

4

La réhabilitation des régimes hydriques et hydrologiques des terres semi-arides dégradées

B. POUYAUD ¹, J. ALBERGEL ², H. CAMUS ³,
P. CHEVALLIER ⁴, J.M. LAMACHERE ⁴

1. ORSTOM, CP 9214, 00095 La Paz, Bolivie

2. ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal (auteur correspondant)

3. ORSTOM, BP 434, 1004 El Menzah, Tunisie

4. ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Dans le cadre des manifestations périphériques à la Conférence des Nations unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED, Rio de Janeiro, juin 1992) s'est tenue à Fortaleza (Ceará, Brésil) une conférence sur l'impact des variations climatiques et le développement durable des régions semi-arides. L'une des résolutions adoptées à cette occasion affirme : plus que les limites environnementales, ce sont les facteurs socio-économiques, politiques et culturels qui sont à l'origine de la pauvreté et des agressions à l'environnement dans ces régions (Déclaration de Fortaleza, février 1992) [1]. La Déclaration de Rio de Janeiro sur l'Environnement et le Développement, connue sous le nom d'Agenda 21, proclame encore : "Les populations et communautés autochtones et les autres collectivités locales ont un rôle vital à jouer dans la gestion de l'environnement et du développement, du fait de leurs connaissances du milieu et de leurs pratiques traditionnelles" (CNUED, 1992) [2].

Ces deux déclarations, faites dans un contexte politique planétaire, posent bien les deux termes du problème : ce sont les populations, habitants et exploitants de ce milieu, qui, d'une part, sont la cause de sa dégradation, mais qui, d'autre part, possèdent l'énergie

nécessaire à sa réhabilitation. Cela est particulièrement vrai pour tout ce qui touche à la ressource en eau.

Pour qualifier et quantifier les flux hydriques dans un écosystème et leur utilisation par le monde vivant, la recherche a introduit le concept d'hydrosystème [3]. En effet, à l'origine du cycle hydrologique continental, il y a des précipitations qui tombent, plus ou moins abondamment, plus ou moins bien distribuées dans le temps, sur un milieu constitué de roches, de sols, de végétation, de constructions, de surfaces d'eau libre et d'êtres vivants.

Les précipitations sont redistribuées selon l'état de ce système récepteur et suivant diverses modalités qui peuvent conduire à des dégâts catastrophiques pour l'homme (crues, inondations, érosion, etc.), à une perte ou à une inaccessibilité de la ressource (évaporation, infiltration profonde, etc.) ou, enfin, à des utilisations profitables (alimentation des végétaux et animaux, irrigation, énergie hydraulique, etc.).

Dans les régions arides ou semi-arides, l'état du milieu récepteur est d'autant plus important sur les régimes hydriques et hydrologiques que, pour des raisons climatiques, la distribution dans l'espace et dans le temps des précipitations est limitée. La dégradation accélérée de ce milieu, particulièrement en Afrique sahélienne, a conduit à une baisse considérable en quantité et en qualité de la ressource en eau disponible pour le monde vivant.

Mais quelles sont les causes et les effets de cette dégradation ? Sur les terres arides et semi-arides, les recherches menées depuis une quinzaine d'années, tant en Afrique qu'en Amérique et avec quelques différences en Australie, convergent pour identifier trois facteurs principaux à la dégradation des hydrosystèmes : le climat, le sol et l'homme.

Si les deux premiers agissent de la même façon partout, le troisième joue de manière différente dans les pays pauvres et les pays riches.

Le climat

La variabilité de la pluviométrie, dans l'espace et dans le temps, est très forte dans toute la zone aride et semi-aride. Le volume précipité varie très fortement, tant d'une année sur l'autre qu'à l'échelle de la décennie [4]. Cette variabilité est un facteur inhérent au climat intertropical, et il a été démontré que cette situation se maintenait pour le moins depuis plusieurs siècles [5, 6].

Les hydrosystèmes de la zone aride et semi-aride doivent s'adapter à de longues périodes de déficit pluviométrique. C'est ainsi qu'en Afrique de l'Ouest l'analyse des chroniques de précipitation a permis de montrer que, depuis 1969, se succèdent des années déficitaires avec deux paroxysmes de sécheresse, le premier en 1972-1974, le second en 1983-1985 [7, 8].

Autant, sinon plus, que la quantité d'eau tombée au cours de l'année, la répartition temporelle des pluies journalières et leur forme sont des données fondamentales pour toutes les sciences étudiant le milieu naturel et ses ressources. Dans des zones arides aussi différentes que le Sahel et le sud australien, les études sur les pluies ponctuelles les plus intenses convergent [9-11]. Elles montrent que les pluies les plus fortes ont la même probabilité d'apparition dans les périodes de sécheresse que dans celles d'excédent pluviométrique. Les événements les plus dangereux (inondation, érosion) sont indépendants de la pluviosité moyenne sur une période.

Les températures élevées et la vitesse importante du vent ont pour conséquence une intense évapo-transpiration [12, 13] qui se traduit par un très faible stockage de l'eau sur et dans le sol.

La part des précipitations qui ne s'écoule pas n'a, le plus souvent, ni le temps de s'infiltrer assez profondément ni de s'accumuler. La lame d'eau stockée sur le sol reste le plus souvent très faible ; elle est rapidement reprise par les flux évapo-transpiratoires.

Le sol

Les sols, héritiers de conditions climatiques difficiles, sont pauvres en matière organique et possèdent une activité biologique réduite. Le plus souvent sableux ou argilo-sableux, ils peuvent être exploités avec profit, mais nécessitent une grande prudence pour leur mise en culture. Le risque est grand de les voir disparaître sous l'action conjuguée des ruissellements en nappe et des érosions éoliennes. La majorité des sols des zones arides ont un épipédon déstructuré, caractérisé par une instabilité structurale et par la pauvreté du complexe absorbant [14].

Les fortes intensités de précipitation en saison des pluies interviennent sur des surfaces peu protégées par une végétation limitée (surtout en début de saison), favorisant la formation de pellicules de battance presque imperméables, bloquant les processus d'humectation des sols et favorisant une érosion en nappe qui porte préjudice à la végétation et aux cultures [15].

Très sensibles aux variations de régimes hydriques, les sols des zones arides présentent de forts risques aux concentrations salines et sont très sensibles aux phénomènes d'acidification.

L'homme

Deux caractéristiques des populations des pays en voie de développement se retrouvent dans toutes les régions sèches avec des niveaux de gravité différents : forte pression démographique et économie de subsistance.

L'augmentation rapide des surfaces cultivées est une conséquence immédiate de la démographie rapidement croissante de ces régions et du déficit de la production alimentaire. L'augmentation de la production des denrées agro-alimentaires, d'environ 1,5 % par an au cours des dernières décennies dans les pays sahéliens, ne permet pas de satisfaire les besoins d'une population qui s'accroît au rythme annuel de 2,7 % [16] .

Cela se traduit par des défrichements anarchiques, l'augmentation des durées de mise en culture et l'abandon d'une gestion collective des terroirs villageois. On observe une modification du paysage dans un sens qui n'est pas favorable à la conservation d'un milieu équilibré. Suivant l'UNSO, la régression des forêts classées au Sahel au profit de la mise en valeur agricole est de 36 % en dix ans [17].

Les faibles revenus agricoles ne permettent pas une intensification de l'agriculture.

La réalisation d'ouvrages hydrauliques (barrages collinaires, forages, puits, digues ou diguettes anti-érosives, casiers rizicoles, micro-barrages ou digues filtrantes, etc.), destinés à améliorer l'accès à la ressource en eau et intensifier l'agriculture, contribue parfois

à une dégradation accélérée des sols et de leurs états de surface, et, par voie de conséquence, des régimes hydrologiques :

- les points d'eau artificiels à gros débit ont modifié localement les parcours des éleveurs et créé des surcharges animales jamais rencontrées et dévastatrices pour les pâturages naturels ;

- l'irrigation excessive ou mal gérée conduit soit à une sursalure superficielle, lorsque la nappe souterraine est peu profonde, soit à un lessivage des sols ;

- le manque d'entretien des systèmes d'exhaure a provoqué un retour aux puits naturels, sans la reprise des contrôles traditionnels, entraînant ainsi de fréquentes pollutions ;

- enfin, la gestion collective des périmètres irrigués et des pâturages à l'aval ou en bordure de retenues artificielles a été vouée à l'échec dans un contexte social qui, traditionnellement, n'était pas adapté à la gestion d'un outil de travail basé sur une notion de rendement économique.

La situation que l'on peut observer actuellement dans les régions arides et subarides (en dehors de quelques zones expérimentales) est celle d'un déséquilibre généralisé. La cause initiale d'un déficit pluviométrique prolongé à laquelle s'est ajoutée une augmentation de la charge démographique a entraîné, dans un milieu fragile, une dégradation croissante du milieu naturel, siège de la redistribution du peu d'eau disponible. Il est grand temps d'inverser le sens de cette évolution en valorisant mieux une ressource en eau, limitée c'est vrai, mais qui existe et qui se trouve - pour l'instant - soit trop dispersée, soit disponible sur un trop court intervalle de temps et parfois (trop souvent) destructrice [18].

Les effets de la dégradation des terres sur le fonctionnement des hydrosystèmes

A l'échelle de la surface élémentaire

Les effets de la dégradation de la surface du sol sur le bilan hydrique ont été étudiés dans tout le Sahel au cours d'un grand programme utilisant la technique expérimentale de la simulation de pluie sur des parcelles de 1 m². A cette échelle, Casenave et Valentin [15] ont introduit le concept d'état de surface défini par l'ensemble : couvert herbacé ou cultural, surface du sol avec ses caractéristiques de rugosité par le microrelief, de porosité physique ou faunique, de texture par la granulométrie, de structure par les organisations pédologiques superficielles et d'humidité.

Une surface élémentaire est d'autant plus dégradée que le couvert végétal est pauvre, l'activité méso-faunique réduite et que certaines organisations pédologiques de surface sont développées. Ces dernières peuvent aller du simple dépôt éolien d'éléments fins à une véritable "cimentation" de la surface incluant tous les éléments grossiers.

Casenave et Valentin présentent une classification des organisations pédologiques de surface basée sur des critères morphogénétiques et donnent une méthode normalisée pour leur description.

Une analyse factorielle des correspondances réalisée sur 50 parcelles au Burkina Faso [19] a permis d'associer les paramètres hydriques d'aptitude au ruissellement et à l'infiltration à la description normalisée des surfaces élémentaires. L'analyse de ces données a montré une dynamique entre la dégradation des états de surface et la répartition des flux

hydriques : la dégradation superficielle du sol engendre une diminution de l'infiltrabilité et une augmentation du ruissellement.

Pour traduire l'état de dégradation du sol, Albergel *et al.* [20] ont cherché à utiliser le concept de résistance hydraulique d'une croûte développé par Hillel [21] et Touma [22]. Pour un sol donné, sa surface est d'autant plus dégradée que la résistance hydraulique est élevée.

L'augmentation du ruissellement, qui résulte de l'encroûtement des sols, ne se traduit pas nécessairement, à l'échelle de la surface élémentaire, par une augmentation de l'érosion. Par contre, l'excès de ruissellement engendré par la dégradation des surfaces élémentaires va provoquer une amplification de l'érosion aux échelles des versants et des bassins versants.

A l'échelle du versant

A l'échelle du versant, la dégradation du couvert végétal, la mise en culture, la densité et le tracé des pistes, la répartition et l'agencement des croûtes de surface ont des répercussions sur le régime hydrologique superficiel et souterrain. Les facteurs topographiques (inclinaison et longueur de pente, répartition longitudinale et spatiale des pentes) et lithologiques (nature et résistance des sols) vont déterminer l'apparition des ravines ou des dépôts.

Sur les surfaces à faible pente et à lithologie résistante, la dégradation des sols induit une augmentation du ruissellement en nappe et un déficit important de l'infiltration. L'étude réalisée par le bureau néerlandais IWACO et le CIEH [23] fournit des renseignements intéressants sur la position et la recharge des aquifères en fonction de la géomorphologie régionale de la province du Yatenga au nord-est du Burkina Faso. La Figure 1 schématise la position respective des aquifères dans le paysage. Elle fait apparaître un creux piézométrique au niveau des bas de versant qui correspond à un déficit d'alimentation de la nappe aquifère. Ce déficit local dans 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 glacis de mi-pente et les chanfreins de bas de pente. Ces derniers sont parmi les plus imperméables testés au Sahel.

A la rupture de pente et en présence de sols plus fragiles naissent d'importantes ravines d'érosion. L'augmentation du ruissellement dans leur zone d'alimentation accroît la compétence des eaux et les ravines se ramifient et s'allongent même dans des zones au relief peu prononcé.

Le versant de Sonkorong, dans le bassin arachidier sénégalais où le relief est pratiquement inexistant, est caractérisé par une importante érosion linéaire. Une grande ravine, prenant naissance en bas de versant, entaille profondément, par de nombreuses ramifications, la zone de raccordement avec le bas-fond. L'apparition de ce ravinement date du début des années 1980 [24] dans la zone de raccordement entre le bas-fond et les glacis de versant (pente de 6 %).

En 1988, suite à une crue de récurrence décennale, cet ensemble de ravines prend des proportions alarmantes en atteignant le village de Sonkorong. Un suivi local de l'érosion linéaire montre que l'évolution des ravines est nettement corrélée aux pluies les plus fortes. Ces dernières évoluent en faveur des pistes et des zones imperméabilisées par l'ha-

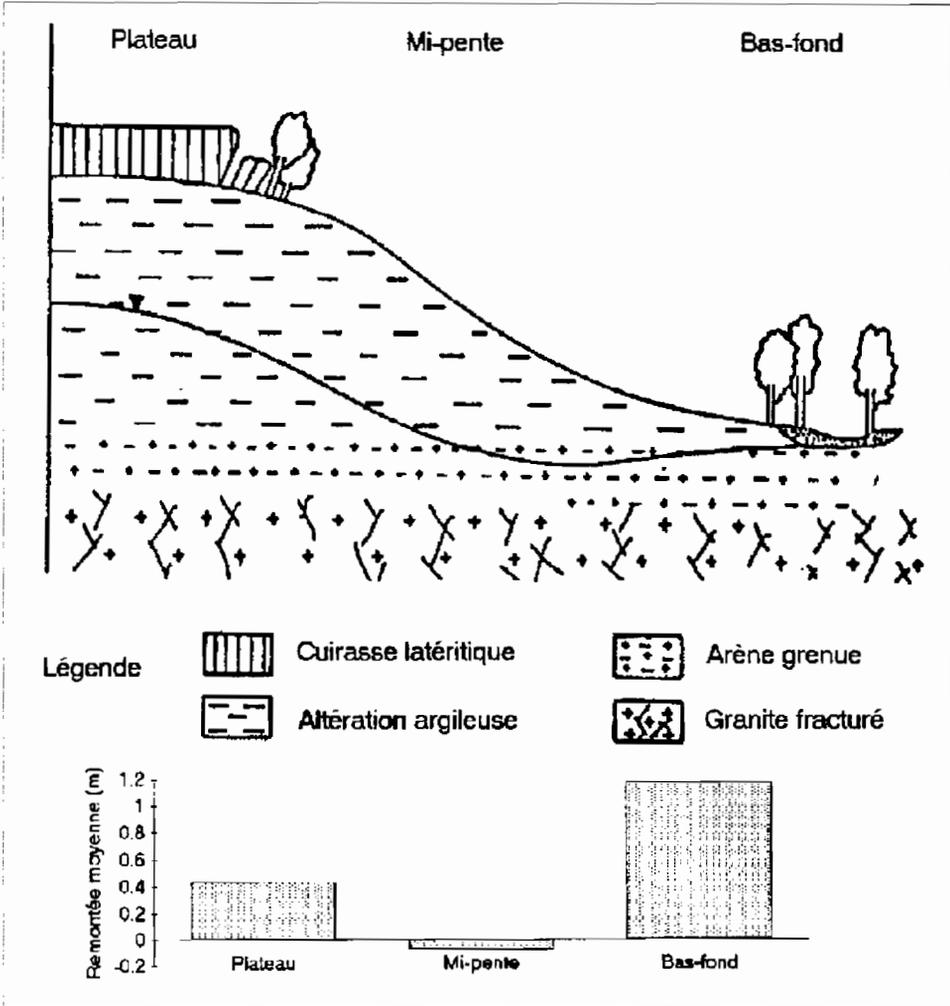


Figure 1. Position respective des aquifères dans le paysage du Yatenga [23].

bitat rural [25, 26]. Des crues de plus en plus fréquentes et violentes empruntent ce réseau de ravines et déposent des sables grossiers sous forme de cônes de déjection dans le bas-fond.

A l'échelle du bassin versant

Au Burkina Faso, cinq petits bassins versants (de 10 à 80 km²) observés dans les années 1955 à 1965 ont été équipés au cours des années quatre-vingt pour en étudier l'évolution [27]. L'affaiblissement du total pluviométrique pendant les années quatre-vingt ne se traduit pas par une diminution de l'écoulement. Les modifications des états de surface ont amené, surtout pour les bassins au nord de l'isohyète 800 mm, des conditions très favorables au ruissellement. La diminution du couvert végétal et l'extension des zones

cultivées favorisent les tassements de la surface du sol et le développement de pellicules imperméables ainsi que l'extension de surfaces très érodées.

En Afrique de l'Ouest sèche, la comparaison des bilans hydrologiques de bassins versants montre une influence de la dégradation des sols et de la végétation différente suivant la taille des bassins [28] :

- dans les petits bassins, l'essentiel de l'écoulement est dû au ruissellement immédiat après les plus forts orages. La dégradation du milieu favorise cette composante du bilan hydrologique, les crues sont plus nombreuses, plus violentes et avec un débit moyen plus fort ;

- pour les bassins de taille intermédiaire, l'écoulement annuel résulte autant de la collecte des eaux de ruissellement immédiat que des écoulements retardés transitant par les nappes phréatiques. La dégradation du milieu modifie peu les volumes écoulés dans l'année, mais les pointes de crue sont plus fortes et les tarissements plus accentués ;

- pour les bassins de plus grande taille, la ressource en eau est entièrement modifiée et amplifie fortement les déficits pluviométriques. Les excédents d'eau dus aux ruissellements immédiats des sous-bassins sont consommés par l'évaporation, tandis que les déficits d'infiltration se cumulent. Il en résulte une chute importante des écoulements annuels et des tarissements rapides.

Différentes tentatives de réhabilitation d'hydrosystèmes dégradés

A l'échelle de la parcelle

L'aménagement le plus simple en vue de la réhabilitation des écosystèmes est la mise en défens. Cette technique a révélé son efficacité dans des milieux les plus variés et dans des conditions climatiques extrêmes [29]. Dans une zone de parcours sur un plateau cuirassé du bassin arachidier du Sénégal, l'impact d'une mise en défens sur le bilan hydrologique a été testé à partir de parcelles de 50 m². Une parcelle a été installée dans une mise en défens de 1 ha datant de 1987, la seconde dans une zone témoin exposée aux allées et venues du bétail.

La mise en défens a amené un facteur réducteur de 3 sur le ruissellement et un facteur réducteur pouvant aller jusqu'à 11 sur l'érosion pour une année comme 1993 qui a connu des événements pluvieux exceptionnels [30].

Dans les systèmes agraires traditionnels, la jachère joue ce rôle de réhabilitation des hydrosystèmes. Devant le recul de cette pratique [31], d'autres aménagements doivent être réalisés. A l'échelle du champ paysan, une expérimentation de réhabilitation de deux micro-bassins versants de 2,5 ha a associé, depuis 1988, des techniques de stabilisation des sols (haies vives, seuils pierreux, fascines) et des améliorations de l'itinéraire technique au Sénégal (sud du bassin arachidier). L'impact de l'aménagement intégré a été suivi par une évaluation du bilan hydrologique des écoulements, des transports solides et du charriage et par une analyse géostatistique des données hydro-pédologiques et agronomiques [32].

Les bilans annuels montrent une quasi-disparition du charriage après aménagement en 1988. Cette disparition du charriage est compensée par des atterrissements en amont des ouvrages (0,5 cm par an en amont des haies vives ; 1 cm en amont des fascines ; 1,8 cm

en amont des cordons pierreux). L'examen comparé des événements hydrologiques montre la disparition du ruissellement pour les faibles précipitations, un effet régulateur de l'aménagement pour les pluies moyennes, mais aucun effet sur les pluies exceptionnelles.

Une étude géostatistique de la répartition spatiale des stocks hydriques montre une forte accumulation de l'eau dans la zone des cordons pierreux et des fascines, en aval du bassin versant. Le suivi tensio-neutronique indique, en 1990, un excédent d'infiltration en début d'hivernage d'environ 100 mm en aval du bassin versant et en amont des ouvrages [33].

A l'échelle du bassin versant

En Tunisie centrale, après trois années d'expérimentation sur des bassins versants, l'étude d'impact de travaux anti-érosifs sur l'écoulement et le transport solide a donné les résultats suivants [34] :

- la mise en place des aménagements a eu un effet assez immédiat sur l'écoulement, le transport solide et un peu moins sur le transport en suspension ;

- 60 % à 65 % des volumes d'eau de crue sont "piégés" en amont des murettes et autres cordons, ainsi que plus de 70 % des transports solides : éléments fins (argile) mêlés à des éléments plus grossiers, tels que sable, gravier et gravillons auxquels on peut ajouter certains débris ligneux ;

- la forme des crues a été modifiée ainsi que les paramètres de base : allongement sensible du temps de base, diminution notable des débits maxima, diminution également du volume de crue ;

- dans le cas de bassin plus grand (celui de l'oued Ez-Zioud), on note l'apparition d'un écoulement retardé, qui, d'après les observations effectuées, semble s'infiltrer dans le lit de l'oued et contribue de ce fait à la réalimentation d'une petite nappe.

A l'échelle des bas-fonds

En Afrique intertropicale, les bas-fonds occupent une superficie de 1,3 million de km² et connaissent déjà un essor agricole important [35]. Des aménagements simples permettent d'agir directement en forçant l'infiltration pour réalimenter les nappes et ralentir les écoulements (soutien des étiages), en gérant mieux les eaux pour lutter contre leur salinisation et favoriser la sédimentation des particules en suspension...

Premier exemple : digue filtrante et digue déversante (Afrique du Nord ou Afrique sahélienne sous l'isohyète 500 mm)

Une digue filtrante est un micro-barrage perméable, en pierres libres ou en gabions, qui freine l'eau de crue et l'épand sur les terres cultivables du bas-fond quelques heures après la pluie, tout en permettant un écoulement progressif vers l'aval. Son rôle est quadruple :

- augmentation des surfaces inondées par la crue ;
- réduction des pointes de crue ;
- amélioration de l'alimentation hydrique des cultures pluviales de bas-fond ;
- augmentation de la recharge locale de la nappe aquifère du bas-fond.

Entre la digue filtrante et le barrage de grande dimension, la digue étanche déversante (ou *micro-barrage*) semble une alternative intéressante dans la mesure où elle concilie :

- le stockage des eaux de surface en saison des pluies et en début de saison sèche pour assurer un complément d'alimentation hydrique aux cultures de bas-fond ;
- le développement du maraîchage en début de saison sèche ;
- la recharge des nappes du bas-fond, par infiltration de l'eau stockée dans le barrage.

Sur le même bas-fond de Bidi-Gourga, au nord de la province du Yatenga au Burkina Faso, les effets sur la recharge de la nappe phréatique d'une digue filtrante et d'un micro-barrage ont été évalués [36] : en position de recharge maximale, comme en position d'étiage, la surface piézométrique présente des courbes isopièzes allongées, parallèlement à l'axe du bas-fond avec un dôme centré sur le bas-fond. Le dôme s'élargit légèrement au niveau de la digue filtrante et beaucoup plus nettement au niveau du barrage. En considérant une amplitude de 2 mètres par rapport au sommet du dôme, les largeurs atteintes latéralement par la nappe ont triplé. A une distance de 50 m de l'axe du bas-fond, la durée de submersion est de 20 à 30 fois plus longue en amont du micro-barrage.

Deuxième exemple : barrage semi-souterrain pour réhabiliter les écoulements de base

Pendant cinq années consécutives, de 1981 à 1985, le riz cultivé traditionnellement dans le bas-fond de Kambo (Mali) avait souffert d'un assèchement précoce de la rizière. Cette sécheresse de fin de cycle avait remis en cause la pratique de cette culture. Lorsque les écoulements de surface cessent, la descente de la nappe est très rapide, de 1,5 à 4 cm/jour, et ne permet pas une sécurisation de la culture du riz. Pour éviter cette descente rapide de la nappe et réguler le niveau de l'eau dans la rizière, un aménagement de type micro-barrage semi-souterrain a été réalisé par l'AFVP en 1987 [37]. Cet ouvrage avait pour objectif de maintenir une lame d'eau sur une superficie de 5,5 ha par la construction :

- d'une digue déversante permettant de régulariser le niveau de l'eau en amont et de pratiquer la riziculture sur l'ensemble de la surface de la retenue (profondeur maximale de l'eau 0.64 m) ;
- d'un parafouille sous le corps de la digue permettant de diminuer les infiltrations et, de ce fait, la vitesse de vidange de la retenue ;
- de sécuriser la culture sans remettre en cause le parcellaire traditionnel.

Une simulation des disponibilités en eau dans le bas-fond a été réalisée à partir d'une chronique de vingt-cinq années de pluies journalières et présentée sous forme statistique. Elle montre que, pour des déficits pluviométriques de fréquence décennale, l'écoulement de base reste suffisant pour assurer la riziculture après aménagement [38].

Bases scientifiques et techniques d'une restauration des régimes hydriques et hydrologiques

Les paragraphes précédents ont mis en évidence l'importance de la dégradation des terres sur le fonctionnement des hydrosystèmes et ont montré que des solutions existent pour les réhabiliter. Pour une intervention plus systématique, il est nécessaire de définir ce qui pourrait constituer les bases scientifiques et techniques d'une restauration des régimes hydrologiques et hydriques au nord et au sud du Sahara (ou dans d'autres zones

arides). A l'évidence, l'approche doit être multidisciplinaire et dépasser le seul domaine des sciences hydrologiques.

En effet, nous avons déjà souligné l'importance du facteur humain et du contexte économique non seulement sur la dégradation du milieu, mais aussi sur les difficultés rencontrées dans les tentatives de réhabilitation engagées récemment. Les exemples présentés en sont un bon témoignage. Une participation active d'agronomes, d'économistes, de spécialistes de la formation en milieu rural et de sociologues est nécessaire à côté de celle des techniciens de la ressource en eau, hydrologues, bioclimatologistes, hydrauliciens ou pédologues. Il semble également nécessaire que les acteurs de cette réhabilitation s'appuient sur les structures locales traditionnelles, associatives ou administratives, dont le capital de confiance auprès des populations est le plus fort !

L'analyse des systèmes de production agro-sylvo-pastoraux

La restauration des régimes hydrologiques sur les versants et les bassins versants passe nécessairement par une remise en équilibre de l'espace exploité par les activités humaines, dégradé par le passage des animaux ou simplement dévasté par les altérations climatiques.

Cet espace est le plus souvent rural et c'est surtout sous cet aspect que nous aborderons le sujet. Il ne faut cependant pas ignorer les zones urbaines ou péri-urbaines des zones arides et subarides où se posent également des problèmes importants de dégradation du milieu.

Dans le Sahel africain, les pratiques paysannes sont le fruit d'une longue accumulation d'expériences dans la gestion des risques. Le paysan sahélien a structuré son mode de vie en développant prioritairement une stratégie de groupe familial pour assumer ce risque : il répartit ses cultures en plusieurs sites ; il tente de les diversifier en fonction de la rapidité de croissance des espèces et de leur précocité relative au cours de la saison agricole ; il augmente les surfaces cultivées en fonction des actifs. Les éleveurs, de leur côté, adoptent des parcours qui sont fonction de la répartition spatiale des points d'eau, cherchant à consommer en priorité les points d'eau les plus temporaires et les plus lointains de façon à exploiter des pâturages dont l'accessibilité est réduite dans le temps avant de se replier sur les points d'eau permanents de saison sèche dont les pâturages sont rapidement surchargés et dévastés [39]. Ces modes de fonctionnement séculaires ne peuvent pas être remis en cause brutalement, même s'ils participent, parfois lourdement, au déséquilibre écologique.

De nombreuses actions ont été menées par les organismes nationaux, les grandes institutions internationales et surtout les organisations non gouvernementales (ONG) pour tenter d'introduire dans le milieu rural des régions arides et subarides des techniques agronomiques adaptées à leur environnement naturel et humain. Si l'on excepte un certain nombre d'erreurs rapidement identifiées, ces propositions sont généralement adaptées à la restauration des fonctionnements naturels. Or on n'observe pas, dans la très grande majorité des cas, d'extension de ces techniques et d'améliorations notoires à l'échelle régionale. Cela est dû soit à la faible diffusion des techniques proposées au-delà de la zone *d'expérimentation* (on n'arrive pas à passer de l'échelle de la recherche à celle du développement), soit à la non-intégration par les populations concernées (on ne dépasse pas le cadre de la *politesse* due à l'égard du technicien ou de l'*intérêt* individuel sans lendemain).

Pour améliorer cette diffusion et cette intégration de techniques auprès des usagers de l'espace, il est nécessaire non seulement de bien connaître les traditions des individus et des sociétés, mais encore de les sensibiliser à la sauvegarde de leur milieu, considéré comme à la fois leur outil de travail et leur cadre de vie.

Le paysan sahélien, comme tous les producteurs de denrées consommables commercialisées, est désemparé devant une succession de problèmes économiques qu'il ne peut gérer et dont les interactions se situent actuellement au niveau planétaire. La majeure partie de la production agricole sahélienne est destinée à l'autoconsommation, mais la mutation des techniques dépend beaucoup de ses capacités d'adaptation aux marchés extérieurs [40, 41]. Combien plus inaccessibles sont alors les notions de *réhabilitation*, voire de *développement durable* ? L'introduction de nouvelles techniques agricoles ou de nouveaux cultivars ont des répercussions sociales dont il n'est pas facile d'appréhender les effets qui peuvent être jugés négatifs par la population ou une partie de la population locale.

Les problèmes posés par la diffusion des techniques de réhabilitation des régimes hydrologiques sont souvent d'ordre pratique ou alors d'ordre culturel. Aligner des pierres dans un champ le long des courbes de niveau ou au travers d'un bas-fond requiert de la main-d'œuvre, une petite maîtrise technique et des moyens de transport. Lorsque la main-d'œuvre ou les moyens de transport font défaut, l'opération est impossible à réaliser. Si la maîtrise technique est déficiente, les effets néfastes de l'aménagement risquent d'annihiler ses effets positifs.

Dans l'impossibilité d'augmenter significativement ses ressources avec des risques acceptables, le paysan africain, confronté à un accroissement important de sa population, développe une stratégie agricole extensive. Cette stratégie est confortée par un mode usager traditionnel d'appropriation de l'espace et, dans plusieurs régions, par l'introduction récente de la culture attelée. Elle conduit cependant à une exploitation destructrice des sols et trouve ses limites aux confins de l'espace cultivable et dans la perte de fertilité des sols surexploités sans compensation organique et minérale. Parallèlement, depuis plusieurs décennies, se développe, dans la zone sahélienne, une agriculture irriguée essentiellement *extensive* mais qui devient *intensive* lorsque les productions trouvent à s'écouler sur des marchés porteurs à l'exportation : haricots verts au Burkina Faso et au Kenya, pommes de terre et oignons au Mali, maraîchage autour des agglomérations urbaines.

Avec la récente dévaluation du franc CFA et la généralisation des programmes d'ajustement structurel ruraux, qui conduisent les États africains à l'abandon des subventions aux intrants agricoles et à la mécanisation des techniques, comment vont évoluer les stratégies paysannes et les marchés de produits tropicaux ?

Quelle réforme foncière faut-il alors adopter pour favoriser la conservation des sols et par quelle stratégie économique peut-on favoriser le développement d'une agriculture intensive ? Des réponses qui seront données à ces deux questions sociales fondamentales dépendent probablement l'avenir agricole de l'Afrique tropicale sèche et son autosuffisance alimentaire.

L'étude des fonctionnements hydrologiques

Pour restaurer les régimes hydrologiques, il faut retrouver un équilibre environnemental où les contraintes liées d'une part aux précipitations et d'autre part à leur redistribution

(infiltration, écoulement, évaporation) ne constituent plus un facteur de dégradation des sols ; il s'agit même d'aller au-delà et d'utiliser cette ressource en eau pour tenter d'enrayer les déséquilibres des autres compartiments environnementaux (végétation naturelle et cultures, élevage, etc.).

Dans de nombreuses situations, et principalement sur les sols cultivés, il faut faire en sorte que les pluies et les écoulements superficiels immédiats soient moins agressifs, donc retarder l'écoulement et tâcher de favoriser son infiltration par tous les moyens appropriés. Comme personne n'ose prétendre limiter l'importance et l'intensité des pluies, il faut savoir protéger le sol, faciliter l'infiltration et réduire, si nécessaire, l'eau disponible pour le ruissellement.

Les conséquences entraînent alors le milieu dans un cycle évolutif favorable : l'eau infiltrée sature les couches superficielles du sol, alimente les nappes, y compris les plus profondes, regonfle les écoulements d'inféoflux, redresse les étiages en quantité et en durée, après avoir lissé les pointes de crues [42]. L'excès d'infiltration n'a cependant pas que des effets positifs et il faut envisager dans certains cas d'aménager l'espace rural en tirant profit de certaines suralimentations des ressources locales, quitte à en assurer leur distribution artificiellement.

Il est donc nécessaire d'étudier finement les précipitations et de comprendre les mécanismes hydrologiques qui régissent l'apparition du ruissellement, la redistribution des écoulements liquides et solides sur les versants et le bilan hydrologique et sédimentologique des bassins versants.

A l'échelle des surfaces élémentaires

De nombreux travaux, en particulier de l'ORSTOM et du CIRAD [43], ont été réalisés sur des surfaces élémentaires (placettes de 1 à quelques dizaines de m², petites parcelles agricoles). Ils font appel à des techniques d'expérimentation (simulation de pluie et de ruissellement, infiltromètres, dispositifs anti-érosifs, etc.) et à des méthodes modernes de mesure. Ils ont permis d'acquérir une bonne connaissance des comportements hydrologiques et érosifs dans un certain nombre de situations agronomiques (association sol / type de culture / technique culturale). Mais ces études sont encore trop incomplètes (en particulier pour ce qui concerne l'érosion dans les milieux cultivés) et de nouvelles et nombreuses expériences devront encore être entreprises avant de pouvoir tester efficacement et systématiquement l'efficacité de nouvelles techniques culturales sur le ruissellement et sur l'érosion.

A l'échelle des versants et des bassins versants

Diverses recherches sur les mécanismes du cycle hydrologiques sur versants et bassins versants ont été réalisées ces dernières années en particulier à Thyssé Kaymor au Sénégal et à Bidi au Burkina Faso [44], mais aussi à Mouda (Cameroun) [45], ou encore avec une approche régionale [46-48]. On peut mentionner également les travaux qui entrent dans le cadre du programme Hapex-Sahel (Niger) [49]. Ce programme a conduit à deux types de résultats nouveaux intéressants les fonctionnements hydrologiques : d'une part, la très grande hétérogénéité locale des précipitations sahéniennes, au-delà de ce que l'on imaginait, d'autre part, un mécanisme de recharge des nappes à partir des petits systèmes

endoréiques locaux et des bas-fonds. Ces quelques études, auxquelles on peut ajouter le projet plus ancien de la mare d'Oursi [50], ont été menées par de grosses équipes avec des moyens importants.

Elles démontrent à l'évidence que notre connaissance des fonctionnements à l'échelle des paysages n'est encore qu'embryonnaire et qu'il est vain de vouloir appliquer des schémas préétablis sur des milieux extrêmement divers. Les milieux secs, longtemps réputés "hydrologiquement simples" apparaissent comme complexes et la réalimentation des aquifères y est encore mal connue. L'étude de la distribution spatiale et temporelle des flux verticaux (précipitation, évaporation, transpiration, interception, infiltration) à l'échelle des ensembles complexes (versants, bassins versants élémentaires et au-delà) constitue une voie de recherche toujours prometteuse et probablement pleine de surprises.

Conclusion

En l'absence d'activités humaines, la nature offre une très grande capacité d'adaptation face aux déséquilibres naturels (climatiques ou accidentels) même dans les régions arides et subarides. Il suffit d'observer les résultats spectaculaires des expériences plusieurs fois renouvelées de mises en défens de parcelles : par exemple à Oursi (Burkina Faso), à Thyssé Kaymor (Sénégal) ou à Banizoumbou (Niger). La végétation reprend en général ses droits avec des espèces qui protègent bien les sols et qui s'adaptent aux nouvelles contraintes édaphiques. On explique la structure en demi-lune des massifs de "brousse tigrée" par le fait qu'une telle organisation spatiale permet de concentrer des écoulements, sur un relief pratiquement plat, vers des zones privilégiées d'infiltration et de stockage [51]. Les paysages de "mogoths" au Mexique (longs et larges piémonts à faible pente) ont la même fonction.

La nature sait faire, et si elle ne fait plus, c'est qu'on l'en empêche en coupant le bois des haies, en paissant les pâturages ou en brûlant l'ensemble. Alors, faut-il attendre que la nature trouve elle-même une solution ou n'est-il pas trop tard ? N'a-t-on pas atteint un déséquilibre irréversible ? Faut-il proposer des solutions déjà bien connues, qui donnent de bons résultats dans des milieux secs, économiquement et culturellement favorables, ou en chercher de nouvelles, mieux adaptées à chaque situation locale ?

Des solutions techniques variées telles que fumure, lutte anti-érosive, économie de l'eau, aménagement de bas-fonds, surcreusement de mares, pratiques agro-forestières, etc., ont été éprouvées expérimentalement et ont fait preuve de leur efficacité. A l'opposé, des solutions sont parfois diffusées sans avoir été validées par une démarche expérimentale sérieuse. D'autres, enfin, ont un objectif positif immédiat (limitation de l'écoulement, par exemple), mais oblitérent l'avenir (utilisation du même écoulement pour une irrigation de surfaces plus grandes, par exemple).

Rochette [52] analyse dans un ouvrage de synthèse sur la lutte contre la désertification au Sahel plus de cent programmes d'aménagement. Il y apparaît que, dans tout le Sahel, on se heurte à l'une des contraintes suivantes :

- la présence de lacunes dans les connaissances sur la distribution des flux hydriques dans le paysage ;
- la mauvaise reproduction des modèles de fonctionnement des écosystèmes cultivés ;
- la faible transférabilité des solutions techniques en milieu paysan.

Du point de vue scientifique, il est nécessaire d'associer l'utilisation d'outils de modélisation spatialisée à la connaissance des mécanismes naturels. Des techniques des systèmes d'information géographiques et de la télédétection commencent à être mises en œuvre. Il faudrait adapter leur utilisation aux besoins de l'évaluation des bilans hydrologiques, prendre en compte l'influence de l'homme par le biais d'une analyse diachronique et pouvoir confronter l'état du milieu avec sa réponse hydrologique.

Enfin, l'application des méthodes participatives d'investigation, utilisées en sciences sociales, permet de mieux appréhender les attitudes et les stratégies que suscite la dégradation de l'écosystème chez le paysan [53].

Parallèlement, il est nécessaire de multiplier les petites expériences locales scientifiquement contrôlées susceptibles de faire tache d'huile. En Amérique du Sud et en Afrique du Nord, on assiste à de très nets progrès dans la conservation des eaux et des sols sous l'influence d'actions souvent privées, simples et généralement peu onéreuses. Pour réussir, il est indispensable que les habitants des régions impliquées prennent conscience de la gravité du problème et qu'ils entreprennent eux-mêmes les actions de réhabilitation. Il y a peut-être de ce point de vue *un devoir d'ingérence* des scientifiques auprès des organismes locaux d'encadrement rural, auprès des gestionnaires de grands projets d'aménagement et auprès des associations et groupements villageois pour les sensibiliser aux actions qui doivent être entreprises sans attendre, pour réhabiliter leur environnement, lieu de vie et lieu de production.

Références

1. ICID (1992). Impacts of climatic variations and sustainable development in semi-arid regions. Conference International in Fortaleza, Ceará, Brazil (January 27, February 1, 1992).
2. CNUED (1992). Déclaration de Rio sur l'Environnement et le Développement. In : *Savoirs 2 - Le Monde diplomatique* : Une terre en renaissance ; les semences du développement durable, 1994.
3. GIP Hydrosystèmes - Groupement d'Intérêt Public - BRGM - CEMAGREF - CNRS - IFREMER - INRA - ORSTOM - OIEau - Directeur : Christian Lévêque, ORSTOM, Paris.
4. Hubert P., Carbonnel J.P. (1989). Approches statistiques de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest. In : *Les hommes face aux sécheresses*. EST IHEAL, Paris : 101-106.
5. Nicholson S.E. (1987). Climatic variations in the Sahel and other African regions during the past five centuries. *Journal of Arid Environments* ; 1 : 3-24.
6. Olivry J.C., Chastenet M. (1989). Évolution de l'hydraulicité du fleuve Sénégal et des précipitations dans son cours inférieur depuis le milieu du XIX^e siècle. In : *Les hommes face aux sécheresses*. EST IHEAL, Paris : 115-124.
7. Lamb P.J. (1982). Persistence of subsahara drought. *Nature* ; Vol. 299 : 46-47.
8. Ojo O. (1987). Rainfall trends in West Africa. In : Solomon S.I., Beran M., Hogg W., eds. *The influence of climatic change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*. IAHS publ ; 168 : 37-44.
9. Albergel J. (1986). Évolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso. Col. Int. sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou 20 au 25 mai 1986. CIEH (19 p).
10. Yu B., Neil D.T. (1990) Global warming and regional rainfall : the difference between average and high intensity rainfalls. *Int Journal of Climatology* ; Vol. 11 : 653-661.

11. Yu B., Neil D.T. (1993). Long-term variations in regional rainfall in the South West of Western Australia and the difference between average and high intensity rainfalls. *Int Journal of Climatology* ; Vol. 13 : 77-88.
12. Riou C. (1975). La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. ORSTOM ; Mémoire n° 80 (236 p).
13. Pouyaud B. (1986). Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. ORSTOM ; Etudes et Thèses (254 p).
14. Pieri C. (1989). *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*. C.F. - CIRAD (443 p).
15. Casenave A., Valentin C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Coll Didactiques. ORSTOM, Paris (229)p).
16. Walsh J. (1984). Sahel will suffer even if rains come. *Science* ; 224 : 46-48 : 467-471.
17. UNSO (1983). Plan national de lutte contre la désertification en Haute Volta (56 p).
18. Numéro spécial Crues et sécheresses de la revue *Sécheresse, science et changements planétaires*, John Libbey Eurotext, septembre 1993, n° 3, vol. 4.
19. Albergel J., Casenave A., Ribstein P., Valentin C. (1992). Aridité climatique, aridité édaphique. Étude des conditions de l'infiltrabilité en Afrique tropicale sèche. In : *L'aridité : une contrainte au développement*. Coll Didactiques / ORSTOM Éditions : 123-130.
20. Albergel J., Bader J.C., Braudeau E., Pépin Y., Planchon O. (1994). UR 4 DEC AID 93. Thyssé Kaymor, ORSTOM, Dakar (80 p).
21. Hillel D. (1974). *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Vander Ed (287 p).
22. Touma J. (1992). Simulation numérique de l'infiltration dans les sols encroûtés : croûte établie et croûte en formation. Hydrologie continentale. ORSTOM ; Vol. 7, n° 2 : 143-158.
23. IWACO et CIEH (1990). Etudes des nappes du Yatenga pour la direction de la DEP du ministère de l'Eau du Burkina Faso.
24. Valet S. (1985). Action villageoise bénévole de lutte anti-érosive dans les unités expérimentales de Thyssé-Sonkorong en 1984 (Siné-Saloum, Sénégal). ISRA / CIRAD Kaolack.
25. Monimeau (1992). Perspectives pour un aménagement intégré d'un bassin versant : projet d'aménagement de la ravine de Sonkorong. CNEARC /CIRAD /ENSAM /ISRA, Mémoire de l'ESAT (65 p).
26. Pépin Y., Albergel J., Dubée G., Maïga M. (1993). Rapport de la campagne de mesures hydrologiques sur le bassin versant de Sonkorong - Année 1993, Savanes à long terme, CNRS-ORSTOM, ORSTOM Dakar (34 p).
27. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso ; du m² au km². Étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Col Etudes et Thèses. ORSTOM, Paris (341 p).
28. Pouyaud B. (1987). Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques. *IAHS* ; n° 168 : 447-462.
29. Grouzis M. (1988). Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques Sahéliens (Mare d'Oursi, Burkina Faso). Col. Etudes et Thèses, Paris, ORSTOM (336 p).
30. Diatta M. Régénération des zones marginales et rôle de l'arbre dans les programmes de DRS, application aux bassins versants de Thyssé Kaymor. Thèse à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (à paraître).
31. Grouzis M., Albergel J. (1992). Environnement et productions agricoles. Cas du Burkina Faso. In : *La crise de l'agriculture africaine*. Société-Espace-Temps I ; 1 : 74-89.
32. Séné M., Pérez P. (1994). Contraintes et possibilités de valorisation des ressources naturelles dans le sud du bassin arachidier (Siné-Saloum, Sénégal) In : Reyniers F.N., Laomaibao N., eds. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. John Libbey Eurotext, Paris : 217-233.

33. Séné M., Pérez P., Albergel J. (1993). La signification de la valorisation de l'eau en culture pluviale au Sénégal : gestion du déficit et de l'excès hydrique. Atelier Scientifique : Gestion durable des terres arides et semi-arides. Conf. SCOP. Dakar, 15-19 nov. 1993.
34. Camus H., Abdallah R., Rajah A. (1994). Impacts d'aménagements anti-érosifs sur le bilan hydrologique de bassins versants expérimentaux en Tunisie centrale. Séminaire maghrébin de Kairouan (30 mai-1^{er} juin 1994) (7 p).
35. Albergel J., Lamachère J.M., Lidon B., Mokadem A.I., 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, CIEH, Ouagadougou (335 p).
36. Lamachère J.M., Maizi P., Serpantié G., Zombré P. (1991). Un petit bas-fond en zone tropicale sèche. Fonctionnement et aménagement (Bidi, Yatenga, Burkina Faso). Séminaire international Tananarive, 9-14 décembre 1991, *Bas-fond et riziculture* (24 p).
37. AFVP (1987). Programme de micro-réalisation, région de Kadiolo. Rapport technique de l'aménagement du bas-fond de Kambo. CEE CIRAD n° TS2A0017FCD. IER, CIRAD, ORSTOM R3S.
38. Albergel J. (1992). Technologies appropriées pour un développement durable en zone semi-aride de l'ouest africain : Exemple du barrage semi-souterrain de Kambo au Mali. ICID, Fortaleza, Brésil (27 janvier 1992 - 01 février 1992) (19 p).
39. Claude J., Grouzis M., Milleville P. (1992). *Un espace sahélien. La Mare d'Oursi (Burkina Faso)*. ORSTOM (242 p).
40. Tubiana L. (1994). Les politiques agricoles au banc des accusés. In : *Savoirs 2 - Le Monde diplomatique* : Une terre en renaissance ; les semences du développement durable.
41. Couty P. (1994). Les capacités d'adaptation des paysans africains. In : *Savoirs 2 - Le Monde diplomatique* : Une terre en renaissance ; les semences du développement durable.
42. Camus H., Bergaoui M., Mouelhi S. (1994). Impact de travaux anti-érosifs sur les caractéristiques des crues de bassins versants expérimentaux en Tunisie centrale semi-aride (11 p).
43. P. Perez (1994). Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum (Sénégal). Thèse Doctorat, ENSAM Montpellier (250 p).
44. Albergel J., Lamachère J.M., Lidon B., Mokadem A.I., Van Driel W. (1993). *Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel*. CIEH (336 p).
45. Thébé B. (1987). Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun : bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelle. Thèse Doctorat Université Montpellier 2.
46. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso, du m² au km² : étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Doctorat Université Montpellier 2.
47. Ribstein P. (1990). Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse Doctorat Université Montpellier 2.
48. Nouvelot J.F. (1993). Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. ORSTOM-CIEH (546 p).
49. Numéro spécial de *Journal of Hydrology* (à paraître en 1995) et Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (septembre 1994).
50. Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A. (1985). Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi. Travaux et documents de l'ORSTOM ; n° 190.
51. Galle S., Seghiéri J. (1994). Dynamics of soil water content in relation to annual vegetation : the tiger bush in the Sahelian Niger (poster). Assembly of EGS - Grenoble, France.
52. Rochette R.M. (1989). Le Sahel en lutte contre la désertification. Leçons d'expérience. CILSS PAC. GTZ (592 p).
53. Matar Gueye (1993). Proposition de programme pour l'étude socio-économique des aménagements anti-érosifs sur les bassins de Thyssé Kaymor. ISRA-Kaolack (8 p).