces changements sont le résultat de facteurs naturels et anthropiques tels que les variabilités et les changements climatiques, l'accroissement de la population et du cheptel, la substitution des modes de gestion traditionnels et collectifs de l'espace, l'instabilité politique et sociale, etc. En outre, la globalisation de l'économie incite les populations à adopter de nouveaux modes de consommation et de production afin d'améliorer leurs conditions de vie. Ces facteurs impliquent une plus grande sollicitation des ressources naturelles dont les conséquences sont très lourdes sur les plans écologique, économique et social.

Cette situation incite les structures en charge de la gestion de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de la planification du développement à collecter, gérer, traiter de façon appropriée les données environnementales qui décrivent les milieux naturels et leur mise en valeur, et de diffuser, en temps voulu, une information fiable sur l'état de l'environnement et sur la distribution et l'évolution des ressources naturelles. Ceci est devenu d'autant plus nécessaire que les pays, en ratifiant les conventions internationales sur l'environnement, se sont engagés à se doter d'instruments de suivi-évaluation des programmes d'action, d'une part, et de dispositifs de gestion de données et d'informations environnementales, d'autre part.

Contexte

La gestion des espaces dégradés, et notamment leur réhabilitation, exige le recours à des systèmes d'observations fiables et pertinents apportant un réel appui au processus décisionnel. En effet, l'information issue de données précises et à jour constitue l'élément de base permettant d'asseoir, sur des bases solides, toute stratégie de gestion des ressources naturelles et de préservation de l'environnement.

Découlant d'une vision stratégique éclairée et d'une volonté politique affichée, la Grande Muraille Verte doit se traduire en concepts techniques permettant la mise en valeur intégrée d'un espace menacé. La mise en œuvre d'un projet d'aménagement d'une telle envergure requiert le recours à des informations à références spatiales valides et à jour.

Cependant, les données cartographiques au niveau de la région sont souvent obsolètes et peu adaptées. En effet, au niveau des zones à faible potentiel économique, les cartes sont rarement mises à jour et sont à des échelles non appropriées à des projets d'aménagement. Dans ce contexte, le recours à la cartographie basée sur l'exploitation des données satellitales s'avère incontournable. La Télédétection permet en particulier d'élaborer différents produits cartographiques thématiques utiles et indispensables pour une approche intégrée.

Potentialités de la télédétection pour le suivi des espaces et des ressources

La muraille verte est un processus qui doit être viable et évolutif. Il ne s'agit pas d'une réalisation figée dans le temps et cantonnée dans l'espace. L'identification des actions à entreprendre, la planification de leur mise en œuvre, le suivi de leur réalisation et l'évaluation de leurs impacts exigent le recours à un système observationnel global, homogène, fiable et objectif.

L'apport des informations issues des données satellitales pour le suivi des ressources naturelles est incontestable. La multitude des applications basées sur l'outil télédétection ainsi que la fiabilité des produits qu'elles génèrent le confirment.

Relativement au suivi des surfaces naturelles (sol et végétation), la télédétection permet l'élaboration d'inventaires spatialisés et la caractérisation de l'état des ressources, l'estimation et la prévision des variations de l'occupation et de l'utilisation des sols ainsi que l'appréciation et la quantification des productions des couverts végétaux stratégiques (céréales, parcours, forêts...).

En matière de gestion des ressources en eau, l'apport de la télédétection n'est pas moindre. L'outil permet l'élaboration d'une cartographie à jour de l'hydrographie surfacique et linéaire. De même, en se basant sur la cartographie de l'occupation du sol, il est possible d'estimer et de suivre l'évolution spatiale et temporelle de la consommation en eau.

Pour certaines applications, le recours à la télédétection peut remplacer les méthodes classiques de suivi des ressources naturelles. Pour d'autres, l'outil peut être fournisseur de données de bases. Il permet également la mise en place de systèmes parallèles pour la validation ou la confrontation des résultats des systèmes classiques d'élaboration de l'information.

Apport de la télédétection aux différentes étapes de la GMV

Comme tout programme de son envergure, la mise en œuvre de l'initiative GMV emprunte une suite logique pouvant être structurée autour d'étapes clés. De l'idée initiale à l'étude d'ingénierie, en passant par les études exploratoires et de faisabilité, la conduite du processus est consommatrice de données et informations souvent à référence spatiale, notamment cartographique. Sur la base, d'une part, de l'analyse des besoins en données et d'autre part de l'offre actuelle, il s'agit alors d'identifier les sources potentielles répondant aux attentes tenant en compte des objectifs fixés et les itinéraires techniques à adopter.

L'idée initiale

L'idée initiale d'un programme ou d'un projet émane de la créativité et de l'esprit d'innovation dont tout décideur ou promoteur est doté. Elle peut découler d'un processus d'induction, relevant de l'intuition et résultant généralement de la confrontation de données disparates, ou de déduction basée sur des conclusions tirées de l'analyse d'une situation.

La GMV en est un exemple qui illustre le développement d'un choix politique face à des constats faits sur l'état de la dégradation des terres au niveau de la région. Cette initiative constitue une réponse stratégique qui prend en considération le contexte international marqué par la mondialisation et les problématiques environnementales aggravées par les changements climatiques. En effet, l'idée de la GMV n'a pu prendre forme que sur la base d'une lecture actualisée et spatialisée des problématiques de dégradation des terres et de sécheresse au niveau du circum-Sahara. Les produits de la télédétection ont été incontournables pour l'établissement des constats et l'analyse des origines des dysfonctionnements et leurs dynamiques.

Les données basse résolution permettent de calculer des indices de végétation donnant une idée précise sur la répartition de la végétation et son état à une échelle suffisante pour ce niveau de réflexion. Pour une analyse plus fine des phénomènes rencontrés, les données haute résolution sont indispensables. Les applications à cette échelle exigent le recours à des données et informations collectées directement sur le terrain. L'observation locale permet en effet la compréhension des causes et l'évaluation des conséquences de la dégradation des terres. Il s'agit d'un outil incontournable pour cerner les problématiques et proposer des solutions idoines.

L'étude exploratoire

La volonté politique étant acquise, il est important de passer à une étude exploratoire permettant de connaître les grandes lignes de l'initiative afin de mobiliser tous les partenaires concernés et de drainer les fonds nécessaires. L'étude exploratoire est une démonstration de la validité de l'idée de l'initiative. Elle permettra de préciser la nature des réalisations, de les évaluer et de convaincre de l'intérêt de l'initiative aux différents niveaux de décision.

Sur un territoire aussi vaste et aussi mal étudié et documenté que la zone concernée par l'initiative GMV, le recours à l'imagerie satellitaire est incontournable.

L'étude exploratoire détermine le cadre général du projet, sans en préciser les limites qui seront établies par les études ultérieures. Elle porte essentiellement sur la nature des actions à entreprendre suite à une analyse des problématiques rencontrées et à la compréhension des spécificités nationales et locales. Sur la base de spatio-cartes actualisées, l'étude définira les grandes lignes du projet grâce à la vision d'ensemble que permet ce produit cartographique.

Des échantillons présentant des situations concrètes doivent accompagner l'étude exploratoire. Il s'agit de présenter des études de cas sur la base de données et informations décrivant l'espace à des échelles mettant en évidence les enjeux que l'initiative représente pour l'environnement et pour les populations concernées. En plus des données haute résolution servant à la réalisation des cartes thématiques actualisées, cette étape devra se baser sur des informations collectées au niveau des observatoires locaux décrivant l'état et l'historique du milieu et le fonctionnement et la dynamique de sa population.

L'étude exploratoire conduira en définitif à l'identification des espaces et des populations qui seront concernées ainsi que le ciblage des techniques et des approches à adopter. Enfin, cette étape dégagera les intérêts et les bénéfices de la mise en œuvre de la GMV.

L'étude de préfaisabilité

Le but de l'étude de préfaisabilité est de déterminer la rentabilité de l'initiative GMV, en établissant les coûts avec une marge d'erreur acceptable, pour susciter l'intérêt des investisseurs et partenaires éventuels. Contrairement à l'étude exploratoire, qui devrait être destinée aux promoteurs de l'initiative, l'étude de préfaisabilité est destinée à tout partenaire de développement que l'on pourrait éventuellement sensibiliser au projet.

Cette étude vise essentiellement la réorientation de l'initiative et la précision des critères d'évaluation. Elle permet de susciter l'intérêt d'investisseurs ou de partenaires au développement qui participeront au financement des réalisations. Elle devrait préciser les limites du projet et ses implications. Les coûts y sont évalués à partir de la liste des principales réalisations et de leur quantification ainsi que des données issues de projets similaires, récemment réalisés.

Si les données sur les coûts unitaires de réalisation sont faciles à obtenir, la détermination exacte des volumes à réaliser est cruciale. Les techniques de la télédétection permettent heureusement de les évaluer avec une grande précision.

L'intégration des cartes thématiques produites dans un système d'information géographique permet une multitude d'analyses et de croisements ainsi que le calcul de paramètres géométriques telles que les superficies et les distances.

D'autre part, les cartes thématiques issues des données de télédétection sont également incontournables lorsqu'il s'agit de définir d'une manière rationnelle et objective les critères à considérer pour choisir l'emplacement des actions à réaliser.

L'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité est la clé de voûte de la réussite de la mise en œuvre de la GMV, car elle sert de référence à toutes les étapes ultérieures de son déroulement. Elle vise l'élaboration d'un document qui servira de référence à toutes les étapes ultérieures du projet et qui permettra de faire sa promotion et de définir son schéma de financement.

Cette étude fixe les limites du projet et permet d'en mesurer toutes les implications. Le calcul des coûts y est basé sur des données plus précises. Elle se doit d'être un document de référence complet et permet de faire une analyse en profondeur du projet et de le réévaluer au besoin.

Pour la GMV, l'élaboration de ce document se basera essentiellement sur des cartes thématiques à différentes échelles. Ces cartes permettront de définir l'organisation spatiale des réalisations, de préciser les contraintes de la mise en œuvre des actions ainsi que d'évaluer les quantités et les coûts des différentes composantes.

Perspectives

Pour la mise en œuvre de la GMV, les données cartographiques et celles à références spatiales constituent des supports d'information inéluçtables. Celles issues des données satellitales sont les mieux adaptées pour le contexte régional. Ceci se justifie, d'une part, par le faible coût qu'engendre l'élaboration de cartes thématiques par la télédétection par rapport à celui engendré en utilisant les méthodes classiques, et d'autre part, par l'avantage qu'elle présente en terme de délais de réalisation. Ces avantages sont d'autant plus attractifs lorsqu'il s'agit de traiter de vastes étendues.

Une fois le processus de la mise en œuvre de la GMV est lancé, un système de suivi doit être mis en place. La nature de l'initiative (processus de développement continu dont la réalisation peut être abordée à plusieurs niveaux) exige que ce système soit pérenne et multi-échelle. Ce système permettra également d'appuyer toutes les initiatives environnementales au niveau de la région et facilitera ainsi leur intégration. Heureusement, la région est dotée de capacités techniques permettant d'asseoir un système de suivi intégré.

Plusieurs centres nationaux, sous-régionaux et régionaux ont été mis en place et ont développé des capacités techniques considérables leur permettant de jouer un rôle de premier ordre en matière d'exploitation des données satellitales pour le suivi de la GMV et d'autres programmes environnementaux au niveau de la région. Le savoir faire couvre les différentes échelles de travail et les différentes disciplines en rapport avec la mise en œuvre de l'initiative. AGRHYMET, à titre d'exemple, a développé des capacités considérables en matière de suivi de la sécheresse au Sahel.

Certains pays de la région sont dotés de satellites d'observation de la terre et ont affiché leurs volontés à mettre leurs produits au profit d'initiatives régionales. L'Agence Spatiale Algérienne a montré les potentialités des images de Alsat-1 pour le suivi du programme forestier du pays. Les programmes spatiaux se développent et s'intéressent de plus en plus à la surveillance des ressources naturelles. Tant d'exemples similaires incitent à développer des systèmes d'observations basés sur les données spatiales.

D'autre part, en appui aux systèmes spatiaux, les systèmes d'observation au niveau local émergent au niveau de la région avec le développement des observatoires locaux faisant partie de réseaux à différents niveaux. Sur la base des acquis de son programme ROSELT, l'OSS a lancé un programme pour appuyer ses pays membres dans la mise en place de dispositifs nationaux de surveillance environnementale.

Dans ce contexte, la GMV s'avère non seulement un programme visant la réhabilitation de l'espace circum-saharien, mais aussi une opportunité pour renforcer l'intégration régionale et le renforcement du partenariat Sud-Sud.

Références

- AIDCCD – Active exchange of experience on indicators and development of perspectives in context of UNCCD : Report on the state of the art on existing indicators and CCD implementation in the UNCCD Annexes, Edited by Enne G and Yeroyanni M.
- Ben Khatra N, 1994 :
Télé-détection appliquée aux statistiques agricoles tunisiennes. Mémoire de Master SILAT, ENGREF Montpellier, France.
- Bennouna T, 1996 :
Caractérisation et suivi des terres de parcours en milieu aride par télé-détection. Cas de la cuvette de Taznakht, Anti-Atlas marocain, thèse nouveau doctorat.
- Ferdinand Bonn, 1998 :
Précis de télé-détection, volume II : applications thématiques, Presses de l'Université du Québec, ISBN : 9782760508880
- Jauffret S. 2001 :
Validation et comparaison de divers indicateurs de changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le sud tunisien. Thèse de doctorat, Université de Marseille III (en collaboration avec l'IRD), France. 372 p.
- M'hiri A, 2005 :
Concepts et outils méthodologiques d'élaboration des outils du suivi-évaluation du PAN/LCD : le tableau de problématisation de la désertification, la grille des indicateurs et le tableau de bord de la LCD : application au cas de la Tunisie.
- OSS, CILSS, 2001.
Indicateurs d'impact et de mise en œuvre du PAN/LCD, concepts et expériences en Afrique, Asie et Amérique latine, V^e conférence des Parties de la CCD, Genève, 1-12 octobre 2001.
- OSS, 2002.
Utilisation des observations locales pour le suivi-évaluation du programme d'action national de lutte contre la désertification.
- ROSELT/OSS, 2004.
Conception, organisation et mise en œuvre de ROSELT.
- ROSELT/OSS, 2004.
Un dispositif commun de surveillance de la désertification en Afrique circum-saharienne.
- ROSELT/OSS, 2004.
Contribution Technique 9 : Recherche d'Indicateurs de désertification par analyse comparative de quelques observateurs (ROSELT/OSS)
- Tro A, Yergeau M et Goze B, 1990 :
« Utilisation de la télé-détection pour l'aménagement agricole au Sahel », Télé-détection & Sécheresse, John Libbey Eurotext 1990, Paris. pp. 121-1.

Geographic Information Science: Monitoring, Mapping, Modeling, and Decision Making for the Great Green Wall Initiative

JOHN HARRINGTON, JR. & RAMATOULAYE NDIAYE
Department of Geography, Kansas State University,
Manhattan, KS 66506

Abstract

Geographic Information Science (GIScience or GISci) — using the synergy of global positioning systems (GPS), remote sensing, spatial analysis and statistics, and geographic information systems (GIS) — provides a powerful set of tools and intellectual approaches to address environmental change. Since the advent of satellite remote sensing of Earth resources in the 1970s, new and innovative ways have been developed to map, measure, monitor, model, and provide decision support for the ongoing changes on our planetary surface. Healthy green vegetation has a unique spectral reflectance response due to absorption in the visible red portion of the spectrum and strong reflectance in the near infrared. Indexes derived from combinations of satellite digital data have been documented to provide good indicators of the amount and geographic coverage of green vegetation. Thus, GIScience methods can be very helpful in spatial reasoning and scientific visualization of the success of agroforestry programs designed to combat desertification. Change detection or monitoring of the success of establishing green vegetation can be accomplished in a geographic information system using multiple dates of satellite imagery or aerial photography. In addition, when information about the state of the vegetation cover is combined with other digital data types, such as soils, access to water, transportation routes, the location of human settlements, and/or natural vegetation cover, then strategic decisions regarding development of the Great Green Wall can be made.

Key words

GREAT GREEN WALL, GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE,
ENVIRONMENTAL CHANGE, VEGETATION

Introduction

Development of the Great Green Wall, a proposed belt of vegetative cover that will link Dakar with Djibouti, is an ongoing participatory effort by the people and the governments of the nations that span the Sahel zone across Africa. Designed to promote biodiversity and sustainable rural landscapes, the Great Green Wall has tremendous potential to engage citizens in an ecosystem restoration project that will promote soil conservation and improvement in ecosystem services.

Applied geography deals with practical or ‘real world’ applications of the concepts and skills that geographers possess. Applied geographers want to use their knowledge and skill set to help make a difference on our planet, especially with regard to improved natural resource management. Due to the nature of environmental problems, applied geographers tend to act locally and hope that the contribution provides a good example that can lead to better informed decisions. Hopefully, a net result of good applied geography will be an improvement in public policy. Frequently, applied geographers advocate for the use of GIScience technology to assist with decision support for management of environmental and natural resource management issues.

Geographic Information Science (GIScience or GISci) — the synergy of global positioning systems (GPS), remote sensing, spatial analysis and statistics, and geographic information systems (GIS) — provides a powerful set of tools and intellectual approaches to address environmental change. GIScience allows “us to see and interact with the world in new and stimulating ways” (Goodchild, 2006). Dangermond (2007) has suggested that GIS is a tool to enable sustainable development. Since the advent of satellite remote sensing of Earth resources in the 1970s, we have developed new and innovative ways to map, measure, monitor, and model the ongoing changes on our planetary surface. Scientific visualization can be an important scholarly contribution to decision making. Being able to ‘see’ how human activities are changing the world helps in communicating the nature of the problem and its associated spatial extent. Orbiting satellites, with a sensor package that enables assessment of Earth resources, can provide repetitive views and enable monitoring the rates of human-induced change. The rapid developments within remote sensing and GIS have enabled a new generation of resource managers to better visualize and address environmental change and associated management concerns. In thinking about these new capabilities and thought processes, Goodchild (2006) suggested that it is increasingly desirable “that maps, pictures, and spatial data need to rank with numbers, text, and logic as essential ways in which humans function.”

We live on a dynamic planet, where natural system functioning has now combined with the impact of over 6.6 billion humans to put considerable stress on ecosystems (Steffen *et al.*, 2004) and the ability of those ecosystems to provide the essential services we need (Daly, 1997). Human actions can combine with natural variations in climate to degrade environmental conditions. The prolonged drought in the Sahel of Africa placed considerable stress on local ecosystem services and the ability of

resident appropriate needed services at sustainable levels. Two significant impacts of the late 20th Century drought were desertification and the migration of many rural residents into urban areas.

Those who have examined the pace and scope of global change have also identified critical locations that may be among the first places to transition or ‘tip’ to a new state in response to global climate change, and may make that change very rapidly. These are the so called ‘surprise’ or ‘canary in the coal mine’ regions; the Sahel is one of them (Scheffer *et al.*, 2001, Zeng, 2003, Lenton *et al.*, 2008). In addition, paleo-environmental data indicate that rapid change occurred in the Sahel during the Holocene. The more humid conditions of 6,000 years ago created vegetation cover similar to African savanna in the Sahel-Sahara region (Kröpelin *et al.*, 2008); however, a slight change in Earth-Sun relationships about 5,000 years ago resulted in “an abrupt change in the regional climate ... triggering a rapid conversion of the Sahara into its present desert condition” (Steffen *et al.*, 2004).

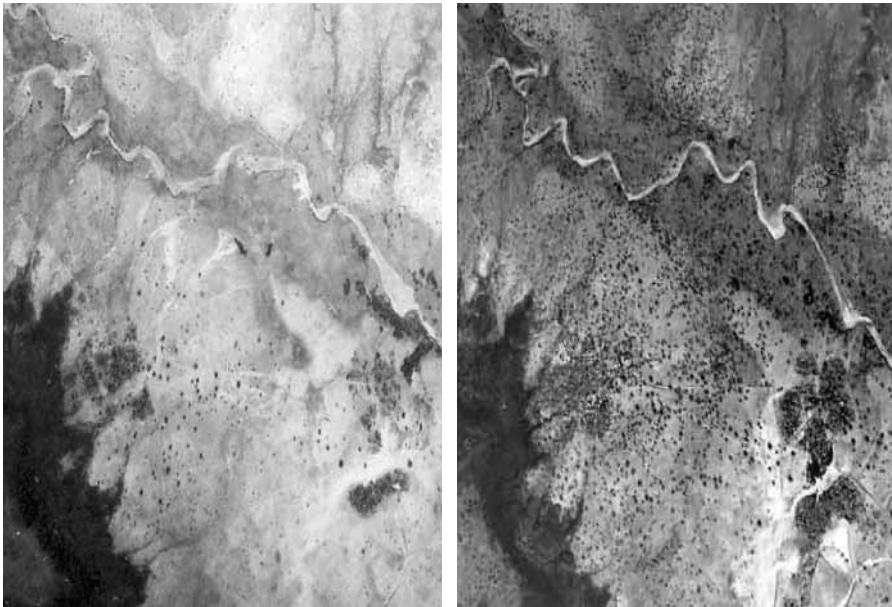
Spatial Reasoning and Decision Support Systems

Providing an intellectual context for an event or changing conditions is an important part of knowledge accumulation. That context can include event location, related items within the sphere of influence of the event location, and gradients in phenomena within the relevant region. Location, sphere of influence, and gradients, spatial association, geographic analogs, and spatial comparison are all components of spatial reasoning. It is becoming increasingly clear that an ability to do spatial reasoning is as important as reading, writing, and arithmetic (Goodchild, 2006).

Decision support systems are computer systems that provide decision-makers with an opportunity to assess and solve ill-structured problems. Jensen *et al.* (2009) identify the additional value of building spatial data into these decision support systems. Advantages of using GIScience for decision support include: “powerful graphic display,” “improved spatial data handling,” and the ability to utilize “specific analytic and modeling capabilities” (Jensen *et al.*, 2009). A committee of the US National Academy of Sciences (NRC, 2002) has discussed the importance of satellite-based Earth observation and the use of geographic information technology for sustainable development in Africa. In addition to discussing the strengths and capabilities of GIScience technology for monitoring change over time, the NRC report recognizes the vital importance integrating social science and natural resource data to inform decision makers.

Examples of the Use of Satellite Data to Monitor Natural Resources in Africa

Numerous examples of our ability to measure, map, and monitor natural resources in Africa using data from satellite-based sensor systems exist. Tucker *et al.* (1985) provided a now-classic discussion regarding the use of visible and near infrared satellite imagery to map land cover for the African continent. Later, Tucker *et al.* (1991) used a decade of satellite data to document the inter-annual changes in the southern boundary of the Sahara, and then related those shifts to changes in high-sun season precipitation amounts. In a special issue of the *Journal of Arid Environments* that dealt with the greening of the Sahel, Anyamba and Tucker (2005) used over two decades of imagery data for the Sahel to further our understanding of inter-annual variations in vegetative cover in a very dynamic transition zone. They documented that the period 1982-1993 saw below average precipitation and vegetative response (as indicated by NDVI) and that 1994-2003 was a period of vegetative recovery associated with wetter conditions. The authors concluded that “studies of changes



Figures 1 and 2.

The village of Galma, Niger in 1975 (left) and 2003 (right).

Source: *La transformation silencieuse de l'environnement et des systems de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles*, Botoni and Reij, 2009.

on the landscape using high spatial resolution satellite data sets ... will provide a detailed spatial quantification and description of the recovery patterns at local scale” (Anyamba and Tucker 2005). Climate variability is an identified driver of variation in the productivity of African agro-pastoral landscapes, and satellite imagery provides a way to document the inter-annual changes; there is concern that on-going global change, including climate change, will negatively impact these integrated social and ecological agro-pastoral systems in Africa (Stige *et al.*, 2006).

GIScience efforts by Gray Tappan and his colleagues to document changes in local and regional vegetation change in the Sahel provide visual evidence of the power of scientific visualization for an area in southern Niger (Figures 1 and 2). They found an increase in tree cover and vegetative density in agricultural zones where local farmers have adjusted their behavior to include agroforestry; tree cover has become five to twenty times more dense than in the 1970s (SIAC 2007). Based on an assessment of nearly four decades of imagery and field work, considerable differences in land cover trends are found at the ecoregion scale within Senegal (Tappan *et al.*, 2004).

Conclusion

This paper advocates for the use of GIScience (the integration of the use of global positioning, remote sensing, and geographic information system technologies) to provide the needed scientific visualization and spatial knowledge for assessing relative success in establishing the Great Green Wall. The capabilities provided by GIScience are a resource for addressing scientific questions about the status of the Great Green Wall, and will provide an ability to visualize existing conditions and how those conditions have changed over time. Given that the Great Green Wall initiative involves the complexity associated with coupled human and natural systems integration (Liu *et al.*, 2007, Seaquist *et al.*, 2008), GIScience is advantageous because it provides an ability to incorporate real world complexity into decision making.

Establishment of a multi-national GIScience Center that will serve the entire Great Green Wall effort, from Dakar to Djibouti, is needed. Dangermond (2007) has noted that GIS enables the kinds of problem solving needed for the transition to sustainability. It is clear that the Great Green Wall effort is aimed toward establishment of a sustainable relationship between local citizens and their biotic resources. An advantage of GIScience technology is that it is a digital resource that grows and improves with time and effort, as more and better data become available. The dynamic nature of a technology system that improves over time and provides scientific visualization capabilities will increase trust among decision makers, especially as spatial data are shared across international boundaries.

References

- Anyamba, A., and C.J. Tucker, 2005.
“Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003,”
J. Arid Environments, 63(3): 596-614.
- Botoni, E., and C. Reij, 2009.
La transformation silencieuse de l’environnement et des systèmes de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles.
Center for International Cooperation,
Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Daly, G., Editor, 1997.
Nature’s Services.
Island Press, Washington, D.C.
- Dangermond, J., 2007.
“GIS—The Geographic Approach: A Framework for Understanding, Managing, and Improving Our World,”
ArcNews, 29(3):1, 3-6.
- Goodchild, M., 2006.
“The Fourth R? Rethinking GIS Education,”
ArcNews, Fall 2006, available on-line at:
<http://www.esri.com/news/arcnews/fall06/articles/the-fourth-r.html>
- Jensen, J., *et al.*, 2009.
“Development of a Remote Sensing-Assisted Decision Support System for Technological Hazardous Waste Sites,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(2): 169-177.
- Kröpelin, S., *et al.*, 2008.
“Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6,000 Years,”
Science, 320: 765-768.
- Liu, J., *et al.*, 2007.
“Complexity of Coupled Human and Natural Systems,”
Science, 317(5844): 1513-1516.
- National Research Council, 2002.
Down to Earth: Geographic Information for Sustainable Development in Africa.
National Academies Press, Washington, D.C.
- Scheffer, M., *et al.*, 2001.
“Catastrophic Shifts in Ecosystems,”
Nature, 413: 591-596.
- Seaquist, J., *et al.*, 2008.
“Disentangling the Effects of Climate and People on Sahel Vegetation Dynamics,”
Biogeosciences Discussions, 5: 3045–3067.
- SIAC, 2007.
“SAIC Employee’s Research in Niger Yields Optimism for Africa,” *SIAC Magazine*, Summer/Fall 2007, available on-line at:
http://www.saic.com/news/pdf/summer_fall07.pdf
- Steffen, W., *et al.*, 2004.
Executive Summary: Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure.
IGBP, available on-line at:
http://www.igbp.kva.se/documents/IGBP_Exec_Summary.pdf
- Stige, L., *et al.*, 2006.
“The effect of climate variation of agro-pastoral production in Africa,”
PNAS, 103(9): 3049-3053.
- Tappan, G., *et al.*, 2004.
“Ecoregions and Land Cover Trends in Senegal,”
J. Arid Environments,
- Tucker, C.J., *et al.*, 1985.
“African Land Cover Classification with Satellite Data,” *Science*, 227(4685): 369-375.
- Tucker, C.J., *et al.*, 1991.
“Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990,”
Science, 253(5017): 299-301.

Pérenniser la Grande Muraille Verte par l'occupation adéquate des sols

*ROKHAYA D. FALL,
ABDOURAHMANE SAMOURA,
IBRAHIMA DEME
ABDOULAYE DIA*
Institut des Sciences de la Terre/UCAD,
Académie Nationale Des Sciences et Techniques du Sénégal

Abstract

Land degradation of African arid and semi-arid areas has negatively affected the livelihoods of millions people in the Sahara and Sahel countries. Important migratory flows in these areas followed by massive concentrations of human settlements in small spaces, further south, characterize the current development in Sub-Saharan Africa and particularly in the Sahel. The implementation of the major project, driven by a political initiative, called the Great Green Wall (GGW), constitutes a very significant step to face land degradation issues and impacts.

This study is conducted to identify some characteristics of relevance and effectiveness of the GGW which is an integral part of the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) at regional level.

The study is particularly focused on the western part of the GGW implementation zone, in Senegalese territory. Soils of this part of the wall are assessed and their aptitude analyzed, while the local vegetation and the one to breed are studied in terms of pedoclimatic suitability. For the rest of the wall a kind the study less focused proceed through kind of generalization, scientifically based. Methods used are threefold: Geographic Information System (GIS), Soil Science Survey and Botanical Inventory. Thematic maps drawn which constitute intermediate results, lead to the proposed plotting located on the Sahelo-Saharan area between isohyets 150 and 400 mm. The sustainability of the project depends in some parts, on agricultural activities that will be conducted in it, which in addition to the rain will

incorporate the possibility of irrigation. Development modes choice that determines the agricultural, pastoral and forestry systems is the main factor of the GGW sustainability ; this choice is consequences of interpretation of pedoclimatic conditions of different parts of the studied area, that have been surveyed as thematic maps, that constitute important intermediates results of this study. Mitigation and adaption activities towards desertification processes are proposed for each area surveyed.

Large space of plantation, from Dakar to Djibouti, crossing eleven countries of the Sahel, the GGW project is an example of integration allowing at the same time to fight against the advancing desert and to create a space for sustainable income-generating activities and recreation development. Water, soil and plants management combined with targeted training of people in various technical and legal tools to manage its natural resources is main conclusion of the GGW sustainability.

Keywords

SAHEL, SOIL, WATER, AGRICULTURE, LIVESTOCK, VEGETATION

Résumé

La dégradation des terres des zones arides et semi-arides d'Afrique a négativement pesé sur les moyens d'existence de millions de personnes dans les pays du Sahara et du Sahel. Des flux migratoires importants de ces zones suivis de concentrations massives d'établissements humains dans des espaces réduits, plus au sud, caractérisent le développement actuel de l'Afrique Subsaharienne et plus particulièrement au Sahel. La mise en œuvre du projet Majeur, né d'une initiative politique, dénommé la Grande Muraille Verte (GMV), constitue un pas très significatif dans la lutte contre la dégradation des terres et ses conséquences.

Cette étude est conduite pour cerner quelques critères de pertinence et d'efficience de la GMV qui est ici considérée comme une partie intégrante de la mise en œuvre de la Convention des Nations Unies pour la Lutte contre la Désertification (UNCCD) sur le plan régional.

L'étude est approfondie sur la partie Ouest du tracé correspondant au territoire Sénégalais. A ce niveau les sols traversés font l'objet d'évaluation de leur aptitude, tandis que la végétation locale et celle à planter sont étudiées sous l'angle des aptitudes pédoclimatiques des zones traversées. Elle procède d'une certaine généralisation, fonction des données disponibles pour le reste du tracé. Les méthodes utilisées relèvent du Système d'Information Géographique (SIG), de la prospection pédologique et de l'inventaire botanique. Des cartes thématiques qui sont des résultats intermédiaires de cette étude, conduisent à la proposition d'un tracé situé sur la zone sahélo saharienne entre les isohyètes 150 et 400 mm. La pérennité de la bande dépend en partie des activités agricoles qui y seront menées, qui en plus du pluvial devront intégrer la possibilité de l'irrigation. Le choix du mode de développement

qui influe sur les systèmes agricoles, pastoraux et sylvicoles préside de la durabilité de l'initiative Grande Muraille Verte ; ce choix est physiquement dicté par les conditions pédoclimatiques des sous zones identifiées dans le tracé, objets des cartes thématiques, résultats importants de cette étude. Les actions d'atténuation et d'adaptation à la désertification sont proposées pour chaque zone cartographiée.

La bande d'espèces végétales allant de Dakar à Djibouti, traversant ainsi onze pays du Sahel est un exemple d'intégration permettant à la fois de lutter contre l'avancée du Désert et de créer un espace de développement durable d'activités génératrices de revenus et de récréation durable. La gestion de l'eau, des sols et des végétaux doublée d'une formation ciblée des populations aux différents outils techniques et juridiques de gestion de ses ressources naturelles est la clé de la pérennité de la GMV.

Mots clés

SAHEL, SOLS, EAU, AGRICULTURE, ÉLEVAGE, VÉGÉTATION

*Rokhaya D. Fall : Directeur Général Institut National de Pédologie, farodaba@orange.sn, insnatpedo@orange.sn; tel : 221 776394890 ; fax : 221 33 8328517

Sigles et abréviations

BF : BURKINA FASO

CCD : Convention de lutte Contre la Désertification

CILSS : Comité permanent Inter-état de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique

DD : Dakar à Djibouti

DJ : DJIBOUTI

ER : ERYTHREE

ET : ETHIOPIE

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GMV : Grande Muraille Verte de Dakar à Djibouti

INP : Institut National de Pédologie

ISRIC : International Soil Reference and Information Center

ML : MALI

MR : MAURITANIE

NE : NIGER

NG : NIGERIA

PAPF : Projet Aménagements Pastoraux du Ferlo

POA : Projet Opération Acacia

SD : SOUDAN

SN : SENEGAL

SOTER : Soil and Terrain (base de données mondiale sur les sols et le terrain)

TD : TCHAD

UNCCD : Convention des Nations Unies pour la Lutte contre la Désertification

UNEP : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education la Science et la Culture

USDA : United States of Department

Introduction

La gestion et le partage des ressources stratégiques (matières premières minérales, ressources énergétiques, ressources en eau et ressources foncières) sont au centre de plusieurs conflits et enjeux géopolitiques. Au moment des grandes crises énergétiques, alimentaires et financières que traverse le monde, la tendance d'aggravation de ces conflits est à prévoir partout sur la planète mais d'avantage dans les endroits toujours caractérisés par la rareté de ces ressources. En effet, depuis plusieurs décennies, les pays du Sahel sont confrontés à une dégradation accélérée de leurs ressources naturelles qui constituent leur principal capital productif de base et plus particulièrement les ressources foncières.

La dégradation des terres des zones arides et semi-arides, objet de plusieurs concertations internationales, sous régionales et nationales a donné naissance à plusieurs instances où des solutions au problème font l'objet de calendrier d'actions spécifiques et d'approches globales. La convention de lutte contre la désertification (CCD) en est une, le CILSS en est une autre à deux échelles différentes et interconnectées. La Grande Muraille Verte de Dakar à Djibouti (GMV/DD) (Fig. 1) est une des dernières initiatives sous régionales qui adressent la question.

L'insécurité alimentaire que partage l'ensemble des pays du Sahel est une des conséquences de la détérioration du cadre environnemental de la région. Le potentiel naturel du Sahel est en continue réduction avec la destruction de plusieurs espèces forestières et animales et la dégradation des terres de cultures. Aujourd'hui, les peuplements naturels observés, montrent peu, sinon pas du tout de signe de régénération ; la grande majorité des individus est adulte et les individus jeunes sont rares et soumis à une pression permanente du climat, de l'infertilité des terres, du bétail et de l'homme, ce qui les condamne à une disparition précoce. Aussi, la baisse de la productivité des terres, au-delà de son implication dans la préservation d'un écosystème stable, affecte la production agricole et participe à l'insécurité alimentaire et au dépeuplement des zones de grave affectation. La rupture de l'équilibre

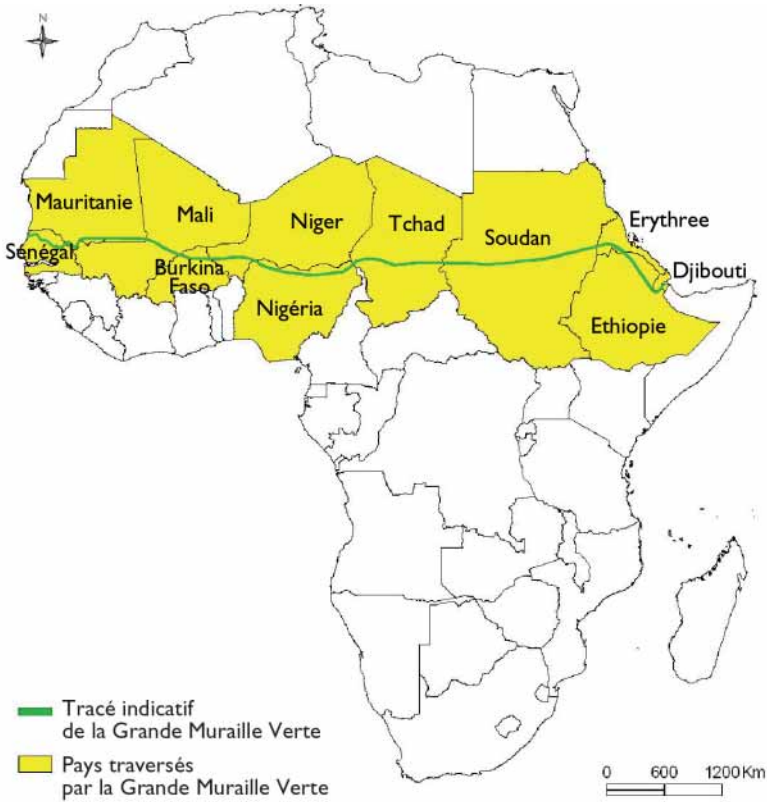


Figure 1.
Tracé schématique de la Grande Muraille Verte du Sahel

écologique des zones affectées entraîne des conséquences non moins importantes dans les zones limitrophes et au-delà des océans, à travers des flux migratoires et des concentrations massives d'établissements humains dans des espaces réduits.

En revisitant l'histoire africaine dans ce domaine de lutte contre la désertification, on peut noter une certaine similitude avec des projets et initiatives qui, pour la plupart, n'ont pas prospéré. Il s'agit entre autres de :

- l'initiative du « Mur Vert » lancée en 1971 en Algérie qui avait pour objectif la reforestation de 3 millions d'hectares de terres ayant 1 500 km de long sur 2 km de large ;
- le projet de la « Ceinture Verte des Pays de l'Afrique du Nord » lancé en 1978 ;
- l'initiative de la « Ceinture verte pour le Nigéria » qui avait pour objectif la plantation de 3 millions d'arbres sur 240 000 ha.
- le projet ceinture verte Sénégal-mauritanien, sur financement du Fonds pour l'environnement mondial depuis 1994 et qui s'est transformé en projet de sauvegarde de la biodiversité.

Volonté politique conduite par une vision claire des enjeux de l'environnement sur le développement, la Grande Muraille Verte du Sahel est un des projets du Siècle pour l'Afrique. Sa réalisation, plus encore sa survie sous les effets de la désertification et sous l'impact des changements climatiques, dépendent de plusieurs facteurs dont deux principaux, l'occupation efficiente des sols de la bande de la muraille sous l'angle de leurs aptitudes consolidées et le régime foncier des terres traversées.

Cette étude se veut une contribution des sciences du Sol à la pérennité de la Grande Muraille Verte (GMV/DD). Elle revisite à l'échelle des territoires qui composent la bande les caractéristiques globales des terres et propose des critères et plans d'occupation viables à l'échelle du Sénégal. L'étude est structurée autour de portions de tracé délimitées à partir de critères pédoclimatiques des terres traversées au Sénégal et de façon plus grossière dans les autres pays de la bande.

Caractéristiques générales des terres de la GMV/DD

Le tracé global, de Dakar à Djibouti comprend une grande diversité de paysages englobant plusieurs types de sols et d'espèces végétales et animales. La bande d'une largeur de 5 à 15 km transposée sur la carte mondiale des sols UNESCO/FAO et ISRIC World Soil Information (1990) permet de recenser 11 groupes majeurs de sols qui présentent des caractéristiques très variées. Le tableau 1 localise ces groupes de sols et, à travers une tentative de corrélation, fixe leurs caractéristiques globales.

Les types et niveaux de dégradations des terres que traverse la grande muraille sont lus et interprétés à l'échelle continentale suivant la carte mondiale des dégradations induites par l'homme (UNESCO/FAO, 1990). Le tableau 2, page suivante, les liste.

Les nombreuses études d'évaluation des impacts de la sécheresse sur les formations végétales dans la zone globale de la GMV (Aubreville, 1950 ; Gaston 1981 ; Valenza 1981 ; White, 1986 ; Von Maydell, 1990 ; Boudet, 1990 ; Hiernaux *et al.*, 1992, Thulin, 1993) ont mis en exergue : i) la quasi-disparition des graminées pérennes comme *Andropogon gayanus*, *Arisida stipoides*, *Diheteropogon hagerupii*, *Hyperthelia dissoluta*... qui représentaient avant cette période des recouvrements compris entre 15 et 20 % sur certaines unités de végétation ; ii) une mortalité importante parmi les formations ligneuses avec raréfaction d'espèces comme *Acacia senegal* (werek), *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum* (rat), *Grewia bicolor*, *Sclerocarya birrea*, *Terminalia avicennioides* ; iii) des espèces menacées de disparition parmi lesquelles *Pterocarpus lucens*, *Parkia biglobosa*, (Jacq) Benth (Oul), *Adansonia digitata* (baobab), *Faidherbia albida*, (Kad), *Sterculia setigera*, (Mbep), et *Dalbergia melanoxylon*, (dialambane) *etc.*

Tableau 1.
Les sols de la GMV et classification corrélée

Matériaux parentaux et formes de paysages majeurs	Sols	Localisations les plus fréquentes
SABLES - DUNES FIXES, SEMI FIXES, MOBILES	Arenosols, aridisols, entisols, alfisols ; Diors	BF ; SN ; ET ; ML ; NE ; SD ; TD
SABLES – PLAINES	Sols ferrugineux tropicaux sur matériels originels sableux	ML ; NE ; NG
SABLES - ROCHES CALCAIRES – DEPRESSIONS ENDOREIQUES et INTERDUNES	rendzine, sols vertiques, sols calciques, sols bruns eutrophes, sols alluviaux, Calcisol	ET ; ML ; MR ; SD ; TD ; SN
CUIRASSE FERRUGINEUSE - PLATEAUX - GLACIS – PENTES - EPANDAGE	leptosols, regosols sur cuirasse et gravillons, sols lithiques	BF ; ML ; MR ; NE ; NG ; SN ; TD
ARGILE – DEPRESSIONS - GRES ARGILEUX- ALLUVIONS	Vertisols et sols similaires dérivés des roches riches en minéraux ferromagnésiens, sols vertiques d'alluvions fluviales	BF ; SN ; ET ; ML ; NE, NG ; SD ; TD
DEPOTS ALLUVIAUX	Vertisols	BF ; ML ; NE ; SN ; TD ; SD ; ET
ROCHES DURES, BASALTE, GRANITES ET MATERIAUX DETRITIQUES	Regosols, alfisols, sols ferrugineux tropicaux sur roches acides	BF ; ML ; MR ; NE ; NG ; SN, TD ; SD ; ET

Tableau 2.
Etat de la dégradation des sols dans la zone traversée par la GMV

Types de dégradation du sol	Pays	Degrés de manifestation de la dégradation 1990 à 2008
Erosion éolienne	SN, MR, ML, BF, NE, NG, TD, SD, ET, DJ	Perte de la partie supérieure du sol, déformation du terrain, dépôts éoliens → Séquelles de transports éoliens au-delà des horizons de surface
Erosion Hydrique	MR, ML, NE, NG, TD, SD, ET, DJ	Déformation du terrain/mouvement de masse, perte de la partie supérieure du sol → Changements notés dans la géomorphologie au niveau des vallées fossiles
Détérioration physique	SN, MR, ML, NG	Compaction /croûte, de moyen en 1990 à forte en 2000-2008 avec la surcharge pastorale
Détérioration chimique	SN, MR, SD	Perte des éléments nutritifs, salinisation et acidification → La perte de la matière organique est généralisée

Source : UNEP/IISRIC, 1990 complétés par des observations et mesures de terrain de 2000 à 2008.

Le tableau 3 montre que certaines espèces sont présentes sur tout le tracé (*Acacia raddiana*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*) alors que d'autres sont très localisées soit à l'échelle sous régionale ou à celle d'un pays (*Grewia flavescens*, *Grewia villosa*, *Rhus oxyacantha*, *Ziziphus nummularia*)

Tableau 3.
Végétation naturelle du tracé : espèces les plus fréquentes

Espèces végétales	Localisation (pays)
<i>Acacia raddiana</i> ,	SN, ML, NG, TD, SD, ER, MR
<i>Boscia senegalensis</i> , <i>Cadaba farinosa</i> , <i>Calotropis procera</i> , <i>caparis decidua</i>	SN, ML, BF, NE, TD, SD
<i>Acacia senegal</i> , <i>Acacia seyal</i>	SN, ML, NE, NG, TD, SD, ER, ET, MR
<i>Acacia nilotica</i>	SN, ML, NE, NG, SD, MR
<i>Acacia mellifera</i> , <i>Ficus salicifolia</i>	NG, TD, SD, ER, ET
<i>Cadaba glandulosa</i> , <i>Leptadenia pyrotechnica</i>	BF, ML, NE, TD, SD
<i>Commiphora quadricincta</i>	NE, NG, TD, SD, ER, ET
<i>Ficus ingens</i>	SN, ML, NE, NG, TD
<i>Grewia flavescens</i>	SN, ML, NE
<i>Grewia tenax</i>	SN, ML, NG, SD
<i>Grewia villosa</i> , <i>Rhus oxyacantha</i>	NE
<i>Maerua crassifolia</i>	SN, ML, SD
<i>Maerua oblongiflora</i> , <i>Maerua aethiopica</i>	NE, TD, SD
<i>Salvadora persica</i>	SN, ML, NE, TD
<i>Tamarix aphylla</i>	SD
<i>Tamarix senegalensis</i>	SN, NE, MR
<i>Ziziphus mauritiana</i>	SN, ML, MR, NE, BF, TD
<i>Acacia Laeta</i>	SN, ML, NE, BF, TD
<i>Combretum aculaetum</i>	SN, ML, BF, NE, TD, SD, ER, ET
<i>Commiphora africana</i> , <i>Cordia qaraf</i>	SN, ML, BF, NG, NE, TD, SD, ER, ET
<i>Grewia bicolor</i>	SN, ML, NE
<i>Maerua angolensis</i>	SN, ML, SD, ER, ET
<i>Ziziphus nummularia</i>	ML
<i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Boscia angustifolia</i>	SN, ML, BF, NE, NG, TD, SD
<i>Boscia salicifolia</i>	NE, TD, SD, ER, ET
<i>Acacia ehrenbergiana</i>	NE, TD, SD
<i>Acacia hebecladoides</i>	TD, NG

Les problèmes qui affectent à des degrés divers, toute la zone sahélienne jusqu'à la limite de la zone tropicale sont de trois ordres : i) la dégradation jusqu'à disparition de plusieurs espèces végétales entraînant la réduction de la diversité génétique et la dénudation des terres ; ii) l'accroissement du degré et de l'ampleur de l'érosion des terres et iii) l'assèchement global des écosystèmes par la réduction dans le temps et dans l'espace des eaux de surface et une apparente diminution des réserves phréatiques, lue à travers l'approfondissement nécessaire et continu des puits d'alimentation.

Pour que la GMV/DD puisse jouer son rôle dans la durée, il lui faut faire face à ces différents challenges en adoptant une approche stratégique intégrant toutes les dimensions des trois ordres de la problématique à travers des activités ciblées, tracées suivant l'aptitude des terres à les supporter de façon rentable et productive dans la durée, en s'assurant de la nature des tenures foncières.

Critères et caractéristiques du tracé en territoire Sénégalais

À la première lecture de la figure 2 du tracé de la GMV sur le territoire sénégalais, on est tenté de se poser la question sur la forme de cette bande qui relie la côte atlantique au Sud de la région de Matam. La réponse nous conduit à deux niveaux de considération, les critères physico techniques dont certains ont fait l'objet de listing lors du séminaire de validation de l'approche stratégique du programme et les critères de faisabilités pratiques.

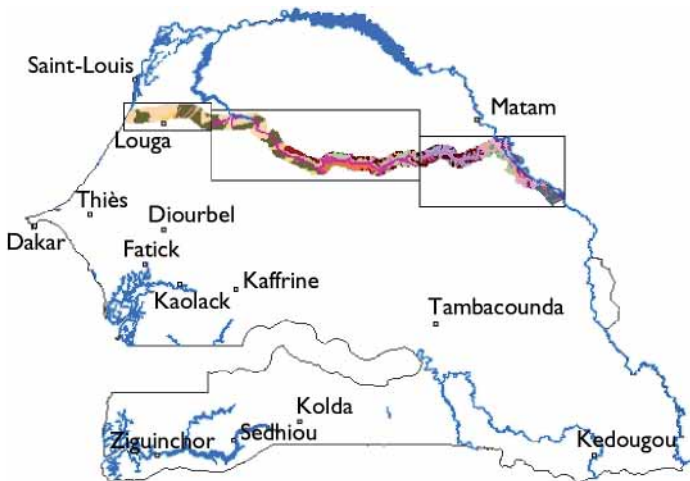


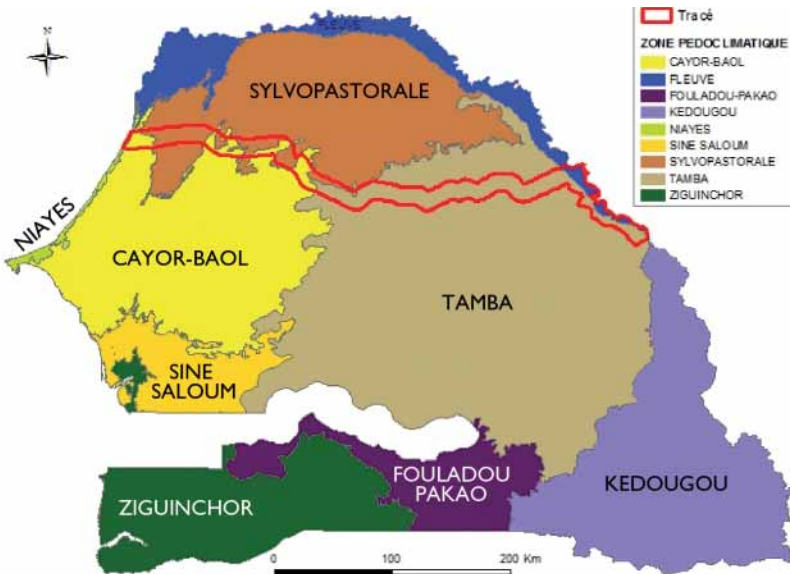
Figure 2.
Tracé de la Grande Muraille Verte du Sénégal

Les Critères physico-techniques que nous retenons ici sont d'ordre climatique (isohyète inférieure à 400 mm), pédologique (sols aptes à porter de manière durable les activités retenues et à mener pour une bonne implantation de la muraille), hydrographique (vallées pouvant abriter des bassins de rétention), socio-économique (zone peuplée, tout en évitant les grands centres urbains déjà dédiés à d'autres activités), écologique (végétation adaptée au but de l'implantation de la muraille) et enfin topographique (relief pas trop accidenté pouvant occasionner des ruptures dans la muraille)

Les Critères de faisabilité pratiques sont des mesures d'ajustements stratégiques pratiques qui sans déroger aux critères physico-techniques, permettent la prise en charge d'acquis d'activités, de programmes et de projets conduits dans la zone globale du projet. L'origine des contorsions du tracé se trouve dans cette prise en compte.

Etude des caractéristiques du tracé au Sénégal

Les figures 4, 5 et 6 proposent un découpage du tracé en trois parties suivant le zonage pédoclimatique (Fig. 3) du territoire sénégalais (Fall, 1994, 2009 et INP/ISRIC 2008). La première partie ou partie Ouest recoupe en majeure partie la



zone des Niayes et se termine dans l'extrême ouest de la zone sylvo-pastorale. La seconde partie ou partie centrale est constituée d'incursions d'ordre stratégique dans la zone du Cayor Baol. La troisième partie ou partie Est prend naissance dans la zone sylvo pastorale Est et s'étale essentiellement dans la zone de Tambacounda. Les sols répertoriés dans les trois parties sont ceux qui figurent dans la révision de la carte morphopédologique du Sénégal (1/500 000) conduite dans le cadre du projet SOTER (ISRIC et INP 2008). La figure 4 est obtenue grâce à la superposition de la carte SOTER et de la carte du zonage pédoclimatique.

La partie Ouest (Fig. 4) reprend les acquis de la bande de filao, fruits de plusieurs projets successifs et destinés à arrêter le mouvement des dunes blanches côtières et jaunes sub-côtières, afin de protéger les zones maraichères, dépressions caractéristiques de la zone des Niayes. Elle s'étend sur **87 km** et couvrent une surface de **1 325 km²**, avec une largeur moyenne de 15 km. Sur le paysage constitué d'un système de dunes blanches et jaunes, se sont développés des sols minéraux bruts d'apport récents ou Entisols. Ce sont des sols sableux dépourvus de toute richesse chimique avec une extrême perméabilité et des mouvements encore actuels de leur matériel parental, les dunes. Ces sols présentent une contrainte physique majeure aux activités agricoles.

Les dunes vives ou semi fixes, matériaux originels de ces Entisols ne portent pratiquement aucune végétation naturelle, en dehors de quelques petites poches éparées de *Opuntia tuna*, *Calotropis procera* et *Maytenus senegalensis* et de formations d'origine anthropique essentiellement composées de *Casuarina equisetifolia*, implantée à dessein pour leur fixation.

Les dépressions interdunaires, qui donnent à l'unité pédoclimatique son appellation de Niayes portent des sols à nappes perchées et, par endroit, à horizon de profondeur tourbeux. Il s'agit d'un labyrinthe soudano-guinéen, piégé en plein Sahel et portant des reliques végétales typiquement guinéennes comme *Elaeis guineensis*, et *Parinari macrophylla* localisés dans la zone de contact entre le bas du système dunaire et la dépression et *Cocos nucifera*, qui rappelle plus les influences marines. Le cœur des dépressions est peuplé par des espèces aquaphiles, en particulier *Nymphaea lotus* et *Phragmites vulgaris*.

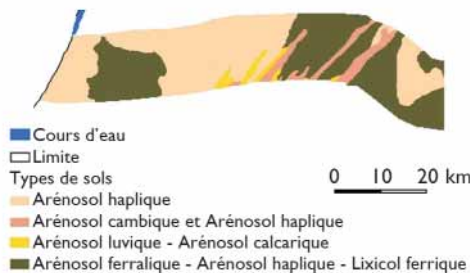


Figure 4.
Partie occidentale du tracé de la Grande Muraille Verte au Sénégal

Aux complexes dunes blanches/dunes jaunes/dépressions globalement appelées la zone pédoclimatique des Niayes, à la limite de l'influence du climat cap verdien suit une unité pure d'Arénosols hapliques formés sur dunes remaniées et rubéfiées, souvent entièrement déboisées et portant la culture de l'arachide ou du Manioc.

Plus à l'Est, dans l'extrême Ouest de la zone sylvo pastorale, des associations d'Arénosols, tantôt ferriques, tantôt ferraliques, tantôt hapliques communément englobés dans le groupe des sols brun-rouge suivant la classification Française ou des Dior suivant l'appellation locale portent plusieurs espèces dont la plupart sont anthropiques, *Faidherbia albida*, produits de mise en défens, *Acacia raddiana*, *Acacia seyal* implantées et *Balanites aegyptiaca* plus présentes dans la partie septentrionale de la région des Niayes. Les strates arbustives et herbacées sont essentiellement composées d'euphorbiacées (*Euphorbia balsamifera*), de combrétacées (*Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*, etc.), de graminées saisonnières (*Cenchrus biflorus*, *Andropogon sp*, etc.) ou des plantes pionnières sur les sols minéraux bruts (*Ipomea pescaprea*).

La partie Centrale (Fig. 5) comprend des poches alternes du Cayor Baol et de la zone sylvo pastorale dans sa première portion Est. Dans sa partie Ouest, elle se situe dans la zone de Tambacounda. En fait, la partie centrale suit un fil conducteur qui correspond à l'unité SOTER 28 (INP/ISRIC 2008) constituée d'une association de gleysol dystrique 50 % et de fluvisol eutrique 50 %, et appartenant à la vallée morte du bras Sud-Est du Lac de Guiers. Ces sols sont relativement riches grâce à leur texture > 50 % d'argile en profondeur qui leur permet d'avoir une bonne capacité de rétention en eau et en nutriments. Le profil de référence indique des valeurs relativement élevées pour la zone (CEC > 10 mEq/100 g sol). La végétation naturelle portée par cette unité traduit cette richesse relative ; il s'agit de *Parkia biglobosa* (Jacq) Benth (Oul), *Detarium microcarpum* Get Per.(Dankh), *Parinari macrophylla* Sabine (Néou).

De part et d'autre de ce fil conducteur, dans en zone sylvo pastorale et du Cayor Baol, des unités pures d'arénosols hapliques et des associations d'arénosols hapliques et ferriques et quelques rares poches d'arénosols cambiques forment les terres jusqu'à la hauteur de Ouarkhokh.

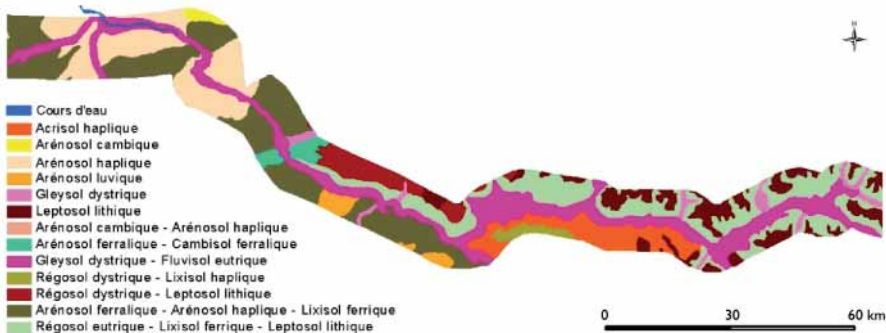


Figure 5.
Partie centrale du tracé de la Grande Muraille verte du Sénégal

Dans la partie comprise dans le Tambacounda, des infiltrations de leptosols litiques intercalés d'arénosols luviques et des associations comprenant des plages de lixisols ferriques et d'acrisols hapliques constituent la base de la formation des terres. Les peuplements végétatifs naturels qui donnent lieu à des steppes de faible densité soutenues par endroits par les interventions anthropiques, varient suivant la profondeur et l'état d'humidité des différents sols. On y note principalement : *Acacia senegal* (werek), *Acacia raddiana* (séing), *Sterculia setigera* (Mbepp), *Acacia albida*, *Acacia tortilis*, *Zizyphus mauritiana* (joubier), *Balanites aegyptiaca* (soump), *Anona senegalensis* Pers. (Dugor) et *Boscia senegalensis* (njandam). La strate herbacée plus fournie dans cette partie centrale qu'à l'Ouest comprend des bouquets de *Cassia obovata* mêlés à des graminées telles que *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*, *Dactyloctenium aegyptiaca*, et *Zornia glochidiata*.

La partie orientale (Fig. 6) qui commence à la fin de l'unité SOTER 28, fil conducteur de la précédente partie, s'étend principalement dans la zone pédoclimatique de Tambacounda et se meurt dans l'extrémité de la zone du Fleuve. L'unité SOTER 28 donne suite à une unité pure de gleysol dystrique qui s'estompe à la hauteur d'Ouro Sidy. Ce parcours de vallées mortes est accompagné de part et d'autre de sols de plus en plus caillouteux ou chargés de gravillons ferrugineux. Les quelques incursions de cambisols tantôt eutriques tantôt ferralliques occupent des plages de plus en plus importantes vers Orkadiéré.

Plus à l'Est, des étendues d'unités entières de leptosols lithiques, et des associations où les leptosols sont prédominants et comprenant tantôt des régosols eutriques ou dystriques et des lixisols ferriques constituent le paysage pédologique, qui change juste avant la partie Fleuve vers Bokiladji, avec une prédominance de cambisols et régosols.

L'incursion non négligeable dans la zone pédoclimatique Fleuve, fait enregistrer des plages entières de vertisols eutriques, cambisols vertiques et de gleysols dystriques et eutriques.

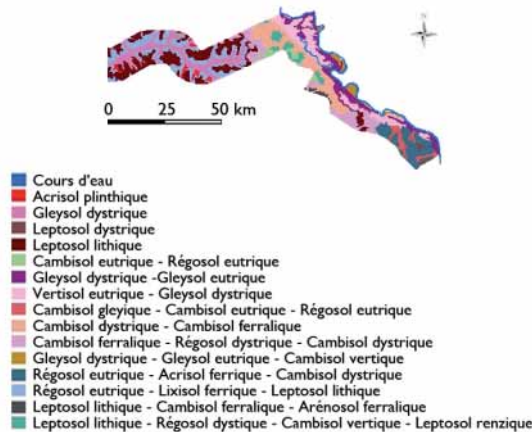


Fig. 6.
Partie orientale du tracé de la Grande Muraille verte du Sénégal

L'inventaire botanique de cette partie varie suivant les situations de sols ci-avant répertoriés. Sur les sols gravillonnaires ou à affleurements latéritiques, la végétation se compose entre autres, de reliques de *Pterocarpus lucens* (sagari), *Borassus aethiopicum* (ronier), *Acacia seyal* (suruur), *Bombax costatum*. Quand le caractère eutrique ou gleyique est noté, on recense alors quelques rares *Tamarindus indica* L. (Dakhar), *Adansonia digitata* (baobab), *Sclerocarya birrea*, *Dalbergia melanoxylon* (dialambane), *Grewia bicolor*, *Commiphora africana*, *Terminalia avicennioides*. Les associations avec *Combretum micrantum* (sexaw), *Combretum glutinosum* (rat), *Combretum nigricans* (tap) se densifient au niveau des plages de cambisols, lixisols et acrisols.

De façon générale le tracé d'Ouest en Est, à travers ses trois subdivisions, révèle une forte dégradation de la couverture végétale liée à une exposition importante dans le temps et dans l'espace des sols aux phénomènes d'érosions éolienne et hydrique et une faible disponibilité en eau de surface et de profondeur. Dans un contexte de sécheresse et de crise des systèmes de production agricole, l'exploitation forestière constituant un moyen de survie pour les populations, aucun espace boisé (bas-fonds, bordures des pistes, galeries forestières, etc.) de la zone n'est épargné. Aujourd'hui, les peuplements naturels observés dans la zone d'action du projet sont pour la plupart vieillissants. Les jeunes plantes sont rares et soumises à une pression permanente du climat, du bétail et de l'homme qui les condamne à une disparition précoce. Ce qui pose la question de la survie à long terme des peuplements en l'absence d'indices de régénération et de mesures radicales de promotion de la régénération (lutte contre les feux de brousse, reboisement, etc.). La surexploitation séculaire d'un couvert végétal clairsemé et composé principalement d'espèces épineuses, combinée aux fluctuations climatiques a fini par modeler l'écologie dans une situation de précarité extrême.

Les propositions d'axe d'intervention et d'activités à implanter dans le tracé de la GMV se fondent sur des réalités sénégalaises et intègrent l'ensemble des maux diagnostiqués du tracé global. De façon générale on peut retenir que la Grande Muraille Verte, située à la limite du désert du Sahara dans le domaine Sahélo-Saharien, devra s'implanter dans une approche stratégique globale bien ciblée et précise pour juguler les processus de dégradation très prononcée caractéristiques de ce domaine aux conditions climatiques particulièrement défavorables.

Propositions d'axes d'intervention

En raison du caractère multidimensionnel du Projet de la « Grande Muraille Verte » la vision acceptée et partagée repose sur une approche intégrée et participative mettant en synergie un ensemble d'activités et d'actions destinées à la solution des problèmes de dégradation des écosystèmes mais aussi à la génération de moyens d'existence des populations en charge de façon continue de la mise en œuvre de ces solutions. La reforestation, l'élevage, l'agriculture mais aussi toute autre activité

économique nécessaire à la vie des populations comme la mise en place d'unités industrielles sur la base des productions agricoles, la formation et la récréation sont à prendre en compte. Un seul principe guidera l'implantation de ces dernières, les aptitudes actuelles des terres et les coûts récurrents à l'actualisation des potentialités.

La reforestation constitue une partie importante de la Grande Muraille, d'où sa couleur verte. Il s'agit de recolonisation des espaces dénudés par des espèces conformes aux caractéristiques des terres en présence et non de reboisement tous azimuts avec un choix globalisant des espèces. Autant un choix d'espèces adaptées aux zones arides et semi-arides est déterminant pour la réussite des opérations de plantation, autant il est question de se conformer aux caractéristiques pédoclimatiques à l'intérieur de la zone globale et opérer un choix idoine d'espèces qui présentent à la fois des capacités de survie les plus élevées et un intérêt réel pour les populations.

Du labyrinthe de dépressions interdunaires aux zones de vallées fossiles, les sols peuvent porter dans la durée des espèces soudano-guinéennes et faire renaître des galeries forestières.

Sur les dunes blanches et jaunes de la partie occidentale, deux espèces ont déjà enregistré des performances notoires. Il s'agit de :

– *Casuarina equisetifolia* a fait la preuve de son adaptation aux conditions pédoclimatiques de ce site, notamment sur dune blanche, il a aussi la particularité de résister aux brises marines, à la sécheresse et d'avoir une croissance rapide et les populations, le service forestier et autres structures d'encadrement ont accumulé beaucoup d'expériences dans la plantation de cette espèce.

– *Eucalyptus camaldulensis* aussi, pousse également bien dans ce site. Cependant il résiste moins bien aux embruns marins que le filao et demande plus d'eau. C'est pourquoi il n'est préconisé que sur les dunes jaunes abritées du vent.

L'utilisation de ces deux espèces permet d'éviter les peuplements mono spécifiques purs dans ce site. En outre leur croissance rapide permettra de gagner assez tôt d'importants crédits de carbone.

Le reboisement par des espèces fruitières adaptées contribue à l'équilibre nutritionnel des populations et à la lutte contre la pauvreté. Il est à privilégier tout le long du tracé partout où cela est possible. Le palmier dattier (*Phoenix datilifera* L.) est une des espèces dont l'introduction est à favoriser. Les tests réalisés certifient de son adaptabilité dans les portions occidentales et centrales de la bande. Des résultats en pépinières ont été obtenus au Sénégal pour certaines espèces des zones de forte aridité. On peut citer ; *Adansonia digitata* (baobab), *Sclerocarya birrea*, *Parkia biglobosa*, (Jacq) Benth (Oul), *Tamarindus indica* L. (Dakhar), *Zizyphus mauritiana* (jujubier), *Diospyros mespiliformis*, etc. (Guissou *et al.*, 2001). Le « jujubier » est une espèce frontière des zones arides dont les fruits représentent une valeur réelle tant du point de vue nutritionnel qu'économique. Les résultats de la domestication de l'arbuste en Inde a permis un accroissement de vingt fois le volume initial des fruits. La diffusion de la variété améliorée au Sénégal est techniquement faisable, les coûts des plants micro greffés et les bénéfices que les populations en tirent méritent d'être pris en compte et analysés.

La mise en défens des sujets jeunes et même vieux mais encore vivaces est une technique à généraliser dans toutes les portions du tracé. La régénération naturelle demeure la plus appropriée pour plusieurs espèces des zones arides, l'exemple de *Faidherbia albida* est très connu dans le Cayor-Baol où sa régénération autorise aujourd'hui une forte densité (20 à 25 pieds par ha) dans les champs. L'agroforesterie est une autre technique à adapter suivant les disponibilités en eau, en veillant à l'adéquation pédoclimatique des écartements entre espèces et entre plan de cultures annuelles et rangées d'arbres.

Sur sols à forte charge gravillonnaire et ou à cuirasse sub-affleurante, à l'est de la partie centrale et tout au long de la partie Est, seule des actions de reforestation sont indiquées. Il s'agit ici de restauration de milieux dégradés, de promotion d'actions de conservation des eaux, de diversification et de redynamisation des filières de production rurale : gommages et résines, produits forestiers non ligneux. A ce titre, l'expérience des projets de développement et des populations ainsi que les acquis de la recherche seront également mis à profit pour la réussite des plantations et l'exploitation optimale des gommages et résines d'une part, des autres produits forestiers, d'autre part. *L'Acacia senegal*, espèce très présente dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes avec une présence localisée dans les zones saharo-sahéliennes et nord-soudanienne, constitue la principale espèce à mettre en place. Ce choix obéit à un certain nombre d'arguments liés à l'engouement que sa plantation suscite auprès des populations rurales grâce aux revenus qu'elles tirent de l'exploitation de la gomme et l'existence dans ce site, qui constitue sa zone de prédilection au Sénégal, d'atouts sur le plan des expériences capitalisées en matière de plantations et de gestion des ressources naturelles en général. Depuis 1999 plus de 18 959 ha de plantations de gommiers répartis dans les arrondissements de Sagatta-Djoloff, Yang-Yang et de Dodji sur un objectif de 40 000 ha de plantations de gommiers prévus dans le département de Linguère. Des projets forestiers ont également réussi des plantations dans cette zone (Kamb, Mbeuleukhé, Ouarkhokh, Barkédji, etc.).

Il s'agira également d'allier la foresterie et la fixation du bétail pour un meilleur élevage qui serait alors semi extensif/semi intensif. Aussi les espèces à promouvoir seront d'une bonne appétence pour le bétail et pourront constituer des balles de foin à conserver pour les temps difficiles. Une pratique de semis à la volée à partir de moyens aériens, de graminées comme *Andropogon gayanus*, constitue un autre volet de développement de l'élevage dans la zone tout en préservant les terres.

La capitalisation systématique d'essais de comportement menés dans les divers paysages devrait porter des innovations pour la GMV. Par exemple *Boscia senegalensis* pers. Lam est une espèce à considérer dans les programmes de lutte contre la désertification et la préservation de l'environnement compte tenu des résultats de travaux déjà réalisés dans le Nord du Sénégal et dans toute la zone sahélienne et qui ont mis en évidence les vertus thérapeutiques, les qualités fourragères et alimentaires ainsi que les capacités de survie sur des sols pauvres à très dégradés de l'espèce. Le genre *Atriplex* selon certaines recherches peut jouer un rôle important dans les programmes d'amélioration des parcours pastoraux des zones arides et semi-arides pour les ovins et caprins.

Les résultats de l'amélioration génétique dans la production de semences sont à mettre à profit et favoriser la domestication d'espèces économiquement rentables et acceptées par les populations. A ce titre dans certains pays, comme le Niger (Niamey), les techniques de domestication et multiplication de *Leptadenia hastata* mises au point jusqu'ici sont très prometteurs. C'est une plante à usage multiple qui couvre le sol, piège du sable et des graines de graminées emportées par le vent. Ces dernières pourront repousser à ses pieds et contribuer à la revégétalisation des zones dégradées.

Quelle que soit la technique de reforestation, elle requiert l'implication des populations qui est un facteur primordial de réussite. Plusieurs rencontres tenues dans le cadre de la mise en œuvre de ce projet majeur, parmi lesquels le Colloque Scientifique sur le choix des espèces et techniques de reforestation tenue à Dakar en février 2001 et le Séminaire international sur les Bassins de Rétention et la Grande Muraille Verte tenue à Dakar les 29 et 30 Mars 2006, ont mis en exergue l'importance de l'implication des populations. Cette implication, en dehors de la garantie de la réalisation, du suivi et de la préservation des acquis, interroge deux aspects fondamentaux, le régime foncier et la gestion des produits issus de la forêt. Le régime foncier reste au cœur des préoccupations de toutes les autres activités de la grande muraille, et participe à sa pérennité. A ce niveau aucune formule n'a valeur de recette, il s'agit d'adapter des mesures garantes d'une certaine pérennité, dans la mise en œuvre qui est un processus continu, dans le suivi et dans la gestion des produits.

Les activités agricoles procèdent de cultures irriguées et de cultures sous pluies. Les techniques d'irrigation seront adaptées aux différents types de sols et à la proximité des eaux disponibles. Des plages d'acrisols, d'arénoles et de régosols eutriques qui accompagnent les galeries forestières soudanaises et les autres sols à caractères gleyiques et vertiques, pourront être colonisées par des cultures céréalières et légumières sous pluies avec des appoints d'eau, par le réseau de bassin de rétention. Le bétail dont l'élevage intensif pourrait se mener dans les pseudos hauteurs leptiques et squelettiques non aptes aux cultures annuelles, profiterait aussi de ce réseau de bassins de rétention. Il pourrait se dessiner de ces îlots de concentration du bétail tout un parcours intérieur GMV, d'Ouest en Est le long des galeries forestières soudano guinéennes, leur permettant de prendre bénéfice de ce réseau.

Le réseau de points d'eau ou bassin de rétention vu à l'échelle de la présente étude permet de prédire trois grands domaines de réseaux d'« oasis » qui tiennent compte d'une part, de la longueur probable de séjour de l'eau en surface, fonction des pluies de l'évaporation et de l'infiltration, d'autre part, de la densité de l'habitat déjà noté sur le tracé. L'unité 28, fil conducteur affiche un habitat particulièrement dense pour la région. Ces « oasis » se situeraient tous sur le tracé central, d'ouest en Est entre i) Gasse Diabé et Touba Mballo Fourdou Mbaila, au cœur de Ngala Ndao, dont la superficie estimée totale est de 82 km² ii) dans le coude du tracé entre Belly et Loumbel Lane, avec une superficie totale de 56 km² iii) de Ndegue Bissinabé à Kébé Khakham avec une superficie de 31 km². Il s'agit de trois réseaux de bassin à taille variable suivant la géomorphologie et la topographie de chaque domaine. Des études plus détaillées sont requises pour l'installation de ces réseaux.

Conclusion

La réussite du projet de la « Grande Muraille Verte » (GMV), Projet Majeur du continent africain, dépend de l'engagement des peuples tout au long du tracé.

Initiative politique des plus hautes autorités de onze pays du continent, il est assis sur une base volontariste qui fait défaut à plusieurs initiatives, mais qui ne peut à elle seule garantir sa réussite dans la durée. Initié au plus haut niveau politique, il va impulser un nouvel élan à la lutte contre l'avancée du désert, en se positionnant comme un programme fédérateur qui doit veiller à la mise en cohérence de l'ensemble des interventions relatives à la mise en valeur de l'espace Saharo-Sahélien.

Le projet pourrait constituer un pas très significatif vers la mise en œuvre de la Convention des Nations Unies pour la Lutte contre la Désertification (UNCCD) sur le plan régional et permettre ainsi de renforcer les capacités de développement de l'Afrique en ce qui concerne le contrôle de la dégradation des sols et la désertification, par le biais d'échanges d'expériences en termes de bonnes pratiques dans le cadre du dialogue Sud-Sud. Les sciences du sol constituent le soubassement qui fonde les approches de sa réalisation, de son suivi et de sa pérennité, parce qu'elles mettent à tous les niveaux, de la conception à la cueillette des fruits, des outils technico-législatifs garants de son succès.

Il reste cependant clair que des études plus approfondies sont à mener au niveau de chaque portion du tracé pour consolider les résultats de la présente étude.

Bibliographie

- Aubreville, A., 1950 -
Flore Forestière Soudano-Guinéenne.
AOF. – Cameroun – AEF ORSTOM. 523 p.
- Boudet, G., 1990 -
Peut-on améliorer la gestion de parcours
sahéliens ? Sécheresse (1) 55-60
- DAT, USAID, RSI. 1984 -
Cartographie et télédétection des ressources
de la République du Sénégal. Etude de la géologie,
de l'hydrogéologie, des sols, de la végétation
et des potentiels d'utilisation des sols.
Doc. SDSU – USAID – RSI – 86-01, 653 p.
- Fall, R.D. 1994 -
Zonage pédoclimatique et classification
ethnopédologique des sols du Sénégal
(document de travail 20 p).
- Fall, R.D. 2009 –
Révision du Zonage pédoclimatique
du Sénégal, (thèse en cours).
- FAO/UNESCO, 1990 -
World soil resources.
An explanatory note
on the FAO World Soil Resources
Map at 1:25 000 000 scale

- Gaston, A., 1981-
Evolution de la végétation au Tchad
(nord-est et sud-est du Lac Tchad).
Evolutions récentes sous des influences
climatiques et humaines.
Thèse Université Paris XII - Val de Marne,
carte 1/200 000, 333 p.
- Guissou, T., Ba, A. M. Plenchette, C.
Guinko, S. Duponnois, R. 2001 -
Effets des mycorhizes à arbuscules
sur la tolérance à un stress hydrique de quatre
arbres fruitiers : *Balanites aegyptiaca* (L.) Del.,
Parkia biglobosa (Jacq.) Benth., *Tamarindus*
indica L. et *Zizyphus mauritiana* Lam.
Revue sécheresse, vol.12 numéro 2
- Hiernaux, P.Y. ; Cisse, M.I. ; Diarra, L. ;
De Leeuw, P.N., 1992 -
Fluctuations saisonnières de la feuillaison
des arbres et des buissons sahéliens.
Amélioration de l'évaluation des ressources
fourragères des parcours sahéliens.
Centre International pour l'Élevage en Afrique,
Mali, 26 p.
- INP – ISRIC, 2008 –
Révision de la carte morphopédologique
du Sénégal au 1/500000
et établissement du Soil and Terrain Data Base
(SOTER) du Sénégal
- Résultats de l'Atelier International
sur la Grande Muraille Verte ;
Dakar – 12 – 13 Février 2008
- Résultats du Colloque Scientifique
sur le choix des espèces et techniques
de reforestation tenue à Dakar en février 2001
- Résultats du Séminaire international
sur les Bassins de Rétention
et la Grande Muraille Verte ;
Dakar – 29 et 30 Mars 2006
- Thulin M. 1993.
Flora of Somalia. Vol. 1,
Royal Botanical Garden Kew, 493 p. ;
- Valenza, J., 1984 -
Surveillance continue des pâturages
naturels sahéliens sénégalais.
Résultats de 10 années d'observations.
ISRA-LNERV, Dakar, 81 p., 35 tabl., 50 fig.
- Von Maydell, H.- J.- 1990.
Arbres et arbustes du Sahel.
Leurs caractéristiques et leurs utilisations.
Verlag Josef Margraf, 530 p. ;
- White, F. 1986.
La végétation de l'Afrique.
Mémoire accompagnant la carte de l'Afrique.
UNESCO/AETFAT/UNSO.
ORSTOM – UNESCO, 384 p.

Partie III

Réalisations

L'analyse des expériences de mise en place de ceintures vertes au niveau du circum-Sahara

MOURAD BRIKI & NABIL BEN KHATRA

Observatoire du Sahara et du Sahel, Bd, leader Yasser Arafat, BP 31 - Tunis 1080

www.oss-online.org,

Mourad.briki@oss.org.tn,

nabil.benkhatra@oss.org.tn

Résumé

La menace de la désertification est importante en Afrique sub-saharienne et ce, particulièrement, dans la zone circum-saharienne caractérisée par des climats allant de l'hyper-aride au subhumide sec. Les sources de vie dans les pays de cet espace sont fortement dépendantes des ressources en sol, en eau et en végétation fragilisées par des pressions de plus en plus croissantes.

Combinée à des facteurs anthropiques, la sécheresse a sérieusement affecté les équilibres écologiques, entraînant une dégradation des ressources naturelles, des sols et une baisse des productions agricoles. Sur le plan socio-économique, la chute des potentiels agricoles a réduit de façon drastique les revenus des populations, ce qui, conjugué au manque de sources alternatives de revenus, explique la persistance de la pauvreté en milieu rural.

Face aux constats établis sur la dégradation des terres au niveau du circum-Sahara, des actions de réhabilitation des terres ont été menées. L'accent a été mis sur des programmes de reboisement.

Le présent document récapitule et analyse les principales expériences de ceintures et barrages verts en Afrique de l'Ouest, Afrique de l'Est et Afrique du Nord. Une analyse plus approfondie de l'expérience algérienne a été réalisée en vue de dresser le bilan des réalisations et de tirer les leçons aussi bien des aspects positifs que négatifs.

Il en ressort que la mise en œuvre de telles initiatives doit tenir compte des dimensions écologique et socioéconomique. Elles doivent se baser sur les établissements humains construits autour d'une agriculture viable grâce à l'irrigation et à la gestion durable des ressources pastorales.

Mots clés

CIRCUM-SAHARA, DÉSSERTIFICATION, ÉCOLOGIE, SOCIO-ÉCONOMIE, REBOISEMENT

Les expériences de reboisement dans le circum-Sahara

L'idée de ceinture verte est née avant la conférence des Nations Unies sur la lutte contre la désertification organisée en 1977 à Nairobi, avec les projets « ceinture verte » de Niamey (1965), « barrage vert » en Algérie (1971) et la « ceinture verte » de Nouakchott (1975). Dans les autres pays circum-sahariens, les activités de reboisement et les activités de fixation de dunes étaient déjà une « tradition » des services forestiers.

Expériences en Afrique de l'Ouest

L'idée de ceinture verte périurbaine est née en réponse à une problématique de dégradation des espaces sylvo-pastoraux, ayant engendré un besoin de protection contre l'ensablement, de dépollution d'un environnement urbain poussiéreux et d'approvisionnement en bois de feu. Ce concept a évolué par la suite en assimilant l'aménagement intégré agro-sylvo-pastoral à une ceinture verte « ouverte » et « discontinue ».

En **Mauritanie**, c'est le pays où l'expérience de ceinture verte est la plus diversifiée et la plus large, en termes de nombre et de répartition de projets ou de sites. Plusieurs types de ceintures vertes ont été installés, toutes à vocation de protection et non de production :

Le modèle « **grande agglomération** » : dans la capitale nationale et les capitales régionales :

– la ceinture de Nouakchott, sous climat saharien : stabilisation mécanique suivie d'une fixation biologique (plantation, essentiellement de *Prosopis juliflora*) avec irrigation ; elle a joué un rôle important dans la protection de l'agglomération et des quartiers périphériques, ainsi que dans l'emploi *informel* ;

– la ceinture verte de Kiffa, en zone sahélienne : reboisement direct sans stabilisation mécanique ni irrigation, de cordons dunaires en mouvement. Cette ceinture est intéressante de par son coût d'installation relativement faible.

Le modèle « **agglomération et zone de culture** » dans les oasis en zones saharienne et sahéliennes : ce sont des ceintures vertes de 15 à 335 ha susceptibles d'assurer une protection efficace et une production de bois pouvant couvrir les frais d'entretien ;

Le modèle « **route** » : il s'agit de sites de 5 à 15 ha, destinés à des protections *ponctuelles* ;

L'expérience mauritanienne a porté sur plus de 100 sites et a permis de montrer que la participation des populations s'est avérée possible sur une base contractuelle définissant les conditions et les modalités de partage des coûts directs.

Au **Niger**, on peut distinguer deux modèles ceinture verte. La « **grande agglomération** », avec la ceinture verte de Niamey (2 500 ha), et les « **agglomérations et cuvettes aménagées** », en zones sahariennes qui sont de petites ceintures de protection (de 10 à 150 ha) couvrant une superficie cumulée de moins de 1 000 ha.

Au **Mali**, l'expérience en matière de ceintures vertes est relativement récente (1990). Elle concerne le programme de lutte contre l'ensablement dans les régions de Tombouctou et de Gao. Selon le concept développé la ceinture verte est formée de deux parties :

– un périmètre de « *protection intensive* », situé à proximité immédiate de l'agglomération et dans lequel les dunes sont mécaniquement stabilisées puis biologiquement fixées ;

– un périmètre de « *protection extensive* », situé dans les zones dites « de ravitaillement », en amont du périmètre de protection proprement dit, au titre de la réduction de la pression des dunes mobiles sur ce dernier.

L'approche suivie au niveau des modalités de mise en œuvre est assez originale. Pour la production de plants de pépinière, trois voies possibles ont été prospectées et testées (régie, producteurs privés et populations). Concernant la stabilisation mécanique et la plantation des arbres, deux modalités : 1), une phase en régie, dans des sites pilotes et 2), et une phase extension dans l'espace et transfert de responsabilités aux populations.

Au **Sénégal**, l'originalité conceptuelle de *la ceinture verte de Dakar* réside dans le fait qu'elle soit composée d'un « réseau de forêts naturelles mises sous régime forestier », consolidé et complété par, d'une part, des plantations et des périmètres de stabilisation de sol et d'espaces verts, et d'autre part, de plantations routières, impliquant les municipalités et les communautés locales.

Au **Burkina Faso**, les éléments les plus saillants de l'expérience de *la ceinture verte de Ouagadougou* sont :

– l'option pour un concept : « la ceinture verte est un élément de l'aménagement paysager en milieu urbain et périurbain » ;

– l'option pour une participation communautaire ;

– l'option pour l'irrigation d'entretien, bien que le climat soit soudanien (700 mm de pluie).

Globalement, malgré des approches *saines*, d'énormes difficultés persistent, notamment dans les quartiers périphériques, empêchant l'extension ou la consolidation des efforts, voire même hypothéquant les réalisations déjà menées, faute de solution adéquate pour une gestion durable des acquis.

Afrique de l'Est

Les pays de cette sous-région s'orientent davantage vers le concept de réhabilitation d'écosystèmes fragiles fondé sur l'adaptation du mode d'utilisation des terres et sur la décentralisation des responsabilités au niveau des institutions locales. Deux expériences méritent d'être citées :

l'expérience kenyane en matière de plantation d'arbres est originale à double titre : *primo*, le concept est fondé sur le principe d'une conservation de l'environnement en valorisant les ressources et le savoir faire locaux. *Secundo*, la plantation d'arbres a joué un rôle catalyseur et intégrateur d'actions de développement et un rôle conservateur de la diversité biologique.

L'expérience soudanaise, dans laquelle l'implication d'institutions locales a permis la réhabilitation de l'écosystème en voie de dégradation et l'exploitation forestière durable d'une réserve naturelle en région sèche.

Afrique du Nord

L'idée d'ériger des « barrières forestières » pour protéger les agglomérations et les routes contre « l'avancée des dunes » était née dès le début des années 60 dans la plupart des pays nord-africains, en même temps que l'idée de réhabiliter par le reboisement des espaces dégradés et considérés à vocation forestière.

Au niveau sous-régional, un projet « ceinture verte en Afrique du nord » a été initié par le PNUE, dans le cadre de la coopération dans le domaine de la sécurité alimentaire. Le projet n'a pas atteint ses objectifs mais a toutefois permis des réaliser des études sectorielles et ponctuelles et à l'organisation de rencontres sous forme de séminaires et de sessions de formation sur des thèmes variés, sans rapport direct avec les efforts des pays sur le terrain.

Les expériences nationales suivantes méritent une attention particulière :

– L'expérience tunisienne est très ancienne et a porté sur la protection des oasis et leurs agglomérations et sur la protection des routes. Les réalisations ont totalisé **20 000 ha**. Les plantations sont faites aussi bien avec des espèces locales qu'avec des espèces introduites.

– L'expérience marocaine a démarré en 1915, avec la fixation biologique des dunes maritimes sur la côte atlantique, pour la protection de villes comme Tanger, Kénitra et Agadir. Les conditions pluviométriques, le plus souvent favorables (200 à 750 mm/an) autorisaient le recours à des espèces introduites à croissance rapide comme l'Eucalyptus, l'*Acacia cyanophylla* et l'*Acacia cyclops*. Les réalisations ont totalisé plus de 34 000 ha de plantations en 60 ans. La taille de la ceinture varie beaucoup d'un site à l'autre, elle va de 14 000 à 12 000 ha. Quant aux ceintures vertes de protection de palmeraies et agglomérations continentales, elles n'ont démarré qu'en 1979. Elles sont installées selon les mêmes techniques que celles utilisées en Tunisie, en Mauritanie et au Niger. La taille de la ceinture est très variable d'un site à l'autre, allant de 3 à 165 ha.

En Egypte, deux types de réalisation méritent d'être cités. 1), Des ceintures vertes de lutte contre l'ensablement, utilisant les eaux usées traitées ou les eaux de mauvaise qualité des nappes profondes ; et 2), la ceinture verte périurbaine du Caire, composée de bandes boisées de 50 mètres de largeur et les espaces verts à l'intérieur des agglomérations.

Le Barrage vert de l'Algérie

Dans les années soixante, l'Algérie s'est retrouvée face à des préoccupations environnementales, caractérisées par la régression très significative des nappes alfatières, entraînant une intensification des phénomènes érosifs dans les zones montagneuses et l'apparition de paysages désertifiés dans la steppe.

L'idée du barrage vert s'est concrétisée en 1971 dans l'objectif de ralentir le processus de la désertification par une action de reforestation. Sa conception ne sera revue que plus tard, en 1982. L'objectif fondamental devint alors le rétablissement et le maintien de l'équilibre écologique du milieu par une exploitation rationnelle des ressources naturelles avec pour finalité la promotion socioéconomique des populations. Il s'agissait donc d'une approche intégrée visant à : 1), améliorer le niveau de vie des populations ; 2), restaurer et augmenter le potentiel productif des terres ; 3), reconstituer les peuplements forestiers disparus et reboiser les terres à vocation forestière ; 4), mettre en valeur les terres pastorales et agricoles et fixer les dunes ; et 5), mobiliser les ressources en eau superficielles et souterraines.

LOCALISATION

Le barrage vert consistait en un reboisement de 3 millions d'hectares dans l'étage bioclimatique semi-aride Le champ d'intervention du barrage vert est constitué par la zone présaharienne comprise entre les isohyètes 300 mm au nord et 200 mm au sud. Il représente une bande de près de 1 500 km de long sur 20 km de large.

DONNÉES SUR LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN

La zone du barrage vert est caractérisée par la faiblesse des précipitations annuelle qui oscillent entre 100 et 400 mm. La moyenne des minima du mois le plus froid se situe entre $-1,7$ et $+1,8$ °C, celle des maxima du mois le plus chaud entre 33 et

41 °C. Le nombre de gelées peut s'élever à 40 jours/an et les vents chauds (sirocco) peuvent se manifester entre 20 et 30 jours par an. L'influence du Sahara dans cette zone se traduit par un climat sec et chaud.

La végétation est essentiellement constituée de forêts et steppes arborées à pin d'Alep, genévrier de Phénicie et chêne vert. La steppe graminéenne est à base d'*alfa*, *sparte* et *drinn* sur sol sableux. La steppe à armoise blanche occupe les sols à texture fine, elle constitue un excellent parcours pour les troupeaux.

Les sols de la zone du barrage vert sont caractérisés par une faible profondeur, un taux élevé de calcaire actif dû à son accumulation sous différents types et à la présence d'une dalle calcaire. La grande majorité des sols sont classés comme calci-magnésiques.

L'activité économique s'organise autour de la production ovine et, accessoirement, de la céréaliculture en sec. La population se divise en trois catégories : les nomades, les semi-nomades, qui ont une activité pastorale et restent liés à la terre qu'ils cultivent eux-mêmes et les sédentaires.

ETAPES DU BARRAGE VERT

La réalisation du barrage vert a connu plusieurs étapes :

Etape 1 : de 1971 à 1980, le ministère de la Défense Nationale a mis les grands moyens pour mettre en œuvre un reboisement massif et à grande échelle par la monoculture du pin d'Alep.

Les reboisements effectués visaient à relever le taux de couverture forestière de la zone par la reconstitution des forêts dégradées de l'Atlas saharien.

Etape 2 : de 1981 à 1990, réalisée conjointement entre les services des forêts et le ministère de la Défense Nationale. Elle a consisté à mettre fin à la monoculture par l'introduction d'une quinzaine d'espèces végétales.

Etape 3 : après le retrait du ministère de la Défense nationale du projet entre 1990 et 1993, le barrage vert a connu, de 1994 à 2000, une nouvelle dynamique qui a touché essentiellement l'extension du patrimoine forestier et sa protection, la lutte contre la désertification et le renforcement des infrastructures.

Depuis 2000, Programme National du Développement Agricole a inscrit dans ses préoccupations la question du reboisement comme moyen de lutte contre la dégradation des terres et ainsi que comme moyen d'assurer une mobilisation additionnelle de ressources et une amélioration des revenus des populations locales.

ETUDES RÉALISÉES ET TYPES D'INTERVENTION

Durant la première décennie (1970-1980), les travaux ont été réalisés en l'absence d'études globales permettant de disposer d'un schéma directeur d'aménagement et le tracé du barrage vert ayant été réalisé à main levée, aucune étude du milieu n'a été élaborée. Les travaux ont été exécutés sur la base de projets d'exécution et n'ont concerné que l'action de reboisement. A l'issue de cette période, un bilan de l'expérience a permis d'identifier les insuffisances et sur cette base, des études ont été réalisées pour disposer de zones pilotes représentatives des différentes situations

écologiques et socio-économiques., les plantations étaient faites à base d'un projet d'exécution. Entre 1974 et 1983, aucune opération n'a été réalisée sur les anciens reboisements, l'amélioration pastorale et les plantations fruitières ont été négligées, la construction des pistes et des points d'eau ainsi que les corrections torrentielles n'ont pas été prises en compte.

Le bilan des interventions, selon l'Agence Nationale des forêts (1990) : près de 106 000 hectares soit 86 % des plantations sont des essences forestières (pin d'Alep) suivi par l'amélioration pastorale avec près de 13 000 hectares (12 %), plantations fruitières avec 2 300 hectares (0,5 %) et les fixations de dunes avec 1900 hectares (0,5 %). Les réalisations sont fonction des spécificités des régions ; la fixation des dunes n'a concerné que les zones à fort ensablement.

ZONES D'IMPACT

Pour effectuer des plantations, des défrichements importants ont été opérés sur des nappes alfatières relativement bien conservées ou dans des couloirs de transhumance. Des terres de statut « arch » (tribal) ont subi le même sort. Les reboisements sur terrains plats à vocation pastorale ont provoqué des situations conflictuelles avec les éleveurs qui arrachaient les jeunes plants ou faisaient paître leurs troupeaux dans les plantations. Après promulgation de la loi 83.18 du 13 août 1983, les terres « arch » ont été revendiquées par les populations.

INVESTISSEMENT

Les investissements consentis aux travaux du barrage vert depuis son lancement jusqu'en 1995 s'élèvent à 25 milliards de dinars (340 187 000,00 US dollar). Néanmoins, ce chiffre reste très en deçà de la réalité si l'on prend en compte l'apport des services de la Défense nationale (main-d'œuvre et matériel gratuits).

RÉSULTATS OBTENUS

Même si aucune étude d'évaluation n'a été élaborée pour quantifier réellement les résultats de ce projet, le barrage vert a permis néanmoins de :

- reconstituer des massifs forestiers dégradés de l'Atlas saharien sur une superficie qui avoisinerait les 300 000 ha,
- réaliser des ceintures vertes et de fixation de dunes sur près de 5 000 ha pour protéger les centres de vie et les infrastructures socioéconomiques des dangers de l'ensablement,
- lutter contre l'érosion par la mise en place d'ouvrages antiérosifs,
- aménager des plantations pastorales pour augmenter l'offre fourragère, sur 25 000 ha,
- mettre en valeur des actions agricoles essentiellement par l'arboriculture rustique au profit des populations concernées,
- mettre en place de réseaux de pistes (5 000 km) pour désenclaver les populations,
- réaliser 90 points d'eau pour la mobilisation des ressources hydriques au profit des populations.

BILAN DES RÉALISATIONS ET ANALYSE

Le barrage vert en tant qu'ouvrage stratégique a contribué essentiellement au rétablissement et au maintien de l'équilibre écologique local. Il a permis de reculer les limites sud de l'Algérie forestière. Il a contribué aussi sur le plan socioéconomique à l'amélioration des conditions de vie des populations locales, estimée à 6 millions d'habitants, au niveau de la steppe. Cette amélioration s'est traduite par l'amélioration des revenus des ménages ruraux et le désenclavement des zones isolées.

En dépit des résultats obtenus, les réalisations dans le cadre du barrage vert sont loin d'être satisfaisantes et sont même en deçà des objectifs fixés. Le faible taux de réussite (30 %) reste en deçà des prévisions escomptées.

Les causes de la non-atteinte des objectifs initiaux peuvent être résumées ainsi :

– **Monoculture du pin d'Alep** : l'utilisation du pin d'Alep a entraîné une prolifération de la chenille processionnaire du pin qui a détruit une grande partie des reboisements. Le choix des espèces n'a été rectifié qu'en 1982 par l'introduction de diverses espèces telles que le chêne vert, le cyprès vert, le *Prosopis juliflora* et quelques espèces fruitières (amandier, abricotier, figuier et grenadier).

– **Absence totale d'études d'approche, de faisabilité** et de milieu préalables (études sur le climat, sol, eau, socio-économie, occupation des terres...). Les plantations étant effectuées sur la base d'un projet d'exécution, le tracé même du barrage vert a été réalisé à main levée. Le choix des terrains de reboisement n'a pas été toujours judicieux.

– **Qualité des graines** : les graines destinées à la production des plants en pépinières ont été collectées aléatoirement, même sur les arbres malades. Des cônes non encore mûrs ont été récoltés, le résultat direct a été la non-germination d'une grande quantité des graines.

– **Provenance des graines** : les plants destinés à la réalisation du barrage vert ont été produits en majorité dans les pépinières de l'Algérie du Nord, dans l'étage bioclimatique humide et subhumide et plantés dans une zone à étage bioclimatique semi-aride, une fois mis en terre, les plants ne supportent que difficilement le nouveau milieu.

– **Elevage des plantes dans les pépinières** : Le séjour des plants dans les pépinières a été trop long (1 année) alors que des travaux scientifiques ont montré que ce séjour ne doit pas dépasser six mois au risque d'affecter la qualité du plant.

– **Transport des plants** : les plants ont été acheminés vers la zone de plantation dans des bacs plastiques favorisant le dessèchement.

– **Travail au sol** : étant donné que les échecs pouvaient être provoqués par la présence des dalles calcaires qui empêchaient la pénétration du système racinaire dans le sol. L'utilisation du rooter avant la plantation permettait de casser ces dalles. Par contre, cette technique a montré ses limites car elle provoquait la dessiccation rapide du sol en augmentant la surface de contact avec l'air.

– **Densité de plantation** : en dépit de la faible disponibilité en eau, il a été décidé empiriquement de planter 2000 plants/hectare, densité utilisée généralement pour assurer un élagage adéquat des arbres destinés à la production de bois et non pas à la protection.

- **Date de plantation** : les plantations ont été effectuées généralement entre septembre et mars, période où la pluviosité est la plus importante. Cependant, des travaux ont montré qu'il y a arrêt de croissance, dans certaines zones du barrage vert, entre décembre et mars à cause des basses températures et des gelées assez fréquentes durant cette période.
- **Qualification du personnel** : en 1982, après avoir dressé un bilan des opérations de reboisements, le ministère de la Défense Nationale décida d'affecter systématiquement au barrage vert des universitaires à profil particulier (écologues, agronomes...)
- **Mécanisation des plantations** : l'importance des surfaces à planter (20 000 hectares/an) a poussé les services forestiers et les unités de réalisation à envisager la mécanisation des plantations. En 1982, les premières expérimentations avec des tarières ont donné d'excellents résultats pour les plantations pastorales et fruitières, par contre leur utilisation sur des sols caillouteux et inclinés s'est avérée peu concluante.
- **Insuffisance** des programmes d'entretien et de protection eu égard à l'ampleur de la dégradation.
- **Retard** dans les opérations d'intégration des terres du barrage vert au domaine forestier national. Les services forestiers ne possèdent pas de pièce justificative de l'appartenance du barrage vert au domaine forestier national,
- **Inexistence de cartographie** précise et exacte du barrage vert par wilaya (département) pour permettre aux services forestiers de délimiter l'espace total afin de planifier l'intégration des terres et leur reboisement,
- **Manque d'encadrement** chargé de la surveillance de l'ouvrage : les reboisements sont totalement abandonnés et livrés aux actions de dégradation perpétrées par les populations (pacage illicite, coupe de bois illicite et défrichements),
- **Non-intégration** de la population locale dans les activités du projet et le **manque de suivi-évaluation** des activités du projet.

De tous les travaux réalisés dans le cadre du barrage vert, seuls les routes, les points d'eau, les retenues collinaires et les vergers arboricoles, cédés gratuitement, ont été bien acceptés. Ils ont permis en effet le désenclavement et constituaient des points d'abreuvement pour les troupeaux. En revanche, les plantations d'espèces forestières ont réduit les terrains de parcours. Il s'avère que la réussite du barrage vert ne peut se faire d'abord que par la mise en place d'un code pastoral tenant compte des données socioéconomiques.

Conclusion

Qu'il s'agisse de ceinture, de barrage, ou de muraille, les actions ont été toujours curatives, et généralement ponctuelles, en rapport non pas avec l'importance du danger, mais avec les moyens disponibles.

Malgré l'évolution dans la perception des problématiques de lutte contre la désertification et de développement durable et vers l'intégration de ces concepts de sorte que les actions de protection soient considérées comme étant des actions d'aménagement et de développement, l'appellation « ceinture verte » se maintient pour les grandes villes (Nouakchott, Tombouctou, Le Caire), très probablement pour son effet sensibilisateur et mobilisateur à la fois pour les populations, pour les décideurs et pour les partenaires de coopération.

L'expérience des pays africains et de leurs partenaires de coopération est techniquement très enrichissante. Si dans l'ensemble les paquets techniques semblent maîtrisés, dans les détails de nombreuses améliorations restent possibles, voire nécessaires, dans le sens notamment d'une réduction des coûts grâce à de meilleurs choix techniques.

La multitude des référentiels techniques utilisés, d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un même pays, est à la fois une richesse en paquets techniques susceptibles de répondre à la grande diversité des situations et une insuffisance dans la mesure où il n'y en a pas qui se soient imposés pour un usage généralisé.

En dépit des nombreuses publications de type rapport d'évaluation, manuel ou guide, etc., les acquis des projets sont loin d'être partagés, c'est-à-dire mémorisés et rendus facilement *accessibles* et, dans tous les cas, ils ont rarement informé les décisions politiques ou les myriades de projets plus ou moins liés.

Afin de réussir une ceinture verte, des actions doivent être entreprises à long terme :

- intégration des populations locales comme parties prenantes du projet,
- résolution des contraintes liées à la nature juridique des terres,
- consolidation du dispositif de surveillance et des mécanismes de suivi-évaluation,
- extension des campagnes de sensibilisation à tous les acteurs et à tous les niveaux,
- prise en compte des causes de la déforestation et de la désertification (coupe de bois, surpâturage, défrichement...) en adoptant une approche intégrée pour couvrir les besoins des populations locales en bois, agriculture, énergie...,
- prise en compte de la disponibilité des ressources en eau dans la zone de plantation,
- considération de la sylviculture et le choix des espèces à planter comme les plantes fourragères, les arbres fruitiers.

Références

ANF.

Le barrage vert : bilan et perspective.
Alger : Agence Nationale des Forêts,
1990 ; 95p.

Bensaid S.

Bilan critique du barrage vert.
Sécheresse n°3, vol 6,
septembre 1995

Direction Générale des Forêts, 2005 ;
Synthèse sur le barrage vert.

FAO, 2005 ;

Green wall for the Sahara,
FAO contribution to the consultative expert
meeting organized by the African union
(Addis Abeba, July 19th 2005)

IGAD, 2006.

Green belt movements, forestry, degradation
and desertification in the IGAD region.
Document de travail,
projet « muraille verte en Afrique », 5 p.

Kadhi Hanifi, 2006.

Le barrage vert algérien.
Document de travail,
projet « muraille verte en Afrique », 16 p.

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), 2006.
Le barrage vert algérien. *Document de travail,*
projet « muraille verte en Afrique », 10 p.

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), 2006.
Les ceintures vertes dans les villes sahéliennes
d'Afrique. *Document de travail,*
projet « muraille verte en Afrique », 16 p.

Programme d'action sous-régional
de lutte contre la désertification au Maghreb
[http://www.maghrebarabe.org/fr/SG_UMA/
etudes/9.htm](http://www.maghrebarabe.org/fr/SG_UMA/etudes/9.htm)

Rapport national de l'Algérie
sur la mise en œuvre de la Convention
de Lutte Contre la Désertification.
[http://www.unccd.int/cop/reports/africa/national/
2004/algeria-fre.pdf](http://www.unccd.int/cop/reports/africa/national/2004/algeria-fre.pdf)

La Grande Muraille Verte : espèces végétales et systèmes de valorisation et de gestion. Cas de la République de Djibouti

M. MOHAMED MOUSSA IBRAHIM

Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Mer, chargé des Ressources Hydrauliques

M. ABOUBAKER DOUALÉ WAIS

Ministère de l'Habitat de l'Urbanisme de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire

BOUH HOUSSEIN OFLEH

Centre d'Étude et de Recherche de Djibouti

Présentation générale de la République de Djibouti

Contexte géologique

Les formations volcaniques issues de la tectonique des plaques recouvrent les roches du socle sédimentaire, calcaires jurassiques et grès crétacé (Fig. 1). À la fin du miocène, les basaltes Adolei (25 Ma) caractérisent la première rupture au sein du bloc Arabo-Nubien. Ces basaltes fortement altérés sont affectés par l'activité hydrothermale. Au cours de ce premier mouvement la tectonique est contrôlée par le rift éthiopien avec une extension Nord-Sud. Cette phase est suivie par une expansion lente au cours de laquelle se mettent en place les rhyolites Mabla (15 Ma) dans une large zone de déformation sénestre. Après une période d'érosion, les basaltes de Dalha se mettent en place en discordance (3.4-9 Ma) sur les rhyolites. Les basaltes Somalis sont presque contemporains des basaltes de Dalha et se localisent dans la partie Est du pays. L'extension N160°E correspondrait aux premiers mouvements ayant permis la mise en place des basaltes de Dalha, laquelle aurait progressivement tourné à N20°E. Entre 3.4 et 1.5 Ma, les basaltes stratoides et les basaltes de Golfe caractérisent l'expansion des plaques et l'ouverture du Golfe de Tadjourah. Les basaltes de Golfe sont localisés de chaque côté du Golfe de Tadjourah et sont considérés comme les premiers épanchements de la ride de Tadjourah. (Barberi *et al.*, 1974 ; Barberi & Santacroce 1980 ; Black *et al.*, 1974 ; Chessex *et al.*, 1974 ; CNRS-CNR 1973 ; ISERST 1985-1995). Au tout début de l'ouverture du Golfe de Tadjourah, la bordure Ouest du bloc d'Ali Sabieh agit comme une zone de

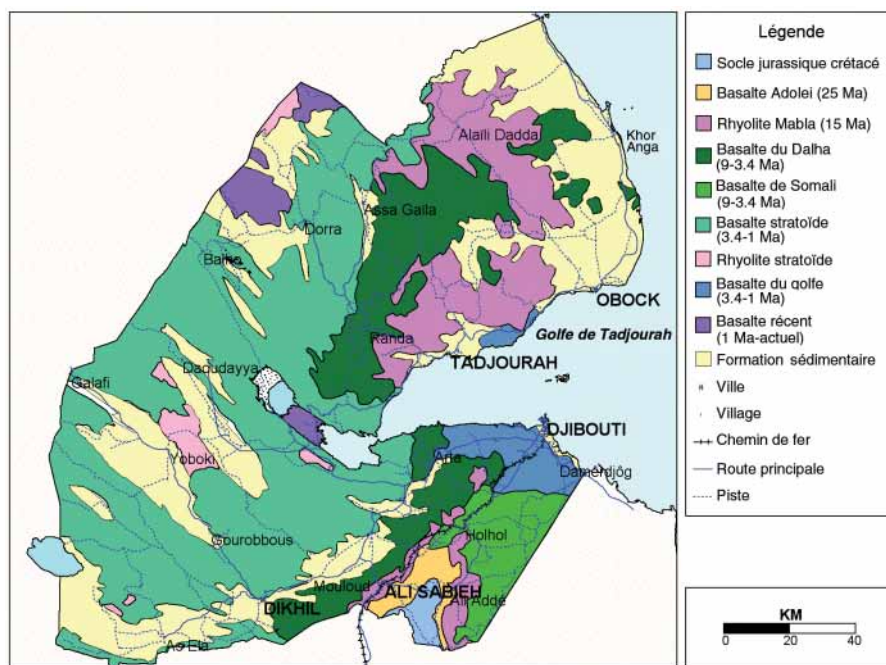


Figure 1.
Géologie de la République de Djibouti

déformation dextre en relation avec l'extension Nord-Sud à N20°E tournant ensuite à N40°E. Les formations volcaniques récentes sont localisées dans la région du rift d'Asal et du rift Manda Inakir. Les formations sédimentaires se trouvent sur les plaines littorales, les bassins du Sud-Ouest et du Nord-Ouest ainsi que le long des oueds. Durant le mio-pliocène, les roches sédimentaires (argiles et alluvions) sont intercalées dans les basaltes de Dalha. Durant le pliocène, les périodes humides et arides se succèdent avec la mise en place des basaltes stratoïdes. Des calcaires, argiles et diatomites sont intercalés dans ces formations basaltiques et remplissent les principaux bassins sédimentaires durant l'ouverture du Golfe de Tadjourah. Le remplissage sédimentaire dépasse plusieurs centaines de mètres dans les bassins. Dans les zones côtières, les conglomérats et les alluvions pliocènes recouvrent les roches volcaniques. Au cours du quaternaire, les sédiments marins (calcaires coralliens et calcaires) se déposent dans les zones côtières. Depuis 100 000 ans BP interviennent cinq phases d'extension majeures des lacs durant les phases humides donnant lieu à des dépôts de calcaires, diatomites et argiles (CNRS-CNR 1973 ; Gasse 1975 ; Gasse *et al.*, 1980 ; ISERST 1985-1995).

Géographie, géomorphologie

Djibouti est l'un des plus petits pays d'Afrique avec 372 km de côtes et une superficie totale de 23 200 km², dont 100 km² de surface d'eau (lacs Abbé et Assal) et 220 km² de forêt (forêts du Day et des Mablal). Il est entouré par l'Erythrée au

nord, l’Ethiopie à l’ouest et au sud, et par la Somalie au sud-est. Résultat d’une zone sismique (croisement de trois plaques tectoniques), le relief est d’origine basaltique et rhyolithique très accidenté, entrecoupé de dépressions sédimentaires ou fluvio-lacustres et de plaines endoréiques. Le Mont Moussa Ali culmine à 2 010 m alors que le lac Assal se situe à 155 m en dessous du niveau de la mer.

Démographie et mode de vie

La population, a été estimée à 700 000 habitants en 2004, soit une densité de 31 habitants/km², mais plus de 400 habitants/km² dans la capitale. La population urbaine représente 84 % de la population totale et plus de 75 % des habitants se concentrent à Djibouti ville. La population rurale représenterait 16 %. Elle se trouve dans les villages ruraux de moins de 1 500 habitants et dans les campements. Les campements sont souvent très dispersés dans la nature. Bien que l’on note une certaine sédentarisation d’une partie de la population rurale qui se verse dans les activités agricoles ou migre vers les centres urbains, le mode de vie nomade demeure encore assez répandu. La vie pastorale de ces populations est réglée par les parcours de transhumance saisonniers d’amplitude comprise 100 à 300 km. On assiste à une sur-exploitation des niches écologiques entraînant à moyen terme une désertification réelle et un exode progressif des populations de pasteurs transhumants dans cette région semi-aride. De façon générale, la République de Djibouti connaît une situation de pauvreté très marquée. Les enquêtes EDAM (1996 ; 2002) révèlent une aggravation de la pauvreté (pauvreté relative et population vivant dans l’indigence) entre 1996 et 2002. En milieu rural, la situation est particulièrement dramatique avec une pauvreté relative de 96.7 % et 83 % de la population vivant dans l’indigence. Ces taux montrent clairement les difficultés qu’ont les populations rurales face aux conditions de vie difficile.

Contexte climatique

Globalement, il existe peu de données climatologiques sur le pays. On ne dispose pas à l’heure actuelle d’un suivi climatologique complet et bien réparti sur l’ensemble du territoire. Deux stations climatologiques collectent les données à Djibouti-Serpent et Djibouti-aérodrome (Météorologie Nationale). En dehors de ces données, il existe des données ponctuelles de précipitations ainsi que les données du réseau hydroclimatologique installé par la Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA) en 1978 et suivi ensuite par l’Institut Supérieur d’Etudes et de Recherches Scientifiques et Techniques (ISERST) (Fig. 2).

Les résultats présentés sommairement sont issus des travaux de la Coopération Hydrogéologique Allemande (1982). Le climat de Djibouti est de type tropical aride. On distingue une saison fraîche (22-30 °C) d’octobre à avril et une saison chaude (30-40 °C) de mai à septembre pendant laquelle un vent de sable chaud et sec (khamsin) souffle une cinquantaine de jours par an. L’évapotranspiration moyenne annuelle est estimée à 2 000 mm. Les précipitations sont faibles ; elles tombent de façon orageuse, erratiques, et provoquent des inondations : 5 pour cent seulement du volume s’infiltrent et contribuent à la recharge des nappes. En mai,

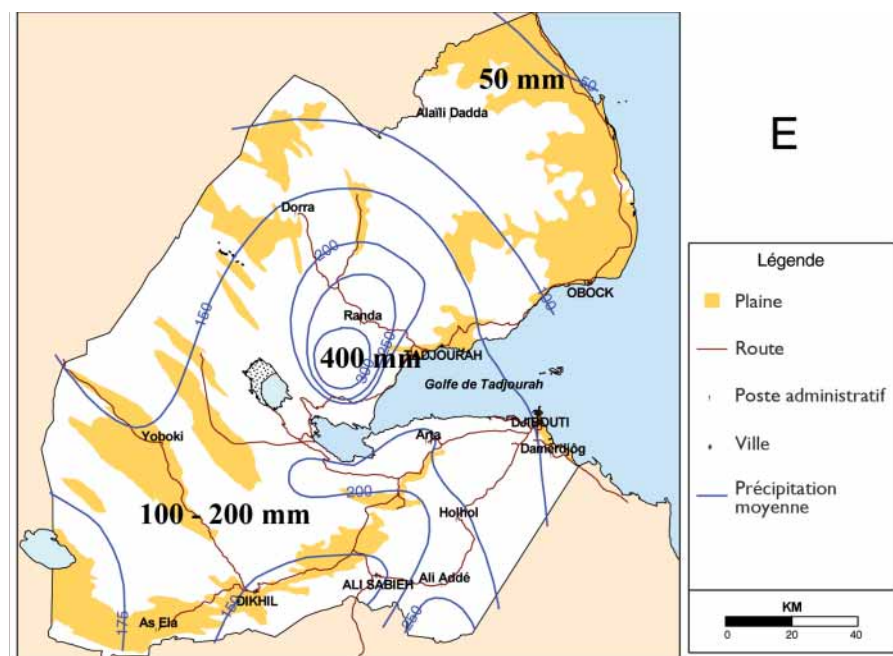


Figure 2.
Précipitations moyennes annuelles (mm) (CHA, 1982)

juin et septembre, le taux d'humidité peut atteindre 100 pour cent. Le maximum des précipitations mensuelles annuelles est observé dans les montagnes à l'ouest de Tadjourah (massif du Goda). Les précipitations diminuent brutalement en direction du nord-est vers la côte à Obock-Khor Angar-Doumeira avec 50 à 100 mm par an. Dans les régions septentrionales du pays, les précipitations annuelles sont de 100 à 150 mm (Dorra-Balho), alors que dans les régions de l'ouest (plaine de Hanlé, plaine de Gobaad les précipitations dépassent 150 mm. Au sud du pays, dans la plaine littorale, les précipitations annuelles se situent entre 130 et 200 mm, et diminuent en direction de Dikhil. La moyenne annuelle des précipitations à l'échelle du pays est de l'ordre de 150 mm.

Ressources hydrauliques

Du fait de la faible pluviosité, le territoire de Djibouti ne compte aucun cours d'eau permanent. Les eaux de surface ne sont utilisées que ponctuellement (ce sont généralement des points d'eau temporaires) pour l'hydraulique pastorale. Il s'agit dans ce cas de retenues de surfaces naturelles ou artificielles, de gueltas, de sources froides et de sources chaudes provenant des manifestations géothermiques. La seule

ressource d'eau permanente provient uniquement des eaux souterraines. La recharge des nappes se fait principalement lors des crues parfois violentes des oueds qui inondent les alluvions qui couvrent le fond des vallées. Dans le contexte de la République de Djibouti, les ressources en eaux souterraines sont primordiales. Il existe dans le pays différents réservoirs souterrains susceptibles d'être exploités pour l'eau potable ou pour l'irrigation et la production agro-pastorale en général. Les aquifères peuvent être repartis en trois types :

– Les nappes d'inféoflux ou nappes alluviales, sont localisées dans les formations sédimentaires qui accompagnent les oueds. Ces nappes superficielles sont assez intensément exploitées par la population rurale à l'aide de puits traditionnels et cimentés.

– Les aquifères côtiers d'extension moyenne constitués de roches volcaniques et d'intercalation des formations sédimentaires. Bien qu'elle présente de fortes salinités en profondeur, c'est la ressource principalement exploitée actuellement pour l'alimentation des agglomérations principales (dont la ville de Djibouti). Ces aquifères sont en principe réalimentés par l'intermédiaire des nappes d'inféoflux lors des crues des oueds.

– Les aquifères régionaux de grande extension, couvrent les régions sud et ouest du pays, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Les forages traversent de grands volumes de trapp de basaltes stratoides. Cette ressource présente potentiellement un réservoir intéressant pour l'alimentation en eau potable et le développement futur du pays.

Dans le cadre du programme de la GMV, nous comptons utiliser les nappes d'inféoflux et les eaux de surface mobilisables. Tout au long de l'itinéraire proposé, il existe déjà une dizaine de retenues dont les surplus seront utilisés pour la sylviculture. Bien évidemment, d'autres aménagements seront planifiés dans le cadre du présent programme.

Qualité chimique des eaux souterraines

Les eaux souterraines couvrent la plus grande partie des besoins en eau du pays. Elles proviennent de l'infiltration des eaux de ruissellement dans les lits d'oueds. Lors de l'infiltration ainsi que lors de leur séjour dans les aquifères, elles lessivent des terrains sédimentaires et volcaniques et acquièrent de cette façon une signature chimique propre et évolutive. Ceci s'opère sur de longues périodes où surviennent des échanges chimiques entre l'eau et les différents types de roches sous l'influence, de plus, de la température qui est relativement élevée. Les concentrations de certains éléments présentés ci-dessous dépassent les normes OMS internationales pour la potabilité de l'eau (Lyonnaise des eaux, 1986). Les eaux des aquifères volcaniques se caractérisent généralement, pour les cations, par des taux élevés en Na^+ puis, en ordre décroissant, en Ca^{++} et Mg^{++} . Pour les anions, elles montrent une dominance du Cl^- puis des SO_4^{2-} et HCO_3^- . Les aquifères sédimentaires révèlent aussi une tendance alcaline et, à un degré inférieur, les ions Ca^{++} . Au niveau des anions, il apparaît deux pôles répartis entre les Cl^- et HCO_3^- . Dans certains cas, il est possible de trouver des proportions importantes en SO_4^{2-} comme dans les formations des grès

crétacés de la région d'Ali Sabieh. D'après l'analyse de la qualité des eaux par le diagramme de Piper, les eaux à Djibouti sont le plus souvent chlorurées-sodiques. Mais elles peuvent se classer parmi les tendances diverses comme sulfatées ou bicarbonatées. En général, les eaux à Djibouti présentent des teneurs variables de NO_3^- dont l'origine reste encore à établir précisément. En effet, le secteur agricole qui cherche à se développer depuis une vingtaine d'années, se cantonne à des méthodologies artisanales sans emploi excessif d'engrais. Dans le secteur de Mouloud, les taux de nitrates dépassent 150 mg.l^{-1} au fur et à mesure que la nappe voit sa piézométrie s'abaisser. En ce qui concerne le développement agricole, il existe d'importantes limites à cause de la qualité de l'eau. Le SAR ($\text{SAR} = \text{Na}^+ / \text{SQR} (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / 2$) permet de mesurer cette limite. Les eaux des aquifères volcaniques présentent en règle générale, des valeurs de SAR faibles, donc relativement favorables pour l'irrigation. Les eaux des aquifères sédimentaires ont des valeurs relativement élevées et se prêtent donc difficilement à l'irrigation. C'est aussi le cas des séries volcaniques sous-jacentes aux formations sédimentaires. Il existe enfin d'autres limites à l'irrigation liées à l'excès des ions sodium, des chlorures et du bore.

Ressources pédologiques

Les ressources pédologiques ont été peu étudiées en République de Djibouti. Les conditions climatiques et les affleurements géologiques qui sont en grande partie volcaniques avec moins de 25 % de terrains sédimentaires et les formations pédologiques généralement peu développées, ainsi que les problèmes de salinité des sols et des eaux ne présentent pas un cadre très favorable au développement agricole. L'expérience de terrain montre que les ressources pédologiques aujourd'hui exploitées pour le développement des cultures par irrigation sont de deux types principaux. Le premier concerne les dépôts sédimentaires récents et actuels, voire le pléistocène dans certains cas, que l'on trouve le long des oueds principaux. Le second est représenté par les dépôts d'altération des basaltes associés à des produits détritiques qui se caractérisent par des formations sablo-limoneuses de couleur rouge-ocre situés sur les affleurements des basaltes. Une étude pédologique a été réalisée par Resource Development Associates (1983) à l'échelle de la République de Djibouti. Elle a consisté à la collecte de 1000 échantillons répartis au hasard dans le pays et d'en tirer les caractéristiques pédologiques essentielles du pays. Sur cet échantillonnage, on a procédé à une analyse détaillée de terrain et de laboratoire pour en déterminer les caractéristiques physiques et chimiques, ainsi que l'intérêt pour les différents types de cultures. Sur la base de ces résultats, RDA (1983) effectue une classification des principaux sols disponibles à Djibouti tout en tenant compte de la recharge de l'eau, du développement agricole, de l'élevage, des projets d'implantations et d'ingénierie. Le but est de permettre d'avoir suffisamment d'information pédologique afin de planifier le développement agricole. Il est cependant précisé que l'étude permet une approche globale des ressources pédologiques de la République

Tableau 1.
Affectation des terres en République de Djibouti

Affectation des terres	Superficies en km ²	Superficies (ha)	% de la surface terrestre
Superficie totale	23200	2320000	100
Eaux territoriales et lacs	5208	520800	22,44
Superficie totale terrestre	17992	1799200	77,55
Terres à vocation pastorale	16987,4	1698740	73,22
Terres facilement irrigables	105	10500	0,45
Terres marginales (terres halomorphes, dénudées et falaises)	899,6	89960	3,87

de Djibouti et que les éléments essentiels sont fournis par l'étude afin de conduire des études plus détaillées lors d'un développement agricole spécifique.

Dans le pays on rencontre principalement deux grandes catégories de sols :

- Les sols en place (sols bruns profonds issus de basalte, lithosols, sols calcaires coralliens) et les sols d'apport (colluvions, alluvions fluviolacustres).
- Les sols cultivables sont alluvionnaires ou sédimentaires, parfois salés, pauvres, mais améliorables.

L'affectation des terres en République de Djibouti est synthétiquement présentée au tableau ci-après. Cependant, il y a lieu de souligner que les ressources classées dans la rubrique Terres marginales peuvent en partie être valorisées avec quelques aménagements plus conséquents et des techniques plus adaptées.

Irrigation

Il y a encore une vingtaine d'années, la population rurale était de tradition pastorale et ses activités se cantonnaient essentiellement autour de l'élevage. Cette identité demeure encore mais en parallèle, avec un appui important du Gouvernement, la population s'est consacrée de plus en plus à l'agriculture irriguée, à cause du climat, lorsque les conditions naturelles le permettaient. Bien qu'à ce jour le secteur agricole ne représente que 1.5 % du PIB et 10 % des besoins alimentaires en fruits et légumes, les indicateurs du secteur laissent apparaître un rapide essor : 40 exploitants en 1970 et 1500 en 1998 (MAEMH, 1996 ; Mohamed & Abdallah, 1998). Aujourd'hui, la superficie irriguée représente seulement 40 % des terres clôturées qui sont elles-mêmes estimées à 10 % des terres cultivables et irrigables. On estime que 2 000 ha (y compris ceux déjà clôturés) sont facilement irrigables en raison de la disponibilité en eau. Les besoins en eau pour l'agriculture varient au cours de l'année

en fonction des cultures. Ils fluctuent entre 10 000 m³/an/ha et 16 000 m³/an/ha soit respectivement en débit journalier 33 m³/jour/ha et 45 m³/jour/ha. Les besoins annuels pour les 388 ha irrigués s'élèveraient entre 4 millions m³ et 5 millions m³. Les programmes nationaux prévoient entre autres l'intensification de la production agricole, ce qui consisterait en un premier temps à utiliser l'ensemble des périmètres clôturés, soit 1 000 ha. Les volumes d'eau à mobiliser pour une telle intensification de la production seraient de 10 Mm³ à 16 Mm³. Le supplément nécessaire par rapport à l'exploitation en eau actuelle se situe dans la fourchette 6 Mm³ à 10 Mm³, ce qui revient à plus que doubler les volumes d'eau.

La flore

La désertification touche plus de 90 % du territoire national et représente le problème écologique le plus grave dans le milieu rural. Sur le plan naturel, les ressources limitées favorisent l'expansion de la désertification. Le climat aride, caractérisé par de faibles précipitations, ne fournit qu'un apport hydrique restreint à la végétation. La qualité des sols est assez pauvre. Ce sont des sols issus de l'altération des roches mères basaltiques et rhyolitiques (85 %), des sols à texture sablo-limoneuse (10 %), compacts et peu perméables, et des sols halomorphes (5 %) des plaines côtières. Les vents chauds et secs du nord-ouest et du sud-est, et les érosions hydrique et éolienne expliquent, avec les autres paramètres, la faible couverture végétale. Mais il existe aussi une importante pression anthropique liée en particulier à la création des points d'eau ruraux provoquant le regroupement des populations et de leur cheptel. On voit alors se développer la coupe de bois de chauffe, le surpâturage et des pratiques agricoles parfois mal adaptées. Les phénomènes de changements climatiques, s'ils ne sont pas atténués, vont sans doute rendre plus sévères les paramètres naturels environnementaux et la lutte contre la désertification n'en sera que plus difficile. Les milieux forestiers connaissent un équilibre fragile. Ce sont les forêts de Madgoul, de Mabla et la forêt du Day, la plus importante. Leur survie est conditionnée par les actions anthropiques et surtout les ressources en eau. La forêt de Madgoul se situe dans une cuvette limoneuse au pied du mont Moussa Ali. Les forêts de Mabla et du Day se trouvent sur les massifs de Mabla et de Goda. Des études menées sur la forêt du Day montrent à quel point cette forêt dépend des conditions particulières du site (Blot, 1991). Bien que restreinte à la forêt du Day et sur une période donnée, l'étude démontre le rôle des précipitations occultes dans l'apport hydrique aux plantes. Les précipitations occultes liées à la présence de nuages de contact dépendent des vents, de l'orographie, de la densité des populations végétales, du tapis végétal et du sol. Par rapport à la pluviométrie, ces précipitations peuvent couvrir entre 40 % et 50 % des apports hydriques aux plantes. Les changements climatiques qui pourraient amener des modifications dans la température et la nébulosité sur un site particulier comme celui du Day pourrait mettre en péril la survie, déjà difficile, d'une telle forêt. La biodiversité est étroitement liée aux ressources en eau. Djibouti compte

Tableau 2.
La typologie de la diversité floristique du pays

N°	Espèces végétales	Localisations	Superficie (km ²)	% S. nationale	Taux de couverture (%)	Densité
1	A) Les Formations Forestières	Massif de Goda Day 900-1600m	50	0,21	40-80	dense fermée
	a) Forêts des montagnes					
	1. La forêt dense sèche des conifères à <i>Juniperus procera</i>					
	2. Les forêts denses sèches des feuilles à <i>Terminalia brownii</i>	Massif de Goda Massif de Mabla 350 - 900 m	20	10	0,09	dense ouverte
b) Forêts des mangroves	Côte Nord Ras-Syyan Godorya Damerjog	0,05	50 - 60	70 - 80	dense fermée	
						Les forêts des mangroves à Rhizophore (<i>Euryops tagal</i> , <i>Avicenna marina</i>)
c) Forêts des plaines et dépressions inondables non salées. Les forêts ouvertes de Mimosaceae à <i>Acacia nilotica</i>	- Madgoul - Andaba - Guinni-Bad	5	0,025	40-60	dense ouverte	
2	B) Les formations steppiques	Moussa-Ali, Goda, Mabla, Massif d'Arta			20	dense ouverte
	a) Steppe arborée				40	
	b) Steppe arbustive	Mabla-Goda-Mouss-Ali- Région d'Obock-Assa-Gueyla- Goubetto-Hol-Hol-Yaguer			1-20	dense ouverte
	c) Steppe buissonnante	plateau et colline de moyenne altitude			1-40	dense ouverte
	d) Steppe herbeuse e) Steppe succulente	plaine côtière sud-ouest hauts plateaux de moyenne altitude			5-60 1-10	dense ouverte dense ouverte
3	C) Les formations des prairies et pelouses	plaines côtières et dépressions continentales			très variable	dense ouverte
	a) Les prairies b) Les pelouses					
4	D) Les formations des milieux naturels confinés	plaines côtières et dépressions continentales				dense ouverte

641 espèces végétales et en faune terrestre, 327 espèces d'animaux et d'oiseaux (Ministère de l'Environnement, du Tourisme et de l'Artisanat, 1998). L'avancée de la désertification causée par les modifications des conditions climatiques sans omettre les actions anthropiques, contribuera à la modification ou à la destruction des habitats de la faune terrestre.

Analyse phytogéographique de la diversité floristique

A défaut de données de recherches contradictoires, l'essentiel des informations ayant servi à l'analyse phytogéographique, est tiré des documents existants en matière de végétation, notamment de *La végétation et les potentialités pastorales de la République de Djibouti* et de *Plantes vasculaires de la République de Djibouti* (Audru *et al.*, 1987,1994) respectivement. Tous les chercheurs scientifiques et amateurs qui se sont penchés de près sur la végétation du pays s'accordent sur le fait qu'elle constitue bien une curiosité de la diversité floristique à découvrir et à redécouvrir, et de ce fait, lui accorder peu d'intérêt serait injuste. Les connaissances actuelles de la diversité floristique de la République de Djibouti (non encore exhaustive) sont synthétisées telles que présentées ci-après.

Tableau 3.
Diversité floristique de la République de Djibouti

Nombre d'espèces spontanées identifiées :	826
Nombre d'espèces introduites et signalées :	108
Nombre de familles spontanées identifiées :	106
Importance numérique des 3 importantes familles	
- Poaceae :	103
- Fabaceae :	54
- Asteraceae :	49
Nombre d'espèces indémiques confirmées :	7
Nombre d'espèces indémiques à confirmer :	2
Nombre d'espèces figurant sur la liste rouge :	5

Objectifs et résultats attendus

La Grande Muraille Verte (GMV) est perçue comme une bande de végétation multi-espèces reliant Dakar à Djibouti. Elle est localisée dans la zone sahélienne avec une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 100 et 400 mm.

Objectif global du projet

L'objectif général du programme d'édification de la GMV consiste à contribuer à la lutte contre l'avancée du désert et à la mise en valeur des zones saharo-sahéliennes par une gestion durable des ressources naturelles et la lutte contre la pauvreté.

OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Les objectifs spécifiques visent :

- La promotion d'activités agro-sylvopastorales génératrices de revenus et la satisfaction des besoins des populations rurales (en produits ligneux et/ou non ligneux) ;
- La diversification des systèmes d'exploitation des terres ;
- La conservation/valorisation de la biodiversité ;
- La restauration/conservation des sols ;
- L'amélioration de la séquestration du carbone CO₂ dans les végétaux et les sols.

L'initiative « Grande muraille Verte » intègre ainsi divers mécanismes de développement humain, tels que le développement durable, le développement propre et la lutte contre la pauvreté.

EFFETS ET IMPACTS ATTENDUS

L'édification de la Muraille Verte dans ces zones arides et déshéritées aura des effets et impacts très positifs sur les populations et leur cadre de vie. En particulier, la GMV assurera un développement intégré et aura divers effets et impacts dans sa zone d'emprise. Les effets et impacts attendus sont notamment :

- L'augmentation des revenus des populations locales
- L'amélioration de la santé chez les humains et les animaux
- L'inversion du phénomène de l'exode rural
- La réduction de l'érosion des sols
- L'amélioration de la structuration des sols
- L'accroissement du taux de boisement
- La relance de l'agriculture et de l'élevage
- La restauration de la biodiversité végétale et animale
- L'accroissement de la couverture des besoins en produits forestiers

Méthodologie d'identification du tracé de la GMV

Dans le choix du tracé nous avons tenu compte des paramètres suivants :

- La géomorphologie
- La topographie
- La pluviométrie
- Les ressources hydrauliques mobilisables
- Les ressources édaphiques
- Et la présence de populations mobilisables.

Le maximum des précipitations annuelles (>300 mm) est observé dans les montagnes à l'ouest de Tadjourah (massif du Goda). Dans cette région, la géomorphologie n'est pas favorable. Donc, le tracé doit impérativement se trouver dans le tiers inférieur du territoire. Dans cette zone la pluviométrie est comprise entre 150 et 200 mm. Des cours d'eau pérenne n'existent pas, cependant des bassins de rétention et beaucoup des forages ont été réalisés ces dernières années par le ministère de l'Agriculture. Dans les zones habitées (Villages) les populations locales seront consultées et associées à la conception, à la mise en œuvre et à la conservation de la réalisation. Ainsi le tracé de la GMV partira de la plaine côtière de Djibouti-Loyada, bifurquera vers Holl Holl. Ensuite, il traversera les plaines du Grand et Petit Bara, empruntera la plaine de Balambaley, longera le plateau de Daka en passant par les plaines de Hanlé et de Gobaad et de là rejoindra l'Ethiopie par le village d'Afambo.

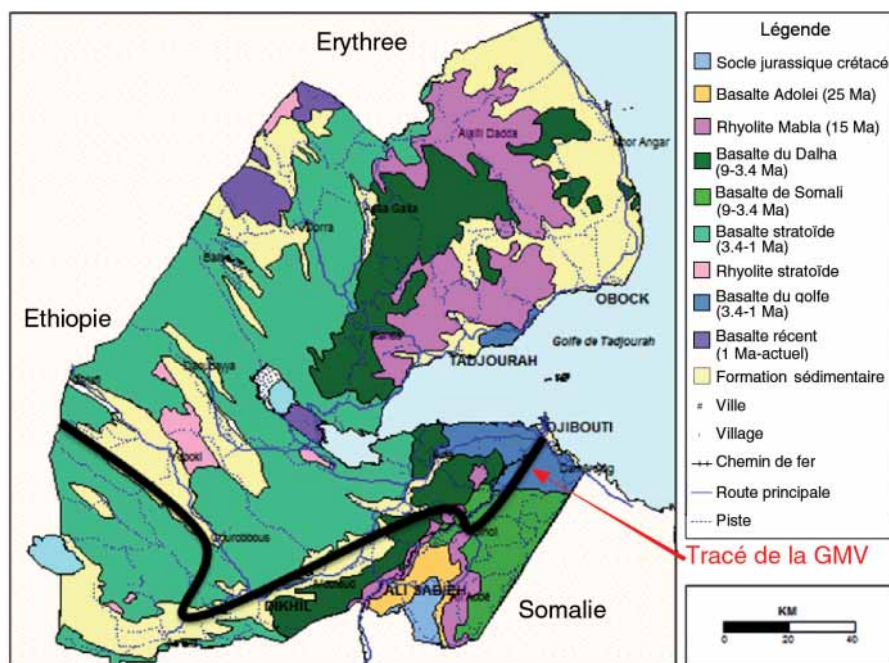


Figure 3.
Tracé de la GMV.

Les espèces végétales proposées

Dans le choix des espèces végétales pour la GMV, nous avons tenu compte d'un certain nombre de paramètres tels que :

- Leurs mécanismes d'adaptation à la sécheresse et aux conditions climatiques difficiles,
- Leur utilité pour les besoins de la population locale,

- Leur existence dans d’autres pays traversés par la GMV,
- Le consentement de la population sur les espèces végétales.

Par ailleurs, nous allons d’abord favoriser les espèces existantes et économiquement rentables et acceptées par la population locale, et en particulier les fruitières forestières qui contribuent à l’équilibre nutritionnel des populations et à la lutte contre la pauvreté. Ensuite, nous allons essayer d’introduire de nouvelles espèces non existantes dans la région et tester leur adaptabilité au contexte local. Nous avons reporté dans le tableau suivant la liste indicative d’espèces végétales répondant aux critères ci-dessus.

Tableau 4.
Liste indicative d’espèces végétales dans le cadre de la GMV

N°	Espèces	Usages
1	<i>Acacia Tortilis</i>	Fourrage, médicaments, bois d’énergie
2	<i>Acacia Nilotica</i>	Fourrage, bois d’énergie, tannins
3	<i>Acacia Ernembergiana (Flava)</i>	Fourrage, bois d’énergie, tannins
4	<i>Acacia miellifera</i>	Fourrage, bois d’énergie, tannins, apiculture
5	<i>Acacia Assak</i>	Fourrage, bois d’énergie, tannins, apiculture
6	<i>Acacia oerfota</i>	Peu appété par les animaux, bois d’énergie
7	<i>Salvadora persica</i>	Fourrage, fixation du sol, brise-vent, intérêt économique, médicament
8	<i>Calatoropis procera</i>	Médicinal, artisanal
9	<i>Blanites Aegyptiaca</i>	Fourrage, médecine, lutte contre le paludisme
10	<i>Blanites Rotandifolia</i>	Fourrage, médecine, lutte contre le paludisme
11	<i>Cadaba Rotandifolia</i>	Fourrage, fixation du sol, brise-vent, intérêt économique, médicament
12	<i>Leptadina Pyrotechnica</i>	Fourrage, bois d’énergie
13	<i>Tamarix Nilotica</i>	Bois d’énergie, bois construction, gîte pour la faune
14	<i>Cesalpinia Erianthera</i>	Fourrage, tannins
15	<i>Ziziphus Macranta</i>	Fourrage, bois, tannins, alimentation, shampoing naturel
16	<i>Boswellia Sp</i>	Economique
17	<i>Phoenix dactilifera</i>	Alimentation, bois de construction
18	<i>Hyphaena tebaica</i>	Usage multiple
19	<i>Prosopis cineraria</i>	Fourrage, bois d’énergie, bois d’œuvre
20	<i>Moringa oleiphara</i>	Usage multiple
21	<i>Moringa moringofera</i>	Usage multiple
22	<i>Leicaena leicocephala</i>	Fourrage
23	<i>Acacia senegal</i>	Gomme

Les systèmes de mise en œuvre et de suivi susceptibles d'être adaptés au contexte local

Après un engagement politique matérialisé par l'adoption d'un décret portant création du Comité Interministériel de Pilotage de la composante nationale de la Grande Muraille Verte, Djibouti s'apprête à mettre en place le cadre institutionnel y afférent.

La coordination générale sera assurée par le Ministère de l'Environnement. Le Ministère de l'Agriculture se voit confier la conduite des travaux de terrain. L'orientation technique sera pilotée en grande partie par le CERD, surtout en matière de mobilisation des ressources hydrauliques et de la multiplication *in vitro* de certaines plantes. Plusieurs autres institutions interviennent dans leurs domaines respectifs de compétences. Dès l'entame de l'opération, la commission nationale de coordination entend entreprendre une sensibilisation et une communication soutenues avec les populations, notamment, celles des régions concernées par le tracé de la GMV. Le choix définitif du tracé et des espèces préconisées se fera de la manière la plus participative possible. Compte tenu de la faible densité de population de la bande de verdure nationale, il est envisagé la sédentarisation des populations autour de périmètres agro-pastoraux aménagés. L'opération s'efforcera d'introduire et de promouvoir des sources d'énergie renouvelable pour préserver la biomasse. Elle fera recours à l'expertise locale, régionale et internationale pour surmonter toute difficulté éventuelle. Les techniques de reboisement seront des plus faciles à maîtriser par les populations. A chaque étape, il sera recherché l'adhésion totale des populations concernées. Sous la houlette du Comité Interministériel de Pilotage, la commission nationale de coordination mettra en place un système de suivi/évaluation aussi souple et transparent que possible.

Mise en œuvre du projet Grande Muraille Verte au Mali

*DIRECTION NATIONALE DE LA CONSERVATION DE LA NATURE
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ASSAINISSEMENT DU MALI*

Résumé

Le Mali est confronté au phénomène de la désertification dont les effets ont fortement affecté l'équilibre des écosystèmes sur environ 51 % de son territoire. Les effets ont abouti entre autres à une perte de terre arables et une forte baisse de productivité.

Le Mali a entrepris des actions de lutte dans le cadre du Plan National de Lutte contre la Désertification et l'Avancée du Désert (PNLCD) depuis longtemps et a entrepris divers programmes et réalisations, notamment la Barrière verte.

La mise en œuvre de la Grande Muraille verte s'appuiera sur des actions annuelles de reboisement et de consolidations des acquis le long du tracé entre les isohyètes 400 mm et 100 mm.

Le choix des espèces sera participatif avec les populations des terroirs. L'accent sera mis sur l'utilisation d'essences locales à usages multiples, sera privilégiée dans les différentes zones écologiques traversées. Les essences exotiques seront utilisées pour les plantations de production de bois en vue de préserver les formations naturelles.

Au plan institutionnel, une coordination nationale autour du ministère en charge de l'environnement sera assurée avec une forte implication des collectivités locales et de la Société civile.

Mots clefs

DÉSERTIFICATION, ESSENCES, TRACÉ, COORDINATION, ÉCOSYSTÈMES, CONSOLIDATION

Introduction

Le Mali, pays sahélien : de 1 241 238 km² de superficie (Fig.1) ;

La Population de près de 12 millions d'habitants ; 80 % de la population vit de l'agriculture ;

Des écosystèmes fragiles à faible productivité ; 51 % du territoire désertique.

Les cultures itinérantes dominent les systèmes de production ;

Les cultures sèches couvrent l'essentiel des superficies cultivées.

Le bois de chauffe couvre 80 à 90 % des besoins énergétiques.

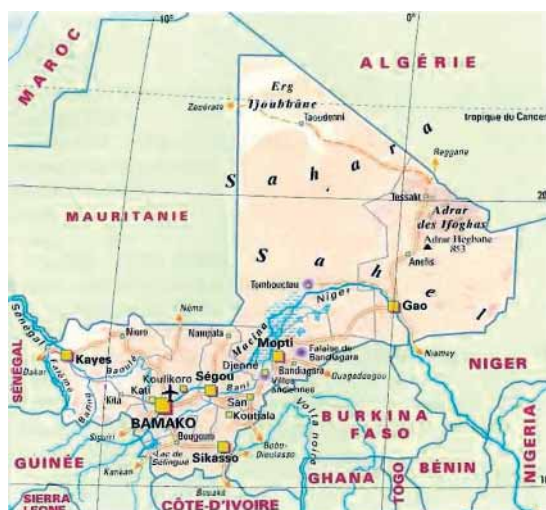


Figure 1.
Carte de localisation de la République du Mali.

Contexte de mise en œuvre

La conjonction de facteurs socio-économiques et climatiques a entraîné :

- une dégradation généralisée des ressources naturelles,
- une perte de fertilité des terres,
- une diminution des superficies cultivables,
- une perte de rendement des cultures,
- une déforestation,
- une diminution du potentiel fourrager des pâturages, etc.

Le stade ultime de cette désertification est l'ensablement dont sont victimes les régions de Gao, Tombouctou et Kidal (fig.2).



Figure 2.

Effets de la désertification (ensablement) dans les régions de Gao, Tombouctou et Kidal.

Expérience malienne en matière de lutte contre la désertification

Le Mali s'est engagé dans les actions de lutte contre la désertification depuis plusieurs années.

1982: Adoption d'une stratégie alimentaire globale et cohérente.

1985: Elaboration et adoption du Plan National de Lutte Contre la Désertification et l'Avancée du Désert (PNLCD). Il répond d'une part à une convergence régionale sahélienne et d'autre part à une volonté politique nationale de faire de la lutte contre la désertification une priorité de premier ordre.

1987 : Adoption du Plan National de Lutte contre la Désertification comportant huit programmes prioritaires, dont la réalisation d'une « Barrière Verte ».

Cette initiative malienne s'inscrit parfaitement dans la vision de la Communauté des États Sahélo-Sahariens (CEN-SAD) de création d'une Grande Muraille Verte, approuvée par l'Union africaine et inscrite dans le plan d'action du volet environnement du NEPAD.

Le tracé de la Grande Muraille Verte

Identification du tracé

Depuis 1985, la barrière verte a connu plusieurs modifications tant dans sa conception que dans son tracé à cause de contraintes de natures diverses.

1985 : Obstacle physique (barrage vert), sur le front du désert situé alors entre les 16° et 17° parallèles partant de la Mauritanie aux frontières avec le Burkina et le Niger.

1987 : Aménagement adéquat de la bande du territoire retenue en vue d'une véritable gestion rationnelle des ressources naturelles afin de créer, recréer ou conserver des conditions favorables à l'installation des populations.

La barrière verte est indicative et se caractérise par la grande sensibilité et la fragilité de ses écosystèmes. Elle est située entre les isohyètes 100 et 400 mm. L'accent de protection est essentiellement mis sur le fleuve Niger, artère vitale du pays.

Choix des espèces végétales de la GMV

Le choix des espèces de la composante malienne de la Grande Muraille prend en compte les objectifs visés et s'appuie sur certains paramètres.

- Essences locales à usages multiples privilégiées dans les différentes zones écologiques traversées,
- Essences exotiques seront utilisées pour les plantations de production de bois en vue de préserver les formations naturelles
- Choix participatif des espèces
- Services des espèces utilisées doivent répondre aux besoins de ces populations à travers l'alimentation, la pharmacopée, l'apiculture, les cosmétiques, le pâturage, l'amélioration des revenus et du cadre de vie.

A ce titre, la liste indicative d'espèces végétales concernées dans la composante grande Muraille du Mali est ainsi établie :

Acacia senegal,
Acacia seyal,
Acacia raddiana,
Acacia erhenbergiana,
Acacia nilotica,
Balanites aegyptiaca,
Sterculia setigera,
Azadirachta indica,
Combretum glutinosum,
Combretum micranthum,
Prosopis juliflora,
Zizuphus sp,
Boscia senegalensis

Techniques de plantation

Les techniques de plantations prévues sont fonction des objectifs assignés aux différentes espèces.

Fixation des dunes :

- bouturage pour les palissades pour des espèces comme *Euphorbia balsamifera*,
- plants en pots pour *Leptadenia pyrotechnica*, *Tamarix* sp., *Balanites aegyptiaca*, *Calotropis procera*,
- ensemencement est prévu pour les herbacées.

La plantation est prévue au vent et l'ensemencement sous le vent.

Plantation et enrichissement des forêts naturelles (Fig.3) :

- racines nues pour les petites superficies,
- semis direct quand les superficies sont importantes,
- plants en pots sont utilisés pour *Eucalyptus camaldulensis*.



Figure 3.
Quelques exemples de plantations
et enrichissement de forêts naturelles

Plantation dans les oasis (Fig.4) :

Par les rejets ou les vitro-plants pour *Phoenix dactylifera* (dattiers),



Figure 4.
Type de plantation dans les oasis

Plantation le long du fleuve (Fig.5) :

A partir de plants en pot ou à racines nues.



Figure 5.
Plantation le long du fleuve.

Stratégie de mise en œuvre

La stratégie de mise repose avant tout sur l'implication de tous les acteurs (populations, services techniques, ONG et Société Civile). D'où la nécessité d'une vaste campagne d'information, de sensibilisation et de communication (fig. 6).



Figure 6.

Système de communication et de sensibilisation.

Il faut aussi une meilleure coordination des projets et programmes opérant dans la zone.

Les objectifs et résultats attendus de la Grande Muraille Verte seront pris en compte depuis l'élaboration des projets et programmes.

La réalisation se basera sur la stratégie nationale de reboisement. Cette stratégie prévoit la plantation chaque année d'une superficie donnée par cercle à partir de plants produits par des opérateurs privés.

La stratégie reposera sur la régénération naturelle dans les zones cultivées et sur la mise en défens avec enrichissement ou non dans les formations naturelles.

La régénération naturelle assistée (RNA) sera rendue obligatoire dans les champs de cultures sèches.

Les plantations ne seront envisagées que là où les possibilités de régénération naturelle sont très faibles

Au plan institutionnel, la mise en œuvre de la Grande Muraille dans la Composante malienne nécessitera la mise en place d'une **coordination nationale** qui regroupera autour du Ministre de l'Environnement et de l'Assainissement, les autres départements ministériels impliqués dans la gestion des questions environnementales et la Société civile.

Conclusions

La Grande Muraille Verte est un gigantesque chantier nécessitant la contribution de tous les pays sahéliens. Sa réalisation donnera un sens réel au volet environnement du NEPAD.

La mise en œuvre devrait reposer sur les ressources propres des Etats et après sur la contribution des partenaires au développement et du secteur privé.

L'implication personnelle des Chefs d'Etat et de Gouvernement est un gage de réussite.



Mise en œuvre du projet Grande Muraille Verte en République Islamique de Mauritanie : tracé, choix des espèces et mise en œuvre de la composante nationale

AHMED OULD ABDEL FETTAH
Directeur de la Protection de la Nature

MALOUM DINE OULD MALOUD, DA/DPCIE
Ministère en charge de l'Environnement

Résumé

La République Islamique de Mauritanie couvre une superficie de 1 030 700 km². Les moyennes pluviométriques sont variables et vont de plus de 600 mm dans l'extrême Sud à moins de 50 mm dans le Nord-Est. Cinq (05) zones écologiques sont délimitées et elles sont pour l'essentiel de types aride, saharien et sahélien.

L'identification du tracé inscrit entre les latitudes 400 mm et 100 mm de moyenne pluviométriques prend en compte les limites phytogéographiques des espèces choisies avec des sols à potentiel productif élevé, l'importance des activités agro-sylvo-pastorales et la présence de points d'eau.

Les espèces végétales sont également choisies selon les caractéristiques de la zone écogéographique.

La mise en œuvre du projet s'appuiera au plan institutionnel sur une Unité de Coordination Nationale (UCN), un Comité de pilotage et des Comités de Concertation (CCR). L'approche se fera selon une régie participative.

Mots clefs

ARIDE, SAHÉLIEN, AGRO-SYLVO-PASTORAL,
RÉGIE PARTICIPATIVE, COORDINATION,
PHYTOGÉOGRAPHIQUE

Présentation du pays



Figure 1.
Localisation de la Mauritanie

- Superficie : 1 030 700 km²
- Population : 2,9 millions
- Relief peu élevé avec des altitudes qui se situent généralement autour de 500 m
- Précipitations moyennes annuelles dépassant 600 mm dans l'extrême Sud du pays. Moins de 50 mm dans le Nord-Est et le long du littoral septentrional
- Langue officielle : arabe
- Langue de travail : le français et l'arabe
- Langues nationales : Arabe, Poular, Soniké et Wolof.

Cinq Zones écologiques (fig. 2)

- Zone Aride ou Zone Saharienne (75 % du pays, soit 810 000 km²) ;
- Zone Sahélienne Ouest (7 % du pays, soit 75 000 km²) ;
- Zone Sahélienne Est (9 % du pays, soit 100 000 km²) ;
- Zone du fleuve Sénégal (2 % du pays, soit 22 000 km²) ;
- Façade maritime s'étend sur 800 km de long et 50 km de large

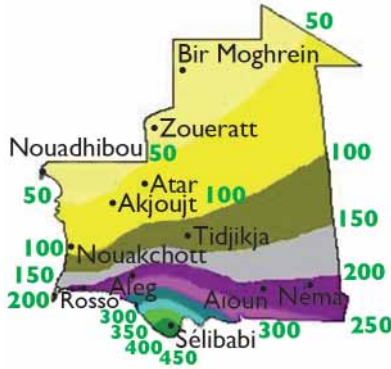
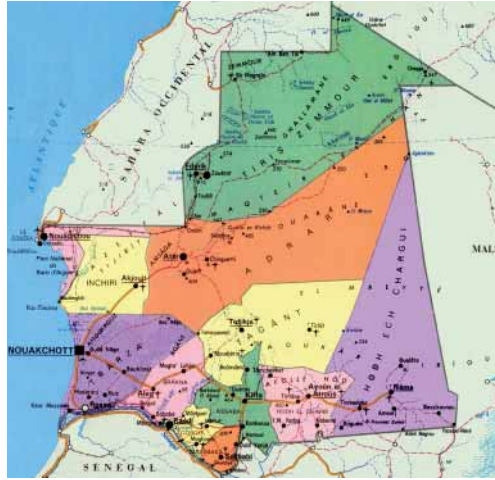


Figure 2.
Répartition des zones écologiques de la Mauritanie

Tracé retenu de la Grande Muraille Verte

Critères du tracé de la Composante GMV de la Mauritanie

Les critères suivants sont pris en considération dans l'identification du tracé indicatif :

- pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm,
- zone habitée par d'importantes populations rurales,
- respect des limites phytogéographiques des espèces choisies avec des sols à potentiel productif élevé,
- importante activité agro-sylvo-pastorale,
- présence de points d'eau ou de zones humides

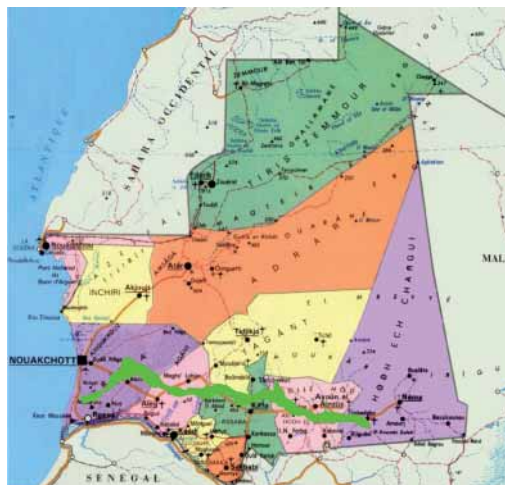


Figure 3.
Localisation du tracé indicatif de la composante GMV de la Mauritanie

Choix des espèces végétales

ZONE SAHÉLIENNE

- *Acacia senegal*
- *Acacia raddiana*
- *Balanites aegyptiaca*
- *Ziziphus mauritiana*
- *Leptadenia pyrotechnica* (dune/zone de déflation)
- *Panicum turgidum* (dune stabilisée)

ZONE SOUDANO-SAHÉLIENNE

- *Sclerocarya birrea*
- *Dalbergia melanoxylon*
- *Grewia bicolor*
- *Grewia tenax*
- *Hyphaene thebaica*
- *Mangifera sp.*
- *Phoenix dactylifera*
- Citronnier
- Goyavier
- *Lawsonia inermis*
- *Ziziphus mauritiana*
- *Acacia senegal*
- *Sterculia setigera*

Processus de mise en œuvre de la Composante Mauritanienne GMV

Création d'organes

- Création d'une Unité de Coordination Nationale
- Mise en place d'un comité de pilotage
- Mise en place de Comités de Concertation Régionaux

Approche

Régie participative (Figures 4 et 5)

Acteurs

- Etat
- Populations locales
- ONG

Financement

- Etat
- Communauté des bailleurs.



Figure 4.

Illustration de l'approche participative



Figure 5.

Création et entretien des pépinières : implication des femmes

Grande Muraille Verte : approches, types d'aménagement et cadre stratégique d'intervention par la République du Niger

HAMADOU MAMOUDOU

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre la Désertification. Niamey, Niger

MAISHAROU ABDOU

Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement

Présentation du Niger

Cadre géographique et milieux naturels

Pays enclavé de l'Ouest africain, le Niger est situé en marge sud du Sahara. Il est caractérisé par :

- 1 267 000 km² dont environ de 500 000 km² de déserts véritables (Ténéré, Tall) ;
- un vaste espace, reposant sur le socle africain primitif, marqué par des massifs montagneux très anciens affleurant au nord-ouest (Aïr).

Le gradient d'aridité décroissant du nord au sud offre à considérer quatre grands types de milieux naturels : (i) les milieux de la zone saharienne (moins de 200 mm de pluie par an) occupent 620 000 km² soit 48 % du territoire ; (ii) ceux de la zone sahélo-saharienne (200 – 350 mm) s'étendent sur 350 000 km² soit 28 % du territoire ; (iii) ceux de la zone sahélienne (350 – 500 mm) couvrent 200 000 km² soit 16 % ; et enfin (iv) ceux de la zone soudano-sahélienne (550 – 600 mm), qui occupent environ 100 000 km², soit 8 % du territoire.

Ces différents milieux matérialisent géographiquement des bandes orientées Ouest-Est, les deux dernières bandes (zone sahélienne et zone soudano-sahélienne) abritant 80 % de la population totale du pays.

Les milieux sahariens sont caractérisés par un climat hyperaride. En dehors du désert du Ténéré où la végétation est presque inexistante, l'espace est dominé par une steppe arbustive discontinue. Des boisements particulièrement denses se rencontrent le long des *koris* et dans les zones d'épandage.

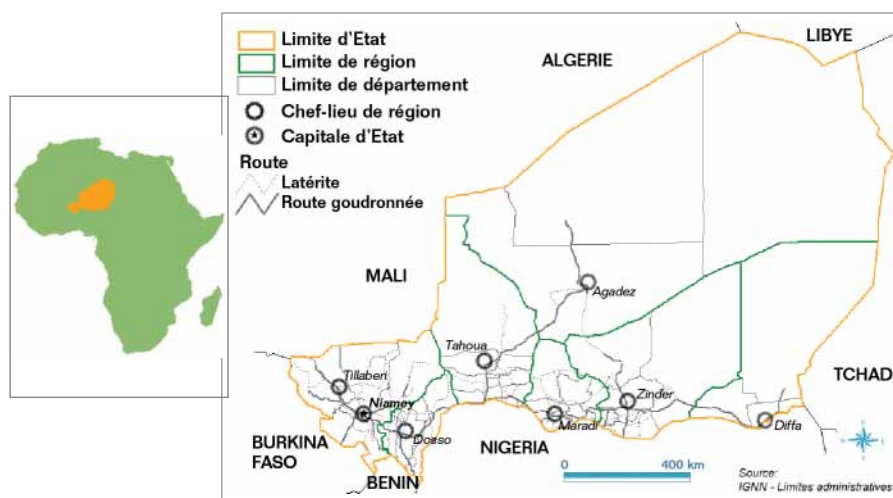


Figure 1.
Carte administrative du Niger

Les milieux sahélo-sahariens à vocation pastorale présentent une grande homogénéité édaphique puisque dans l'ensemble de la zone dominant les sols du type brun aride sur sable éolien. Le genre acacia y est très présent sous forme de pseudo-steppes.

Les milieux de la zone sahélienne proprement dite sont dominés par des recouvrements éoliens sablonneux. Les gradients d'humidité y définissent deux grands types de sols : les sols bruns-rouges sur sables éoliens au nord et les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur sables, au sud. La végétation prend la forme d'une savane arbustive. Ces milieux sont à vocation agro-pastorale et se caractérisent par une forte densité de population.

Cadre social et utilisation de l'espace

La population du Niger est estimée à 13 millions d'habitants en 2007, avec un taux moyen d'accroissement de 3,3 %. Elle est majoritairement jeune (plus de 50 %) et rurale à 85 %. Le profil de pauvreté défini au plan national indique qu'il y a 63 % de pauvres. De cette population pauvre, 86 % habitent en milieu rural, 66 % vivent en dessous du seuil de pauvreté officiellement établi. Trois Nigériens sur quatre vivent principalement d'agriculture et d'élevage. La « concentration spatiale » de la population dans la bande sud provoque de profonds déséquilibres qui accélèrent la dégradation du potentiel productif des terres et la disparition des boisements naturels.

Le potentiel en terres utilisables à des fins de productions rurales est de l'ordre de 322 000 km², soit 25 % de la surface totale du pays, correspondant aux terres « affectées » à l'agriculture, l'élevage et aux forêts. Les superficies mises en cultures vivrières de mil et de sorgho (principales spéculations) ont augmenté de 65 % en moyenne au cours des quinze dernières années (4 361 813 à 6 659 930 ha ; les superficies emblavées en mil ont en moyenne augmenté de 68 %). La saturation des

terres cultivables dans les zones soudano-sahéliennes et sahélienne fait que le front agricole avance sur les terres fragiles de la zone sahélo-saharienne à vocation essentiellement agricole.

La forêt nigérienne couvre 16 000 000 ha (soit environ 2 % du territoire), constitués de : (i) brousses tigrées et formations associées ; (ii) formations sur substrats sableux ; (iii) forêts dites de bas-fonds et galeries forestières ; (iv) doumeraies ; (v) rôneraies, (vi) les gommaraies et (vii) parcs arborés. Quoique relativement peu maîtrisées (étendue, sylviculture) et dans un état de détérioration le plus souvent très avancé, les ressources forestières contribuent à la satisfaction de besoins cruciaux et multiples des populations, ainsi qu'à la création de richesses au plan local et national (210 espèces végétales contribuent directement à l'alimentation humaine, particulièrement pendant les périodes de disette et de famine ; 235 espèces sont consommées par le bétail ; 270 sont utilisées en pharmacopée traditionnelle ; 127 espèces dans l'artisanat et l'habitat, etc.). D'autres produits comme la gomme arabique sont exportés.

Les ressources naturelles du Niger sont soumises à diverses contraintes : les facteurs naturels (sécheresses, baisse des nappes, etc.), responsables du recul de nombreux espaces boisés (dessèchement des arbres et ensablement de cuvettes dans la région de Diffa par exemple), et les facteurs anthropiques, qui se caractérisent par un rythme de déforestation qui se situerait autour de 80 000 ha par an, exercent de très fortes pressions sur les formations forestières. La disparition de la couverture forestière fragilise l'environnement de production rurale. Les défrichements agricoles anarchiques ouvrent la voie à une détérioration encore plus poussée des terres déjà surexploitées. Les feux de brousse récurrents et dévastateurs constituent aussi une grave menace à l'intégrité et la richesse des parcours en zone sahélo-saharienne et des forêts naturelles à travers tout le pays.

Ainsi, les aléas climatiques et la pression démographiques constituent les contraintes principales du développement du Niger. En effet, la dégradation des écosystèmes résulte de la conjonction d'une situation climatique particulièrement défavorable et une pression anthropique des plus fortes (doublement de la population tous les 25 ans), qui se traduit par la remontée des cultures vers le nord, la diminution des espaces pastoraux et des terres forestières disponibles.

La pression démographique sur les ressources accélère la disparition du couvert végétal, ce qui a pour conséquences l'intensification du phénomène de l'érosion génétique, l'appauvrissement des sols, la vulnérabilité accrue des sols à l'érosion éolienne et hydrique et la baisse de la productivité des terres.

Aussi, la pression démographique accélère la progression des cultures au nord de la limite agricole fixée par la législation nationale menace de compromettre l'équilibre précaire établi au niveau des écosystèmes pastoraux qui font, en conséquence, l'objet de modifications structurelles profondes en raison de la pression humaine et animale croissante. Cette dynamique se poursuit dans la zone pastorale par une raréfaction des pâturages herbacés et ligneux ; une réduction des capacités de charge (amenuisement progressif des bilans fourragers annuels) ; un accroissement du cheptel en nombre et une tendance à l'assèchement climatique et à l'avancée du désert vers le sud.

Ce phénomène préoccupe sérieusement les communautés pastorales et agricoles, notamment les Peul Bororo et les Touareg du Tamesna et du Tadress, qui ont tendance à se replier plus au nord où les ressources pastorales sont maigres, ou sont forcés à descendre précocement vers le sud agricole, entraînant très souvent des affrontements meurtriers entre les pasteurs et les agriculteurs. En conséquence, il importe en priorité d'apporter une réponse adéquate à cette situation, afin de conserver le mode de vie séculaire de ces communautés et éviter ainsi cette descente spontanée et massive des animaux dans la zone agricole (1/4 de la superficie nationale) qui abrite déjà les trois quarts (3/4) de la population nationale. On assiste dans cette zone, depuis longtemps, à une saturation foncière, à une dégradation accélérée et à un appauvrissement considérable des terres de culture et de pâturage.

Rappel des objectifs de la Grande Muraille Verte

Le programme de Grande Muraille Verte pour l'espace CEN-SAD exprime une volonté politique forte d'accélérer, consolider et renforcer la mise en œuvre des Programmes d'Action Nationaux de Lutte contre la Désertification et leur mise en synergie avec les programmes d'adaptation aux changements climatiques et de préservation de la biodiversité.

Le programme Grande Muraille Verte est essentiellement à caractère de lutte contre la désertification (LCD) qui doit bénéficier des appuis et des apports des institutions et mécanismes de la CCD et leur apporter, à son tour, les impulsions nécessaires à la consolidation de la foresterie rurale, urbaine et périurbaine, des infrastructures socioéconomiques et des actions de développement créatrices de revenus et d'emplois, et donc stabilisatrices de populations et notamment des jeunes de plus en plus tentés par l'exode et l'émigration.

L'objectif principal de la Grande Muraille Verte est d'assurer le développement durable dans les régions sahélo-sahariennes et d'améliorer les conditions de vie des communautés concernées à travers un ensemble concerté et cohérent d'interventions visant la conservation, l'exploitation durable et l'aménagement des ressources naturelles et le renforcement des infrastructures.

Les objectifs spécifiques du Programme Grande Muraille Verte sont : améliorer l'efficacité des efforts en matière de foresterie rurale, urbaine et périurbaine à vocation ceinture verte, moyennant de meilleurs échanges d'expériences ; renforcer la place et le poids de la foresterie dans les programmes et plans nationaux de développement ; mettre au point de nouvelles formules de développement durable, intégrant les trois dimensions : protection durable des infrastructures et des ressources naturelles ; production d'énergie vertes et de produits vivriers ; création d'emplois et de revenus durables pour les jeunes de plus en plus tentés par l'exode et l'émigration.

Le programme Grande Muraille Verte doit venir en appui aux projets planifiés ou en cours d'exécution, pour en améliorer l'efficacité technico-économique et la durabilité des impacts à travers quatre grands types d'action :

1. définition des référentiels techniques : Le programme devra capitaliser les acquis scientifiques, techniques, socioéconomiques et institutionnels des expériences passées et valoriser les savoir-faire locaux et nationaux, à travers l'analyse des facteurs de réussite et des facteurs d'échecs portés par les expériences des pays CEN-SAD afin d'identifier les meilleures pratiques réussies et en faire profiter l'ensemble de l'espace ;

2. renforcement de la recherche scientifique : Le Programme Muraille Verte est appelé à mobiliser les institutions de recherche sur les problématiques auxquelles sont confrontés les projets de terrain et construire une stratégie et des programmes coordonnés de recherche d'accompagnement impliquant les centres, stations et laboratoires compétents dans les champs d'action thématique et spatial de la Grande Muraille Verte ;

3. renforcement des capacités grâce à un apport pédagogique d'actions de formation et d'échanges entre les pays de l'espace ;

4. mobilisation des financements intra-région CEN-SAD et au niveau international, à travers une meilleure dynamisation et un meilleur encadrement des mécanismes mis en place par les conventions environnementales et la création d'une solidarité interrégionale.

Emprise de la Grande Muraille Verte au Niger

Au Niger, le Programme de Grande Muraille Verte matérialise la volonté politique nationale d'engager des efforts importants de réhabilitation écologique et socio-économique des zones sahéliennes, sahélo-saharienne et saharienne. Son approche globale met l'accent sur la restauration des terres et le reboisement, la gestion locale et écologiquement rationnelle des espaces agro-sylvo-pastoraux et la promotion d'une dynamique de développement intégré dans les zones traversées.

Approches, types d'aménagement et cadre stratégiques d'intervention

CARACTÉRISTIQUES TYPOLOGIQUES DES SYSTÈMES DE PRODUCTION AU NIGER

L'identification des systèmes de production sur une base géographique utilisant des données différentes et une échelle variable, régionale, départementale ou locale a été menée par le Centre Régional AGRHYMET (CRA, Projet AP3A, 2002).

En procédant par la même approche et en suivant la méthodologie développée par le CRA, une classification à l'échelle du pays a été établie de façon à mettre en évidence les grands modes d'exploitation agricoles et/ou pastoraux du milieu par les communautés paysannes. L'hypothèse de base étant que l'économie du pays se base sur l'agriculture et l'élevage, l'identification des systèmes de production donne un cadre économique de référence des conditions de vie des populations. Sur la base de l'activité de production principale, on distingue deux grandes classes, à savoir : les systèmes de productions agricoles et les systèmes de productions pastorales.

1. Les systèmes de production agricoles identifiés sur la base des cultures pratiquées, l'intensité culturale et le niveau des précipitations. Ils se déclinent en quatre grands types sur la base de la culture prévalant (systèmes de production vivriers, de rente, rizicoles et mixtes).
2. Les systèmes de production pastoraux se distinguent entre eux sur la base du type de gestion de l'élevage adopté (nomade, transhumant ou agro-pastoral) ;
3. Les systèmes de production sylvicoles qui se composent des forêts de Combrétacées, des gommaraies, des dommeraies et des parcs agroforestiers, qui en plus de la production des produits forestiers ligneux et non ligneux, servent également des espaces pastoraux.

Tenant compte de l'incidence des surfaces occupées par chaque type de cultures dans une unité administrative et de l'importance de la zone pastorale dans cette unité administrative (occupation totale ou en partie), plusieurs systèmes de production suivants ont été identifiés pour le Niger, à savoir les systèmes de production vivrière et vivrière pastorale, les systèmes de production mixte et de production mixte pastorale et le système de production pastorale (Fig. 2).

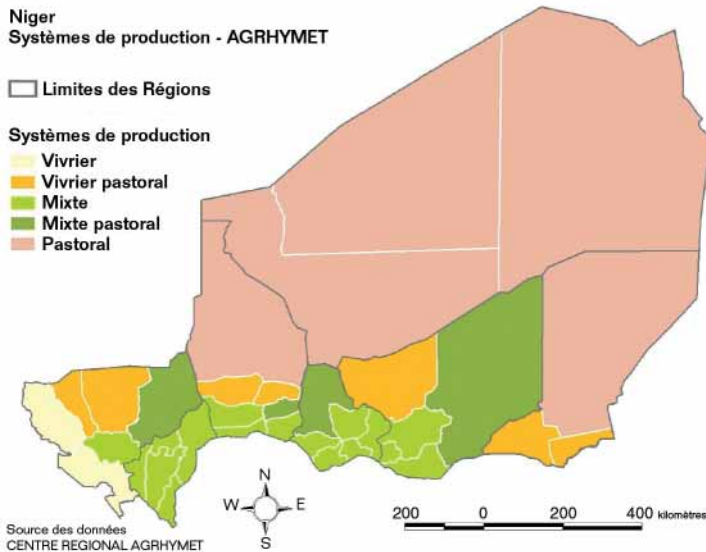


Figure 2.
Carte des systèmes de production au Niger

DÉTERMINATION DE TYPES D'AMÉNAGEMENTS

Le Programme Grande Muraille Verte se veut au Niger comme un ensemble d'actions d'aménagement de nature agro-sylvo-pastorale, de protection de l'environnement, mais également de l'amélioration de la production agricole en vue d'améliorer les conditions de vie des populations et assurer ainsi la durabilité des investissements qui y seront consentis. Dans la mise en œuvre de ce programme, les aménagements à retenir doivent impérativement tenir compte de la physiographie et du climat des zones traversées et de systèmes traditionnels de production rencontrés dans la zone d'emprise. C'est pourquoi l'établissement de **la cartographie d'occupation des terres (COT)** de la zone d'emprise de la Grande Muraille Verte et des Bassins de Rétention doit être un préalable à la définition exacte des aménagements à proposer. Cette COT permettrait de passer à la loupe les différents systèmes de production existants en vue de faire de bonnes propositions sur les aménagements à entreprendre.

En effet, le Niger présente une réalité complexe, avec des spécificités assez marquées dans certaines régions liées à de nombreux facteurs parmi lesquels la disponibilité en l'eau est l'un des plus importants. Ainsi, les écosystèmes à plus faible pluviométrie correspondent aux zones pastorales (la limite septentrionale des cultures correspond plus ou moins à l'isohyète des 300 mm), par contre les zones à hautes potentialités pluviométriques sont exploitées par des systèmes de production de cultures vivrières ou de cultures de rente. A l'intérieur de ces grands ensembles, on rencontre par ailleurs, relativement à la disponibilité des eaux de surface et/ou souterraines, des systèmes de production irrigués et de cultures de rente.

Aussi, cette réalité est souvent d'autant plus complexe que la croissance et les mouvements des populations, les changements du mode de vie, une longue série de sécheresses, la présence de certains marchés transfrontaliers et bien d'autres facteurs influencent fortement le développement des systèmes de production agro-sylvo-pastoraux. Ainsi, les différents systèmes de production sont souvent intégrés, en particulier l'intégration agriculture-élevage qui est activement croissante ces dernières décennies.

C'est pourquoi la définition de types d'aménagement à proposer serait intimement liée aux systèmes physiographiques existants dans l'emprise de la grande muraille et aux principaux systèmes de production agro-sylvo-pastoraux traversés. Ainsi, la réalisation de la Cartographie d'Occupation des Terres (COT) aiderait à mieux définir les types d'aménagement à proposer dépendamment de l'approche Programme Unique Intégré et Multisectoriel ou de l'approche programme par bassin.

APPROCHE PROGRAMME INTÉGRÉ ET MULTISECTORIEL

L'approche Programme Unique Intégré et Multisectoriel perçoit le Programme Grande Muraille Verte comme un **Programme de Développement Intégré** dans l'emprise régionale de la muraille au sein duquel une ceinture de végétation multi-espèces large de 15 km et longue de 7 000 km. Ce programme va intégrer plusieurs systèmes d'utilisation des terres suivants avec des projets d'aménagement correspondants. Il s'agit notamment de :

1. l'aménagement des formations végétales naturelles ;
2. la réalisation de nouvelles plantations et la réhabilitation des plantations existantes ;

3. la restauration des terres pour des fins de production agro-sylvicoles ;
4. l'aménagement des espaces pastoraux et aires de pâturage ;
5. la réhabilitation et la création des parcs animaliers ;
6. l'aménagement des réserves communautaires de faune ;
7. la création des parcs et réserves botaniques ;
8. la promotion des vergers fruitiers et de la production maraîchère.

À la différence de l'approche programme intégré par bassin, la mise en œuvre du programme grande muraille verte selon l'approche intégré et multisectoriel sera assurée par les instances retenues dans l'organigramme de la Grande Muraille Verte et de Bassins de Rétention dont l'Unité Coordination au niveau national va assurer la synergie des interventions et la complémentarité des actions avec les projets et programmes existants, qui dans la majorité des cas, ont des objectifs, des stratégies et des zones d'intervention différent.

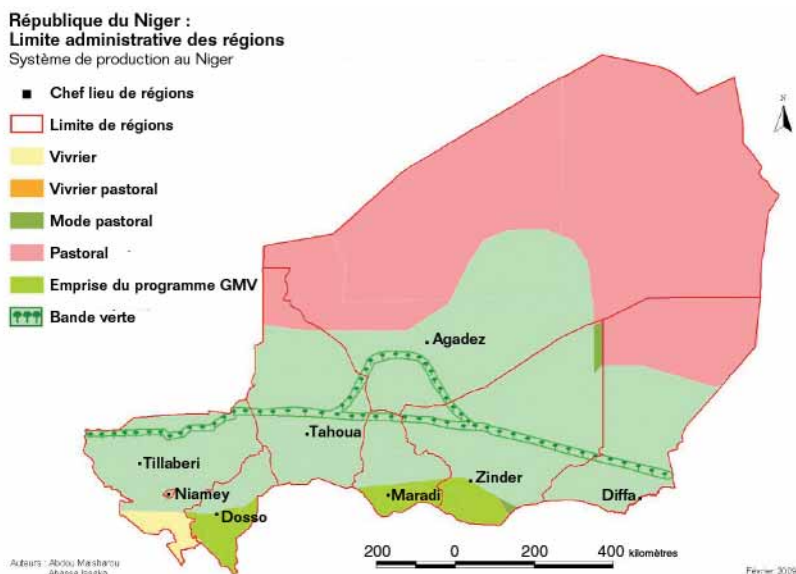


Figure 3.

APPROCHE PROGRAMME INTÉGRÉ PAR BASSIN

La mise en œuvre du programme grande muraille verte selon l'Approche Programme Intégré par Bassin tient compte des spécificités des différents bassins et des systèmes de production traversés par l'emprise de la muraille dans les différentes zones. Tenant compte du cadre schématique de la grande muraille verte, sept (7) bassins peuvent être concernés au Niger :

1. Le bassin du Fleuve Niger et de Anzourou ;
2. Le bassin du Liptako-Gourma ;

3. La zone du Tamesna, Ader-Doutchi-Majia et Tadress ;
4. Le bassin de l'Irhazer - Oasis de l'Aïr et du Kawar ;
5. Damagaram- Mounio- Manga ;
6. Système Goulbi et Korama ;
8. Bassin du Lac Tchad.

En plus du programme intégré par bassin, il est proposé la conduite des actions azonales composées de la réhabilitation de la ceinture verte de Niamey, la réhabilitation et l'édification des ceintures vertes périurbaines au niveau des villes et villages de l'emprise de la grande muraille dont la capitalisation avec des actions des programmes passés et en cours contribueront ainsi à la construction de la Grande Muraille Verte par l'édification d'une bande verte de 15 km de large et 1 500 km de long composée des espèces d'arbres adaptées au milieu et apportant une valeur ajoutée au point de vue économique, social et culturel.

(Les espèces proposées pour la partie du Niger feront l'objet d'une autre communication)

Il faut noter que l'approche de programme intégré par bassin offre des opportunités de mise en œuvre des actions concertées entre le Niger et les Etats voisins dans certains bassins d'intervention.

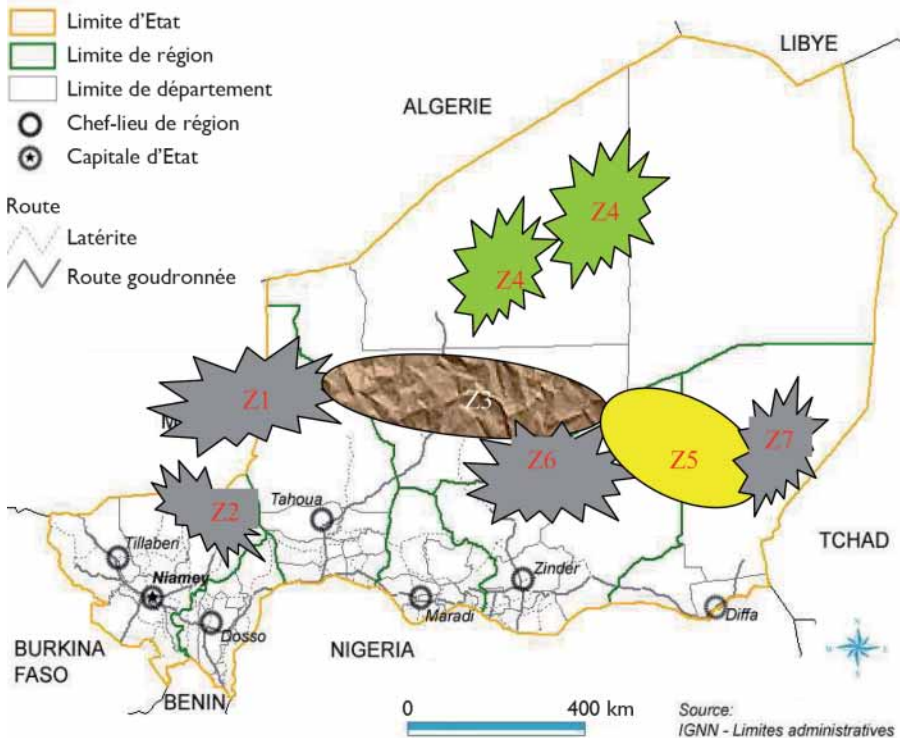


Figure 4.

TYPES D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉS

Les types d'aménagement à entreprendre dans le cadre de la mise en œuvre du Programme Grande Muraille Verte viseront à augmenter les productions agro-sylvo-pastorales, à renforcer et préserver les ressources ligneuses ; à renforcer les puits et les réservoirs de séquestration de carbone, à travers la restauration des terres dégradées, l'aménagement participatif des forêts naturelles de l'Etat, la gestion communautaire et durable des forêts domaniales, la réhabilitation de la ceinture gommère avec les plantations à base d'espèces locales de valeur et à croissance rapide.

En effet, la réhabilitation de la ceinture gommère va constituer un véritable rempart à l'avancée du désert et à la progression des cultures dans la zone pastorale. Elle constituera également une zone d'intenses productions agro-sylvo-pastorales qui aurait pour effet l'amélioration des conditions climatiques, non seulement à l'échelle locale, mais également à l'échelle internationale grâce à la biomasse et son impact sur la régulation des flux gazeux. Les boisements qui seront créés constitueront également un moyen de conservation de la biodiversité végétale, mais aussi faunique et microbienne. Le programme GMV prévoit également la réhabilitation et la création des parcs animaliers, l'aménagement des réserves communautaires de faune, la création des parcs et réserves botaniques et la promotion des vergers fruitiers et de la production maraîchère.

Tenant compte de la nomenclature de systèmes de production, des objectifs de la grande muraille verte, de l'orientation générale de son tracé et de l'approche programme intégré par bassin, les aménagements suivants pourraient être proposés pour le Niger :

1. Amélioration de la production agricole et sylvicole et la protection du Fleuve Niger contre l'ensablement ;
2. Aménagement des forêts naturelles du bassin de Liptako-Gourma ;
3. Réhabilitation de la Ceinture gommère du Niger ;
4. Amélioration de la production sylvo-pastorale dans le Tamesna et le Tadress ;
5. Restauration des terres et renforcement de la production agricole et sylvicole dans l'Ader-Doutchi-Majia ;
6. Gestion intégrée des oasis de l'Aïr et du Kawar ;
7. Lutte contre l'ensablement dans le Mounio- Manga ;
8. Protection des zones de production du Goulbi et des Korama ;
9. Protection du lac Tchad contre l'ensablement ;
10. Création et développement des Ceintures Vertes Péri-Urbaines.

Cadre stratégique d'intervention

Le programme GMV va contribuer à l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) et à la mise en œuvre des conventions post Rio et des Accords Multilatéraux pour l'Environnement. Au Niger, le Programme de Grande Muraille Verte s'accorde avec la stratégie de développement accéléré et de lutte

contre la pauvreté (SD/RP) et la stratégie du développement rural (SDR), qui sont les deux principaux documents stratégiques d'orientation du Gouvernement. Le programme GMV va également contribuer à la mise en œuvre de la stratégie nationale de relance de la production et de la commercialisation de la gomme arabique et de la stratégie de relance du secteur de l'élevage.

En effet, la SDRP adoptée en 2006 par le gouvernement du Niger a pour objectif de diminuer l'incidence globale de la pauvreté des populations nigériennes de 63 % à moins de 50 % à l'horizon 2015. Pour atteindre cet objectif, quatre axes stratégiques majeurs ont été définis à savoir : (i) la promotion d'une croissance économique durable et soutenue, créatrice d'emplois et distributive de revenus ; (ii) le développement des secteurs productifs et la sécurité alimentaire ; (iii) le développement des services sociaux de base pour un accès des plus démunis aux services de santé, d'éducation et d'eau potable et (iv) le renforcement des capacités humaines et institutionnelles, notamment la bonne gouvernance, la décentralisation et le renforcement de l'Etat de droit.

La SDR adoptée en 2003 quant à elle confirme que les ruraux constituent l'essentiel de la population nigérienne (83 %) et sont les plus touchés par la pauvreté et l'extrême pauvreté (60 % vivent en dessous du seuil de pauvreté). Elle confirme également le rôle moteur que doit jouer le secteur rural pour relance de l'économie nationale, au regard des potentialités existantes largement sous exploitées dans divers domaines. Dans cette perspective, trois objectifs stratégiques déclinés en 14 programmes ont été retenus, notamment : Favoriser l'accès des ruraux aux opportunités économiques pour créer les conditions d'une croissance économique durable en milieu rural ; Prévenir les risques, améliorer la sécurité alimentaire et gérer durablement les ressources naturelles pour sécuriser les conditions de vie des populations ; Renforcer les capacités des institutions publiques et des organisations rurales pour améliorer la gestion du secteur rural. Le programme Grande Muraille Verte contribue notamment à la mise en œuvre du programme 10 : Préservation de l'environnement, et du programme 13 : Restauration des terres dégradées et reboisement.

La Stratégie de relance de la production et de la commercialisation de la gomme arabique a pour objectif global le développement économique et social de la nation par la relance du secteur privé. Elle vise la lutte contre la désertification et la lutte contre la pauvreté à travers trois objectifs spécifiques suivants : (i) l'amélioration des conditions de vie des acteurs intervenant dans l'ensemble des maillons de la chaîne de la filière gomme ; (ii) le rehaussement de la contribution de la filière gomme à l'économie nationale et la satisfaction des besoins des rurales ; (iii) la sauvegarde et le maintien de l'équilibre écologique dans les zones de production de la gomme arabique.

Mise en œuvre du programme au Niger

Stratégie de mise en œuvre

La mise en œuvre du programme GMV sera basée sur une l'approche participative (participation volontaire et effective des populations bénéficiaires). Cette implication

directe et volontaire des populations dans toutes les phases du programme constitue un des points forts de la réussite du programme. Les interventions du programme seront concentrées autour des axes prioritaires suivants :

1. L'amélioration des productions agro-sylvo-pastorales par des actions mécaniques d'aménagements anti-érosifs à travers l'utilisation de la technologie Vallerani de récolte des eaux de ruissellement ;
2. Les actions de restauration et de protection de l'environnement ;
3. Le renforcement des capacités des acteurs par des actions de sensibilisation, d'information, de formation renforcement des capacités de tous les acteurs impliqués dans la mise en œuvre des activités du programme ;
4. La mise en œuvre des actions complémentaires créatrices de revenus destinées à soulager les populations des problèmes immédiats et qui pourraient constituer un obstacle à la réussite des aménagements proposés.

Pour s'assurer de la réussite de ces actions, le programme veillera sur le renforcement des capacités des acteurs et de l'efficacité des structures d'encadrement des populations par :

- Une connaissance du milieu tant physique que socio-économique de la zone d'intervention ;
- Une sensibilisation/formation des populations aux problèmes environnementaux sur une base participative ;
- Une sélection très poussée des encadreurs qui suivront les formations périodiques et un suivi technique régulier et efficace ;
- La prise en compte des expériences similaires menées par d'autres projets et programmes ;
- Le développement de la collaboration et de synergies avec les projets et programmes en cours dans la zone ;
- Une organisation efficace des populations à travers la mise en place des comités locaux de gestion ;
- Une programmation souple des activités respectant l'approche de gestion axée sur les résultats.

La problématique générale étant la dégradation accélérée des ressources naturelles des zones d'intervention, l'exécution des activités du programme reposera sur les principes suivants :

- Le respect strict de la vocation primaire des sites ;
- Une identification et une prise en compte des paramètres qui garantissent la durabilité des aménagements avant toute intervention ;
- L'implication et la responsabilisation des populations et des autorités politiques administratives dans toutes les phases d'exécution du programme.

CADRAGE INSTITUTIONNEL

Le Ministère de l'Environnement et de la Lutte Contre la Désertification (ME/LCD) va assurer la tutelle du programme. L'Unité Nationale de Coordination du programme

est basée à Niamey avec les antennes régionales représentées par les Directeurs Régionaux de l'Environnement des Régions concernées ;

Au niveau national, un Comité National d'Orientation présidé par le Ministre de l'Environnement est créé comprenant toutes les institutions impliquées. Ce Comité National d'Orientation est assimilé au Cadre de Concertation pour les programmes 10, 13 et Sous-programme 4.4 de la SDR. Il est présidé par le Ministre de l'Environnement. Il a pour entre autres attributions de faciliter les échanges d'informations sur les initiatives des différents partenaires portant sur la mise en œuvre des programmes concernés de la SDR, contribuer à la mobilisation des partenaires nationaux et internationaux pour la mise en œuvre de ces programmes et à conduire un plaidoyer pour la mobilisation des ressources nécessaires à la gestion durable des terres et de l'environnement d'une façon générale.

Le Comité National de Pilotage présidé par le Secrétaire Général du Ministère de l'Environnement ;

Un Comité Scientifique est en cours de construction et serait présidé par un chercheur de l'Université Abdou Moumouni de Niamey à l'image du Comité Scientifique de la mise en œuvre du projet ROSELT Niger ;

Au niveau régional, le programme sera placé sous la tutelle technique des Secrétaires Généraux Adjointes des Gouvernorats (Coordonnateurs Régionaux de la mise en œuvre de la SDR). Les Directeurs Régionaux de l'Environnement (Chefs d'Antennes Régionales) assureront la Coordination de l'exécution des travaux du Programme. Le suivi/supervision des travaux sera assuré par le Comité Technique Régional de Suivi/Supervision ;

Au niveau local, les Services Départementaux de l'Environnement vont assurer la coordination de l'exécution des activités du programme et le suivi/supervision des travaux sera assuré par le Comité Technique Sous-Régional d'appui à la mise en œuvre des activités.

SYSTÈME DE SUIVI ET DE L'ÉVALUATION

Le système de suivi et de l'évaluation à mettre en place pour le suivi et l'évaluation du programme grande muraille verte doit tenir compte des exigences du moment. On doit se mettre à l'esprit dès le départ que « le suivi et l'évaluation sont des instances de réflexion quant à l'exécution du programme et à la réalisation de ces résultats et de ces objectifs ». Plus précisément, le but général du suivi et de l'évaluation est de mesurer et d'évaluer la performance¹ afin de mieux gérer les effets (résultats intermédiaires) et les impacts (résultats finaux ou de développement) du programme.

Ce système de suivi/évaluation va se concentrer sur le suivi et l'évaluation des effets et des impacts du programme. Le suivi et l'évaluation des effets concernent la collecte et l'analyse systématique de données afin de suivre les changements depuis la situation de référence jusqu'aux effets attendus du programme et d'appréhender pourquoi il y a eu ou non le changement. Le suivi constitue en ce sens un moyen de contrôle des prévisions par rapport aux réalisations et un outil de gestion, puisqu'il

1. La performance se définit comme la progression vers la réalisation de résultats escomptés.

rend possible des réorientations des actions et permet ainsi d'adapter le projet à l'évolution du contexte en repérant d'éventuelles anomalies en cours d'exécution. Les activités de suivi permettent ainsi de comparer le rendement prévu avec le rendement atteint.

L'évaluation doit rendre compte des enseignements tirés des expériences vécues dans le cadre de la mise en œuvre du programme. L'évaluation est donc une opération sélective qui vise à apprécier systématiquement et de manière objective les progrès dans la réalisation des effets attendus du programme. Il ne s'agit pas d'une activité ponctuelle, mais d'une opération qui suppose une série d'évaluations différentes quant à leur objet et le degré de détail. L'évaluation doit être effectuée à plusieurs moments pour répondre à l'évolution des besoins en connaissances critiques et en apprentissage tout au long de la réalisation des effets du programme.

Toutes les évaluations – même celles portant sur la pertinence, l'efficacité et d'autres critères – doivent être reliées aux effets par rapport à la seule performance ou aux produits immédiats du programme.

Tenant compte de tout ce qui précède, les instances suivantes de suivi/évaluation peuvent être préconisées dans le cadre de ce programme, à savoir :

L'évaluation à mi-parcours du programme qui doit être centrée sur l'efficacité, l'efficience et le caractère propice (aspects favorables de la démarche) de l'exécution du programme. Elle doit être entreprise vers la fin de la première moitié de la vie du programme. Si elle est bien conduite, elle doit mettre en exergue les contraintes et proposer les solutions opérationnelles et de tirer les leçons de la conception, de la mise en œuvre et de la gestion du programme.

1. Suivi du rendement et de la performance du programme basé sur la confrontation de données de base (qui décrivent la situation au début du programme ou situation de départ à un temps T_0) et les données collectées à un temps T_1 et mesurer ainsi le changement. Les données de base doivent être recueillies dès le début de la mise en œuvre du programme. Elles peuvent provenir d'études ou de statistiques existantes. Les données collectées sur la performance du programme (le pas de collecte des données à préciser) servent à rendre compte des résultats atteints eu égard des résultats escomptés et de ceux de la situation de référence.

2. Elaboration des rapports périodiques (semestrielle ou annuelle) sur les résultats informant sur le degré d'atteinte des résultats et les écarts entre les résultats escomptés et les résultats atteints, le cas échéant. Ils offrent également l'occasion de réviser les intrants au besoin et de mettre à jour les informations reliées au contexte du programme et à la gestion des risques. Des rapports d'étapes doivent notamment décrire les résultats réels obtenus pendant la période couverte à chaque niveau de la chaîne des résultats ainsi que les écarts entre les résultats prévus et réels en expliquant la situation et en expliquant comment gérer les enjeux qui interviennent en raison de ces écarts. Les rapports d'étapes fournissent l'occasion de faire le point sur les réalisations, d'analyser les défis auxquels il faut faire face, et d'adapter les stratégies en vue d'atteindre les objectifs. Ils facilitent également la communication et contribuent ainsi à assurer une transparence au sein des instances de décision du programme.

3. Evaluation finale qui doit intervenir à la fin d'un programme. Au-delà des aspects traités par l'évaluation à mi-parcours, une évaluation finale traite également des signes avant-coureurs d'impact et de la durabilité des résultats, englobant le concours au renforcement des capacités et à la concrétisation des objectifs environnementaux globaux. L'évaluation finale permet également de décider de la réalisation ou non d'une phase complémentaire au programme.

4. Une évaluation à posteriori destinée à identifier les impacts du programme. Elle pouvait être réalisée deux ans ou plus après l'achèvement du programme. Cette évaluation met l'accent sur la durabilité des résultats du programme et sur les leçons apprises (meilleures et pires pratiques, coûts prévus et non prévus, application des enseignements aux niveaux sectoriel, thématique et transfrontières) en tant que bases de l'élaboration de politiques et de la planification ultérieure.

La collecte et l'analyse des données sur le rendement lors des opérations de suivi/évaluation vont offrir l'occasion aux instances supérieures du programme de voir :

- si le programme respecte le calendrier et l'utilisation prévue des ressources ;
- si la stratégie de gestion des risques s'avère efficace ;
- si l'on éprouve des difficultés qui nécessitent une redéfinition des produits ou une réaffectation des ressources ;
- les leçons à tirer pour améliorer les pratiques de gestion du programme, ajuster le tir au besoin pour s'assurer que le programme atteint les résultats escomptés, faire des propositions pour l'avenir et feront l'objet d'un rapport ;
- l'efficacité du programme.

La fréquence de la collecte de ces données doit être réaliste tenant compte des capacités du programme tout en fournissant l'information nécessaire à la prise de décisions : au commencement du programme, l'on doit recueillir des données périodiquement et à intervalles plutôt rapprochés pour obtenir l'information dont on a besoin pour redresser le tir et améliorer les résultats. Au fil du temps, la fréquence de la collecte des données diminue ; les rapports doivent surtout mettre l'accent sur l'atteinte des *extrants* ou résultats immédiats et des *effets* (résultats intermédiaires).

Dans tous les cas, toutes les parties prenantes doivent participer à la définition de ce qui sera suivi et évalué, de qui prendra part à ces exercices, de leurs périodicités, des méthodes participatives de collecte et d'analyse des données et de la manière dont les constatations seront consolidées. L'avantage de la participation des parties prenantes les conduit dans la majorité des cas à donner une suite plus favorable aux recommandations de ces exercices puisqu'elles (ces recommandations) viennent d'elles-mêmes.

Aussi, les informations collectées lors du suivi et de l'évaluation doivent être partagées par une large **communication d'information**. Il s'agit de fournir systématiquement et en temps utile des renseignements vitaux à intervalles réguliers pour espérer un **retour d'information**, une opération par laquelle des informations et des connaissances sont diffusées et utilisées pour évaluer les progrès globaux sur

la voie de la réalisation des résultats ou pour confirmer la réalisation des résultats. Il peut s'agir de constatations, de conclusions, de recommandations et d'enseignements tirés de l'expérience.

Risques et mesures d'atténuation

Risques

Les risques majeurs suivants doivent être pris en considération. Il s'agit notamment de :

- Aléas climatiques : les sécheresses sont fréquentes au Niger. L'insuffisance et l'irrégularité des précipitations et des inondations pourraient compromettre la réussite des plantations réalisées et des bassins de rétention construits ;
- Participation des populations locales : à cause de la prévalence et du degré de la pauvreté dans les zones d'intervention du programme, les populations locales pourraient donner plus de priorité aux actions portant sur la satisfaction de leurs besoins individuels plutôt que sur les actions durables de gestion de ressources naturelles. Ainsi la participation effective des populations aux travaux de restauration et de protection des ressources naturelles pourrait entraver l'atteinte des résultats attendus du programme et donc un défi à relever ;
- Faible capacité institutionnelle et instabilité politique : faiblesses capacités institutionnelles au niveau national et local pourraient compromettre la mise en œuvre du programme au Niger. Le processus de la décentralisation au Niger présente encore de nombreux défis notamment : le renforcement de la gouvernance locale, la mobilisation des ressources financières au niveau local, le développement et le renforcement de la citoyenneté et le renforcement de coopérations intercommunales et transfrontière.

Mesures d'atténuations

Les mesures d'atténuation suivantes sont proposées pour réduire ces risques :

- Réduction des risques climatiques : le programme doit se focaliser sur les approches et techniques de gestion durable des ressources naturelles compatibles aux sécheresses prolongées et les variations climatiques. La durée relativement longue du programme peut être aussi perçue comme une mesure d'atténuation. La collaboration du programme avec le plan d'action national d'adaptation (PANA) aux changements climatiques adopté récemment par le Niger offre les possibilités de la prise en compte des résultats du PANA dans les actions et les stratégies du programme.
- Renforcement de la participation des populations locales : l'approche participative prônée par le programme va assurer la mobilisation des populations locales. La mise

en œuvre des activités créatrices des revenus prévues par le programme pourrait également favoriser l'implication des populations dans l'atteinte des résultats du programme.

– Responsabilisation des institutions de gouvernance locale : le programme va en premier lieu focaliser son intervention sur le renforcement des capacités en gestion durable des ressources naturelles au niveau local, régional et national avec un accent particulier le relèvement des défis de la décentralisation par : (i) la sensibilisation sur les enjeux de la dégradation de l'environnement et les approches de gestion durable de ressources ; (ii) l'amélioration de revenus locaux par la vente des services des écosystèmes et (iii) le renforcement de pouvoir de décisions des institutions locales sur la gestion et la mise en valeur des ressources naturelles.

La mise en œuvre de la composante nationale Grande Muraille Verte du Sénégal : approches, réalisation et impact

MATAR CISSE
PAPA SARR

Direction des Eaux et Forêts et de Conservation des Sols du Sénégal
du Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et des Bassins de Rétention du Sénégal.
cissematar@orange.sn

Historique et contexte

Le programme « Grande Muraille Verte » (GMV) est né lors du sommet des Leaders et Chefs d'Etat de la Communauté saharo-sahélienne (CEN-SAD) tenu à Ouagadougou (Burkina Faso) du 1^{er} au 2 juin 2005, pour répondre à une préoccupation majeure du continent : les efforts conjugués de la dégradation du milieu rural naturel et de la sécheresse.

Suite à la proposition des Etats de la Communauté saharo-sahélienne, le Sénégal a abrité du 26 au 27 juillet 2005 à l'Hôtel Méridien Président la réunion des experts portant sur la création d'une Autorité du Sahara pour le développement de l'Afrique.

Cette rencontre a été présidée par le Chef de l'Etat, Maître Abdoulaye WADE, qui avait engagé le Ministre de l'Environnement et de la Protection de la Nature à démarrer la réalisation de la portion du programme (GMV) impartie au Sénégal.

Lors du Conseil des Ministres du 30 mars 2006, le Chef de l'Etat avait demandé au Gouvernement, dans le cadre de l'édification de la GMV, de travailler à l'identification des espèces et l'implication massive des populations dans les opérations de reboisement.

Conçu comme un ensemble d'actions et d'interventions multisectorielles de conservation et de gestion des ressources naturelles et de lutte contre la pauvreté, le programme GMV s'inscrit dans le Plan d'Action de **l'Initiative Environnementale**

du NEPAD qui a pour ambition de contribuer à l'éradication de la pauvreté, d'assurer la croissance et le développement durable grâce, entre autres mesures, à une gestion rationnelle, participative et intégrée des ressources naturelles et de l'environnement.

Il figure parmi les axes prioritaires de la stratégie de développement rural et de gestion des ressources naturelles de la CEN-SAD adoptée par la 9^e Conférence des Leaders et Chefs d'Etat tenue à Syrte (Libye) en juillet 2007.

C'est ainsi que dès août 2008, les opérations de mise en œuvre de la composante sénégalaise de la GMV ont démarré dans la région de Louga (Département de Linguère), par des chantiers de reboisement. Les opérations de terrain, menées selon une démarche participative avec une forte implication des populations locales, des étudiants et élèves avec l'encadrement des agents des Eaux et Forêts, portent en priorité sur le reboisement et les formes de restauration basées sur la régénération naturelle, la défense et la conservation des sols.

Le tracé de la Grande Muraille Verte (GMV) au Sénégal



Figure 1.
Tracé Indicatif Global du projet majeur de la Grande Muraille Verte Dakar-Djibouti.
Localisation de la GMV au Sénégal.

Le choix de la localisation de la composante sénégalaise de la Grande Muraille Verte est fait en tenant compte du Tracé Indicatif global du projet de la Grande Muraille Verte (fig. 1).

La GMV est conçue pour se situer à des latitudes où la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 100 et 400 mm. Le tracé a été obtenu en utilisant une base de données contenant les limites phytogéographiques disponibles permettant de bien localiser le zonage climatique, une carte de l'occupation du sol identifiant les limites des grandes formations végétales et les limites des pays dans la sous-région.

Compte tenu de la configuration et des caractéristiques écologiques par endroits de la Grande Muraille Verte, la longueur de celle-ci à l'intérieur du Sénégal est de 545 km depuis la côte Ouest de la région de Louga, passant par les régions de Matam, et Tambacounda jusqu'à la frontière avec la République du Mali (fig. 2). Soit une superficie d'environ 817 500 ha.

Sur le plan de l'occupation humaine, la zone sélectionnée correspond à une zone dominée par l'activité pastorale avec un élevage extensif et l'activité agricole. C'est aussi la principale zone pour la production de la gomme arabique, un des produits d'exportation du Sénégal qui apporte une contribution significative à l'économie nationale (le Sénégal a été pendant longtemps le deuxième pays producteur mondial après le Soudan).

Malgré la longue saison sèche qui la caractérise, cette zone présente l'avantage d'avoir un potentiel végétal et écologique (formations végétales dominées par les espèces appartenant aux genres *Acacia* et *Balanites*, des xérophytes qui présentent tous des mécanismes d'adaptation à la sécheresse) pouvant permettre la conduite d'activités de reconstitution de la végétation.

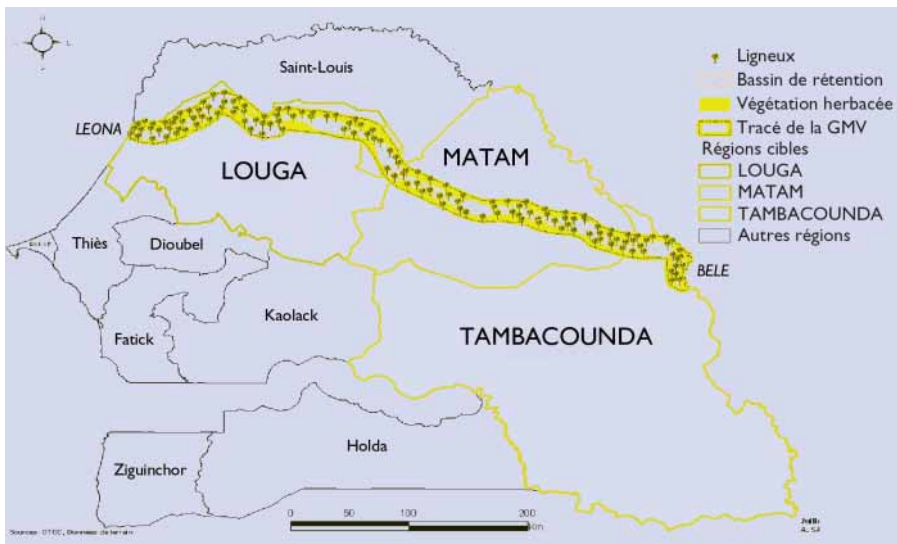


Figure 2.
Tracé de la Composante nationale sénégalaise de la Grande Muraille Verte

C'est ainsi que l'édification de la GMV va toucher près de 15 Communautés Rurales situées dans l'emprise du tracé indiqué et dans différentes régions et communautés rurales du Sénégal (Louga, Matam, Tambacounda) (fig. 3, 4 et 5).

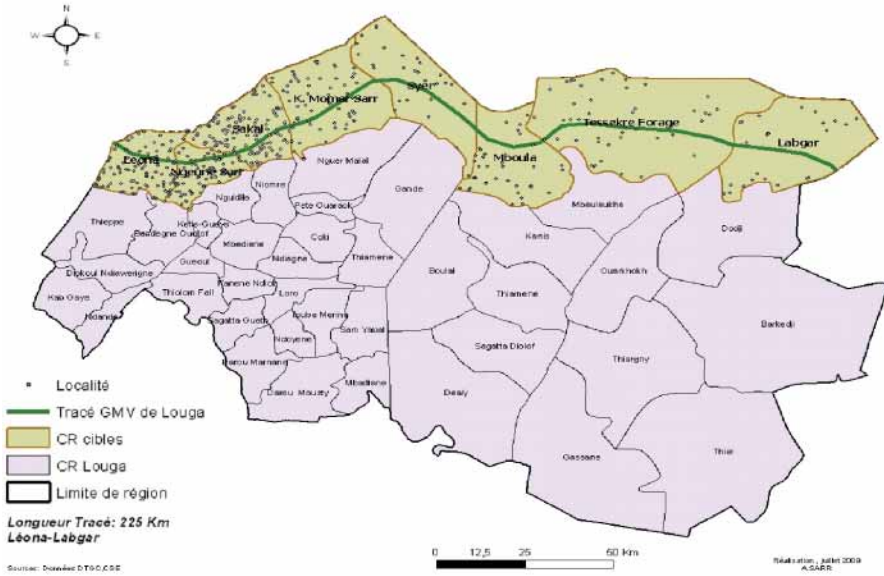


Figure 3. Localisation de la GMV dans la région de Louga (Sénégal).

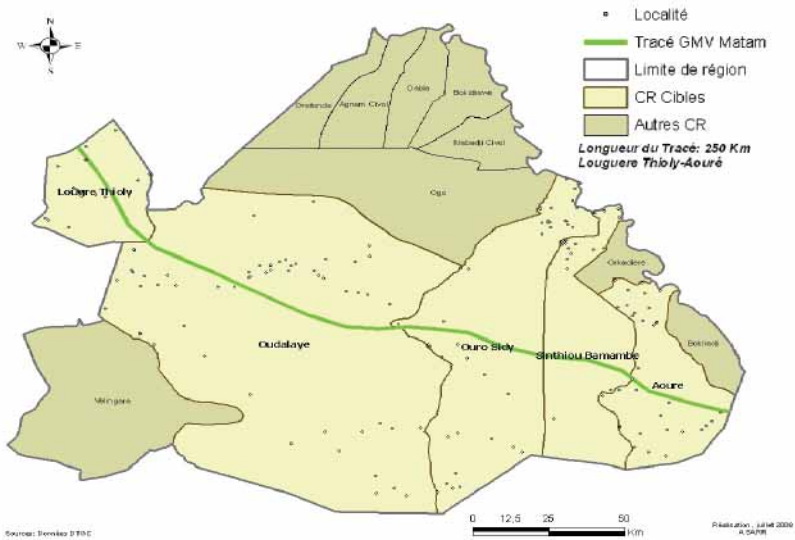


Figure 4. Localisation de la GMV dans la région de Matam (Sénégal).



Figure 5. Localisation de la GMV dans la région de Tambaounda (Sénégal).

Stratégie de mise en œuvre

De manière stratégique, il a été toujours entendu que les opérations de terrain devront être menées selon une approche intégrée et participative, qui porte en priorité sur le reboisement et les formes de restauration basées sur la régénération naturelle, la défense et la conservation des sols. A cet égard, une constante demeure permanente, il s'agit de la prépondérance de l'arbre dans les unités aménagées.

L'approche vise également à mettre en synergie des actions d'atténuation des effets de la désertification avec celles de mise en valeur des potentialités que renferment les zones en question.

Toutefois, l'espace aménagé ne devra pas être considéré comme une bande de plantations ligneuses continues, mais plutôt comme une succession d'unités vertes au niveau des terres à vocation agricole et sylvo-pastorale pouvant prendre certains contours pour éviter des obstacles (cours d'eau, sols rocaillieux, montagne et collines de roche) ou rejoindre des zones habitées. Elle intègre plusieurs systèmes d'utilisation des terres.

Etat d'exécution de la GMV/Sénégal et perspectives

Les premières opérations d'édification de la GMV ont démarré en août 2008 par la plantation d'une superficie totale de 5 200 hectares sur le site des terroirs villageois entre Windou Thiengolly et Tessékéré, dans la Communauté Rurale de Tessékéré, Arrondissement de Yang-Yang.

Ce choix obéit à un certain nombre d'arguments liés à la coïncidence avec la proposition de tracé et l'existence dans ce site d'atouts sur le plan des infrastructures, des équipements et des expériences capitalisées en matière de plantations et de gestion des ressources naturelles en général.

Un travail du sol a été effectué pour augmenter les chances de réussite des plantations. L'*Acacia senegal* (gommier), le *Balanites aegyptiaca* (soump) et le *Ziziphus mauritiana* (sidem) sont les principales espèces utilisées.

Le programme de reboisement de la composante Sénégal de la GMV n'a pas été conduit avec les seuls efforts déployés par le Service forestier. En fait, il a nécessité la mobilisation de multiples et divers acteurs impliqués dans les activités de reboisement. C'est ainsi que le Ministère de la Jeunesse a mobilisé deux cents jeunes pendant quinze jours dans le cadre « des vacances citoyennes ».

C'est aussi le cas de l'Association « Sukyo Mahikari » qui s'est engagée aux côtés du service forestier de manière bénévole des actions de grande envergure notamment grâce au dynamisme du groupe actif que constitue sa jeunesse, venant de différents pays d'Europe, d'Amérique, d'Asie et d'Afrique pour participer à l'édification du programme de la GMV.

L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) s'est également illustrée en étroite collaboration avec la DEFCCS des vacances citoyennes dans le cadre d'un programme qu'elle s'est définie afin de mieux participer, en tant qu'institution, à l'œuvre de développement du pays et plus particulièrement de la Grande Muraille verte. Des activités de reboisement, de prestations de soins médicaux et distribution de médicaments, d'alphabétisation ont été dispensées notamment aux groupements de femmes et associations de jeunes en guise de contribution à l'édification de la GMV par les étudiants et les enseignants encadreurs grâce à l'appui et au soutien des services compétents.

A cette diversité d'acteurs, il faut ajouter la présence de l'armée nationale qui a assuré une bonne partie de la logistique pendant toute la durée des activités de terrain.

Au total, le bilan des réalisations de la GMV pour la campagne de reboisement 2008 avec un taux de survie estimée entre 65 et 80 % se décline comme suit :

- Une production totale et installation de 2 298 293 plants avec les espèces suivantes :
Acacia senegal (gommier) ;
Balanites aegyptiaca (soump)
Ziziphus mauritiana (sidem) ;
Acacia radiana (seing).

- Plantation sur une superficie totale de 5 203 ha, répartie en sept (07) parcelles, pendant une durée effective de plantation de 28 jours. Le travail du sol a facilité le piquetage, la trouaison et a favorisé le développement du système racinaire des jeunes plants.
- Pour les activités de plantation, les différents participants ont été organisés en camps ; un site de reboisement était affecté à deux ou plusieurs structures selon la dimension de la parcelle et la proximité du camp d'accueil.



*Photo 1.
Production et entretien de pépinières GMV.*



*Photo 2.
Travail du sol et plantation de plants dans le corridor de la GMV.*



Photo 3.

Activité populaire de mise en œuvre de la Grande Muraille Verte.

Au titre de 2009, la production de plan a prévu un total de 2 750 000 plants et un programme d'installation de 5 000 ha compte tenu des contraintes financières. Les localités rurales visées dans la région de Louga sont Labgar (Département de Linguère) et Loughéré Thioly Thioly (Département de Ranérou).

La planification de production de plants est prévue dans quatre (04) pépinières qui bordent le tracé. Il s'agit des pépinières installées à Labgar (1 006 879 plants), Loughéré Thioly Thioly (660 000 plants), Téssekéré (198 303 plants) et Widou Thiengoly (883 421 Plants)

A coté des actions de reboisement, il est prévu également :

- des actions de protection contre les incendies avec la réalisation de 2 100 km de pare-feux nouveaux et la réhabilitation de 1 100 km anciens,
- l'initiation de bassins de rétention d'une capacité de 25,000 m³ au niveau de Labgar,
- le démarrage d'activités maraîchères avec la création de groupements de promotion féminine dans les localités de Widou, Tessékéré, Labgar et Amaly (région de Louga).

Impacts socio-économiques

Dès la première année de mise en œuvre de la Grande Muraille Verte, quelques impacts positifs sont déjà notés, outre la reconnaissance de la pertinence de l'initiative, la forte mobilisation populaire et l'implication massive des habitants des terroirs. Ces premiers impacts se situent dans la rémunération, la facilitation de l'écoulement de produits locaux, les activités de maraîchage et les soins de santé gratuits.

Rémunération

La main-d'œuvre locale est rémunérée à hauteur de 54 795 FCFA par mois, permettant aux étudiants et élèves ressortissants de prendre en charge les frais de scolarité, les fournitures, et même d'appuyer leurs parents.

Écoulement de produits locaux

Pour le seul camp de reboisement de Widou, 315 têtes de petits ruminants ont été acquises pour les besoins de la nourriture. Un boulanger traditionnel multiplie sa production par 4,5 durant la campagne, pendant que les femmes font de très bonnes affaires avec la vente de lait et des produits dérivés comme l'huile et le beurre, éloignant le spectre de la mévente. Des circuits de distribution s'organisent dans cette filière Lait, prospectant les coins les plus reculés du Ferlo pour servir les camps.

Produits de cueillette générés par les parcelles clôturées

5 750 kilogrammes de fruits de *Balanites* ont été ramassés dans une parcelle test, auxquels il faut ajouter les quantités issues du *Zizyphus*, la récolte de gomme, et l'importante quantité de la biomasse herbacée issue des parcelles clôturées.

Maraîchage

Le maraîchage a permis aux Groupements féminins d'enregistrer de nouvelles adhésions et de retrouver une nouvelle dynamique : recettes générées, autoconsommation et qualité nutritionnelle...

- 321 000 fcfa à Labgar
- 800 000 fcfa à Widou Thengoly
- 150 000 fcfa à Téssékéré
- 127 000 fcfa à Amaly

Cette activité de maraîchage a généré 1 398 000 francs pour une campagne de contre-saison froide.

Les autres dimensions perceptibles concernent l'inversion du phénomène de l'exode, l'intérêt pour l'alphabétisation, sans compter les dons en nature qu'apportent certains partenaires actifs sur les lieux durant les opérations.

Soins de Santé primaire

La Faculté de Médecine, d'Odontologie et de Pharmacie de l'Université de Dakar dans le cadre de camps de vacances citoyennes a participé en apportant des consultations et soins gratuits aux populations et en particuliers aux enfants et aux femmes.

Mise en œuvre du Projet de la Grande Muraille Verte (GMV) : la Composante Tchadienne

ABAKAR MAHAMAT ZOUGOULOU

Directeur des Forêts et de la Lutte contre la Désertification,
Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques du Tchad
(abakar_zougoulou@yahoo.fr)

DJIMRAMADJI ALRARI

Chef de Projet « Opération acacia »,
Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques du Tchad

Résumé

Le Tchad est un des onze (11) pays ayant souscrit à la mise en œuvre du Projet de la Grande Muraille Verte (GMV). Le processus de cette mise en œuvre a bénéficié d'une importante attention des plus hautes autorités. Ce qui a permis dès janvier 2008 la formulation d'un projet conceptuel sur la base des acquis existants. Le projet répond parfaitement aux objectifs de la Stratégie Nationale de Réduction de la Pauvreté (SNRP) et à ceux du Programme de la GMV. Le schéma conceptuel assorti de l'identification d'un tracé ou dorsale dès janvier 2008 est axé sur une vision de résolution de la problématique de la gestion des ressources en général avec un accent sur l'arbre en tant que vecteur de stabilisation des terres dégradées et la promotion d'un développement intégré de gestion systémique le long du tracé. La mise en œuvre du projet GMV/Tchad suit un certain nombre de critères clés, notamment la participation à toutes les échéances (réunions, colloques...) en vue d'échanger sur les expériences des pays et de mieux comprendre le mécanisme, l'intégration des communautés villageoises le long du tracé et la valorisation des savoirs traditionnels, les études biogéographiques et écologiques, le choix des espèces, le choix des systèmes d'irrigation, le développement d'un cadre institutionnel et de partenariat pour le financement.

Les résultats positifs obtenus de certains projets similaires seront capitalisés dans l'approche. Le long du tracé il y a en effet des expériences de Projets notamment le projet pilote « Opération acacia » et le Programme National de Développement des

Ceintures Vertes (1^{er} tiers du tracé), le Volet Gestion Communautaire des Ecosystèmes (2^e tiers du tracé), le Projet de Développement du Ouaddai et Biltine (3^e tiers du tracé), etc. Sur le plan méthodologique, diverses études seront faites par le biais des consultations nationales et échanges avec les expériences d'autres pays afin d'assurer une réussite au Projet. Un accent particulier sera mis sur les compétences nationales à travers des contrats qui seront conclus avec divers groupements bénéficiaires (éco-villages, prestataires privés, services techniques, institutions de microfinance...).

Mots clefs

TCHAD, DÉSSERTIFICATION, TRACÉ, DÉVELOPPEMENT, BIOGÉOGRAPHIQUE, STRATÉGIE

Introduction

Le Tchad est un pays enclavé dont les trois quarts de la superficie sont désertiques. La dégradation des terres constitue une problématique majeure avec comme conséquences la déforestation, la baisse de productions agricoles et fourragères et leur cortège d'insécurité alimentaire, de famine, de migration humaine et animale y compris la faune sauvage. Face à cette situation, des efforts ont été déployés par le Gouvernement à travers des programmes et projets mais les résultats obtenus jusque-là sont en deçà de ceux escomptés. En effet, ces actions ont pour la plupart des portées très limitées car isolées dans l'espace, mal coordonnées et souvent inappropriées.

L'ampleur du phénomène de désertification au Tchad nécessite des actions de grande envergure. C'est ainsi que le Tchad a souscrit à l'initiative de la mise en œuvre de la « Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel ».

La mise en œuvre de la Grande Muraille Verte est une réponse concrète en rapport avec les changements climatiques et la dégradation des ressources naturelles. Le Tchad travaille à sa mise en œuvre et un projet de document de stratégie a été élaboré avec un tracé obéissant à l'utilisation d'un système de gestion systémique dans lequel les systèmes de production ruraux sont intégrés.

Données géographiques et climatiques

Le Tchad est un vaste pays de 1 284 000 km² avec environ onze (11) millions d'habitants. Il est situé entre 8° et 24°N et entre 14° et 24° E. Suivant la zonation bioclimatique, il est subdivisé en trois grands domaines :

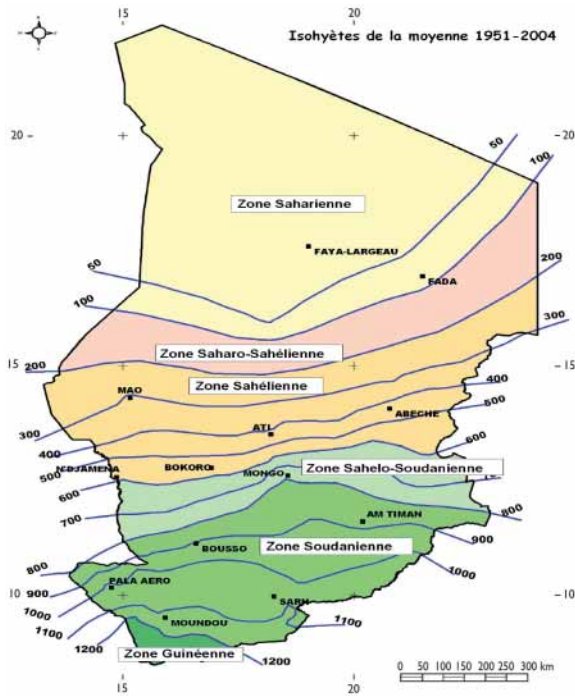


Figure 1.
Localisation des zones bioclimatiques du Tchad.

- le **domaine saharien** (47 % de la superficie totale) est caractérisé par une pluviométrie inférieure à 200 mm et une végétation très rare, à l'exception des oasis où toute la vie s'y concentre ;
- le **domaine sahélien** (43 %) avec 200 à 600 mm/an et une végétation de steppe arbustive dominée par des épineux, particulièrement les acacias ;
- le **domaine soudanien** (10 %) avec plus de 800 mm/an et une végétation de savanes et des forêts claires.

Tracé et axes stratégiques de la GMV/Tchad

Critères de développement du tracé de la dorsale

L'identification du tracé de la composante GMV du Tchad s'est basée sur les contraintes suivantes :

- la jonction du tracé avec celui du Niger ou du Nigeria (Lac Tchad comme référence de relais) ;

- la proximité des peuplements humains en vue de développer une gestion systémique tenant compte de l'agriculture et de l'élevage domaine par excellence de cette zone ;
- la délimitation du tracé entre les isohyètes 150 mm-350 mm comme repères ;
- le choix des espèces, fonction de l'existant et de l'orientation vers des espèces adaptées et qui apportent des revenus aux populations ;
- le choix des systèmes de mise en valeur et de suivi.

Axes stratégiques du Projet GMV/Tchad

Un projet de base a été élaboré dont le but global est de travailler en synergie avec les autres pays membres du tracé en vue de lutter contre la Désertification, l'avancée du désert, la dégradation écologique des régions arides et semi-arides et la pauvreté des populations de ces zones par des activités génératrices de revenus.

- Les actions globales intégrées et coordonnées offriront un développement intégré de ces zones et de meilleures conditions de vie aux populations.
- Les axes spécifiques visés dans la réalisation de la GMV Tchad sont :
 - La restauration du couvert végétal et le potentiel productif des terres dégradées ;
 - La promotion d'une gestion intégrée des ressources naturelles garantissant la sécurité alimentaire ;
 - La préservation des écosystèmes d'importance capitale et la diversité biologique ;
 - L'amélioration des conditions de vie et le revenu des populations rurales en particulier les femmes et les jeunes ;
 - Le renforcement des capacités techniques et institutionnelles des acteurs et des services de l'Etat et la coopération régionale.

Etat d'avancement du développement du projet GMV/Tchad

Plusieurs actions menées dans le cadre de projets sont capitalisées et ont permis de faire le montage du Projet. Les orientations retenues dans la mise en œuvre du projet sont en particulier le choix définitif du tracé (2^e) établi en mai 2009, le choix des espèces clés, les systèmes de mise en valeur et de suivi et la capitalisation des savoirs traditionnels.

Choix du tracé

En se basant sur les données définissant le tracé de la GMV, qui doit se situer entre les isohyètes 150 mm - 350 mm, un premier tracé a été développé en janvier 2008 (Fig. 2).



Figure 2.
1^{er} tracé de la dorsale (janvier 2008).

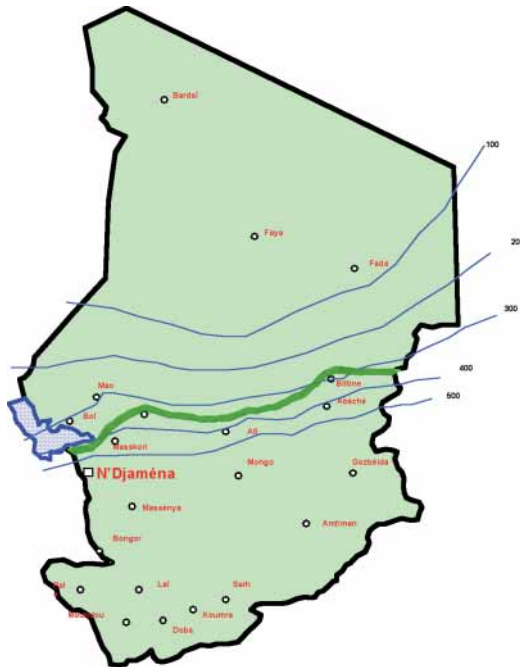


Figure 3.
2^e tracé de la dorsale (mai 2009).

D'une longueur de 1 206 km, le tracé prend sa source à l'extrême nord du Lac Tchad, relais du tracé Nigérien et se termine dans la Région de Wadi Fira (frontière soudanaise). Compte tenu de l'extrême aridité de la zone et étant entendu que le Lac Tchad constitue un rempart de prise de relais à partir du Niger ou du Nigeria, un second tracé a été développé en 2009 (Fig.3). Il a comme point d'encrage, la Région de Hadjer Lamis à partir de Gredaya (confins sud du Lac Tchad) et comme finalité la frontière soudanaise au niveau de la Région de Wadi Fira (Guereda).

Ce second tracé qui va donc de Gredaya à Guereda est évalué à 1 010 km. Il implique quatre (04) Régions : Hadjer Lamis, Barh El Ghazal, Batha Ouaddai et Wadi Fira. Les caractéristiques pédologiques montrent que la majorité du tracé est occupé par des zones sablonneuses avec des poches de zones oasiennes. À l'extrême est, frontalière avec le Soudan, le tracé sera dans une zone rocailleuse.

Choix des espèces

Le choix des espèces est un critère clé pour la réussite du projet. Il permet de mettre en œuvre des actions d'aménagement des terres dégradées et de préservation des écosystèmes naturels avec des espèces adaptées en vue de freiner efficacement l'avancée du désert. En ce qui concerne les actions de reboisement, de plantation privée et de stabilisation des dunes l'accent sera particulièrement mis sur les espèces adaptées aux conditions locales et servant de rempart pour lutter efficacement contre la désertification. Il faut noter que d'une région à l'autre, il y a une certaine spécificité régionale et même locale qui nécessite une orientation du choix des espèces. On citera un certain nombre d'entre elles en fonction de leur importance :

- *Acacia senegal* et *Acacia seyal* : Toutes les Régions où se situe le tracé sont concernées ou cette espèce se développe en peuplement pur dans 3/4 de leur superficie. De par son importance sur le plan écologique et socio-économique à travers la lutte contre l'érosion, la fertilisation des sols, et surtout l'amélioration de l'économie rurale par la gomme arabique qu'elle exsude ;
- *Acacia nilotica* : Elle se développe bien dans les zones de bas fonds et existe bien en peuplement important dans la plupart de ces Régions ;
- *Faidherbia albida* : Espèce emblématique reconnue par les agro pasteurs pour la fertilisation de leurs champs et qui est très adaptée dans plusieurs Régions du tracé
- *Balanites aegyptiaca* : Très résistante aux intempéries et utilisée comme bois d'œuvre et en alimentation humaine ;
- *Phoenix dactylifera* : Peuplements végétaux essentiels des ouaddis de la Région du Bahr El Ghazal principalement avec son apport en tant que source de revenu aux populations ;
- *Prosopis juliflora* : Espèce envahissante utile pour les zones dunaires à ensablement important ;
- *Parkinsonia acculeata* : Importante dans les différentes Régions du tracé pour la fixation des dunes de sable, l'amélioration de la fertilité des sols, la fourniture du bois de chauffe et du fourrage pour le bétail ;

– *Commiphora africana* : dans la région du Wadi Fira, économiquement utile pour sa gomme très appréciée comme encens au Soudan et au Nigeria et donc une source de revenu aux populations.

Les photos 1 et 2 ci-après illustrent quelques activités de projets pilotes réalisés sur le tracé.



Photos 1 et 2.

Activités dans les Projets pilotes (Opération acacia) dans le premier tiers du tracé.

Choix du système de mise en œuvre

Outre l'apport des eaux de pluies, le système consiste en la valorisation des acquis techniques et méthodologiques des projets exécutés et qui ont réussi dans ce domaine notamment le projet pilote « Opération acacia » à travers la récupération du sol par le système vallerani.

C'est un système de maîtrise de l'eau qui récupère les terres dégradées et le captage des eaux de ruissellement dans des micro-bassins (demi-lunes, zai, diguettes, cordons pierreux, banquettes...), par des technologies appropriées (techniques locales et mécanisée...).

Ce système que nous avons mis en œuvre permet notamment :

- une diminution de l'érosion hydrique et une augmentation de l'infiltration des eaux de pluie grâce au micro - bassins de retenue d'eau favorisant une régénération naturelle des herbacées qui améliorent la production pastorale ;
- une intensification de la production agro-sylvo-pastorale, par la mise en aménagement des terres, la restauration du couvert végétal et la diffusion d'itinéraires techniques adaptés aux conditions pédoclimatiques et appropriables par les populations ;
- une diversification des activités de production visant l'amélioration de la sécurité alimentaire et des conditions de vie et de revenus ;
- une prise en compte des contraintes majeures liées à la sécurité alimentaire à savoir notamment l'insuffisance de terres de cultures et de pâturages, l'insuffisance des capacités des producteurs du point de vue technique, financier et organisationnel.

La technique favorise une diminution de l'érosion hydrique et une augmentation de l'infiltration des eaux de pluie grâce aux micro-bassins de retenue d'eau, une régénération naturelle des herbacées améliorant la production pastorale. La même technique est utilisée pour la ceinture verte de N'Djaména.

Les photos 3 et 4 illustrent quelques aspects liés à cette technique.



Photo 3.

Sillon de retenue d'eau creusé avec la charrue Treno.



Photo 4.

Micro-bassins de retenue d'eau creusés avec la charrue Delfino.

Valorisation des savoirs traditionnels

Vivant dans ces zones depuis des décennies, voire des siècles, les populations locales ont acquis des connaissances, des techniques et des expériences non négligeables. Ces connaissances méritent d'être capitalisées, valorisées et vulgarisées dans le cadre de la mise en œuvre du projet à travers des partages et des échanges régionaux et/ou nationaux. Les savoirs traditionnels ont été démontrés lors la mise en œuvre de plusieurs projets pilotes.

Dans le premier tiers du tracé les populations riveraines du Lac Tchad sont très connues pour leur connaissance en techniques de maraîchage et d'agroforesterie.

Dans le second tiers (zone dunaire), les populations du Bahr Elghazal et du Batha sont de grands exploitants de gommaraies et dans le Ouaddai et le Biltine. Les savoirs des populations locales dans l'exploitation des ouaddis sont démontrés dans le cadre des projets de la Coopération allemande et ont fait tâche d'huile dans plusieurs régions du pays.

Plan méthodologique d'exécution

Au Tchad, tous les projets du secteur rural dont l'environnement sont pilotés par le Haut Conseil National pour l'Environnement constitué de représentant de 16 Départements Ministériels et le Comité Technique de Suivi (CTS) qui est un collège de Secrétaires Généraux des départements du secteur rural.

Le projet GMV/Tchad aura donc ce dispositif au sommet. Il dispose en outre d'une Coordination nationale actuellement pilotée par le Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques à travers la Direction des Forêts et de la Lutte Contre la Désertification (en attendant la mise en place effective) de l'Agence Nationale sur la GMV (en projet de création). Cette Agence aura un Comité technique et scientifique constitué de chercheurs de haut niveau et dans divers domaines opérant dans les structures d'enseignement (départements ministériels, universités et instituts) et de recherche (laboratoires spécialisés (Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement (ITRAD), Laboratoire des Recherches Vétérinaires et Zootechniques (LRVZ), Laboratoire d'Analyse des Eaux et de l'Environnement (LABEEN)).

La décentralisation est indispensable pour assurer l'exécution, la coordination et le suivi efficaces des activités. Elle est un gage de réussite pour le projet et le partenariat qui sera mis en place. Pour ce faire, elle nécessitera la mise en place d'un cadre institutionnel adéquat tant au niveau central que décentralisé se présentant comme suit.

NIVEAU NATIONAL :

- Le Haut Comité National pour l'Environnement
- Le Comité Technique de Suivi
- L'Agence Nationale sur la GMV (Coordination Nationale responsable de la mise en œuvre et de l'exécution technique des activités)
- Un Comité technique et scientifique constitué d'experts nationaux dans divers domaines.

NIVEAU DÉCENTRALISÉ

- Le Comité de pilotage régional sera assuré par les Comités Régionaux d'Action (CRA) mis en place dans le cadre du Plan d'Intervention pour le Développement Rural (PIDR) ;
- Une Coordination régionale pour la supervision et suivi ;
- Des partenaires opérationnels (Communautés de base, Communes, ONGs, Services techniques étatiques...).

Des contrats seront conclus avec divers groupements bénéficiaires (écovillages, prestataires privés (Société civile, ONGs, services techniques, institutions de micro finance...).

Diverses études seront faites par le biais des consultations afin de mettre un accent particulier sur les compétences nationales.

Des protocoles d'accord et de collaboration pourront être également signés avec d'autres partenaires surtout le PAM qui, par le biais d'un programme du type « Food for Work » pourrait appuyer les bénéficiaires dans la réalisation des activités, notamment celles relatives aux DRS/CES, plantation, gardiennage...).

La mise en place d'un partenariat entre tous les acteurs concernés est indispensable pour la réussite du projet. Pour ce faire, le projet développera un partenariat étroit avec les producteurs d'une part et avec les structures administratives et techniques d'autre part, ainsi qu'avec les ONG et projets intervenant dans chacune des zones du projet. Le projet s'appuiera particulièrement sur les structures de base dynamiques existantes (groupements/associations villageoises, unions de groupements villageois, comités villageois de gestion, comités inter-villageois de gestion ; communautaires...). Dans les zones où ces organisations n'existent pas, le projet s'attellera à leur mise en place. Pour les groupements nouvellement mis en place, le projet appuiera leur structuration et accompagnera leur reconnaissance juridique.

Résultats de quelques projets et programmes

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Grande Muraille, certains projets existants pourront être intégrés ou capitalisés dans la composante GMV/Tchad. Il s'agit en particulier du **Programme de Développement des Ceintures Vertes** avec diverses composantes et du **Programme National de Sécurité alimentaire**.

PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT DES CEINTURES VERTES

Ce programme est une initiative de Son Excellence, Monsieur le Président de la République, Chef de l'Etat. Il vise une prise en compte de la lutte contre la désertification dans les zones urbaines à l'échelle nationale. De 2008 à maintenant ce programme a entamé ces activités avec la ville de N'Djaména et s'est élargi à toutes les autres villes du pays dont les villes principales et secondaires se trouvant le long du tracé. Quatre projets majeurs constituent des actions principales utilisables dans le développement du projet de la GMV Tchad.

La Ceinture Verte de N'Djaména

La zone du projet est le pourtour de la ville de N'Djaména, allant des berges du Chari à Gassi à celles de Mara distant de quarante (40) km. La zone est d'un point topographique, généralement plate mais disposant par endroit des bas fonds. L'espace à reboiser est une bande en demi-cercle de 200 mètres de large et de 40 000 mètres de long, soit 800 hectares. Cette bande est distante de 300 mètres du canal de conduite des eaux.

Une première phase a été lancée servant de site pilote et est actuellement opérationnelle. Elle est d'une longueur de 2,2 km et d'une largeur de 200 mètres équivalent à 44 hectares. La phase actuelle, objet du présent projet est de 37,8 km de long et 200 mètres de large, soit 756 hectares à reboiser. La durée de réalisation de ce projet est de trois (3) années, soit 252 hectares par an. Le projet bénéficiera à terme, à toute la population de la ville, soit environ un (1) million de personnes par l'atténuation du vent et de la chaleur et à tous les villages se trouvant dans le périmètre de la ville par l'augmentation de leur revenu assurant ainsi leur sécurité alimentaire. Les équipements hydrauliques permettront aux femmes des zones concernées à satisfaire leurs besoins en eau. L'intégration de ce dispositif à d'autres systèmes de productions ruraux notamment le maraîchage permettra d'améliorer les conditions de vie des populations. Le projet bénéficiera également aux agents de l'Etat, qui feront de ce projet un atout d'expérimentation technique pour l'ensemble du pays.

Le projet pilote Opération acacia (PPOA)

Développé dans le cadre de la Coopération Tchad Italie à travers la FAO, il a permis de mettre en œuvre des actions de développement de pépinières villageoises dans plusieurs régions du pays et particulièrement celles traversées par le tracé. Les acquis seront mis à contribution notamment l'utilisation de la technologie vallerani. C'est une technique de récupération des terres dégradées qui a fait ses preuves et dont les populations se sont appropriées. Ce système vallerani a permis en 2007, la récupération de 395 ha dans 12 sites. Par la suite la capitalisation des résultats de la phase pilote du POA s'est développée sur le plan quantitatif et du point de vue effets/impacts sur le milieu et la population cible.

Le Projet de développement régional du Département de Biltine (PRDB) et le Projet de développement local du Ouaddai et Biltine

Dans cette zone du pays constituant le dernier tiers du tracé de la GMV il y soixante sept (67) bassins versants. Le PRDB et le PRODABO ont été initiés dans le cadre du développement de l'Agroforesterie pour le premier et l'aménagement des Ouaddis pour le second dans la Région de Biltine actuel Wadi Fira et le Ouaddai. Utilisant le système de récupération des terres par les cordons pierreux plusieurs superficies sont récupérées et exploitées à des fins agricoles.

LE PROGRAMME NATIONAL DE SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Outre les projets du Programme de Développement de Ceintures Vertes, projets qui ont des acquis certains, il existe le grand **Programme National de Sécurité Alimentaire**. Dans ce grand programme seront développés quatre projets dont

trois intéressent particulièrement le tracé de la GMV. Il s'agit en particulier des projets suivants :

- *projet d'appui à la filière Palmiers dattiers* (important pour le 1^{er} tiers du tracé) ;
- *projet d'appui à la filière Gomme Arabique* (2^e tiers) ;
- *projet d'appui aux autres produits forestiers non ligneux* qui apportera des revenus substantiels aux populations.

Mécanismes de suivi-évaluation et contraintes

L'atteinte des objectifs et des résultats attendus du projet majeur de la Grande Muraille Verte, passe nécessairement par la mise en place de mécanismes performants **de suivi-évaluation** et de réaction.

Suivi

Le suivi du projet sera fait à travers un mécanisme de suivi par les Délégations régionales dans lesquels il y a des antennes régionales. Un rapport de suivi sur l'état d'avancement des activités de terrain sera fourni chaque trois (03) mois à la coordination nationale. Sur la base des rapports trimestriels, la coordination nationale du projet produira des rapports semestriels et annuels qui dresseront le bilan des activités tout en faisant ressortir les contraintes et les atouts assortis des mesures correctionnelles. Ces rapports seront transmis au comité de pilotage, au ministère de tutelle et aux bailleurs. À la fin du projet, un rapport final mettant un accent particulier sur les résultats et les impacts environnementaux et socio-économiques sera rédigé. Les résultats obtenus et les leçons tirées seront capitalisés.

Dans le cadre de telles activités de suivi, les techniques modernes basées sur l'imagerie satellitaires et les GIS sciences seront développées.

Evaluation

Un dispositif d'évaluation interne sera mis en place par le projet incluant l'auto-évaluation par les bénéficiaires. A la fin de chaque trimestre, les activités de terrain feront l'objet d'évaluation par la composante en charge sur la base des indicateurs prédéfinis. Au niveau externe, une évaluation à mi-parcours est prévue à la troisième année d'exécution du projet. Cette évaluation permettra de dresser le bilan à mi-parcours et faire des orientations concrètes pour la suite du projet. Le projet fera enfin l'objet d'une évaluation finale par les donateurs et le Gouvernement.

Atouts et contraintes du projet

Atouts : les atouts sont assurément la forte volonté politique afin de mettre en œuvre le projet ainsi que la prise de conscience des populations vivant le long du tracé malgré leur précarité.

Contraintes : elles sont d'ordre physique et socio-économique.

Sur le plan physique, on note :

- une pluviométrie aléatoire ne favorisant pas une bonne production agro-sylvo-pastorale d'où l'utilisation de systèmes d'irrigation d'appoint ;
- les sécheresses cycliques avec comme conséquences l'avancée du désert et l'ensablement de certaines zones ;
- l'apparition de plusieurs poches de glacis dont la mise en valeur agricole est difficile avec les moyens rudimentaires des paysans, ce qui nécessite une intervention importante afin de viabiliser les zones ;

Sur le plan socio-économique :

- une forte pression humaine et pastorale sur les ressources forestières résiduelles ;
- la faiblesse de l'encadrement des producteurs ;
- la persistance de systèmes de production extensifs nécessitant des aménagements ;
- l'insuffisance de points d'eau ;
- le taux d'analphabétisme élevé et l'exode rural important.

Perspectives

En perspective nous avons un plan stratégique qui sera validé par le Comité Technique de suivi (CTS) et dont les activités essentielles sont :

- La création de l'Agence Nationale sur la GMV (avant le sommet des Chefs d'Etat) ;
- L'adoption du projet mettant en place le Comité Technique et Scientifique de la GMV ;
- La proposition du projet de base pour financement par l'Etat par rapport aux actions urgentes notamment les études pédologiques, géomorphologiques, sociologiques et économiques... et les actions d'information et de sensibilisation des populations des zones du tracé ;
- Le développement d'une carte d'occupation en fonction des données du terrain ;
- La finalisation du projet sur la base des nouvelles données ;
- La mobilisation des fonds pour la mise en œuvre effective par l'Etat et les bailleurs.

Experience of Acacia operation project: support to food security, poverty alleviation and soil degradation control in the gum and resins producers countries

MAMOUM GASIM MUSA
Forests National Corporation, Ministry of Agriculture and Forest SUDAN

Introduction

Acacia Operation is a regional project implemented in six Sahelian countries. In Sudan the project started in 2004 in two gum producing States namely (North Kordofan and Sinnar,). The project was funded by the Italian Government, implemented by Forests National Corporation with FAO as an executing agent. The project has been formulated with the specific objective of improving the livelihoods of the small-scale producers/collectors of gum Arabic in the Sudan. A number of different activities were conducted, ranging from rehabilitation of nurseries, extension services, village level plantations, improvement in quality of marketable Gum Arabic and improvement of social infrastructure for supporting the Gum Arabic producer's communities.

Acacia Senegal has a wide distribution in Sudan. It occurs in a belt between latitudes 10°-16° North covering an area of about one fifth of the total area of Sudan. Within this belt, gum is being mainly produced in two distinct areas namely western Sudan and eastern Sudan. The west comprises Kordofan and Darfur regions, while the east includes Blue Nile and Gedarif states.

There are also socio-economic benefits from gum collection, which stretch beyond the simple cash value of the gum. Millions of people are involved in harvesting, cleaning and trading of the gum, and because it is an activity that is carried out during the dry season it does not put demands on the farmer when he needs to tend other crops. It, therefore, helps to make him and his family attached to the land and discourages him from migrating to urban areas in search of work.

Environmentally, there are benefits which accrue from gum Arabic production. In particular, *Acacia Senegal*, the main gum Arabic producing species in the Sudan and the other gum-producing species that produce non-commercial quantities (*Acacia seyal*, *A. polyacantha*, *A. mellifera* and *A. laeta*) provide a means of combating desertification and desert encroachment

Project Objectives

GENERAL OBJECTIVE

To promote gum production and productivity, rehabilitate traditional gum cultivation cycle and strengthen newly organized gum producing associations and locally displaced communities with the view of alleviating poverty, combating desertification and enhancing food security.

SPECIFIC OBJECTIVES

- Identify and disseminate the most promising rehabilitation approaches under different ecological and socio-economic conditions
- To establish nurseries, promote organic farming and restore traditional gum cultivation cycle.
- To encourage re-settlement of locally displaced communities through replanting & restocking of degraded areas with gum-producing trees.
- To improve back-yard gardens for production of rain-fed vegetables, sustain women farming and diversify food supply.
- To promote and enhance marketing systems to secure increased benefits and better returns for gum producers
- To build organizational, management and administrative capacities of Gum Producers Association and Internally Displaced People in the areas of book keeping, finance and administration;

Benefits and beneficiaries

The major beneficiaries of this project are the small-scale producers of gum Arabic and their Associations into which they are grouped.

- The Associations benefited from the plantations of *Acacia senegal* which after 5 years can yield a considerable amount gum Arabic.
- Cultivation of agricultural crops and fodder are of significant impact in terms of food security, income generation and livelihood improvement.
- The population located in or around the targeted villages also benefited indirectly from services as well as indirectly improving their welfare through the increased production of vegetables.

– Producers benefit directly from (i) the supply of seedlings from the rehabilitated nurseries (ii) the training they received in the field of using of improved tools for the tapping, collection and maintenance of their trees.

Moreover, In Sudan, many of the areas where the project was implemented are suffering from desertification. The soils may be sandy with very poor structure highly vulnerable to erosion. The desertification process is due not only to climatic factors, but also to the presence of animals in numbers exceeding the carrying capacity of the land. In short spaces of time, large areas of land have been subjected to rapid desertification with the result that all the land could support is an itinerant agriculture or livestock economy and the exploitation of the gum trees. In this context, the project contributed effectively in improvement of the soil and combating desertification in targeted areas. Finally, *Acacia Senegal* is an important source of fodder for cattle, sheep and goats from its leaves and pods, and of wood and charcoal for the population, in addition to the revenue derived from its gum.

Project achievements

Beneficiaries

State	No. of Beneficiaries
Sennar	2460
North Kordofan	4550
Total	7010

The number of beneficiaries was 1310 in 2004, raised up to 3810 in 2005, and in 2006 jumped up to 7010.

Training of trainers

	Sennar	N. Kordofan	Total
Seeds collection	50	60	110
Seedling production	-	10	10
Tree planting	126	255	381
Management & gum production techniques (workshop)	10	15 +5 from other States	30

ACTIVITIES 2004 (SENNAR)

Site	Spacing	Area planted	Seeds in Kg	Planting system	No. of Families
Reserved forest	4*4 strips	188 ha (project tractor) 230 ha (hired tractor)	1000	Tungya <i>A. senegal</i> with crops in 167 ha	20
Communal & private owned area	4*4 strips	365 ha Ploughed with a hired tractor	300	Tungya <i>A. senegal</i> with crops	6
Total		783	2000		26

Survival rate = 70%

ACTIVITIES 2004 (KORDOFAN)

Site	Spacing	Area planted	Seeds in Kg	Planting system	No. of Families
Reserved forest	4*4 strips	417 ha (hired tractor)	600	Tungya <i>A. seyal</i> with crops	78
Communal & private owned area	4*4 strips	21 ha (hired tractor)	10000 seedlings	Tungya <i>A. senegal</i> with crops	17
Total		438	2000		95



Photo 1.
Taungya system 2004 (N. Kordofan)



Photo 2.
Taungya 2004 (N. Kordofan)



Photo 3.
Plantation 2004 (Sennar)

ACTIVITIES 2005 (KORDOFAN)

Site	Spacing	Area planted	Seeds in Kg	Planting system	No. of Families
Reserved forest	5*5 Delfino	530 ha (project tractor) 230 ha beeting up for 2004	600	Tungya <i>A. senegal</i> (with crops)	20
Communal & private owned area	5*5 Delfino	210 ha (project tractor)	1200	Tungya <i>A. senegal</i> with crops	10
Total		760	1800		30

Site	Spacing	Area planted	Seeds in Kg	Planting system	No. of Families
Reserved forest	4*5 & 4*4 Delfino	250 ha (project tractor)	800	Tungya <i>A. seyal</i> (with crops)	100
Communal & private owned area	5*5 Delfino + traditional	167 ha (project tractor) Sandy soil	450 + 8000 seedlings	Tungya <i>A. senegal</i> with crops	50
Total		417	1250		150

ACTIVITIES 2005 IN SENNAR

OBSERVATION

- The total planted area during this season was equivalent to 78.5% form the targeted area.
- The survival rate was high due to sufficient rainfall and early land preparation (water harvesting techniques).

SUMMARY FOR PLANTATION ACHIEVEMENT:

Site	Total area planted / ha				
	Year 2004	Year 2005	Year 2006	Year 2007	Total / ha
N. Kordofan	438	417	570	900	2325
Sennar	783	760	280	625	2448
Total	1221	1177	850	1995	4773

Water Harvesting Technique

- When the first year planting programme (executed by traditional methods) was evaluated, it was decided that both traditional and water harvesting techniques should be adopted especially in Kordofan on poor sandy soils.
- On the arrival of the dolphin plough the mechanized water harvesting technology was used and the traditional methods were also adopted on terrain unsuitable for that machine. It must be mentioned here that the Sudan had acquired excellent experience from previously executing water harvesting programmes. Experience showed that the method adopted (mechanized or traditional) should be selected according to the suitability of that method to the site factors.



*Photo 4.
Land preparation 2005 (Sennar)*



*Photo 5.
Taungya 2005 (N. Kordofan)*

Lessons learnt

- Growing agricultural crops in association with Gum Arabic plantation, especially at early stage of plantation, would have opened an opportunity to make the participatory forest management concept more rewarding.
- Beneficiaries and different stakeholders had improved their knowledge in various aspects.
- Willingness and interest of local people is very important for the success of all forestry and livelihood improvement programmes so an efficient forestry extension program (awareness and capacity building) is crucial.

- Involvement of different stakeholders in the afforestation and improvement of production through agro-silvo-pastoral technique is essential for the success
- Well trained staff in forestry technical issues and rural development will enhance the work progress
- Using of water harvesting techniques seem to be essential in rehabilitation of degraded land in semi arid area
- Physical characteristic of the soil and landscape should have been considered in planning suitable water harvesting techniques
- High and outstanding success was with landless people in reserved forests and women were found do better than men.
- Taking forest committees on study tours to other successful models was found to be a very effective demonstrating tool.

1. CONTRIBUTION TO POVERTY REDUCTION AND WEALTH CREATION:

- The income level of the project beneficiaries was changed remarkably, due to higher benefits received from introduced Agro-silvo-pastoral system.
- The most outstanding output of the participatory forest management is the appearance of *Acacia Senegal* (Hashab) the gum producing tree in project areas that were not previously occupied by the species during the last two decades.
- These plantations will secure a very important source of income, as the research studies estimated that the gum production revenue of 20 feddans is about US \$ 5,000.

2. IMPORTANCE OF PARTICIPATORY FOREST MANAGEMENT IN NATIONAL DEVELOPMENT:

Acacia Operation plays a significant role in supporting the livelihoods of the poor in project site. When resources are degraded, contested, or inaccessible, the poor tend to be negatively affected, often driven even deeper into poverty. Recently attention is being paid to the role of forestry in poverty context, and this has been addressed in the forest policy and national strategies for poverty alleviation.

3. IMPEDIMENTS AND PROPOSED MEASURES:

- Forests and trees provide a wide range of socio-economic and environmental benefits and values to the people in the region. This inevitably results in a wide range of often competing demands, needs and interests being placed on the same resources resulting in conflicts. The conflicts occur at different levels ranging from household to local and national level. Establishing conflict resolution mechanisms among users, within agencies, and between local groups is highly required.
- Newly established Hashab plantations are subjected to overgrazing during the drought period. Training on the importance of sustainability and conservation of natural resources is highly needed to complement the technical assistance provided to farmers.
- Participation of women in the implementation of different project components is very minor, compared to the role of women towards improving food security in the rural area. In this regard it is essential to promote their participation in the social and economic life of their communities by empowering them to initiate and conduct an income generating activities in fields of agriculture and forestry.

– The project is mainly targeting the Gum Arabic Producers' Associations (GAPAs). These Associations are recently formed by small-scale producers - typically owning few Hashab trees to a maximum of 30 feddans - of a same community. Around 2651 associations have been registered so far; they have an apex structure in Khartoum: the Gum Arabic Producers' Union. There is a need to improve the capacity of GAPA's through improving business organizational, marketing skills, administrative capacity and giving them access to finance services with reasonable credit charges - as an alternative to the traditional *Sheil* system.

Some Means and Ways for Community Involvement

- For successful working with the community from the initial stage, extension agents should ensure that trust is built with local leaders and even with prominent people in the community who may otherwise turn the community against the innovation.
- To enable communities to run activities on their own and/or with minimum external support, relevant training should be provided for the effectiveness of the project.
- Needs assessment of community training should be carried out on a regular basis to identify and formulate the extension package.
- Community forest extension is of dynamic feature, and therefore the level of achievements should not be based only on achieving prescribed plans, but also on community needs, organizational capacities and level of understanding.

Expérience du Burkina Faso en matière de réalisation de la Muraille Verte. Le projet Front de Terre

ADAMA DRABO
Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. Ouagadougou, Burkina Faso

Introduction

Le Burkina Faso, à l'instar des pays sahéliens, est confronté à une crise écologique caractérisée par une dégradation accélérée des ressources naturelles avec pour corollaire une raréfaction des terres cultivables et des aires de pâturage. Ceci est dû essentiellement à la conjugaison de facteurs climatiques et anthropiques, soutenue par une forte croissance démographique avec pour conséquence un accroissement des besoins en terres de culture, de pâturages et de produits forestiers.

Cette situation, conjuguée à des pratiques agricoles inadaptées, à un mode d'élevage de type extensif et à une forte exploitation des ressources naturelles, a eu pour conséquence une baisse de la fertilité des sols et de la productivité agricole. Elle a entraîné un flux migratoire important des populations du Nord vers les zones qui regorgent encore des potentialités relativement importantes en ressources naturelles.

Cette dégradation est plus particulièrement marquée dans les zones soudano-sahéliennes à sahéliennes, où l'on observe de vastes étendues de terres de glaciais, devenues improductives et incultes avec les moyens aratoires traditionnels.

C'est dans un tel contexte que le Projet « Front de Terre » a été initié par le Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie depuis 1998.

Financé conjointement par une contribution importante de la République de Chine et le budget de l'Etat, le projet a permis de tester des systèmes de gestion intégrée des terroirs et des ressources naturelles basés sur l'approche participative et orientés essentiellement vers la restauration des espaces sylvo-pastoraux.

Zone de mise en œuvre du projet

Caractéristiques physiques

La zone de mise en œuvre du projet se caractérise par deux types de climat :

– Climat sahélien avec 3 à 4 mois de saisons de pluies et une pluviométrie variant entre 300 à 600 mm. C'est la partie du pays la plus soumise à l'influence des vents desséchant de l'harmattan. Cette sous-zone couvre les provinces du Yagha dans la **Région du Sahel**, de la Gnagna dans la **Région de l'Est**, du Namentenga et du Sanmatenga dans la **Région du Centre-Nord**.

– Climat nord soudanien avec 4 à 6 mois de saisons de pluie et 600 à 900 mm de pluviométrie annuelle. La zone ici couvre les provinces du Passoré dans la **Région du Nord**, de l'Oubritenga dans la **Région du Plateau Central**, du Kadiogo dans la **Région du Centre**, et du Nayala, de la Kossi et des Banwa dans la **Région de la Boucle du Mouhoun**.

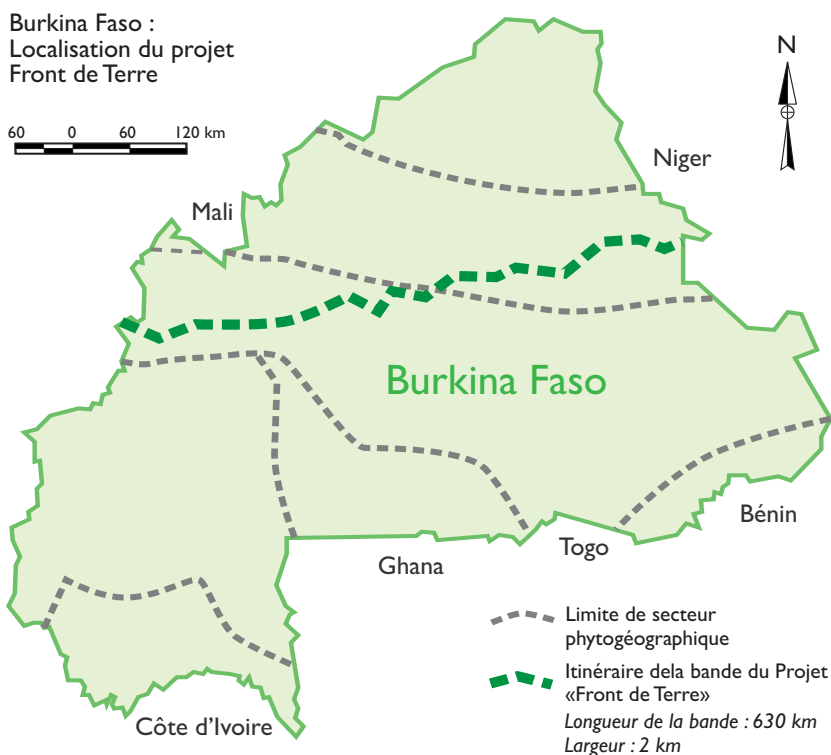


Figure 1.
Localisation de la zone de mise en œuvre du projet.

Contexte socio-économique et objectifs

La zone d'intervention initiale du projet Front de Terre couvre ainsi 12 provinces réparties dans sept régions administratives du pays.

La population de l'ensemble de la zone est estimée à 2 683 596 personnes, soit un peu plus de 25 % de la population du Burkina Faso. Cette population est essentiellement rurale et pratique dans sa grande majorité les activités agro-sylvo-pastorales largement tributaires des aléas climatiques.

L'objectif est de lutter contre la dégradation des terres en vue d'un accroissement de la productivité agricole dans la zone sahélo-soudanienne du pays.

De manière spécifique, il s'agissait de réaliser une bande de végétation de 2 km de large sur environ 630 km de long dans la zone sahéenne du pays. Cette bande de végétation réalisée avec des essences forestières adaptées au milieu devait s'étendre, depuis le village de Mansila (frontière Burkina Faso-Niger) dans la province du Yagha (région du Sahel) au village de Tansila (frontière Burkina Faso-Mali) dans la province de la Kossi (Région de la Boucle du Mouhoun).

Modalités de mise en œuvre

Approche stratégique

Le projet a été exécuté initialement à travers deux phases :

- une phase pilote de 1998 à 2003,
- une phase de consolidation de 2004 à 2007.

LA PHASE PILOTE

La phase pilote a effectivement débuté au cours de l'année 1998 et s'est poursuivie jusqu'en 2003.

Au début de cette phase seule une distance d'un seul tenant d'environ 20 km de long sur 2 km de large a été effectivement réalisée essentiellement dans la province de la Gnagna.

L'approche a consisté à briser la carapace du sol à l'aide d'une sous soleuse sur des bandes parallèles mais perpendiculaires au sens de l'écoulement des eaux de ruissellement à raison de 3,5 m à 4 m d'intervalles. Ceci a pour avantage de permettre le stockage des eaux de pluie et de faciliter ainsi le développement des plants.

Les essences forestières locales adaptées à ce milieu sahéen et ayant une valeur économique intéressante ont été surtout utilisées le long de ce tracé. Ce sont essentiellement *Acacia senegal* et *Acacia nilotica*. Cependant quelques autres réalisations de faibles amplitudes ont été faites dans quelques villages le long du tracé notamment entre le Yagha et la Gnagna.

Au regard de certaines difficultés dues à la problématique de la surveillance des plants dans les zones inter village, l'approche consistant à réaliser la bande de végétation fut revue à partir des années 2003

LA PHASE DE CONSOLIDATION

La phase de consolidation a débuté à partir de 2004. L'approche consistant à réaliser la bande de végétation a été abandonnée. L'accent fut mis sur la récupération des terres dégradées et la réhabilitation des berges des cours d'eau dans les provinces concernées.

Cette approche a pour avantage de traiter les sols incultes avec la sous-soleuse en y associant cette fois la production agricole et fourragère selon la prédominance des activités agro-sylvo-pastorales.

Les glacis ainsi récupérés permettaient de produire les cultures vivrières entre les sillons traités et surtout facilitaient le travail du sol à l'avantage des plants mis en terre.

Dans le cas de certains glacis, la strate herbacée reprenait graduellement au profit du bétail de la localité.

Le dispositif de protection des plants

Dans le cadre du dispositif de protection des plants, il faut noter que toute la population est concernée par la protection des plants mis en terre. Néanmoins des comités villageois de surveillance ont été mis en place dans chacune des provinces. Les membres de ces comités se chargent d'assurer la protection des plants de manière rotative. Ils sont appuyés selon les cas par des gardiens ou l'ensemble de la population.

Les résultats enregistrés

Au titre des grands résultats obtenus, on note entre autres que :

- douze (12) provinces ont été touchées dans sept (07) régions administratives du pays ;
- 62 sites ont été sous-solés sur une superficie totale de 3 320 ha ;
- 1 218 037 plants, notamment *Acacia senegal* et *Acacia nilotica*, ont été effectivement plantés avec un taux de réussite variant entre 30 et 95 % selon les sites.
- l'implication de 85 villages avec un effectif de 6 596 personnes ayant participé aux séances de sensibilisation et 258 villageois formés pour la conduite des activités, etc. ;
- la mise en place de 45 comités de surveillance dans les localités concernées.

Au regard des acquis du projet et vu l'engouement de la population, une requête de financement d'un nouveau projet vient d'être initiée pour la poursuite et le renforcement des acquis déjà engrangés.

Le financement du projet

La première phase du projet a été mise en œuvre à travers la coopération Chine –Burkina Faso et a coûté environ 800 millions de francs CFA avec une contrepartie nationale estimée à près de 100 millions de francs CFA.

Il faut noter que deux unités de traitement du sol ont été acquises. Il s'agit de deux tracteurs de 180 CV de 4 charrues dont 2 charrues Delphine et 2 traîneaux. Le coût des plants ainsi que leurs mises en terre ont été supportés par le projet.

La phase de consolidation a été prise en charge entièrement par l'Etat à travers les engagements nationaux de 2004 à 2008 pour un cumul de 164 millions de francs CFA, avec cependant trois années creuses (2003, 2004 et 2007)

Quelques difficultés et contraintes ont émaillé l'exécution du Projet. On retient entre autres :

- l'aberration dans l'estimation quantitative des objectifs initiaux du Projet ;
- l'absence de document de projet au moment du lancement des activités ;
- l'absence d'un cadre référentiel pour une appréciation et une évaluation objective des résultats ;
- l'insuffisance d'études préalables ;
- la variabilité de la méthodologie ou stratégie d'intervention du Projet ;
- le pâturage dans les sites : en effet, la zone d'intervention actuelle du Projet est une zone à forte intensité d'élevage. Le cheptel (les animaux domestiques) est numériquement très important et a une incidence sur la végétation, notamment sur les sites boisés ;
- les aléas climatiques : la pluviosité reste très faible et aléatoire dans cette zone, réduisant le taux de réussite des plants mis en terre ;
- l'insuffisance des moyens logistiques (véhicules, motos) pour l'exécution et le suivi des activités du Projet ;
- les moyens financiers limités pour suivre les exigences de l'évolution progressive du Projet ; l'enveloppe financière s'est révélée de plus en plus insuffisante pour faire face aux différents enjeux et défis.

Perspectives

Les acquis engrangés par le projet s'avèrent intéressants. Tenant compte de ces résultats, il s'avère nécessaire de poursuivre les activités du projet à travers un financement conséquent.

Les objectifs à atteindre pourraient s'articuler autour des points suivants :

- contribuer à lutter contre la désertification pour la réduction de la pauvreté dans la zone d'intervention du Projet, tout en accroissant les productions agro-sylvo-pastorales par la récupération des terres dégradées et le renforcement des capacités de gestion des communautés locales ;
- corriger les insuffisances de la mise en œuvre antérieure du projet, notamment par :
 - l'intégration du concept de Développement Local dans la stratégie d'intervention du Projet selon une démarche participative ;
 - l'extension du Projet dans les autres régions non couvertes, suivant une démarche « zone d'intervention » intégrant les terroirs villageois, en lieu et place d'une intervention suivant une bande végétale ;
 - l'élaboration de protocoles techniques et méthodologiques pour les actions de récupération des terres dégradées ;
 - la mise en place d'un système de programmation ascendant et d'un dispositif suivi-évaluation approprié, assorti d'une base de données.
- sauvegarder et consolider les acquis.

La Grande Muraille Verte : un corridor de suivi de la dynamique d'établissement et des changements d'état de la biodiversité au Sahel

BRICE SINSIN
Laboratoire d'Ecologie Appliquée, université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 cotonou, Bénin
bsinsin@gmail.com

Résumé

La plupart des stations dont disposent les scientifiques pour le suivi des changements d'état des ressources naturelles sont soit des stations naturellement établies depuis l'évolution de la planète soit de vieilles plantations à histoire peu connue en termes de processus des composants. L'initiative heureuse de l'implantation d'une Grande Muraille Verte au Sahel à l'échelle continentale est un idéal pour le monitoring de la biodiversité car plusieurs questions scientifiques pourront enfin trouver un champ expérimental à leur résolution. Quelle est l'influence de la longueur ou des effets de dimensions des plantations sur le recrutement de nouvelles espèces ? Quels sont les agents facilitateurs de l'augmentation de la biodiversité au sein de plantations artificielles en milieu aride ? Quels peuvent être les effets de cette grande bande verte sur les micro- ou méso-climats et les facteurs biotiques associés au Sahel ? Quels sont les groupes taxonomiques qui seront les pionniers à s'établir et pour combien de temps avant leur remplacement ? Quelles pressions subiront les espèces utiles (fruitières, fourragères, énergétiques, etc.) de la part des populations riveraines et quelles sont les réactions positives induites ? Ce sont autant de questions de monitoring qui seront répondues au cours du suivi écologique de la Grande Muraille Verte à partir d'une bonne maîtrise du temps à travers des modèles mathématiques enrichis de données sur le long terme. Cette communication est un plaidoyer pour inviter les scientifiques à prendre le train du bio-monitoring dès la gare de départ pour ne pas manquer le début des processus. Enfin, pour donner encore plus de renommée à cette impressionnante œuvre, le projet de la Grande Muraille Verte

(GMV) est proposé pour être érigé en aire protégée de la Catégorie V de l'UICN dénommée : Aire Protégée Paysagère de la GMV Transfrontalière du Sahel.

Mots clés

GRANDE MURAILLE VERTE ; MICRO- OU MÉSO-CLIMATS ; ESPÈCES PIONNIÈRES ; ESPÈCES UTILES

Introduction

La mise en œuvre d'activités découlant d'objectifs spécifiques et projetées pour être réalisées, communément appelées « projets », est une décision qui est l'aboutissement d'un processus plus ou moins long de jeux d'hypothèses et d'activités conséquentes concourant à l'obtention de résultats escomptés selon les objectifs de projet. Il est souvent notoire que les données pouvant contribuer à l'évaluation des projets ne soient pas prises en compte au démarrage de leur mise en œuvre ce qui du coup crée des lacunes pour le jugement objectif de la pertinence et de la portée des résultats obtenus. De telles données ne peuvent être obtenues qu'à l'aide de protocole de suivi des projets sur le long terme (monitoring) pour éviter notamment les erreurs d'extrapolations temporelle et spatiale liées aux études ponctuelles de courte durée (Evans & Turnbull, 2004 ; Dale, 2003).

Le suivi écologique des systèmes dynamiques nécessite de prévoir des dispositifs adéquats de collecte de données qu'il faut asseoir dès le début du processus censé prendre place au fil du temps, soit pour réajuster les actions prévues soit pour choisir des solutions alternatives (Ringold *et al.*, 1996 ; Nyberg, 1998 ; Elzinga *et al.*, 2001). Par exemple, l'un des domaines où la collecte régulière de données est bien utile, selon un dispositif bien élaboré et en adéquation avec les objectifs à long terme des projets, est celui des modélisations prédictive ou explicative (Dale, 2003). En effet, nombreux sont les auteurs qui se trouvent confrontés aux problèmes que posent les données manquantes lors de l'établissement du paramétrage de tels modèles (Evans & Turnbull, 2004).

Le nouveau projet d'établissement d'une bande boisée sur toute la longueur de la zone du Sahel pour contrer la désertification progressive venant du Sahara, projet dénommé la « Grande Muraille Verte (GMV) » du Sahel, offre un cadre intéressant d'expérimentation du suivi des effets probables ou prédictibles de la dynamique naturelle qui y aura court à plus ou moins long terme. Au-delà de la croissance et du développement normal des espèces d'arbres qui y seront plantées, la couverture forestière ainsi créée servira très probablement d'habitats à nombre d'organismes de tous règnes comme cela a déjà été révélé ailleurs pour des cas similaires (Duff *et al.*, 1986 ; Senanayake, 1987). L'environnement biophysique du Sahel en termes de climatope, d'édaphotope et d'écosystème est fortement soumis aux changements à tous les niveaux, aussi les effets qu'un tel projet de changement biophysique induira méritent-ils un suivi diligent pour en tirer un grand nombre d'enseignements scientifiques.

En ce moment où ont lieu les discussions sur les modalités de mise en œuvre du projet de la GMV, le dispositif de collecte de données doit déjà intégrer les méthodologies de suivi de la biodiversité que l'on pourrait voir naître de cette œuvre biologique.

Ce document a pour objectif de monter l'intérêt des plantations d'une manière générale et d'argumenter voire d'insister sur la nécessité d'asseoir un protocole de collecte de données pour le monitoring des plantations de la GMV en tant que milieu-cadre et milieu-ressource pour les organismes qui y viendraient enrichir la diversité biologique attendue.

Intérêts des plantations de la GMV pour le Sahel

La domestication des essences forestières en termes de plantations remonte bien loin dans le passé comme l'ont rapportée Evans & Turnbull (2004) pour les plantations d'olive (*Olea europaea*) en Grèce vers l'an 4000 avant JC, de *Commiphora myrrha* ou de *Boswellia* sp. en Egypte vers 1500 avant JC. De nos jours, aussi bien les pays nantis en ressources forestières tels le Brésil ou l'Indonésie que ceux qui en sont démunis (Tchad ou Soudan) ont réalisé des plantations à plus ou moins grande échelle. Les estimations de la FAO (2001) indiquent que la couverture forestière et les plantations couvrent au niveau mondial environ 3869 millions d'hectares soit 30 % de la surface terrestre dont 187 millions d'hectares de plantations. Les top cinq grands pays de plantations au niveau mondial sont la Chine, la Russie, les USA, l'Inde et le Japon (Brown, 2006). Sous les tropiques, le rythme annuel de progression des plantations est de 4,5 millions d'hectares contre environ 80 mille hectares pour l'Afrique. Pour l'ensemble des pays tropicaux, l'Afrique vient en troisième position en termes de plantation (Tableau 1).

Tableau 1.
Superficies reboisées (x 1 000 ha) entre 1965 et 2000 sous les tropiques
(y compris zones subtropicales) (27°N – 27°S)
(FAO, 2001)

Régions	1965	1980	1990	2000
Asie	421	13046	29245	73444
Amérique du Sud	579	4448	8470	8634
Afrique	1378	2724	3773	4566
Amérique Centrale + îles Caraïbes	219	486	786	1311
Australie + îles du Pacifique	70	269	420	480
Total	6667	20973	42694	88435

Une bonne partie des plantations est de type industriel comme le montrent les données du Tableau 2 et les essences utilisées appartiennent à 4 principaux genres que sont *Eucalyptus*, *Acacia*, *Tectona* et *Pinus* (Tableau 3). Très peu d'espèces locales sont ainsi utilisées dans les plantations établies sur de vastes étendues.

Tableau 2.
Superficies totales couvertes par les plantations industrielles sous les tropiques en 1995
(Pandey & Ball, 1998)

Régions	(x 1 000 ha)	Taux annuel de plantation (x 1 000 ha)	Usages industriels effectifs (%)
Afrique tropicale	2434	120	52
Amérique tropicale	5973	230	76
Asie tropicale	19098	1300	45
Total	27505	1650	

Tableau 3.
Espèces utilisées pour les plantations forestières sous les tropiques
(Evans & Turnbull, 2004)

Espèces	% des plantations
<i>Eucalyptus</i> spp	50
<i>Acacia</i> spp	17
<i>Tectona grandis</i>	10
<i>Pinus</i> spp et autres espèces	23
Total	100

Au sein de l'Afrique, les cinq premiers pays de plantations sont l'Afrique du Sud, le Nigeria, le Soudan loin devant Madagascar et le Sénégal (Tableau 4).

Par ailleurs, toutes les plantations ont une ou plusieurs raisons qui justifient leur réalisation. Ainsi, les plantations sont-elles destinées soit i) à produire du bois et autres produits dérivés du bois, ii) à ajouter de la valeur aux agrosystèmes, iii) à réhabiliter ou à protéger des sites dégradés ou vulnérables (dunes, terrains érodés), iv) à améliorer l'environnement (mitigation des effets de changement climatique, séquestration de carbone), v) à créer un environnement esthétique et une ambiance de forêt naturelle pour le tourisme ou à des fins récréatives, etc.

Toutefois, la GMV sera implantée dans un environnement sahélien peu favorable à la productivité primaire en raison de : i) la disponibilité faible et erratique de l'humidité du sol, ii) l'effet fort desséchant et abrasif du vent saharo-sahélien souvent chargé de poussière et de sable, iii) températures extrêmes agissant comme facteurs limitants, iv) la mobilité du substrat (dunes) entraînant des cassures de racines, v) risques d'utilisations concurrentes au-delà des capacités de charge (prélèvements excessifs

Tableau 4.
Superficies reboisées (x 1 000 ha) dans divers pays du Sahel et au sud du Sahel de 1965 à 2000 (FAO, 2001).

Pays	1965	1980	1990	2000
Soudan	26,6	188	330	641
Sénégal	5,8	44	145	263
Ethiopie	16	135	270	216
Niger	-	0,2	16,4	73
Burkina Faso	0,6	5,5	46	67
Mauritanie	-	-	-	25
Mali	-	0,4	3,9	15
Tchad	0,6	-	1,3	14
Nigeria	100	170	259	693
Bénin	6,5	9,7	11	112
Cameroun	8,8	16	19,5	80
Afrique du Sud	500	697	795	1050
Total Afrique tropicale	1378	2724	3773	4566

de fourrage, bois de chauffe, etc.), vi) l'effet forme ou de périmètre, ici plus en longueur ou ceinture verte ce qui exposera les bords de plantation aux agressions avec le risque d'aggravation de tels effets par la fragmentation subséquente.

L'expérience de plantation écologique sur de longue distance est connue de la Chine avec son projet de ceinture verte pour protéger ses terres de l'avancée du désert de Gobi. Cette muraille verte, pendant de la Grande Muraille de Chine, est prévue pour atteindre 4 500 km allant de la banlieue de Pékin à la Mongolie-Intérieure pour un coût évalué à 8 milliards de dollars US (Brown, 2006).

Il y a donc des avantages certains pour le projet de la GMV ; aussi peut-on noter entre autres :

- Une opportunité pour les pays limitrophes du Sahel (Nigeria, Cameroun par exemple) ou typiquement sahéliens (Sénégal, Niger, Tchad, Soudan, etc.) d'entreprendre des actions concrètes à grande échelle pour contrer l'avancée du désert du Sahara vers l'équateur en érigeant une barrière d'arbres censée freiner certaines forces desséchantes telles que le vent, le rayonnement incident au contact du sol, les déplacements de sable et de poussière, etc.

- Une opportunité de créer ou d'accroître la diversité biologique régionale par la régénération attendue des espèces végétales colonisatrices et l'arrivée d'autres organismes en raison des nouvelles niches. Des espèces déjà menacées en raison de l'absence de couvert végétal pourront être sauvées par la restauration d'un micro-climat convenable.

– Une opportunité pour donner plus de valeur esthétique au paysage du Sahel fort dégradé par la désertification et les effets pervers des excès d'exploitation de diverses ressources naturelles (pâturages, récolte de bois, etc.). La GMV, telle une galerie forestière en zone de climat contrasté, devrait faire effet d'art par le relief de verdure que représente une telle ceinture vivante dans un paysage jauni de dunes et brûlant en maints endroits découverts.

– Une opportunité de disposer au démarrage d'un dispositif adéquat de collecte de données nécessaires pour le suivi des changements d'état et surtout pour l'élaboration de modèles robustes d'explication et de prédiction des effets de tels genres d'aménagement face aux changements climatiques.

A chacune de ces raisons on peut trouver des objectifs de gestion ou de conservation qui orientent généralement des actions appropriées pour lesquelles des informations scientifiques et/ou techniques sont pour le moins utiles. Dès lors, on peut évaluer la pertinence des actions d'aménagement et/ou de gestion du projet de GMV en cours durant les phases de croissance et de développement des peuplements établis.

Les plantations, un désert biologique ou des sites d'enrichissement biologique ?

Au regard des déterminants explicatifs de la diversité biologique, à savoir un grand nombre d'espèces co-existantes avec une régularité similaire d'individus (Magurran, 2004), les plantations souvent mono-spécifiques ou composées d'un petit nombre d'espèces abondamment plantées ne sauraient égaler les formations naturelles à ce propos. Même au sein des formations naturelles, les faciès mono-spécifiques y sont souvent moins riches en espèces végétales (Evans & Turnbull, 2004). D'une manière générale, les plantations sont moins performantes que les formations naturelles sur bien des aspects écologiques. Ces écarts sont plus ou atténués avec l'âge des plantations où l'on note une évolution croissante de la diversité biologique avec le temps. En particulier on peut rapporter à titre de comparaison :

– Richesse spécifique des espèces végétales plus faible dans les plantations comparées aux formations naturelles (70 à plus de 100 espèces d'arbres par hectare dans les formations denses forestières).

– Structure nettement plus simple des plantations comparées aux formations naturelles présentant souvent une complexité de strates de développement (espèces émergentes, dominantes, dominées, de sous-bois et de ras de sol).

– Productivité primaire (taux de conversion de l'énergie solaire en matière organique par les végétaux) en bois stocké, plus élevée dans les plantations que dans les formations naturelles qui agissent comme un système fermé en équilibre dynamique.

– Cycle biogéochimique : i) l’immobilisation de minéralomasse est croissante avec l’âge des plantations alors qu’elle est constante dans une formation stable, ii) le taux de décomposition de la litière est nettement plus lente sous plantation (20 à plus de 70 t/ha minéralisant au-delà de trois ans voire 17 ans et plus, Morris, 1993) qu’au sein d’une formation naturelle (5 à 15 t/ha minéralisant au bout de 2 à 6 mois, Egunjobi & Onweluzo, 1979).

– Niche et richesse faunique : la diversité des formes de vie et celle des réseaux trophiques sont plus complexes au sein des formations naturelles où il existe une diversité plus élevée de niches et de chaînes trophiques qui y sont associées. En cela les plantations sont nettement moins riches en faune sauvage, mais elles deviennent avec l’âge des refuges attractifs pour plusieurs espèces animales et dans certains cas elles rivalisent en diversité faunique avec les formations naturelles voisines généralement plus perturbées ou dégradées (Evans & Turnbull, 2004).

On peut donc faire le constat que les plantations sont écologiquement moins riches que les formations naturelles, mais elles ne sont pas pour autant des déserts biologiques, car il est bien démontré que les plantations peuvent faire renaître la diversité biologique notamment lorsqu’elles sont établies sur des terrains dénudés ou initialement très appauvris floristiquement.

Facteurs de dynamique de la biodiversité au sein des plantations

Plusieurs facteurs induits par l’existence des plantations expliquent l’évolution progressive de la biodiversité que l’on y observe avec l’âge des plantations ; ce sont en particulier :

– La couverture végétale qui créée, sert d’habitat ou de refuge à plusieurs organismes. L’effet du couvert végétal est en amont de plusieurs processus améliorateurs du milieu qui sont des facteurs déterminants de la biodiversité.

– Le microclimat d’une plantation est bien notoire par la température qui y est plus constante et plus tempérée que la température extérieure. L’éclairement y est diffus. Dès lors les autres facteurs périodiques secondaires que sont l’humidité relative et le vent sont maintenus à des niveaux optima pour la vie de divers organismes forestiers qui ne tolèrent que difficilement des extrêmes plus prononcées de ces mêmes facteurs climatiques.

– Les conditions de sol y sont meilleures : plusieurs études ont montré que les propriétés physico-chimiques des sols sous plantations (eau du sol, matière organique, CEC, structure, texture, porosité, etc.) sont améliorées durant la maturation des plantations. Cela vient du fait du cycle biogéochimique que l’on y observe en raison de la chute importante de litière et sa décomposition. Toutefois, d’autres études ont révélé une certaine tendance à l’acidification des sols avec une richesse floristique plus faible sous des plantations d’*Eucalyptus camaldulensis* (Djogo & Sinsin, 2006).

- Les chaînes trophiques (décomposeurs, minéralisateurs, producteurs, herbivores/frugivores, carnivores) naissent progressivement avec l'âge des plantations en réponse au couvert végétal, aux facteurs de microclimat forestier et à l'amélioration des propriétés du sol.
- Les agents « disperseurs » de semences de divers groupes taxonomiques (oiseaux, chauves-souris, rongeurs, insectes, etc.) enrichissent les plantations par dépôt de semences, point de départ des régénérations de certaines espèces étrangères à la station ou dont le stock semencier du sol a été détruit suite aux utilisations antérieures à la plantation.
- Les conditions ci-dessus citées étant remplies, les plantations fonctionnent comme les écosystèmes naturels et peuvent fournir des services équivalents à bien d'égards à ceux des formations naturelles (nourriture, pollinisation, divers produits forestiers, régulations diverses, etc.).

Le suivi ou monitoring écologique des changements du milieu

Justification/problèmes posés

Comme il a été présenté dans les paragraphes précédents, une plantation naît, croît, arrive à maturité puis peut livrer des produits au cours de son développement ou à la fin de rotations successives. Une plantation change ainsi d'état au fil du temps et dès lors, nombreuses sont les questions qui se posent en rapport avec des faits établis (richesse notoire en faune avienne par exemple) ou en termes de recherche de causalité pour divers impacts ressentis ou prédictibles (modélisation). Malheureusement, les réponses à ces questions souffrent souvent de manque de données pertinentes collectées en temps opportun et suivant des méthodologies appropriées. Plusieurs raisons entre autres qui expliquent cet état de fait sont i) le manque de discussions approfondies sur divers aspects des projets avant leur mise en œuvre, ii) le manque d'évaluation des objectifs spécifiques aux grands axes stratégiques, notamment leur adéquation avec l'objectif global, et le risque majeur d'avoir pour un même projet des objectifs contradictoires voire compromettants, iii) l'absence de comité scientifique institutionnalisé pour coordonner les protocoles de collecte de données sur le long terme.

Ces besoins en données sont bien ressentis au regard des lacunes que le monitoring écologique permet de combler, à savoir :

- Absence de collecte de données explicatives des processus caractéristiques de la dynamique des plantations sous gestion.
- Manque de données pour paramétrer et valider les modèles mathématiques explicatifs et prédictifs des changements d'état des plantations.

Intérêts d'un dispositif de monitoring écologique des plantations

- Disponibilité de système d'alerte pour réadapter/ajuster la gestion en cours des plantations avant tout échec prévisible.
- Disponibilité d'informations pour évaluer la pertinence et l'efficacité des actions d'aménagement entreprises.
- Disponibilité de données au départ, sur l'état actuel et sur l'évolution future prédictible de certains facteurs-variables de dynamique des plantations.
- Disponibilité d'informations pour révéler l'effet des pressions d'origine anthropique sur les plantations.
- Disponibilité d'informations pour révéler des lacunes dans la gestion et les actions correctrices nécessaires.
- Disponibilité de banque de données pour formuler des indicateurs de gestion et de biodiversité.
- Disponibilité de données régulièrement accumulées pour l'analyse des séries temporelles et pour l'élaboration des modèles mathématiques.

Typologie de monitoring

Le monitoring est l'ensemble des activités de collecte et d'analyse de séries d'observations ou de prises de mesures quantitatives en vue d'évaluer les changements au cours d'un processus évolutif dans le cadre d'objectifs mesurables d'aménagement et de gestion. Il est bon de remarquer que le succès du monitoring dépend de la précision et de la clarté des objectifs spécifiques de projet.

On peut distinguer deux types de monitoring que sont i) le monitoring pour la gestion des ressources naturelles et ii) le monitoring pour la recherche d'accompagnement :

Monitoring dans le cas de gestion des ressources naturelles

- Monitoring comme outil d'aide aux décisions alternatives : ce type de monitoring suppose que l'on dispose de solutions de rechange à un problème pressenti comme probable. Par exemple, si le monitoring révèle qu'une plantation de clones a engendré un taux élevé de mortalité suite à une sécheresse, alors on peut décider assez tôt soit de planter des provenances non clonées à qui l'on garde toute leur diversité génétique soit de changer d'espèce.
- Monitoring pour la gestion adaptative : ici les effets de la gestion sont évalués et les résultats de ces évaluations sont pris en compte pour réajuster les actions futures "learning by doing" (Nyberg, 1998 ; Lee, 1999). Par exemple si l'objectif d'aménagement est de limiter la pression de prélèvement du fourrage aérien à 30 % et si

les résultats de monitoring révèlent une pression supérieure à 30 % alors on peut décider d'accroître le budget de sensibilisation des éleveurs ou taxer la fréquentation des plantations.

Monitoring pour la recherche d'accompagnement

– Monitoring des processus de dynamique temporelle (trend analysis) : l'évaluation des changements doit faire partie d'un cycle de gestion ou d'un aménagement adaptatif au cours duquel les résultats de monitoring doivent être utilisés à des fins d'ajustement. Ce type de monitoring permet d'étudier par exemple la manière dont les éléments de la biodiversité changent au fil du temps. En voici deux exemples :

- Objectif n°1 de projet : éviter que l'espèce exotique colonise spontanément plus de 10 % des terres adjacentes

- Sous-objectif d'échantillonnage : s'assurer à 95 % que l'envahissement n'excède pas 10 ± 1 % des terres adjacentes

- Réponse : si l'envahissement excède 10 % alors entreprendre l'éradication mécanique de l'espèce exotique.

- Objectif n°2 de projet : limiter les dégâts des rongeurs aux jeunes plants à un maximum de 10 % à l'an 2

- Sous-objectif d'échantillonnage : s'assurer à 99 % que les dégâts n'excèdent pas 10 % dans un intervalle de confiance de ± 5 %

- Réponse : si dégâts > 10 % entreprendre lutte mécanique et si inefficace alors usage de raticide.

– Monitoring pour établir des référentiels servant de « témoins » pour les actions futures : ce monitoring exige une caractérisation bien détaillée des conditions de départ pour servir de référence ou témoin “baseline” aux changements futurs. Plusieurs facteurs-variables sont pris en compte dans l'espoir de voir quelques-uns déterminants de certains effets ou impacts du projet dans le futur. L'objectif est d'étudier les variations naturelles des éléments de la biodiversité à travers des paramètres tels que les taux/vitesse des changements à la suite de processus naturels ou de perturbations.

Quelques précautions pour la collecte de données de monitoring

En raison des usages qui peuvent découler des résultats de monitoring comme les outils d'aide à la décision, il est important de prendre du temps pour bien penser les protocoles afin de bien collecter et en quantité suffisante les données de base (Dale, 2003). Ainsi est-il nécessaire de i) écrire et de conserver le protocole dans ses moindres détails, ii) développer le ou les modèles *a priori* pour en connaître tous les facteurs-variables nécessaires pour générer les différents paramètres, iii) prévoir les

types ou techniques de traitement des données selon le ou les dispositifs expérimentaux mis en place. Plus particulièrement les aspects ci-après sont recommandables :

- Définir avec précision l'objectif global et les objectifs spécifiques pertinents de monitoring pour obtenir/connaître les valeurs des changements ou de dynamique du système. Les objectifs sont le fondement du processus de monitoring et doivent porter soit sur les éléments de la biodiversité (taille de la population, régénération, reproduction, indice de diversité, etc.) soit sur les attributs de changements de l'habitat, soit encore sur les indicateurs de menaces. La définition des objectifs peut être déclinée soit comme i) condition : par exemple limiter la pression de pâturage à 30 % du feuillage, soit comme ii) mesure de changement : par exemple déterminer les tendances évolutives de l'abondance des ravageurs, soit comme iii) sous-objectif de recherche fondamentale pour générer de nouvelles informations/connaissances : par exemple modéliser l'état d'équilibre du système diversité taxonomique induite
- exploitation pastorale des plantations.
- Définir avec précision les objectifs spécifiques d'échantillonnage pour le monitoring (pour élaborer un protocole pertinent et adéquat avec échantillonnage représentatif) en vue de mesurer et déterminer avec précision les attributs et paramètres des modèles de changement.
- Écrire dans les moindres détails dans un style clair et facile, la méthodologie de collecte des données. Les dimensions, unités d'observation/mesure, taille des échantillons, etc. doivent être décrites et transcrites avec précision dans le document de collecte de données de monitoring.
- Tenir compte de la représentativité des échantillons d'observation (combien de points/parcelles/fréquences d'observation pour détecter un minimum de changement ?).
- Définir le protocole au regard des traitements prévus pour l'analyse des données.
- Concevoir avant le démarrage des activités de monitoring le format de la base de données (méta-données) et former le personnel chargé de la collecte des données en conséquence.
- Former tout le personnel, à tous les niveaux, impliqué dans la collecte des données pour respecter rigoureusement le protocole de collecte des données afin d'éviter les erreurs non liées à l'échantillonnage (erreurs idiosyncrasiques).
- Préciser la gestion et l'administration de la base de données : responsable, conditions d'accès et d'échanges, etc.

Conclusion

On peut retenir que le projet de la GMV du Sahel va connaître des développements au cours de son évolution. On s'attend donc à une masse importante de connaissances à acquérir de ce projet de plantation à grande échelle. Toutefois, afin d'apporter des

données valides aux hypothèses qui en découleraient et pour en déduire des leçons pour la science, il est nécessaire d'élaborer, et ceci dès le démarrage des plantations, des protocoles de collectes de données en adéquation avec les objectifs spécifiques d'aménagement et de recherche. De la qualité du protocole de collecte de données dépendra la qualité des outils d'aide à la décision qui découleraient des modèles explicatifs et/ou prédictifs de la dynamique du système plantation-utilisations locales.

Recommandation

Ériger la GMV en Aire Protégée Transfrontalière du Sahel dans la catégorie V de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) (Phillips, 2002). En effet,

- Vu le fait que la communauté internationale recommande aux dirigeants africains davantage d'effort de création d'aires protégées dans les catégories de l'UICN selon les réalités de leur pays ;
- Vu le fait que la catégorie des aires protégées paysagères de l'UICN (Catégorie V) autorise une gestion durable des ressources du paysage concerné (Amend *et al.*, 2008) ;
- Vu l'intérêt bénéfique que peut procurer une aire protégée de catégorie internationale à la communauté internationale en général et aux populations locales en particulier ;
- Vu le fait que la GMV est destinée à augmenter et à conserver la biodiversité du Sahel ;
- Vu le fait que la GMV est établie pour servir les générations actuelles et futures ;
- Vu le fait que la GMV est destinée à l'exploitation durable avec partage équitable des coûts et bénéfices entre les peuples ;
- Vu le fait que l'établissement de la GMV va améliorer la valeur paysagère du Sahel ;

Il est proposé pour la GMV, le statut d'aire protégée de la Catégorie V de l'UICN dénommée : Aire Protégée Paysagère de la GMV Transfrontalière du Sahel.

Références

- Amend T., Brown J., Kothari A., Phillips A. & Stolton S. (2008) *Protected Landscapes and Agrobiodiversity values*. IUCN/WCPA, Gland Switzerland.
- Brown L.R. (2006) *Rescuing a planet under stress and a civilization in trouble*. Earth Policy Institute.
- Dale V.H. (2003) *Ecological modeling for resource management*. Springer-Verlag.
- Djogo J. & Sinsin B. (2006) *Impact des espèces exotiques plantées sur la diversité spécifique des phytocénoses de leur sous-bois*. Syst. Geogr. Pl., 76 : 191-209.
- Duff A.B., Hall R.A. & Marsh C.W. (1986) *A survey of wildlife in and around a commercial tree plantation in Sabah*. Malaysian Forester, 47(3/4) : 197-213.
- Egunjobi J.K. & Onweluzo O. (1979) *Litter fall, mineral turnover and litter accumulation in Pinus caribaea stands at Ibadan, Nigeria*. Biotropica 11(4) : 251-255.
- Elzinga C.L., Salzer D.W., Willoughby J.W. & Gibbs J.P. (2001) *Monitoring plant and animal populations*. Blackwell Science.
- Evans J. & Turnbull J. (2004) *Plantation forestry in the tropics : The role, silviculture, and the use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes*. Oxford University Press.
- FAO (2001) *Global forest resources assessment 2000*. FAO Forestry Paper 140. FAO, Rome, Italy.
- Lee K.N. (1999) *Appraising adaptive management*. Conservation Ecology, 3 : 3 Online URL : <http://www/consecol.org/vol3/iss2/art3>.
- Magurran A.E. 2004 (2004) *Measuring biological diversity*. Chapman and Hall.
- Morris A.R. (1993) *Forest floor accumulation under Pinus patula in the Usutu Forest, Swaziland*. Commonwealth Forestry Review, 72 : 114-117.
- Nyberg J.B. (1998) *Statistics and the practice of adaptive management*. In : V. Sit & B. Taylor (eds), Statistical methods for adaptive management studies. Land management handbook No. 42, pp 1-7. Victoria, British Columbia : research Branch, B.C. Ministry of Forests.
- Pandey D. & Ball J. (1998) *Teak : a global overview*. Unasylva, 51(201) : 3-13.
- Phillips A. (2002) *Management guidelines for IUCN Category V Protected Areas, Protected Landscapes/Seascapes*. IUCN, Best Practices Protected Areas Guidelines Series no 9. IUCN/WCPA, Gland Switzerland.
- Ringold P.L., Alegria J., Czapslewski R.L., Mulder B.S., Tolle T. & Burnett K. (1996) *Adaptive monitoring desing for ecosystem management*. Ecological Applications, 6(3) : 745-747.
- Senanayake F.R. (1987) *Analog forestry as a conservation tool*. Tiger Paper ; FAO, Bangkok Forest Newsletter, 14(2) : 25-30.

Partie IV

Synthèses

Végétations sèches des ceintures sahéliennes et soudaniennes du Sénégal à Djibouti

RODOLPHE SPICHIGER

Conservatoire et Jardin botaniques de Genève - 1 Ch de l'Impératrice.
PO Box 60. Postal code : CH-1292. Geneva. Switzerland

Préambule

Monod (1957) propose une revue comparative et critique de tous les systèmes de classification de la végétation africaine, y-c. les travaux encyclopédiques produits par la prolifique école biogéographique anglérienne. Schnell (1976, 1977) donne à son tour une bibliographie intéressante pour le public francophone. Plus récemment, White offre une compilation exhaustive de la littérature traitant de la flore et de la végétation de l'Afrique subsaharienne (White, 1986). Nous n'avons donc pas l'intention de refaire cet exercice. Notre objectif est de décrire la végétation sèche subsaharienne au Nord de l'équateur, en utilisant des ouvrages synthétiques qui sont considérés comme les références majeures sur le sujet. L'ouvrage de White, par exemple, intègre aussi bien des travaux modernes que les grandes fresques encyclopédiques des pionniers de la botanique en Afrique, à notre avis inégalées. Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances trouvera sans peine ce qu'il recherche, soit directement dans la bibliographie ci-jointe, soit dans celles des ouvrages cités dans cette liste. Concernant plus spécifiquement les pays sahéliens (y-c la Somalie et Ogaden), nous avons choisi un ou deux auteurs de référence, sans que la modernité ne prime sur la qualité.

Enfin, vu la relative hétérogénéité des typologies et nomenclatures utilisées par les spécialistes des différentes régions, nous avons suivi, pour la végétation, la classification des formations végétales d'Aubréville (1965, 1971) – qui est une amélioration de celle de Yangambi (Aubréville, 1957) – et pour la floristique, l'écologie et la

chorologie, les travaux de Lebrun (1977, 1979), Lebrun & Stork (1991, 1992, 1995, 1997, 2003, 2006, 2008a, 2008b) ainsi que le « Check list of Flowering Plants of Sub-Saharan Africa » (Klopper *et al.*, 2006).

Introduction

Lorsqu'on lit la carte de la végétation d'Afrique dressée par White (1986), ou d'autres ouvrages produits par les classiques de la phytogéographie africaine (p. ex. Aubréville, 1950, Lebrun, 2001), on est frappé par la régularité et le parallélisme latitudinal du dessin des grands domaines. Contrairement à l'Amérique du Sud dont la végétation s'allonge verticalement ou diagonalement en fonction des grandes barrières montagneuses et des courants marins, la cartographie de la végétation africaine fait apparaître les corrélations latitudinales entre climat, végétation et sol.

Cela se complique lorsqu'on arrive dans la Corne de l'Afrique. Là, grandes failles et massifs montagneux perturbent considérablement la représentation cartographique en la transformant en une mosaïque de taches de couleurs. L'altitude se substitue alors à la latitude comme facteur déterminant majeur. Les zones sèches s'incurvent brusquement vers le Sud, suivant les côtes de la Mer Rouge et de l'Océan Indien.

Cette contribution vise trois objectifs :

1. Décrire les types de végétation sèche entre la côte sénégal-mauritanienne et la Somalie. Puisqu'il faut bien se décider pour un ordre de présentation, nous suivrons plus ou moins fidèlement la classification de White (1986) qui est le produit d'un consensus mis en place par les africanistes à l'occasion de plusieurs congrès AETFAT (Association pour l'Etude Taxonomique de la Flore d'Afrique Tropicale). Des ouvrages récents, orientés plutôt vers la conservation de la biodiversité, proposent des variantes ou des tableaux synoptiques comparatifs (Burgess *et al.*, 2004).

Jusqu'au Soudan, la bande de végétation sèche est située à cheval sur :

– au Nord, la ceinture sahélienne (selon White : *phytochorie XVI, Zone de transition régionale du Sahel* ; selon Lebrun *Zone de transition saharo-soudanienne*), à savoir des steppes plus ou moins densément boisées, généralement épineuses ;

– au Sud, la ceinture soudanienne (selon White : *phytochorie III, Centre régional d'endémisme soudanien* ; selon Lebrun *Souche d'endémisme soudanienne*), c'est-à-dire une végétation de forêts denses sèches, de forêts claires et de savanes.

A l'Est la ceinture sèche se transforme en une mosaïque comprenant, en plus des types de végétation ci-dessus, des forêts et fourrés de montagne (*phytochorie VIII, région afro-montagnarde*) et des fourrés arides de la région somalienne (*phytochorie IV, région de la Somalie et du pays Massai*).

On ajoutera à ces types de végétation des formations extrazonales induites par les cours d'eau et les reliefs, ou azonales d'origine édaphique ou humaine.

2. Décrire la végétation sèche par pays.

Nous nous sommes limités à la description de la végétation des seuls pays traversés par la ceinture sahélienne et généralement considérés comme sahéliens : Sénégal, Mauritanie, Mali, Niger, Tchad, Soudan, Somalie et Ethiopie (Djibouti, Ogaden). L'extrême Nord du Burkina Faso, du Nigeria et du Cameroun étant aussi steppiques, cette végétation est mentionnée soit dans les généralités (chap. 1), soit dans le chapitre concernant les grands voisins sahéliens. La recherche conduite à partir de la Côte d'Ivoire nous a fourni beaucoup d'informations sur l'écologie des espèces xérophiiles (Adjanohoun et Aké Asi, 1967, Aké Assi, 2001 et 2002, Guillaumet & Adjanohoun, 1971).

Enfin, pour chacun des pays, nous avons étendu notre description non seulement à leur zone soudanienne mais encore aux aires susceptibles d'expliquer la distribution extrazonale de certaines espèces xérophiiles, comme les massifs montagneux. Ce choix a pour but de mettre en évidence les espèces les plus prometteuses pour une politique de reboisement. Ces espèces seront traitées dans le chapitre 3.

3. Présenter certaines espèces xérophiiles emblématiques.

Pour cela on utilisera les travaux de Lebrun et de Lebrun et Stork (voir bibliographie) ainsi que la base de données des Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève qui constituent une somme d'informations continuellement mises à jour.

I. Types de végétation présents dans la bande sèche Sénégal-Djibouti.

Chevallier (1933) plaçait dans son domaine (ou région) soudanais une *zone des steppes sahéliennes ou des épineux* et une *zone soudanaise proprement dite ou brousse-parc*. Reprenant en partie la conception de Chevallier, Aubréville (1950) propose une classification des unités de végétation africaines qui sert de base à tout ce qui a été publié depuis. Schnell (1976) donne un aperçu didactique des formations xérophiiles.

Suivant la conception aubrèvillienne, Aubonnier énumère dans sa *Flore des ligneux d'Afrique sèche* (2002) le secteur saharo-sahélien, le secteur sahélien, le secteur sahélo-soudanien, le secteur soudanien et le secteur soudano-guinéen. Knapp (1974) décrit une *zone des savanes à épineux (Vegetationzone der Dornsavannen)* correspondant plus ou moins au secteur sahélien septentrional ; une *zone des savanes sèches (Trockensavannen)* correspondant au secteur sahélo-soudanien ; et une *zone des savanes humides (Feucht-Savannen)* plus ou moins synonyme du secteur soudanais. En utilisant les méthodes statistiques modernes pour mettre en évidence

les groupements floristiques de l'Afrique Sub-saharienne, Linder *et al.* (2005) ont fait apparaître deux groupements un peu différents en lieu et place des phytochorions soudanien et sahélien classiques : un phytochorion nord-soudanien, mélange d'éléments de la zone de transition sahélienne et d'éléments du secteur soudanien selon White (1986), et un phytochorion sud-soudanien, regroupant une partie du secteur soudanien et de la zone de transition guinéo-congolaise/soudanienne de ce même auteur. Au contraire, d'autres auteurs confirment les conceptions aubrévilléennes, entre autres sur la base de données palynologiques (Lézine *et al.*, 2009).

Nous considérons donc que les recherches actuelles ne remettent pas en cause la conception d'Aubrèville (1950) reprise, entre autres, par White (1986) et Lebrun (2001).

1.1. Ceinture sahélienne : Zone de transition régionale du Sahel (selon White)

Entre la ceinture soudanienne et le Sahara, sous un climat tropical aride à saison sèche marquée (8 à 10 mois) et à pluviométrie variant entre 80 et 500 mm, s'étend une formation xérophile et xéromorphe souvent épineuse, à dominante herbacée. Chevallier (1933) et Aubréville (1950) nomment Zone sahélienne cette ceinture, homologue du domaine atlantico-nilotique de Monod (1957). Lebrun (2001) définit cette ceinture comme zone de transition saharo-soudanienne. La formation végétale la plus fréquente est la steppe à épineux. Dans sa traduction française, White n'utilise pas le terme de steppe, mais celui de formation herbeuse. Certains auteurs (Trochain, 1980) préfèrent utiliser le substantif « pseudo-steppes » réservant le terme de « steppe » aux formations extratropicales (euro-asiatiques ou nord américaines). Nous utiliserons néanmoins « steppe » dans le sens d'Aubrèville (1965 et 1971).

Les steppes se distinguent des savanes par un tapis herbacé discontinu, plus bas, et surtout constitué par une majorité de graminées annuelles, disparaissant lors de la saison sèche. Le tapis graminéen ne dépasse pas 80 cm de hauteur. Il est très clairsemé, cespiteux et prostré dans les régions les plus arides, seules les touffes de graminées pérennes restant visibles en permanence (*Panicum turgidum* p. ex.). Les steppes sont classées en fonction de leur physionomie : herbacées, arbustives, à épineux, à succulentes, etc. Les facteurs influençant prioritairement – et négativement – la végétation et la flore de la steppe sont l'élevage et le ramassage du bois de feu. Le feu de brousse est moins présent qu'en savane. *Balanites aegyptiaca* est une espèce envahissante caractéristique de tous les types de sols dans les zones atteintes par le feu, les défrichements ou le surpâturage. Les sols sahéliens sont ferrugineux, généralement sableux ou argileux (argiles pléistocènes), ou peu développés (cuirasses, affleurement rocheux, rocailles).

Selon White (1986), sur 1 200 espèces, moins de 3 % sont endémiques, surtout des herbacées. 6 % de ces 1 200 espèces se prolongent dans la région de la Somalie et du Pays Masai et en Asie (voir chap. 1 4.) ; 5 % ont une aire de répartition disjointe entre l'Afrique du Sud et le Sahel ; 14 % se retrouvent entre le Sud-Sahara et le

Sahel. Parmi les sud-saharo-sahéliennes citons *Leptadenia pyrotechnica*, *Maerua crassifolia*, *Panicum turgidum* et, à l'étage montagnard, *Olea laperrinei*. Certaines espèces (26 %) se retrouvent aussi bien en zone soudanienne que sahélienne (*Bauhinia rufescens*, *Piliostigma reticulatum*), et présentent même une distribution panafricaine (*Diospyros mespiliformis*, *Abrus precatorius*). 46 %, enfin, sont des espèces prédominantes du Sahel, p. ex de nombreuses espèces d'*Acacia*, genre emblématique des steppes à épineux.

La région sahélienne n'est pas homogène. On y trouve des types de végétation spéciaux, liés à des conditions locales particulières d'ordre microclimatique, édaphique ou anthropique. Le Sahel septentrional est caractérisé par une steppe herbacée à *Panicum turgidum* et à *Cenchrus biflorus* (cram-cram), ou une steppe faiblement arbustive à épineux avec un même couvert graminéen. C'est la zone des grandes transhumances (camélidés, caprins, ovins). La steppe boisée à épineux constitue la formation zonale du Sahel méridional où se pratiquent surtout l'agriculture et l'élevage sédentaire.

1.1.1. STEPPES SEMI-DÉSERTIQUES HERBACÉES OU ARBUSTIVES À ÉPINEUX DU SAHEL SEPTENTRIONAL (UNITÉ CARTOGRAPHIQUE 54A SELON WHITE)

Les régions au Nord de la bande sahélienne qui reçoivent moins de 250 mm de pluie sont caractérisées par une végétation herbeuse parsemée de ligneux qui du Sud au Nord deviennent de plus en plus rares et rabougris. Selon les auteurs et les régions, il est parfois difficile de faire la distinction entre flore nord-sahélienne et sud-saharienne.

Dans les conditions les plus arides (100 mm), une steppe herbeuse ou pauvrement arbustive à *Panicum turgidum* se maintient, accompagnée de *Acacia tortilis*, *Maerua crassifolia*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Calligonum comosum* et *Euphorbia balsamifera*. Les crêtes non stabilisées des dunes sont occupées par *Stipagrostis pungens*. Les affleurements rocheux sont colonisés par une population d'*Acacia ehrenbergiana*, et les sols hydromorphes saumâtres hébergent une végétation halophile à *Salvadora persica* et *Tamarix*. *Panicum turgidum* et *Stipagrostis pungens* sont des graminées typiques du Nord-Sahel et du Sud-Sahara qui disparaissent dans les régions plus méridionales. *Acacia senegal*, *Commiphora africana* et *Balanites aegyptiaca* sont moins xérophiles.

Dans des conditions moins arides, entre 100 et 250 mm, on trouve une steppe buissonnante à épineux dont le recouvrement ligneux, inférieur à 10 % et d'une hauteur moyenne de 2-3 m est composé de *Acacia tortilis*, *Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Acacia laeta*, *A. ehrenbergiana*, *A. senegal*. Certaines Graminées du Sahel septentrional peuvent descendre vers le Sud (*Cenchrus biflorus* - cram-cram -, *Aristida stipoides*, *Tragus racemosus*).

1.1.2. STEPPES ARBUSTIVES OU BOISÉES À ÉPINEUX DU SAHEL MÉRIDIONAL (UNITÉ CARTOGRAPHIQUE 43 SELON WHITE)

Ces formations occupent la partie moins aride de la bande sahélienne (250-500 mm). Les ligneux ont une taille variant entre 3 et 8 m. Leur densité varie en fonction de la pression anthropique. L'*Acacia senegal* est prédominant dans cette

région. La large distribution dans les zones sèches de *Faidherbia albida* est une conséquence de son statut de plante-compagne. *Ziziphus mauritiana* forment des peuplements anthro-po-zoogènes près des campements (Fortin *et al.*, 2000). Du Sénégal au Soudan, les brousses tigrées ou tachetées sont fréquentes dans le Sahel méridional, Ce sont des arcs ou des bandes de végétation disposés parallèlement aux courbes de niveaux, sur les terrains à faible déclivité.

La diversité ligneuse est constituée d'espèces déjà citées pour le Sahel septentrional – *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *A. laeta*, *Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Maerua crassifolia*, *Leptadenia pyrotechnica* – mêlées à des taxa à affinités sahélo-soudaniennes (*Combretum spp.*). Les herbacées prédominantes sont *Cenchrus biflorus* (cram-cram), *Aristida stipoides*, *Schoenefeldia gracilis*, *Tragus racemosus*. *Andropogon gyanus* est caractéristique des sols sableux profonds.

1.1.3. FORMATIONS SUR SUBSTRAT PARTICULIER (UNITÉS CARTOGRAPHIQUES SELON WHITE : 43 ET 19B)

Brousses tigrées ou *tachetées* : sur les pentes à faibles inclinaisons (voir chap. 1.1.2.)

Fourrés rupicoles : sur les affleurements rocheux et le piémont des inselbergs, on trouve des fourrés à *Commiphora africana*, *Acacia mellifera*, *Boscia senegalensis* et *Euphorbia candelabrum*.

Forêts basses broussailleuses sahélo-montagnardes : certaines pentes rocheuses d'altitude hébergent des forêts basses broussailleuses dominées par un olivier, *Olea laperrinei*, accompagné de *Boscia angustifolia*, *Maytenus senegalensis*, *Ficus spp.*, *Euphorbia candelabrum*. Une *savanne faiblement arbustive* à grandes andropogonées est la forme secondarisée de ce genre de végétation exploitée depuis très longtemps.

Végétations des rives et des mares : il s'agit de formations considérées comme extrazonales, c'est-à-dire à cheval sur les ceintures sahéliennes et soudaniennes (voir chap. 1.2). Elles seront décrites plus en détail dans les chapitres concernant les pays respectifs :

- Végétations herbacées aquatiques composées d'hydrophytes,
- Prairies aquatiques à *Vetiveria nigriflora* et *Echinochloa stagnina*,
- Prairies marécageuses à *Typha* et *Phragmites*,
- Steppes à Palmiers doums (*Hyphaene thebaica*), poussant sur sols exondés,
- Savanes boisées avec *Bombax costatum*, *Parkia biglobosa*, *Prosopis africana*,
- Forêts-galeries et fourrés-galeries à *Acacia nilotica* et *Mitragyna inermis*.

Une particularité des bassins du Tchad et du Haut-Nil, aussi bien en zone sahélienne que soudanienne, sont les argiles noires à fissures de dessiccation. Ces sols périodiquement inondés portent une mosaïque de végétation constituée de savanes ou de steppes plus ou moins boisées – en fonction de la qualité du drainage – et de formations herbacées hydromorphes.

1.2. Ceinture soudanienne : Centre régional d'endémisme soudanien (selon White)

La région soudanienne s'étend de la côte sénégalaise jusqu'au piémont éthiopien. Son homologue au Sud de la zone des forêts humides guinéo-congolaises est la région zambésienne. L'altitude de la ceinture soudanienne ne dépasse généralement pas les 750 m. Seuls dépassent certains plateaux au Nord-Cameroun (le Mandara p. ex. à plus de 1 000 m), le Jebel Marra (3 057 m) – chaîne volcanique qui marque le partage des eaux entre le Tchad et le Nil –, et certains massifs cristallins à l'extrême Sud-Est du Soudan (l'Imatong p. ex. à 3 187 m).

Cette ceinture est constituée par une végétation décidue s'épanouissant sous un climat tropical à une seule saison sèche bien marquée (4 à 7 mois) et à pluviosité regroupée sur les jours longs. On constate une élévation de la pluviosité annuelle du Nord au Sud (de 400 à 1300mm, et même jusqu'à 1 800 mm en situation de piémont). En plus de l'altitude et de la pluviométrie, d'autres facteurs influencent la végétation : l'homme, les feux de brousse, la dispersion des poussières terrigènes et des cendres, l'harmattan (Monnier, 1981). Même s'il est d'origine anthropique, le passage annuel des feux de brousse peut être considéré comme un facteur essentiel conditionnant les processus éco-physiologiques.

Les types de végétation caractérisant cette ceinture se développent généralement sur des sols ferrallithiques ou ferrugineux tropicaux selon la pédologie française (Duchaufour, 1970). Ce sont essentiellement des sols profonds, sablo-argileux, acides, pauvres en bases échangeables. Le lessivage et les températures élevées sont à l'origine de concrétions de fer ou d'alumine plus ou moins profondes. Des formations édaphiques particulières (savanes arbustives et herbacées, steppes, fourrés, végétations marécageuses) sont liées à des substrats particuliers tels que les cuirasses et les lithosols, les sols hydromorphes ou salés, etc. Ajoutons à cette énumération les formations azonales sur argiles noires à fissures de dessiccation caractérisant les bassins du Tchad et du Haut-Nil (voir chap. 1.1.3.).

Certaines espèces soudanaises xérophiles, par exemple les Combrétacées, pénètrent au Sahel. D'autres espèces hygrophiles se trouveront au contraire dans les forêts galerie, ou même les forêts denses humides semi-décidues mélangées à des espèces guinéo-congolaises (Adjanohoun, 1964, Guillaumet & Adjanohoun, 1971).

1.2.1. FORÊTS DENSES SÈCHES

Les forêts denses sèches sont des peuplements ligneux élevés, fermés, caducifoliés ou partiellement sempervirents. Selon certains auteurs, elles constitueraient la formation climacique originelle du domaine soudanien. Ces formations se font rares et se réfugient dans des sites protégés des feux, de l'agriculture ou du pastoralisme. Dans l'ouest de la ceinture soudanienne, prédominent *Anogeissus leiocarpa*, *Diospyros mespiliformis*, *Gilletiodendron glandulosum* et *Guigourtia copallifera*. Les forêts claires et les forêts denses sèches partagent de nombreuses espèces mais *Gilletiodendron glandulosum* semble être une espèce strictement liée aux forêts denses.

1.2.2. LES FORÊTS CLAIRES, SAVANES BOISÉES ET ARBORÉES (UNITÉ DE VÉGÉTATION 29A SELON WHITE)

La formation zonale la mieux représentée dans la ceinture soudanienne est la *forêt claire*. En réalité, la forêt claire ne répond pas à la définition des « forêts » selon la classification mondiale des types de végétation (UNESCO, 1973), mais appartient à la catégorie des « savanes ». Contrairement à une forêt dense, il y a toujours présence d'une strate graminéenne puissante et pérenne. Le terme anglais de *Woodland*, regroupant savanes boisées et forêts claires, nous semble mieux décrire ce genre de végétation.

Les auteurs mettent en évidence deux types de forêts claires : les forêts claires à *Isoberlinia doka*, plus méridionales donc plus humides, et les forêts claires indifférenciées. Le type à *Isoberlinia doka* s'étend jusqu'à la vallée du Nil, à partir de laquelle *I. doka* se raréfie. *Isoberlinia doka* est accompagné de *Daniellia oliveri*, *Burkea africana* et *Erythrophleum africanum*. La forêt claire à *I. doka* est considérée comme une variante appauvrie de la forêt claire à Miombo de la région zambézienne, mais sans les deux genres caractéristiques du Miombo, *Brachystegia* et *Julbernardia*. A l'Est du Haut-Nil, et jusqu'en Ethiopie, s'étendent les forêts claires indifférenciées. Un faciès plus sec que les forêts à *I. doka* et plus humide que les forêts indifférenciées se développe sur les collines rocheuses ou sur les plateaux sablonneux. Il s'agit de forêts basses à *Isoberlinia doka*, *I. angolensis*, *Azzeria africana*, *Anogeissus leiocarpa*, et des Combretacées et des *Acacia*.

Près des villes et villages, la forêt claire est surexploitée. *Isoberlinia doka* et les autres espèces de forêts claires sont d'abord remplacées par des ligneux tels que *Terminalia avicennioides*, *T. laxiflora* et *Vitellaria paradoxa*. La sélection de certaines espèces arborées crée des paysages de savanes-vergers ou de savanes-parcs (savane à karité, à néré). A proximité des agglomérations, la végétation est réduite à des jachères à rejets de souche (*Combretum spp.*), ou à des savanes herbacées. *Guiera senegalensis* a une grande potentialité d'invasion des friches.

Avec l'augmentation de l'aridité, on constate la transformation progressive des forêts claires et des savanes boisées en savanes arbustives. Cela s'accompagne d'un appauvrissement floristique de la strate ligneuse. Les Combretacées (*Terminalia spp.* et *Combretum spp.*) deviennent prépondérantes. Des épineux sahéliens s'implantent en savane.

1.2.3. FORMATIONS ÉDAPHIQUES À L'INTÉRIEUR DES CEINTURES SOUDANIENNES (UNITÉS CARTOGRAPHIQUES SELON WHITE : 19B, 33, 63, 64)

Les cuirasses ferrugineuses

Les affleurements cuirassés – les « bowés » (sing. « bowal ») d'Afrique occidentale – sont occupés par des savanes herbacées (p. ex à *Loudetia simplex*, *Ctenium newtonii*) ou par une végétation marécageuse à *Rhytachne rottboellioides*, *Lycopodium spp.*, *Xyris spp.*, *Utricularia spp.* et *Drosera spp.*. Dans les dépressions marécageuses situées sur les sommets d'inselbergs du plateau centrafricain (« dembos ») une végétation marécageuse semblable à celle des bowés peut se développer.

Formations rupicoles

Les fourrés rupicoles colonisant les affleurements rocheux ou encerclant les inselbergs peuvent être rattachés aux forêts denses sèches. Ils sont constitués d'espèces à large distribution qu'on retrouve jusqu'en zone guinéenne : *Zanthoxylum xanthoxyloides*, *Erythroxylum emarginatum*, *Bombax costatum*, *Spondias mombin*, *Combretum spp.*, etc. Sur les inselbergs du plateau de Jos au Nigeria on a décrit des fourrés à *Euphorbia desmondii*, *E. kamerunica*, *E. poissonii* (accompagnées de *Carissa edulis*, *Dodonea viscosa*, *Diospyros abyssinica*, *D. ferrea*, etc).

Formations liées aux cours d'eau

Lorsque le substrat est bien drainé, les forêts ou fourrés-galeries de la zone soudanienne ont une physionomie et une flore de forêt dense sèche (voir chap. 1.3.2.). La forêt riveraine typique est souvent dominée par *Syzygium guineense* accompagné de *Khaya senegalensis*, *Terminalia schimperiana*, *Vitex doniana*, *Diospyros mespiliformis*, *Acacia sieberiana*, *Tamarindus indica* et *Ficus glumosa*.

En bordure des plaines d'inondation herbacées (« Fadamas » au Nigéria) des forêts claires colonisent les bourrelets de rives épargnés par les crues. La composition floristique est essentiellement soudanienne avec quelques éléments sahéliens (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia sieberiana*).

Sur les sols hydromorphes, mal drainés ou périodiquement inondés, la végétation est disposée en fonction du substrat : savanes herbacées à *Hyperthelia dissoluta* et *Brachiaria jubata*, prairies aquatiques – *bourgoutières* au Niger, *herbiers* au Tchad –, savanes boisées à *Terminalia schimperiana*, *T. macroptera*, *Borassus aethiopum*, *Myragyna inermis*. Une particularité des bassins du Tchad et du Haut-Nil sont les mosaïques de savanes boisées plus ou moins drainées et de savanes herbacées hydromorphes sur les argiles noires à fissures de dessiccation. (voir chap. 1.1.3.)

1.3. Centre régional d'endémisme morcelé afromontagnard (selon White : unités cartographiques 19a, 38)

La bande de végétations sèches passe sur les contreforts de la pointe nord du Centre régional d'endémisme morcelé afromontagnard selon White. Dans l'ouest de l'Éthiopie on rencontre en basse altitude des forêts claires indifférenciées à *Anogeissus leiocarpa*, *Combretum aculeatum*, *Boswellia papyrifera* ainsi que des fourrés de bambous *Oxytenanthera abyssinica*. Pour les escarpements éthiopiens occidentaux Demissew *et al.* (2005) donne une diversité de 950 espèces dont au moins 27 endémiques.

Friis (1992) propose les types de forêts suivants pour la zone montagneuse de la Corne de l'Afrique :

- les forêts périphériques planitiales semi-décidues guinéo-congolaises ;
- la forêt ombrophile de transition entre 500 et 1 500 m, avec une pluviométrie d'env 2 000 mm ;
- la forêt ombrophile afromontagnarde avec un mélange de latifoliées et de *Podocarpus* (1500-2 500 m) ;

- la forêt afromontagnarde indifférenciée, ou forêt à *Podocarpus-Juniperus* ;
- la forêt afromontagnarde sèche à prédominance de *Juniperus procera* et *Olea europaea* ssp. *cuspidata* (au Nord des hauts plateaux éthiopiens) ;
- transition entre la forêt sèche à *Juniperus* et *Olea* et les fourrés ombrophiles et semi-décidus des escarpements orientaux éthiopiens et somaliens ;
- les forêts riveraines et galeries, de souche guinéo-soudanienne, soudanienne et même sahélo-soudanienne ;
- transition entre la forêt indifférenciée et les fourrés ombrophiles de Zanzibar-Inhambane, au sud-somalien.

De grandes surfaces afromontagnarde sont secondarisées et colonisées par des Graminées à large amplitude qui forment des savanes herbacées d'altitude semblables aux formations équivalentes de plaine : *Loudetia simplex*, *Monocymbium ceresiforme*, *Themeda triandra*, *Elyonurus argenteus*, *Andropogon* spp., *Brachiaria* spp., *Hyparrhenia* spp. etc

Sur les contreforts orientaux bordant la Somalie, subsistent des lambeaux de forêts afromontagnardes xéromorphes, ainsi que des fruticées à *Juniperus procera*, *Commiphora* et *Acacia*.

1.4. Centre régional d'endémisme de la Somalie et du pays Massaï (selon White)

(Nous ne traitons pas le Kenya (pays Massaï), mais seulement la végétation xérophile planitiaire de la Somalie et de l'Ogaden)

Après avoir contourné la pointe nord du centre d'endémisme afromontagnard (voir chap. 1.3.), la végétation sèche suit les côtes de la Mer Rouge et de l'Océan Indien (Djibouti, Somalie). La végétation xérophile de la Corne d'Afrique (Somalie-Ogaden) appartient au *sous-domaine somali du domaine somalo-éthiopien* selon Monod (1957), ou au *domaine sahélien oriental de la région soudano-zambésienne* selon Lebrun (2001) et White (1986).

Cette région se distingue des aires centrales et occidentales de la ceinture sahélienne par un taux d'endémisme extrêmement élevé, l'abondance des formes succulentes et des adaptations épigées et hypogées à l'aridité (qui les rapprochent physionomiquement de certains matorales ou campos cerrados d'Amérique du Sud) et par une végétation en fourrés denses et en maquis, semblable à ce qu'on trouve dans les zones sèches de Madagascar.

En exploitant par des méthodes numériques les données fournies par les 4 247 taxons compilés dans les 3 ouvrages fondamentaux sur la diversité floristique de la Corne de l'Afrique (Audru *et al.*, 1994, Lebrun, 1977, 1979), Friis & al. (1992, 2005) fournissent un taux d'endémicité de 29 % pour la Somalie, 17 % pour l'Éthiopie, 7 % pour Erythrée et 3 % à Djibouti. Le taux d'endémisme élevé de la Somalie est expliqué par l'« effet-péninsule » créé par le profond découpage de la côte.

**1.4.1. STEPPES SEMI-DÉSERTIQUES HERBACÉES OU ARBUSTIVES À ÉPINEUX
DES CÔTES ÉTHIOPIENNES ET SOMALIENNES ET DE L'OGADEN
(UNITÉ CARTOGRAPHIQUE 54B SELON WHITE)**

Les conditions climatiques y sont particulièrement arides (100 à 200 mm de pluies annuelles). Les sols sableux profonds hébergent des steppes herbacées à *Eragrostis hararensis*, *Panicum turgidum*. Les sols pierreux sont colonisés par des steppes sous-arbustives (ou arbustives naines) ou des steppes à succulentes composées des genres *Aloe* (*A. breviscapa*, *A. scobinifolia*, *A. rigens*), *Euphorbia* (*E. cuneata*, *E. multiclava*), *Ipomoea* (*I. sultanii*), *Jatropha* spp., *Lycium europaeum*, *Zygophyllum hildebrandtii*. Les gypses portent des endémiques succulentes (*Euphorbia columnaris*, *E. sepulta*, *E. mosaica*, *Dorstenia gypsophila*, *Pelargonium cristophoranum*).

Des steppes herbacées à *Chrysopogon plumulosus* sont incluses dans des forêts claires broussailleuses à *Acacia bussei*, ou dans des fourrés épineux à *Acacia-Commiphora*. On observe un embroussaillage des steppes herbacées à *Chrysopogon plumulosus* dans les zones à forte pression d'élevage.

1.4.2. FOURRÉS ET MAQUIS (UNITÉ CARTOGRAPHIQUE 42 SELON WHITE)

Il s'agit soit d'un fourré épineux dont la canopée varie entre 3 et 5 m avec de petits arbres émergents, soit d'une steppe buissonnante dense (maquis). Les genres dominant sont *Acacia* et *Commiphora*. Dans les zones plus humides, des émergents peuvent dépasser 10 m. Les Graminées sont clairsemées et généralement annuelles. Les Baobabs ne dépassent que rarement 10 m de haut dans cette région. Lorsque les fourrés et maquis sont surexploités, ils se transforment en semi-déserts qui peuvent semble-t-il se régénérer grâce aux *Commiphora* en cas de fortes pluies.

La biodiversité est soit semblable, soit vicariante de celle des formations sahéliennes occidentales : *Bridelia taitensis*, *Caesalpinia trothae*, *Combretum aculeatum*, *Grewia arborea*, *Grewia tembensis*, *Grewia tenax*, *Maerua denhardtiorum*, etc. Les plantes succulentes sont présentes partout : *Euphorbia robecchii*, *E. nyikae*, *E. quinquecostata*, *E. grandicornis*, *E. globosa*, *Adenium obesum*, *Calyptrorhiza somalensis*, *C. taitense*, *Cissus quadrangularis*, *S. viminalis*, *Sansevieria* spp., *Aloe* spp. Notons enfin des organes souterrains spectaculaires tels que les énormes tubercules d'*Adenium obesum* et *Pyrenacantha malvifolia*.

2. Végétations sahélienne et soudanienne par pays, y-compris les inclusions extrazonales ou azonales

2.1. Sénégal

La monographie de Laweson (1995) propose une revue bibliographique ainsi qu'une histoire des études botaniques sur le pays. Rappelons aussi les références

fondamentales que sont la « Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal » (Trochain, 1940), et d'autres ouvrages plus récents de cet auteur. Les domaines et secteurs que Trochain propose servent encore de cadre aux classifications et aux descriptions actuelles.

Les unités de végétation sèches appartiennent à la ceinture soudanienne (partie Sud du pays) et à la ceinture sahélienne (Nord) ; c'est-à-dire la majorité de la végétation sénégalaise sauf les unités de végétation humides de la zone de transition régionale guinéo-congolaise/ soudanienne. Laweson décrit plus de 40 unités de végétation ; nous proposons ci-après une énumération simplifiée intégrant par souci didactique certaines catégories de Frederiksen et Laweson (1993) et de Roberty (1940).

2.1.1. FORMATIONS DU SAHEL FLUVIAL (RÉGION DU FLEUVE SÉNÉGAL)

Au Nord du pays, dans la région du fleuve Sénégal, on trouve une végétation de transition entre le Sahara et le Sahel constituée d'une steppe clairsemée influencée par de fortes contraintes écologiques : aridité, froid, salinités et crues du fleuve. Les terres cultivées dans les zones inondables du fleuve Sénégal sont nommées « Walo ». La végétation naturelle entre dans les catégories suivantes :

– Steppes semi-désertiques herbacées à *Sporobolus* : dans la partie nord du Sénégal, on trouve des formations désertiques soumises aux crues du fleuve Sénégal. La très haute salinité édaphique de certains sols inondables argileux ou limono-argileux ne permet le développement que de rares graminées halophiles (*Sporobolus spicatus*, *S. robustus*).

– Steppes semi-désertiques buissonnantes et arbustives épineuses à *Salvadora persica* et *Hyphaene thebaica* : lorsque le degré de salinité diminue, une steppe arbustive se maintient sur les buttes protégées des inondations (avec *Bauhinia rufescens*, *Hyphaene thebaica*, *Acacia nilotica*, *Tamarix senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Parkinsonia aculeata*).

– Steppes semi-désertiques à succulentes : sur les sols limono-sableux du bas-Sénégal se développe une steppe à succulentes bien particulière caractérisée par une euphorbe-candélabre (*Euphorbia balsamifera*) accompagnée de *Commiphora africana* et *Sclerocarya birrea*. Ce type de formation se trouve aussi sur des sols rocailleux.

– Forêts-galeries épineuses à *Acacia nilotica*, *A. tortilis* et *Faidherbia albida* : la strate ligneuse supérieure (10-12 m) est dominée par les Acacias alors que le sous-bois est constitué d'un peuplement dense d'arbustes sahélo-soudaniens (*Maytenus senegalensis*, *Maerua crassifolia*, *Mitragyna inermis*, *Crateva adansonii*, *Tamarindus indica*, *Bauhinia rufescens*). Après la crue, une strate graminéenne se développe en sous-bois.

– Prairies aquatiques à *Vetiveria nigritana* et *Echinochloa stagnina*. Ces prairies sont aussi présentes le long des lits majeurs des grands cours d'eau au Mali (chap. 2.3.2., 2.3.5.) et au Niger (chap. 2.4.4)

2.1.2. STEPPES DU SAHEL SEMI-DÉSERTIQUE NON FLUVIAL (FERLO SABLEUX, CÔTE)

Un peu éloignée du fleuve Sénégal, sur les sols sableux du Ferlo septentrional, une végétation semi-désertique sur sols arides drainés fait suite à celle des zones influencées par le fleuve. Le sable est apparent entre les touffes de graminées et les buissons.

– Steppes semi-désertiques buissonnantes à *Boscia senegalensis*-*Calotropis procera*-*Balanites aegyptiaca* : la strate ligneuse y est inférieure à 2 m, et les herbacées sont basses et éparées. La végétation est distribuée par taches. Le sol est sableux, dunaire. Quelques arbustes plus élevés peuvent se développer dans les dépressions (*Sclerocarya birrea*). *Boscia senegalensis* est très commun sur les sols sableux de la presqu'île du Cap Vert (Fortin *et al.*, 2000). Une forme de dégradation de ce type de végétation est la steppe semi-désertique herbacée. Sur la côte il existe une telle végétation dominée par *Calotropis procera* et *Adansonia digitata*. Dans les zones littorales le Baobab aurait été propagé par l'homme (Fortin *et al.*, 2000) ; on observe de très beaux peuplements dans les environs de Thiès.

– Steppes semi-désertiques herbacées à *Panicum turgidum* : Roberty (1940) décrit ce genre de formation aride poussant sur les buttes sableuses. Certains auteurs rattachent ce type de végétation au domaine sud-saharien (Poilcot, 1999).

2.1.3. STEPPES SAHÉLIENNES (CENTRE-NORD)

Sous un climat qualifié de sahélien-continentale, dans la partie méridionale du Ferlo, on trouve les formations sahéliennes proprement-dit. Le substrat est généralement sableux. Trochain (1940) considère la steppe arbustive épineuse à *Acacia tortilis* (avec *A. senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*, *Capparis decidua*, *Leptadenia pyrotechnica*) comme la végétation zonale sur sols sableux du Sahel septentrional sénégalais. Laweson (1995) affine la classification de la manière suivante :

– Steppes buissonnantes et arbustives épineuses à *Balanites aegyptiaca*-*Acacia tortilis* : la strate ligneuse atteint 3-4 m avec un recouvrement inférieur à 10 %. Dans les stations les plus arides on peut y trouver des formations à *Calotropis procera* semblables à celles du Sahel subdésertique (chap. 2.1.2.) alors que dans des conditions moins contraignantes – failles, dépressions, etc. – des espèces soudaniennes (*Anogeissus leiocarpa*) peuvent s'y implanter.

– Steppes boisées épineuses à *Acacia tortilis* : le peuplement ligneux y est dense et plus élevé que dans la formation précédente (*Faidherbia albida*, *A. nilotica*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca*). La prédominance de *Acacia tortilis* est manifeste. Ce genre de formation est sensible au pâturage, aux feux, et à toute exploitation ; en cas de surpâturage et dans les jachères, *Balanites aegyptiaca* devient prédominante. Les steppes boisées épineuses à *Acacia tortilis* ne subsistent que dans des sites protégés et le long de la côte atlantique.

– Fourrés steppiques épineux à *Acacia senegal* et *Balanites aegyptiaca* : cette formation très dense (variant autour de 4 m avec quelques rares émergents de plus de 7 m) peut être qualifiée de maquis ou matorral (UNESCO, 1973). A côté des

espèces précédemment nommées, on relève *Acacia nilotica*, *Ziziphus mauritiana*, *Combretum aculeatum*, *Grewia bicolor*. Les facies les plus secs sont caractérisés par *Acacia senegal*, *A. seyal*, *Balanites aegyptiaca*. Les facies plus humides hébergent de nombreuses espèces soudaniennes qui atteignent ainsi la limite septentrionale de leurs distributions : *Anogeissus leiocarpa*, *Celtis toka*, *Sterculia setigera*, *Borassus aethiopicum*, *Stereospermum kunthianum* et *Piliostigma thonningii*.

– Steppes herbacées halophytiques : ces formations azonales, liées à de fortes concentrations de sel se retrouvent dans différentes régions du Sahel sénégalais. Les rares ligneux qui résistent à ces conditions sont *Phoenix reclinata* et *Tamarindus indica* surmontant une strate clairsemée d'halophytes : *Salsola imbricata*, *Sesuvium portulacastrum* et *Vetiveria nigriflora* près des cours d'eau.

2.1.4. STEPPES SAHÉLO-SOUDANIENNES DE TRANSITION (CENTRE)

Il s'agit d'une zone de transition entre les phytochories sahélienne et soudanienne. Les sols sont ferralitiques ou ferrugineux, riches en latérites meubles ou indurées, parfois hydromorphes en profondeur. La région est caractérisée par la présence de nombreuses Combretacées : *Guiera senegalensis* et des *Combretum*. Les sols y sont généralement rocheux ou indurés. *Combretum glutinosum* et *C. micranthum* sont caractéristiques des terres argileuses et latéritiques et peuvent descendre jusqu'en zone soudano-guinéenne. Fortin *et al.* (2000) constatent que la végétation secondaire sur les terrains sablonneux défrichés est caractérisée par des peuplements étendus de *Guiera senegalensis*.

– Steppes buissonnantes sahélo-soudaniennes à *Boscia senegalensis*-*Commiphora africana* : formations éparées liées aux sols indurés ou imperméables. *Boscia senegalensis* est très commun sur les sols compacts et rocailleux (Fortin *et al.*, 2000). Les fameuses *brousses tigrées* appartiennent à ce groupement : il s'agit d'arcs ou de bandes de végétation se développant parallèlement aux courbes de niveaux.

– Steppes boisées sahélo-soudaniennes épineuses à *Acacia macrostachya*. Ces formations étaient semble-t-il beaucoup plus étendues il y a une cinquantaine d'années. Les espèces sahéliennes (*Boscia senegalensis*, *Guiera senegalensis*, *Acacia senegal*, etc) y côtoient de nombreuses espèces soudaniennes (*Anogeissus leiocarpa*, *Celtis toka*, *Bombax costatum*, *Terminalia avicennioides*, *Pterocarpus erinaceus*, *Cordia senegalensis*, *Piliostigma thonningii*, *Sterculia setigera*, etc.). Lawson propose différents types en fonction des prédominants : type à *Acacia macrostachya*, à *Grewia bicolor*/*Guiera senegalensis*, à *Pterocarpus lucens*, à *Acacia seyal*/*A. polyantha*. *Boscia senegalensis* occupe préférentiellement les termitières dégradées (Fortin *et al.*, 2000).

2.1.5. FORÊTS CLAIRES, SAVANES ET FOURRÉS SOUDANIENS (CENTRE, CASAMANCE, SUD-EST ET CÔTE)

Cette flore soudanienne constitue des savanes ouvertes – herbacées, sous-arbustives ou arbustives – ou des peuplements plus fermés telles que les savanes arborées, les savanes boisées ou les forêts claires (voir Chap. 1.2.).

- Savanes arbustives, sous-arbustives ou herbacées côtières : relevons l'abondance des Palmiers (*Borassus aethiopum*, *Eleaëis gineensis*) et des Combretacées (*Combretum spp.*). La formation steppique à *Calotropis procera* descend très bas vers le Sud le long de la côte (voir 2.1.2.).
- Forêts claires côtières : elles sont généralement dominées par *Adansonia digitata* qui cohabite selon la région avec *Elaëis guineensis*, *Borassus aethiopum*, *Phoenix reclinata*. Dans certaines régions le Baobab constitue des populations monospécifiques spectaculaires. *Combretum micranthum* constitue des peuplements denses sur les cuirasses latéritiques de Casamance maritime (Fortin *et al.*, 2000).
- Savanes boisées et forêts claires (Centre, Sud-Est, Casamance) : elles sont typiques du domaine soudanais, mais peuvent héberger en sous-bois des espèces guinéo-congolaises. La densité des ligneux diminue du Sud-Est au centre du pays. Les stations les plus sèches de la zone collinéenne du Sud-Est (Niokolo Koba) hébergent une savane boisée à *Acacia dudgeonii*. En Casamance, Miège *et al.* (1976) décrivent plusieurs types de forêts claires. Les bords sableux des rizières de Casamance portent de vastes peuplements de *Faidherbia albida* (Adjanooun *et al.*, 1980).

2.1.6. FORÊTS DENSES ET FOURRÉS SOUDANO-GUINIÉENS (SUD-OUEST, CASAMANCE)

Il y a dans ces forêts un mélange d'espèces soudaniennes humides et guinéo-congolaises irradiant depuis le Sud et le Sud-Est. La Casamance est un réservoir important pour la dispersion de ces espèces dans toutes les stations humides.

- Fourrés hygrophiles soudano-guinéens : les dépressions, marais, mares permanentes ou temporaires, rivières et autres marigots sont généralement encerclés par des fourrés très denses. De nombreuses espèces soudaniennes méridionales s'y installent grâce au régime hydrique favorable des sols. Les fourrés à *Raphia* et à *Pandanus* colonisent les sols engorgés.
- Forêts-galeries et forêts riveraines soudano-guinéennes : elles diffèrent des fourrés par une taille supérieure. Elles sont constituées d'espèces hygrophiles provenant des régions soudaniennes et guinéo-congolaises. Le faciès à *Diospyros mespiliformis*, accompagné de *Ceiba pentandra*, *Anogeissus leiocarpa* et *Spondias mombin* se développe sur les sols humides et bien drainés. Il est caractérisé par de très grands émergents (*Ceiba pentandra*).
- Forêts denses sèches soudaniennes : la canopée atteint une vingtaine de mètres, constituée de *Afzelia africana*, *Pterocarpus erinaceus*, *Parkia biglobosa*, *Daniellia oliveri*, *Bombax costatum*, *Prosopis africana*, *Spondias mombin*, *Lannea acida*, *Diospyros mespiliformis*, etc. La forêt de Bandia, près de Thiès (Schnell, 1977) est une forêt dense sèche constituée d'un mélange d'espèces de forêts claires (*Parkia biglobosa*, *Adansonia digitata*, *Anogeissus leiocarpa*) et de forêts fermées à affinités soudaniennes ou guinéo-congolaises (*Khaya senegalensis*, *Morus mesozygia*, *Albizia zygia*, *Antiaris toxicaria*, *Ceiba pentandra*).
- Forêts denses humides semi-décidues soudano-guinéenne à *Erythrophleum suaveolens* et *Dialium guineense* : c'est une prolongation jusqu'en Casamance de la phytochorie guinéo-congolaise.

2.2. Mauritanie

Depuis le littoral jusqu'à l'intérieur des terres, le secteur mauritanien du Sahara, comme d'ailleurs une grande partie du Sahara tropical, est occupé par une végétation particulière appelée par Quezel (1965) – auteur de référence pour le Sahara – *Savane désertique à Acacia-Panicum*. Cette formation colonise les substrats rocailloux. L'élément prédominant est *Acacia Seyal*. S'y ajoutent *A. tortilis*, *Maerua crassifolia*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *Z. lotus*, *Capparis decidua*. Quezel propose différentes associations, celle à *Cassia italica* (= *Cassia aschrek*) et *Panicum turgidum* étant la mieux représentée de la Mauritanie au Tchad.

La partie non saharienne de Mauritanie est colonisée par des steppes semi-désertiques, extension septentrionale de celles décrites pour le Sénégal. Schnell (1974) énumère :

- des steppes herbacées semi-désertiques à *Panicum turgidum* parsemées d'*Acacia ehrenbergiana*, *Ziziphus mauritiana*, *Boscia senegalensis* et *Maerua crassifolia* ;
- des prairies éphémères à *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida spp.*, avec *Acacia tortilis*, *A. senegal*, et le cortège d'arbustes sahéliens ;
- des steppes suffrutescentes halophytiques à Chenopodiacées ;
- la vallée du Sénégal avec *Acacia nilotica* et des prairies aquatiques à *Oryza barthii* ;
- des formations littorales et marécageuses.

Quézel (1965) décrit des steppes à succulentes qu'on peut rapprocher des steppes semi-désertiques à *Euphorbia balsamifera* du Sénégal. Il s'agit de steppes pauvrement ligneuses caractérisées par la prédominance d'une Euphorbe-candélabre (*Euphorbia balsamifera*) accompagnée d'une strate sous-arbustive à *Salvadora persica*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia tortilis*. La strate herbacée est dominée par *Panicum turgidum*, *Aristida spp.*, avec de nombreuses Dicotylédones annuelles, parfois halophytiques (*Salsola*).

Lebrun (1998) énumère la diversité végétale de la Mauritanie et du Sahara Occidental, fournissant de précieuses indications sur l'histoire des explorations botaniques, la distribution et l'écologie des espèces. Cet auteur relève la fréquence dans le Sahel mauritanien de *Boscia senegalensis*, *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*.

Audry et Rossetti (1962) décrivent des brousses-tigrées dans la région d'Aouker (entre le 16° et le 17° parallèle). L'aspect de la végétation est dû aux ondulations du terrain. Les parties basses sont dépourvues de végétation alors que les parties plus élevées et les ruptures de pente sont colonisées soit par des prairies éphémères d'herbacées prostrées (*Aristida funiculata*, *Cenchrus biflorus*, *Chloris pilosa*), soit par des fourrés à *Commiphora africana*, *Prerocarpus lucens* et *Andropogon gayanus*. Près des la région à brousses-tigrées, les affleurements gréseux hébergent un fourré à *Grewia bicolor* et *Combretum glutinosum*. Ces auteurs décrivent aussi des prairies éphémères et des steppes herbacées, buissonnantes et arbustives à épineux. *Commiphora africana* y est l'arbuste le plus fréquent, suivi par *Acacia tortilis*, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum*.

2.3. Mali (et nord du Burkina Faso)

Le domaine sahélien occupe la partie nord et centre du Mali et l'extrême-nord du Burkina. La partie méridionale du Mali, le centre et le Sud du Burkina appartiennent au domaine soudanais. En ce qui concerne la végétation du Burkina Faso, Guinko (1984) est considéré comme la référence en la matière. Des travaux ont été récemment menés par cet auteur en zone soudanienne (Wittig & Guinko, 1998 a, 1998b). Dans ce traitement, on extrapolera au Burkina les données sur le Mali.

En suivant plus ou moins la classification de Roberty (1940) et de Quezel (1965) on divise le territoire malien, du Nord au Sud en :

2.3.1. STEPPES DU SAHEL SEMI-DÉSERTIQUE SEPTENTRIONAL :

- Steppe semi-désertique épineuse à *Acacia seyal*. Ce type de végétation correspond à ce que Quezel (1965) nomme savane désertique à *Acacia-Panicum* (voir 2.2.). Roberty parle de forêt-steppe à tamats (*tamat* : nom touareg pour l'*Acacia seyal*) ou, en langage phyto-sociologique : *Acacietum seyalis*.
- Steppe désertique herbeuse à *Panicum turgidum* qui correspond à nos steppes semi-désertiques herbacées à *Panicum turgidum* (chap. 2.1.2.). Roberty nomme ce genre de formation aride steppes à markoubas (*Panicum turgidum*).
- Steppe désertique rupicole à *Euphorbia balsamifera* que nous avons citée sous steppes semi-désertiques à succulentes (chap. 2.1.1.).

2.3.2. SECTEUR SAHÉLIEN-FLUVIAL ENTRE MOPTI ET TOMBOUCTOU (VOIR AUSSI 2.3.5.) :

- Steppes semi-désertiques arbustives épineuses à *Hyphaene thebaica*, *Salvadora persica* et *Acacia tortilis* (chap. 2.1.1.). Poussant sur sols exondés, physionomiquement caractérisées par *Hyphaene thebaica*, on les nomme aussi steppes à Palmiers doums. Quezel constate que cette association peut atteindre des stations fort septentrionales en profitant des conditions favorables offertes par certains massifs sahariens.
- Prairies inondées à *Vetiveria nigriflora* et à *Echinochloa stagnina* (les *Bourgoutières* du Niger selon Poilcot)

2.3.3. SECTEUR SAHÉLIEN SENSU STRICTO DONT LES TYPES DE VÉGÉTATION CORRESPONDENT PLUS OU MOINS À CEUX DÉCRITS POUR LE SÉNÉGAL (CHAP. 2.1.3.)

- Steppes sous-arbustives à *Commiphora africana* ou steppes à halliers de dracé (= *Commiphora africana*) selon Roberty, sur sols compacts ou rocailleux (correspondent aux steppes buissonnantes sahélo-soudanaises à *Boscia senegalensis-Commiphora africana* décrites au Sénégal ; voir chap. 2.1.4.)
- Steppes boisées épineuses à *Acacia nilotica* (= *A. arabica*) et *Balanites aegyptiaca* : steppe à gonakié (= *A. nilotica*) selon Roberty sur sols sableux profonds.
- Steppes arborées épineuses à *Acacia tortilis* : forêt-steppe à Talha (= *A. tortilis*) selon Roberty sur sols assez profonds et compacts. Cette formation recouvre plus ou

moins les unités suivantes décrites au Sénégal : steppes boisées épineuses à *Acacia tortilis* et steppes arbustive épineuses à *Balanites aegyptiaca-Acacia tortilis* (voir chap. 2.1.3.)

– Steppes herbacées halophytiques : formations azonales liées à de fortes concentration de sel.

2.3.4. SECTEUR SAHÉLO-SOUDANIEN

Zone de transition occupée par les steppes boisées à épineux (décrites aux chap. 2.1.4), caractérisées par une forte pénétration d'éléments soudanais.

2.3.5. SECTEUR SOUDANIEN DELTAIQUE (SEGOU-BAMAKO)

Ces formations extrazonales peuvent remonter jusqu'en zone sahélienne (voir 2.3.2.). En fonction du recouvrement ligneux, on distingue :

– Des prairies inondées à *Vetiveria nigritana* et *Oryza barthii* correspondant à ce qu'on trouve en région sahélienne, mais enrichies d'espèces soudaniennes. Ce sont les prairies à Ba n'gassa (*Vetiveria*) de Roberty. Poilcot nomme ces formations *Bourgoutières* au Niger.

– Palmeraies à *Hyphaene thebaica* et *Borassus aethiopum* : facies plus humide, beaucoup plus riche en espèces soudaniennes que les formes arides à *Hyphaene thebaica* du secteur sahélien fluvial de la région Mopti-Tombouctou (chap. 2.3.2.).

– Fourrés hygrophiles et forêts galerie soudano-guinéens : les marais, rivières et autres marigots sont généralement encerclés par des fourrés très denses. Schnell (1974) décrit des forêts-galerie à *Myrtagyna inermis*, *Cynometra vogelii*, *Pterocarpus santalinoides*, *Piliostigma reticulatum*, *Salix mucronata*. (voir aussi chap. 2.1.6.).

2.3.6. SECTEUR DES FORÊTS CLAIRES ET SAVANES BOISÉES SOUDANIENNES.

Roberty propose la succession suivante :

– dans les secteurs les moins secs, groupements dominés par *Combretum adenogonium* (= *C. ghasalense*) (savane-brousse à Combretacées), *Parkia biglobosa* et *Vitellaria paradoxa* (savane à néré-karité), *Terminalia avicennioides* (savane-brousse à Karité-wolodié), *Bombax buonopozense* (savane à kapokier), *Detarium senegalense* (savane-brousse à Tambacoumba), *Terminalia macroptera* (savane à wolo-ba), *Mitragyna inermis* (savane-prairie à Dioun) ;

– puis, dans les zones plus arides : *Guiera senegalensis* (brousse à kounié), *Sclerocarya birrea* (savane-parc à m'gouna), *Vitellaria paradoxa* (savane-parc à karité), *Acacia seyal* (savane-parc à zadié), *Pterocarpus lucens* (savane-parc à gala djiri), *Acacia macrostachya* (savane-parc des collines à épineux).

2.3.7. FORÊTS DENSES SÈCHES ET FOURRÉS SOUDANIENS ET SOUDANO-GUINÉENS

On trouve sur les plateaux gréseux et latéritiques de l'Ouest du Mali (triangle Kita-Kayes-Kéniéba) une forêt dense sèche à prédominance de *Gilletiodendron glandulosum* et *Guibourtia copallifera*. Sur les escarpements rocheux un fourré de 5-6 m se substitue à la forêt dense sèche.

2.3.8. L'ADRAR DES IFORAS

L'Adrar des Iforas offre des conditions particulières (sols, pentes, encaissement des vallées, protection contre les conditions extrêmes, etc.) permettant à certaines espèces typiquement sahéliennes, et même soudaniennes, d'atteindre leur limite septentrionale : *Cadaba glandulosa*, *C. farinosa*, *Anogeissus leiocarpa*, *Cratogeomys adansonii*, *Combretum glutinosum*, *C. aculeatum*, *Boscia senegalensis*, *Bauhinia rufescens*, *Albizia chevalieri*, *Acacia senegal* (Sidiyene, 1996).

2.4. Niger

L'ouvrage de Poilcot (1999) *Les Poaceae du Niger* nous servira de source principale pour la description des types de végétation de ce pays. Rappelons l'énorme impact de l'élevage sur cette région, comme d'ailleurs sur l'ensemble du Sahel.

2.4.1. SECTEUR SUD-SAHARIEN

Poilcot considère les savanes désertiques à *Acacia-Panicum* (Quézel, 1965) comme appartenant au *domaine sud-saharien planitiaire*. En fonction de leur situation topographique la composition floristique du tapis herbacé change : *Cyperus conglomeratus* est prédominant sur les dunes, *Aristida spp.* sur les plateaux et, dans les vallées, *Cymbopogon schoenanthus*. Les ligneux sont *Acacia tortilis* et *A. ehrenbergiana*, *Cordia sinensis*, *Maerua crassifolia* et *Grewia tenax*. Ces formations de plaines, qui sont des formes de transition entre le Nord-Sahel et le Sud-Sahara, sont le plus souvent considérées comme *sahélienne désertiques*. Leurs faciès de dégradation sont des steppes semi-désertiques herbacées à *Panicum turgidum* (voir chap. 2.3.1. et 2.2.).

Le *secteur sud-saharien montagnard* de l'Air héberge des steppes épineuses plus ou moins boisées dont les strates arbustives sont constituées d'espèces sahéliennes : *Acacia ehrenbergiana*, *A. tortilis*, *A. nilotica*, *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca*, *Maerua crassifolia*, *Salvadora persica*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Calotropis procera*, etc. Cette zone montagneuse ne semble pas constituer un bastion septentrional aussi propice aux espèces soudaniennes que l'Adrar des Iforas au Mali (voir chap. 2.3.8.).

2.4.2. SECTEUR NORD-SAHÉLIEN

La végétation de cette région correspond aux steppes clairsemées fréquentes dans le Sahel semi-désertique (voir chap. 2.1.2 et 2.3.3.).

La composition floristique ligneuse est représentée par *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *Faidherbia albida*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Cordia sinensis*, *Combretum micranthum*, *Hyphaene thebaica*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Salvadora persica*, *Commiphora africana*, *Calotropis procera*, *Sclerocarya birrea*. En ce qui concerne le tapis herbacé notons *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*, *Panicum turgidum*, *Brachiaria spp.*, etc. En fonction du substrat et de la topographie, on relève différents faciès. En simplifiant, et de manière non exhaustive :

– Steppes semi-désertiques boisées à *Guiera senegalensis* et *Cenchrus biflorus* (cram-cram) (avec *Faidherbia albida*, *Boscia senegalensis*, *Combretum micranthum*, *Sclerocarya birrea*) sur les sables ;

- Steppes semi-désertiques buissonnantes et arbustives épineuses à *Acacia tortilis*, *A. senegal* et *Balanites aegyptiaca* (avec *Hyphaene thebaica*, *Commiphora africana*, *Calotropis procera*, *Salvadora persica*) sur les sables ;
- Steppes semi-désertiques herbacées à *Stipagrostis uniplumis* sur les sols squelettiques ;
- Steppes semi-désertiques épineuses à boqueteaux clairsemés de *Commiphora africana*, *Combretum micranthum*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Acacia senegal* (avec *Lannea microcarpa*, *Sclerocarya villosa*, *Grewia tenax* et *G. villosa*) sur les sols rocheux ou argileux de l'Est ;
- Steppes semi-désertiques arbustives épineuses à *Acacia tortilis*, *Commiphora quadricincta*, *C. africana*, *Balanites aegyptiaca*, avec tapis herbacé à *Panicum turgidum* dans les massifs sableux de la région de Zinder.

2.4.3. SECTEUR SUD-SAHÉLIEN

Ce secteur correspond aux secteurs sahélien sensu stricto et au secteur sahélo-soudanien décrits pour le Sénégal (chap. 2.1.3., 2.1.4.) et le Mali (chap. 2.3.3.). Il touche aussi l'extrême Nord du Nigeria pour lequel Keay (1953) décrit une *steppe épineuse arbustive* à *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *A. laeta*, *Commiphora africana*, *Salvadora persica*, *Leptadenia pyrotechnica*. Les steppes sud-sahéliennes ont un couvert végétal plus dense que dans le Nord, en particulier au niveau des ligneux qui constituent une strate arborée, boisée ou des fourrés. La diversité spécifique est enrichie par des espèces soudaniennes. Les sols sont généralement sableux. En cas de défrichements, des peuplements purs de *Guiera senegalensis* peuvent s'installer (Adjanohoun et al., 1980).

- Brousses tigrées – ou tachetées – à *Combretum micranthum* (avec *Acacia ataxantha*, *Boscia senegalensis*, *Commiphora africana*, *Combretum nigricans*, *Lannea acida*, *Piliostigma reticulatum*), sur les plateaux gréseux non ensablés de l'ouest.
- Fourrés à *Combretum micranthum*, *Sclerocarya birrea*, *Piliostigma reticulatum* (avec *Acacia spp.*, *Faidherbia albida*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus mauritiana* et des espèces soudaniennes comme *Anogeissus leiocarpa*) sur les plateaux gréseux du centre. La steppe sous-arbustive à *Combretum micranthum* et *Tinospora bakis* en est un facies appauvri sur lithosol.
- Fourrés à *Hyphaene thebaica* et *Senna singueana* (avec *Piliostigma reticulatum* et *Leptadenia pyrotechnica*) dans les dépressions interdunaires.
- Fourrés-galeries à *Acacia nilotica*, *A. seyal*, *A. sieberiana* et *Mitragyna inermis* (avec un tapis herbacé de spécialistes des zones humides créées par les dépressions ou le ruissellement (*Typha domingensis*, *Phragmites australis*, *Echinochloa stagnina*, *Cyperus spp.*, *Oryza spp.*, etc.). Les stations argilo-sableuses inondables sont colonisées par *Acacia nilotica* (Adjanohoun et al., 1980).
- Steppes boisées épineuses à *Acacia senegal*, *Anogeissus leiocarpa*, *Albizzia chevalieri*, *Hyphaene thebaica* et *Adansonia digitata* en zone de piémont.
- Steppes arbustives ou arborées épineuses à *Faidherbia albida*, *Hyphaene thebaica* (avec *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Salvadora persica*, *Maerua crassifolia* et *Piliostigma reticulatum*) sur les terrasses gréseuses ou ferrallitiques.

- Steppes buissonnantes épineuses denses et fourrés à *Acacia tortilis*, *Commiphora quadricincta* (avec *C. africana*, *Balanites aegyptiaca*, *Salvadora persica*, *Maerua crassifolia*) sur sols drainés sablo-argileux ou sur les ergs anciens (Zinder).
- Steppes buissonnantes à *Combretum microcarpum*, *Bauhinia rufescens* et *Euphorbia balsamifera*, en situation de piémont de collines gréseuses.

2.4.4. SECTEUR SAHÉLO-SOUDANIEN FLUVIAL :

DÉVELOPPÉ SURTOUT DANS LE SUD-OUEST DU PAYS

- Végétation herbacée aquatique des mares permanentes ou temporaires à hydrophytes (*Oryza barthii*, *O. longistaminata*, *Echinochloa callopus*, *Nymphaea*) et Graminées hygrophiles (*Andropogon pseudapricus*, *Panicum subalbidum*, *Paspalum scrobiculatum*, *Vetiveria nigriflora*, *Eragrostis spp.* etc).
- Prairies aquatiques à *Vetiveria nigriflora* et *Echinochloa stagnina*, ou *Bourgoutières*, se développant dans le lit majeur du Niger sur les alluvions argilo-limoneuses. Des formations analogues, dominées par *Vetiveria nigriflora* et *Echinochloa stagnina* sont signalées pour le Sénégal (chap. 2.1.1.) et pour le Mali (chap. 2.3.2, 2.3.5.).
- Prairies marécageuses à *Sporobolus spicatus*, *Paspalidium geminatum*, *Typha domingensis*, *Phragmites australis* dans la vallée du Foghat.
- Savanes boisées sur les terrasses alluviales du fleuve Niger avec *Bombax costatum*, *Parkia biglobosa*, *Prosopis africana*, et en sous-bois *Annona senegalensis*, *Hexalobus monopetalus*, *Maytenus senegalensis*, *Piliostigma reticulatum*.
- Fourrés-galeries à *Acacia nilotica*, *A. seyal*, *A. sieberiana* et *Mitragyna inermis* (avec un tapis herbacé d'hydrophytes : *Typha domingensis*, *Phragmites australis*, *Echinochloa stagnina*, *Cyperus spp.*, *Oryza barthii*, etc.). Il s'agit souvent d'un écotone entre les steppes – ou les savanes – et le cours d'eau.
- Forêts-galeries soudano-guinéennes à *Isobertinia doka*, *Azelia africana*, *Daniellia oliveri*, *Kigelia africana*, *Albizia zygia*, avec un fourré de sous-bois constitué du bambou *Oxytenanthera abyssinica*.

2.4.5. SECTEUR DES FORÊTS CLAIRES ET DES SAVANES SOUDANIENNES

AVEC LAMBEAUX DE FORÊTS DENSES SÈCHES

Situé à l'extrême Sud du pays, elles se développent sur des plateaux gréseux plus ou moins recouverts par des sables éoliens.

- Forêts denses sèches à *Combretum micranthum*, *C. nigriflora*, *Anogeissus leiocarpa*, *Bombax costatum*, *Daniellia oliveri*, *Sclerocarya birrea*, *Stereospermum kunthianum*, *Sterculia setigera*, avec un sous-bois lianescent. Ces forêts sont situées sur les plateaux latéritiques.
- Forêts claires à *Acacia macrostachya*, *Adansonia digitata*, *Anogeissus leiocarpa*, *Daniellia oliveri*, *Bombax costatum* (avec encore *Ficus platyphylla*, *Combretum spp.*, *Burkea africana*, *Piliostigma reticulatum*, etc), sur les terrasses sableuses.
- Savanes boisées à *Faidherbia albida*, *Annona senegalensis*, *Diospyros mespiliformis* sur les sols ferrallitiques de plateau avec le cortège habituel des arbres et arbustes soudanais. Notons un faciès drainé sur cuirasse démantelée à *Pterocarpus erinaceus*,

Lannea acida, *Combretum spp.*, *Pericopsis laxiflora* et un autre facies sur les nappes phréatiques peu profondes caractérisé par *Vitellaria paradoxa* et *Borassus aethiopum*.
– Savanes arborées peu denses sur sols hydromorphes à *Neocarya macrophylla*, *Borassus aethiopum*, *Daniellia oliveri*, *Prosopis africana*, *Hyphaene thebaica*.

2.5. Tchad

Gillet (1968) distingue une zone nord-sahélienne, caractérisée par des steppes herbacées ou faiblement arbustives et l'omniprésence du cram-cram (*Cenchrus biflorus*) et une zone sud-sahélienne portant des steppes arbustives, arborées ou boisées à Acacias. Un cordon sableux descend jusqu'au 12^e parallèle. Des cuirasses affleurantes ou à faible profondeur marquent le Sud du pays. Pias (1970) dresse une carte de la végétation du Tchad en la corrélant avec les sols. Gaston (1981) nous offre une revue bibliographique, ainsi qu'un bon descriptif de de la végétation du Tchad, se basant - entre autres - sur les travaux de Gillet.

2.5.1. SECTEUR SUD-SAHARIEN.

Les savanes désertiques à *Acacia-Panicum* occupent le territoire tchadien au Nord du 16^e parallèle. Ces formations de transition entre le Nord-Sahel et le Sud-Sahara, sont souvent considérées comme *sahélienne désertiques* (voir 2.4.1.). La Chenopodiacee *Cornulaca monacantha* est une indicatrice du domaine saharien.

Selon Quézel (1965), le piémont sud-occidental du Tibesti constitue un milieu éminemment favorable au développement de la végétation, à cause de son exposition à la mousson. Dans les bas-fonds pousse une steppe épineuse à boqueteaux d'*Acacia seyal* et *A. tortilis* avec son tapis herbacé d'annuelles (*Aristida spp.*) ; seul *Panicum turgidum* est pérenne.

2.5.2. SECTEUR SAHÉLIEN

Cette région – Kanem, Goz Géfélé, Goz Chobou, Goz Bichini, Goz Almar, etc. – s'étend entre le 16^e et le 13^e parallèle, depuis le piémont du massif du Ouaddaï à l'Est, jusqu'au Lac Tchad ; elle est limitée plus ou moins par l'isohyète 400 mm. C'est une zone dans laquelle prédomine *Acacia tortilis*.

La végétation zonale des sols bruns-rouges subarides est la steppe semi-désertique arbustive épineuse à *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Leptadenia pyrotechnica*, avec *Aristida mutabilis* et *A. funiculata* en strate herbacée. Une steppe sahélienne boisée s'installera plutôt dans les niches les moins arides.

En fonction de la situation topographique on trouve les facies suivant :

– Steppes semi-désertiques herbacées à *Panicum turgidum* et *Cenchrus biflorus* (cram-cram), avec une strate sous-arbustive très clairsemée de *Calotropis procera* sur les sables entre le lac Tchad et le Batha ainsi que dans les zones soumises au pâturage.

– Steppes semi-désertiques arbustives épineuses à *Acacia tortilis*, *Commiphora quadricincta*, *C. africana*, *Balanites aegyptiaca*, avec un tapis herbacé à *Panicum turgidum* sur les dunes de Manga, prolongation de ce que l'on trouve dans les massifs sableux de la région de Zinder (voir chap. 2.4.2.)

– Steppes semi-désertiques arbustives épineuses à *Acacia tortilis*, *A. senegal* typiques sur les plateaux sableux, avec une densité d'*A. senegal* augmentant du Nord au Sud.

– Steppes arbustives épineuses denses et fourrés à *Commiphora africana*, *Hyphaene thebaica*, *Maerua crassifolia*, *Salvadora persica*, *Boscia senegalensis*, (avec *Acacia spp.*, *Piliostigma reticulatum*, *Capparis decidua*, *Abutilon fruticosum* et *Pavonia triloba*) au fond du sillon de Bahr el Ghazal et dans les dépressions inondables (ouaddis). La strate herbacée est hygrophile (*Enteropogon prieurii*, *Echinochloa colona*, *Panicum laetum*), et aquatique dans les zones à inondation prolongée : *Marsilea*, *Schoenoplectus senegalensis*, *Typha domingensis*, etc

– Fourrés-galeries à *Acacia nilotica* croissant autour des zones humides de bas-fonds.

– Steppes herbacées à *Aristida mutabilis* et *Hyperthelia* sur les plateaux du Harr et de Bir Louri.

2.5.3. SECTEUR SAHÉLO-SOUDANIEN

Ce secteur s'étend entre le 13° et le 12° parallèle sur des sols bruns-rouges subarides. On passe progressivement d'une végétation de steppes sahéliennes à une végétation de savanes soudaniennes, les formations plus sèches se maintenant sur les parties hautes du paysage. On remarque la disparition de *A. tortilis* au profit de *A. senegal*.

La secondarisation de ces formations provoque une induration des sols et l'uniformisation de la végétation qui se transforme en steppes secondaires épineuses à *Acacia seyal* et *Balanites aegyptiaca*.

Formations épineuses sur substrat drainé :

– Steppes arbustives épineuses à *A. senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Leptadenia pyrotechnica*, avec *Aristida mutabilis* et *A. funiculata* en strate herbacée. Elles se trouvent sur sols sableux. Lorsque le sol devient plus compact, par exemple suite au surpâturage, *Ziziphus mauritiana*, *Boscia senegalensis* et *Bauhinia rufescens* apparaissent. Un autre faciès de dégradation est la steppe arbustive clairsemée à *Salvadora persica*.

– Steppes arbustives épineuses à *Acacia nilotica*, *Hyphaene thebaica*, *Salvadora persica* (avec les espèces précédentes) aux alentours du lac Tchad.

Formations inermes sur substrat drainé :

– Steppes boisées à *Sclerocarya birrea* et *Anogeissus leiocarpa* (avec *Commiphora africana*, *Salvadora persica*, *Hyphaene thebaica*, *Capparis decidua*, *Guiera senegalensis*, *Dalbergia melanoxylon*) et tapis de graminées steppiennes (*Aristida spp.*)

– Steppes boisées à *Terminalia avicennioides* (avec une strate arbustive monospécifique de *Hyphaene thebaica*)

Végétations sur substrat hydromorphe, avec prédominance de *Acacia seyal* et *A. nilotica*

– Steppes arbustives épineuses hydromorphes à *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Crateva adansonii*, *Dospyros mespiliformis* (avec un tapis herbacé d'hydrophytes : *Typha domingensis*, *Phragmites australis*, *Echinochloa stagnina*, *Cyperus spp.*, *Oryza barthii*, *Schoenoplectus senegalensis*, *Pistia stratioides*, *Heteranthera callifolia*, etc.)

2.5.4. SECTEUR SUD-OUEST :

LAC TCHAD ET LES FLEUVES

(CHARI, LOGONE, GRANDE SIDO, NANA BARRYA)

Le système des Yaérés

Les Yaérés sont des formations végétales submergées par les crues du Logone, au Tchad et au Nord-Cameroun. Elles se développent sur les argiles noires sahéliennes et soudaniennes se craquelant à la dessiccation. Cela donne un paysage de mosaïques formations boisées -formations herbacées. Les zones exondées, plus éloignées de l'influence des crues sont colonisées par des formations steppiques zonales à *Acacia seyal* et *Balanites aegyptiaca* (« Karal » ou « Firki ») ou à *Acacia nilotica nilotica* dans les dépressions. Ensuite, du plus aride au plus hydromorphes se succèdent :

- les steppes épineuses arbustives à *Acacia sieberiana* et *A. polyacantha* (= *A. cam-pylacantha*) ;
- les steppes arbustives à *Pseudocedrela kotschyi* et *Acacia sieberiana* ;
- les steppes sous-arbustives à boqueteaux de *Mitragyna inermis* ;
- les Yaérés proprement-dit, à savoir les savanes herbacées hydromorphes à *Hyparrhenia rufa* (avec *Eragrostis atrovirens*, *Panicum anabaptistum*, *Echinochloa colonna*, *Vossia cuspidata*, *Setaria sphacelata*, *Sorghastrum stipoides*, etc.)

Les berges du Logone et du Chari sont occupées par une forêt-galerie soudanienne à *Morelia senegalensis*, *Diospyros mespiliformis* et *Crateva adansonii*.

Les « Naga »

Une steppe très clairsemée à *Balanites aegyptiaca*, *Lanea humilis*, *Dalbergia melanoxylon*, *Haphaene thebaica*, *Maerua crassifolia*, *Acacia seyal*, *Schoenefeldia gracilis* se développe sur des sols argilo-sableux halomorphes lessivés le long du Chari. Ce genre de formation est homologue des Regs du Sud-Est (voir 2.5.5.).

Lac Tchad

La végétation aquatique du lac est constituée d'herbiers à *Potamogeton*, d'îles flottantes, de *Phragmitaies*, de *Typhaies*, d'îlots-bancs de *Phragmites australis* et d'autres formes de végétation hydrophytique.

La rive proprement dite est occupée d'abord par une prairie ripicole à *Leptadenia hastata* (Asclepiadacée typique de cette zone), *Cyperus spp.*, *Scirpus spp.*, et à Graminées hydrophytes, puis par une bordure flottante constituée de *Vossia cuspidata* ou *Cyperus papyrus*.

Sur les terres exondées éloignées des rives, le lac est entouré de steppes herbacées ou de steppes arbustives épineuses à *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *A. sieberiana*. *Calotropis procera* est le sous-arbuste pionnier des terrains exondés.

Grands cours d'eau du Sud-Est

Lorsque le courant est faible et sur les bras-morts, une végétation aquatique semblable à celle décrite pour le lac Tchad peut s'installer.

Formations sahélo-soudaniennes

– Fourrés-galeries à *A. sieberiana*, *A. nilotica*, *A. polyacantha* (= *A. campylacantha*), *A. seyal*, *Faidherbia albida* et *Mitragyna inermis*. Formations riveraines discontinues le long du Chari et d'autres rivières, avec un tapis herbacé d'espèces hydrophiles : *Vetiveria nigriflora*, *Panicum anabaptistum*.

Formations soudaniennes

– Savanes herbeuse ou faiblement arbustive à boqueteaux de *Mitragyna inermis*, *Terminalia macroptera* et *Vitex doniana* dans les lits-majeurs, avec une végétation graminéenne hygrophile.

– Forêts-galeries à *Morelia senegalensis*, *Diospyros mespiliformis*, *Cratogeomys adansonii*, *Mitragyna inermis*, *Celtis toka*, *Kigelia africana*, avec un sous-bois d'espèces humides comme *Paullinia pinnata*, *Merremia pinnata*

– Végétations sous-arbustives ripicoles à *Mimosa pigra*, *Sesbania sesban*, *Salix mucronata*.

Formations soudano-guinéennes

A l'extrême Sud du Tchad, on trouve une forêt dense semi-décidue soudano-guinéenne, fortement imprégnée d'espèces guinéo-congolaises

– Forêts ripicoles ou fourrés denses ripicoles à *Oncoba spinosa*, *Oncoba crepiniana*, *Psychotria vogeliana*, *P. psychotrioides*, *Opilia celtidifolia*, avec un sous-bois à *Oncocalamus acanthocnemis* qui les rend quasiment impénétrables. Le sous-bois est constitué d'espèces humides : *Paullinia pinnata*, *Smilax kraussiana*, *Cremaspora triflora*.

2.5.5. SECTEURS SUD-EST :

MASSIF DU OUADDAÏ

ET CUIRASSES AFFLEURANTES OU À FAIBLE PROFONDEUR

Les précipitations particulièrement élevées à l'intérieur du massif de l'Ouadaï autorisent le développement de savanes arborées ou boisées dont la diversité est un mélange d'espèces soudaniennes (*Anogeissus leiocarpa* et Combretacées, *Tamarindus indica*) et sahéliennes (*Acacia mellifera*, *A. laeta*, *A. senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Dalbergia melanoxylon*). Plus au Nord, la végétation ligneuse se raréfie.

Le contraste est grand entre la végétation dense du massif et les contreforts occidentaux constitués de « regs », sols argilo-sableux halomorphes lessivés, qui n'hébergent qu'une steppe très clairsemée à *Balanites aegyptiaca*, *Maerua crassifolia*, *Acacia seyal*, *Schoenefeldia gracilis*.

Les cuirasses au Sud du massif sont colonisées par des îlots denses de savanes arborées soudano-sahéliennes ou de fourrés profitant des failles ou du démantèlement de la cuirasse. Lorsque le sol est absent, seules des savanes herbacées à Andropogonées ou de la végétation marécageuse peuvent se maintenir. *Combretum aculeatum* est un buisson caractéristique des affleurements latéritiques (Adjanooun *et al.*, 1980).

2.5.6. SECTEUR DES FORÊTS CLAIRES ET DES SAVANES SOUDANIENNES

Au Sud du 12^e parallèle, le secteur soudanais est occupé par des savanes arborées et des forêts claires. Entre le 12^e et le 9^e parallèle, les formations plus sèches sont :

– Des savanes arborées à prédominance de Combretacées : *Anogeissus leiocarpa*, *Terminalia avicennioides* avec *Detarium senegalense*, *Prosopis africana*, *Sterculia setigera*, sur sols ferrugineux lessivés.

– Lorsque l'hydromorphie édaphique augmente on passe progressivement aux savanes arborées à *Anogeissus leiocarpa* et *Pseudocedrela kotschii*, puis aux savanes arbustives à *Terminalia macroptera* et *Pseudocedrela kotschii*.

Les formations secondaires issues de ces types de végétation sont des savanes arbustives épineuses à *Acacia seyal* et *Balanites aegyptiaca*, des *rôneraies* (savanes à *Borassus aethiopum*), des *doumeraies* (savanes à *Hyphaene thebaica*), ou des savanes-parcs à *Faidherbia albida*.

Au Sud du 9^e parallèle, sur les sols ferrugineux drainés et profonds, on trouve :

– les forêts claires à *Isobertinia doka*, *Burkea africana*. Le tapis herbacé est caractérisé par les Andropogonées géantes : *Beckeropsis uniseta*, *Andropogon gayanus*, *A. macrophyllus* ;

– les savanes boisées à *Daniellia oliveri* (avec *Parkia biglobosa*, *Vitellaria paradoxa*). Elles occupent les sols dont la cuirasse ferrugineuse est moins profonde.

Lorsque la cuirasse est affleurante, une savane herbacée ou pauvrement arbustive s'y développe.

L'exploitation et la pression pastorale sur les savanes et les forêts claires de la zone soudanienne les transforment en savanes à prédominance de Combretacées (*Terminalia spp.*, *Combretum spp.*). Il y a uniformisation, banalisation des types de végétations. Ajoutons à cela l'exploitation à grande échelle de certaines espèces qui transforme le paysage en « savanes-verger » ou « savanne-parc » à Karité (*Vitellaria paradoxa*) ou à Néré (*Parkia africana*).

2.6. Soudan

Le domaine sahélien occupe la partie nord et centre du Soudan. La partie méridionale du pays appartient au domaine soudanais et aux formations herbacées édaphiques du Haut-Nil disposées en mosaïques avec des savanes à Acacias. Le massif du Djebel Marra offre des conditions favorables à la végétation, modifiant considérablement le climat local. Du Nord au Sud on trouve les végétations suivantes. L'imagerie satellitaire et les études de terrain dans la région frontière avec l'Ouganda remettent partiellement en question la classification des formations soudanaises et les limites de secteur tracés selon White (Friis & Vollesen, 2005).

2.6.1. STEPPES DU SAHEL SEMI-DÉSERTIQUE SUR SABLES ÉOLIENS

Avec une pluviosité inférieure à 250 mm, on retrouve les formations zonales semi-désertiques, à savoir

– Steppes semi-désertiques herbacées à *Aristida spp.* et *Panicum turgidum* dans les zones les plus arides.

– Steppes semi-désertiques boisées épineuses à *Acacia* (*A. tortilis*, *A. senegal*), *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Calotropis procera*, *Ziziphus spina-christi*, *Maerua crassifolia* (avec *Combretum aculeatum* et *Guiera senegalensis* dans les dépressions interdunaires plus humides). L'abondance de *Leptadenia pyrotechnica*, *Calotropis procera*, *Ziziphus spina-christi* est un signe de forte pression pastorale sur les sols. En général les ligneux sont concentrés dans les dépressions.

2.6.2. STEPPES SAHÉLIENNES

Entre 250 mm et 400 mm, *Acacia senegal* est d'autant plus présent dans les steppes qu'il est favorisé par les pratiques culturales (gomme arabique). Cependant l'épuisement des sols finit par l'éliminer et par favoriser une plante parasite nocive : *Striga hermonthica*. La végétation zonale est la steppe boisée épineuse à *Acacia senegal* dont le couvert ligneux se densifie lorsqu'on va vers le Sud. La composition floristique est la même que celle citée pour les steppes boisées du Sahel septentrional, avec les différences et particularités suivantes :

Formations sur sables éoliens

- *Acacia tortilis* est plus abondant dans le Nord plus aride, *A. senegal* dans le Sud.
- Les fourrés de *Lannea humilis* sont une caractéristique du Nord.
- Les steppes arborées épineuses à *Albizia amara* (avec *A. nubica*, *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca* et *Maerua crassifolia*) indiquent des anciennes jachères.
- Les sols épuisés par la pression pastorale ne produisent plus que des steppes herbacées à *Panicum turgidum*.
- Dans la zone méridionale plus humide on retrouve les savanes arborées à *Acacia senegal*, *Combretum glutinosum*, *Terminalia brownii*, *Stereospermum kunthianum*, *Albizia amara*, *Terminalia laxiflora*, *Sclerocarya birrea*.

Formations sur argiles

- Sur sols de pédiplaine (sables superficiels épandus sur argile) : fourrés à *Acacia mellifera*, *A. nubica*, *Commiphora africana*, *Boscia senegalensis* (associées dans les dépressions avec des espèces soudanaises : *Cordia sinensis*, *Dichrostachys cinerea*, *Albizia amara*, *Terminalia brownii*, *Adansonia digitata*).
- Steppes à *Zornia glochidiata* dans les zones surpâturées.
- Savanes arborées monospécifiques à *Acacia mellifera* sur argiles noires fissurées (associé à *Boscia senegalensis*, *Albizia anthelminthica*, *Cadaba glandulosa*, *Balanites aegyptiaca* et *Dichrostachys cinerea*).

2.6.3. SECTEUR SAHÉLO-SOUDANAIEN

Exploitée pour l'élevage et l'agriculture, cette zone ne porte plus que quelques rares lambeaux de forêts claires soudano-sahéliennes avec *Combretum glutinosum*, *Albizia amara*, *Terminalia brownii*, *Dalbergia melanoxylon*, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca*, *Sclerocarya birrea*.

2.6.4. SECTEUR SOUDANIEN

Certains vestiges de forêts denses sèches à *Terminalia schimperiana*, *Albizia zygia*, *Vitex doniana*, *Anogeissus leiocarpa* ont été décrits vers la limite orientale de la ceinture soudanienne, près des contreforts éthiopiens. Au Darfur et à l'Est, à la frontière avec l'Éthiopie, souvent sur des argiles noires, on trouve de la forêt claire à *Anogeissus leiocarpa* accompagné de *Combretum glutinosum*, *Balanites aegyptiaca*, *Combretum collinum*, *Terminalia laxiflora*, *Sclerocarya birrea*, *Dichrostachys cinerea*, *Sterculia setigera*, *Lonchocarpus laxiflorus*, *Dalbergia melanoxylon* ; des peuplements purs de *Boswellia papyrifera* occupent les crêtes rocheuses.

2.6.5. BROUSSES TIGRÉES, TACHETÉES, ETC.

Dans le Darfur, le Kordofan et la vallée du Nil, les brousses tigrées et tachetées constituent un trait remarquable de la végétation (voir chap. 1.1.2., 1.1.3., 2.1.4., 2.4.3.). Ce sont des bandes ou des arcs de végétation se développant parallèlement aux courbes de niveaux sur de très faibles déclivités.

Zones à pluviométrie faible (moins de 250 mm)

- Bandes graminéennes à *Aristida spp.* sur sols argilo-limoneux.
- Brousses en œufs de grenouilles à *Acacia mellifera* sur sols sableux éoliens.

Zones à pluviométrie élevée (400-500 mm)

- Brousses tigrées à *Terminalia brownii* (avec *Albizia amara*, *Dalbergia melanoxylon*, *Grewia flavescens* et *G. tenax*, *Boscia senegalensis*).
- Brousses en dactylogrammes à *Acacia mellifera* en peuplement pur.

2.6.6. MOSAÏQUES SAVANES BOISÉES-SAVANES HERBACÉES INONDABLES SUR LES ARGILES NOIRES DU HAUT-NIL

Ces formations sont l'équivalent des Yaérés du Tchad. Elles se développent elles aussi sur des argiles noires fissurées. Les savanes herbacées hydromorphes sont disposées en mosaïques avec des savanes boisées ou des fourrés denses à *Acacia mellifera* (dans les zones les plus arides) ou à *Acacia seyal* lorsque les précipitations dépassent 550 mm. Les écotones entre savanes herbacées et savanes à *Acacia* sont occupés par le Palmier-doum (*Hyphaene thebaica*) et le Rônier (*Borassus aethiopicum*). Lorsque l'inondation est très importante seule subsiste une Savane herbeuse hydromorphe à *Hyparrhenia rufa* et *Setaria incrassata*.

2.6.7. JEBEL MARRA

Le Massif du Jebel Marra dessine dans sa longueur la ligne de partage des eaux entre le Nil et le Tchad. S'élevant à plus de 3 000 m il est formé de laves basaltiques. Le massif est circonscrit par une pénéplaine sur schiste ou gneiss parsemée d'inselbergs. Sa situation centrale en Afrique sèche et des conditions environnementales variées ont créé les conditions favorables à l'installation de nombreuses espèces. Wickens (1976, 1977) cite plus de 1000 espèces, le tiers de la flore du Soudan. Le climat régional est marqué par une pluviométrie relativement élevée permettant l'installation d'une végétation sahélo-soudanienne et même soudanienne.

- dans les parties les plus sèches des zones planitiaires : steppes arbustives ou arborées épineuses à *Acacia mellifera*, *A. senegal*, *A. seyal*, *A. tortilis*, *Faidherbia*

albida, *Balanites aegyptiaca*, *Commiphora africana*, accompagnées d'espèces soudaniennes comme *Anogeissus leiocarpa*, *Kigelia africana*, *Terminalia laxiflora*, *Combretum spp.*, *Pterocarpus lucens*, *Prosopis africana* ;

– sur les contreforts : forêts claires à *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus spina-cristi* avec différentes espèces sahéliennes et soudaniennes ;

– sur les sols volcaniques d'altitude : fourrés à *Acacia mellifera*, *Commiphora africana*, *Euphorbia candelabrum*, *Grewia flavescens* ;

– dans les parties les plus humides des zones planitiaires et sur les limons cendrés des pentes : forêts claires à Combretacées (*Anogeissus leiocarpa*, *Terminalia laxiflora*, *Combretum glutinosum*) ;

– forêts riveraines à *Diospyros mespiliformis*, *Polyscias fulva*, *Albizia zygia*, *Syzygium guineense*, *Phoenix reclinata* ;

– sur les sommets : savanes herbacées avec quelques arbres résiduels.

2.7. Zones sèches et arides de la Corne de l'Afrique

Selon Kuchar (1986), la formation climax de la Somalie planitaire aride (250-500 mm) est le fourré à *Acacia-Commiphora* (accompagnés de *Grewia tembensis*, *G. tenax*, *G. villosa*, *G. bicolor*, *Boscia*, *Cadaba*, *Maerua*, *Cordia*, *Dalbergia*, etc.), surcimé par des émergents arbustifs ou arborés (12 m) clairsemés appartenant aux genres *Boswellia*, *Delonix*, *Gyrocarpus*, *Albizia*. Les *Acacia* sont *A. senegal*, *A. tortilis*, *A. reficiens*, *A. mellifera*, et sur les sols périodiquement hydromorphes : *A. drepanolobium*, *A. seyal*, *A. zanzibarica*. Quant à *Commiphora*, on relève plus de 15 espèces différentes. La dégradation du fourré à *Acacia* et *Commiphora* conduit à un maquis ou à une steppe buissonnante naine.

En Ogaden et dans la Somalie centrale, Les fourrés restent dominés par les genres *Acacia* et *Commiphora*. Néanmoins, les espèces endémiques d'*Acacia* (*A. hamulosa*, *A. walwalensis*, *A. zizyphisina*) et de *Commiphora* (*C. horrida*, *C. stellatopubescens*) se substituent aux espèces pansahéliennes.

Dans les régions hyperarides (100-250 mm), on trouve des steppes semi-désertiques : herbacées, à succulentes et buissonnantes naines. La région hyperaride du Nord-Est est caractérisée par une steppe à succulentes (*Euphorbia spp.*, *Adenium obesum*, *Cissus spp.*, *Cyphostemma sp.*, *Aloes spp.*) parmi lesquelles on relève un grand nombre d'endémiques.

Les versants montagneux exposés au Nord de la Somalie septentrionale hébergent une végétation méditerranéenne et ouest-asiatique bien différente du fond sahélo-soudanien. Enfin la zone côtière est couverte de steppes herbacées riches en plantes prostrées ou en coussinets adaptées aux vents qui donnent à ces formations végétales une physionomie de toundra.

Djibouti

Audru *et al.* (1994) proposent la classification suivante pour Djibouti :

Végétation des montagnes et des hauts plateaux :

– Forêt dense sèche climacique à conifères à *Juniperus procera* (avec *Olea europea ssp. africana*, *Buxus hildebrandtii*), entre 800 et 1 600 m. Cette formation, actuellement en forte régression, est apparentée aux forêts denses sèches d'Ethiopie (voir chap. 1.3.).

– Forêt dense sèche à *Terminalia brownii* et *Buxus hildebrandtii*, entre 400 et 900 m. Formation moins dense que la précédente, mais plus diversifiée, composée essentiellement de feuillus.

– Steppe arborée de montagne à *Acacia etbaica* et *Aizoon canariense* : formation provenant de la dégradation (feux, surpâturage) des forêts climaciques à *Juniperus*.
Végétation de moyenne altitude et de plaine :

– Steppes arborées et arbustives épineuses à *Acacia mellifera* dans les zones entre 250 et 700 m d'altitude. Dans les zones plus sèches *A. tortilis* se mêle à *A. mellifera*. Puis, lorsque le degré d'aridité augmente une steppe semi-désertique herbacée à *Panicum turgidum* et *Lasiurus scindicus* s'installe.

– Steppes buissonnantes à *Rhigozum somalense*, à l'étage inférieur et sur les escarpements et les collines basses.

– Steppes semi-désertiques buissonnantes à *Acacia horrida* dans les sites arides du Nord-Est.

Végétation des zones humides (oueds, dépressions), avec des phréatophytes et des halophytes (*Hyphaene thebaica*, *Acacia nilotica*, *Tanarix nilotica*, *Salvadora persica*).

Végétation du littoral : steppes herbacées plus ou moins halophytique.

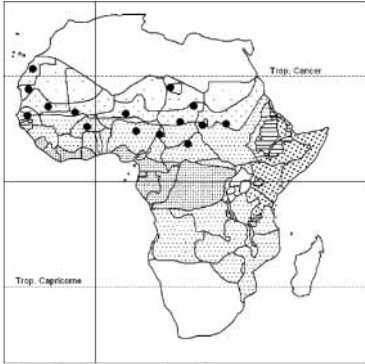
3. Trois familles emblématiques de la ceinture sèche

Nous présentons quelques espèces ligneuses emblématiques de la ceinture sèche sous l'angle de leur distribution, de leur écologie et de leur ethobotanicité. Ces espèces sud-sahariennes, sahéliennes ou soudaniennes, appartiennent à trois grandes familles intertropicales : *Capparaceae*, *Combretaceae*, *Leguminosae*. Notre choix n'est pas totalement arbitraire puisque les représentants de ces familles sont prédominants dans les végétations sèches. Nous aurions pu aussi illustrer notre propos avec des bombacacées (*Adansonia digitata*, *Bombax costatum*), des rhamnacées (*Ziziphus mauritiana* et *Z. spina-christi*), *Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca*, *Leptadenia pyrotechnica* ou *Salvadora persica*, mais il fallait poser des limites. Les espèces choisies appartiennent à la liste d'espèces de reforestation proposée par Le Houérou (2009, p. 31). Cependant cette liste a été élaborée avec nos collègues J.P. Lebrun et A. Stork, les meilleures références actuelles en la matière. Les informations sur l'écologie et les cartes de distribution sont issues des publications de Lebrun et Stork (2003, 2006, 2008a, 2008b) dont les travaux alimentent la base de données sur les plantes à fleurs africaines des Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève :

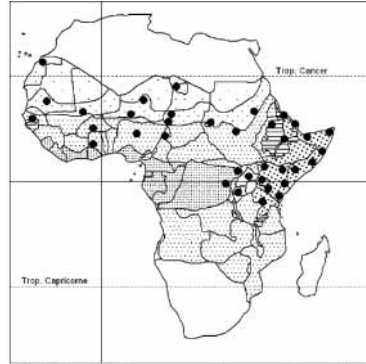
African Flowering Plants Database (version 3.1). Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève and South African National Biodiversity Institute, Pretoria, "Retrieved [11.2009]", from <<http://www.ville-ge.ch/musinfo/bd/cjb/africa/>>.

Nos informations ethnobotaniques proviennent de la compilation d'un choix d'ouvrage : Adjanohoun *et al.* (1979, 1980), Aké Assi & Guinko (1991), Dalziel (1937), Fortin *et al.* (2000), Kerharo & Bouquet (1950), Kerharo et Adam (1974) et Neuwinger (2000). Néanmoins le lecteur intéressé par l'ethnobotanique africaine complètera ses informations en consultant la bibliographie exhaustive de chacun de ces auteurs.

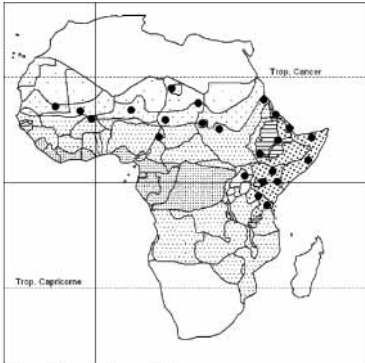
3.1. Capparaceae :



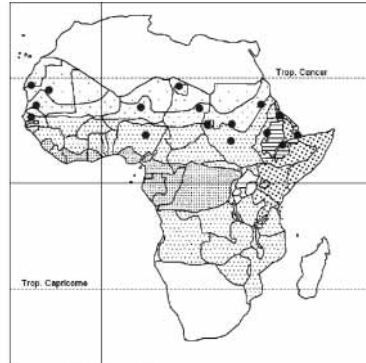
Boscia senegalensis



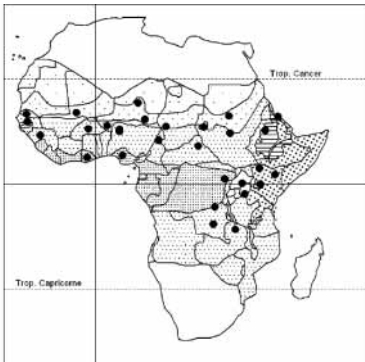
Cadaba farinosa subsp. *adenotricha*



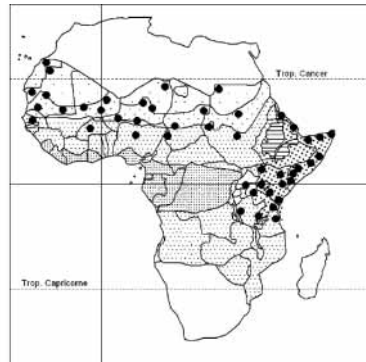
Cadaba glandulosa



Capparis decidua



Crateva adansonii subsp. *adansonii*



Maerua crassifolia

Boscia senegalensis (Pers.) Lam.

Arbuste ou petit arbre. Espèce sahélienne avec extensions saharo-sindienne et soudanienne. Signalée sur les anciennes termitières. Préfère les sols légèrement argileux près des zones humides. Accompagne *Adansonia digitata* sur les bourrelets de rive.

Les jeunes feuilles sont consommées en légumes et les graines comme féculents ou en farine. La pulpe du fruit est comestible. On l'utilise parfois comme succédané du couscous.

Les feuilles, l'écorce et les rameaux servent à purifier l'eau. Les feuilles sont utilisées en décoction (médecine vétérinaire et humaine) contre les ulcères, les eczémas, les troubles gastro-intestinaux et la bilharziose.

Tous les organes sont utilisés pour soigner les rhumatismes et les maux de ventre (coliques, parasites), mélangés parfois avec *Cadaba farinosa*, *Combretum glutinosum*, *Guiera senegalensis*, *Maerua crassifolia*, *Securinea virosa* et *Adansonia digitata*.

Cadaba farinosa Forssk.

Arbuste très rameux, rarement arbre. Espèce xérophile à vaste distribution (jusqu'en Inde). Steppes sahéliennes et semi-désertiques. Souvent sur les anciennes termitières. Se trouve aussi en montagne.

On fait une pâte alimentaire à partir des feuilles et des rameaux moulus, pâte que l'on mélange avec d'autres céréales. On la mélange avec le couscous.

Les feuilles, réduites en cendres ou en décoction, sont utilisées contre les fièvres, la dysenterie, les parasites et les ulcères cutanés.

Cadaba glandulosa Forssk.

Arbuste ou sous-arbuste très rameux. Espèce xérophile allant jusqu'en Arabie. Steppes sahéliennes et semi-désertiques. Se trouve aussi en montagne.

Les feuilles, broyées et mélangées à de l'eau, sont appliquées sur les morsures de serpent. On traite également les otites avec cette décoction. On soigne les blessures externes avec de la poudre de feuilles.

Capparis decidua (Forssk.) Edgew.

Arbuste ou petit arbre rameux avec épines stipulaires, défolié durant la floraison. Espèce xérophile du Sahel et du Sud-Sahara, jusqu'en Inde. Vallées et dépressions sableuses.

Les fruits peuvent être consommés. Les pousses défeuillées sont broutées par les dromadaires.

La macération d'écorce est utilisée contre les maladies sexuelles et vénériennes, contre les troubles intestinaux et ophtalmologiques.

Crateva adansonii DC.

Arbuste ou arbre inerme. Floraison avant l'apparition des feuilles. Espèce sahélo-soudano-zambésienne. Savanes, forêts galeries, lisières, souvent sur les anciennes termitières. Souvent plantée.

Les jeunes feuilles sont consommées en potage. Le fruit, grillé, peut aussi être mangé. Ce sont plutôt plutôt des aliments de disette.

Les bains de vapeur de feuilles (mélangées à la racine de *Tinospora bakis*) sont utilisés pour traiter les problèmes ophtalmologiques, les fièvres, la dysenterie, les parasites et les ulcères cutanés. Différentes parties de la plante sont utilisées pour soigner les troubles gastro-intestinaux et gynécologiques, les problèmes de foie (jaunisse) et les rhumatismes.

Maerua crassifolia Forssk.

Petit arbre rameux à houppier étalé. Espèce xérophile afro-asiatique. Steppes et fourrés semi-désertiques, souvent près des rivières. Sols sableux. Se trouve aussi en montagne.

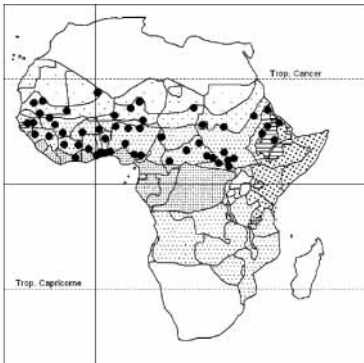
L'infusion de feuilles soigne les maux d'estomac. Les rameaux servent de cure-dent pour les soins dentaires et de la cavité buccale.

3.2. Combretaceae :

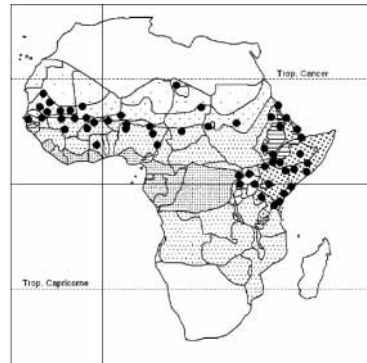
Anogeissus leiocarpa (DC.) Guill. & Perr.

Grand arbre à frondaison légère, verte claire. Espèce soudanienne à vaste spectre écologique.

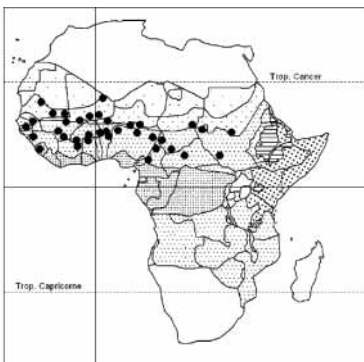
La cendre est utilisée en tannerie. Les feuilles ont des propriétés tinctoriales (couleur jaune) qui auraient favorisé les plantations de cet arbre près des villages.



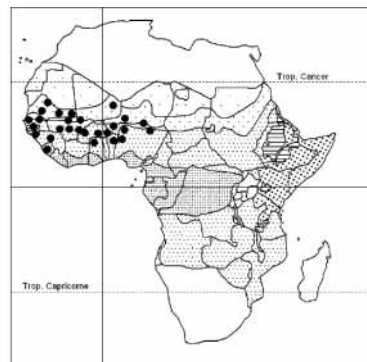
Anogeissus leiocarpa



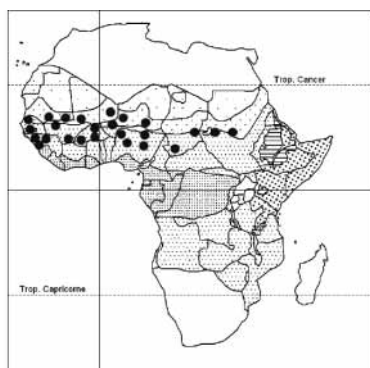
Combretum aculeatum



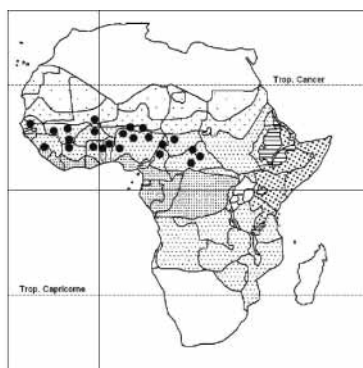
Combretum glutinosum



Combretum micranthum



Guiera senegalensis



Terminalia avicennioides

Le décocté de différents organes est utilisé en bain de siège contre les hémorroïdes (parfois mélangé avec de l'écorce de *Parkia biglobosa*) ; la poudre d'écorce, mélangée à de la bouillie, est consommée jusqu'à guérison. Cette poudre entre dans la composition de préparations anti-lépromateuses. Les feuilles et l'écorce en décoction soignent diarrhées – et surtout les diarrhées infantiles – et les jaunisses. L'écorce en décoction agit contre les douleurs, les problèmes ophtalmologiques ou gynécologiques (avec *Terminalia schimperiana*). En poudre elle soigne les blessures et les ulcères externes.

Combretum aculeatum Vent.

Arbuste grimpant épineux (base des péciolles), parfois rampant. Espèce sahélo-somalienne, avec extension soudanienne. Espèce des formations steppiques épineuses à *Acacia* et *Commiphora*. Parfois en montagne.

La partie épigée réduite en poudre est vermifuge. En décoction elle soigne les dysenteries et les maladies de foie. Les décoctions de feuilles réduisent les coliques et les maladies vénériennes. Les racines sont considérées comme un purgatif puissant. La sève des rameaux est utilisée en gouttes pour soigner les affections ophtalmologiques.

Combretum glutinosum Perr. ex DC.

Arbuste buissonnant ou petit arbre. Espèce sahélo-soudanienne de forêt claire, de savanne ou de steppe. Sols argileux et plateaux latéritiques. Grande amplitude écologique.

Le bois, très résistant, est utilisé pour la fabrication de clotures et d'éléments de construction (madriers). Comme beaucoup de Combrétacées, c'est un bois de feux recherché. La cendre est utilisée pour teindre en indigo ; les racines et l'écorce pour le jaune.

C'est une des plantes médicinales les plus utilisées par les tradipraticiens en Afrique de l'Ouest.

Les racines traitent les affections hépatico-biliaires, urinaires, gynécologiques, les oedèmes, les maladies vénériennes et parasitaires. L'écorce est un analgésique ; elle est utilisée pour traiter la jaunisse et la fièvre jaune (mélangée avec *Cocculus pendulus*

et *Tinospora bakis*) ; contre la bilharziose (avec *Securinega virosa*) et la lèpre (avec *Acacia sieberiana* et *Strophanthus sarmentosus*) ; pour traiter les maladies mentales (avec *Balanites aegyptiaca*).

Les décoctions de feuilles sont utilisées pour les maux de dents, l'estomac, les dysfonctionnements gynécologiques et intestinaux, les maladies vénériennes, la pression artérielle, les voies respiratoires et le paludisme.

C. micranthum G. Don

Arbuste grimpant, buissonnant ou petit arbre. Espèce sahélo-soudanienne des plateaux latéritiques et des collines rocailleuses. Eléments constitutifs des brousses tigrées.

Les tiges sont très solides et très souples. On les utilise pour construire des corbeilles et des récipients. On utilise le bois en charpenterie. On en fait du charbon.

Les racines ont des propriétés antiparasitaires et désinfectantes (médecine humaine et vétérinaire). Le décocté de racine est vermifuge et désinfectant (blessures). Le décocté de feuilles a des nombreuses propriétés : gastro-intestinales (coliques, vomissements), anti-parasitaires, désinfectantes, fébrifuges, anti-rhumatismales, diurétiques. Il traite aussi les maladies vénériennes (mêlé à *Salvadora persica*), la toux, la bronchite, les problèmes de foie, les plaies. Les fruits séchés font mûrir les abcès et les chancres syphilitiques.

Guiera senegalensis J.F. Gmel.

Arbuste sempervirent couvert de ponctuations noires. Espèce sahélo-soudanienne secondaire des friches et autres végétations très dégradées. Sols secs sableux ou rocailleux.

Cette espèce a beaucoup de propriétés communes avec *Combretum micranthum*. C'est une espèce médicale et vétérinaire (galactologue) très importante au Sénégal.

Les décoctions de racines sont utilisées contre les maladies pulmonaires, les rhumatismes et les parasites. Les décoctions d'écorces et de feuilles soignent la dysenterie amibienne, la diarrhée, les maladies vénériennes et parasitaires. La poudre de racine et d'écorce, mêlée au mil, soigne les maux de ventre. La galle de la plante, broyée en poudre, guérit les dysfonctionnements urinaires et les maladies de peau. La décoction de feuilles (mêlée à des Combrétacées ou des légumineuses) soigne la toux, les maladies pulmonaires et la fièvre ; c'est aussi un anti-lépreux. En cataplasme, les feuilles peuvent soigner les ulcères, les chancres syphilitiques et le ver de Guinée. La poudre de feuilles est un antiseptique et un cicatrisant puissant.

Terminalia avicennioides Guill. & Perr.

Arbuste buissonnant ou petit arbre. Grégaire, fréquent dans les formations savaniennes secondaires et dans les faciès les plus secs des forêts claires. Plaines sableuses.

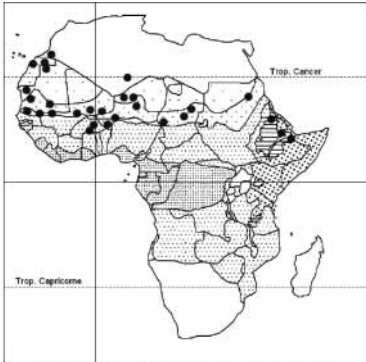
C'est un bois très apprécié, en particulier pour sa solidité. Le bois est utilisé pour faire des cannes ou des arcs. On en fait aussi du charbon.

On utilise les racines et l'écorce pour traiter les maladies de foie. En décoctions, les racines peuvent soigner les parasitoses et les maladies gastro-intestinales. En poudre les racines et les feuilles ont un pouvoir cicatrisant sur les brûlures, les ulcères ou les blessures.

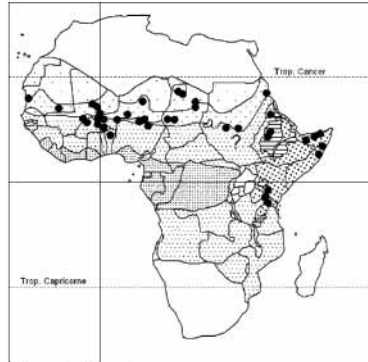
3.3. Leguminosae :

Acacia ehrenbergiana Hayne

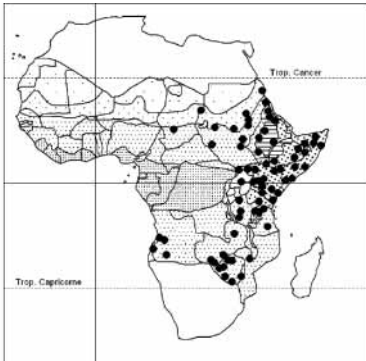
Arbuste ou petit arbre épineux multicaule. Espèce sud-saharienne et nord-sahélienne allant jusqu'en Iran. C'est un des *Acacia* qui supporte les conditions le plus arides (avec *A. tortilis*). Souvent associé, à *Panicum turgidum*.



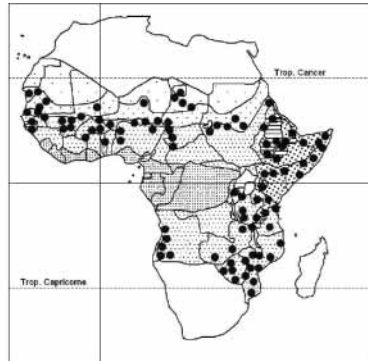
Acacia ehrenbergiana



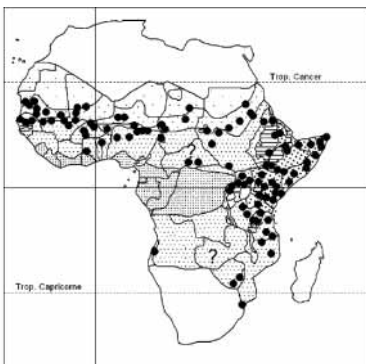
Acacia laeta



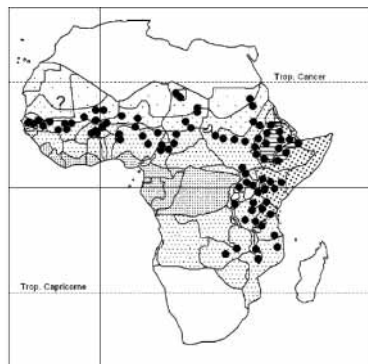
Acacia mellifera



Acacia nilotica



Acacia senegal

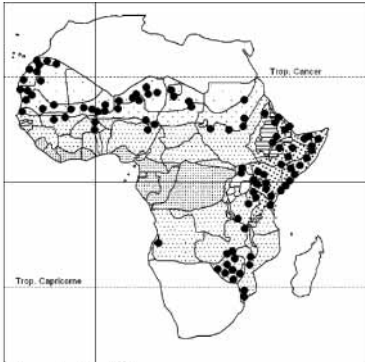


Acacia seyal

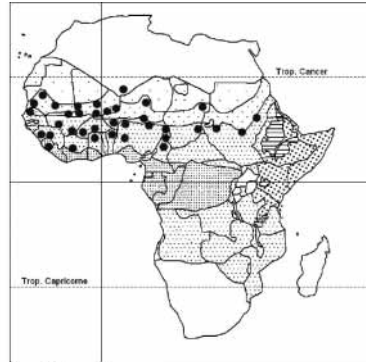
A. laeta R. Br. ex Benth.

Arbuste ou petit arbre épineux. Espèce sud-saharienne, nord-sahélienne et somalienne allant jusqu'en Asie du Sud-Est. Souvent liée à des sols riches en particules fines (limon, argile).

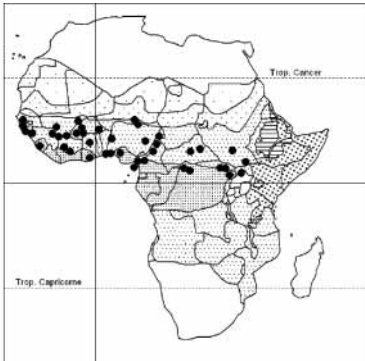
L'écorce en décoction ou réduite en poudre a des propriétés anti-lépreuses, anti-syphilitiques et contre la jaunisse. Elle est utilisée en cas de morsures de serpent, de troubles intestinaux (dysenterie, péritonite) et gynécologiques.



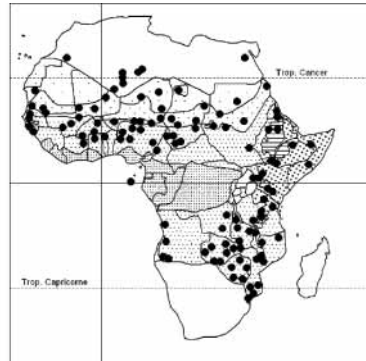
Acacia tortilis



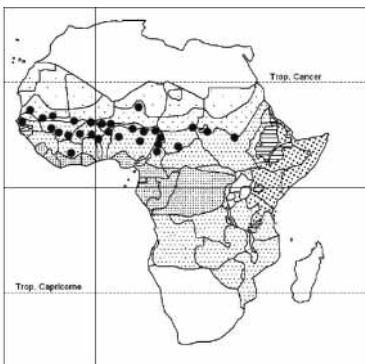
Bauhinia rufescens



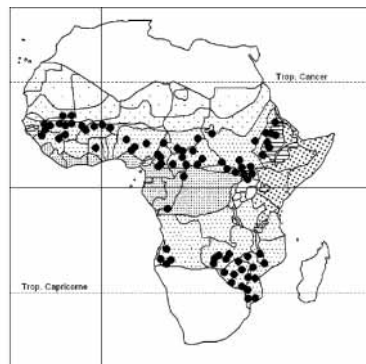
Daniellia oliveri



Faidherbia albida



Piliostigma reticulatum



Pterocarpus lucens

A. mellifera (Vahl) Benth.

Arbuste ou petit arbre épineux multicaule. Espèce xérophile parfois grégaire à distribution afro-orientale : est-sahélienne, somalienne, zambésienne et namibienne, allant jusqu'en Asie du Sud-Est. Elle préfère les sols argileux. C'est une indicatrice du surpâturage et de la surexploitation des sols.

Les fibres de l'écorce sont utilisées pour fabriquer des paniers.

A. nilotica (L.) Willd. ex Delile

Arbre épineux en forme de parasol. Habitats très variables, mais liés à l'eau (phréatophyte) ; l'espèce résiste aux inondations prolongées. Répandu dans les zones sèches africaines, y.c. Afrique du Nord (Lybie, Egypte), jusqu'en Inde.

Le bois est utilisé pour faire des outils. Il aurait été apprécié dans l'Antiquité comme bois de menuiserie, de charpenterie ou de batellerie.

Les feuilles soignent les troubles intestinaux, les pneumonies et autres affections broncho-pulmonaires. Les tiges et les rameaux sont utilisés pommade dermatologique anti-lépromateuse. L'écorce en décoction est administrée contre les dysfonctionnements gynécologiques, les maladies vénériennes, les troubles intestinaux ; en poudre, c'est un hémostatique appliqué sur les blessures. Les fruits en infusion servent contre les pneumonies, méningites et refroidissements ; en poudre, c'est un antiseptique et un antidysentérique. Les graines pilées soignent les hémorroïdes et les gingivites.

A. senegal (L.) Willd.

Arbuste (parfois sous-arbuste prostré) ou petit arbre épineux en forme de parasol, souvent grégaire. Répandu dans les zones sèches africaines, jusqu'en Inde. Apprécie les sols sableux drainés.

Les fibres extraites de l'écorce des racines, extrêmement résistantes, sont utilisées pour fabriquer des cordes, des filets de pêche, des harnais, des chaussures. Le bois des racines est utilisé pour fabriquer des manches d'outil. Le jeune feuillage est un bon fourrage.

La gomme arabique fait l'objet d'un commerce important dans le Sahel. *A. senegal* est parfois cultivé en verger pour la production de gomme. Un arbre peut produire de la gomme durant une vingtaine d'années. Consommée par les pasteurs sahéliens comme aliment médicinal mélangé au lait, la gomme soigne les maux de poitrine, de ventre et les maladies vénériennes. Elle est aussi utilisée en médecine vétérinaire. La poudre de gomme soigne diarrhées et maux d'estomac. La gomme arabique est utilisée en galénique pour la préparation de granulés, de comprimés et de dragées. Elle intervient aussi dans l'industrie alimentaire et des cosmétiques.

Les décoctions de racine et d'écorce ont une action contre les maux gastro-intestinaux et contre les maladies vénériennes. L'écorce intervient dans les préparations anti-ictériques.

A. seyal Delile

Arbre épineux en forme de parasol, souvent grégaire sur des sols plutôt argileux (y.c. argiles noires craquelées, ou fissurées). Répandu dans les zones sèches africaines, jusqu'en Asie du Sud-Est. Se trouve aussi en zones montagneuses.

La gomme est de moins bonne qualité que celle de *A senegal*. Elle est néanmoins consommée fraîche dans certaines régions pour ses propriétés aphrodisiaques. Le feuillage est un important fourrage pour le bétail. Les légumes sont utilisés pour engraisser les moutons ; ils sont parfois commercialisés.

Le décocté de racine soigne la péritonite, les fièvres biliaires et la jaunisse. La poudre et la décoction d'écorce sont utilisées contre les maux de tête, la lèpre, les dysfonctionnements gynécologiques et les maladies vénériennes. La poudre est appliquée sur les morsures de serpent.

Acacia tortilis (Forssk.) Hayne

Arbuste ou arbre épineux à houppier aplati. Espèce xérophile semi-désertique sud-saharienne-sahélo-somalienne à grande amplitude édaphique. C'est un des Acacias les plus xérophiles avec *A. ehrenbergiana*. La sous-espèce *raddiana* est plutôt occidentale. Les racines servent à fixer le sable en régions désertiques. Les rameaux feuillés servent de fourrage. Les gousses sont utilisées pour engraisser les moutons ; elles sont parfois commercialisées. Le bois, dur et flexible, a différents usages (enclos, bois de lance). On en fait aussi du charbon.

Les racines macérées sont recommandées contre la fièvre et la malaria (mêlées avec *Guiera senegalensis* et *Faidherbia albida*). Le décocté d'écorce traite l'asthme et les troubles gynécologiques. La pâte de feuilles soigne les allergies et les oedèmes.

Bauhinia rufescens Lam.

Arbustes grimpant ou arbre muni de courts rameaux spinescents. Espèce sahélo-soudanienne des zones humides, des éboulis rocheux, des cuirasses latéritiques démantelées. Sa limite septentrionale semble être le massif du Ennedi où elle constitue des populations grégaires.

On utilise la fibre de l'écorce pour faire des cordages. Le tanin intervient dans la préparation des cuirs. La plante a de nombreuses propriétés magiques.

Les décoctions de racines et d'écorces traitent les problèmes urinaires, la lèpre et les états fébriles. En décoctions, les feuilles et les fruits sont utilisés contre les morsures de serpent et les troubles intestinaux. La poudre de feuille est appliquée sur les morsures de serpent.

Daniellia oliveri (Rolfe) Hutch. & Dalziel

Arbre gégaire des savanes boisées et des forêts claires soudanaises, souvent mêlé à *Vitellaria paradoxa* et *Parkia biglobosa*.

Cet arbre fournit le « copal » ouest-africain. Cette résine a de nombreux usages : désinfection par fumigation, nettoyage, traitements contre les xylophages, vernis de surface. Le bois est très dur et sert à la fabrication d'outils, de récipients, d'éléments de construction, de pirogues, etc. En cas de disette les jeunes feuilles peuvent être consommées.

Le décocté de racines soigne les problèmes urinaires et gynécologiques. Le décocté et la poudre d'écorce sont recommandés contre la dysenterie, la péritonite, les maux de dents, la lèpre et la tuberculose. Les feuilles sont recommandées en décocté contre les affections intestinales, et en poudre comme hémostatique, cicatrisant et anti-ictérique. Les fumigations de résine calment migraines et maux de dents.

Faidherbia albida (Delile) A. Chev.

Arbre épineux parfois grégaire des zones sèches africaines : steppes sahéliennes, savanes soudaniennes, ouasis sahariens. Grande tolérance édaphique. Espèce souvent anthropogène.

Cet arbre semble bénéficier de la protection de certains villages autour desquels il constitue des peuplements purs. Le fourrage (feuillage et fruits) qu'il offre au bétail durant la saison sèche – puisqu'il perd ses feuilles en saison des pluies et reste feuillé durant les jours courts – ainsi que l'enrichissement en azote du sol au-dessous du houppier, expliquent la faveur dont jouit l'espèce dans l'écologie du terroir. Le bois est utilisé pour faire des instruments de petite taille ou des récipients.

L'écorce, les racines et les feuilles sont préparées en décoction contre les fièvres, la malaria, les maladies vénériennes, les parasitoses, les maladies pulmonaires, la toux et la diarrhée. Les fumigations sont prescrites contre les maladies mentales (avec *Afzelia africana*).

Piliostigma reticulatum (DC.) Hochst.

Arbuste ou petit arbre sempervirent. Espèce sahélo-soudanienne occidentale présente aussi bien sur les cuirasses latéritiques et les éboulis rocheux que sur les sols dunaires sableux ou sur les terrains inondables. Espèce secondaire formant des fourrés denses envahissant les friches.

Les gousses sont consommées ou utilisées pour confectionner une boisson.

Mélangé à *Ximenia americana*, il soulage les céphalées, les maux de dents, les maux de la cavité bucale et des gencives, les oreillons. La décoction d'écorce soulage les troubles gastro-intestinaux. Mélangée à *Tamarindus indica*, la poudre de feuille et d'écorce est un cicatrisant. La décoction de feuilles et d'écorces (mêlées à *Guiera senegalensis* et *Securinega virosa*) est utilisée contre les accès fébriles, la toux, la bronchite ; par voie externe, c'est un cicatrisant. Les décoctions de feuilles sont hémostatiques, anti-malariques, et agissent sur les troubles ophtalmologiques, gynécologiques et hépato-biliaires. La décoction de racines et de tiges se prescrit en bain de siège et en boisson contre les hémorroïdes. Les fumigations et mastication d'écorce soulagent la toux.

Pterocarpus lucens Lepr. Ex Guill. & Perr.

Arbre sahélo-soudanien, zambésien, somalien et parfois montagnard, parfois grégaire, colonisant toutes sortes de substrats : éboulis rocheux, sols squelettiques, dépressions latéritiques, zones alluviales, dunes, etc.

Les décoctions sont vermifuges (écorce) et soulagent les migraines (feuilles).

Références

- Adjanohoun (1964)
Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire centrale. Mémoire no 7, ORSTOM, Paris. 178 pp.
- Adjanohoun E. & L. Aké Asi (1967)
Inventaire floristique des forêts claires subsoudanaises et soudanaises en Côte d'Ivoire septentrionale. Ann. Univ. Abidjan, fasc. sc. 3 : 89-147.
- Adjanonoun E. & al. (1979)
Médecine traditionnelle et pharmacopée. Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques au Mali. Agence de coopération culturelle et technique. Paris. 291 pp.
- Adjanonoun E. & al. (1990)
Médecine traditionnelle et pharmacopée. Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques au Niger. Agence de coopération culturelle et technique. Paris. 250 pp.
- Aké Assi, L. (2001)
Flore de la Côte d'Ivoire : catalogue systématique, biogéographie et écologie, vol. 1. Boissiera 57. 396 pp.
- Aké Assi, L. (2002)
Flore de la Côte d'Ivoire : catalogue systématique, biogéographie et écologie, vol. 2. Boissiera 58. 401 pp.
- Aubonnier, M. (2002)
Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. CIRAD/MNHN, 2^e éd. 573 pp.
- Aubréville, A. (1950)
Flore Forestière soudano-guinéenne. Société d'Éditions géographiques, Maritimes et coloniales. Paris. 523 pp.
- Aubréville, A. (1957)
Accord à Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation. Bois et Forêts des Tropiques, 51 : 23-27.
- Aubréville, A. (1965)
Principe d'une classification des formations végétales tropicales. Adansonia, sér. 2, 153-196.
- Aubréville, A. (1971)
Vocabulaire de biogéographie appliquée aux régions tropicale. Adansonia, sér.2, 439-497
- Audry P. et C. Rossetti (1962)
Observations sur les sols et la végétation en Mauritanie du sud-est et sur la bordure adjacente du Mali. Prospection Ecologique. Etudes en Afrique Occidentale. FAO. Rome. 267 pp.
- Audru, J. & al. (1994)
Les Plantes Vasculaires de la République de Djibouti. Flore Illustrée. CIRAD, Département d'Elevage et de Médecine Vétérinaire. Volumes 1, 2.1 et 2.2.
- Burgess, N. & al. (2004)
Terrestrial Ecoregions of Africa and Madagascar. A conservation assessment. World Wildlife Fund. Island Press. 501 pp.
- Chevallier, A. (1933)
Le territoire botanique de l'Afrique tropicale nord-occidentale et ses subdivisions. Bull. Soc. Bot. Fr., 80 : 4-26.
- Dalziel, J.M. (1937)
The useful plants of West Tropical Africa. An appendix to the Flora of West Tropical Africa. The Crown Agents for the Colonies. London, S.W.1. 612pp.
- Demissew, S & al. (2005)
Diversity and endemism of the western Ethiopian escarpment – a preliminary comparison with other areas of the Horn of Africa
In : Friis, I. & H. Balslev, Plant diversity and complexity patterns : local, regional and global dimensions. Proceedings of an international symposium. Biologiske Skrifter 55. Royal Danish Academy of Sciences and letters. Copenhagen, Denmark. 603 pp.
- Duchauffour, P. (1970)
Précis de pédologie. Masson, Paris. 481 pp.
- Fortin, D. & al. (2000)
Plantes médicinales du Sahel. Série Etudes et Recherches no 187-188-189. Enda-Éditions. Dakar. 280 pp.
- Frederiksen, P. & J.L. Laweson (1992)
Vegetation types and patterns in Senegal based on multivariate analysis of field and NAOO-AVHRR satellite data. J. Veg. Sc. 3 : 535-544.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Friis, I. (1992)
Forests and Forest Trees of Northeast Tropical Africa. Their natural habitats and distribution patterns in Ethiopia, Djibouti and Somalia. Royal Botanic Gardens, Kew.
Kew Bulletin Additional Series XV. 396 pp.
- Friis, I. & K. Vollesen (2005)
Flora of the Sudan-Uganda Border area East of the Nile. 2. Catalogue of vascular plants, 2nd part, vegetation and phytogeography. Biologiske Skrifter 51 (2) : 399-855
- Friis, I. & al. (2005)
Patterns of plant diversity and endemism in the Horn of Africa *In* : Friis, I. & H. Balslev, Plant diversity and complexity patterns : local, regional and global dimensions. Proceedings of an international symposium. Biologiske Skrifter 55.
Royal Danish Academy of Sciences and letters. Copenhagen, Denmark. 603 pp.
- Gaston, A. (1981)
La végétation du Tchad (Nord-Est et Sud-Est du lac Tchad). Thèse de doctorat, Université de Paris XII. 333 pp.
- Gillet, H. (1968)
Tchad et Sahel tchadien. Cons. Veg. Afr. South of the Sahara, Symp. AETFAT, Acta phyt. Suecica 54 : 54-58.
- Guillaumet, J.L. & E. Adjanohoun (1971)
La végétation de la Côte d'Ivoire *In* Le Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. ORSTOM, Paris. 161-263.
- Guinko, S. (1984)
Sur la Végétation de la Haute Volta. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux III. 2 tomes.
- Keay, R.W.J. (1953)
Isobertia woodlands in Nigeria and their flora. Lejeunia 16: 17-26.
- Kerharo, J. & J.G. Adam (1973)
La pharmacopée sénégalaise traditionnelle : Plantes médicinales et toxiques. Editions Vigot frères. Paris. 1011 pp.
- Kerharo, J. & A. Bouquet (1950)
Plantes médicinales et toxiques de la Côte d'Ivoire-Haute Volta. Mission d'étude de la pharmacopée indigène en AOF. Paris. 295 pp.
- Klopper R.R. & al. (2006)
Checklist of the Flowering Plants of Sub-Saharan Africa. An index of accepted names and synonyms. Southern African Botanical Diversity Network (SABONET) Report No 42. 894 pp.
- Knapp, R. (1974)
Die Vegetation von Afrika. Vegetation Monographien der einzelnen Grossräume. Band 3. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 626 pp.
- Kuchar, P. (1986)
The plants of Somalia : an overview and checklist, CRDP Technical report series, no 16, *In* : Louis Boger International and Central Rangelands Development Project. National Range Agency. Mogadishu. 335 pp.
- Lawson, J.E. (1995)
Studies of woody flora and vegetation in Senegal. Opera Botanica 125. 172pp.
- Lebrun, J.P. (1977)
Elements pour un Atlas des Plantes vasculaires de l'Afrique sèche, vol. 1. Institut d'Elevage et de Médecine vétérinaire des Pays tropicaux, Etude botanique n° 4.
- Lebrun, J.P. (1979)
Elements pour un Atlas des Plantes vasculaires de l'Afrique sèche, vol. 2. Institut d'Elevage et de Médecine vétérinaire des Pays tropicaux, Etude botanique n° 6.
- Lebrun J.P. (1998)
Catalogue des plantes vasculaires de la Mauritanie et du Sahara Occidental. Boissiera 55. 322 pp.
- Lebrun J.P. (2001)
Introduction à la Flore d'Afrique. Cirad, Ibis Press. 155 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (1991)
Enumération des Plantes à Fleurs d'Afrique Tropicale. Vol. 1 : Généralités et Annonaceae à Pandaceae. Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève. 249 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (1992)
Enumération des Plantes à Fleurs d'Afrique Tropicale. Vol. 2 : Chrysobalanaceae à Apiaceae. Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève. 257pp.

- Lebrun, J.P. & A. Stork (1993)
Énumération des Plantes à Fleurs d'Afrique
Tropicale. Vol. 3 : Monocotylédones :
Limnocharitaceae à Poaceae.
Conservatoire et Jardin Botaniques
de la Ville de Genève. 341 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (1997)
Énumération des Plantes à Fleurs d'Afrique
Tropicale. Vol. 4 : Gamopétales :
Clethraceae à Lamiaceae.
Conservatoire et Jardin Botaniques
de la Ville de Genève. 712 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (2003)
Tropical African Flowering Plants, Ecology
and distribution. Vol. 1 Annonaceae-Balanitaceae.
Conservatoire et Jardin Botaniques
de la Ville de Genève. 797 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (2006)
Tropical African Flowering Plants,
Ecology and distribution.
Vol. 2 Euphorbiaceae-Dichapetalaceae.
Conservatoire et Jardin Botaniques
de la Ville de Genève. 306 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (2008a)
Tropical African Flowering Plants, Ecology
and distribution. Vol. 3 Momosaceae-Fabaceae
(incl. Derris). Conservatoire et Jardin Botaniques
de la Ville de Genève. 325 pp.
- Lebrun, J.P. & A. Stork (2008b)
Tropical African Flowering Plants,
Ecology and distribution. Vol. 4 Fabaceae
(Desmodium-Zornia) Conservatoire et Jardin
Botaniques de la Ville de Genève. 289 pp.
- Le Houérou, H.N. (2007)
Bioclimatology and Biogeography of Africa.
Springer Verlag Berlin Heidelberg. 241 pp.
- Lézine A-M. & al. (2009)
Are modern pollen data representative
of west Africa vegetation ?
Review of Palaeobotany and Palynology 156 :
265-276
- Linder H.P. & al. (2005)
A numerical re-evaluation of the subsaharian
phytochoria of mainland Africa
In : Friis, I. & H. Balslev, Plant diversity and
complexity patterns : local, regional and global
dimensions. Proceedings of an international
symposium. Biologiske Skrifter 55.
Royal Danish Academy of Sciences and letters.
Copenhagen, Denmark. 603 pp.
- Miège, J. & A. (1976)
Aperçu phytogéographique
sur la Basse-Casamance.
Origine des Flores Africaines et Malgaches.
Vol. 2. Boissiera 24b : 461-471.
- Monnier, Yves (1981)
La poussière et la cendre. Paysages, dynamique
des formations végétales et stratégie des sociétés
en Afrique de l'Ouest. Agence de coopération
culturelle et technique. 248 pp.
- Monod, T. (1957)
Les grandes divisions chorologiques
de l'Afrique. Rapport présenté à la réunion
de spécialistes sur la phytogéographie.
(Yangambi, 29 juillet-8 août 1956).
Londres. 146 pp.
- Neuwinger, H.D. (2000)
African Traditional Medicine.
A dictionary of Plant Use and Applications.
Medpharm GmbH Scientific Publishers.
Stuttgart. 589pp.
- Pias, J. (1970)
La végétation du Tchad.
Ses rapports avec les sols.
Variations paléobotaniques au Quaternaire.
Travaux et Documents de l'ORSTOM.
ORSTOM. Paris. 47 pp + une carte 1/500'000.
- Poilcot, P. (1999)
Les Poaceae du Niger.
Boissiera 56. 766 pp.
- Quézel, P.
La végétation du Sahara, du Tchad
à la Mauritanie. Geobotanica selecta, Band II.
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 355 pp.
- Roberty, G. (1940)
Contribution à l'étude phytogéographique
de l'Afrique Occidentale Française.
Candollea 8 : 84-134.
- Schnell, R. (1976)
Introduction à la Phytogéographie
des pays tropicaux. 3. La Flore et la Végétation
de l'Afrique tropicale, 1^{re} partie.
Bordas, Paris. 459 pp.
- Schnell, R. (1977)
Introduction à la Phytogéographie
des pays tropicaux. 4. La Flore et la Végétation
de l'Afrique tropicale, 2^e partie.
Bordas, Paris. 378 pp.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Sidiyene, E.A.(1996)
Des arbres et des arbustes spontanés
de l'Adrar des Iforas (Mali).
Etude ethnolinguistique et ethnobotanique.
ORSTOM/CIRAD. 137 pp.
- Trochain, J. (1940)
Contribution à l'Etude de la végétation
du Sénégal. Mémoire de l'Institut français
d'Afrique Noire, no 2. Paris. 433 pp.
- Trochain, J. (1980)
Ecologie végétale de la zone intertropicale
non désertique. Université Paul-Sabatier.
Toulouse. 468pp.
- Unesco (1973)
International classification and mapping
of vegetation. Ecology and conservation nr. 6.
English, French and Spanish. Paris. 93 pp. + map.
- White, F. (1986)
La végétation de l'Afrique.
Mémoire accompagnant la carte de végétation
de l'Afrique UNESCO/AETFAT/UNSO.
ORSTOM. UNESCO. 384 pp. 4 cartes.
- Wickens, G.E. (1976)
The Jebel Marra (Sudan Project).
Origine des Flores Africaines et Malgaches.
Vol. 2. Boissiera 24b : 535.
- Wickens, G.E. (1977)
The flora of Jebel Marra (Sudan Republic)
and its geographical affinities.
Kew Bul. Add. Ser., 5 : 1-368.
- Wittig, R.& S. Guinko (1998a)
Etudes sur la Flore et la végétation
du Burkina Faso et des pays avoisinants
Vol. 3. Studien zur Flora und Vegetation
von Burkina Faso und seiner nachbarländern.
Vol. 3. Frankfurt et Ouagadougou.
88 pp.
- Wittig, R.& S. Guinko (1998b)
Etudes sur la Flore et la végétation
du Burkina Faso et des pays avoisinants.
Vol. 4. Studien zur Flora und Vegetation
von Burkina Faso und seiner nachbarländern.
Vol. 4. Frankfurt et Ouagadougou.
44 pp.

Les champignons mycorhiziens : une composante majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux

R. DUPONNOIS, A.M. BÂ, Y. PRIN,
E. BAUDOIN, A. GALIANA & B. DREYFUS
IRD. Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM).
Campus International de Baillarguet. Montpellier. France

Introduction

La restauration et la préservation de la biodiversité (« la diversité de la vie sur terre ») constituent des priorités dans l'élaboration des stratégies de lutte contre la pauvreté et de développement durable au niveau planétaire. En effet, la diversité biologique est assujettie actuellement à des changements drastiques sans précédent conduisant à une réduction de la richesse biologique terrestre dont les pays du Sud sont les principales victimes (*Millennium Ecosystem Assessment*, 2005). La biodiversité participe, directement ou indirectement, sous différentes formes au bien-être de la biosphère et en particulier de l'homme : alimentation ; régulation de la qualité des sols de même que de la qualité et de la quantité des eaux ; médecine ; fibres ; matériaux de construction ; énergie et autres ressources renouvelables ; recyclage des éléments minéraux ; résilience des écosystèmes ; régulation climatique ; éducation et culture ; assurance écologique, sociétale, contre les risques et incertitudes associés aux changements globaux en cours ; etc.

Parmi les composantes de la biosphère, les formations végétales sont particulièrement sensibles à ces changements globaux. Les dégradations des communautés végétales, tant au niveau qualitatif (perte de diversité) que quantitatif (baisse de productivité) engendrent des dysfonctionnements significatifs dans le biofonctionnement des écosystèmes qui, à terme, ne permettent plus au couvert végétal d'assurer sa pérennisation (Ex : régénération naturelle) et son développement. Cette capacité à supporter des perturbations externes d'origine naturelle (facteurs biotiques ou

abiotiques) ou anthropiques (surexploitation des ressources naturelles, pollution, etc.) a été nommée « capacité de résilience ». Le concept de résilience écologique est défini comme étant le pouvoir d'un écosystème à supporter diverses perturbations et à adopter différentes stratégies pour recouvrer certaines de ses propriétés originelles (fonctions, structure, composition, etc) (Peterson *et al.*, 1998). Le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes terrestres sont fonction des caractéristiques du couvert végétal (diversité et structure) (Tilman & Downing 1994 ; Tilman *et al.*, 1996). Toutefois, les mécanismes écologiques assurant le maintien et le renouvellement de la diversité spécifique et de la structure de la strate végétale sont encore mal connus et leur interprétation est généralement réduite à la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, aux interactions interspécifiques, à la pression exercée par les herbivores, etc (Tilman, 1988). Plus récemment, il a été démontré que la microflore tellurique jouait un rôle clé dans les processus assurant la co-existence des plantes mais également la dynamique de l'écosystème et sa productivité (Janos, 1980 ; van der Heijden *et al.*, 1998). Au sein des communautés microbiennes peuplant le sol figurent les microorganismes symbiotiques qui contractent des relations étroites avec les plantes en leur assurant en particulier une nutrition minérale (N et P) nécessaire au développement des espèces végétales. En ce qui concerne les symbiotes fongiques (champignons mycorhiziens), leur impact sur la plante hôte ne se limite pas à une amélioration de l'acquisition de minéraux (micro et macro-éléments) par le végétal mais ces symbiotes exercent également une pression sélective sur les microorganismes saprophytes du sol tant au niveau de leur diversité génétique que de leur diversité fonctionnelle (Klett *et al.*, 2005) afin de constituer un complexe trophique associant le symbiote, la microflore mycorrhizosphérique et la plante. Ils ont aussi un rôle significatif dans l'organisation spatiale et temporelle de l'évolution de l'écosystème. En conséquence, ces microorganismes symbiotiques et plus particulièrement les champignons mycorhiziens, peuvent être considérés comme des composantes clés dans les mécanismes biologiques assurant la capacité de résilience d'un écosystème et doivent être considérés au même titre que le choix de la plante dans les stratégies de réhabilitation des sols dégradés.

L'objectif principal de cet article sera de présenter les différents types de symbioses mycorhiziennes et de montrer l'utilité de la maîtrise de l'inoculation mycorhizienne contrôlée pour optimiser les opérations de reboisement en milieu tropical.

La symbiose mycorhizienne

Généralités

Les mycorhizes sont des « unions durables » résultant de l'association entre les racines des végétaux et certains champignons du sol. Chaque union est basée sur des échanges réciproques. Les mycorhizes constituent des partenaires essentielles dans la relation sol – plantes – microorganismes. En effet, certaines espèces végétales ne peuvent

croître normalement sans leur symbiote fongique dont elles sont fortement dépendantes et avec qui elles ont co-évoluées (Janos, 1980 ; Hetrick, 1984 ; Brundrett, 1991 ; Gobat *et al.*, 2003).

Le nouvel organe mixte est formé de tissus de la plante hôte et du champignon mycorhizien et chaque partenaire optimise son développement grâce à cette symbiose. Les racines de plus de 80 % des espèces de plantes vasculaires présentent ou sont susceptibles de présenter des symbioses mycorhiziennes. La symbiose mycorhizienne est donc un phénomène général chez les plantes à l'exception de quelques familles comme les *Brassicaceae*, les *Caryophyllaceae*, les *Cyperaceae*, les *Juncaceae*, les *Chenopodiaceae* et les *Amaranthaceae* qui présentent très peu d'associations mycorhiziennes (Strullu, 1991 ; Norman *et al.*, 1995). La fonction de la mycorhize est primordiale dans tout ou partie du cycle de la plante hôte, surtout mais non exclusivement pour la nutrition. Le champignon profite des ressources carbonées synthétisées par la plante *via* la photosynthèse et qui sont indispensables à son métabolisme, à son cycle de développement et à sa fructification. En retour, les hyphes fongiques améliorent la nutrition hydrique et minérale de la plante hôte grâce à l'augmentation du volume de sol prospecté et à la production de divers enzymes extracellulaires (phosphatase, phytase) susceptibles de mobiliser du phosphore à partir de composés complexes du sol (Manjunath *et al.*, 1989 ; Leyval & Berthelin, 1993 ; Gobat *et al.*, 2003).

La présence des mycorhizes entraîne l'apparition de nouveaux compartiments biologiques dans la rhizosphère. En modifiant la physiologie de la plante et donc la sécrétion des exsudats racinaires, les mycorhizes induisent des modifications significatives dans la structure des communautés bactériennes au voisinage de ces racines mycorhizées : le terme **mycorhizosphère** a été utilisé pour désigner ce volume de sol sous influence des mycorhizes (Rambelli, 1973 ; Linderman, 1988). Des études réalisées en milieu naturel sur des plantes colonisées par des champignons mycorhiziens ont montré qu'environ 10 à 20 % du carbone fixé au niveau du végétal sont transférés aux symbiotes fongiques. Ceci représente une entrée significative d'énergie dans ce compartiment, et ce carbone jouera un rôle crucial dans la dynamique de nombreux microorganismes associés à cette mycorhizosphère (Johnson *et al.*, 2002). Par ailleurs, les hyphes mycéliens des champignons formant les associations mycorhiziennes peuvent s'étendre jusqu'à plusieurs centimètres au-delà de la surface racinaire (Rhodes & Gerdemann, 1975). Outre leur rôle dans le prélèvement des nutriments, ces hyphes favorisent la formation d'agrégats dans le sol notamment par leur exsudation. Ces structures stimulent la prolifération de microorganismes bien distincts : l'**hyphosphère** désigne ainsi le sol conditionné par ce réseau d'hyphes (Rambelli, 1973 ; Linderman, 1988).

La richesse du sol en phosphore est un facteur déterminant dans la mise en place de la symbiose mycorhizienne. Ratnayake *et al.* (1978) ont proposé que le mécanisme par lequel le phosphore contrôlerait la formation de cette symbiose soit lié à la perméabilité membranaire des racines. En effet, en condition de sol riche en P, les métabolites nécessaires à l'initiation et à la formation de l'association plante – champignon mycorhizien ne seraient pas exsudés en quantités suffisantes suite à une baisse de la perméabilité membranaire des racines dues à leur teneur élevée en P.

De même, Graham *et al.* (1981) ont indiqué que les champignons mycorhiziens, en améliorant la nutrition phosphatée de la plante, réduisaient également les quantités d'exsudats racinaires libérés dans la rhizosphère du fait d'une diminution de la perméabilité des membranes racinaires. En revanche, Leyval & Berthelin (1993) et Grayston *et al.* (1996) observent plutôt une augmentation de l'exsudation racinaire en présence des mycorhizes. Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer ce mécanisme : une plus grande allocation de photosynthétats au symbiote fongique (Koch & Johnson, 1984), la production par les mycorhizes d'hormones augmentant la perméabilité racinaire (Bowen, 1994), etc.

Selon le type de champignons symbiotiques et les critères morpho-anatomiques du nouvel organe formé, deux principaux types de mycorhizes ont majoritairement été décrits en zone tropicale (Read, 1991 ; Gobat *et al.*, 2003) : les mycorhizes à vésicules et arbuscules et les ectomycorhizes.

– les **mycorhizes à vésicules et arbuscules** : elles concernent environ 95 % des taxons végétaux à mycorhizes et ce type est non visible à l'œil nu (Read, 1991). Les symbiotes fongiques sont classés dans quatre ordres : Archeosporales (Walker & Schüßler), Diversisporales (Walker & Schüßler), Glomerales (morton & Benny) et Paraglomerales (Walker & Schüßler) appartenant à la classe des Glomeromycètes (Cavalier-Smith) et à l'Embranchement des Glomeromycota (Walker & Schüßler) (Schüßler *et al.*, 2001). Ils sont distingués par leurs caractères morphologiques et structuraux ou par analyse moléculaire. Le genre *Glomus* est généralement le plus représenté en termes d'espèces dans les sols des agrosystèmes en Afrique de l'Ouest, probablement à cause de sa capacité d'adaptation aux sols dégradés (Bâ *et al.*, 1996 ; Dalpé *et al.*, 2000). Ces champignons sont des symbiotes obligatoires non cultivables en l'absence de la plante hôte. Après la germination de la spore et la formation d'un tube germinatif, l'hyphe qui en résulte entre en contact avec la racine de la plante hôte et différencie un appressorium. À son tour, l'appressorium différencie un hyphe d'infection qui s'insinue entre les cellules épidermiques et corticales de la racine où des structures d'échange (arbuscules) et de réserve (vésicules) se développent. Néanmoins, la formation de vésicules n'est pas observée chez tous les groupes développant ce type de symbiose. Des spores sont également différenciées dans le sol et dans les racines, et sont utilisées comme structure de référence pour l'identification morpho-anatomique des espèces. Ce sont des structures unicellulaires, de forme généralement globoïde, à paroi épaisse formée de plusieurs couches de différentes textures, reliées au réseau filamenteux par un hyphe suspenseur. L'infection par les endomycorhizes ne modifie pas la morphologie globale des racines.

– les **ectomycorhizes** : la symbiose ectomycorhizienne concerne 3 à 5 % des plantes vasculaires et se rencontre principalement chez les dicotylédones. Dans ce cas, les partenaires fongiques sont des champignons supérieurs, Basidiomycètes et Ascomycètes, qui peuvent fructifier et une première identification peut être basée sur la morphologie des carpophores. Certains de ces champignons sont cultivables en l'absence de leur plante hôte.

La symbiose ectomycorhizienne entraîne d'importantes modifications dans la morphologie racinaire : les poils absorbants disparaissent et un manteau d'hyphe, appelé « manteau fongique », entoure les racines nourricières. De ce manteau partent des hyphe qui s'insèrent entre les cellules corticales de la racine pour

former le « réseau de Hartig ». Vers l'extérieur, des hyphes prolifèrent à partir du manteau fongique et colonisent le milieu environnant en formant le « réseau extramatriciel » (Hampp *et al.*, 1999).

Dans les écosystèmes tropicaux, au sud du Sahara en particulier, les associations endomycorhiziennes sont majoritaires (Ducouso & Thoen, 1991) et le type ectomycorhizien se retrouve principalement chez les *Caesalpinioideae*, les *Dipterocarpaceae*, les *Euphorbiaceae*, les *Fabaceae*, les *Proteaceae*, les *Gnetaceae*, les *Sapotaceae*, les *Sarcolaenaceae*... (Thoen & Bâ, 1989 ; Thoen & Ducouso, 1989 ; Sanon *et al.*, 1997 ; Diédhiou *et al.*, 2005). Des auteurs ont observé que les Acacias sahéliens (*Faidherbia albida*, *A. nilotica*, *A. raddiana*, *A. senegal* et *A. seyal*) ne formaient que des associations mycorhiziennes à arbuscules (Ducouso & Thoen, 1991 ; Diop *et al.*, 1994 ; Manga, 2005).

Les champignons mycorhiziens dans les agrosystèmes : leur rôle écologique

Le rôle majeur des mycorhizes est le prélèvement et le transport vers la plante des éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le phosphore (Rhodes & Gerdemann, 1975 ; Bolan, 1991 ; Gianinazzi & Schüepp, 1994 ; Duponnois *et al.*, 2005a ; Lambers *et al.*, 2008). En effet, selon le pH du sol, cet élément se retrouve en grande partie associé au fer, à l'aluminium ou au calcium sous des formes de phosphates difficilement disponibles pour les plantes (Hinsinger, 2001). L'exploration d'un plus grand volume du sol et la possibilité de solubilisation des minéraux primaires par les mycorhizes devraient ainsi permettre une meilleure nutrition phosphatée des plantes (Manjunath *et al.*, 1989 ; Landeweert *et al.*, 2001).

Cette amélioration de l'acquisition des nutriments inorganiques par les mycorhizes concerne également N, K, Mg, Na, S, B, Br, Cl, Cu, Cr, Cs, Co, Fe, Mo, Mn, Ni, Si, Zn (Caris *et al.*, 1998 ; Duponnois & Bâ, 1999 ; He & Nara, 2007). Par ailleurs, il a été démontré que les associations mycorhiziennes pouvaient jouer un rôle significatif dans la décomposition et la minéralisation des matières organiques végétales et mobiliser les nutriments au bénéfice de la plante hôte (Tarafdar & Rao, 1997 ; Pare *et al.*, 2000 ; Hodge *et al.*, 2001 ; Gobat *et al.*, 2003 ; Lambers *et al.*, 2008). He & Nara (2007) ont même suggéré que les mycorhizes pourraient jouer un rôle fondamental dans la réduction de la malnutrition humaine du fait que de nombreux nutriments se retrouvaient dans la biomasse des plantes mycorhizées (biofortification) et pourraient alimenter l'organisme humain.

L'amélioration de la nutrition hydrique des plantes par l'intermédiaire des mycorhizes a aussi été notée *via* ce plus grand volume de sol exploré par les hyphes mycorhiziens (Garbaye, 2000 ; Auge, 2001).

De nombreux autres résultats indiquent par ailleurs, un effet bioprotecteur des mycorhizes : une réduction ou même une inhibition de l'effet négatif de certains agents phytoparasitaires (Smith, 1987 ; Duponnois *et al.*, 1993 ; Duponnois & Cadet, 1994 ; Newsham *et al.*, 1995 ; Azcon-Aguilar & Barea, 1996 ; St-Arnaud *et al.*, 1997) et une meilleure survie des plantes mycorhizées sur les sols pollués par les éléments traces métalliques ou par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Leyval *et al.*, 1997 ; Khan *et al.*, 2000 ; Rufyikiri *et al.*, 2000 ; Leyval & Joner, 2001 ;

Joner & Leyval, 2003). De même, une nette amélioration de la structure du sol a souvent été notée en présence des mycorhizes. Le vaste réseau d'hyphes extramatriels et la libération dans le sol par les hyphes mycorhiziens d'une glycoprotéine, la glomaline, entraîneraient une meilleure stabilisation du sol par la formation d'agrégats beaucoup plus stables (Tisdall & Oades, 1979 ; Wright & Upadhyaya, 1998 ; Rillig & Steinberg, 2002 ; Lovelock *et al.*, 2004 ; Rillig & Mummey, 2006).

Les associations mycorhiziennes jouent également un rôle clef dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes terrestres en intervenant fortement dans les relations plante - plante. En effet, l'existence d'arbres adultes supportant déjà des structures mycorhiziennes a été décrite comme un moyen très efficace dans l'établissement des jeunes plants en favorisant notamment l'infection de ces jeunes plants par les champignons mycorhiziens, donc leur survie (Newman, 1988 ; Simard & Durall, 2004). En outre, les champignons mycorhiziens favorisent la co-existence entre plusieurs espèces végétales, améliorant ainsi la productivité et la biodiversité végétales dans ces écosystèmes (van der Heijden *et al.*, 1998a,b ; Gobat *et al.*, 2003 ; Hart *et al.*, 2003 ; Silvertown, 2004 ; Sanon *et al.*, 2006 ; Kisa *et al.*, 2007). Des auteurs ont même suggéré une translocation de métabolites *via* un pont mycélien créé par le réseau d'hyphes connectant plusieurs plantes de la même et d'espèces différentes (Smith & Read, 1997 ; Robinson & Fitter, 1999 ; Gobat *et al.*, 2003 ; Yao *et al.*, 2003 ; Simard & Durall, 2004), avec le cas particulier de la mycohétérotrophie où des plantes non chlorophylliennes (Orchidées, Ericacées) sont nourries par leurs congénères photosynthétiques *via* ce réseau mycélien (Leake, 2004 ; Selosse *et al.*, 2006). Par ailleurs, les associations mycorhiziennes sont fortement impliquées dans les successions végétales : ainsi, sur certains sols pauvres aussi bien en éléments nutritifs qu'en propagules mycorhiziennes, les espèces végétales dépendant peu de cette symbiose vont s'installer. Par la suite, avec l'enrichissement du sol en structures mycorhiziennes, les espèces plus mycotrophes prennent la relève avec une forte corrélation positive entre les biodiversités fongique et végétale (Reeves *et al.*, 1979 ; Janos, 1980 ; van der Heijden *et al.*, 1998a, Hart *et al.*, 2003). En revanche, il faut aussi noter que certaines espèces pionnières très mycotrophes s'installent en début de succession végétale sur des sols dégradés et favorisent par la suite le développement d'autres espèces végétales *via* un effet « plante nurse » (Azcon-Aguilar *et al.*, 2003).

L'utilisation de la symbiose mycorhizienne dans les opérations de reboisement : exemple des champignons ectomycorhiziens

Dans les régions tempérées, les champignons ectomycorhiziens améliorent de façon remarquable la croissance et la nutrition minérale des arbres (Smith & Read, 2008). Ils permettent aussi aux arbres de mieux résister à certaines maladies racinaires et d'exploiter au mieux les ressources en eau.

Dans les régions tropicales naturelles, il existe en général très peu de données équivalentes sur le rôle des champignons ectomycorhiziens pour le développement des essences endémiques d'Afrique tropicale et d'Asie du Sud-Est (Bâ *et al.*, 1999 ; Bâ *et al.*, 2002 ; Diédhiou *et al.*, 2005 ; Ramanankierana *et al.*, 2007). Mais pour certaines essences tropicales introduites comme les pins, les eucalyptus et les acacias australiens, de nombreuses données sont disponibles aussi bien dans leur aire d'origine que dans les zones d'introduction (Garbaye *et al.*, 1988 ; Dell & Malacjczuk, 1997 ; Duponnois *et al.*, 2005, 2007 ; Dell *et al.*, 2002 ; Chen *et al.*, 2000a, 2006).

Dans les régions tropicales, deux situations pédoclimatiques sont généralement observées : les zones tropicales humides (forêt dense et galerie forestière) et les zones tropicales sèches (forêt claire, savane sèche et steppe aride) (Garbaye *et al.*, 1988). Quand la ressource en eau est peu limitante (milieu tropical humide), la stratégie sylvicole vise à obtenir une production de biomasse optimale en améliorant le matériel végétal par le choix des provenances et du matériel clonal. Ensuite la fertilité des sols est améliorée en ayant recours à des engrais et/ou des microorganismes symbiotiques (Garbaye *et al.*, 1988). Ces plantations industrielles (Ex : plantations de pins en Afrique du Sud et au Congo, d'*Acacia mangium* en Indonésie, d'*Eucalyptus* spp. au Brésil) contribuent significativement à la production mondiale de pâte à papier. Pour les essences forestières qui ont longtemps co-évolué avec des champignons et des bactéries dans un continent éloigné, le problème est d'évaluer le bénéfice que ces arbres peuvent tirer de l'environnement microbien de la zone d'introduction. En conséquence, la connaissance du statut symbiotique des essences et de leur compatibilité fonctionnelle vis-à-vis de la microflore native du milieu est une condition nécessaire pour la réussite des plantations.

Lorsque les sols sont carencés en éléments nutritifs mais où le déficit hydrique limite la production ligneuse, le reboisement revêt une importance toute particulière car il fournit l'essentiel des moyens de subsistance pour les populations locales (Ex : protection des sols, bois de chauffe, nourriture). Dans ce contexte de sylviculture de survie, le matériel végétal doit être sélectionné en fonction des contraintes abiotiques (Ex : stress hydrique, salinité, etc.) et il s'agit également d'optimiser les symbioses fixatrices d'azote et mycorhiziennes afin que les arbres utilisent au mieux les ressources disponibles en eau et en éléments minéraux (Smith & Read, 2008). En Afrique, les reboisements sont généralement réalisés avec des essences à croissance rapide comme les Légumineuses, les Casuarinaceae et les Myrtaceae. Afin d'optimiser le rôle de la symbiose mycorhizienne, il convient de sélectionner des symbiotes fongiques performants quant à leur effet sur la croissance de la plante hôte.

Dans cet article, les principaux résultats acquis sur la mycorhization contrôlée en Afrique de l'Ouest de certaines essences introduites (pin, eucalyptus, filao, acacias australiens) seront exposés. Ils concernent certaines essences introduites (pin, eucalyptus, filao, acacias australiens).

Les Pinaceae

En Afrique, les pins tropicaux utilisés en plantation proviennent d'Asie du Sud-Est (Ex : *P. kesiya*), des Caraïbes (Ex : *P. caribaea*), d'Amérique centrale (Ex : *P. oocarpa*),

et d'Amérique du Nord (Ex : *P. radiata*). *P. caribaea* est une des espèces de pins les plus répandues en Afrique de l'Ouest. Les pins sont associés à des champignons ectomycorhiziens dont ils dépendent très fortement pour leur croissance (Delwaulle *et al.*, 1987). La plupart des champignons montrent une spécificité très étroite vis-à-vis des pins (Ex : *Rhizopogon* spp., *Suillus* spp.), mais d'autres symbiotes fongiques (Ex *Pisolithus tinctorius*) présentent une spécificité d'hôtes beaucoup plus large (Marx, 1977 ; Molina & Trappe, 1994 ; Martin *et al.*, 2002).

Les premiers essais d'introduction de pins (*P. radiata*) ont été réalisés au Kenya en 1902 (Mikola, 1970). Toutefois les plants étaient chlorotiques et dépassaient rarement le stade de la pépinière. Cet échec dura jusqu'en 1910 quand sur les conseils du "Royal Botanic Gardens" à Kew en Angleterre, du sol de vieilles plantations de pins contenant des propagules (ex : spores, fragments de racines) de champignons ectomycorhiziens fut importé d'Afrique du Sud. Cet inoculum naturel fut utilisé avec succès dans les pépinières de pins au Kenya avant que cette pratique d'inoculation ne se répande en Afrique de l'Est (Mikola, 1970). En Afrique de l'Ouest, les premiers succès de plantations de pins (Ex : *P. kesiya*) ont été enregistrés à Dalaba en Guinée en 1914 (Delwaulle *et al.*, 1987). Comme en Afrique de l'Est, l'utilisation du sol de vieilles plantations a permis la réussite des essais d'introduction de cette essence au Cameroun, au Congo, au Nigeria, au Liberia, en Côte d'Ivoire et au Ghana (Momoh & Gbadegesin, 1980 ; Marx, 1980 ; Delwaulle *et al.*, 1987). Toutefois, les modalités selon lesquelles les champignons associés aux pins ont été introduits en Afrique tropicale, restaient incertaines. Trois hypothèses non exclusives ont été proposées pour expliquer l'origine de l'inoculum naturel : (1) des immigrants venus d'Europe auraient introduit en Afrique de jeunes pins mycorhizés comme plantes d'ornement (2) des spores de champignons ectomycorhiziens auraient été présentes sur des graines de pins importées (3) la microflore ectomycorhizienne des pins serait native de la zone de plantation (Mikola, 1970 ; Delwaulle *et al.*, 1987). Les deux premières hypothèses sont plus probables par rapport à la troisième hypothèse car la microflore ectomycorhizienne native est en général spécifique des essences endémiques (Mikola, 1970 ; Redhead, 1979). Cela pourrait expliquer en partie l'échec des tentatives d'introduction de *P. caribaea* en Casamance, région au Sud du Sénégal la plus favorable au reboisement avec les pins (Delwaulle, 1978).

Garbaye (1991) a comparé les avantages et les inconvénients de l'utilisation des inoculums naturels (Ex : sol de vieilles plantations de pins, spores). Le coût des inoculums naturels est très attractif par rapport à celui des inoculums artificiels mais ils présentent de nombreux inconvénients comme les risques de recyclage de pathogènes. Pour que l'inoculum ait une efficacité optimale et durable, il est nécessaire d'utiliser des cultures pures de champignons sélectionnés en exploitant éventuellement leur variabilité interspécifique et intraspécifique (Lamhamedi & Fortin, 1991). De nombreux résultats expérimentaux attestent que l'inoculation avec des souches de champignons sélectionnées améliorerait significativement la croissance des pins en pépinières et plantations (Tableau 1). Par exemple les travaux de Momoh et Gbadegesin (1980) sur le pin des Caraïbes ont montré que les gains de croissance sont plus importants avec une souche de *P. tinctorius* qu'avec un inoculum naturel apporté sous forme de sol de vieilles plantations de pins. Ce type de résultat a

Tableau 1.
Ectomycorhization contrôlée de *Pinus caribaea* introduit en Afrique de l'Ouest et du centre

Référence	Pays	Paramètre mesuré	Champignon introduit	Augmentation de croissance par rapport aux plants non inoculés
Momoh & Gbadegesin (1980)	Nigeria	Hauteur à 30 mois	<i>Pisolithus tinctorius</i>	x 1,2 à 2,8
Ofosu-Asiedu (1980)	Ghana	Hauteur à 18 mois	<i>Pisolithus tinctorius</i> <i>Rhizopogon luteolus</i> <i>Thelephora terrestris</i>	x 0,6 à 1 x 1 x 0,8 à 1,2
Delwaulle <i>et al.</i> (1982)	Congo	Hauteur à 20 mois	<i>Pisolithus tinctorius</i> <i>Suillus bovinus</i> <i>Suillus bevinii</i> Mycorhize de Loudima Mycorhize de Pointe-Noire	x 1,2 à 1,5 x 1,1 x 1 x 1,2 x 1
Kabre (1982)	Sénégal	Biomasse aérienne à 8 mois	<i>Pisolithus tinctorius</i>	x 1,4 à 13,5
Marx <i>et al.</i> (1985)	Liberia	Volume par ha à 3 ans	<i>Pisolithus tinctorius</i> <i>Telephora terrestris</i> Humus	x 1,5 x 1 x 1,7
Delwaulle <i>et al.</i> (1987)	Congo	Hauteur à 12 mois	<i>Pisolithus tinctorius</i>	x 1,2

également été obtenu au Congo par Delwaulle *et al.* (1982). Pourtant, dans d'autres situations, l'inoculum naturel peut être aussi efficace que le champignon introduit. Par exemple, dans certains sols du Sud du Sénégal, la présence d'actinomycètes antagonistes du champignon introduit expliquerait la supériorité de l'inoculum naturel sur la souche introduite pour la croissance du pin des Caraïbes.

En conclusion, il s'avère nécessaire d'inoculer les pins avec des souches de champignons ectomycorhiziens sélectionnées. *P. tinctorius* est un bon candidat, efficace et adapté aux conditions environnementales lorsque des pins sont introduits dans des sites où il n'existe pas de champignons ectomycorhiziens natifs compatibles. Si par contre il existe déjà de vieilles plantations de pins à proximité du lieu de reboisement, il est alors possible d'utiliser, par défaut, du sol de plantations pour assurer la survie des jeunes plants en pépinière. L'idéal est d'introduire des champignons sélectionnés qui procurent aux arbres un gain de croissance en pépinière et en plantation.

Les Myrtaceae

La famille des Myrtaceae comprend 133 genres et plus de 3800 espèces (Wilson *et al.*, 2001) et comprend deux sous-familles (Myrtoideae et Psiloxylodeae) et 17 tribus (Wilson *et al.*, 2005). Les zones d'endémisme des Myrtacées sont l'Australie, le Sud-Est asiatique et l'Amérique du Sud. Les ectomycorhizes sont observées chez les

tribus Eucalypteae et Melaleuceae constitués d'espèces appartenant respectivement aux genres *Eucalyptus* et *Melaleuca* (Wang & Qiu, 2006). Ces deux genres sont originaires du Nord-Est d'Australie, d'Indonésie orientale et de Nouvelle-Guinée. Des millions d'hectares d'eucalyptus sont plantés dans les pays tropicaux en dehors de leur aire d'origine. En Afrique tropicale, les eucalyptus sont utilisés dans des plantations clonales industrielles en République du Congo pour la production de pâte à papier et dans des petites plantations rurales (Ex : Sénégal) pour produire du bois de chauffe, du charbon de bois ou des perches utilisées pour la construction de maisons. Les eucalyptus sont également plantés au Brésil et en Inde pour la production de pâte à papier ou de charbon de bois. Ils sont répartis en cinq sous-genres : *Monocalyptus*, *Symphomyrtus*, *Corymbia*, *Eudesmia* et *Idiogenes* et 450 espèces (Chilvers, 1972). Leur nombre précis évolue au fil des études taxonomiques. La plupart des espèces utilisées en plantation forestière tropicale appartiennent au sous-genre *Symphomyrthus*.

Dans son aire de distribution naturelle, le genre *Eucalyptus* est associé à la fois à des champignons ectomycorhiziens et à des champignons mycorhiziens à arbuscules. Les espèces des sous-genres *Monocalyptus* (Ex : *E. fastigata*, *E. radiata*) et *Symphomyrtus* (Ex : *E. camaldulensis*, *E. grandis*) sont celles qui présentent le plus grand nombre de morphotypes ectomycorhiziens (Chilvers, 1972). La diversité des morphotypes observés chez les *Monocalyptus* est plus importante que celle des *Symphomyrtus* (Chilvers, 1972). Il a été suggéré que les *Monocalyptus* qui se développent dans des sols très pauvres sont plus dépendants des mycorhizes à arbuscules que les *Symphomyrthus* trouvés dans des sols relativement plus riches.

Les eucalyptus ont un cortège ectomycorhizien très diversifié comprenant des champignons épigés à large spectre d'hôtes (Ex : *Laccaria laccata*, *Scleroderma laeve*, *P. albus*) et des champignons hypogés à spectre d'hôtes plus étroit (Ex : *Hymenogaster albellus*, *Hydnangium carneum*) (Malajczuk *et al.*, 1982). Toutefois, ils ne sont pas compatibles avec des champignons ectomycorhiziens comme *Rhizopogon* spp., *Suillus* spp. et *P. tinctorius* spécifiques des pins (Ex : *P. radiata*) introduits en Australie (Malajczuk *et al.*, 1982 ; Molina & Trappe, 1994). La zone d'endémisme du genre *Pisolithus* serait l'Australie et l'Asie avec au moins cinq espèces dont deux d'entre elles, *P. microcarpus* et *P. albus*, se seraient dispersées avec les eucalyptus en Europe, Amérique du Sud, Asie et Afrique (Martin *et al.*, 2002). La variabilité interpécifique voire intraspécifique dans le genre *Pisolithus* est valorisée pour sélectionner les champignons performants sur la croissance des eucalyptus (Burgess *et al.*, 1994 b). En effet, il existe une variabilité dans la réponse des eucalyptus à l'inoculation avec des espèces voire des isolats fongiques de *Pisolithus* d'origines géographiques différentes (Burgess *et al.*, 1994 b). Ce sont les espèces fongiques australiennes qui sont les plus performantes quant à leur effet sur la croissance des eucalyptus en Australie (Burgess *et al.*, 1994 b).

Chez les eucalyptus, le rôle des mycorhizes à arbuscules est moins connu que celui des ectomycorhizes. Les mycorhizes à arbuscules ont été décrites dans les années 1930 mais c'est seulement dans les années 1980 que ce type de mycorhizes a été étudié (Asai, 1934 ; Maeda, 1954 ; Malajczuk *et al.*, 1981).

Les eucalyptus présentent des mycorhizes à arbuscules qui coexistent avec des ectomycorhizes sur le même système racinaire et parfois sur le même apex racinaire (Chen *et al.*, 2000b ; 2007). La contribution respective des deux types de mycorhizes sur la croissance des eucalyptus n'a pas encore été clairement établie (Lapeyrie & Chilvers, 1985 ; Chen *et al.*, 2000b). Cependant, d'un point de vue épidémiologique, les mycorhizes à arbuscules prédominent sur les jeunes plants tandis que les ectomycorhizes sont majoritaires sur des plants plus âgés (de Mendonça Bellei *et al.*, 1992 ; Oliveira *et al.*, 1997).

En dehors de leur aire d'origine, les eucalyptus sont principalement associés aux genres *Pisolithus* et *Scleroderma* (Mikola, 1970 ; Bakshi, 1966 ; Garbaye *et al.*, 1988 ; Thoen & Ducouso, 1989 ; Dell *et al.*, 2002 ; Chen *et al.*, 2006 ; Chen *et al.*, 2007). Certains *Pisolithus* australiens (Ex : *P. albus*, *P. microcarpus*) ont été introduits en même temps que les eucalyptus dans différents continents (Martin *et al.*, 2002). Il a aussi été montré que les eucalyptus forment des ectomycorhizes avec des souches de *Pisolithus* (Ex : *P. kisslingi*, *P. aurantioscabrosus*) indigènes de la zone de plantation en Asie (Dell *et al.*, 2002). Une autre possibilité serait que les eucalyptus d'introduction plus récente aient contracté des ectomycorhizes avec des souches de *P. tinctorius* apportées avec les pins. En conclusion, pour réussir l'introduction des eucalyptus hors de leur aire d'origine, deux stratégies peuvent être envisagées : (i) soit introduire des champignons ayant co-évolué avec cette essence dans son aire d'origine, (ii) soit avoir recours à des champignons indigènes (Garbaye *et al.*, 1988 ; Bâ, 1990). Une plantation expérimentale réalisée au Congo a permis de mesurer l'impact positif de l'inoculation par des cultures pures de *P. tinctorius* (isolat de pins d'Amérique du Nord) sur la production de biomasse (+ 30%) par rapport à un hybride (*E. urophylla* x *E. kirtoniana*) en pépinière (Garbaye *et al.*, 1988). La souche nord américaine, pourtant efficace la première année, a ensuite été éliminée par un scléroderme local. Cette souche de *Pisolithus* semble donc être moins adaptée que la souche locale aux eucalyptus et/ou aux conditions pédoclimatiques de la région. En conséquence, l'introduction des eucalyptus tropicaux est à envisager avec des souches fongiques australiennes. Cette hypothèse est à prendre en compte lorsque les champignons locaux sont peu efficaces avec les eucalyptus comme en Chine et aux Philippines où l'inoculation avec des champignons australiens sélectionnés a été nécessaire pour stimuler, d'un facteur multiplicateur de 2,5 la croissance des eucalyptus âgés de 2 ans (Dell & Malajczuk, 1997). Les *Pisolithus* et *Scleroderma* asiatiques se révèlent d'ailleurs moins performants que ceux d'Australie sur des eucalyptus en pépinière et en plantation en Asie (Dell *et al.*, 2002 ; Chen *et al.*, 2006).

En conclusion, pour optimiser les performances des plantations d'eucalyptus, la stratégie à mettre en œuvre est la suivante : (i) sélectionner du matériel génétiquement adapté à la zone de plantation en utilisant de préférence des hybrides interspécifiques plus vigoureux pour répondre aux besoins en bois de service, (ii) s'assurer de la survie des hybrides exigeants en éléments nutritifs en les « équipant » avec des souches fongiques adaptées à l'essence et au climat de la zone de plantation (Garbaye *et al.*, 1988). Les souches australiennes de *Scleroderma* et *Pisolithus* sont de bonnes candidates pour la mycorhization contrôlée des eucalyptus en dehors de leur aire d'origine (Chen *et al.*, 2006 ; Chen *et al.*, 2007).

Les Casuarinaceae

Les Casuarinaceae sont des plantes actinorhiziennes formant des nodules fixateurs d'azote avec l'actinomycète *Frankia* (Dommergues *et al.*, 1999). Elles se subdivisent en 4 genres et 96 espèces : *Allocasuarina* (59 espèces), *Casuarina* (17 espèces), *Ceuthostoma* (2 espèces) et *Gymnostoma* (18 espèces) (Maggia, 1991). Leur aire d'origine s'étend de l'Australie au Sud-Est asiatique.

Quelques Casuarinaceae (Ex : *Allocasuarina* et *Casuarina*) ont été introduites dans les zones tropicales et subtropicales pour lutter contre l'érosion des sols et pour produire du bois de feu. Par exemple, au Sénégal, des milliers d'hectares de *C. equisetifolia* ont été plantés, dans la zone des Niayes, le long du littoral entre Dakar et Saint-Louis, pour protéger les cuvettes maraîchères et fixer les dunes (Dommergues *et al.*, 1999).

Dans leur aire d'origine, les Casuarinaceae présentent une diversité de champignons ectomycorhiziens dont certains sont communs aux eucalyptus (Reddell *et al.*, 1986). La diversité fongique est plus importante avec *Allocasuarina* (20 genres dont *Amanita* spp., *Elaphomyces* spp., *P. tinctorius*) qu'avec *Casuarina* (*Scleroderma* spp. et *Thelephora* spp.). De plus, le genre *Casuarina* forme rarement des ectomycorhizes *sensu stricto* et en serait moins dépendant que les *Allocasuarina* (Bâ *et al.* 1987, Thoen *et al.*, 1990 ; Dell *et al.*, 1994).

Il y a peu de données sur la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules associés aux Casuarinacées dans leur milieu d'origine (Reddell *et al.*, 1986). Le genre *Gymnostoma* n'est pas associé à des champignons ectomycorhiziens, mais possède des myconodules dont le rôle est encore hypothétique (Duhoux *et al.*, 2001). Les myconodules sont des nodules colonisés par des champignons mycorhiziens à arbuscules. Par contre, il n'y a pas d'informations sur le statut mycorhizien des deux espèces de *Ceuthostoma*.

En dehors de leur aire d'origine, c'est en partie grâce à leur aptitude à évoluer en symbiose avec l'actinomycète *Frankia*, fixateur d'azote, que les Casuarinaceae ont été introduites avec succès sur les sols dunaires et les stériles miniers (Dommergues *et al.*, 1999). Il a été possible de trouver *in situ* les deux types de mycorhizes et parfois les trois symbiotes (champignons ectomycorhiziens, champignons mycorhiziens à arbuscules et *Frankia*) sur le même système racinaire de *C. equisetifolia* (Bâ *et al.*, 1987). Cependant, l'efficacité de cette quadruple symbiose pour la croissance de la plante hôte n'a pas été prouvée. Diem & Gauthier (1982) ont montré que la mycorhization par *G. mossaea* stimule la croissance, la nodulation et la fixation d'azote par *Frankia* sur de jeunes plants de *C. equisetifolia*. Il a été également démontré que des transferts d'azote sont possibles, *via* le réseau ectomycorhizien, entre la plante fixatrice d'azote *C. cunninghamiana* et la plante non fixatrice d'azote *E. maculata* (He *et al.*, 2004).

À notre connaissance, il n'y a pas d'études publiées sur la mycorhization contrôlée des Casuarinaceae en plantation. Les principales informations concernent l'effet bénéfique de la mycorhization contrôlée sur la croissance des Casuarinaceae en serre et en conditions contrôlées. Des progrès sont à faire dans ce domaine surtout si on veut que la fixation d'azote des Casuarinacées fonctionne *in situ* à son niveau d'efficacité maximal.

Les Légumineuses

La famille des Légumineuses (Fabaceae) comprend trois sous-familles : les Caesalpinioideae, les Mimosoideae et les Papilionoideae. En Afrique tropicale, on trouve des ectomycorhizes majoritairement parmi les Caesalpinioideae.

LES MIMOSOIDEAE

La sous-famille des Mimosoideae comporte environ 2800 espèces d'arbres, d'arbustes et d'abrisseaux des régions tropicales et subtropicales. Elle renferme des essences à usages multiples dont l'intérêt économique et écologique est considérable dans les systèmes agroforestiers traditionnels d'Afrique de l'Ouest. Les espèces qui possèdent des ectomycorhizes appartiennent à la tribu des *Acacieae*, au genre *Acacia* et au sous-genre *Phyllodinae*. On peut citer par exemple *A. mangium*, originaire d'Australie, à croissance rapide, qui connaît depuis ces vingt dernières années un regain d'intérêt auprès des services forestiers africains qui plantent des milliers d'hectares de sols dégradés pour répondre à la demande en bois et préserver ainsi les forêts naturelles de la pression anthropique (Cossalter, 1986). *A. mangium* est une des essences exotiques les plus plantées en Afrique de l'Ouest tout particulièrement en Côte d'Ivoire et en Guinée (Galiana *et al.*, 1996). *A. mangium* possède, outre des nodules fixateurs d'azote, des ectomycorhizes et des mycorhizes à arbuscules comme la plupart des *Phyllodinae* (Ducouso, 1991). La symbiose fixatrice d'azote d'*A. holosericea* fonctionne à son niveau d'efficacité maximale quand les deux types de mycorhizes sont présents sur les racines (Cornet & Diem, 1982).

Les acacias africains sont différents des acacias australiens par leur statut mycorhizien (Ducouso, 1991). Les acacias africains sont exclusivement associés à des champignons mycorhiziens à arbuscules dont ils dépendent fortement pour leur alimentation phosphatée (Colonna *et al.*, 1991 ; Bâ & Guissou, 1996).

Parmi les acacias australiens, certains sont uniquement à ectomycorhizes, d'autres à mycorhizes à arbuscules (Ducouso, 1991). On peut également observer les deux types de mycorhizes sur le même système racinaire chez quelques acacias. Si les champignons mycorhiziens à arbuscules ne sont pas spécifiques (la même souche peut indifféremment être associée à différentes plantes), il n'en va pas de même pour les champignons ectomycorhiziens et les rhizobia. Comme nous l'avons déjà signalé pour les pins et les eucalyptus, le problème de la spécificité revêt une importance comparable chez les acacias australiens. Dans leur aire d'origine, les acacias australiens sont, dans le meilleur des cas, naturellement associés aux trois symbiotes : rhizobium (sens large), champignon mycorhizien à arbuscules et champignon ectomycorhizien (Warcup, 1980). Contrairement aux eucalyptus, peu d'informations ont été acquises sur le cortège mycorhizien des acacias en Australie.

Les acacias australiens ont révélé une grande aptitude à s'adapter à une large gamme de sol dans leurs milieux d'introduction. Les résultats les plus spectaculaires ont été obtenus sur *A. mangium* en plantation dans des sols dégradés d'Asie (Ex : Indonésie, Malaisie, Thaïlande, Chine) et d'Afrique (e.g. Côte d'Ivoire, Tanzanie, Guinée) en partie grâce à l'inoculation avec des souches sélectionnées de *Bradyrhizobium* (Galiana *et al.*, 1991 ; Galiana *et al.*, 1996). Par contre, l'inoculation avec des

champignons mycorhiziens à arbuscules sélectionnés n'a pas donné tous les résultats escomptés probablement en raison de l'existence d'une microflore fongique native dans la zone de plantation (de la Cruz & Yantasath, 1986). Les données expérimentales sur les ectomycorhizes des acacias australiens restent très limitées et de simples observations sont encore nécessaires. En Malaisie, *Thelephora ramarioides* fructifie dans des plantations d'*A. mangium* sans pour autant que des ectomycorhizes aient été formellement observées. Des ectomycorhizes *sensu stricto* ont été, cependant, observées sur des racines d'*A. mangium* associées au champignon *Clavaria* sp. aux Philippines (Anino, 1992) et à *P. albus* au Sénégal (Duponnois *et al.*, 1998).

L'association entre acacias australiens et *P. albus* s'est révélée fonctionnelle en particulier dans des sols pauvres en P assimilable (Duponnois & Bâ, 1999 ; Duponnois & Plenchette, 2003) (Tableau 2). Néanmoins, l'effet de l'inoculation peut s'estomper après plusieurs mois de plantation d'*A. crassicarpa* malgré la présence de fructifications du champignon inoculé, *P. microcarpus* (Ducouso *et al.*, 2004). Ceci pourrait être dû à l'existence d'une microflore native tout aussi efficace que le champignon introduit. La double inoculation par *Bradyrhizobium* sp. et *G. mossaea* a été bénéfique sur *A. holosericea* en pépinière et quelques mois en plantation (Cornet & Diem, 1982).

Le cortège ectomycorhizien *in situ* des acacias australiens, en dehors de leur aire de distribution naturelle, semble limité au genre *Pisolithus* (Duponnois *et al.*, 1998). *P. albus* est l'espèce la plus commune sur les acacias et eucalyptus en plantation au Sénégal (Martin *et al.*, 2002). Cependant, les acacias australiens peuvent s'associer *in vitro* avec des champignons ectomycorhiziens natifs d'Afrique de l'Ouest (Bâ, 1990 ; Bâ *et al.*, 1994 b ; Duponnois & Plenchette, 2003) (Tableau 2). En effet, *S. dictyosporum*, associé fongique naturel d'*A. africana*, forme des ectomycorhizes en *in vitro* avec *A. holosericea* (Bâ, 1990). Les associations ainsi formées sont tout à fait fonctionnelles car on a observé des stimulations de croissance sur de jeunes plants d'*A. holosericea* inoculés avec *S. dictyosporum* (Tableau 3). Les sclérodermes africains seraient donc tout aussi efficaces que *P. albus* et probablement plus adaptés au contexte local même s'ils n'ont pas co-évolué avec les acacias australiens. Par ailleurs, des champignons ectomycorhiziens de zone tempérée comme *Boletus suillus* s'avèrent également performants sur la croissance d'*A. auriculiformis* en serre (Osonubi *et al.*, 1991).

Tableau 2.

Dépendance ectomycorhizienne de quelques espèces d'*Acacia australiens* introduits en Afrique de l'Ouest et inoculées par *Pisolithus albus* IR100 (D'après Duponnois & Plenchette, 2003).

Espèces d'Acacia	Dépendance ectomycorhizienne (%) ⁽¹⁾
<i>A. auriculiformis</i>	45,2
<i>A. eriopoda</i>	20,6
<i>A. holosericea</i>	25,2
<i>A. mangium</i>	20,1
<i>A. platycarpa</i>	31,6

⁽¹⁾ Dépendance mycorhizienne = {(biomasse totale plants inoculé – biomasse totale plant non inoculé) / biomasse totale plants inoculé} × 100 (Plenchette *et al.*, 1983).

Le choix du champignon ectomycorhizien approprié pour les acacias australiens doit se faire sur une base aussi large que possible. Une attention toute particulière est à apporter également au choix des provenances des acacias. En effet, il a été démontré que certaines provenances d'*A. mangium* sont plus dépendantes du phosphore assimilable que d'autres (Vadez *et al.*, 1995) ou présentent une dépendance mycorhizienne variable en fonction des symbiotes fongiques (Duponnois *et al.*, 2002).

Tableau 3.
Dépendance ectomycorhizienne de *A. holosericea* inoculé
par des souches de *Pisolithus* et de *Scleroderma*
(D'après Duponnois & Plenchette, 2003).

Souches ectomycorhiziennes	Dépendance ectomycorhizienne (%)
<i>Pisolithus</i> sp. SL2	46,3
<i>P. albus</i> COI007	47,5
<i>P. albus</i> COI024	41,6
<i>P. albus</i> COI032	44,9
<i>P. albus</i> IR100	54,3
<i>P. tinctorius</i> GEMAS	47,9
<i>Scleroderma dictyosporum</i> IR109	44,6
<i>S. verrucosum</i> IR500	50,2

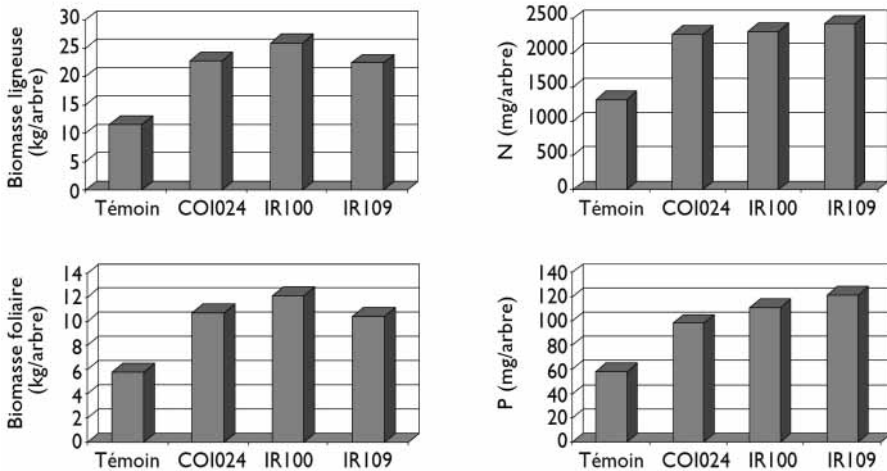


Figure 1.

Effet de l'inoculation ectomycorhizienne sur la croissance et la nutrition minérale de *Acacia holosericea* après 2 années de plantation au Sénégal.

D'après Duponnois *et al.* (2005).

Souche COI024 : *Pisolithus albus* ;

Souche IR100 : *Pisolithus albus* ;

Souche IR109 : *Scleroderma dictyosporum*.

L'inoculation contrôlée d'*A. holosericea* avec la souche *P. albus* IR100 a été bénéfique en pépinière (Duponnois *et al.*, 2005, 2007). La crise de transplantation a été notamment atténuée dans les traitements inoculés et la souche de *P. albus* introduite avait bouclé son cycle de reproduction puisque des sporophores ont été observés à proximité des arbres inoculés après 2 années de plantation (Figure 1). L'effet bénéfique de *P. albus* souche IR100 sur le développement d'*A. holosericea* a été confirmé dans des expériences de mycorhization contrôlée dans plusieurs sites au Sénégal (Duponnois *et al.*, 2007) (Tableau 4. Figures 1, 2, 3).



Figure 2.
Sporophores de *Pisolithus albus*
observés dans une plantation de *Acacia holosericea* au Sénégal sous des plants inoculés
par le champignon *P. albus* souche IR100 après 2 années de plantation.
Photo R. Duponnois



Figure 3.
Effet de *Pisolithus albus* souche IR100 sur la croissance de *Acacia holosericea*
après 2 années de plantation.
Photo R. Duponnois

Conclusion et perspectives

En Afrique de l'Ouest, les plantations forestières sont le domaine d'application privilégiée de la mycorhization contrôlée. Elles concernent principalement des essences à croissance rapide, comme les eucalyptus et les pins, pour approvisionner en bois l'industrie de la pâte à papier et pour répondre à la demande de bois de feu même si elles sont peu rentables préservant ainsi les forêts naturelles.

Le pépiniériste privé ou des services forestiers évaluent rarement le statut symbiotique des plants forestiers malgré les bénéfices potentiels de l'inoculation contrôlée sur la croissance des plants en pépinière comme en plantation. La sensibilisation des pépiniéristes est à encourager d'autant que les techniques de mycorhization contrôlée permettent d'obtenir des plants équilibrés, vigoureux et sains en réduisant notamment les traitements phytosanitaires et les fertilisants.

Ensuite les techniques de production de plants en pépinière sont à optimiser en apportant l'associé fongique approprié lorsqu'il est absent tout en économisant l'utilisation d'intrants (pesticides, engrais). Cependant, la production d'inoculum commercialisée reste un des obstacles majeurs pour la diffusion de la technique de mycorhization contrôlée. Des procédés de fabrication d'inoculum mycélien sont à valoriser puisque la demande en produits ligneux augmente en Afrique de l'Ouest. Malgré quelques inconvénients (e.g. recyclage de pathogènes), l'utilisation des spores, peu coûteuse, est à promouvoir chez les sclérodermes et les pisolithes car ces champignons produisent de grandes quantités de spores, faciles à conserver et qui germent au contact des racines.

Enfin, le choix du champignon adapté à l'essence et aux conditions pédoclimatiques est primordial pour la réussite des plantations des essences indigènes ou introduites. Le problème de la spécificité se pose lorsqu'on introduit des essences en dehors de leur aire d'origine. On peut envisager au moins deux cas de figure. Dans le premier cas où les symbiotes indigènes ne sont pas compatibles avec la plante introduite (Ex. pins), les connaissances actuelles nous orientent vers le choix des champignons ayant co-évolué avec la plante dans l'aire d'origine de celle-ci. Dans le second cas où il est possible de trouver des champignons locaux compatibles avec la plante (Ex. eucalyptus, acacias australiens) mais dont on ignore s'ils sont efficaces en plantation, il est important d'envisager l'introduction de l'associé fongique performant dans l'aire d'origine de l'essence et de le comparer avec les souches locales.

Le problème de la spécificité des souches locales vis-à-vis des essences indigènes (Ex. *A. africana*) ne se pose pas dans les mêmes termes car les souches locales sont déjà en place et ne montrent pas de spécificité d'hôtes. Il s'agit donc de les sélectionner suivant des critères d'efficacité et de compétitivité dans les conditions de pépinière et de plantation. Pour les *A. africana*, il est nécessaire de faire des essais d'inoculation dans différents sites de plantation afin d'éprouver les résultats obtenus en pépinière avec la souche locale *Thelephoroid* sp. XM002.

Une plus grande attention est à apporter aux inoculations multiples avec des champignons ectomycorhiziens, des champignons mycorhiziens à arbuscules et des rhizobiums (*Frankia* pour les Casuarinaceae) dans la mesure où la plupart des légumineuses forestières exotiques ou indigènes hébergent ces microorganismes symbiotiques.

Tableau 4.
Diamètre, hauteur et paramètres de croissance des arbres inoculés ou non par *Pisolithus albus* souche IR100 dans les différentes plantations expérimentales de *Acacia holosericea* réalisées au Sénégal.
D'après Duponnois et al. (2007).

Plantations	Sites	Temps	Paramètres de croissance								
			SD ⁽¹⁾	H	H est.	PB	SBB	WB	TB	LiB	
EC7	A	30 mois									
Témoin			9,9 a ⁽²⁾	4,39 a	4,49 a	13,2 a	11,8 a	17,9 a	42,6 a	1,7 a	
<i>P. albus</i> IR100			13,8 b	4,93 b	5,16 b	27,4 b	24,7 b	42,5 b	91,6 b	3,6 b	
EC8	B1	18 mois									
Témoin			2,7 a	2,49 a	2,9 a	0,77 a	0,64 a	0,60 a	2,11 a	0,08 a	
<i>P. albus</i> IR100			3,3 b	2,82 b	2,82 a	1,20 b	1,00 b	1,02 b	3,37 b	0,13 b	
EC9	B1	18 mois									
Témoin			2,6 a	2,43 a	2,55 a	0,71 a	0,59 a	0,55 a	1,94 a	0,07 a	
<i>P. albus</i> IR100			3,5 b	2,87 b	2,89 b	1,36 b	1,15 b	1,19 b	3,86 b	0,15 b	
EC10	B1	18 mois									
Témoin			2,5 a	2,37 a	2,51 a	0,65 a	0,54 a	0,49 a	1,77 a	0,07 a	
<i>P. albus</i> IR100			4,3 b	3,15 b	3,16 b	2,14 b	1,82 b	2,03 b	6,21 b	0,24 b	
EC11	B2	18 mois									
Témoin			5,7 a	3,63 a	3,55 a	3,96 a	3,42 a	4,24 a	11,89 a	0,47 a	
<i>P. albus</i> IR100			6,5 b	3,81 b	3,76 b	5,28 b	4,59 b	5,97 b	16,11 b	0,64 b	
EC13	A	18 mois									
Témoin			3,1 a	2,60 a	2,75 a	1,04 a	0,88 a	0,86 a	2,91 a	0,11 a	
<i>P. albus</i> IR100			6,6 b	3,81 b	3,78 b	5,46 b	4,75 b	6,21 b	16,68 b	0,66 b	

⁽¹⁾ SD: Diamètre du tronc (cm); H: Hauteur (m); H est.: Hauteur estimée selon les équations allométriques (m) (Duponnois et al., 2007); LB: Biomasse foliaire (kg per tree); SBB: Biomasse des branches (kg per tree); WB: Biomasse ligneuse (kg per tree); TB: Biomasse totale (kg per tree); LiB: Biomasse de la litière (kg m⁻²).

⁽²⁾: Pour chaque expérience, les données d'une même colonne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$).

Références

- Anino, E.O. (1992).
Natural ecto-mycorrhiza of *Acacia mangium*.
Nitrogen Fixing Tree Res. Reports 10, p. 96.
- Asai, T. (1934).
Über das Vorkommen und die Bedeutung
der Wurzelpilze in den Landpflanzen.
Japanese Journal of Botany, 7 : 107-150.
- Maeda, M. (1954).
The meaning of mycorrhiza
in regard to systematic botany.
Kumamoto Journal of Science Ser. B., 3, 57-84.
- Auge RM (2001).
Water relations, drought and vesicular-arbuscular
mycorrhizal symbiosis.
Mycorrhiza 11: 3-42.
- Azcon-Aguilar C, Barea JM (1996).
Arbuscular mycorrhizas and biological
control of soil-borne plant pathogens –
An overview of the mechanisms involved.
Mycorrhiza 6 : 457-464.
- Bâ, A.M. & Guissou, T. (1996).
Rock phosphate and mycorrhizas effects
on growth and nutrient uptake of *Faidherbia*
albida (Del.) in an alkaline sandy soil.
Agroforestry Systems 34 : 129-137
- Bâ AM, Dalpé Y, Guissou T (1996).
Les Glomales d'*Acacia holosericea*
et d'*Acacia mangium*.
Bois et Forêt des Tropiques 250 : 5-18.
- Ba, A.M., Sougoufara, B. & Thoen, D. (1987).
The triple symbiosis of *Casuarina equisetifolia*
in Senegal. In : Mycorrhizae in the next decade.
Sylvia D. M., Hung L. L., Graham J. H. (éd.).
Gainesville, États-Unis, University of Florida,
p. 121.
- Bâ, A.M., Sanon, K.B., Duponnois, R.
& Dexheimer, J. (1999).
Growth responses of *Azelia Africana* Sm.
seedlings to ectomycorrhizal inoculation
in nutrient- deficient soil.
Mycorrhiza, 9 : 91-95.
- Bâ, A.M., Sanon, K.B. & Duponnois, R. (2002).
Influence of ectomycorrhizal inoculation
on *Azelia quanzensis* Welw. seedlings
in a nutrient-deficient soil.
Forest Ecology & Management, 161 : 215-219.
- Bâ, A.M. (1990).
Contribution à l'étude de la symbiose
ectomycorhizienne chez deux essences
forestières d'Afrique intertropicale :
Azelia africana et *Uapaca guineensis*.
PhD thesis, University of Montpellier II, France.
- Bakshi, B.K. (1966).
Mycorrhiza in eucalyptus in India.
Indian Forester, 92 : 19-20.
- Bolan NS (1991).
A critical review of the role of mycorrhizal
fungi in the uptake of phosphorus by plants.
Plant & Soil 134 : 189-207.
- Bowen GD (1994).
The ecology of ectomycorrhiza formation
and functioning. *Plant & Soil* 159 : 61-67.
- Brundrett M (1991).
Mycorrhizas in natural ecosystems.
Advances in Ecological Research 21 : 171-313.
- Burgess, T., Dell, B. & Malajczuk, N. (1994).
Variation in mycorrhizal development
and growth stimulation by 20 *Pisolithus*
isolates inoculated onto *Eucalyptus grandis*.
New Phytologist, 127 : 731-739.
- Caris C, Hördt W, Hawkins H-J,
Römheld V, George E (1998).
Studies of iron transport by arbuscular
mycorrhizal hyphae from soil to peanut
and sorghum plants. *Mycorrhiza* 8: 35-39.
- Chen, Y.L., Gong, M.Q., Xu, D.P.,
Zhong, C.L., Wang, F.Z. & Chen, Y. (2000a).
Screening and inoculant efficacy
of Australian ectomycorrhizal fungi
on *Eucalyptus urophylla* in field.
Forest Research, 13 : 569-57.
- Chen, Y.L., Brundrett, M.C. & Dell, B. (2000b).
Effects of ectomycorrhizas and
vesicular-arbuscular mycorrhizas,
alone or in competition, on root colonization
and growth of *Eucalyptus globulus*
and *E. urophylla*.
New Phytologist, 146 : 545-556.
- Chen, Y.L., Kang, L.H. & Dell, B. (2006).
Inoculation of *Eucalyptus urophylla* with spores
of *Scleroderma* in a nursery in south China :
Comparison of field soil and potting mix.
Forest Ecology and Management, 222 : 439-449.

Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte

- Chen, D.M., Bastias, B.A., Taylor, A.F.S. & Cairney, J.W.G. (2007). Identification of laccase-like genes in ectomycorrhizal basidiomycètes and transcriptional régulation by nitrogen in *Piloderma byssinum*. *New Phytologist*, 157 : 547-554.
- Chilvers, G.A. (1972). Host range of some eucalypt mycorrhizal fungi. *Australian Journal of Botany*, 21 : 103-111.
- Colonna, J.P., Thoen, D., Ducousso, M. & Baji, S. (1991). Comparative effects of *Glomus mosseae* and P fertilizer on foliar mineral composition of *Acacia senegal* seedlings inoculated with *Rhizobium*. *Mycorrhiza*, 1: 35-38.
- Cornet, F. & Diem, H.G. (1982). Etude comparative de l'efficacité des souches de *Rhizobium* d'*Acacia* isolées de sols du Sénégal et effet de la double symbiose *Rhizobium-Glomus mosseae* sur la croissance de *Acacia holosericea* et *A. raddiana*. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 198 : 3-15.

JOUVE

1, rue du Docteur Sauvé - 53100 Mayenne
Imprimé sur presse rotative numérique
N° 602410J - Dépôt légal : novembre 2010

Imprimé en France

L'initiative de la Grande Muraille Verte (GMV), projet transcontinental, est une réponse de l'Afrique à la désertification, à la pauvreté et au changement climatique. Elle repose sur une approche concertée, multisectorielle, mettant en synergie des actions de lutte contre ces trois fléaux majeurs pour le continent africain. La particularité de la GMV est, tout en créant et consolidant une ligne de défense par des activités de reboisement et d'aménagement, de contribuer efficacement au développement intégré des zones rurales et d'aider à la lutte contre la pauvreté dans le cadre d'un développement durable.

Il s'agit de l'installation et de la mise en valeur intégrée d'espèces végétales à valeur économique adaptées aux terres arides et aux particularités locales, de bassins de rétention, de systèmes de production agricoles et autres activités génératrices de revenus. La GMV intègre ainsi plusieurs systèmes d'utilisation des terres, notamment des formations naturelles, des plantations artificielles anciennes ou nouvelles, des unités agro-sylvo-pastorales, des zones de parcours villageoises ou intercommunautaires, des parcs animaliers, des réserves communautaires et des couloirs de migration de faune.

Cet édifice transcontinental est une référence de modèle d'intégration sous-régional mettant en exergue une initiative originale initiée par des pays fortement assujettis aux phénomènes de désertification et de changement climatique. Il constitue un Modèle Multisectoriel de Développement Intégré des Zones Arides (MDI/ZA), dédié à la lutte contre les effets et l'avancée de la désertification, à la restauration et la mise en valeur des zones dégradées et au mécanisme de développement propre dû à sa forte capacité de séquestration de carbone.

L'ouvrage vise un large public, notamment les scientifiques, enseignants, décideurs, techniciens chargés de la mise en œuvre de la GMV, et permet d'apprécier l'originalité du projet dans son approche concertée et multisectorielle et ses résultats dans le développement intégré des zones arides à semi-arides.

Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS



Commission scientifique Grande Muraille Verte

AKPO Elie (FST/UCAD)
BA Amadou Tidiane (Univ. Ziguinchor)
CISSE Matar (DEFCS/MEPNBRLA)
DIA Abdoulaye (ANSTS/FST)
DIA Oussaynou (ANSTS)
DIALLO Ismaïla (ISRA)
DIENG NDiawar (MEPNBRLA)
DIOP Tahir Abdoulaye (FST/UCAD)
DUPONNOIS Robin (IRD)
FALL Rokhaya Daba (INP/MA)
FAYE Serigne (FST/UCAD)
GASSAMA Yaye Kéne (FST,ANSTS)
GAYE Amadou Thierno (LPA/ESP)
GUISSE Alioune (FST/UCAD)
MBOW Cheikh (FST/UCAD)
NDIAYE Ahmadou Lamine (ANSTS)
NDIAYE Gogo Banel (MEPNBRLA)
NIANG Amadou Moctar (CSE/MEPNBR)
NIANG Amsatou (DEFCS/MEPNBRLA)
SAMBOU Bienvenue (FST/UCAD)
SECK Dogo (CERAAS/ ISRA)
SECK Matar Mour (FST /UCAD)
SOUGOUFARA Bassirou (DEFCS/MEPNBR)
SY Mame Oureye (FST/UCAD)
THIAM Mouhamed (DBRLA/MEPNBRLA)
THOMAS Ibrahima (ISRA)
TOURE Assize (CSE)
TOURE Moctar (ANSTS/Expert Consultant)



Institut de recherche
pour le développement

44, bd de Dunkerque
13572 Marseille cedex 02
www.ird.fr

