

Aménagements hydrauliques innovants pour la gestion conservatoire des eaux et des sols sur le tracé de la Grande Muraille Verte

JEAN ALBERGEL
Directeur de recherche IRD, UMR 144 LISAH, Nairobi – Kenya

SALIF DIOP
Professeur à l'Université Cheikh Anta Diop,
Académie des Sciences du Sénégal et Académie africaine des Sciences
Chef de la Section des Écosystèmes
Division de l'Évaluation scientifique et de l'Alerte rapide (DEWA)
Programme des Nations unies pour l'Environnement (UNEP) Nairobi – Kenya

Introduction

De Dakar à Djibouti, la Grande Muraille Verte (GMV) traverse au nord de l'isohyète 1 000 mm les bassins versants des fleuves Sénégal, Niger, Volta, Logone, Chari et Nil. Serpente entre les parallèles 15° et 10°Nord, à peu près à mi-distance entre l'équateur et le tropique du Cancer, elle s'étend sur des versants arides ou semi-arides du Sahel, recoupe les bas-fonds de petites rivières souvent endoréiques et croise les plaines alluviales et les lits des grands fleuves, ou de leurs principaux affluents (fig. 1).

Le second objectif général assigné à la GMV est « la mise en valeur intégrée des zones dégradées du Sahel en vue d'une gestion durable des ressources naturelles » <http://www.grandemurailleverte.org>. Les deux premières ressources naturelles qui soutiennent l'ensemble des activités humaines dans la région sont l'eau et le sol (Marter and Gordon, 1996). Avec les couverts végétaux, les sols (Eswaran *et al.*, 2011) et l'eau sont les ressources naturelles qui ont connu la plus forte dégradation dans les 30 dernières années dans toute l'Afrique subsaharienne au nord de l'isohyète 1 000 mm (IAASTD, 2009).

Pour une restauration des ressources en eau et en sols en vue d'une gestion conservatoire, le projet de GMV propose en plus de la reconstitution d'un couvert végétal protecteur des aménagements de petite et moyenne hydrauliques. Dans les attendus

Le projet de « Grande muraille verte »

7 100 km de verdure du Sénégal à Djibouti pour contrer la désertification



Figure 1.

Le tracé de la Grande Muraille Verte : 7 000 km de Dakar à Djibouti.

de ce projet est noté en point 9 : « la maîtrise des ressources en eau, à travers la mise en place de bassins de rétention, de lacs artificiels et d'ouvrages hydrauliques qui contribuera à l'amélioration des systèmes de production ».

Depuis une trentaine d'années, de nombreuses expériences d'aménagements hydrauliques ont été menées par différents acteurs, qu'il s'agisse d'initiatives privées, de projets d'organisations non gouvernementales (ONG), de programmes nationaux ou régionaux financés par les bailleurs du développement en Afrique subsaharienne. La recherche agronomique d'abord puis l'ensemble des disciplines concernant la recherche pour le développement se sont intéressées, dès le début des années 1990, à ces aménagements pour analyser leurs impacts sur les systèmes de production, sur l'environnement et pour améliorer leur efficacité (Albergel *et al.*, 1993 ; Roose, 1994 ; Lavigne Delville et Camphuis, 1998). Depuis, de nombreuses études ponctuelles ou régionales sont venues confirmer, préciser ou améliorer ces premières synthèses (Bangoura, 2002 ; Vohland and Barry, 2009 ; Albergel, 2012).

Après une description des conditions géomorphologiques et hydroclimatiques de la bande de terre occupée par la GMV, ce chapitre présente les principaux aménagements de petite et moyenne hydrauliques qui ont fait leur preuve sous ces latitudes. Il s'intéresse aux aménagements de gestion conservatoire des eaux et des sols sur les versants et aux aménagements de mobilisation et d'usage de la ressource en eau des bas-fonds. En ce qui concerne les grands fleuves, leurs affluents et leurs plaines alluviales, les aménagements hydrauliques sont de grands ouvrages mis en place par les politiques nationales de mobilisation des ressources en eau pour la distribution de l'eau potable, l'irrigation et la production d'énergie. Ils ne sont pas abordés dans ce chapitre.

Le contexte naturel et humain

La GMV effectue le premier tiers de son parcours sur le bouclier ouest-africain, vieux socle pénéplané à une altitude qui ne dépasse pas 500 m. Elle démarre à l'ouest du continent sur des zones sédimentaires tertiaires et quaternaires du bassin sénégal-mauritanien. Elle traverse les formations gréseuses du précambrien supérieur qui couvrent toute la frange sud du bassin sédimentaire de Taoudénit, situé au nord-ouest du Mali, les formations métamorphiques du précambrien moyen et supérieur au Burkina Faso, puis la frange nord du bouclier nigérian. À l'est du Niger et au Tchad, elle s'étend sur les formations lacustres du pléistocène terminal et de l'holocène, reste essentiellement dans les formations sédimentaires quaternaires au Soudan. Elle rentre enfin dans la Corne de l'Afrique, au nord des montagnes éthiopiennes érigées lors de la formation de la vallée du Grand Rift, contourne le massif du Siemen, plonge vers le sud au pied de l'immense escarpement séparant les massifs montagneux de la Mer Rouge et débouche à Djibouti sur l'Océan indien (description réalisée à partir de la carte géologique de l'Afrique, G. Choubert et A. Faure-Muret, CCGM, 1990-1995).

Vu les différentes formations géologiques traversées, il est difficile de définir simplement tous les caractères géomorphologiques propres de cette longue bande de terre qui s'étend d'un océan à l'autre. On peut seulement signaler l'importance des dunes fossiles et la fréquence des mares temporaires de saison humide, qui définissent un paysage relativement homogène sur tout le parcours de la GMV. Excepté les grands fleuves d'origine allochtone cités en début de ce chapitre, le réseau hydrographique dans la GMV est constitué de cours d'eau éphémères, affluents temporaires ou débouchant dans des mares endoréiques. Les services écologiques de ces mares sont très importants et ont été étudiés dans le cadre d'un grand programme multidisciplinaire au nord du Burkina Faso (Chevallier *et al.*, 1985 ; Claude *et al.*, 1991). Certaines de ces mares retiennent de l'eau jusqu'au printemps et forment des oasis avec une végétation ligneuse abondante. Tout aménagement doit prendre en compte les services écosystémiques rendus par ces zones humides.

Les sols du Sahel africain sont caractérisés par des altérations épaisses s'intercalant entre la surface et la roche saine. Selon la classification française des sols, on distingue : (1) des sols évolués sub-désertiques et des sols isohumiques bruns subarides ou brun rouge subarides dans les régions les plus septentrionales de la GMV (sud de la Mauritanie, nord du Sénégal) ; (2) des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés lorsque la GMV suit à peu près l'isohyète 500 mm ; (3) des sols ferrugineux tropicaux lessivés dans les régions plus humides.

La circulation générale de l'atmosphère au-dessus de la GMV dépend des hautes pressions tropicales et de l'équateur météorologique, dont les migrations saisonnières déterminent les caractéristiques des flux d'air et les types de temps résultants.

En hiver boréal, l'équateur météorologique, sous l'influence de l'anticyclone du Sahara, migre vers le sud jusqu'à la latitude 4° Nord bien au sud de la GMV. L'alizé dominant est continental, saharien : l'harmattan. Il se caractérise par une grande sécheresse, des amplitudes thermiques importantes entre la nuit et le jour. Il entraîne

une très forte évaporation et évapotranspiration potentielle. L'alizé issu de l'anti-cyclone des Açores est de direction nord à nord-ouest. Il est humide, frais et parfois froid. Malgré son humidité, ce flux ne produit que rarement des précipitations, qui restent localisées sur la partie la plus occidentale (pluies d'hiver au Sénégal). Son inaptitude à engendrer des précipitations tient au fait de la position trop basse de l'inversion d'alizé. Il est responsable d'humidité qui se dépose sous forme de rosée et des journées très claires de saison sèche. Sur la Corne de l'Afrique, l'alizé de nord-est apporte une humidité dans les zones montagneuses du nord de la Somalie, où les précipitations de la fin de l'automne peuvent faire monter le total annuel à 500 mm. Sur la côte est, les vents soufflent parallèlement à la côte et limitent ces précipitations.

En été boréal, le réchauffement de l'hémisphère nord entraîne l'installation d'une dépression thermique au Sahara et l'affaiblissement de l'anticyclone des Açores, qui migre vers le nord. Dans l'hémisphère sud, l'hiver austral renforce les anticyclones qui montent également vers le nord. Le Front Intertropical prend une position extrême proche de 20° Nord. La circulation aérienne s'inverse et prend une orientation sud-ouest. L'Afrique sahélienne est alors envahie par le flux de mousson. Ce flux de mousson résulte de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène et dévié par la force de Coriolis en franchissant l'équateur. Son parcours maritime l'a chargé d'un grand potentiel d'eau précipitable. Son influence se fait sentir dans tout le Sahel : de mai à octobre, dans les régions les plus méridionales, la GMV pourra recevoir jusqu'à 800 mm de pluie certaines années ; et de juillet à septembre pour le Sahel le plus septentrional, qui ne reçoit que 200 mm au nord du Sénégal. Dans la Corne de l'Afrique, les plaines de Somalie et de Djibouti sont généralement arides malgré la proximité de l'équateur. Les vents d'ouest ont en effet perdu la plus grande part de leur humidité après avoir survolé le Sahel et le Soudan. L'ouest et le centre de l'Éthiopie, ainsi que l'extrémité sud de l'Érythrée, sont mieux exposés et reçoivent d'abondantes pluies en été (570 mm à Asmara). On peut considérer que globalement la GMV se situe dans tout son parcours entre les isohyètes 200 et 700 mm mais qu'elle se situe majoritairement entre 200 et 400 mm.

En fonction des précipitations, la végétation naturelle sur le parcours de la GMV sera une steppe à épineux plus ou moins dégradée dans ses parties les plus sèches et une brousse à parcs dans son parcours en zone humide. Le groupement végétal à *Acacia raddiana* est très répandu sur les substrats sableux dans les zones les plus sèches de la GMV. La dégradation du couvert végétal est marquée par l'extension de *Balanites Aegyptiaca* pour le couvert arboré et de *Cenchrus biflorus* (cram-cram) pour le tapis herbacé où il se substitue à *Chloris prieuri* et *Schoenefeldia gracilis*. Les parties moins arides de tracé de la GMV sont caractérisées par deux types de groupements végétaux : le groupement à *Acacia seyal* sur sols argileux et le groupement à *Combretum glutinosum* sur sol plus léger.

Sur tout le parcours de la GMV, les habitants sont surtout des éleveurs, nomades, semi-nomades ou récemment sédentarisés. Elle traverse des zones de pastoralisme transhumant (Peuls, Daza, Zaghawa, Beja, Afar, Touaregs, Baggara, Somali, Afars, etc.) avec de grands troupeaux parcourant de petites distances lors de la transhumance saisonnière. La GMV croise également des villages où la vie

sédentaire est rendue possible par les activités agricoles. Les cultures sont surtout céréalières : mil, sorgho, fonio. La culture du riz ou du maïs peut se faire dans et en bordure des bas-fonds. Les systèmes sédentaires et éleveurs cohabitent et sont en concurrence pour l'utilisation des bas-fonds et des ressources en eau. Sur les terrains défrichés, certaines espèces d'arbres sont conservées en raison de leur utilité. Les corps gras sont fournis par les fruits du karité, arbre non cultivé mais protégé. *Acacia Albida* et *Adansonia digitata* sont aussi conservés, le premier comme fixateur d'azote pour les cultures de céréales, le second pour ses produits : fruits, feuilles, écorces...

C'est dans ce cadre naturel et humain que doivent être conçus les aménagements de petite et moyenne hydrauliques.

Aménagements conservatoires de petite et moyenne hydrauliques

Dans les années 1990, de nouveaux concepts sont apparus dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Malin Falkenmark (1995) a identifié trois types d'eau :

- L'eau bleue : l'eau qui peut être stockée dans des réservoirs de surface ou pompée dans les nappes phréatiques. Les réservoirs de surface sont alimentés par le ruissellement superficiel ou par la résurgence de nappes phréatique. Les nappes phréatiques sont alimentées par la partie de l'infiltration qui n'est pas reprise par l'évapotranspiration des plantes.
- L'eau verte : l'eau stockée dans le profil des sols et directement utilisée par la végétation pour la production de biomasse
- L'eau virtuelle : l'eau contenue dans les produits échangés ou commercialisés, qu'il s'agisse de produits agricoles ou de productions manufacturées.

Les évaluations classiques des ressources en eau ne prennent pas en compte de l'eau verte, qui est une partie importante des ressources en eau sur les continents. Les besoins minimaux en eau par personne sont couramment estimés à 50 l par jour et par personne, soit $18 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{hab}^{-1}$ (Gleick, 1996) lorsque l'on ne tient pas compte de l'eau pour la production des aliments et des objets de consommation courante. Rockström (2003) estime à $1\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{hab}^{-1}$ la quantité d'eau nécessaire pour produire les aliments correspondant à un régime nutritionnellement acceptable. Si l'on considère $18 \text{ m}^3 \cdot \text{an}^{-1} \cdot \text{hab}^{-1}$ d'eau bleue nécessaire pour satisfaire les besoins élémentaires d'un homme, une quantité d'eau 70 fois supérieure est indispensable pour le nourrir et provient soit de l'eau verte, soit de l'eau virtuelle.

La conservation et la gestion de l'eau verte sont devenues un grand défi pour assurer la sécurité alimentaire. Dans ce cadre, les agences de développement ont lancé

l'idée de crédits « Eau Verte » comme moyen de paiement aux agriculteurs pour les services qui permettraient d'augmenter la disponibilité de l'eau verte.

Les crédits « Eau Verte », connus sous le nom de *Green Water Credits* (GWC), sont un mécanisme financier qui devrait permettre de rétribuer les agriculteurs ou leur donner accès au microcrédit en échange d'activités visant à améliorer la disponibilité en eau verte. Ces activités viseraient à réduire le ruissellement superficiel, source de dégradation des sols et d'envasement des lacs de barrages, et en à augmenter l'infiltration. Ces activités ne sont actuellement ni reconnues, ni rémunérées, mais offrent un potentiel d'une meilleure gestion du cycle de l'eau qui améliorerait la sécurité alimentaire, la santé publique et permettrait de prolonger la durée de vie des grands barrages. Ces crédits « Eau Verte » sont considérés comme une politique économique possible pour combattre les changements climatiques et environnementaux et s'y adapter. De modestes mesures de conservation des sols comme le labour de conservation, le paillage et les aménagements de petite et moyenne hydrauliques sont susceptibles de réduire le ruissellement et l'érosion et d'augmenter l'infiltration. Elles permettent d'améliorer les bilans en eau verte et l'accumulation d'eau bleue au travers d'une circulation souterraine. Cette circulation souterraine de l'eau permet sa purification ainsi que d'alimenter des réserves superficielles d'eau bleue dans une position basse dans la topographie sans apporter de sédiments. Comme la production de l'eau verte est associée à la production végétale, et limite l'envasement de barrages hydroélectriques, les crédits « Eau Verte » pourraient être couplés avec les crédits carbone et être négociés dans le cadre du marché du carbone dont les règles sont définies par les grands accords internationaux sur la limitation des émissions de gaz à effet de serre. (<http://www.worldchanging.com> David Zaks and Chad Monfreda, 2008).

La figure 2 présente dans la province du Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso) une coupe géomorphologique d'un paysage très courant sur l'ensemble du territoire de la GMV. En haut de forme se trouve un plateau aux sols indurés (cuirasse latéritique). Il est relié au bas-fond par un long versant de forme d'abord convexe, puis concave. Le niveau piézométrique de l'année 1989 y est représenté après une saison des pluies 1988 favorable ; la recharge de l'aquifère a été estimée à l'infiltration d'une lame d'eau de 50 mm. Il fait apparaître un creux piézométrique en mi-pente des versants qui correspond à un déficit d'alimentation de la nappe aquifère. Ce déficit local dans l'infiltration et l'alimentation hydrique de l'aquifère doit être mis en relation avec la dégradation des versants et l'existence de sols nus encroûtés sur les chanfreins qui bordent les bas-fonds (Albergel *et al*, 1993).

Cet exemple et les indications précédentes sur la nécessité d'améliorer la disponibilité en eau verte montrent que l'on doit s'intéresser de manière différente à ces trois segments de paysage. Sur le plateau, l'infiltration qui est déjà bonne sera améliorée par une bonne conservation, voire restauration des couverts arborés. La savane arborée permet la fracturation des cuirasses latéritiques et augmente la fertilité des sols pas très riches. Sur les versants, la végétation est généralement une savane arbustive très dégradée avec de nombreux champs de culture. Cette dégradation est due à une érosion hydrique et éolienne importante, facilitée par les labours et le piétinement des troupeaux. Cette dégradation conduit à de fortes érosions et à l'encroûtement

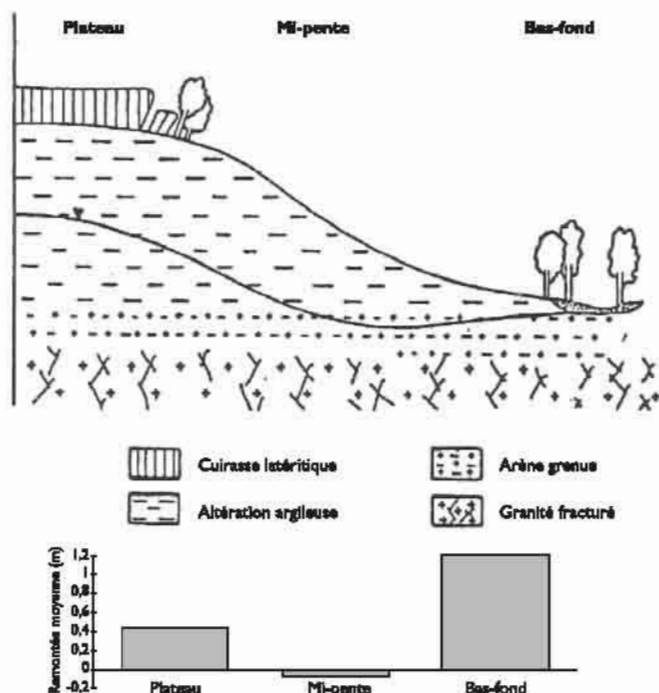


Figure 2.

Géomorphologie et position respective des aquifères dans un paysage sahélien (ex. du Yatenga) (IWACO et CIEH, 1990).

des surfaces dénudées sur lesquelles les ruissellements sont très forts et atteignent localement 90 % de la lame précipitée. Des aménagements hydrauliques sont nécessaires pour réduire le ruissellement, augmenter l'humidité localement. Ils permettent une revégétalisation raisonnée et l'augmentation des rendements agricoles. Enfin, les bas-fonds qui récupèrent à la fois les eaux de ruissellement et celles qui circulent dans la nappe phréatique sont les lieux où la remontée des eaux souterraines est la plus importante. La stratégie d'aménagement vise alors soit l'épandage des eaux pour augmenter les surfaces cultivées en saison des pluies, soit sa conservation pour l'utiliser plus tard durant la saison sèche.

Les aménagements de petite hydraulique concernent plutôt les versants, leur forme doit être adaptée au climat, à l'utilisation des terres et à leur position sur le versant. Il s'agit d'améliorer localement la disponibilité en eau verte pendant la saison des pluies. Les aménagements de moyenne hydraulique sont adaptés aux bas-fonds ou aux pieds de versants proches des bas-fonds. Ces aménagements sont utilisés pour gérer des eaux bleues dont une partie est transformée très vite en eau verte par épandage ou plus tard par irrigation.

Aménagement de versants

La dégradation s'exprime sur les versants sahéliens par une érosion hydrique importante. Dans les parties hautes des toposéquences, le ruissellement généralisé diffus est à l'origine d'un tri sélectif des particules en surface du sol et de son « glaçage » par la formation d'une croûte de ruissellement (Casenave et Valentin 1989) qui réduit l'infiltration. Aux ruptures de pentes, le ruissellement se concentre et prend de la vitesse ; il est à l'origine de ravinements et de dépôts de sables localisés ennoyant les couches fertiles. Cette dégradation hydrique aggravée par l'érosion éolienne de saison sèche entretient la chute du statut organique du sol et interdit toute amélioration de la productivité végétale naturelle ou cultivée (Sene, 1995). Des techniques simples de gestion de l'eau pluviale associées à des aménagements de petite hydraulique permettent de réhabiliter le milieu et d'améliorer les termes du bilan hydrique des cultures ou des zones de végétation naturelle. Des techniques simples de gestion de l'eau ont été mises en œuvre.

Cloisonner l'espace agricole en vue de traiter le ruissellement diffus (haies vives, cordons de pierres, banquettes en terre, fossés d'infiltration) et les écoulements concentrés (seuils filtrants, fascines anti-érosives...).

Améliorer l'infiltration par l'adoption de techniques culturales adaptées (labour en courbes de niveau, semis direct...) en zone cultivée, et par la mise en défens et la revégétalisation d'espaces de parcours aidée par des aménagements en demi-lunes, arêtes de poisson, etc.

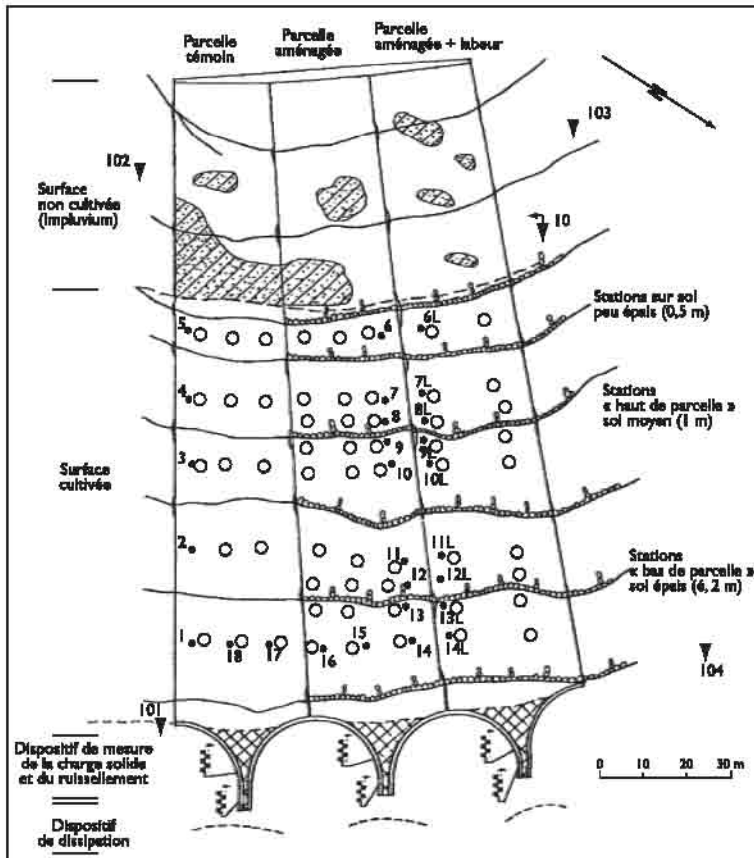
Assurer le développement d'un couvert végétal homogène et protecteur grâce à une amélioration de la fertilité des sols : utilisation de plantes fixatrices d'azote (exemple des parcs à *Faidherbia albida*, Peltier, 1996), apport de matière organique produite en bordure des champs dans des aménagements simples pour produire du compost.

La panoplie des aménagements ponctuels est bien connue et décrite dans de nombreux manuels scientifiques et/ou techniques. Un inventaire récent relativement exhaustif en est donné par Gomes *et al.* (2008) dans le cadre du programme européen AQUASTRESS, project (IP) contract n°511231-2. Nous présentons ici les impacts de ces aménagements sur les bilans de flux d'eau et de matière transportée à deux échelles différentes. La première échelle retenue est celle du champ de brousse (± 1 ha) en prenant deux exemples expérimentaux, celui de Bidi dans le Yatenga burkinabé, qui teste l'efficacité d'un aménagement en cordons pierreux (Lamachère et Serpantié, 1991), et celui de Thyse Kaymor dans le Sine-Saloum sénégalais, avec des aménagements mixtes, « bandes enherbées, traitement de ravine » (Pérez *et al.*, 1997a). La seconde échelle présentée est celle d'un aménagement intégré de versant ($\pm \text{km}^2$), mis en place également à Thyse Kaymor (Pérez *et al.*, 1998a).

Aménagement en cordons pierreux (Lamachère et Serpantié, 1991)

Les bilans en eau et en transports solides ont été suivis pendant quatre années à Bidi-Samniweogo sur trois parcelles agronomiques installées sur un versant sableux dont la plus grande pente est de 2,5 %. Elles sont contiguës, trapézoïdales, longues

de 150 mètres et larges de 20 à 32 m (fig. 3). L'amont des parcelles est constitué d'un impluvium sur un tiers de la plus grande pente (1 250 m²), les deux tiers aval sont exploités par une monoculture de mil (3 100 m²). Celle-ci est mise en place par un semis direct en poquets aux premières pluies, avec éventuellement un second semis en cas de sécheresse en début de saison des pluies. Un premier sarclage est effectué au début du mois d'août et un second sarclage avant la floraison.



(Pente générale 2,5 %)

- | | | | |
|----|--|---|--|
| 3. | Points de suivi du profil hydrique et phénologie | — | Cordon pierreux (0,25 m) |
| ○ | Station de récolte | ~ | Courbe de niveau (0,5 m) |
| ▨ | Microbuttes sableuses | ▼ | Pluviomètre |
| — | Tôles (0,2 m et 0,4 m) | ▼ | Pluviographe |
| == | Murs (0,2 m) | ~ | Limnigraphe et échelles limnimétriques |
| ▨ | Exutoire en béton | | |

Figure 3.

Plan d'ensemble du dispositif expérimental de Bidi-Samniweogo (Lamachère et Serpantié, 1991).

La parcelle de gauche est utilisée comme parcelle témoin et est cultivée de manière traditionnelle. La parcelle médiane a subi un aménagement en cordons pierreux isohypses constitués d'une double rangée de blocs de cuirasse ferrugineuse (40 kg par mètre linéaire), espacés d'environ 20 mètres. Aucun cordon pierreux n'a été pose sur l'impluvium. La parcelle de droite est identique à la parcelle médiane, mais elle est labourée selon les courbes de niveau avec une charrue bovine attelée vers la fin du mois de juin.

Le tableau 1 compare les lames ruisselées et les quantités de sédiments exportés sur les trois parcelles au cours de trois années. Le ruissellement annuel est le plus fort dans la parcelle témoin, les cordons pierreux qui sont filtrants modifient légèrement la quantité ruisselée à l'exutoire la première année. Leur impact sur le ruissellement augmente avec le temps en fonction du colmatage des interstices entre les pierres. Par contre, le ruissellement diminue drastiquement sur la parcelle labourée en 1987, année pour laquelle le ruissellement annuel est 2,5 fois plus faible. Cette différence s'explique par l'occurrence de fortes pluies en juillet, juste après le labour.

Tableau 1. Pluies annuelles et ruissellement sur les parcelles agronomiques (Lamachère et Serpantié, 1991).

Année	1986			1987			1988		
Variable	PU mm	Lr mm	TS Kg	PU mm	Lr mm	TS Kg	PU mm	Lr mm	TS Kg
P. témoin	530	127	1218	483	53	438	512	94	739
P. aménagée	528	124	634	484	42	138	510	51	232
P. aménagée + labourée				486	17	108	509	67	432
P. : parcelle ; Pu : pluie au sol ; LR : lame ruisselée aux exutoires ; TS : transport solide exporté.									

L'effet des cordons pierreux est effectif dès la première année sur les transports solides. Le labour atténue l'impact de cet aménagement sur la quantité de sédiments exportés. En créant un obstacle au déplacement des flux liquides, les cordons pierreux les ralentissent, leur font perdre de leur compétence, de plus ils retiennent une partie des particules. Par contre, le labour ameublit les sols et cela est favorable à l'érosion.

Pour mieux expliciter l'effet de l'aménagement pierreux sur le ruissellement, la figure 4 compare les hydrogrammes des crues observées le 13 juillet 1986 aux exutoires de la parcelle témoin et de la parcelle aménagée sans labours. L'averse totale avait une hauteur de 40,6 mm (mesurée à 1 m). Elle a duré 1 h 15 min Son intensité maximale sur une durée de 15 minutes était de 82 mm/h. On remarque une crue retardée (4 minutes entre les maxima de crue), un fort écrêtage du pic (39 %) sur la parcelle aménagée. Le volume ruisselé est inférieur de 13 % et la quantité de matériaux exportés de 28 % à ceux de la parcelle témoin. Le frein hydraulique induit par les cordons pierreux a pour effet de modifier la forme générale de la crue, d'augmenter l'infiltration et de retenir des sédiments, ainsi que de réduire la compétence érosive du ruissellement.

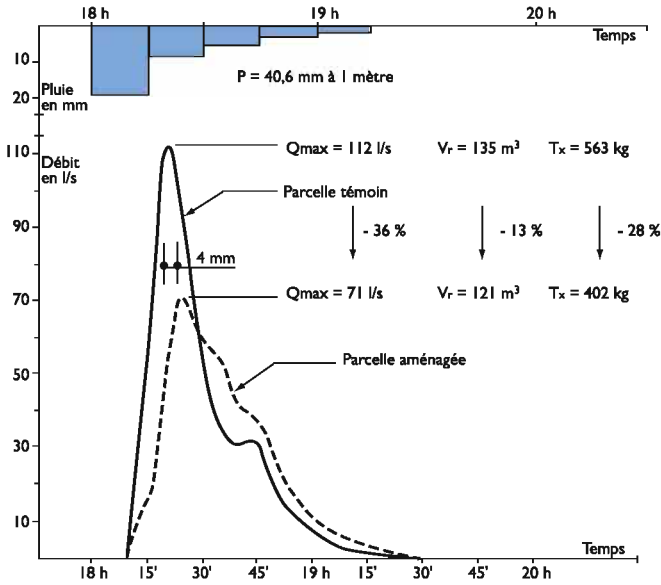


Figure 4.
Comparaison des crues du 13 juillet 1986 sur les parcelles aménagée et témoin
(à partir des données de Lamachère et Serpantié).

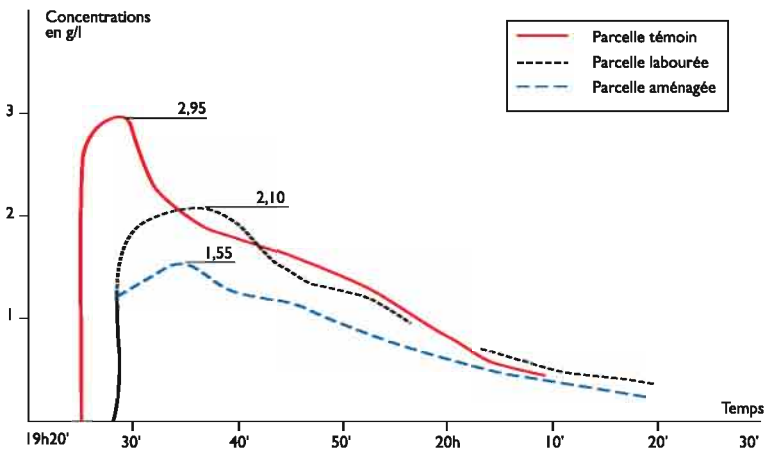


Figure 5.
Comparaison des transports solides exportés le 15 août 1988
sur les parcelles aménagée et témoin (à partir des données de Lamachère & Serpantié).

Le retard dans le déclenchement de la crue augmente avec le temps au fur et à mesure du colmatage des cordons pierreux. Ainsi, la figure 5 compare sur les trois parcelles, témoin, aménagée et aménagée + labourée, les concentrations en

transports solides pendant la crue du 15 août 1988 à leurs exutoires. On remarque que les pics de crue sont maintenant de 7 minutes. Les concentrations moyennes sont égales à 1,75 g/l sur la parcelle témoin, 0,98 g/l sur la parcelle aménagée et à 1,15 g/l sur la parcelle labourée.

Dans une étude d'impact des aménagements de conservation des eaux et des sols sur la régénération des ressources ligneuses en région sahélienne et nord-soudanienne du Burkina Faso, S. Ganaba (2005) montre que les aménagements en cordons pierreux ont eu un impact positif sur la reconstitution de la végétation ligneuse.

Traitement des ravines et haies vives

Sur des surfaces de versants supérieures aux parcelles que nous venons de décrire et réunissant plusieurs champs (quelques hectares), Pérez *et al.* (1998a) ont analysé l'impact d'un aménagement rural associant le traitement des ravines par des cordons pierreux et des fascines et une haie vive dans la zone arachidière du Sine Saloum au Sénégal (fig. 6). Sur deux grandes parcelles de 2,5 ha chacune, Ndiba et Yarane, les bilans hydrologique et en matières solides ont été suivis de 1985 à 1992,

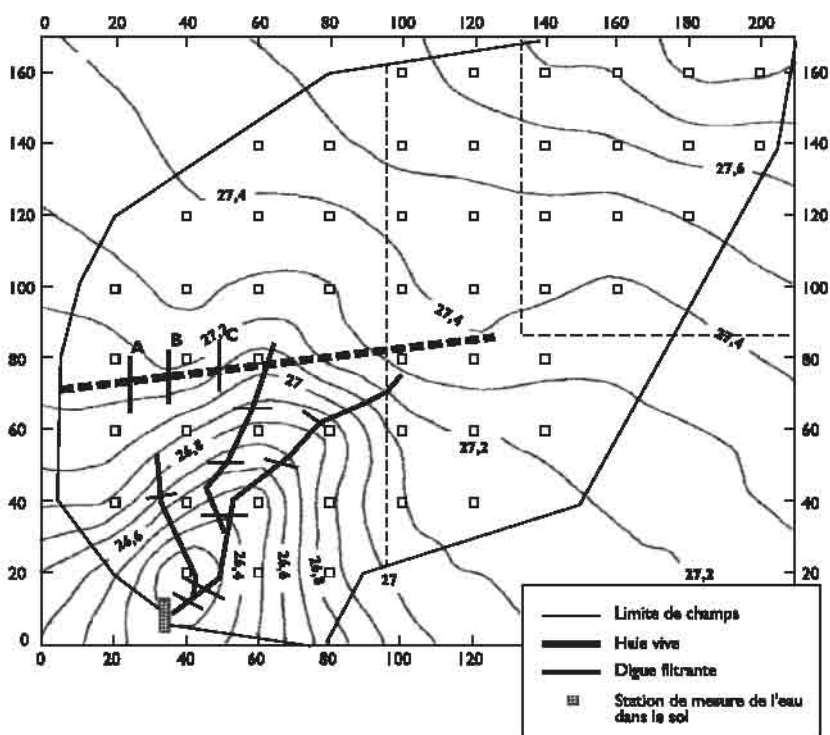


Figure 6.
Aménagement et dispositif expérimental à Ndiba (Pérez *et al.*, 1998a).

l'aménagement a été mis en place en 1987. À partir de 1989, un suivi spatialisé des bilans hydriques a été mis en place avec l'implantation de tubes pour sondes à neutrons disposés sur une grille carrée de 20 m de côté et de placettes de mesure du ruissellement et de l'érosion. Les mesures à l'exutoire permettent de se faire une idée de l'efficacité globale de l'aménagement, alors que le dispositif spatialisé permet de comprendre l'impact de chaque élément de cet aménagement.

Pérez *et al.* (1998a) vérifient que la distribution des pluies journalières était identique pour les deux périodes (avant et après aménagement), même si la seconde période est plus pluvieuse. Ils présentent les bilans en eau et en matière associée suivant trois périodes : 1985-1987 – avant aménagement –, 1988 – mise en place de l'aménagement – et 1989-1992 – après aménagement (tabl. 2). On remarque un effet sensible de l'aménagement sur le ruissellement. Le nombre d'épisode ruisselant diminue de 9 % sur Ndiba et de 15 % sur Yarane. Les coefficients de ruissellements diminuent significativement. À l'exutoire du bassin versant de Ndiba, les transports solides ont été correctement mesurés pour 25 crues dans la période avant aménagement (1985-87) et 28 après aménagement (1989-92) et estimés par un modèle simple pour les événements où la mesure n'a pas été faite correctement. La diminution des pertes en terre est significative entre les deux périodes, 13 955 kg avant aménagement à 2 967 kg après aménagement. La même différence a été mesurée pour les événements les plus érosifs dans chaque période ; 4 924 kg pour un index d'érosivité R=96 unités USA lors d'une crue de juillet 1986 avant l'aménagement et 912 kg pour un index d'érosivité R=98 unités USA lors d'une crue de juillet 1990 après l'aménagement. Le taux spécifique de perte en terre est donc passé de 1,9 t/ha/an à 0,3 t/ha/an comme effet de l'aménagement.

Tableau 2.
Bilans hydrologiques annuels sur deux petits bassins de la ceinture arachidière du Sénégal
(d'après les données de Albergel et Pérez).

Période	Nb de pluies	Nb de crues	Lame précipitée totale mm	Index d'érosivité	Lame ruisselée mm	Coef. ruissellement %
<i>Parcelle de Ndiba 2,5ha</i>						
Avant (1985-1987)	129	40	2057,7	900	87,1	4,2
Pendant (1988)	50	18	91,5	445	40,1	4,3
Après (1989-1992)	154	36	2339,7	1092	60,2	2,6
<i>Parcelle de Yarane 2,5ha</i>						
Avant (1985-1987)	88	33	1361,4	542	159,8	11,7
Pendant (1988)	49	13	917,3	434	68,3	7,4
Après (1989-1992)	154	36	2288,2	1046	221,7	9,7

La variabilité de la réserve en eau dépend sur la parcelle de Ndiba de la topographie, des états de surface et de la nature des sols. Une procédure automatique d'ajustement de distribution des réserves hydriques des sols a été établie et une cartographie automatique de cette variable a été établie pour différentes dates. Une fonction de distribution normale est ajustée aux réserves en eau du sol mesurées sur tout son profil de 0 à 150 cm de profondeur. Un modèle sphérique dont le semi variogramme

à une portée de 50 m est utilisé pour cartographier les réserves en eau des sols. La figure 7 montre l'impact de la présence de la haie vive sur l'infiltration tout au long de la saison des pluies.

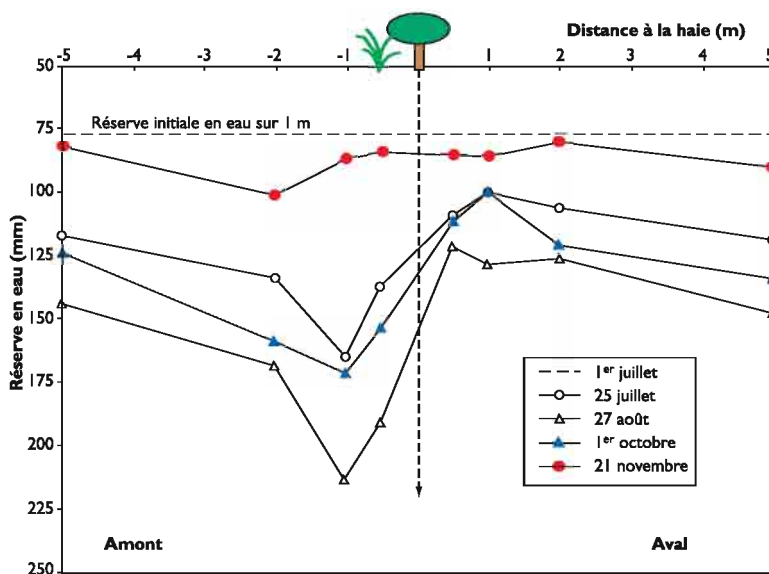


Figure 7.
Évolution de la réserve hydrique en amont et en aval d'une haie vive.

Aménagement intégré d'un versant (km²) (Albergel *et al.*, 2000)

Albergel *et al.* (2000) ont montré la pertinence d'un aménagement d'embocagement d'un versant en zone sahélienne comprenant : des reboisements avec des aménagements en arêtes de poisson, des mises en défens sur le plateau, un cordon pierreux en bordure du talus, des haies vives sur les glacis et les terrasses, et le traitement des ravines qui entaillent les berges de raccordement terrasse/bas-fond. Les critères d'efficacité ont été limités aux paramètres hydrologiques mesurés à l'exutoire. Pour ce faire, la méthode des bassins versants appariés a été utilisée : deux bassins de ravines, drainant l'ensemble des unités de la toposéquence, ont été suivis en conditions naturelles pendant une période initiale (1983-1988), puis l'un des deux a été aménagé en cours d'étude (1989-1990). Les observations se sont poursuivies jusqu'en 1995. Cette méthode repose sur l'hypothèse implicite de constance d'autres facteurs évolutifs sur le domaine d'étude.

Les deux bassins étudiés sont ceux de deux petites ravines, affluents de premier ordre, démarrant en bordure de plateau et entaillant les glacis de raccordement au marigot : Keur Dianko et N'Dierguène dont les exutoires sont distants de 4 km environ. L'aménagement de Keur Dianko est représenté sur la figure 8.

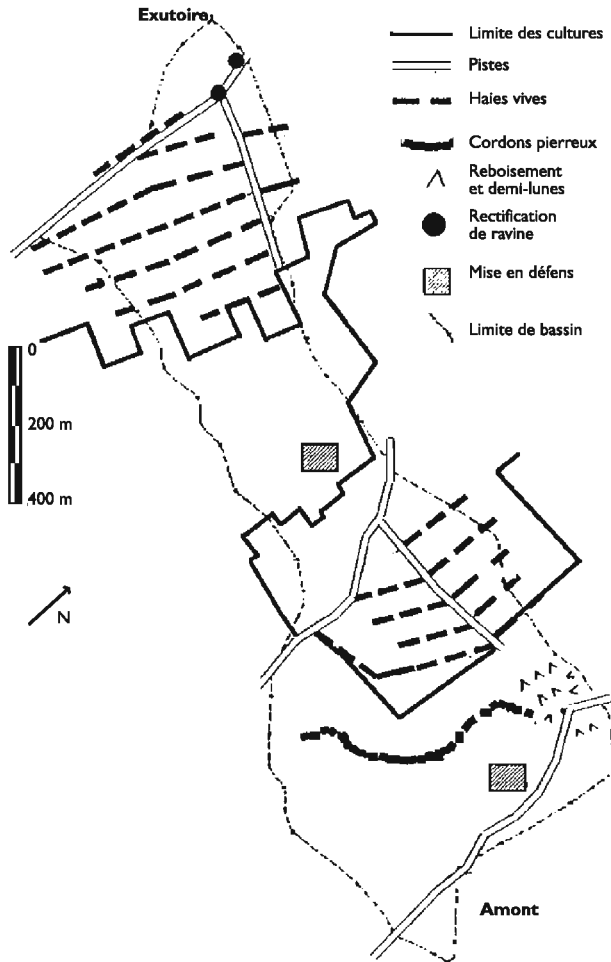


Figure 8.
Aménagement intégré de versant à Keur Dianko (Pérez et al., 1998b).

La figure 9 compare les bilans hydrologiques annuels sur ces deux portions de versant. Les coefficients de ruissellement sont toujours supérieurs sur le bassin témoin. Après la mise en place des aménagements (1988-91), la différence d'aptitude au ruissellement diminue nettement sur le bassin aménagé. En séparant la période d'observation en trois parties :

- avant aménagement (5 années) : la lame ruisselée de Keur Dianko est égale à 52 % de celle du bassin témoin,
- durant la période de mise en place de l'aménagement (3 années), ce rapport passe à 56 % et semble montrer une perturbation du milieu sur le bassin versant expérimental, avec une légère hausse du ruissellement (mais non significative),

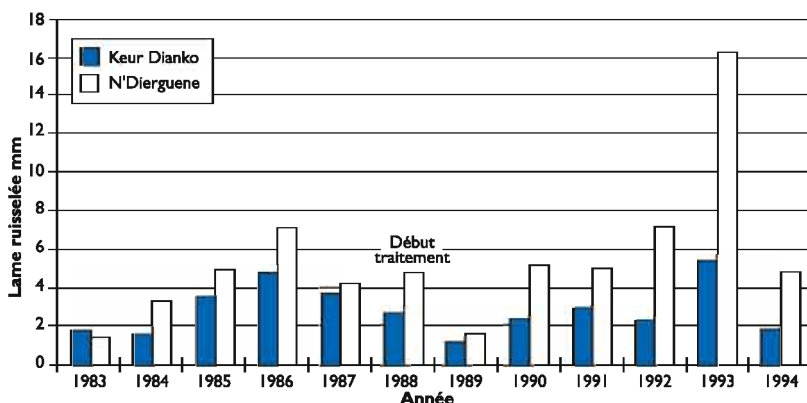


Figure 9.
 Comparaison des coefficients de ruissellement de 1983 à 1995
 sur les ravines de Keur Dianko (KD) et de N'Dierguène (ND)
 (Albergel et al., 2000).

– après la mise en place de l'aménagement (5 années) : la lame ruisselée du bassin aménagé n'est plus que de 36 % de celle du bassin témoin.

L'aménagement a un rôle d'autant plus fort sur le bilan en eau et en matières solides transportées que l'année comporte des ruissellements importants : en 1991, les transports solides sont équivalents sur les deux bassins (environ 650 kg/ha) ; en 1992, ils sont de 488 kg/ha pour le bassin aménagé et de plus de 1 tonne/ha sur le bassin témoin ; en 1993, où l'événement exceptionnel des 4 et 5 août (179 mm en 24 heures) est à l'origine de près de 50 % de l'érosion annuelle, les transports solides sont de 1,5 t/ha sur le bassin aménagé et de 3,5 t/ha sur le bassin témoin ; en 1994, année de faible pluviosité, ils sont légèrement plus faibles dans le bassin aménagé (320 kg/ha pour 380 kg/ha).

La figure 10 compare les crues provoquées par l'événement exceptionnel des 4 et 5 août. À des fins de comparaison, les lames ruisselées et les transports solides sont ramenés à l'hectare. Les crues résultantes de la première averse beaucoup plus forte sur le bassin aménagé provoquent un coefficient de ruissellement de 9 % et une érosion spécifique 302 kg/ha pour le bassin aménagé contre un coefficient de 11 % et une érosion spécifique 112 kg/ha pour le témoin. Les crues provoquées par les deux averses suivantes (conditions d'infiltration très faibles) sont beaucoup plus fortes et plus pointues sur le bassin témoin. Les coefficients de ruissellement et les taux d'érosion spécifique sont respectivement de 10 %, 48 kg/ha et 14 %, 209 kg/ha sur le bassin aménagé et 50 %, 970 kg/ha et 42 %, 594 kg/ha sur le témoin. Sur le total de l'événement, la différence dans le ruissellement se traduit par un écart encore plus important des matières transportées. L'objectif de réduction de l'énergie cinétique de la lame ruisselée est donc atteint. L'examen individuel des pluies démontre un effet régulateur de l'aménagement pour les événements moyens et forts.

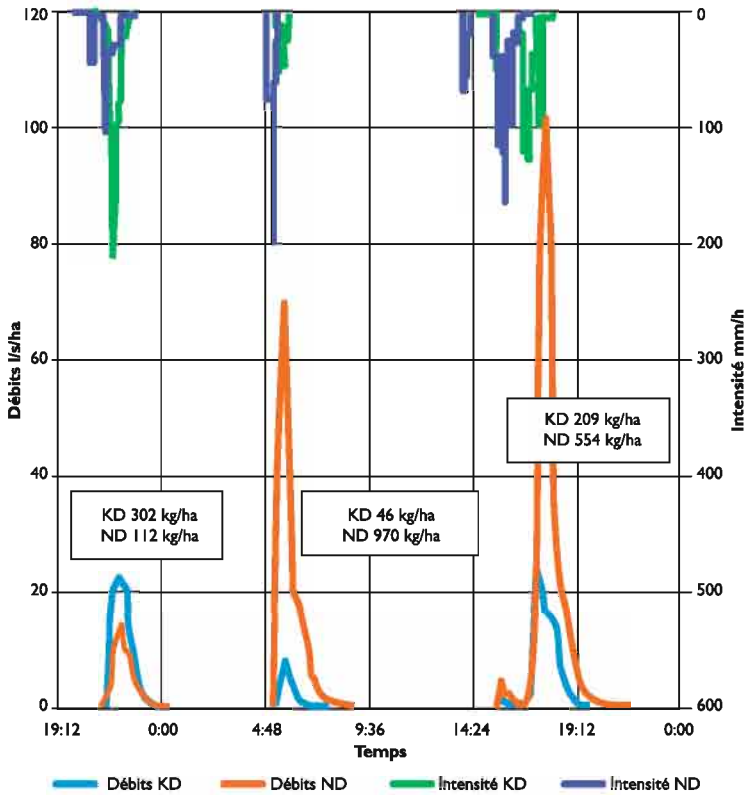


Figure 10.
Débits rapportés à 1 ha pour l'événement des 4 et 5 août 1993 –
Comparaison ravine de Keur Dianko (aménagée) et de N'Dierguène (témoin)
(Albergel et al., 2000).

Les aménagements de bas-fonds

Les bas-fonds du Sahel sont les axes d'écoulements déprimés, fonds de vallons, ne possédant pas de cours d'eau important bien marqué, submergés pendant une période de l'année par une nappe d'eau qui s'écoule. Ils drainent des bassins versants d'une dizaine à quelques centaines de kilomètres carrés. Leurs sols ont pour origine essentielle des colluvions. Les bas-fonds concentrent les écoulements superficiels et souterrains, et favorisent l'installation de zones humides dans des paysages arides et semi-arides. La présence de nappes souterraines à faible profondeur dans les bas-fonds permet également le développement d'une strate arborée. Ils occupent une place limitée dans les paysages du Sahel : 5 à 10 % selon les conditions géomorphologiques (Albergel *et al.*, 1993).

Autrefois réservés à l'élevage, les bas-fonds de la zone sahélienne sont de plus en plus mis en culture en saison des pluies, et cela depuis le début des sécheresses des années 1970 et 1980. Le sorgho y est la culture la plus répandue, là où les sols ne sont pas trop engorgés et là où il peut bénéficier d'une assistance de la nappe aquifère en fin de cycle. En saison sèche, le maraîchage est pratiqué dans des petits jardins protégés des animaux et des vents secs par des clôtures en fascines et arrosés à partir de puisards creusés dans le bas-fond. L'arboriculture est aussi possible dans les parties des bas-fonds bien alimentées en eau.

Les deux contraintes naturelles les plus importantes au développement agricole des bas-fonds au Sahel sont :

- les fortes crues couplées avec une pente assez forte du bas-fond de l'ordre de 2 à 5 mètres par kilomètre, qui provoquent en début de saison des pluies l'arrachage des jeunes plants ;
- la faible durée de la saison des pluies, qui se traduit par un tarissement précoce des écoulements et une baisse rapide des nappes aquifères.

Afin de lever les contraintes naturelles liées à la mise en valeur des bas-fonds au Sahel, plusieurs solutions techniques sont proposées. Elles ont fait l'objet d'une étude complète au cours d'un projet R3S (Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse/CORAF (Conseil ouest et centre- africain pour la recherche et le développement agricoles) soutenu par la commission européenne de la Recherche (Albergel *et al.*, 1993). Toutes ces solutions visent à la maîtrise plus ou moins complète de l'eau. Pour les zones climatiques traversées par la GMV, Albergel *et al.* (1993) ont retenu deux types d'aménagements.

Ceux qui ont pour but d'épandre les crues, de les ralentir et de stocker l'eau pendant un temps assez long pour alimenter la réserve en eau du sol mais pas trop long pour ne pas compromettre par asphyxie le bon développement des plantes. Parmi les aménagements de ce type, Albergel *et al.* (1993) recommandent en fonction de la surface drainée et de la taille des bas-fonds les digues filtrantes ou les digues déversantes.

Ceux qui ont pour but de stocker l'eau pendant un temps assez long et dont la complexité et la dimension vont dépendre de l'objectif à atteindre :

- jouer le rôle de réserve d'eau pour abreuver les hommes et surtout les animaux ;
- réalimenter les nappes phréatiques proches pour faciliter le puisage de l'eau destinée à l'abreuvement et au maraîchage ;
- cultiver en décrue dans la retenue ;
- stocker l'eau suffisamment longtemps pour rendre la culture quasi indépendante de la pluviométrie, y compris en contre-saison.

La base de ces aménagements est toujours un barrage étanche dont la hauteur varie avec la disponibilité de l'eau et avec la durée prévue pour le stockage de l'eau.

La digue filtrante et la digue déversante

Ces deux types d'aménagements ont été testés et évalués sur le bas-fond de Gourga, dans la région de Bidi au Burkina Faso.

La figure 11 en donne le plan de situation :

- la digue filtrante dans la zone amont draine un bassin versant de 45 km². Elle a été réalisée en 1986.
- le micro-barrage à digue déversante en aval, terminé en 1988, draine un bassin versant de 157 km².

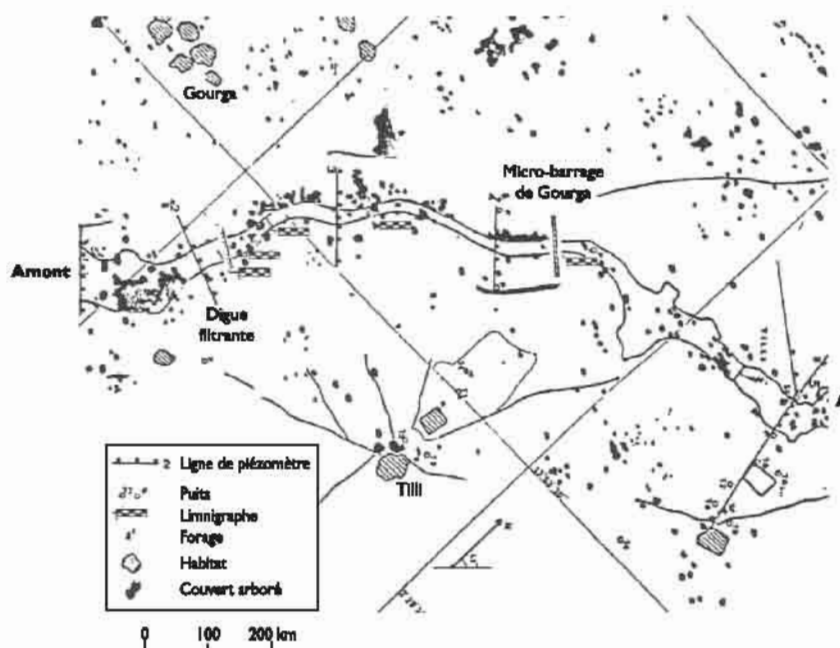


Figure 11.
Plan de situation des digues filtrantes et déversantes.
Bas-fond de Gourga Armén, Burkina Faso.

Les digues filtrantes freinent l'eau dans sa course et étendent la nappe d'inondation sur une plus grande superficie cultivable. L'eau s'étale ainsi à la surface du sol quelques heures à quelques dizaines d'heures en fonction de la taille du bassin versant.

Les digues filtrantes sont réalisées uniquement en pierres sèches dans le cas de petits bassins versants dont la superficie est inférieure à 10 km² (fig. 12), en gabions dès que le débit à évacuer devient trop important (fig. 13). Leur tracé suit des courbes de niveau pour mieux étaler l'eau, mais il est quelquefois rectifié.

Le sorgho et le riz sont les spéculations conseillées en amont des digues filtrantes. Le riz sera planté dans les parties les plus basses où la submersion est la plus longue. Le sorgho est une plante rustique qui supporte une submersion de deux à trois jours grâce à son enracinement profond et peut être cultivé en climat sec, où la saison des pluies ne peut pas assurer le cycle du riz qui est plus long.

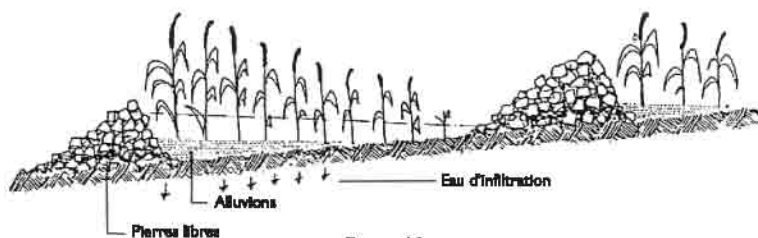
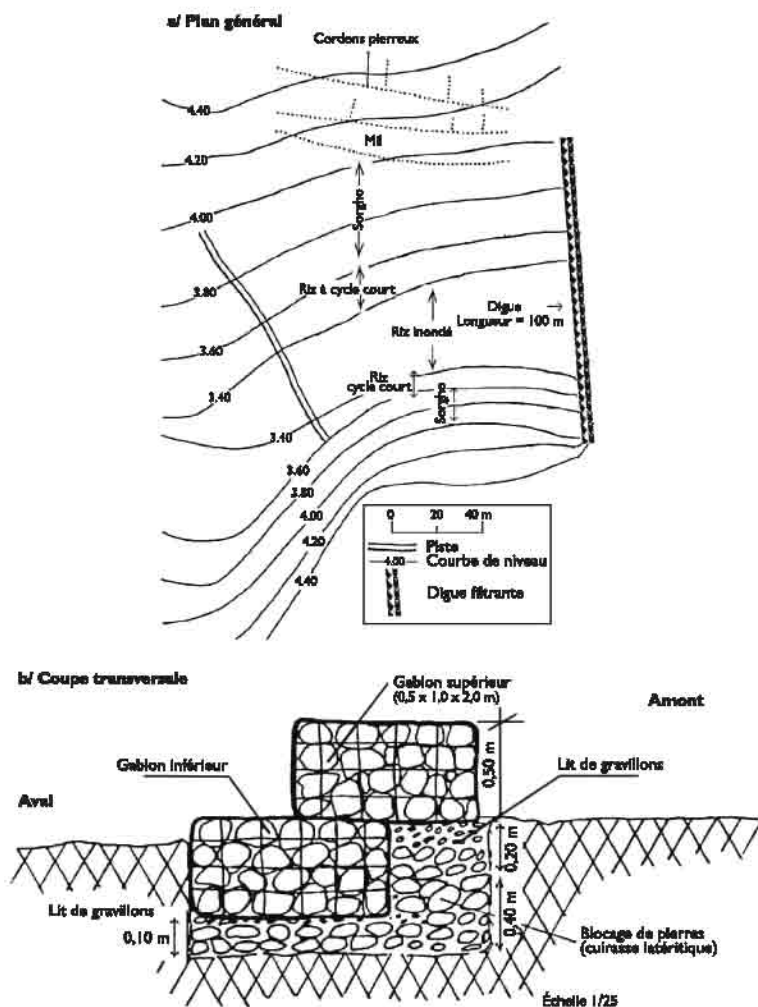


Figure 12.

Digues filtrantes dans la région de Rissiam, Burkina-Faso (Van Driel et Vlaar, 1991).



Les digues filtrantes prolongent la saison végétative uniquement en rechargeant la réserve en eau du sol après la dernière crue. C'est pourquoi les performances de cet aménagement sont d'abord liées à la pluviométrie. En dessous de 600 mm/an, les paysans associent riz et sorgho, minimisant les risques.

Les digues filtrantes ont été vulgarisées au Sahel, surtout au Burkina Faso, sous forme d'aménagements impliquant les populations pour leur construction.

En enregistrant les crues en amont et en aval d'une digue filtrante, Van Driel & Vlaar montrent l'impact hydrologique de cet aménagement et calculent la recharge de la réserve en eau du sol. La figure 14 montre, pour une crue, l'effet de laminage de la digue filtrante. Ils expriment cet effet de laminage par le rapport entre le débit maximal de la crue enregistrée en amont de la digue et celle en aval. En fonction de la crue, ce rapport varie de 0,97 à 0,46. Ils ont mesuré un ralentissement des crues variant entre 5 et 15 minutes et des lames infiltrées variant de 200 à 400 mm.an⁻¹ en fonction de la position topographique. Il est intéressant de constater que des sols rarement inondés avant l'aménagement peuvent bénéficier d'apports en eau non négligeables.

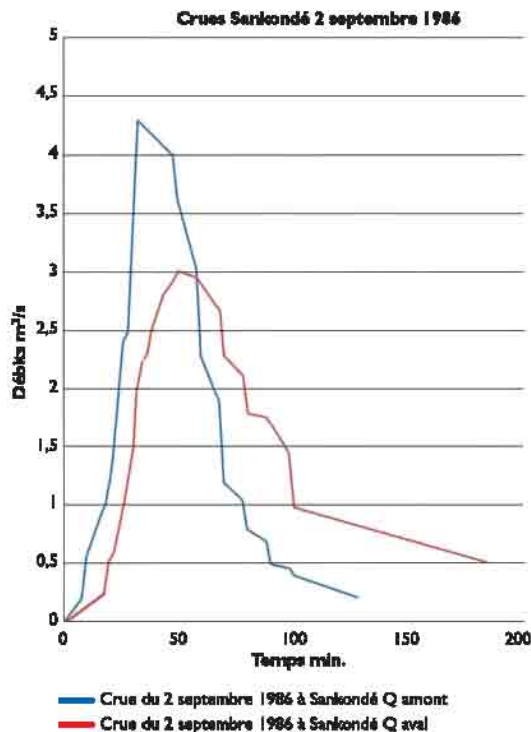
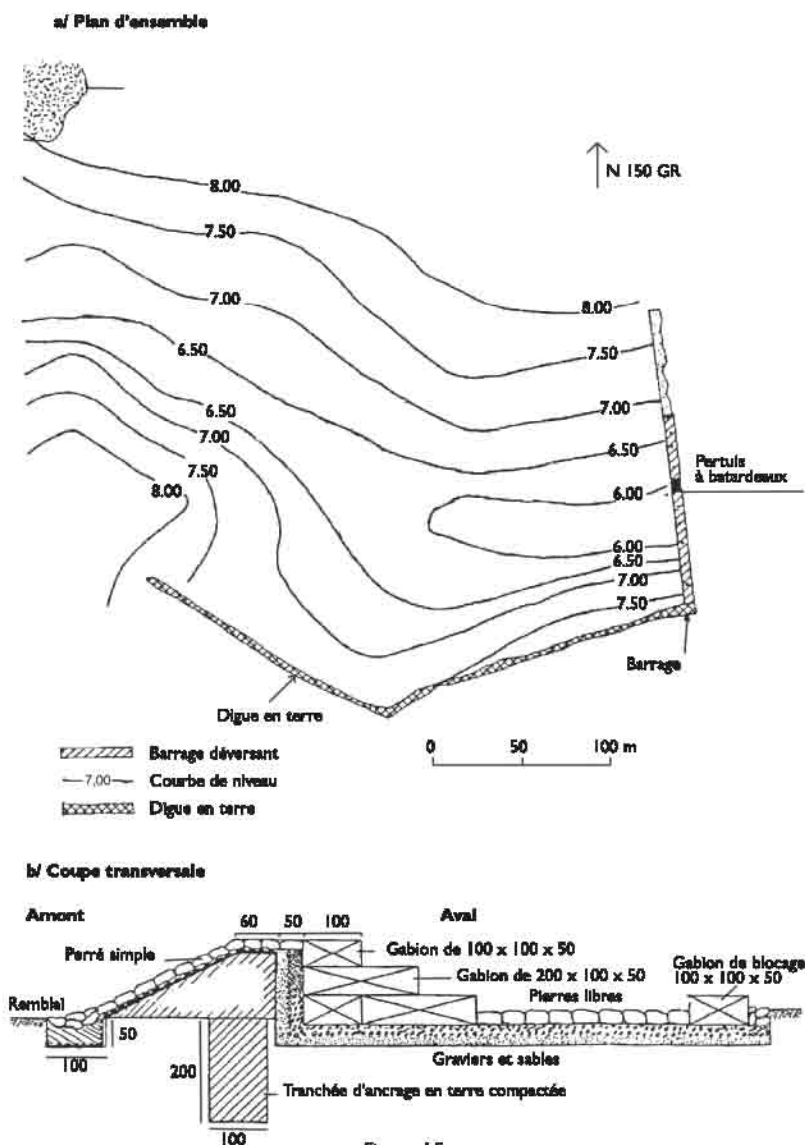


Figure 14.
Comparaison des hydrogrammes de crues en amont et en aval
de la digue filtrante de Sankondé, région de Rissani, Burkina Faso
(données CIEH, Van Driel et Vlaar).

En multipliant le nombre de digues filtrantes, le laminage de crue augmente.

La digue déversante est un ouvrage un peu plus important (figure 15), ajoutant à la fonction agricole de l'épandage de la crue une fonction réservoir qui peut perdurer quelque mois après la saison des pluies. Dans le cas de l'ouvrage de Gourga



(Burkina Faso), représenté sur la figure 15, l'étude hydrologique a montré (Albergel *et al.*, 1993) que l'aménagement concilie jusqu'en année décennale sèche (375 mm de pluviosité) :

- le stockage des eaux de surface en saison des pluies et en début de saison sèche ;
- la sécurisation des cultures sur le pourtour de l'aménagement et du maraîchage en début de saison sèche ;
- la recharge des nappes phréatiques par infiltration de l'eau du barrage.

Dans cet aménagement, la crête de la digue est à la cote 700 m, alors que le point le plus bas est à la cote 580 m, la surface inondable est de 5,5 ha. Il est possible de sécuriser 2,35 ha de riz inondé et 0,85 ha de riz pluvial. Soixante pour cent de la surface de la retenue est donc rizicultivable. Afin d'assurer une valorisation maximale de l'ouvrage, un pertuis a été mis en place au milieu de la digue et permet de réguler le niveau de l'eau en début de saison des pluies pour éviter de noyer les cultures.

Les petits barrages de retenues

Les petits barrages de retenues sont les aménagements les plus importants. De 1995 à 2005, l'IRD (Institut de recherche pour le développement) leur a consacré un grand programme sur trois continents. En zone sèche, ils ont été étudiés plutôt en Méditerranée, au nord du Mexique et dans le Nordeste brésilien. En Afrique de l'Ouest, ils ont été étudiés durant ce grand programme dans le nord de la Côte d'Ivoire (Cecchi, 2007). Depuis 2005, ce projet est relayé dans les régions plus sèches, notamment au travers d'un programme du « Challenge Programme : Eau et Nourriture » de l'IWMI (International Water Management Institute). <http://waterandfood.org/>.

Les petits barrages ont des hauteurs de digues inférieures à 15 m (hauteur des grands barrages définie par l'ICOLD [International Commission for Large Dams]). Ils sont équipés de déversoirs latéraux de conception rustique et parfois d'une vanne de fond. Leur coût unitaire est de l'ordre du demi-million d'euros, et souvent nettement moins. D'extension modérée (quelques hectares), les lacs de ces barrages ont une capacité de rétention qui varie de quelques dizaines de milliers au million de mètres cubes (fig. 16) (Albergel et Cecchi, 2012).

Les petits barrages qui sont construits au Sahel sont essentiellement destinés aux usages cités ci-dessous en fonction de leurs capacités, des aménagements annexes et de l'organisation des communautés rurales pour leur usage (Albergel *et al.*, 1993).

1- L'abreuvement du bétail (et parfois des humains malgré les risques sanitaires). Ils sont réalisés dans le cadre d'un programme cohérent de développement de l'économie pastorale, prenant en compte la valeur des pâturages, les circuits de transhumance. Malheureusement de nombreuses initiatives ne tiennent pas compte du cadre général pour lancer la construction de barrages pastoraux.

2- La réalimentation des nappes phréatiques. Cela intéresse les villageois qui peuvent construire des puits moins profonds et mieux alimentés en eau. L'eau stockée dans la nappe permet aussi de réaliser des cultures maraîchères et fruitières.

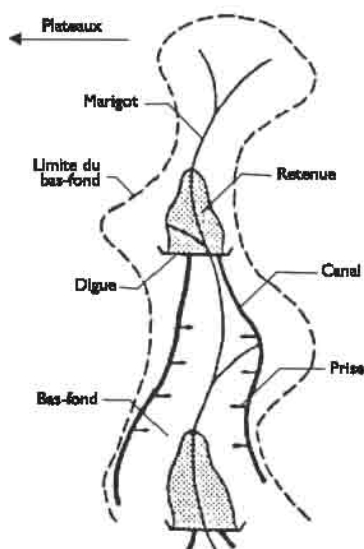


Figure 16.
Petits barrages et systèmes d'irrigation.

3- La culture de décrue, surtout de sorgho, au fur et à mesure que l'eau se retire. Le barrage peut être muni d'une vanne pour accélérer la vidange et mettre en place les cultures avant l'apparition des vents secs. On trouve ces barrages pour cultures de décrues en Mauritanie, au Niger (Ader Doutchi-Maggial) et au Tchad (Ouaddm). Les conditions de leur développement sont encore mal connues. Des expériences pour planter un pâturage aquatique dans la retenue (*Echinochloa stagnina* ou Bourgou) ont été tentées (comm. pers., Jean-François Gabelle), mais là aussi les résultats de retours d'expérience ou recherches manquent.

4- L'irrigation, qui peut se faire en aval, à partir d'un ou deux ouvrages de prise, ou sur les versants de la retenue par pompage.

- Irrigation par gravité en aval du barrage. Des canaux d'irrigation suivant le bord du bas-fond (parfois également les bourrelets de berge) distribuent l'eau en aval de la digue de retenue. Il s'agit d'une solution coûteuse, mais très répandue au Burkina Faso. Suivant la hauteur d'eau stockée derrière le barrage et la durée du stockage, on peut cultiver du riz en double culture. Il s'agit dans ce cas des petits barrages les plus gros, car les besoins en eau sont importants pour pouvoir cultiver jusqu'en avril-mai. Par exemple, le barrage de Mogteto, construit en 1963, mis en valeur en 1967 et qui a une capacité de 6 560 000 m³, assure chaque année une double culture de riz sur 94,6 ha dans la plaine de Mogteto et 18 ha de cultures maraîchères (source : services techniques de DPAHRH du Ganzourgou). Ce barrage s'assèche en 2008 en raison de l'augmentation non contrôlée des surfaces et d'une année de mauvaise pluviométrie. Un plan de rehaussement du barrage a été étudié. Le barrage de Goinré, dans la banlieue nord de Ouahigouya, permet une culture de riz en saison des pluies et du maraîchage en contre-saison.

- Irrigation sur les versants de la retenue. Au lieu d'irriguer les terres par gravité à l'aval du barrage, on irrigue par pompage à l'amont de celui-ci (avec des calebasses en pays Dogon, avec des motopompes la plupart du temps).

Les principaux problèmes techniques posés par ces barrages concernent l'évacuateur de crue et le bon dimensionnement de la digue en fonction des apports. Le premier risque environnemental des barrages construits au Sahel est la rupture de digue (Albergel et Cecchi, 2012). Les ouvrages évacuateurs de crues doivent être correctement calculés. Ce calcul se fait généralement à partir de la prédétermination de la crue de récurrence décennale.

Une digue surdimensionnée prive les zones aval d'eau et transforme le barrage qui ne se remplit pas en machine à évaporation. La capacité de la retenue est en générale calculée pour retenir un écoulement moyen annuel.

En fonction de l'importance de l'aménagement, on utilise des méthodes simples de prédétermination de ces paramètres hydrologiques (crue décennale et apports annuels), ou la modélisation hydrologique. Les méthodes de prédéterminations simples sont basées sur la connaissance que l'on a des régimes hydrologiques régionaux. Albergel *et al.* (1993) donnent les principales méthodes de prédétermination de ces paramètres et proposent des abaques pour les régions pilotes de l'étude R3S/CORAF dans leur synthèse sur les bas-fonds. En 2003, l'Association internationale des sciences hydrologiques (IAHS) a lancé une décennie de recherche sur l'hydrologie des bassins versants non jaugés (IAHS, *Decade on predictions in ungauged basins (PUB)*, Sivapalan *et al.*, 2003). Des résultats très intéressants ont vu le jour, dont l'application de nouvelles méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques pour la construction de petits barrages.

Le passage des crues à travers le périmètre aval reste un problème : soit on endigue sur ses deux berges le marigot au milieu de la plaine, soit on abandonne la culture sur un côté de la plaine pour laisser passer les crues, soit on laisse les crues passer sur les cultures, mais les dégâts sont alors inévitables.

À partir de l'étude de Jean-François Gadelle sur les aménagements hydrauliques en Afrique, publiée dans la Synthèse de l'étude des bas-fonds au Sahel (Albergel *et al.*, 1993), le tableau 3 présente les avantages et les inconvénients des aménagements de bas-fonds en zones sèches du Sahel africain.

Conclusion

De l'entretien des puits pastoraux traditionnels à la construction de barrages modernes pour l'irrigation de grands périmètres, l'aménagement hydraulique est une priorité des politiques de tous les États du Sahel. De nombreuses et importantes réalisations à différentes échelles ont vu le jour depuis les indépendances de ces pays. Toutes n'ont pas atteint leurs objectifs, mais certaines les ont dépassés.

Tableau 3.
Avantages et inconvénients des principaux aménagements de bas-fonds au Sahel
(F. Gabelle, in Albergel et al., 1993).

Avantages	Inconvénients
Digue filtrante	
• Étalement des crues sur toute la largeur du bas-fond • Meilleure infiltration • Diminution de l'écoulement dans l'axe du bas-fond et laminage de la crue • Augmentation de la superficie cultivée • Rendements plus élevés • Aménagement à la portée des populations y compris son entretien.	• Ne convient que pour des bas-fonds drainant de petits bassins versants avec des crues modérées • Système inefficace en année sèche • Rendement très sujets à la pluviométrie et à l'hydraulicité
Digue déversante	
• Étalement des crues sur toute la largeur du bas-fond • Meilleure infiltration • Fonction de réservoir possible • Diminution de l'écoulement dans l'axe du bas-fond et laminage de la crue • Augmentation de la superficie cultivée • Rendements plus élevés	• Système plus coûteux que la digue filtrante et technicité plus importante • N'assure pas une forte maîtrise de la ressource en eau • Rendements assez sujets à la pluviométrie et à l'hydraulicité
Barrage de retenue pour hydraulique villageoise	
• Facilité d'abreuvement • Entretien peu coûteux	• Solution coûteuse à comparer avec forage, puits ou surcreusement de mare • Médiocre utilisation de l'eau en raison de l'évaporation
Barrage de retenue pour alimentation de la nappe phréatique	
• Facilité pour abreuver les hommes et les troupeaux toute l'année • Possibilité de pratiquer des cultures irriguées par pompage, maraîchers et vergers • Possibilité de ressources halieutiques	• Nécessité de sols filtrants mais pas trop • Investissement coûteux • Obligation d'élever l'eau à la main ou avec un système d'exhaure
Barrage de retenue pour culture de décrues	
• Culture de sorgho connue et bonne sécurisation hydrique • Entretien peu coûteux	• Manque de retour sur expériences • Conditions pédologiques mal connues • Nécessité d'étude approfondie, hydrologie et géotechnie
Barrage de retenue pour irrigation	
• Facilité pour abreuver les hommes et les troupeaux toute l'année • Maîtrise de l'eau pour toutes les cultures • Rendements potentiellement élevés • Possibilité de ressources halieutiques	• Aménagement très coûteux à l'investissement et à l'entretien • Nécessité d'étude approfondie, hydrologie et géotechnie • Demande une technicité élevée de la part des agriculteurs • Nécessité de redistribution des terres

Cette étude a démontré que les écosystèmes sahéliens sont soumis à des pressions sans précédent, accentuées par les variabilités et changements climatiques ; ce qui menace leurs perspectives actuelles de développement durable. Cependant, et malgré tous les défis environnementaux présents, les opportunités offertes par les aménagements hydrauliques le long du tracé de la Grande Muraille Verte (GMV) seront importantes si leur gestion sur le moyen et long terme est bien assurée, notamment en mettant l'accent sur la maintenance des espèces ligneuses très résilientes, qui de surcroît ont des qualités multifonctionnelles, et sur l'amélioration de la fertilité des sols et la gestion durable des ressources en eaux. L'adhésion des populations locales devra être assurée, de même que la sécurisation de leurs apports, ainsi que les appuis techniques et financiers et les mécanismes de suivi nécessaires. Les formes d'initiatives et d'ouvrages ainsi décrites dans cet article constituent des formes d'adaptation innovantes dans un milieu sahélien fragile et vulnérable, exposé en grande partie, sinon dans sa totalité, à l'impact des changements et variabilités climatiques ainsi qu'à la dégradation des ressources et des terres, et à celle des biens et services environnementaux qui leur sont liés.

Ces formes d'ouvrages, qui constituent des réponses pour des conditions environnementales plus stables, auront atteint tout leur potentiel de réussite si elles parviennent à sauvegarder un tel environnement sahélien fragile ainsi que la biodiversité qui lui est associée, tout en créant des activités agro-forestières génératrices de revenus et de bien-être, et en renforçant les capacités des populations locales à se prendre en charge par elles-mêmes et de façon durable.

Si de telles conditions sont réalisées, on aura alors atteint l'objectif d'une innovation et d'une croissance inclusive plus réactives aux objectifs d'éradication de la pauvreté et pour le bénéfice des communautés locales dans un milieu plus prospère, plus stable et plus équitable, pour le bien de l'économie et de l'environnement de l'ensemble de la région sahélienne.

Bibliographie

Albergel J. et Cecchi P., 2012.
Le petit barrage, un hydro-aménagement innovant en zones méditerranéennes et tropicales sèches.
Forum Mondial de l'eau Marseille 2012, Editions de l'IRD, à paraître.

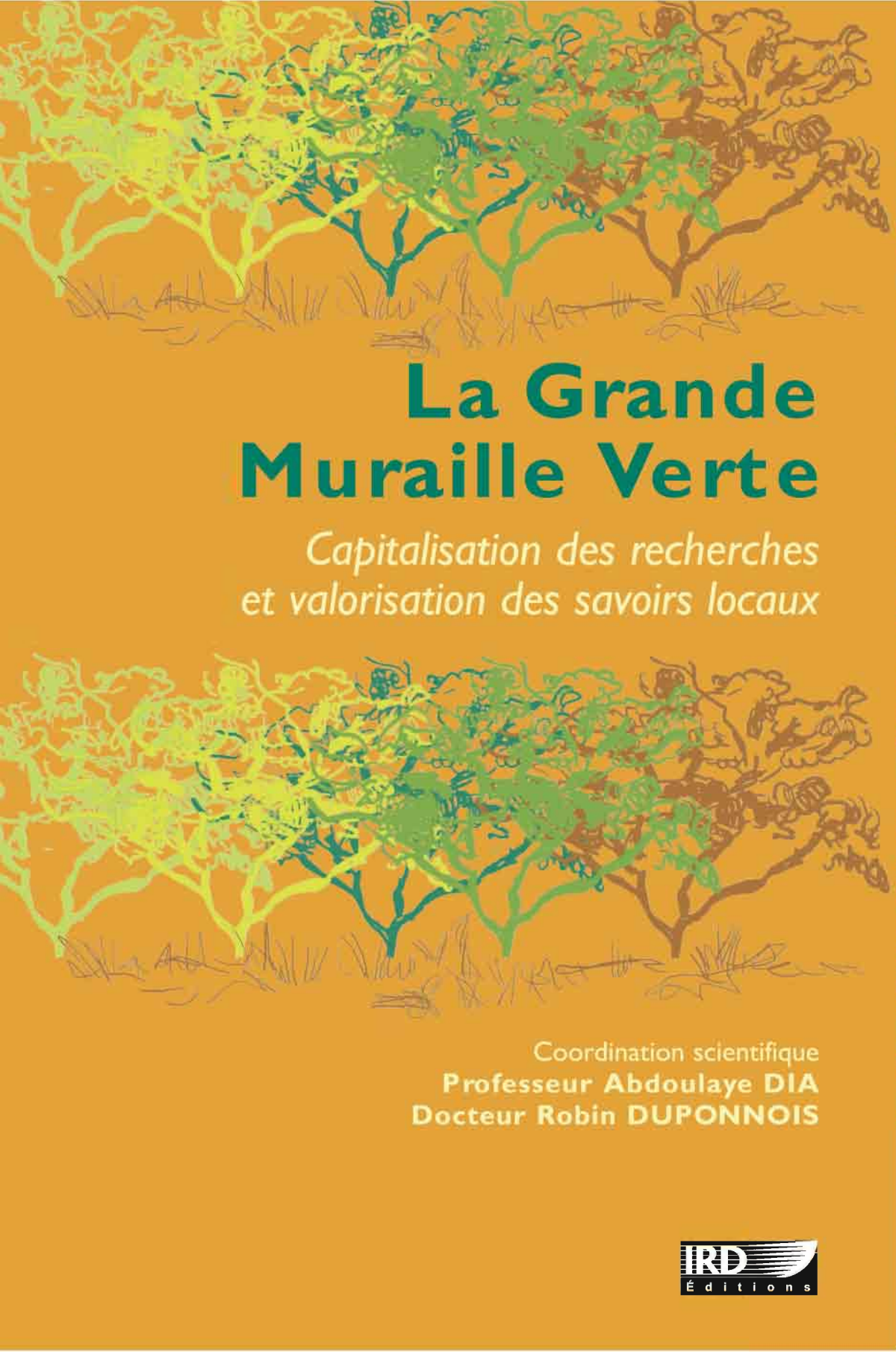
Albergel J., Lamachère J.M., Lidon B., Mokadem A., Van Driel W. (Ed.), 1993.
Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles.
Rapport final d'un projet CORAF-R3S. Ouagadougou, Burkina Faso, CIEH, 335 p.

Albergel J., Lamachère JM, Lidon B., Mokadem A., Van Driel W., 1993.
Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF-R3S. Ouagadougou, Burkina Faso CIEH, 335p.

Albergel J., Diatta M., Pépin Y.
Aménagement hydraulique et bocage dans le bassin arachidier du Sénégal, 2000.
In : Floret Christian (ed.), Pontanier Roger (ed.). La jachère en Afrique tropicale : rôles, aménagement, alternatives : 1. Actes du séminaire international, Dakar, 13-16 avril 1999. Paris (FRA) ; Montrouge : IRD ; J. Libbey, 2000, p. 741-750.

- La Jachère en Afrique Tropicale :
Rôles, Aménagement, Alternatives :
Séminaire International, Dakar (SEN),
1999/04/13-16. ISBN 2-7099-1442-5
- Albergel, 2012.
Reservoirs, multipurpose use of small reservoirs.
In Encyclopedia of Lakes and Reservoirs
Geography, Geology, Hydrology and
Paleolimnology Series: Encyclopedia of Earth
Sciences Series. Bengtsson, Lars;
Hersch, Reginald W.; Fairbridge, R.W. (Eds.)
800p., Chap. 234.
- Bangoura, S., 2002.
Water harvesting techniques in West and Central
Africa. In: Dupuy, A., Lee, C., Schaaf, T. (Eds.),
Proceedings of the International Seminar on
Combating Desertification: Freshwater Resources
and the Rehabilitation of Degraded Areas
in the Drylands, Samantha Wauchope,
fushia publishing Paris, N'Djamena, Chad,
October 30 to November 4, 2000, pp. 20-26.
- Casenave, A. et Valentin, C. 1989.
Les états de surface de la zone sahélienne.
Ed. ORSTOM, Collection didactiques. 227 p.
- Cecchi P (2007).
" L'Eau en partage. Les Petits Barrages
de Côte d'Ivoire ". P. Cecchi (ed.)
Collection Latitude 23, IRD, Paris. 295p.
- Chevallier P., Claude J., Pouyaud B.,
Bernard A., 1985 -
Pluies et crues au Sahel.
Hydrologie de la Mare d'Oursi - Burkina Faso.
Paris, ORSTOM, Travaux et documents n°190,
251 p.
- Claude J., Grouzis M., Milleville P., 1991.
Un Espace sahélien : la mare d'Oursi,
Burkina Faso. IRD Editions, 1991, 241 pages
- Eswaran, H., R. Lal and P.F. Reich. 2001.
Land degradation: an overview.
In: Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R.
Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr,
and S. Sompatpanit (eds.).
Responses to Land Degradation.
Proc. 2nd. International Conference on Land
Degradation and Desertification, Khon Kaen,
Thailand. Oxford Press, New Delhi, India.
- Falkenmark, M., 1995.
Land-water linkages-A synopsis in land
and water integration"ROME, FAO,
Land and Water Bulletin, 1, pp 15-16.
- Ganaba S., 2005.
Impact des aménagements de conservation
des eaux et des sols sur la régénération
des ressources ligneuses en région sahélienne
et nord soudanienne du Burkina Faso,
VertigO – La revue en sciences de l'environnement,
Vol6 n°2, septembre 2005, pp 1-15
- Gleick, P., 1996.
Basis Water requirement for human activities:
Meeting basic needs,
Water international, 21, pp 82-92.
- Gomes N., Touma J. and Albergel J. 2008.
Water harvesting Techniques, State of the Art,
New Researches and Challenges. 68p.
Project (IP) contract n°511231-2 -
6th Eu Framework Programme for RTD
- IAASTD, 2009.
"Agriculture at a Crossroads", International
Assessment of Agricultural Knowledge,
Science and Technology for Development.
Volume 5 : Sub-Saharan Africa. Ed. B.D.
McIntyre, H.R. Herren, J. Wakhungu and R.T
Watson. Islandpress. Washington, Covelo.
London. 167 p.
- Lamachère J.M. et G. Serpantié, 1991.
Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins
versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREF.
John Libbey Eurotext. Paris © 1991,
p. 165-178
- Lavigne Delville P., Camphuis N., 1998.
Aménager les bas-fonds dans les pays du Sahel.
Gret ; ministère de la Coopération ;
CTA. 528 p.
- Marter A. and A. Gordon, 1996.
Emerging issues confronting the renewable
natural resources sector in sub-Saharan Africa.
Food Policy. Volume 21, Issue 2, May 1996,
Pages 229-241
- Peltier R., 1996.
Les parcs à Faïdherbia.
Editeur : Quae (1 janvier 1996)
Collection : Cahiers scientifiques.
Broché: 312 p.
- Perez P., Albergel J., Diatta M.,
Grouzis M., Sene M., 1998 b.
Rehabilitation of a semiarid ecosystem
in Senegal. Experiments at the hillside scale.
in Agriculture, Ecosystem and Environment
n°65, pp. 95-106.

- Perez P., Albergel J., Diatta M., Grouzis M., Sene M., 1998a. Rehabilitation of a semiarid ecosystem in Senegal. 2. Farm-plot experiments Original. Research Article. Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 70, Issue 1, 3 August 1998, Pages 19-29
- Rockström, G., 2003. Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shift in rain-fed agriculture. The Royal Society, Phil. Trans. Biological Sciences (2003) pp 1997-2009
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Bulletin pédologique de la FAO n°70
- Sene M., 1995. Influence de l'état hydrique et du comportement mécanique du sol sur l'implantation et la fructification de l'arachide. Thèse de Doctorat, ENSAM Montpellier, 127 p.
- Sivapalan M.; Takeuchi K. ; Franks S. W.; Gupta V. K. ; Karambiri H.; Lakshmi V.; Liang X.; McDonnell J. J.) ; Mendiondo E. M.; O'Connell P. E.; Oki T. ; Pomeroy J. W. ; Schertzer D. ; Uhlenbrook S. ; Zehe E.. 2003. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences = La décennie de l'AISH sur les prévisions en bassins non jaugés (PBNJ), 2003-2012 : émergence d'un futur passionnant pour les sciences hydrologiques. Hydrological sciences journal. 2003, vol. 48, n°6, pp. 857-880
- Van Driel WF & Vlaar JC.J, 1991. Impact des digues filtrantes sur le bilan hydrique et sur les rendements agricoles dans la région de Rissiam, Burkina Faso. Soil Water balance in the Sudano-Sahelian Zone. (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. 199, 1991, pp 299-309
- Vohland K. and Barry B. 2009. A review of in situ rainwater harvesting (RWH) practices modifying landscape functions in African drylands. Agriculture, Ecosystems and Environment 131 (2009) 119-127
- Zaks D. and C. Monfreda, 2008. Green Water Credit in <http://www.worldchanging.com>



La Grande Muraille Verte

*Capitalisation des recherches
et valorisation des savoirs locaux*

Coordination scientifique
Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

La Grande Muraille Verte

Capitalisation des recherches
et valorisation de savoirs locaux

Coordination scientifique

Professeur Abdoulaye DIA
Docteur Robin DUPONNOIS

IRD
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Coordination
Corinne Lavagne

Mise en page
Alain Doudiès Conseil

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, 2012
ISBN : 978-2-7099-1738-4