

Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides

BULLETIN
PÉDOLOGIQUE
DE LA FAO

57



ORGANISATION
DES
NATIONS UNIES
POUR
L'ALIMENTATION
ET
L'AGRICULTURE

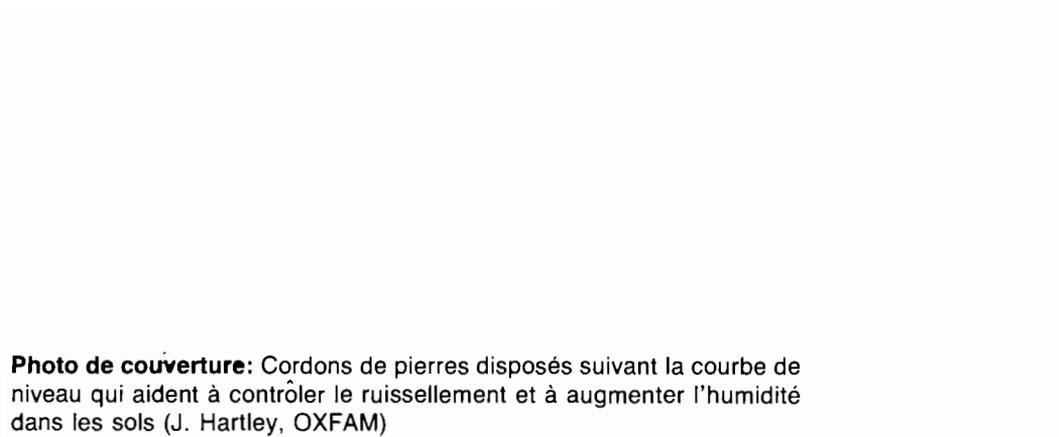


Photo de couverture: Cordons de pierres disposés suivant la courbe de niveau qui aident à contrôler le ruissellement et à augmenter l'humidité dans les sols (J. Hartley, OXFAM)

Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides

par

Norman W. Hudson

Silsoe Associates
Amphill, Bedford
Royaume-Uni

Version française adaptée

par

E. Roose

ORSTOM
Montpellier, France

Service des sols — ressources, aménagement et conservation
Division de la mise en valeur des terres et des eaux; FAO

BULLETIN
PÉDOLOGIQUE
DE LA FAO

57



ORGANISATION
DES
NATIONS UNIES
POUR
L'ALIMENTATION
ET
L'AGRICULTURE
Rome, 1990

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-51
ISBN 92-5-202946-X

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, mise en mémoire dans un système de recherche bibliographique ni transmise sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit: électronique, mécanique, par photocopie ou autre, sans autorisation préalable. Adresser une demande motivée au Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie, en indiquant les passages ou illustrations en cause.

© FAO 1990

AVANT-PROPOS

Depuis de nombreuses années, la FAO s'intéresse au développement, à l'aménagement et à la conservation des ressources en terre.

Parmi les activités dans ce domaine, citons la publication depuis 1965 d'une série de bulletins pédologiques par la Division "Terres et Eaux". Ils ont été rédigés dans l'intention de fournir des informations claires aux personnes concernées par la mise en valeur des ressources en terre.

Ces dernières années, les régions semi-arides du monde ont fait l'objet d'une attention particulière. Cette attention a été largement provoquée par les sécheresses et les famines des années 1970 et 1980. Dans les zones semi-arides africaines, elles ont touché de vastes régions et des millions de personnes.

Que peut-on entreprendre afin d'éviter le renouvellement de telles catastrophes ? Il ne peut y avoir de réponse simple à cette question, tant qu'un grand nombre de problèmes techniques, économiques, sociaux et politiques ne seront pas étudiés et résolus.

Cependant, chacun sait que les sécheresses sont la conséquence globale de phénomènes naturels dans les régions semi-arides. Cela s'est souvent produit par le passé et se reproduira encore dans l'avenir. Nous savons aujourd'hui que les terribles effets des dernières sécheresses ont été aggravés par l'érosion et d'autres formes de dégradation des sols qui se sont développées au fil des ans, dans les régions semi-arides à cause d'une gestion inadaptée et d'une mauvaise utilisation des terres. La dégradation du sol et de la végétation aggrave la situation en période de sécheresse.

Mais l'érosion des sols peut être maîtrisée et la fertilité peut être restaurée jusqu'à atteindre un niveau de productivité satisfaisant si des techniques d'aménagement appropriées sont appliquées.

Toutes les techniques de conservation des sols dans les zones semi-arides ne peuvent être citées dans une si brève publication, même si elles sont connues. Plus précisément, les besoins varient selon les régions en fonction de la végétation, des sols, du climat et des besoins des hommes.

Par conséquent, l'objectif de cette étude est de présenter des méthodes et des techniques qui ont déjà été testées et qui se sont révélées efficaces dans certaines régions du globe où le manque de précipitations est un problème majeur. Nous pensons que plusieurs de ces méthodes pourraient être largement étendues à des régions à problèmes similaires. Enfin, nous espérons que ce bulletin servira de guide et de référence aux planificateurs et techniciens travaillant dans les zones semi-arides à la recherche de solutions à adapter et à développer dans leurs efforts pour contrôler la dégradation des terres et pour introduire des systèmes agricoles productifs et équilibrés.

Etant donné les différences de terminologie des systèmes de classification des sols, l'auteur a repris les termes des textes originaux cités en référence. L'annexe 2 dresse la liste des différentes terminologies relevées d'un auteur à l'autre. Elle a été empruntée à "Elsevier's Agricultural Compendium" (1981), tableau 2.7/7, intitulé "Résumé du système FAO-Unesco de classification des sols et son analogie avec le système taxonomique des Etats-Unis".

En 1987, la FAO publiait en anglais ce bulletin, basé essentiellement sur l'expérience des pays anglophones. Il semblait important non pas de traduire le présent bulletin mais d'en publier une version française, adaptée, qui incluerait l'expérience des pays francophones en matière de conservation du sol et des eaux.

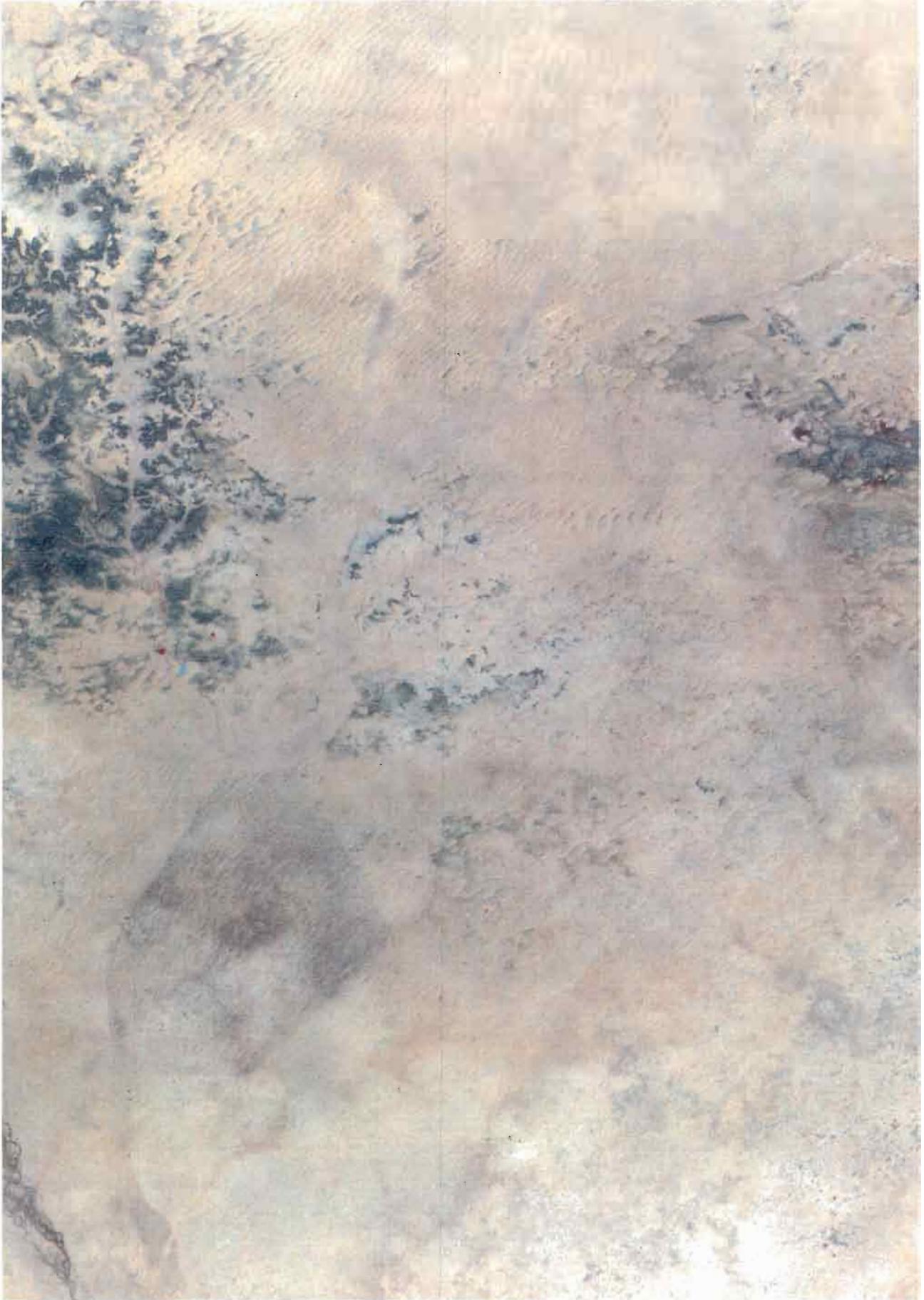
REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement les nombreuses personnes et institutions qui nous ont apporté leur soutien en nous communiquant leurs idées, leurs commentaires, leurs publications et leurs documents photographiques pour la réalisation de ce Bulletin, et plus particulièrement :

Le personnel de l'ACSAD (Centre arabe d'étude des terres arides et non irriguées) à Damas, Syrie ; P.E.V. Charman et l'équipe du "Soil Conservation Service", New South Wales, Australie ; Dr. M.T. Dennet, "Department of Agricultural Botany", Université de Reading ; Dr. R.M. Dixon, "Imprinting Foundation", Tucson, Arizona ; Dr. H.E. Dregne, "International Center for Arid and Semi-Arid Land Studies", Texas Tech. University, Lubbock, Texas ; Dr. S.A. El-Swaify, "College of Tropical Agriculture and Human Resources", l'Université d'Hawaii ; Prof. M. Evenari, Université hébraïque de Jérusalem ; Dr. D.H. Fink, "Water Conservation Laboratory" Phoenix, Arizona, Etats-Unis ; B.Foran, CSIRO, "Division of Wild Life and Rangelands Research", Australie ; Dr. S.A. Gavande, "Soils and Reclamation Consultant", Austin, Texas ; Dr. G.T. Gowan, "Federal Department of Agricultural Land Resources", Kaduna, Nigeria ; G.M. Hallam, DRSPR, Mali ; Dr. B. Heusch, Saint-Mury la Tour, France ; W. Hoogmoed, Université agronomique de Wageningen, Pays-Bas ; Dr. H. Hurni, Programme de conservation des sols, Addis Abeba, Ethiopie ; le personnel du "Intermediate Technology Development Group, Water Group" ; "Intermediate Technology Publications" ; le personnel de l'ICARDA (Centre international de recherche agricole dans les zones arides), Alep, Syrie ; l'ensemble du personnel de l'ICRISAT (Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides), Hyderabad, Inde ; Dr. E.Jones, Station de recherches de Chiredzi, Zimbabwe ; C.D. Kagoro, "the Institute of Agricultural Engineering", Zimbabwe ; I.A.F. Laing, Ministère de l'Agriculture, Australie occidentale ; Dr. H. Lal, EMBRAPA, Petrolina, Brésil ; J.G. Lewis, WAPAC, Banque Mondiale ; Prof. C. Mathieu, Faculté des sciences agronomiques, Université du Burundi (actuellement FAO, République Centrafricaine) ; Prof. W.G. Matlock, Faculté d'agriculture, Université d'Arizona ; Dr. A. Millington, Département de géographie, Université de Reading ; I.R. Melville and R.G. Richards, "Conservation Commission of the Northern Territory" Australie ; Dr. Dhruva Narayana et le personnel du "Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute", à Dehra Dun, Inde ; Dr. W.E. Ormerod, Padworth, Reading, Angleterre ; le personnel de l'ODI ("Overseas Development Institute") Londres ; le personnel de l'OXFAM ; Dr. A. Von Peter, Institut International de la Potasse (IPI), Suisse ; Prof. J. de Ploey et Dr. J.Poesen, Université Catholique de Louvain, Belgique ; le personnel de l'IRAT (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières), Montpellier, France ; Prof. C.W. Rose, "School of Australian Environmental Studies", Université de Griffith, Queensland, Australie ; Dr. D. Rosenzweig, Director of Soil Erosion Research Station, Natanya, Israël (actuellement Coopération Israélienne, Ethiopie) ; T.F. Shaxson, FAO, Brésil (actuellement FAO, Lesotho) ; D. Sims, FAO, Portugal (actuellement FAO, Rome) ; C.W. Steley et W.F. Buddee, Division des programmes pour l'outre-mer, Ministère de l'Agriculture, Australie, Région Sud ; Dr. M.A. Stocking, "School of Development Studies", Université d'East Anglia ; Dr. R.K. Sivanappan, Université agricole Tamil Nadu, Coimbatore, Inde ; Dr. C. Valentin de l'ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire ; H. Vogel, Agence allemande de coopération technique (GTZ) ; Dr. T.J. Willcocks, "Overseas Division", NIAE, Silsoe, Bedford.

Plusieurs membres du personnel technique de la FAO nous ont fourni leur assistance, en particulier D.W. Sanders, Fonctionnaire Principal du Groupe de la conservation des sols, qui a proposé l'édition de ce Bulletin et nous a aidé à définir ses buts et ses objectifs. Nous tenons à remercier également les agents de son Groupe pour leur assistance technique et le Service de télédétection de la FAO pour la fourniture des images satellitaires.

La recherche documentaire concernant un sujet aussi large a été grandement facilitée par l'aide apportée par la Bibliothèque du Collège de Silsoe, notamment grâce aux recherches sur banques de données réalisées par B. Morgan, bibliothécaire, aux recherches interbibliothèques effectuées par Mlle B.Laing et l'action de tout le personnel de la Bibliothèque universitaire.



Frontispice : image satellite montrant le surpâturage au Sahel. La tache hexagonale représente le ranch de Ekrafane au Niger, où le surpâturage est contrôlé. La zone blanche aux alentours est dénudée à la suite du surpâturage (NASA)

Pour l'édition de ce Bulletin, un grand nombre de photographies nous ont été aimablement prêtées, et chaque auteur est cité dans la légende correspondante. Les photos non accréditées proviennent de la collection personnelle de l'auteur. La plupart des graphiques ont été dessinés par H. Trayner. Je suis très reconnaissant à L. Ovington Lee d'avoir pris en compte les innombrables rajouts et corrections dans la frappe de ce manuscrit, à H. Tonkin, Editrice et chargée de réunions, AGLD, pour son aide critique concernant la coordination de l'édition finale, ainsi qu'à C. Smith-Redfern pour avoir assuré la coordination de l'édition française.

Nous tenons à remercier M. Perraud pour la traduction de ce présent bulletin.

RESUME

Ce bulletin ne saurait offrir de solutions simples à tous les problèmes de conservation du sol et de l'eau dans les régions semi-arides. Il n'existe pas de catalogue de méthodes éprouvées sur le terrain qui soient applicables immédiatement. Les conditions de climat, de sol et les facteurs économiques et sociaux sont trop variables. Ce bulletin passe en revue les techniques qui ont déjà été expérimentées, qui se sont avérées efficaces en certains endroits et qui pourraient être utilisées dans des conditions similaires.

Nous n'avons pas essayé de définir les zones semi-arides, quelques uns des exemples cités proviennent d'ailleurs des régions arides et sub-humides. Ce bulletin doit être utile là où la pluviosité est un problème du fait de sa faible quantité, de sa distribution ou de son irrégularité. Nous n'avons pas abordé les problèmes de salinité et d'alcalinité, d'érosion éolienne et de mécanisation. Il en est de même pour les aspects économiques, sociaux et politiques qui, dans bien des cas, sont aussi importants que les problèmes techniques.

Les trois premiers chapitres soulignent l'ampleur et la gravité du problème, les difficultés rencontrées et les possibilités d'amélioration. Nous soutenons la thèse selon laquelle la sécheresse est un phénomène naturel des régions semi-arides et que les récents désastres de dégradation du sol et de famine en Afrique sont le fruit d'erreurs de gestion et d'utilisation des ressources naturelles, réduisant la capacité de ces régions à répondre aux défis supplémentaires imposés par la sécheresse.

Le chapitre 2 passe en revue l'étendue des problèmes d'érosion et les pressions qui pèsent sur les écosystèmes semi-arides, résultant de l'augmentation des populations humaines et du cheptel. Certains problèmes pourraient être surmontés, comme par exemple, la carence en recherche agronomique, dont l'effort a porté jusqu'à présent sur les régions à fort potentiel agricole, au détriment de techniques appropriées répondant aux besoins des paysans et des pasteurs nomades. Les problèmes devant lesquels nous sommes impuissants sont également évoqués, notamment l'irrégularité des pluies. La grande diversité des sols implique des problèmes de chimie des sols et de stockage de l'eau.

Le chapitre 3, consacré à l'examen des possibilités d'amélioration de l'agriculture, s'intéresse plus particulièrement à l'adoption de techniques existantes concernant l'inventaire des ressources. Ainsi, les pays en voie de développement pourraient établir des plans à long terme qui permettraient une valorisation optimale de leurs propres ressources, en maximisant l'exploitation des meilleures terres et en minimisant les pressions sur les terres marginales. Dans le but de favoriser l'adoption de méthodes agricoles améliorées, la recherche sur les "systèmes agraires" est nécessaire, afin de mieux connaître les motivations des petits paysans vivant en économie de subsistance, des cultivateurs semi-nomades et des pasteurs. Le faible taux d'adoption des nouvelles technologies est en relation avec le manque de compréhension des mentalités paysannes.

Le premier des quatre chapitres techniques traite de la conservation des sols sous trois rubriques ; tout d'abord les principes, ensuite les méthodes biologiques et enfin les structures mécaniques de conservation des sols. On prétend que dans les régions semi-arides où la production est fatalement faible, la plupart des approches classiques sont inadaptées car elles ont été mises au point dans des conditions différentes. Des travaux coûteux nécessitant l'usage de matériel lourd sont rarement justifiés ; il en est de même pour les travaux cultureux, base de la conservation biologique dans les pays développés où le climat est plus favorable. Le besoin principal des zones semi-arides est, en premier lieu, la conservation biologique par des méthodes culturelles améliorées qui doivent rapporter aux paysans des bénéfices à court terme, mais pas nécessairement une augmentation des rendements. Le paysan peut en effet se montrer plus sensible à une diminution des risques de production et des temps de travaux. De même, pour les structures mécaniques, on se doit de privilégier les techniques simples, peu coûteuses et qui peuvent être mises en place et entretenues avec un minimum d'assistance technique.

Le chapitre 5, intitulé "Agriculture de ruissellement", traite des méthodes permettant d'augmenter le stockage d'humidité dans le profil pédologique là où il y a un léger ruissellement des eaux de surface. Le choix de la méthode de conservation des eaux à utiliser, est difficile, car l'objectif peut varier d'une saison à l'autre. En région sèche, il peut être intéressant d'augmenter le stockage des eaux à la surface du sol afin d'améliorer le rendement des cultures en année normale ; mais lors d'une année humide ceci pourrait entraîner un engorgement et réduire le rendement. Par ailleurs, un système de drainage dont la finalité est de faciliter l'évacuation des eaux de surface hors des zones habituellement trop humides, peut renforcer les effets négatifs d'une sécheresse. Nombre de méthodes ont pour principe de bien utiliser les précipitations marginales en concentrant le ruissellement superficiel des terres incultes vers des parcelles cultivées, qui emmagasineront alors suffisamment d'humidité pour la croissance des végétaux. Ces méthodes sont généralement désignées sous le terme général "Concentration des eaux pluviales" (rainfall multiplier). Les ouvrages les plus répandus sont les terrasses en gradins mises au point et largement diffusées au Etats-Unis, ainsi que des variantes plus simples, par exemple les fossés en courbes de niveau, les microbassins, ou les diguettes en courbes de niveau. La pratique du billonnage ou du billonnage cloisonné est examinée en détail car cette méthode a été expérimentée dans de nombreux pays, avec des succès variables. La méthode alternant de larges planches et des sillons est de plus en plus adoptée sur les argiles noires de l'Inde, en association étroite avec la culture attelée, améliorée, ce qui la met à la portée du paysan. D'autres méthodes d'emmagasinement localisé de surface utilisent des bassins de captage en demi-lune ou trapézoïdaux, qui se répandent au Burkina Faso et au Kenya, et qui offrent une alternative aux fossés superficiels traditionnels.

Dans la section concernant l'épandage des eaux, on trouvera un exposé des différentes formes d'utilisation localisée des eaux de ruissellement soit issues de l'écoulement naturel des collines soit dérivées et recueillies dans des canalisations. De nombreux exemples de telles pratiques ont été décrites chez les indiens d'Amérique, en Tunisie et en Israël. Il existe aussi quelques exemples récents provenant du Kenya, du Pakistan et de la République Islamique du Yémen. Les méthodes d'immersion consistent à retenir des eaux de crue et à les laisser séjourner suffisamment longtemps afin de saturer le sol et de permettre la culture grâce à l'humidité stockée. Ces méthodes sont utilisées à petite échelle au Soudan et au Brésil et à plus grande échelle dans les régions semi-arides de l'Inde ; certaines sont pratiquées depuis plusieurs siècles. La diversion et l'épandage des eaux de crue sans stockage sont également traités avec des exemples provenant du Pakistan, de la République Islamique du Yémen et de divers pays d'Afrique. Le drainage des eaux sub-superficielles n'ont que des applications limitées en régions semi-arides, mais plusieurs systèmes simples de drains superficiels sont décrits.

Les méthodes qui consistent à collecter et à stocker les eaux de ruissellement dans des retenues, des réservoirs ou des citernes pour un usage ultérieur sont décrites dans le chapitre 6 intitulé "Collecte et utilisation des eaux". Les quantités d'eau de ruissellement étant l'élément critique pour ce type d'aménagement, nous avons passé en revue les différents moyens d'aménager les bassins versants destinés à augmenter le ruissellement. Les méthodes utilisées vont de la simple élimination des pierres et de la végétation, au remodelage des aires de captage comme cela a été pratiqué dans l'Ouest australien avec la construction de bassins damés, de barrages dont la surface a été tassée, ou a subi des traitements chimiques tels que des défloculants et des paraffines, jusqu'à l'imperméabilisation de la surface à l'aide de membranes étanches. On trouvera des conseils pratiques sur la conception et la construction de seuils ou de barrages en terre. Nous mentionnons aussi les barrages à ensablement, qui emmagasinent l'eau dans du sable retenu derrière un seuil-déversoir, méthode qui peut être particulièrement efficace en climat chaud car elle réduit les pertes par évaporation. Les procédés de stockage hors du lit de la rivière sont également décrits ; ceux-ci comprennent les "hafirs traditionnels" rencontrés en Afrique du Nord, les réservoirs en Inde et les petits réservoirs aménagés dans l'Ouest australien pour les troupeaux. Nous avons également examiné les méthodes de réduction des pertes par infiltration au fond des bassins de stockage, ou par évaporation de surface, quoique les solutions à ces deux problèmes soient souvent trop onéreuses pour un usage général. Ce chapitre traite enfin du problème des nappes phréatiques, et plus particulièrement les méthodes de recharge de la nappe des puits profonds, des petits puits de surface, des puits horizontaux tels les

anciens "qanats" de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient et des techniques modernes de forage horizontal rencontrées dans l'Ouest des Etats-Unis.

Le chapitre 7 étudie les applications de la conservation de l'eau aux pâturages et aux plantations d'arbres et de buissons. Parmi les difficultés et les problèmes rencontrés en zone semi-aride, nous avons déjà mentionné précédemment les problèmes de surcharge du bétail et de surpâturage. Ceux-ci sont plus longuement développés dans ce chapitre. La télédétection montre de façon concluante que la dégradation du Sahel et de la Namibie est provoquée par l'homme et le surpâturage et non pas par la sécheresse (voir l'image satellite du Niger dans l'avant-propos et celle de la Namibie au chapitre 7). Il ne fait aucun doute que le cheptel a augmenté comme le montrent les recensements faits au Swaziland et sur le plateau Mambilla à la frontière du Nigéria et du Cameroun. Nous avons également discuté de la baisse de mobilité des populations pastorales nomades et semi-nomades, en relevant des exemples au Botswana où les deux principales causes sont d'une part les opérations de sédentarisation de la population et d'autre part l'approvisionnement permanent des points d'eau à l'aide de forages en remplacement des anciens points d'eau naturels. Nous avons cité deux exemples de plan d'aménagement de pâturage, l'un au Niger et l'autre à l'est du Sénégal. Nous avons également étudié l'exemple d'un aménagement conduisant à l'ouest des Etats-Unis et nous l'avons comparé au système traditionnel de pâturage utilisant les points d'eau dans la région du Butana au Soudan. Nous avons analysé des techniques d'amélioration des pâturages réduisant le ruissellement. Les demi-lunes, les petits cordons de pierres en courbe de niveau et les petits bassins creusés à la houe sont des techniques à petite échelle plus adaptées à l'Afrique ; des techniques utilisant une mécanisation à grande échelle sont également explicitées.

Dans les zones semi-arides, le paysage est souvent composé de terrains boisés, de savanes arbustives, de terres arables et de pâturages ; les arbres et les buissons font toujours partie de l'écosystème. Ils répondent à de nombreux besoins : énergie, alimentation animale, matériaux de construction, cultures alimentaires et commercialisables, et ils jouent souvent plusieurs de ces rôles à la fois. La diminution du stock naturel d'arbres et de buissons est un indicateur de la pression excessive exercée sur les terres et qui conduit à une dégradation croissante. L'Ethiopie est un modèle qui permet d'étudier les étapes progressives de la dégradation ; celle-ci débute par la diminution des populations d'arbres et se termine par un exode massif des populations. Dans de nombreux pays, la rareté croissante du bois de chauffe devient aussi préoccupante que le manque de nourriture, et dans ce contexte, le besoin d'augmenter la production d'arbres et de buissons est certainement un des défis majeurs des régions semi-arides. Les techniques habituelles de reforestation sont rarement adaptées dans les régions semi-arides du fait de l'irrégularité des précipitations.

Les solutions avancées sont des variantes des systèmes de récupération des précipitations présentés précédemment au sujet des terres cultivables, depuis le microbassin de quelques m² dans lequel on plante un jeune arbre et qui est alimenté en eau grâce à de petites rigoles, jusqu'aux bassins de 250 m² alimentés par des rigoles que l'on peut observer dans le désert du Néguev en Israël. D'autres variantes de ce type sont citées dans plusieurs pays d'Afrique. L'agroforesterie n'est pas traitée dans cet ouvrage, mais une liste de références est jointe.

TABLE DES MATIERES

	Page
Avant-propos	iii
Remerciements	iv
Résumé	vii
1. INTRODUCTION	1
1.1 L'objectif du bulletin	1
1.2 L'importance des régions semi-arides	3
1.3 Sécheresse et évolution	3
1.4 Changements politiques et sociaux	4
2. LES PROBLEMES DE L'AGRICULTURE DANS LES REGIONS SEMI-ARIDES	6
2.1 Généralités	6
2.1.1 L'extension de l'érosion	6
2.1.2 Diversité des régions semi-arides	6
2.1.3 Manque d'informations	7
2.1.4 Manque de technologies	7
2.2 Pressions sur les écosystèmes semi-arides	9
2.3 Climat	9
2.3.1 Précipitations	9
2.3.2 Températures et vents	13
2.4 Sols	13
2.5 Les traditions agraires	16
3. REVUE DES POSSIBILITES POUR AMELIORER L'AGRICULTURE	18
3.1 Ressources physiques	18
3.2 Limites sociales	19
4. LA CONSERVATION DES SOLS	21
4.1 Principes	21
4.1.1 L'extension de l'érosion	21
4.1.2 Conservation du sol et de l'eau	21
4.1.3 Programmes intégrés	21
4.1.4 Besoins de structures mécaniques	24
4.1.5 Technologie appropriée	24
4.2 Méthodes de conservation biologique du sol	25
4.2.1 Techniques culturales conservatoires	25
4.2.2 Travail du sol en profondeur	25
4.2.3 Systèmes agraires conservatoires	26
4.2.4 Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la plante	30
4.3 Structures conservatoires mécaniques	30
4.3.1 Principes	30
4.3.2 Construction de terrasses	40
4.3.3 Evacuation des eaux	40
4.3.4 Quelques mesures peu coûteuses	42

5.	CONSERVATION DES EAUX	51
5.1	Principes	51
5.1.1	Choix de la méthode	51
5.1.2	Quelques principes de conception	53
5.1.3	Les effets d'échelle	54
5.2	Méthodes applicables aux terres cultivées	54
5.2.1	Système des planches et fossés	54
5.2.2	Billonnage et billonnage cloisonné	61
5.2.3	Terrasses de conservation en gradins	64
5.2.4	Fossés d'infiltration en courbes de niveau	69
5.3	Epandage de l'eau	79
5.3.1	Ruissellement naturel	79
5.3.2	Collecte et diversion du ruissellement	81
5.3.3	Méthodes d'inondation par les eaux de crue	93
5.3.4	Dérivation des eaux de crue	95
5.4	Drainage superficiel	101
5.5	Autres sources d'eau : neige, rosée et brume	103
5.5.1	Gestion de la neige	103
5.5.2	Rosée et brume	103
6.	RECOLTE ET UTILISATION DE L'EAU	105
6.1	Méthodes de collecte des eaux	105
6.2	Traitement des zones d'interception	106
6.2.1	Impluviums naturels et modifications mineures	106
6.2.2	Remodelage des zones d'interception	108
6.2.3	Traitements chimiques	108
6.2.4	Membranes imperméables	113
6.3	Stockage de l'eau	114
6.3.1	Petits barrages en terre	114
6.3.2	Petits seuils-déversoirs	120
6.3.3	Barrages d'inféoflux dans le sable	122
6.3.4	Stockage de l'eau en dehors du cours d'eau	123
6.3.5	Stockage au-dessous du niveau du sol	127
6.4	Pertes d'eau emmagasinée	127
6.4.1	Pertes par infiltration	129
6.4.2	Pertes par évaporation	129
6.5	Mise en valeur des eaux souterraines	130
6.5.1	Recharge des nappes d'eau souterraine	130
6.5.2	Pompage des nappes	131
7.	APPLICATIONS DE LA CONSERVATION DES EAUX	135
7.1	Pâturages	135
7.1.1	Problèmes	135
7.1.2	Aménagement des zones de pâturage	139
7.1.3	Restauration des parcours dégradés	144

7.2	Arbres et arbustes	147
7.2.1	Problèmes	147
7.2.2	Méthodes et techniques	152
7.2.3	Agroforesterie	155
REFERENCES		157
BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE		176
ANNEXE 1	: Glossaire des noms locaux	179
ANNEXE 2	: Résumé du Système FAO-Unesco de classification des sols et son analogie avec le système taxonomique des Etats-Unis	181

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

	Page
Dans l'Avant-Propos : image prise d'un satellite montrant le surpâturage au Sahel	v
2.1 Dégâts de l'érosion provoquée par des averses de fréquence rare, Queensland, Australie	11
2.2 Dégâts de l'érosion provoquée par des averses de fréquence rare, Queensland, Australie	11
2.3. Erosion due au vent sur un projet d'irrigation, Etats-Unis	14
2.4 Erosion géologique grave dans un climat semi-aride	15
4.1 Un sol érodible dévasté par une érosion hydrique à Mexico	22
4.2 Un exemple de contrôle très coûteux de ravine en Australie	23
4.3 Un groupe d'entraide au Kenya	24
4.4 Harnais et attelage pour un seul boeuf mis au point au CIPEA	29
4.5 Terrasses en courbe de niveau irriguées au Bhutan	32
4.6 Terrasses en gradin en République Islamique du Yemen	33
4.7 Terrasses en marche d'escalier	33
4.8 Végétation plantée sur une terrasse Fanya juu	34
4.9 Terrasses Fanya juu au Kenya	34
4.10 Terrasse murundum au Brésil	35
4.11 Diguettes en courbe de niveau	35
4.12 Banquettes de diversion	36
4.13 Billonnage	37
4.14 Billonnage cloisonné	37
4.15 Terrasses pour verger	39
4.16 Drain cloisonné sur le versant et exutoire	39
4.17 Terrasses anciennes en Ethiopie	41
4.18 Terrasses anciennes en République Islamique du Yemen	41
4.19 Le débordement d'une banquette en courbe de niveau peut entraîner la destruction des suivantes	43
4.20 Alignements d'herbes, de pierres et de mottes de terre qui freinent l'écoulement (micro-barrages perméables), Ethiopie	43
4.21 Bandes d'arrêt enherbées, Swaziland	45
4.22 Les bandes d'arrêt enherbées n'éliminent pas toute l'érosion sur les pentes fortes du Swaziland	45
4.23 Haie vive au Kenya	46
4.24 Barrière végétale, sud du Mali	46
4.25 Les bandes d'arrêt enherbées peuvent fournir du fourrage au Kenya et au Brésil	47
4.26 Cordons de pierres isohypses, Burkina Faso	48
4.27 Amélioration du couvert herbacé près des cordons de pierres au Mali	48
4.28 Cordon de pierres stabilisant un chemin érodé par le passage du bétail au Kenya	49
4.29 Petit seuil de pierres ralentissant un courant d'eau au Mali	49
5.1 Système de planches et de fossés, ICRISAT, Inde	57
5.2 Coupe perpendiculaire de planches et de fossés	57
5.3 Un porte-instruments pour former et cultiver des planches, ICRISAT	58
5.4 Un billonneur à traction bovine au CIPEA en Ethiopie	59
5.5 Ruissellement et érosion sur un vertisol en Inde	59
5.6 Planches larges et fossés en Ethiopie	60
5.7 Essais à l'ICRISAT d'un planteur à trois lignes sur planche	60
5.8 Expériences de billonnage cloisonné, Burkina Faso	62
5.9 Formation de petits bassins pour la production de blé en Israël	63
5.10 Système manuel de levage du billonneur pour former les cloisons, Malawi	65
5.11 Billonneur levé par une roue excentrique	65
5.12 Billons et cloisons provenant de résidus de culture, racines et terre en Ethiopie	66
5.13 Fossés en courbe de niveau avec cloisons en Ethiopie	71
5.14 Diguettes en courbe de niveau qui améliorent la croissance de l'herbe en Ethiopie	71

5.15	Petits bassins utilisés afin d'augmenter la rétention d'eau	73
5.16	Fossés en courbe de niveau au Nord-Est du Brésil	75
5.17	Fossés en courbe de niveau de la province de Kitui, Kenya	75
5.18	Une billonneuse à traction animale pour former les billons en courbe de niveau	76
5.19	Un tracteur tirant une billonneuse à lame	76
5.20	Essais sur un terrain de billons et de fossés en courbe de niveau, Mexique	77
5.21	Gessours dans une vallée terrassée en Tunisie	82
5.22	Anciens gessours, aujourd'hui abandonnés, Neguev, Israël	83
5.23	Anciens gessours, dont quelques uns sont cultivés par les bedouins	83
5.24	Agriculture de ruissellement dans le Neguev, Israël	84
5.25	Bandes empierrées qui augmentent le ruissellement, Neguev, Israël	86
5.26	Agriculture qui dépend de la capture du ruissellement sur des terrains en terrasses en Afghanistan	88
5.27	Agriculture avec impluvium dans les oliveraies	88
5.28	Oasis dans la vallée de Hunza, au Nord du Pakistan	90
5.29	Canaux de capture du ruissellement qui traversent les fortes pentes (khuls)	90
5.30	Culture en terrasses utilisant le ruissellement	91
5.31	Agriculture profitant du ruissellement, République Islamique du Yemen	92
5.32	Structure d'épandage de crues, République Islamique du Yemen	96
5.33	Structure de contrôle de crues, Mali	96
5.34	Inondation d'une oliveraie, Tunisie	97
5.35	Barrage d'épandage de crues, Tigre, Ethiopie	99
5.36	Canal d'alimentation dans un plan d'épandage de crues	99
5.37	Drains de surface traditionnels coupés par des banquettes récentes en Ethiopie	102
6.1	Collecte de l'eau à partir d'un affleurement granitique, Kenya	107
6.2	Bassins compactés : remodelage de la surface du sol, Australie	109
6.3	Applanissement et compactage des bassins	110
6.4	L'érosion peut-être un problème pour les bassins compactés	110
6.5	Deux applications différentes de bassins compactés, en Australie de l'ouest	111
6.6	Petits réservoirs en assiettes creuses en Australie de l'ouest	112
6.7	Un seuil très simple pour capter les sables	124
6.8	Un vaste barrage pour capter les sédiments, Afrique du sud	124
6.9	Méthode des boudins pour construire des réservoirs d'eau	128
7.1	Dégradation de la végétation due au surpâturage, Zimbabwe	135
7.2	Image satellite montrant le surpâturage, Namibie	136
7.3	Epandage des eaux de crue pour améliorer les pâtures, Australie	140
7.4	Fossés de pâturage pour disperser le ruissellement superficiel, Australie	140
7.5	Repérage des demi-lunes, Burkina Faso	142
7.6	Construction d'un cordon de pierres au Burkina Faso	142
7.7	Une charrue à disques opposés pour creuser des petits trous, Australie occidentale	143
7.8	Disques modifiés munis d'une sous-soleuse et d'une semeuse d'herbe, Australie occidentale	144
7.9	Petits bassins et fossés creusés mécaniquement, Australie occidentale	145
7.10	Formation de petits bassins sur les parcours, Australie	145
7.11	Un rouleau à pointes pour améliorer les parcours, Australie occidentale	146
7.12	Rouleau imprimant des creux qui permettent de stocker les eaux de pluie dans les parcours, New South Wales, Australie	146
7.13	L'effet de la mise en défense de pâturage, Ethiopie	147
7.14	Restructuration des terres de pâturages, Inde	148
7.15	Rouleau à lame pour contrôler les buissons indésirables, New South Wales, Australie	149
7.16	Fossés aveugles pour augmenter l'infiltration, Australie du nord	149
7.17	Banquettes d'inondation pour lessiver les sels des sols, New South Wales, Australie	150
7.18	Spirales de fossés pour augmenter l'infiltration, Australie du Nord	150

7.19	Herbe semée dans de petites dépressions, Australie du nord	151
7.20	Micro-bassins pour la culture d'arbres fruitiers	153
7.21	Demi-lunes pour la plantation d'arbres au Niger	153
7.22	Herbe entre les planches de Leucaena, Inde	155
7.23	Double rang de Leucaena pour le paillage et le fourrage laissant une place aux terres cultivées, Inde	156

LISTE DES FIGURES

	Page	
1.1	Carte mondiale des zones arides et semi-arides	2
2.1	Risque d'échec des variétés améliorées	8
2.2	Coefficient de variation des pluies annuelles	10
4.1	Types de terrasses en gradin	32
4.2	Réduction progressive de la pente avec les terrasses Fanya juu	34
4.3	Schéma de diguettes en courbe de niveau	36
4.4	Terrasses intermittentes	38
5.1	Modification de la surface du sol pour retenir l'eau pluviale	55
5.2	Culture alternative et arrangement des rangs de plantation sur les planches	58
5.3	Diverses terrasses en gradins de rétention totale comparées à d'autres pratiques	67
5.4	Amélioration de l'humidité des sols grâce à des diguettes en courbe de niveau	70
5.5	Des structures simples pour retenir le ruissellement en surface	72
5.6	Restructuration de la surface du sol en zones de ruissellement et zones d'accumulation	74
5.7	Une machine qui forme des fossés non symétriques	76
5.8	L'effet sur l'humidité du sol des billons et fossés en courbe de niveau et paillage des fossés	78
5.9	Billonnage au Botswana	78
5.10	Agriculture d'épandage de crues en Arizona par les indiens Navajo	80
5.11	Un système d'agriculture de ruissellement du Kenya	89
5.12	Diversification et épandage du ruissellement en Australie	92
5.13	Schéma de "khadin" ou réservoir submergé	94
5.14	Schéma d'un petit mur d'épandage des crues en Ethiopie	98
5.15	Un projet pilote au Turkana, épandage des crues sur pâturages et terres cultivées	100
5.16	Les principales zones tropicales et subtropicales à vertisols	100
6.1	Bassins compactés (roaded) très utilisés en Australie occidentale pour collecter le ruissellement	109
6.2	Plan d'un petit barrage en terre avec un déversoir en déblais	116
6.3	Un réservoir à exutoire naturel dans une vallée voisine	117
6.4	Un réservoir à exutoire mécanique doublé d'un exutoire de sécurité	117
6.5	Installation d'un exutoire mécanique sous le mur du barrage	118
6.6	Un barrage en terre avec une tranchée d'ancrage imperméable	119
6.7	Exemples de petits seuils	121
6.8	Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne digue	123
6.9	Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne annulaire	126
6.10	Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne en nid de poule	126
6.11	Puits horizontaux	132
6.12	Le système qanat, un exemple de puit horizontal	133
7.1	Evolution de la population de bétail (a) sur le plateau de Mambilla, Nigeria 1930-80, (b) au Swaziland 1947-80	137
7.2	Une charrue à disques modifiés pour creuser des cuvettes dans les zones de parcours	143
7.3	Plan et section d'une parcelle Negarin	151
7.4	Petit impluvium pour la croissance des arbres, Baringo, Kenya	154
7.5	Combinaison de cordons de pierres et de plantation d'arbres, Niger	155

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Fortes averses observées dans les zones arides	12
4.1	Variation des rendements selon la toposéquence	26
4.2	Des terrasses différentes pour des objectifs différents	31
5.1	L'effet de démultiplication des pluies sur un système de terrasses continues en gradin	69
6.1.	Capacité des exutoires mécaniques	118

1. INTRODUCTION

1.1 L'OBJECTIF DU BULLETIN

Cet ouvrage n'apporte pas de solutions simples aux problèmes de conservation de la terre et de l'eau dans les régions semi-arides. Il n'existe pas de catalogue décrivant les techniques éprouvées que l'on pourrait appliquer immédiatement. Les conditions sont trop variables, qu'il s'agisse du sol, du climat, du régime foncier, de la disponibilité en moyens mécaniques et en main-d'oeuvre, du rôle du cheptel : la liste des variables est longue. Cet ouvrage est donc une revue des techniques qui ont déjà fait leurs preuves dans certaines régions et qui pourraient être utilisées ailleurs, ainsi que diverses méthodes riches de promesses mais encore au stade expérimental.

Le sujet est trop vaste, la diversité des régions, des populations et des climats trop extrême, pour que nous puissions répondre aux problèmes de tous les lecteurs. Nous nous sommes sûrement trop attardés sur telle ou telle question et nous avons dû omettre d'en traiter d'autres. En particulier, nous aurions dû insister plus sur la région méditerranéenne où les pluies hivernales provoquent des situations très différentes des autres régions semi-arides à pluies estivales ; il en est de même pour les travaux réalisés dans les pays francophones de l'Afrique du Nord et de l'Ouest.

Nous n'avons pas essayé de définir les régions semi-arides, pas plus que nous ne nous sommes souciés de savoir si telle zone devait être classée comme aride ou semi-aride : notre attention s'est portée sur toutes les zones où les précipitations sont insuffisantes, mal distribuées et irrégulières. Nous n'avons pas étudié tous les problèmes des zones semi-arides et, en particulier, les problèmes de salinité et d'alcalinité, d'érosion éolienne et de mécanisation. Il y avait toutes sortes de manière de présenter un sujet aussi vaste ; quand une technique est examinée dans plusieurs chapitres, nous en avertissons le lecteur. Une carte des régions arides et semi-arides est présentée à la figure 1.1.

Dans cet ouvrage nous n'avons pas détaillé toutes les pratiques car elles varient selon les sols et les climats. Nous nous sommes plus particulièrement attachés aux principes de base. Nous n'avons pas non plus étudié la faisabilité sur le terrain des méthodes sous la forme de besoins de main-d'oeuvre, de coûts ou de bénéfices. La faisabilité d'une méthode dépendra surtout de l'urgence du problème. Si telle ou telle méthode peut permettre à des populations de survivre, alors sa rentabilité économique n'est pas le critère le plus important.

Cet ouvrage n'étudie pas les réglementations ni les stratégies politiques, les lois sur le régime foncier ou les systèmes sociaux, la structure politique des gouvernements et la structure sociale de l'utilisation de la terre. Cela ne signifie pas que ces facteurs soient sans importance. Beaucoup d'analyses récentes sur les programmes de conservation des sols et de l'eau ont tendance à considérer que les programmes antérieurs ont été trop dirigistes, c'est à dire qu'ils n'ont pas assez tenu compte des besoins, des aspirations et des capacités des petits paysans qui, par conséquent, n'ont pas assez été impliqués dans ces programmes (Marchal, 1979; Reij, 1989 ; Wright, 1985 ; Roose et Piot, 1984). On notera que de nombreuses idées et techniques présentées dans cet ouvrage, sont soit d'origine traditionnelle, soit développées en collaboration avec des paysans. Ces projets sont souvent mis en place par des volontaires appartenant à des organisations non gouvernementales.

L'étude des projets qui ont été menés a fait clairement apparaître la nécessité de familiariser les paysans à l'utilisation d'un matériel simple. Par exemple, l'emploi du niveau à eau afin de développer des ouvrages en courbes de niveau au Burkina Faso ou bien au Kenya. Il faut aussi aider les organisations locales à gérer plus efficacement leurs affaires. En Inde, il existe une tradition séculaire de gestion des eaux dans les villages. Il s'agit des Pani Panchayat chargés de la gestion générale des eaux et des Pukka Warabundi (structure officielle) ou Katcha Warabundi (non officiel) qui ont la fonction de comités d'irrigation. Dans d'autres pays, les changements politiques et sociaux conduisent à la mise en place de coopératives ou d'associations paysannes. Afin de mener à bien des programmes de conservation des sols et de l'eau, il est essentiel de

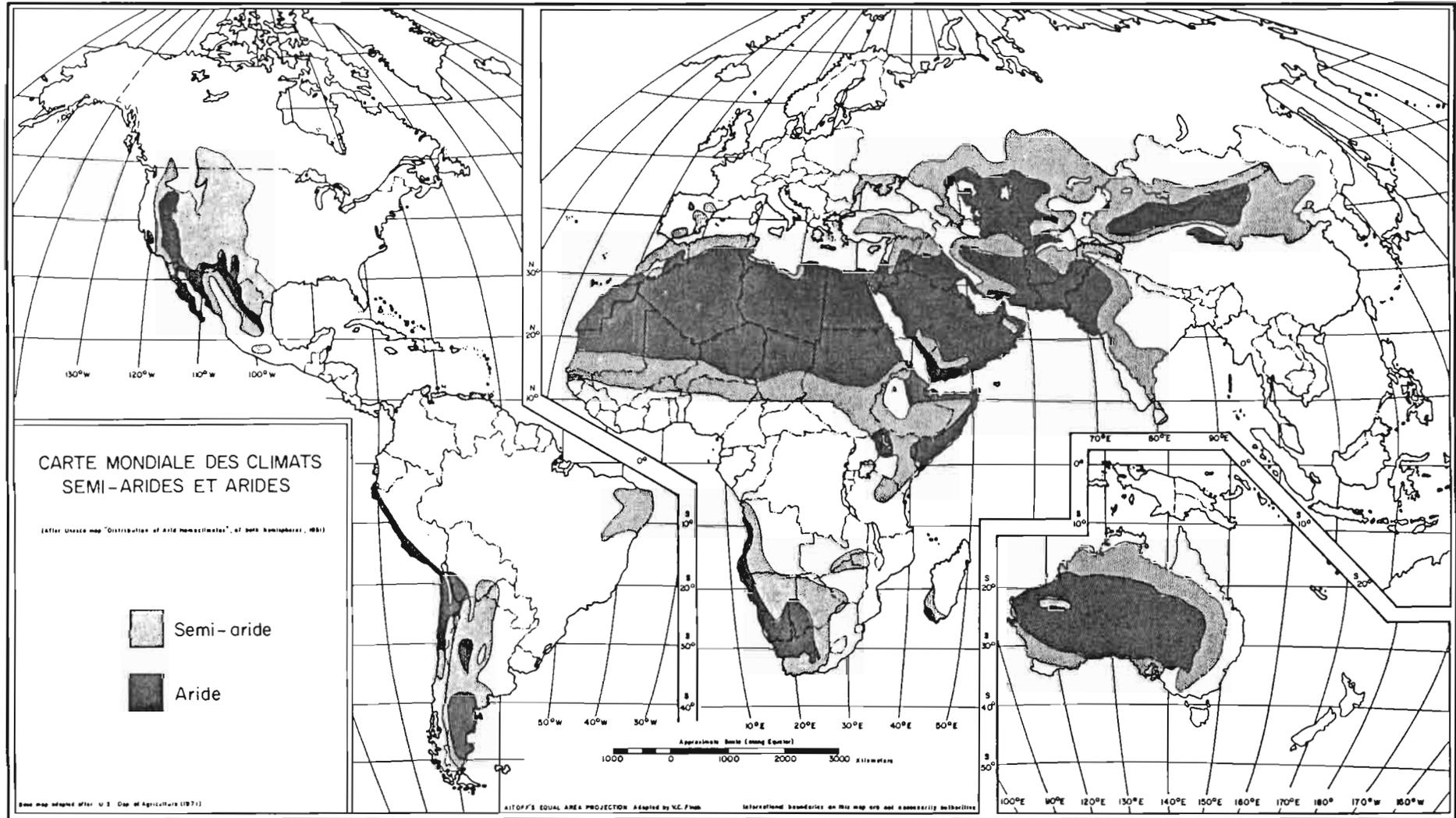


Figure 1.1 : Carte mondiale des zones arides et semi-arides

former les membres de ces associations, de discuter longuement avec les paysans du choix des techniques anti-érosives ainsi que du plan général d'aménagement du terroir villageois et de tenir compte de l'usage traditionnel des terres et des problèmes fonciers sous-jacents (Marchal, 1979 ; Martinelli et Serpantie, 1987 ; Roose et Cavalie, 1988).

1.2 L'IMPORTANCE DES REGIONS SEMI-ARIDES

Naturellement, l'agriculture se développe d'abord sur les meilleures terres. Cette tendance se vérifie à l'échelle d'une exploitation ou d'un pays. Lorsqu'il faut augmenter la production agricole, on s'efforce de la maximiser dans les zones qui ont le plus fort potentiel. Mais lorsque la demande de nourriture, de bois de chauffe ou de construction et de vêtements augmente, il est alors nécessaire de travailler les terres qui sont moins appropriées à l'agriculture et dont les conditions climatiques sont moins favorables. Les responsables de la planification, du développement et de la production agricole en viennent à s'intéresser de plus en plus aux régions semi-arides.

L'intérêt porté aux régions semi-arides s'est accru à la suite de fortes sécheresses qui ont frappé de vastes étendues en Afrique dans les années 1970, puis au milieu des années 1980. Ces dix dernières années, nous avons vu se multiplier congrès, conférences et programmes d'aide consacrés à l'Afrique semi-aride.

Il n'y a pas de solutions miracles pour résoudre les problèmes des régions semi-arides. Il n'est pas en notre pouvoir de contrôler la régularité des pluies et de les prévoir ou d'empêcher le retour de la sécheresse. On ne peut pas remédier du jour au lendemain à des siècles de dégradation et de mauvaise gestion de la terre et du capital humain. Les famines ne seront pas stoppées par des opérations ponctuelles d'amélioration des rendements, considérées souvent comme des anecdotes de l'histoire. Pour obtenir la confiance des paysans, il faudrait mettre en place des programmes étalés sur un minimum de cinq ans et il faudrait encore plus de temps pour orienter les politiques gouvernementales vers une meilleure gestion de la terre.

Cet ouvrage tente de présenter un vaste tour d'horizon des idées et des techniques parmi lesquelles les techniciens pourront choisir les éléments qui conviennent le mieux à tel ou tel programme.

1.3 SECHERESSE ET EVOLUTION

Les relations entre la sécheresse et la production alimentaire ont été admirablement étudiées par Sir Joseph Hutchinson dans la préface du Symposium de la Royal Society en 1977, lorsqu'il a déclaré :

"Ces problèmes (les vastes sécheresses du début des années 1970) n'ont pas été la conséquence directe de la sécheresse. Celle-ci n'est que la manifestation extrême de la variabilité naturelle du climat dans les zones semi-arides. Ces problèmes proviennent de la pression exercée par l'homme et les animaux domestiques sur des ressources limitées ; ils ont été aggravés par l'explosion démographique de ces dernières années".

"Il est naturel dans ces zones marginales, que les saisons agricoles désastreuses soient la conséquence de variations climatiques habituelles. Il faut les prévoir et prendre ses précautions, au lieu de les considérer comme des coups du sort pris en charge par la charité internationale. La difficulté de prévoir les sécheresses et même d'éviter les famines a été aggravée par les énormes succès de la science et de la technique dans ce dernier quart de siècle, surtout par le contrôle des maladies parasitaires et nutritionnelles. Les progrès dans le domaine médical ont contribué à l'augmentation de la population humaine et animale, qui n'a pu subsister alors, qu'en exploitant au maximum l'environnement. Par conséquent, les pénuries que l'on pouvait autrefois combattre en étendant le domaine agricole, ont cédé la place à la famine dès lors qu'il n'y a plus eu de nouvelles terres à mettre en valeur".

L'attitude générale vis-à-vis de la sécheresse pourrait être schématisée à la façon de ce fermier du bush australien qui expliquait à un conseiller agricole que "tous ses problèmes proviennent de saisons des pluies anormales depuis 25 ans".

Le commentaire de Hutchinson à propos des pressions croissantes qui s'exercent sur les terres marginales est renforcé par celui d'Ormerod (1978) qui étudie les problèmes qui peuvent découler par inadvertance du développement économique des régions sèches et qui insiste sur la question suivante : "La demande économique est un des facteurs responsables de l'aridité croissante en Afrique de l'Ouest, en stimulant l'expansion de l'agriculture et de l'élevage sur des terres arides".

D'après l'opinion générale selon laquelle la meilleure façon de répondre à la demande est d'augmenter la production locale, Ormerod déclare :

"Cela peut accroître le taux de dégradation des terres arables et il est donc dangereux de promouvoir le progrès économique dans certaines zones désertiques et, en particulier, de faire entrer les nomades dans le système monétaire. Avant d'ouvrir au développement cette partie éloignée et fragile du monde, il faudrait regrouper plus d'informations sur la dynamique des pâturages des nomades et sur les conséquences possibles que pourraient entraîner l'extension de ces activités sur le climat et l'environnement".

Ormerod encourage aussi la mise au point de techniques quantitatives permettant d'évaluer la capacité de charge des sols afin de déterminer les limites à partir desquelles un développement économique peut être entrepris sans provoquer une dégradation écologique.

Selon Le Houérou (1979) les déserts s'étalent sur leurs bordures à l'occasion de périodes de sécheresse prolongées. La cause principale de l'extension des déserts est à rechercher dans l'augmentation des populations humaines et animales de l'ordre de 2 à 3 % l'an en période humide. Le rythme de l'expansion des déserts est voisin de la croissance démographique moyenne sur 20 ans car la productivité des zones semi-arides est réduite.

Dans une étude très approfondie publiée récemment (1985), Sinclair et Fryxell proposent un argument irréfutable selon lequel l'homme serait responsable du désastre écologique au Sahel.

La preuve des ravages causés par le surpâturage nous est donnée par les images satellites. Nous en montrons deux exemples : l'un au Niger dans l'Avant-propos et l'autre en Namibie sur la photo 7.2.

1.4 CHANGEMENTS POLITIQUES ET SOCIAUX

Récemment, la direction politique de plusieurs pays s'est focalisée sur le développement de l'agriculture dans des zones où les précipitations sont peu abondantes ou irrégulières. Dans certains cas, par exemple au Zimbabwe, cette tendance est apparue à la suite d'un changement politique lors du passage d'un statut colonial à l'indépendance. A l'époque coloniale, le développement agricole et la recherche agronomique visaient en premier lieu l'augmentation de la production sur les grandes exploitations très mécanisées, situées sur les meilleurs sols et dans les régions où la pluviosité est régulière. Depuis l'indépendance, cette politique s'est inversée et l'accent a été porté sur le développement des zones où il y a urgence, plutôt que sur celles qui offrent un meilleur potentiel : par exemple, sur la petite agriculture de subsistance dans des régions à sols pauvres et à précipitations peu abondantes et irrégulières. La nécessité d'augmenter la production nationale a entraîné le développement des zones arides. Nous nous référons aux deux exemples suivants : le développement massif de la céréaliculture dans le Sud-Est de l'URSS et les efforts entrepris au Kenya pour promouvoir la production dans les zones où les précipitations sont peu abondantes.

La mise en valeur des régions jusque-là considérées trop arides pour l'agriculture a été favorisée par le développement de nouvelles techniques telles que, les systèmes agricoles mécanisés à travail minimum du sol qui, dans le Sud du pays de Galles, est responsable de l'expansion des terres arables vers l'Ouest.

Cependant tous les pays ne manifestent pas le même intérêt pour les régions sèches, et dans certains pays la production baisse car le pouvoir politique n'a apparemment pas la volonté de développer ces dernières. Un correspondant rapporte que c'est le cas au Maroc, en Algérie et en Tunisie. Par le passé, chacun de ces pays étaient autosuffisants en céréales avec une moyenne de rendement de l'ordre de 1000 kg/ha. Le Maroc a maintenu cette moyenne de rendement mais doit désormais importer 20 % de ses besoins alimentaires. En Tunisie, le rendement est tombé à 800 kg/ha et 40 % des besoins alimentaires sont aujourd'hui importés. En Algérie, le rendement est tombé à 600 kg/ha et la part des importations alimentaires est de 60 % (FAO, 1985). Il faut cependant retenir que la fraction importée des céréales dépend pour une bonne part de la croissance démographique : la population en Afrique du Nord double tous les 20 à 30 ans ! (Le Houérou, 1987).

Dans certains pays, une baisse de la population a rendu impossible l'entretien des structures de conservation indispensables à une agriculture stable ; c'est le cas pour la République Islamique du Yémen et très localement pour certaines régions méditerranéennes (ex : Cévennes en France, Matmata en Tunisie).

2. LES PROBLEMES DE L'AGRICULTURE DANS LES REGIONS SEMI-ARIDES

2.1 GENERALITES

2.1.1 L'extension de l'érosion

La plupart des régions semi-arides souffrent d'une érosion importante causée par des précipitations au pouvoir érosif important et généralement plus dévastatrices que dans les zones tropicales humides à cause du faible couvert végétal. Les travaux documentés de Lowdermilk (1975) montrent bien les ravages de l'érosion passée, dans la région méditerranéenne, et une étude récente montre que la situation continue à se détériorer. Par exemple au Maroc, 40 % des terres sont exposées à l'érosion. En Turquie, 50 % des terres sont dégradées. En Grèce, 21 % des terres sont touchées par une érosion modérée et 46 % par une très forte érosion.

Les régions semi-arides non méditerranéennes ont aussi des problèmes d'érosion hydrique : en Amérique du Nord (Etats-Unis et Mexique), en Amérique du Sud (Nord-Est du Brésil et la majorité du Sud-Est du continent), en Afrique, le Sahel et les pays du Sud-Ouest, (par exemple le Lesotho). Puis sur une large ceinture qui s'étend de l'Est de l'Afrique à la Turquie, l'Irak, l'Iran et l'Afghanistan, avec une extension à l'Est de l'URSS et de la Chine et une autre du Sud de l'Himalaya à l'Inde en passant par le Pakistan. En Australie, la plupart des états ont de graves problèmes d'érosion hydrique dans les zones peu arrosées.

L'érosion éolienne peut provoquer beaucoup de dégâts dans les régions semi-arides tempérées, par exemple dans les steppes de l'Asie centrale (l'Est de l'URSS, la Mongolie et la Chine) et en Amérique du Nord (Nord-Ouest des Etats-Unis, les prairies au centre du Canada) Hudson, 1988. Dans les pays tropicaux semi-arides le schéma change. Certains pays voisins du Sahara endurent une désertification ainsi qu'une érosion éolienne croissantes. D'autre part, certains soutiennent que les régions semi-arides récupèrent plus de terre apportée par le vent qu'elles n'en perdent à cause de l'érosion hydrique.

2.1.2 Diversité des régions semi-arides

Le seul point commun à toutes les zones semi-arides est la faiblesse des précipitations. Le reste est d'une telle diversité qu'il n'est pas raisonnable de chercher des solutions universelles. Elles peuvent avoir des climats tempérés ou tropicaux, des pluies estivales ou hivernales et des pratiques agricoles complètement différentes.

Même lorsque le climat est identique, les différences demeurent, comme l'a montré Charreau (1977) lorsqu'il a étudié les possibilités de transférer, en Afrique occidentale, des techniques mises au point à l'ICRISAT en Inde. Les caractéristiques principales du climat sont les mêmes dans les deux régions : une courte saison des pluies caractérisée par des précipitations intenses et irrégulières entrecoupées de sécheresses imprévisibles. Cependant en Inde, la saison des pluies est plus longue et la courbe d'évapotranspiration potentielle est unimodale, alors qu'elle est bimodale en Afrique Occidentale. Des périodes atypiques sans pluies ont lieu au milieu de la saison des pluies en Inde, mais au début ou à la fin de cette saison en Afrique occidentale. Les deux régions ont, comme sols principaux, des alfisols rouges et des vertisols noirs, mais on observe des différences qui influent sur les cultures, le drainage et la fertilité. En outre, il existe de grandes différences sociologiques, en particulier la densité de population qui en Inde est très élevée 200 hab/km² par rapport à 10-60 hab/km² en Afrique occidentale semi-aride. Cela aboutit à une approche très différente de la productivité agricole. En Afrique occidentale, l'objectif est de maximiser la productivité de chaque travailleur, alors qu'en Inde il est plus important de valoriser le rendement par unité de surface. Il existe aussi des différences dans les types d'utilisation des terres. En Asie, les familles cultivent la même terre depuis des générations tandis qu'en Afrique beaucoup de gens sont des nomades ou des migrants saisonniers.

2.1.3 Manque d'informations

Par le passé, la recherche et le développement agricole ont surtout été axés sur les moyens d'utiliser au mieux les zones dotées des meilleurs sols et du meilleur climat, au détriment des situations marginales. Ce choix a entraîné un manque d'informations concernant les zones semi-arides les plus défavorisées. Cela est vrai dans tous les domaines techniques. Dans les zones semi-arides, il existe peu d'inventaire des sols montrant ce dont on peut disposer et moins encore de recherches sur les propriétés physiques et chimiques des sols permettant de définir leurs contraintes et leurs capacités. Il y a moins de stations agrométéorologiques et moins d'analyses de résultats dans les zones semi-arides. Compte tenu de la variabilité des conditions elles devraient au contraire être plus nombreuses.

Ceci est probablement moins vrai pour les zones semi-arides francophones qui disposent à l'heure actuelle de nombreuses cartes pédologiques du 1/50 000 au 1/500 000 (voir catalogue ORSTOM 1989) et de 20 à 30 années d'expérimentation en stations agronomiques (Bambey, Saria, Mpesolia, Ntarla, etc) et sur de nombreux points d'appuis (Pieri, 1984).

Les recherches sur les cultures dans les régions semi-arides sont restées limitées. La plupart des pays dotés à la fois de zones humides et de zones arides, ont polarisé leurs études sur les zones humides, car c'est dans ces zones que l'on a le plus de chance d'obtenir un rendement rapide et financièrement intéressant. Les recherches internationales sur les zones semi-arides se sont développées récemment par la mise en place d'organismes comme l'ICRISAT (Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides) qui a été fondé en 1972 et l'ICARDA (Centre international de recherche agricole dans les zones arides) en 1977. La sélection de cultivars adaptés aux climats semi-arides est prometteuse, mais nécessite encore de longues recherches (Hall et al., 1979).

Il y a aussi un manque d'informations dans le domaine économique et social. Les systèmes agraires et l'économie de la production agricole ont été moins étudiés, d'une part à cause du manque d'intérêt pour les zones arides et d'autre part à cause des difficultés physiques d'approcher ces vastes étendues ainsi que du manque de routes. Par ailleurs, les systèmes agraires sont complexes de par le fait :

- de l'association d'agriculteurs sédentaires et d'éleveurs nomades ou semi-nomades qui pratiquent la transhumance saisonnière;
- de la complexité culturelle des titres de propriété des terres communales ou de droits tribaux de pâturages;
- les frontières culturelles ou ethniques peuvent différer des frontières politiques.

2.1.4 Manque de technologies

Le manque d'intérêt pour les régions semi-arides combiné à l'insuffisance de programmes de recherche et à la complexité des problèmes, entraîne un manque de moyens techniques pour améliorer l'agriculture dans ces régions. Jones souligne qu'en Afrique, plusieurs études sur le billonnage cloisonné ou d'autres techniques culturales de gestion de l'eau ont donné des résultats très encourageants mais qu'elles ont été trop brèves, trop localisées ou confinées à des stations expérimentales. Par conséquent l'assimilation de la technique a été superficielle et sa compréhension limitée (les limitations inhérentes imposées par le sol, l'outillage, les conditions économiques.....). Il n'y a pu y avoir création d'une dynamique qui aurait permis de lancer des programmes de plus longue durée, comportant des essais plus approfondis, des ajustements et des vérifications dans des conditions normales d'exploitation (Jones 1984). Dans les zones semi-arides, les recherches doivent s'étaler sur une période assez longue, pour corriger les effets des variations saisonnières et, couvrir de larges surfaces pour réduire les variations spatiales.

Une autre difficulté apparaît lorsqu'il s'agit d'étendre une technique à un vaste programme de développement, après qu'elle ait été étudiée et testée. En Inde, la production agricole est instable sur plus des trois quart des terres agricoles dû à des précipitations insuffisantes et irrégulières. Le programme de lutte contre la sécheresse mis en place il y a une vingtaine d'années, a permis de faire des progrès considérables mais il existe toujours un fossé entre les résultats des recherches et leur application par les agriculteurs (Johl, 1981). Une technique améliorée mise au point par l'ICRISAT pour les vertisols, a fait ses preuves et son extension progresse. Mais pour qu'elle soit appliquée sur les 5 millions d'hectares de vertisols d'ici 20 ans, il faudrait une croissance du rythme d'adoption de 43 % par an (ICRISAT, 1986).

Une des principales raisons du faible taux d'adoption des techniques, découle de l'impossibilité pour les petits agriculteurs qui pratiquent l'agriculture de subsistance, de prendre des risques. Leur stratégie vise à assurer leur survie en tous temps, même quand les conditions sont particulièrement défavorables (aléas climatiques, ravageurs, maladies). Ces paysans n'ont aucun capital : aussi toutes leurs stratégies visent-elles à améliorer leur sécurité. Ils préféreront planter des variétés à faible rendement, dont ils sont sûrs qu'elles produiront chaque année de quoi assurer tant bien que mal leur subsistance, que des variétés améliorées qui, certes, produiront plus la plupart du temps mais risquent de ne rien donner du tout les mauvaises années. Même si la probabilité d'obtenir un meilleur rendement atteint neuf années sur dix, c'est un pari inacceptable pour les petits agriculteurs. La dixième année, celle où la culture est un échec, sa famille risquerait la famine. Si les paysans tiennent tellement à leurs vieilles variétés, ce n'est pas par stupidité ou par fainéantise mais par réalisme. La figure 2.1. illustre cette idée en comparant le rendement d'une variété locale de céréales à celui d'un hybride à haut rendement. Cet exemple d'une agriculture de subsistance qui ne peut se permettre de prendre de risque, peut également s'appliquer à d'autres changements technologiques aux résultats sans doute prometteurs mais incertains.

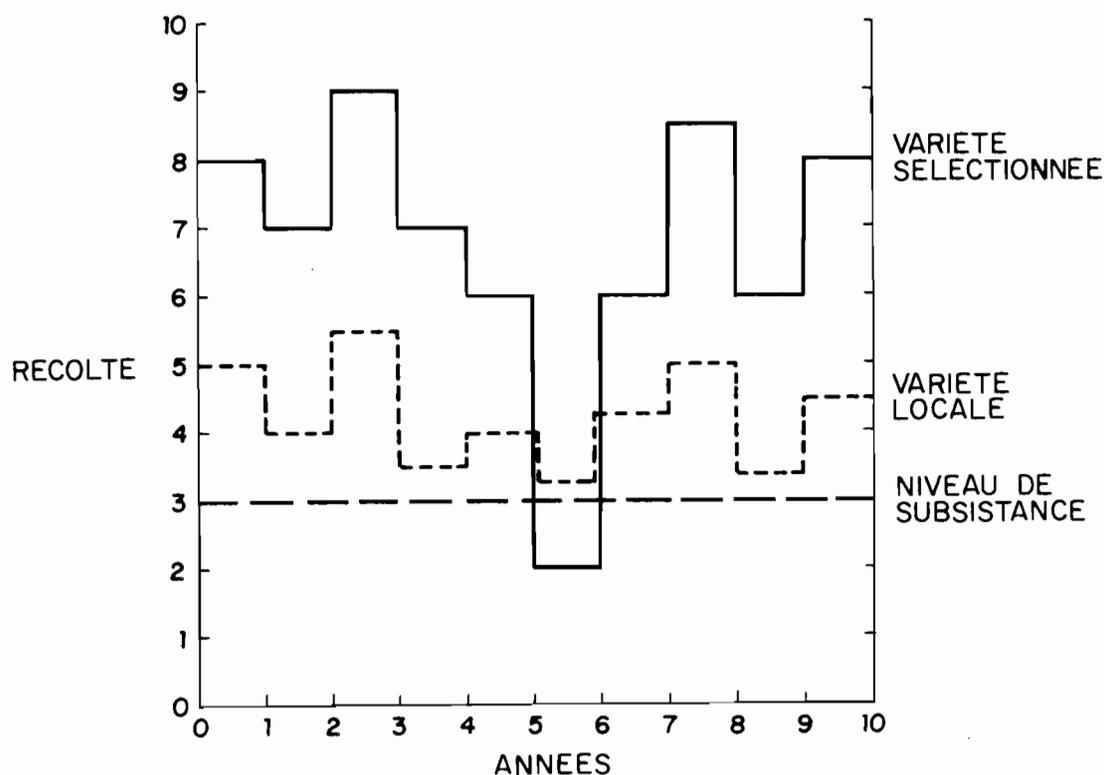


Figure 2.1 : la variété sélectionnée a un rendement moyen plus élevé que la variété locale mais elle n'est pas acceptable pour les paysans pauvres, car elle donne occasionnellement moins que le minimum requis pour survivre

2.2 PRESSIONS SUR LES ECOSYSTEMES SEMI-ARIDES

Comme partout, il y a un phénomène naturel d'accroissement de la population dans les régions semi-arides. Mais il y a d'autres facteurs. Il y a une tendance à la migration des zones les plus peuplées vers les régions semi-arides parfois soutenue par l'Etat qui cherche à augmenter la production dans ces régions, en distribuant des terres aux colons. Il semble par ailleurs que la sédentarisation des populations, au contraire du nomadisme, s'accompagne d'une augmentation du taux de croissance démographique. L'accroissement du cheptel a été suffisamment étudié dans de nombreux pays pour que l'on puisse constater une ferme tendance à la croissance, habituellement représentée par une courbe exponentielle ascendante. Quelques exemples sont cités dans la section 7.1.1. Les progrès de la médecine vétérinaire (chapitre I) et l'accroissement de la demande de produits carnés dans certains pays, seraient les causes de cette augmentation, par exemple au Nigéria. Parfois, l'amélioration de l'approvisionnement en eau a aussi contribué à l'augmentation du cheptel et à une surexploitation des pâturages.

L'étude du cheptel ovin en Irak par Thalen (1977) est un exemple intéressant. Il indique que ce cheptel a considérablement augmenté à la suite de l'introduction de machines pour forer les puits et de l'apparition de véhicules tout terrain, qui ont donné accès à des régions éloignées. Le cheptel national est passé de 4 ou 5 millions dans les années 1930, à 10 ou 11 millions dans les années 1960. Cela a entraîné un tel surpâturage et une telle dégradation que le cheptel est retombé à 6 millions dans les années 1970. Des exemples analogues de surpâturage dû à l'amélioration de l'approvisionnement en eau sont signalés au Soudan (Adams, 1975) et dans d'autres pays du Sahel (Franke et Chasin, 1981 ; Baral et al., 1983).

La pression croissante sur les ressources naturelles a également réduit la marge de manoeuvre. Les mauvaises années, on ne peut compter sur aucune réserve. Cela entraîne pour le petit agriculteur une baisse rapide de ses faibles stocks de nourriture et de fourrage. La situation est similaire au niveau du village ou de la tribu, qui dans le passé gardait toujours en cas d'urgence de la nourriture et des pâturages en réserve. C'est vrai aussi à l'échelle nationale quand on ne peut plus déplacer en masse des troupeaux qui ne trouvent plus à brouter sur leurs pâturages habituels. Au Botswana, les mauvaises années, les troupeaux se déplacent traditionnellement vers l'Est ; au Sahel ils partent pour le Sud. Dans ces deux cas ils reviennent à leur zone d'origine lorsque les conditions s'améliorent. A l'ouest du Soudan, les conséquences des dernières sécheresses n'ont pas été trop graves car les gens ont pu migrer avec leur bétail, en direction du Sud vers des zones plus humides et peu peuplées.

Certains événements politiques peuvent entraver les déplacements traditionnels d'un pays à l'autre. D'autres peuvent provoquer des mouvements de réfugiés.

Des chiffres sur l'évolution de l'utilisation des terres sont disponibles pour le Mali. Entre 1952 et 1975 les pâturages en savane ont baissé de 89 % à 63 % des terres exploitées alors que la part des cultures est passé de 6,6 % à 11,1 %. Durant la même période les terres dégradées ont augmenté de 4 % à 26 % (Le Houérou, 1979).

En résumé, tout semble indiquer que les ressources naturelles des régions semi-arides, de plus en plus sollicitées, se dégradent de jour en jour.

2.3 CLIMAT

2.3.1 Précipitations

L'agriculture en zone semi-aride souffre de deux problèmes : le manque de précipitations et leur irrégularité. En outre, plus le taux de précipitation est faible, plus la variabilité augmente. Cela se vérifie dans le monde entier (Le Houérou, 1986). Nous citerons deux exemples provenant de l'Asie de l'Ouest et de l'Afrique du Nord (voir figure 2.2). Les faibles quantités de pluie entraînent de nombreuses contraintes, la culture devient incertaine ou bien exige l'utilisation de techniques spéciales comme la jachère nue ou le creusement de fossés afin de collecter plus d'eau. La gamme des espèces pouvant être plantées est très limitée et dans les pays tropicaux semi-arides

qui ont des pluies estivales, le maïs est cultivé là où il y a assez d'eau, le sorgho là où il n'y en a pas assez pour le maïs, et le mil là où il n'y en a pas assez pour le sorgho. La stratégie des systèmes culturaux doit être orientée vers la réduction des pertes et du gaspillage des eaux de pluie par le ruissellement (Roose, 1976 ; Serpantié et Lamachère, 1989).

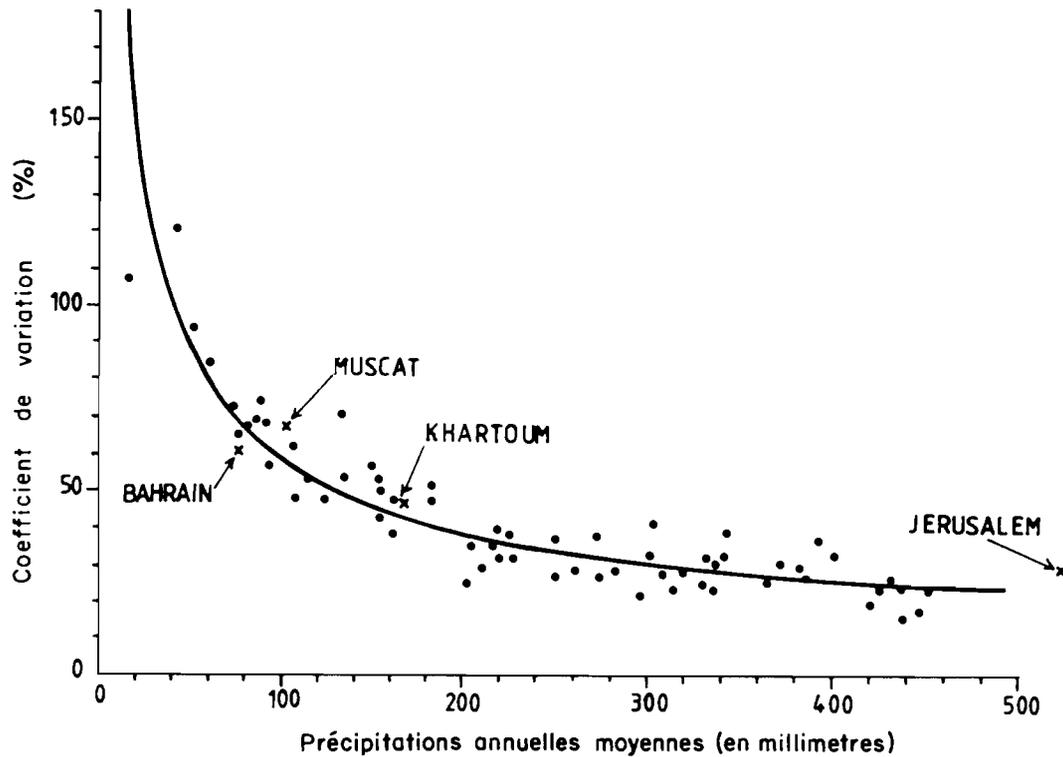


Figure 2.2 : coefficient de variation des précipitations annuelles en fonction de leur moyenne annuelle (étude nf37 de la FAO sur l'irrigation et le drainage des zones arides, 1981)

Dans les zones où la moyenne annuelle des précipitations est faible, il peut toutefois se produire de violents orages qui provoquent des inondations et érodent le sol. Le tableau 2.1. (Rainey, 1977) fait ressortir qu'il peut exceptionnellement tomber beaucoup plus d'eau en un seul mois qu'il n'en tombe normalement dans toute une année. Les photos 2.1 et 2.2 montrent des exemples d'inondations et d'érosion dévastatrices à la suite d'orages exceptionnels dans le Queensland en Australie.

Bourges, Floret et Pontanier (1977) ont étudié le bilan hydrique et l'érosion à la citerne TELMAM près de Gabès dans le Sud Tunisien de 1972 à 1977. En moyenne sur 5 ans, la pluie atteint 231 mm, l'érosivité (RUSA) 76,4, le ruissellement (KRAM) 28 % et l'érosion 16t/ha/an (soit 1-2 mm/an). Mais en un seul jour, le 12 Décembre 1973, il est tombé 250 mm de pluie entraînant un ruissellement de plus de 80 % et des pertes en terre de 90t/ha - plus qu'en 5 ans !

Delhoumes (1987) en Tunisie Centrale a comparé l'érosion et le ruissellement sous forêt dense méditerranéenne et sous maquis dense (couvert 40 %) dans le djebel SEMAMA et sur le Piémont : l'érosion y est faible, même sous maquis, mais lors de grosses averses (70-80 mm) tombant sur sol humide, le ruissellement peut atteindre 40-55 % sous maquis et entraîner des dégâts de ravinement dans la plaine et les piémonts.

Il existe généralement une relation entre la moyenne annuelle des précipitations et leur érosivité (Roose, 1976-1980). Ces résultats signifient que la quantité de pluies annuelles provient surtout du nombre d'orages plutôt que de leur violence. Les pluies de



Photo 2.1 : dégâts de l'érosion à la suite d'une tempête de fréquence rare, Queensland, Australie (Queensland Dept. of Primary Industries)

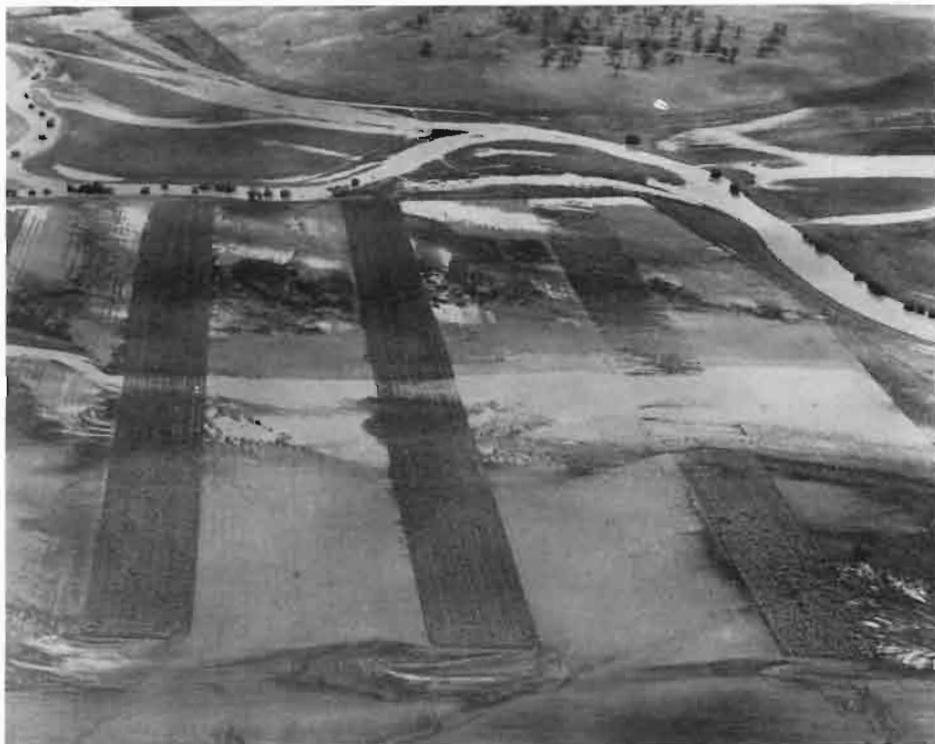


Photo 2.2 : dégâts de l'érosion à la suite d'une tempête de fréquence rare, Queensland, Australie (Queensland Dept. of Primary Industries)

convection, brèves mais très intenses qui prédominent dans les régions semi-arides tropicales ont des relations, intensité x durée assez stables et indépendantes de la moyenne à long terme des précipitations en une station donnée. Par exemple, un bon paramètre pour prévoir l'érosion est la quantité maximale de pluie reçue en 30 minutes ce qui est indépendant de l'emplacement et de la moyenne annuelle des précipitations tant dans les pays méditerranéens que dans les pays tropicaux semi-arides (FAO, 1981 p.13). D'autre part, certaines régions reçoivent des pluies frontales de faible intensité, généralement hivernales. En Jordanie et dans le Néguev par exemple, où la majorité des précipitations sont hivernales, les pluies peu intenses peuvent représenter la plus grande part des précipitations annuelles et l'érosion qu'elles provoquent est généralement moins grave, bien qu'on y observe parfois des inondations remarquables.

Tableau 2.1 PLUIES VIOLENTES SUR LES TERRES ARIDES

		Précipitations annuelles moyennes	Mois à plus haute pluviosité enregistrée	Mois suivant le plus mouillé
Soudan	Wadi Halfa 1937-60	3	29 (juillet)	14 (octobre)
	Abu Hamed 1931-60	17	110 (juillet)	48 (août)
Algérie	Aoulef 1931-60	11	25 (janvier)	20 (août + novembre)
Tchad	Faya-Largeau 1941-60	16	48 (juin)	31 (août)
Yemen du sud	Aden 1941-60	39	55 (novembre)	47 (septembre)
Pakistan	Jacobabad	99	330 (juillet)	129 (août)

Source : WMO (1967) Climatological normals, 1931-60.

Plus la sécheresse augmente, plus la variabilité des précipitations est importante, comme le montre la Figure 2.2. L'écart type des précipitations annuelles en apporte une autre illustration. Dans les climats tempérés, dix-neuf années sur vingt, les précipitations annuelles sont comprises entre 75 et 125 % de la moyenne. Dans les pays tropicaux semi-arides elles varient, dix-neuf années sur vingt, de 40 à 200 % de la moyenne quand celle-ci est de 200-300 mm et de 30 à 350 % quand la moyenne tombe à 100 mm. (FAO 1981, p. 13).

Il y a généralement nettement plus de valeurs annuelles au-dessous qu'au-dessus de la moyenne. Il y a donc une courbe assez optimiste de la distribution annuelle des précipitations. La valeur modale est inférieure à la valeur médiane et toutes deux sont inférieures à la moyenne (FAO, 1981). De plus, on observe des variations spatiales très fortes, notamment là où les précipitations se forment dans des cellules convectives de faible taille. Par exemple Sharon (1972), a montré qu'en Israël on peut trouver des cellules de précipitations ne dépassant pas 5 km de diamètre, par conséquent sur un bassin hydrographique de quelques centaines de km², seulement 20 % de la zone peut être arrosé. A plus long terme, la variation du régime des pluies dans une zone en principe homogène peut être suffisante pour influencer les pratiques agricoles, comme nous l'ont montré les études par Keatinge et al (1985) de trois sites en Syrie et celles de Dennett et Rodgers (1986) sur six sites au Botswana.

En d'autres termes, l'irrégularité des précipitations d'une année sur l'autre est due aux variations d'un endroit à l'autre et d'un orage à l'autre. Par conséquent, des prévisions sont très difficiles à établir. Les techniques statistiques modernes permettent de déterminer la probabilité d'événements importants pour l'agriculture : pluies au moment des semis, vagues de sécheresse à telle ou telle époque de la

saison.... Mais ce sont des instruments stratégiques essentiels qui aident les gouvernements à établir leurs plans ou à fournir une ligne de conduite pour les opérations agricoles qui peuvent probablement être effectuées à certaines époques. Il existe des possibilités prometteuses d'établir des prévisions saisonnières pour une région, basées sur des liens entre des données à grande échelle de la circulation atmosphérique et des précipitations ; par exemple l'étude de Dennett et al. (1978) sur Fidji. Mais ces prévisions ne peuvent avoir qu'un caractère général et les variations locales restent considérables. Le paysan a surtout besoin de conseils pour prendre des décisions tactiques, à court terme, mais cela semble plus difficile. Les études de Dennett et al. (1983) indiquent qu'il est impossible à partir du déroulement du début de la saison des pluies, de prévoir la suite des événements. En revanche, au Kenya, Stewart et Hash (1982), ont été en mesure de classer les saisons des pluies en trois catégories, en fonction de l'époque et du volume des premières pluies et suffisamment tôt pour modifier les décisions de gestion agricole. Mais une analyse similaire de données pluviométriques sur le Botswana a révélé qu'il n'y avait aucun lien entre le volume des premières pluies et le volume total saisonnier des précipitations (Sinclair, 1985).

Dans certains cas, il y a donc quelques possibilités de changements tactiques en milieu de saison. Dans un autre exemple, Rainey (1977), a observé que les pasteurs nomades réagissent très rapidement aux variations saisonnières des précipitations en emmenant leurs troupeaux, grâce à leurs propres informations, vers une zone où la pluie est tombée. Pour les cultures il est moins évident d'opérer des changements au milieu de la saison. Théoriquement il devrait être possible de planter des variétés à cycle long plus intéressantes si les pluies démarrent suffisamment tôt, et de choisir des variétés à cycle court au cas où les pluies tardent. Cela se fait parfois, par exemple en Inde et au Swaziland, mais il est très difficile sur un plan logistique de maintenir les deux stocks de semences et de les distribuer au moment voulu.

2.3.2 Températures et vents

Les températures extrêmes, peuvent poser des problèmes. Les terres à blé du Kazakhstan (URSS) ne sont à l'abri du gel que pendant 100 à 120 jours ; la culture est mise en place à la suite d'un labour qui s'opère nuit et jour, puis plantée le plus tôt possible et récoltée en automne avant que la culture n'arrive à complète maturité. Au Botswana, en Afrique australe, la température du sol est si élevée, qu'elle peut empêcher la germination et il est tout à fait vraisemblable que la diminution des rendements après billonnage soit en partie due à une augmentation de la température du sol dans les billons.

L'érosion éolienne peut présenter une certaine menace lorsque simultanément le sol est très sec et est balayé par les vents. Cette association est fréquente dans les pays tropicaux semi-arides, et peut se produire également dans les climats tempérés lorsque la sécheresse saisonnière coïncide avec les vents. La photo 2.3 montre un exemple, provenant du projet d'irrigation du bassin des Columbia, dans l'état de Washington, Etats-Unis, au début du printemps.

Les vents chauds et secs ont trois effets principaux : ils réduisent l'efficacité des pluies par évaporation à la surface du sol, augmentent l'évapotranspiration du couvert végétal et les risques de stress de sécheresse, et, finalement les vents augmentent l'évaporation des réservoirs d'eau.

2.4 SOL

Les sols sont très variés dans les zones semi-arides. On se référera à deux exemples pour les problèmes pédologiques. Après avoir rappelé que les zones tropicales semi-arides se situent principalement dans les pays en voie de développement d'Afrique (70 % du total), en Asie du Sud-Est (majoritairement en Inde), en Amérique Latine et en Australie (représentant respectivement chacun environ 10 %), Kampen et Burford (1980) indiquent que huit classes de sols sont représentées mais que plus de la moitié sont des alfisols et des aridisols. Les alfisols sont majoritaires et couvrent environ 32 % du SAT (Tropiques semi-arides) africain et 38 % du SAT asiatique. Les vertisols couvrent 6 % de la superficie totale mais 25 % de l'Inde semi-aride.



Photo 2.3 : érosion éolienne sur un projet d'irrigation dans l'état de Washington, Etats-Unis, au début du printemps (USDA - SCS)

Jones montre dans un autre exemple (1984) la diversité des sols dans les zones peu arrosées d'Afrique du Sud : "Les sols sont très divers ; on trouve de vastes étendues d'arénosols (sable et sable limoneux) au Botswana, au Zimbabwe et au Mozambique, des zones plus réduites mais potentiellement plus riches de vertisols (argile lourde) dispersés dans toute la région ; des acrisols, des ferralsols et nitosols ayant un taux d'acidité et de lessivage très élevé en Tanzanie (majoritairement) et des sols neutres, alcalins et salins au Botswana (fluvisols, solonchaks, xerosols et solonetz)".

Ces sols ont des propriétés physiques très diverses qui peuvent être néfastes à l'agriculture. Par exemple :

- Le taux d'infiltration est faible et conduit à un fort ruissellement, d'où une mauvaise utilisation de l'eau de pluie (Roose, 1980).
- La croûte qui se forme fréquemment à la surface du sol dans les régions semi-arides peut-être une des causes principales du faible taux d'infiltration (Escafadal *et al.*, 1988 ; Valentin et Collinet, 1979 ; Casenave et Valentin, 1988). En outre, elle peut créer un obstacle à la levée des semis à un tel point qu'il est nécessaire de citer cette contrainte comme un facteur important de la classification des potentialités des terres, par exemple au Zimbabwe.
- Le tassement des sols très denses peut réduire l'infiltration et aussi accroître la force de traction nécessaire pour le travail de la terre, comme c'est le cas sur les limons sableux du "Hardveld" au Botswana.
- La fissuration profonde des vertisols peut accroître les pertes d'eau par évaporation et poser des problèmes pour l'agriculture.
- Beaucoup de sols semi-arides ont une faible capacité de rétention de l'eau, surtout pour les sols sableux et les sols peu profonds comme les alfisols en Inde.

La réserve utile en eau du sol dans la zone exploitée par les racines peut être limitée par: (a) la faible réserve d'humidité propre aux sols sableux ou graveleux, (b) un faible développement racinaire en profondeur à cause de la dureté naturelle du sol (Charreau, Nicou, 1972). Les techniques de gestion mises en place pour prévenir le ruissellement, peuvent entraîner des engorgements et des conditions trop humides particulièrement néfastes aux plantes au début de leur croissance. En raison de l'irrégularité des précipitations et de la faible capacité de stockage, les cultures risquent de souffrir de coup de sécheresse en fin de cycle même si l'infiltration est satisfaisante en début de saison.

Les problèmes chimiques des sols y compris une faible fertilité peuvent trouver leur raison dans les propriétés intrinsèques du sol, dans le lessivage ou une érosion ancienne (Roose 1980). Breman et Vithol (1984), constatent que dans les zones de parcours sahéliennes la faible fertilité des sols, surtout les carences en azote et en phosphate, est un facteur limitant beaucoup plus grave que les précipitations irrégulières et faibles, les conditions d'utilisation des engrais en zone semi-arides étant délicates (Pieri, 1984). La salinité et l'alcalinité posent aussi des problèmes majeurs mais hors du sujet de cet ouvrage.

On peut distinguer différents types d'érosion qui sont associés à une érodibilité excessivement forte des sols et qui sont plus fréquentes dans les tropiques semi-arides que dans les régions humides (Roose et Sarrailh, 1989). Par exemple, l'érosion en tunnel souvent associée à la géomorphologie des bad-lands (Bryan et Yair, 1982). Ce sont généralement des sols présentant un déséquilibre calcium/sodium et qui ont tendance à se disperser facilement. L'érosion géologique peut être très grave si les sols sont très érodibles, les orages violents et le couvert végétal maigre (voir photo 2.4).



Photo 2.4 : érosion géologique grave dans des climats semi-arides (Fairchild Survey)

2.5 LES TRADITIONS AGRAIRES

Tous les problèmes des pays en voie de développement se retrouvent dans les régions semi-arides, mais ils sont généralement aggravés par le faible niveau de production ce qui entraîne une faible capacité d'investissement des agriculteurs et un faible développement des infrastructures par les gouvernements. Le paysage général est plutôt déprimant avec une baisse de la production et la dégradation croissante de l'environnement, il existe pourtant des techniques qui permettrait de surmonter ces problèmes.

- i. Le Nord-Ouest semi-aride des Etats-Unis a obtenu une production de blé très satisfaisante bien que la moyenne annuelle des précipitations soit comprise entre 240 et 400 mm, mais dans ce cas, la majorité des pluies tombent en hiver et ce système exige un haut niveau d'intrants tels que machines, capitaux et engrais (Bolton, 1977).
- ii. La Turquie offre un autre exemple encourageant (Kronstad, 1981). La production annuelle de blé a augmenté de 8 millions de tonnes en 1965 à 16 millions de tonnes en 1976, grâce aux efforts suivants :
 - la mise en place de programmes de recherches sur la préparation des terres, le contrôle des mauvaises herbes et l'amélioration variétale,
 - un renforcement substantiel du programme national de vulgarisation et de formation,
 - l'envoi à l'étranger de chercheurs et de vulgarisateurs pour qu'ils puissent se perfectionner. Dans ce cas, il a aussi fallu investir beaucoup mais dans la formation, la recherche et la vulgarisation, de telle sorte que cet exemple est dès plus pertinent pour les pays en développement.
- iii. En Australie, les rendements se maintiennent à un niveau raisonnable grâce à des rotations avec des trèfles ou des luzernes. Le seul engrais utilisé est le superphosphate, à raison de 60 à 100 kg/ha. Le pâturage des légumineuses et du fourrage est strictement contrôlé. Ce système a remporté un certain succès en Lybie et il pourrait être mis en place dans d'autres régions. Il en est au stade expérimental en Algérie (Arabi, Roose, 1989).
- iv. Dans les régions à précipitations estivales, l'ICRISAT a mis au point des techniques agraires prometteuses pour les terres arides, bien que peu d'agriculteurs aient encore accepté ces méthodes.

Dans beaucoup de pays, le manque d'énergie est une contrainte majeure au développement des cultures. Dans le tiers monde, les paysans les plus pauvres n'ont aucune chance de pouvoir acheter une paire de boeufs. Des millions de paysans ont quelques bêtes mais pas assez fortes pour pouvoir travailler efficacement leurs terres. Dans les régions à précipitations estivales, au printemps, lorsque le besoin le plus urgent de force de traction apparaît et que le labour exige le plus haut niveau d'énergie, les animaux sont dans des états pitoyables après avoir enduré un hiver rude et sec. En Afrique il est courant, après le début des pluies, de laisser les bêtes brouter l'herbe nouvelle pendant un mois pour les remettre en condition ; pourtant, la plantation précoce est la condition essentielle pour avoir une bonne récolte. Dans d'autres pays c'est la main-d'oeuvre qui fait défaut (Marchal, 1986 ; Reij, 1989). L'exode masculin vers des emplois plus rémunérateurs en ville ou vers des pays voisins freine le développement de l'agriculture. C'est le cas des mines et des industries d'Afrique du Sud qui ont provoqué un exode si important de main-d'oeuvre provenant des pays voisins comme le Lesotho et le Swaziland que les productions végétales de ceux-ci ont diminué. Plus récemment, le Moyen-Orient, riche de son pétrole, a attiré beaucoup de main-d'oeuvre non qualifiée. Ce genre de migrations n'a pas d'effet sur l'agriculture dans les pays très peuplés comme l'Inde ou le Pakistan, mais ailleurs il peut poser des problèmes. Dans la République Islamique du Yémen, un système de terrasses très performant n'est plus entretenu, faute de main d'oeuvre qualifiée (Vogel, 1985). La situation est analogue dans plusieurs pays d'Afrique du Nord où un exode de main-d'oeuvre vers l'Europe, affecte localement l'agriculture.

Il faut aussi tenir compte des problèmes provenant de dépenses inadéquates. Les engrais et les semences améliorées sont introuvables ou trop chers pour les petits paysans. Ces derniers n'ont pas de capitaux à investir. Les coopératives et les systèmes de crédit ne sont pas assez développés et sont difficiles d'accès pour les populations semi-nomades.

Il y a aussi les problèmes sociaux, notamment la difficulté de bien gérer les pâturages communaux et le refus d'investir de l'argent ou de la main-d'oeuvre sur des terres qui s'appuient sur des systèmes peu fiables de location temporaire. L'infrastructure est souvent moins développée dans les régions semi-arides parce qu'il y a eu moins de demande de routes, de points d'eau et de marchés commerciaux, et aussi parce que le faible taux de productivité ne justifie pas l'accroissement de ces investissements. Il y a souvent des difficultés de distribution des semences, des produits chimiques et des engrais : cela est apparu récemment, lorsque des organisations humanitaires se sont retrouvées dans l'incapacité de distribuer de la nourriture dans des pays qui souffrent de la famine. La majorité des gouvernements ont pour objectif d'améliorer et de développer l'agriculture, mais la réalisation manque souvent de vigueur. Dans plusieurs pays africains, la volonté gouvernementale de réduire le cheptel national pour soulager la pression exercée sur les pâturages dégradés n'a pas abouti, car la majorité des grands troupeaux appartient à des propriétaires puissants. Les gouvernements ont aussi du mal à concilier le désir politique de maintenir bas les prix de l'alimentation de base et leur volonté de verser des revenus équitables aux agriculteurs. Enfin, sur un plan international, il est alarmant de constater que les conflits politiques se multiplient dans les régions semi-arides où la lutte pour la défense et la préservation de la nature est déjà bien difficile et devrait mobiliser toutes les énergies.

3. REVUE DES POSSIBILITES POUR AMELIORER L'AGRICULTURE

Pour améliorer l'agriculture ou même pour essayer de stopper ou de réduire les effets de la dégradation du sol, nous devons connaître les facteurs qui régissent les potentialités du milieu physique et humain.

3.1 RESSOURCES PHYSIQUES

Il est curieux de noter que tant de pays dont le développement dépend de la production agricole, n'ont pas pris l'initiative de dresser un inventaire de leurs ressources naturelles et de les classer en zones agro-écologiques ayant des aptitudes différentes. De telles enquêtes peuvent être menées à bien à l'aide de méthodes adaptées à l'échelle d'investigation. Le programme FAO d'études agro-écologiques régionales utilise massivement l'ordinateur pour combiner la carte mondiale des sols au 1:5 000 000 avec les données climatiques, pour obtenir des cartes de capacités agricoles. La même méthode peut être appliquée dans d'autres pays, avec des cartes au 1:1 000 000. Les études faites à cette échelle sont utiles pour mettre en place une planification stratégique très générale, mais elles doivent être complétées par des études locales plus approfondies. (FAO, 1978).

La série d'études des ressources naturelles menées par le Centre de Développement des Ressources de la Terre (LRDC), qui combine l'analyse des photos aériennes et la cartographie des terres avec les données géologiques, pédologiques et climatiques disponibles par le pays, est une autre façon d'inventorier les ressources. Ces études peuvent être faites à une échelle qui convient à tout le Nord du Nigéria par exemple (LRDC, 1968) ou bien au 1:250 000 pour un petit pays tel que le Lesotho (LRDC, 1968). Un système efficace qui peut servir de modèle à la plupart des pays en voie de développement a été mis en place au Zimbabwe. L'étude agro-écologique du Zimbabwe a été complètement cartographiée au 1:100 000 ème dans les années 1950, et a été progressivement améliorée pour donner la carte des "régions naturelles et zones agricoles" laquelle est un outil essentiel au gouvernement du Zimbabwe pour la planification de sa politique agricole. L'Australie offre de bons exemples d'études détaillées au niveau des bassins versants (Aldrick et coll., 1978). L'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM) a mis au point en Tunisie, une classification comportant 22 "systèmes écologiques", cette classification est adaptable aux zones méditerranéennes semi-arides d'Afrique du Nord (Floret et al. 1981).

Pour étudier l'érosion, il faut également utiliser des échelles différentes selon le degré de précision nécessaire. Landsat et la télédétection qui ne cesse de s'améliorer, peuvent être utilisés pour procéder à des évaluations générales (Pickup et Nelson, 1984) mais il faut interpréter les photos aériennes si l'on veut faire des observations plus détaillées (Keech, 1985) : dans les deux cas des vérifications au sol sont indispensables. Nous devons recueillir des informations tant sur l'érosion que sur la conservation des sols. Les tentatives faites par le passé, même infructueuses, peuvent fournir des informations utiles concernant les erreurs à éviter. Nous devons aussi étudier les méthodes de conservation existantes pour les utiliser dans d'autres situations lorsque c'est possible.

Comme les régions semi-arides n'ont pas été mises en valeur intensivement, les informations disponibles sur les sols et le climat sont généralement maigres. Les mesures de la pluviosité sont plutôt rares et espacées, tandis que la forte variabilité spatiale signifie que les données disponibles peuvent ne pas être représentatives. De même, les études pédologiques et les recherches sur les caractéristiques physiques et chimiques des sols sont en général moins fines que dans les zones où les précipitations sont moins aléatoires.

Etant donnée la grande variété des conditions rencontrées dans les régions semi-arides, les résultats des travaux de recherche ou de développement effectués dans d'autres pays doivent être interprétés avec prudence. Depuis ces dernières années il y a un intérêt croissant pour l'agriculture des régions sèches. Il est donc important que tout recensement d'informations existantes prenne en compte toutes les informations des

programmes de recherche et plus particulièrement les programmes récents ou en cours dont les résultats peuvent ne pas avoir été largement diffusés. Dans le cas plus courant où les connaissances et les informations actuelles sont insuffisantes, les programmes de recherche et de développement doivent comporter et réunir, d'une part les recherches thématiques menées dans chaque discipline, et d'autre part les recherches sur les systèmes agraires dans les stations de recherche et chez les paysans.

3.2 LIMITES SOCIALES

Il est certain que dans le passé, les résultats de nombreuses recherches thématiques très valables par ailleurs n'ont pas été transmis ni adoptés avec succès par les agriculteurs, car ils ne correspondaient pas à leurs systèmes agraires. Il est indéniable qu'il faut connaître à fond toutes les ramifications sociales et économiques des systèmes agraires pour orienter les recherches vers des sujets thématiques et des techniques qui soient applicables. Dans le cas des systèmes agraires caractéristiques des zones semi-arides, il est particulièrement difficile de rassembler les informations et de les comprendre. A la difficulté habituelle de recueillir des données auprès des agriculteurs, qui sont sceptiques face aux projets officiels et qui répugnent à fournir des informations financières, s'ajoute la complexité du système. Par exemple, dans l'agriculture commerciale à but lucratif, il est urgent d'identifier les responsabilités et le processus de prise de décision en matière de gestion. Dans les communautés tribales ou villageoises, la prise de décisions peut être très longue et très compliquée. Les données que l'étude cherche à dégager sont complexes, et ceux qui la conduisent peuvent n'en avoir qu'une idée approximative. Par exemple les droits d'exploitation et les droits d'accès à l'eau, aux pâturages et aux combustibles, et les droits de culture ou de cueillette sont généralement difficiles à définir. Dans les systèmes d'élevage nomades ou semi-nomades, même le droit de propriété peut présenter des ambiguïtés : par exemple, un propriétaire individuel d'animaux dans un troupeau communal, propriétaire de l'animal mais non de sa descendance, propriétaire conditionnel avec reversion en cas de dissolution du mariage et bien d'autres particularités étrangères à l'agriculture occidentale. Il ne fait aucun doute que l'étude de la totalité du système agraire est nécessaire pour définir les possibilités d'un développement rural. Mann (1974), Chambers (1981) et Collinson (1981) ont beaucoup amélioré ces dernières années les techniques qui permettent d'obtenir les informations requises.

La majorité des stratégies d'amélioration des cultures et d'utilisation plus efficace des eaux de pluies - discutées chapitres 5 et 6 - s'adressent plutôt à des exploitations individuelles ou à de petits groupes d'agriculteurs. Cela explique probablement la popularité et le succès de petites opérations de développement dirigées par des Organisations Non-Gouvernementales (ONG), par exemple le projet Oxfam au Burkina Faso, ou le projet "War on Want" au Kenya, qui sont étudiés dans la section 5.2.4. La phrase célèbre de Schumaker "ce qui est petit, est beau" semble s'appliquer à la majorité des projets de développement dans les régions semi-arides. Il y a bien entendu quelques exemples d'expériences d'agriculture collectant les eaux de ruissellement sur une grande échelle tels que les anciens systèmes du Neguev ou les petits réservoirs pour l'irrigation par submersion ou "khadins", du Nord de l'Inde. Un de ces réservoirs, près de Bharatpur, a une digue de retenue de 19 km de longueur ; il irrigue par submersion 4 100 hectares et en arrose 4 800 autres. Ces systèmes sont décrits dans la section 5.3.3.

Le faible taux d'adoption d'une méthode nouvelle, qui semble par ailleurs satisfaisante, a été étudié dans le contexte des activités de vulgarisation en Inde (voir section 2.1.4), mais il y a des exemples d'adoption rapide comme au Botswana le développement récent de l'utilisation de tracteurs de puissance moyenne et la constitution de syndicats pour l'exploitation de forages. Il serait intéressant d'étudier pourquoi les nouvelles idées diffusent lentement dans certains cas et rapidement dans d'autres. L'irrégularité des précipitations qui ne peuvent servir de base à une stratégie viable, est une des difficultés qui freinent l'adoption de méthodes visant à modifier le mode d'utilisation des eaux de pluies et des eaux de ruissellement pour la culture. Les dispositifs de stockage de l'eau qui sont nécessaires au cours d'une année sèche deviennent gênants lors d'une année pluvieuse où il faut au contraire construire des fossés de drainage (et inversement).

A long terme, il existe des possibilités d'amélioration de la physiologie des plantes à utiliser dans les zones semi-arides. La sélection et la reproduction de plantes à cycle court sont étudiées et ont donné des résultats encourageants. Il existe aussi d'autres problèmes qui n'ont pas été autant étudiés, comme l'augmentation de l'efficacité de la transpiration. Le problème de l'utilisation plus efficace de l'eau disponible est étudié plus en détail dans la section 4.2.4.

4. LA CONSERVATION DES SOLS

4.1 PRINCIPES

4.1.1 L'extension de l'érosion

Les zones semi-arides reçoivent moins de pluies que les zones à climats humides, mais cela ne signifie pas que l'on y observe peu d'érosion hydrique. En effet, l'érosion hydrique peut être plus forte dans les régions semi-arides que dans d'autres zones climatiques. Cela est dû en partie au fait que, dans les zones semi-arides, les précipitations ont un taux élevé de pluies d'orages convectives, très intenses et qui ont un fort pouvoir érosif en début de saison des pluies. Cela s'explique surtout par la présence d'un couvert végétal peu dense, en particulier en début de saison des pluies (Cormary et Masson, 1964 ; Roose, 1966). En région méditerranéenne, l'érosion en nappe est faible (Heusch, 1972 ; Arabi, Roose, 1989) mais à la faveur des longues séries d'averses tombant sur des sols détremés en hiver, le ruissellement se concentre le long des versants et provoque des ravinements, des glissements de terrain, des sapements de berges qui sont responsables de transports solides très importants et qui colmatent trop rapidement les réservoirs (Demmak, 1984).

Certains des sols communs dans les zones semi-arides sont particulièrement vulnérables parce qu'ils ont une faible résistance à l'érosion (Roose, 1980 ; Fauck, 1977), en raison de leurs propriétés physiques et chimiques (pauvres en matières organiques et riches en limons). Un exemple provenant du Mexique est illustré sur la photo 4.1. C'est ainsi que les alfisols subissent une perte particulièrement forte de productivité par unité de perte de sol (Stocking et Peake, 1985). L'érosion par ravinement peut être très forte dans les régions semi-arides et il faut prendre en compte le rapport bénéfice/coût du contrôle du ravinement. Les travaux efficaces mais coûteux de lutte contre le ravinement qui ont été mis en place en Australie, par exemple, et qui sont illustrés sur la figure 4.2, peuvent ne pas être adaptés aux possibilités des pays du tiers monde. Des expériences sont en cours en Algérie pour mettre au point des méthodes de fixation des ravines moins chères, mieux adaptées aux différents cas et rentabiliser ces travaux non seulement par la réduction des sédiments transportés mais surtout par la mise en valeur des sédiments piégés (Roose, 1988).

4.1.2 Conservation du sol et de l'eau

Il existe toujours des liens étroits entre les mesures de conservation du sol et de conservation de l'eau, et cela s'applique également aux zones semi-arides. Beaucoup de mesures s'occupent principalement soit du sol soit de l'eau, mais la plupart sont bivalentes. La diminution du ruissellement de surface à l'aide d'ouvrages appropriés ou d'aménagement des terres, aidera à réduire l'érosion. De même, la lutte contre l'érosion entraîne des mesures qui préviendront la battance des gouttes de pluies, la formation de croûtes ou la dégradation de la structure du sol, toutes mesures qui augmentent l'infiltration et aident à conserver l'eau.

4.1.3 Programmes intégrés

Depuis 1980, les spécialistes de la conservation des sols tendent à penser que les travaux avec des engins et les ouvrages réalisés dans le cadre de programmes de conservation des sols financés par les gouvernements ou par les donateurs ne répondent pas au but recherché. La prise de conscience générale à propos de l'inefficacité des programmes comprenant seulement la construction de terrasses anti-érosives, en est un exemple. L'idée se répand que les seuls programmes efficaces sont ceux qui jouissent du plein appui de la population. Le petit paysan n'a que faire des appels aux sentiments ou à la raison philosophique en faveur de la conservation du sol : il faut que les mesures de conservation aient pour lui des avantages visibles à court terme. Ce qui compte le plus pour lui, c'est un accroissement des rendements par unité de surface, ou bien une meilleure production par unité de travail ou encore une plus grande fiabilité des rendements (Shaxson et al., 1989).

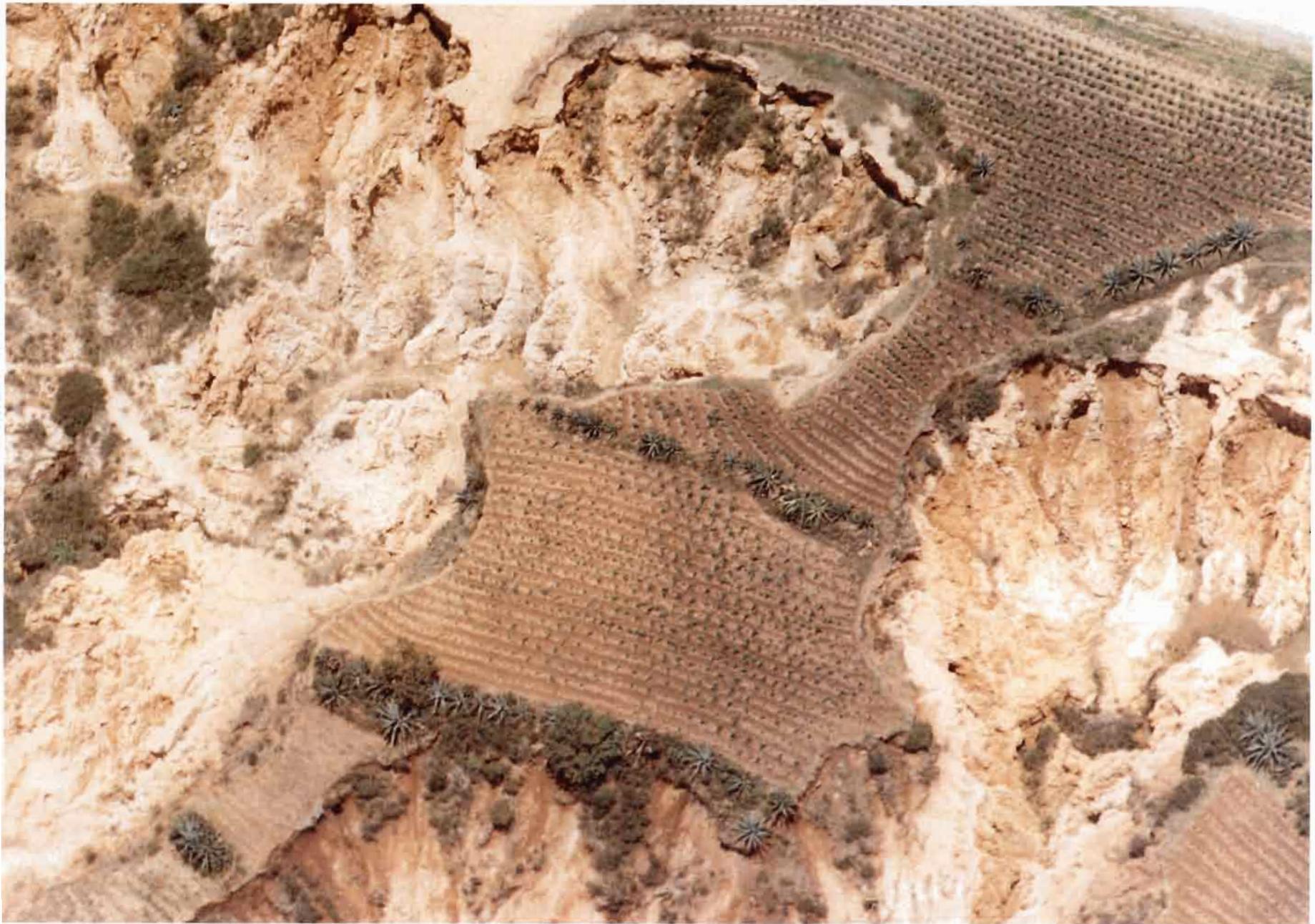


Photo 4.1 : sol érodible dévasté par l'érosion hydrique au Mexique (Roberto C. Coutino)

AVANT:



APRES:

A la saison suivante
après défoncement et
semis au cultivateur
lourd



Photo 4.2 : Exemple d'un aménagement coûteux de ravine en
Australie (R.J. Noonan, Soil Conservation Authority,
Victoria)

L'idée de travailler en groupe à des travaux qui demandent une abondante main-d'oeuvre est solidement implantée dans de nombreux pays, en particulier pour le semis et la récolte. Cette pratique pourrait s'étendre à des travaux de conservation des sols. Les avantages sont les suivants :

- Un village ou un groupe peuvent venir à bout de tâches qui seraient trop importantes pour un individu ou une famille ;
- Elle développe le sens de la responsabilité communautaire pour préserver la terre ;
- Ces travaux de groupe constituent pour les agents de vulgarisation un bon forum pour diffuser des méthodes agricoles améliorées (photo 4.3).



Photo 4.3 : groupe d'auto-assistance au Kenya
(Carl Matzon)

4.1.4 Besoins de structures mécaniques

S'il est exact que la conservation du sol doit se montrer rentable pour être acceptée par l'agriculteur, alors la faible valeur de la production sur les sols semi-arides signifie que seules des solutions simples et bon marché y sont appropriées. Sur un sol fertile suffisamment arrosé, il est judicieux d'investir beaucoup de main-d'oeuvre ou d'argent dans des systèmes perfectionnés de lutte contre le ruissellement ; mais ce n'est pas le cas dans les régions semi-arides où les rendements sont faibles et aléatoires. Il en découle que les tentatives pour éliminer complètement l'érosion ne sont pas réalistes et qu'un certain degré d'érosion, ainsi qu'un certain risque d'échec des mesures de conservation du sol, devraient être acceptés. En ce qui concerne le risque d'échec, un exemple d'approche réaliste est fourni par les digues de dérivation des eaux de crue construites dans la République Démocratique Populaire du Yémen pour les systèmes d'irrigation par épandage des eaux de crue. Chaque extrémité de la digue est construite en pierres, ou actuellement en béton, tandis que la partie centrale est en terre. Il est admis que la partie en terre sera tôt ou tard détruite par les grandes crues mais la réparation ou la reconstruction sont bon marché (Thomas, 1982). Pour améliorer la construction de ces digues afin qu'elles résistent aux crues qui se produisent tous les 25 ans, l'effort des agriculteurs serait trop important. Cette même approche doit être appliquée à tous les programmes de conservation mécanisés dans les zones semi-arides.

4.1.5 Technologie appropriée

Beaucoup de programmes de conservation ont échoué car la technologie était inadaptée ou mal appliquée ou bien parce que ces programmes ne prenaient pas en compte la situation sociale et ne mobilisaient pas la population. Les programmes passés de conservation du sol en Afrique du Nord en fournissent un exemple frappant. Heusch (1985), conclut que les grands programmes de conservation réalisés de 1950 à 1975 en Algérie, au Maroc et en Tunisie utilisaient des techniques inappropriées, importées des Etats-Unis où les conditions étaient totalement différentes et la totalité de cette opération doit être considérée comme une erreur à ne pas répéter. Des critiques analogues peuvent s'appliquer au projet GERES au Burkina Faso (Marchal, 1979-86 ; Mietton, 1986).

4.2 METHODES BIOLOGIQUES DE CONSERVATION DES SOLS

4.2.1 Techniques culturales conservatoires

Ce terme général englobe une multitude de techniques, dont les façons culturales réduites, les façons minimales, le non labour, le semis direct, le travail du sol sous un paillis, le système cultural préservant partiellement les chaumes, la culture en bandes, le labour suivi du semis (pour plus de détail se référer à Mannering et Fenster, 1983). Dans les pays où les programmes de conservation du sol sont assez avancés, en particulier aux Etats-Unis et en Australie, le concept de façons culturales conservatoires occupe une place de premier plan dans les recommandations concernant les terres cultivables ; mais il s'étend aussi rapidement dans d'autres régions, par exemple dans le Sud du Brésil. Il s'applique principalement aux grandes cultures mécanisées, telle qu'elles se pratiquent dans les régions bien arrosées ou bien à la lutte contre l'érosion éolienne dans les zones de grande production céréalière mécanisée. Il s'applique moins à des types de production agricole à faible niveau d'intrant ou à l'agriculture de subsistance. Au Burkina Faso de nombreux projets (P.Agro-Ecologique, Projet Agro-Forestier, P.INERA-ORD, etc) ont développé divers volets de techniques culturales conservatoires avec des succès divers. (Buritz, Dudeck et al., 1986 ; Dugue, 1985 ; Ouoba et Rodriguez, 1989 ; Roose, 1987 ; Wright, 1985).

Les principes restent valables quelles que soient les conditions : il s'agit de maximiser le couvert du sol en lui restituant les résidus de culture, en s'abstenant de retourner la couche superficielle et en utilisant des cultures vigoureuses très denses (Roose, 1977). Les techniques culturales conservatoires présentent aussi l'avantage de réduire la nécessité de construire des terrasses ou autres structures permanentes. Elles ont cependant plusieurs inconvénients qui limitent leurs application en milieu semi-aride :

- L'installation d'un couvert végétal dense est parfois incompatible avec la stratégie très au point qui consiste à utiliser de faibles densités végétales lorsque l'eau disponible est insuffisante.
- Les résidus de cultures peuvent avoir une certaine valeur en tant que nourriture pour le bétail.
- Il n'est pas facile de planter à travers une surface paillée quand on utilise des engins attelés, encore que l'on puisse échapper à ce problème en employant des semoirs à main.

Des manipulations de la surface du sol, tel que le billonnage sont exposés dans le chapitre 5.

4.2.2 Travail du sol en profondeur

Si les rendements obtenus dans les zones semi-arides sont faibles, c'est en général, parce que les racines des végétaux ne disposent que d'une quantité limitée d'humidité. L'humidité disponible peut s'accroître si la profondeur racinaire augmente et il a été montré dans certains cas, que le labour profond peut y contribuer, par exemple sur les sols sableux et denses (luvisols) du Botswana (Willcocks, 1984) ou du Sénégal (Charreau, Nicou, 1977). En passant en revue un grand nombre d'études relatant des expériences concernant la profondeur des labours sur des alfisols, El Swaify a rapporté des résultats variables ; le labour profond profite à certaines cultures, mais pas à toutes et fonctionne sur certains sols mais pas sur tous. De même, le labour profond demande une puissance de traction supérieure qui normalement fait défaut dans les zones semi-arides. Sur des sols sableux profonds du Nord du Burkina Faso, Serpantie et Lamachere (1989) ont montré l'importance du labour profond et des sarclages/débuttages pour rompre la pellicule de battance, entretenir la rugosité de la surface du sol, réduire le ruissellement et l'érosion et finalement augmenter les rendements. Les travaux culturaux seraient responsables de 75 % des effets bénéfiques d'un aménagement complexe comportant un impluvium, des cordons de pierres en courbe de niveau tous les 20 mètres et des techniques culturales améliorées. Pour expliquer l'influence favorable de

cet aménagement il faut tenir compte des interactions très importantes entre la structure antiérosive (les cordons pierreux qui retardent et ralentissent le ruissellement), l'état homogène ou rugueux de la surface du sol (qui favorise l'infiltration ou la concentration du ruissellement en rigole) et la succession des averses.

Bahri, Pontanier et Dridi (1988) ont montré sur les terres limono-argileuses de la région de KAIROUAN (Tunisie) que le labour profond et dans une moindre mesure le travail superficiel du sol augmentent temporairement (pendant les 40 premiers millimètres) la capacité d'infiltration des sols mais réduisent sa résistance à l'érosion. Le travail du sol effectué dans de mauvaises conditions (trop poudreux ou sur pentes) peut augmenter les risques d'érosion éolienne et hydrique, si la culture ne vient rapidement relayer l'effet bénéfique de l'augmentation de la rugosité.

Nicou, Ouattara et Some (1987) ont étudié au Burkina Faso les effets sur les céréales des techniques culturales permettant l'économie de l'eau à la parcelle (grattage en sec, labour, labour + buttage + cloisonnement, billonnage direct) dans quatorze stations. Il en ressort qu'il n'y a pas de recette passe partout. Le labour semble la technique de préparation la plus souhaitable et le buttage cloisonné est une opération complémentaire très intéressante. Mais, l'utilisation de ces techniques va dépendre de la pluviosité, de la capacité de stockage en eau du sol et du contexte socio-économique pour assurer la rentabilité optimale du travail du paysan. En zone semi-aride, la gestion de l'eau constitue le point de départ de l'intensification, mais elle doit être rapidement secondée par la fertilisation (doses modestes) et l'association d'une grande variété d'espèces à cycle de longueur différente (pour assurer la sécurité).

Valet (1985) a montré qu'en année déficitaire au Siné Saloum (Sénégal) le fonctionnement hydro-pédologique d'un versant (combinaison des reports d'eau et du volume du réservoir sol) conditionne les potentialités agricoles des champs dans le paysage et explique leur croissance observée vers le bas des versants. Traditionnellement les paysans en tiennent compte, et dispersent leurs champs tout au long de la toposéquence pour limiter les risques.

Tableau 4.1 VARIATION DES RENDEMENTS SELON LA TOPOSEQUENCE

Position parcelle sur le versant	haute	moyenne	basse	basse
Culture	traditionnelle	traditionnelle	traditionnelle	améliorée
Profondeur du sol (cm)	40	90	230	230
Rendement en mil (90 jours) (kg/ha)	0	145	646	1000

Le scarifiage ou le sous-solage peuvent être bénéfiques, soit pour augmenter la porosité du sol, soit pour briser une couche indurée qui ralentit la perméabilité. La localisation d'engrais en profondeur peut aussi être utilisée pour favoriser un enracinement profond mais, là encore, c'est une technique qui trouve difficilement sa place dans l'agriculture de subsistance.

4.2.3 Systemes agraires conservatoires

Comme pour les façons culturales conservatoires, ce titre englobe un grand nombre de techniques agricoles différentes. Il comprend toutes les pratiques culturales qui ont pour but d'améliorer le rendement ou la fiabilité des cultures, de réduire les besoins de main-d'oeuvre, d'engrais ou de tout ce qui peut contribuer à améliorer l'aménagement des terres, que nous avons défini comme la base d'une bonne conservation des sols.

Parfois, il existe une tradition agricole et des pratiques de conservation des sols qui ont été expérimentées et mises au point sur des périodes suffisamment longues pour pouvoir y incorporer toutes les variations de climat. Ces pratiques traditionnelles devraient à long terme donner des résultats excellents, compte tenu du fait que les paysans peuvent attribuer davantage d'importance à la fiabilité des récoltes qu'au rendement maximum. Mais les régions semi-arides évoluent rapidement et les schémas traditionnels peuvent en un court laps de temps ne plus être viables. Comme le remarque Jones (1986) : "tandis que la tradition assimile la sagesse séculaire d'expériences pratiques, elle peut aussi se révéler dépassée là où de récentes pressions démographiques ont déjà provoqué des changements. Dans ce cas, on assiste à l'abandon de la jachère arborescente ou à la migration vers des types de sols différents ou vers des zones plus clémentes. Il faut aussi prendre en considération le point suivant ; il est encore courant que l'agronome rate une démonstration d'une "recette infaillible". Or on ne peut pas demander à des agriculteurs d'adopter de nouvelles pratiques dont les probabilités de succès ne dépassent pas 50 %". Les nouvelles techniques proposées devraient avoir les mêmes caractéristiques fondamentales que les techniques traditionnelles ; elles devraient être simples, faciles à mettre en place, ne demander que de faibles apports de main-d'oeuvre ou d'argent comptant et avoir un taux élevé de succès, c'est-à-dire un taux de rentabilité élevé.

Parmi ces techniques, citons :

- **La culture orientée obliquement sur la pente** est une technique utilisée en Inde (Swaminathan, 1982). Les cultures et le semis sont orientés selon une pente douce, parfois aménagée entre des banquettes de diversion. Cela favorise l'infiltration et permet au surplus d'eau de s'écouler à faible vitesse. Parfois, cette technique est combinée avec des pratiques simples visant à faciliter l'infiltration comme l'enfouissement des déchets de culture. C'est rarement une solution définitive, car il reste à résoudre le problème de la gestion des eaux de surface : quand le ruissellement se produit, il faut pouvoir l'évacuer sans danger dans des exutoires aménagés.
- **La culture en bandes en courbe de niveau** est particulièrement efficace sur les pentes douces, lorsqu'elle permet de ramener l'érosion à des niveaux acceptables, sans avoir recours à des talus ou à des drains.
- **La rotation** des cultures est aussi une pratique simple très répandue. Elle a pour but d'améliorer la fertilité grâce à la présence de légumineuses ou bien de faciliter la lutte contre les ravageurs ou les maladies. Dans les zones semi-arides de l'Australie, une pratique très au point, consiste à alterner la culture de céréales avec une légumineuse fourragère annuelle qui se resème d'elle-même comme le trèfle méditerranéen ou medicago. Doolette (1977), fait état d'essais réalisés en vue d'adapter ce système en Tunisie. Arabi et Roose (1989) le testent actuellement en Algérie.
- **La jachère** est bien connue et donne parfois de bons résultats, mais pas dans tous les cas. Sur les terres sèches à blé en Australie, le sol est laissé en jachère nue pendant l'été pour favoriser l'accumulation d'humidité dans le sol avant de semer le blé d'hiver qui ne reçoit que rarement des précipitations suffisantes. Cette pratique est particulièrement utile sur les sols argileux sujets à fissuration profonde. Il y a danger d'érosion pendant l'été, lorsque de violentes averses s'abattent sur les sols dénudés (Walker, 1982). En Afrique de l'Est, l'emploi de cette méthode sur des terres en pente comporte un fort risque d'érosion (Pereira *et al.* 1958). Par contre, sur les pentes douces du Botswana, de bons résultats ont été signalés par Whiteman (1975). Cette pratique n'apporte pas une réussite universelle, en partie parce que les agriculteurs de subsistance ne réussissent pas à enlever toutes les mauvaises herbes de leur jachère et qu'en présence d'un régime pluviométrique unimodal, la production de grain peut varier du simple au double. En Syrie, l'ICARDA a étudié les effets de la jachère nue sur la conservation de l'humidité dans le cadre d'un assolement orge/jachère, sur six stations, recevant entre 260 et 350 mm de précipitations annuelles. En dessous de 260 mm, la quantité d'humidité emmagasinée n'a pas augmenté ; la mise en jachère n'a pas donné beaucoup de résultats jusqu'à 300 mm, mais il y avait une

possibilité d'augmenter la conservation de l'humidité lorsque la jachère était bien gérée. Cela demande une préparation profonde et complète de la jachère, de bonnes mesures de lutte contre les mauvaises herbes et contre les ravageurs, un teneur en azote permettant de tirer parti du surcroît d'humidité, enfin une bonne préparation du lit de semence (ICARDA, 1982). Selon Jones (1985), la meilleure mise en jachère consisterait en un système d'aménagement de la terre dans lequel se succèderaient des cultures à cycle court et à cycle long, et la mise en place de jachères dénudées permettant d'optimiser l'utilisation de l'eau. A partir du moment où un profil est humecté, une culture donnera un rendement minimal, même lors d'une année plus sèche. Boersma et Jackson (1977), décrivent l'utilisation déjà ancienne et qui s'est avérée concluante des jachères d'été dans les régions semi-arides de l'Amérique du Nord et font observer qu'une épaisseur de sol d'un mètre, et même 1,5 mètre, est nécessaire. D'autre part, des essais effectués par Rawitz *et al.* (1983) ont montré que le système traditionnel de labour profond et d'autres techniques culturales effectuées en automne ont provoqué une accélération de l'érosion et entraîné une perte des précipitations hivernales supérieure à 60 %. Les méthodes employant des bassins d'infiltration (étudiées dans la section 5.2.2) se sont révélées plus efficaces. En analysant les résultats d'essais de jachère entrepris en Afrique du Nord francophone, Manichon (1983) arrive à la conclusion que les conditions requises pour réussir une jachère nue sont rarement réunies sur le terrain. En définitive la jachère nue, est une technique utilisable, mais dangereuse, qui doit être testée dans des conditions locales.

- **Culture mixte et culture intercalaire** sont des techniques traditionnelles très largement appliquées. Une combinaison de cultures qui ont des périodes de semis différentes et des périodes de croissance plus ou moins longues, permet d'étaler les besoins de main-d'oeuvre liés à la plantation et à la récolte, et permet aussi de modifier le plan de culture à la demi-saison en fonction des précipitations en début de saison (Swaminathan, 1982). Ce système permet en outre d'utiliser des légumineuses pour améliorer le taux d'azote de la culture céréalière. L'ICRISAT (1986) a entrepris d'étudier, dans le cadre du programme sur les systèmes agraires, diverses variantes sur le thème des cultures mixtes, des cultures intercalaires et des cultures relais.
- **Le paillage de la surface du sol** a l'avantage de constituer un couvert protecteur à un moment où la culture ne peut pas encore couvrir le sol. Il facilite l'infiltration et peut aussi contribuer à réduire la température du sol. Parmi ses éventuels inconvénients, citons :
 - . Le volume nécessaire de résidus de culture risque d'être plus important que celui que fournit un faible taux de production ;
 - . Les problèmes phytosanitaires, ou de faim d'azote ;
 - . Le manque d'outils permettant de semer ou de planter à travers le paillage ;
 - . Les paillages organiques sont connus pour s'oxyder rapidement par fortes températures.

Stuart *et al.* (1985) ont décrit une bonne utilisation du paillage dans le Sud-Ouest semi-aride des Etats-Unis. Des essais ont été faits avec différents matériaux et quantités en Inde (Yadav, 1974), et dans la savane sèche au Nord du Ghana (Bonsu, 1985).

Au Yatenga (province N.O du Burkina Faso) les petits paysans Mossi qui ne disposent pas de bétail (ni de fumier) "fument" leur lopin de terre en y répandant les pailles résiduelles des céréales (très peu) et des branchages de légumineuses arbustives non apâtées par le bétail. Ce léger paillage (<4t/ha) joue au moins trois rôles :

- apporter un minimum d'éléments nutritifs et de matières organiques
- protéger le sol, à peine gratté, contre l'agressivité des premiers orages
- et surtout favoriser l'infiltration des pluies en attirant en surface les termites qui percent la croûte de battance (Roose et Plot, 1984).

Collinet (1988) a montré que le paillage est moins efficace sur les sols dont la structure se dégrade par simple humectation.

La date des opérations agricoles est toujours importante, surtout lorsque les précipitations sont erratiques : les rendements peuvent être radicalement différents si le semis et le travail du sol ont été effectués au bon moment. Il arrive souvent, que l'on doive attendre l'arrivée des précipitations qui ameublissent le sol, lequel est trop dur pour être labouré en sec, et parfois même, qu'on ne puisse plus semer parce que le sol est trop engorgé. Il arrive qu'une famille ne possédant qu'un boeuf doive attendre pour en emprunter un deuxième - ou bien qu'elle n'utilise une charrue tirée par un seul animal comme le montre la photo 4.4. Il se peut également que l'on soit obligé d'attendre un bon mois après le début des pluies que les boeufs soient à nouveau en état de travailler après une saison sèche éprouvante. Le programme de recherche sur les systèmes agronomiques a pour but d'étudier l'ensemble des opérations d'une exploitation agricole, pour identifier les contraintes ou les goulots d'étranglement, avant de commencer des actions de recherche sur certaines parties du système.

Photo 4.4 : système d'attelage et harnais pour un seul boeuf mis au point par le CIPEA



D'autres techniques devraient être mentionnées mais elles dépassent le cadre de cet ouvrage. Le lecteur intéressé pourra se référer aux ouvrages cités.

- Le semis en profondeur de variétés qui peuvent germer à partir de 15 cm de profondeur, retardant ainsi la germination jusqu'aux premières pluies (Nouveau-Mexique, Billy, 1981) ; ou bien encore, le mouillage des semences avant plantation lorsqu'il est nécessaire d'accélérer la germination.
- Des semis en sec dès que l'on peut prévoir l'arrivée des pluies (Inde, Virmani, 1979).
- Des outillages attelés améliorés (Ethiopie, CIPEA, 1985 ; Kenya, Muchiri et Gichuki, 1983).
- Nouveaux outillages à traction mécanique (Australie, Charman, 1985).
- Différents systèmes de techniques culturales (Etats-Unis, Wittmuss et Yazar, 1981 ; synthèse mondiale, Unger, 1984).

4.2.4 Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la plante

La sélection et les essais de nouvelles variétés et la sélection et la reproduction de cultivars adaptés aux régions semi-arides sont des techniques relativement nouvelles mais prometteuses (Oertli, 1983 ; Dugue, 1989). Cependant Jones (1985) assure que cette solution ne sera ni simple, ni facile à mettre en oeuvre, car il est nécessaire que ces nouvelles variétés survivent aux périodes de sécheresse et qu'elles reprennent leur croissance juste après la fin de la période sèche. Cette aptitude est régie par tout un ensemble de caractères que l'on connaît assez mal.

D'autres caractéristiques sont à rechercher ; une courte période de croissance des plantes, leur résistance à la sécheresse et l'adaptation de leur développement en fonction de l'humidité disponible ; par exemple la plante peut développer des talles quand elle trouve de l'eau ou entrer en dormance quand celle-ci se fait rare, ou encore ne porter à maturité qu'une certaine proportion des semences qu'elle porte.

L'incertitude de la production végétale est une entrave à l'utilisation rationnelle des engrais organiques et minéraux. Il est cependant possible de tirer un profit économique d'un faible investissement, par exemple "la majorité des sols semi-arides ont une faible capacité de sorption du phosphate, autrement dit, il suffit d'apporter de petites doses de cet engrais pour avoir de bons résultats agricoles dont l'effet résiduel subsistera pendant plusieurs années. De la même façon, une augmentation soutenue de la productivité ne sera envisageable dans ces régions que lorsqu'une amélioration de la capacité en phosphate sera mis en place" (Jones, 1985). Il est évident que la présence de potassium peut améliorer l'utilisation de l'eau grâce à son effet sur la pression de turgescence ou sur le mécanisme de régulation des stomates (Lindhauer, 1983). Pieri (1984) a montré qu'une dose raisonnable d'engrais équilibrés valorise l'eau disponible et permet un bon démarrage des cultures à condition d'intégrer la fertilisation aux autres techniques d'intensification et de maintenir le statut organique du sol à un niveau suffisant.

Une irrigation d'appoint peut jouer un rôle important car des apports de petites quantités d'eau à des moments critiques peuvent donner de bons résultats, par exemple pour permettre un semis plus précoce, une irrigation d'urgence afin de sauver des cultures en périodes sèches, ou pour augmenter la disponibilité de nutriments solubles pour les végétaux.

4.3 STRUCTURES CONSERVATOIRES MECANIQUES

4.3.1 Principes

Il n'existe pas de pratique de conservation des sols, qui soit applicable partout. La planification de la conservation des sols consiste à disposer sur le terrain d'une multitude de techniques et de pratiques, comme une gamme de couleurs sur une palette. L'art de la conservation des sols consiste à choisir un ensemble de techniques différentes, chacune bien adaptée aux conditions locales, et de les associer pour créer un système fonctionnel.

En analysant le vaste arsenal des structures mécaniques, la première chose à faire pour procéder à un choix, est de **définir l'objectif**. On peut voir au tableau 4.2, la façon dont les différents types de terrasses permettent d'atteindre différents types d'objectifs.

Les principaux objectifs peuvent être :

- de modifier la pente du sol (types 1, 2 et 3) ;
- de gérer le ruissellement superficiel (types 4 à 7) ;
- de permettre l'utilisation agricole sur les fortes pentes (type 8).

Dans les régions à forte pluviosité, le but généralement recherché est d'acheminer en toute sécurité l'inévitable ruissellement superficiel hors des terres cultivées, en utilisant des drains et des fossés. Dans les régions semi-arides,

Tableau 4.2

TERRASSES DIFFERENTES POUR DES OBJECTIFS DIFFERENTS

Objectif	Type de terrasse
Aménagement du sol	<ol style="list-style-type: none"> 1. terrasses horizontales pour l'irrigation (photo 4.5) 2. terrasses en gradins contruites en une seule opération (figure 4.1 et photos 4.6 et 4.7) 3. réduction progressive de la pente grâce à un système de terrasses (Fanya juu) figure 4.2 et photos 4.8 et 4.9
Aménagement de l'eau	<ol style="list-style-type: none"> 4. absorber la totalité des pluies (murundum, photo 4.10) 5. absorber une partie des pluies avec un exutoire de secours (diguette selon la courbe de niveau) figure 4.3 et photo 4.11 6. ruissellement contrôlé/banquettes de diversion, photo 4.12 7. ruissellement atténué et contrôlé <ul style="list-style-type: none"> - billonnage, photo 4.13 - billonnage cloisonné, photo 4.14
Aménagement de la culture	<ol style="list-style-type: none"> 8. terrasses horizontales intermittentes, figure 4.4 <ul style="list-style-type: none"> - terrasse pour verger, photo 4.15 - plate-formes - drains sur les versants, photo 4.16

l'objectif consiste plutôt à ralentir le ruissellement pour éviter les affouillements et pour favoriser l'infiltration ou le dépôt de limon, mais sans détourner l'écoulement. Cette opération nécessite des ouvrages simples et peu coûteux, tout à fait différents du système classique constitué de drains et de banquettes de diversion et de seuils d'évacuation : ce sont des procédés de haute technologie, dont les ouvrages très étudiés et les méthodes de conception ont été décrites par Hudson (1981). C'est une approche qui ne convient pas pour les régions semi-arides, où on ne trouve pas toujours le personnel qualifié nécessaire. Il faut alors recourir à des techniques plus simples, qui peuvent être mises en oeuvre par des vulgarisateurs villageois ou par les agriculteurs eux-mêmes (Wright, 1985 ; Roose, 1986 ; Serpantie et Lamachère, 1989).

Dans les pays développés, l'un des problèmes essentiel de la conservation des sols est celui de savoir si le résultat justifie la dépense. Dans les zones semi-arides, le problème est plus compliqué car les solutions de remplacement ne sont pas très nombreuses. D'un point de vue scientifique et dénué de passion, on peut dire qu'il vaut mieux laisser à l'abandon des terres dégradées plutôt que de tenter de les restaurer au prix de coûteux travaux de restauration des sols. Mais si l'on ne dispose pas de meilleures terres pour produire les aliments dont on a besoin, alors la seule solution possible qui est d'investir beaucoup de main d'oeuvre pour construire des terrasses, peut être envisageable..

Il existe plusieurs méthodes éprouvées pour construire des structures linéaires, soit suivant les courbes de niveau, soit selon un gradient pré-établi. Le système de l'équerre A a été largement utilisé en Afrique et en Amérique du Sud avec de bons résultats, de même que le niveau à eau. Au Kenya, on préfère utiliser les niveaux à visée. Collett et Boyd (1977) ont procédé à une étude comparée de ces divers instruments simples de nivellement. S'il faut aménager de vastes étendues de terre en pente douce,



Photo 4.5 : terrasses d'irrigation selon les courbes de niveau au Bhutan

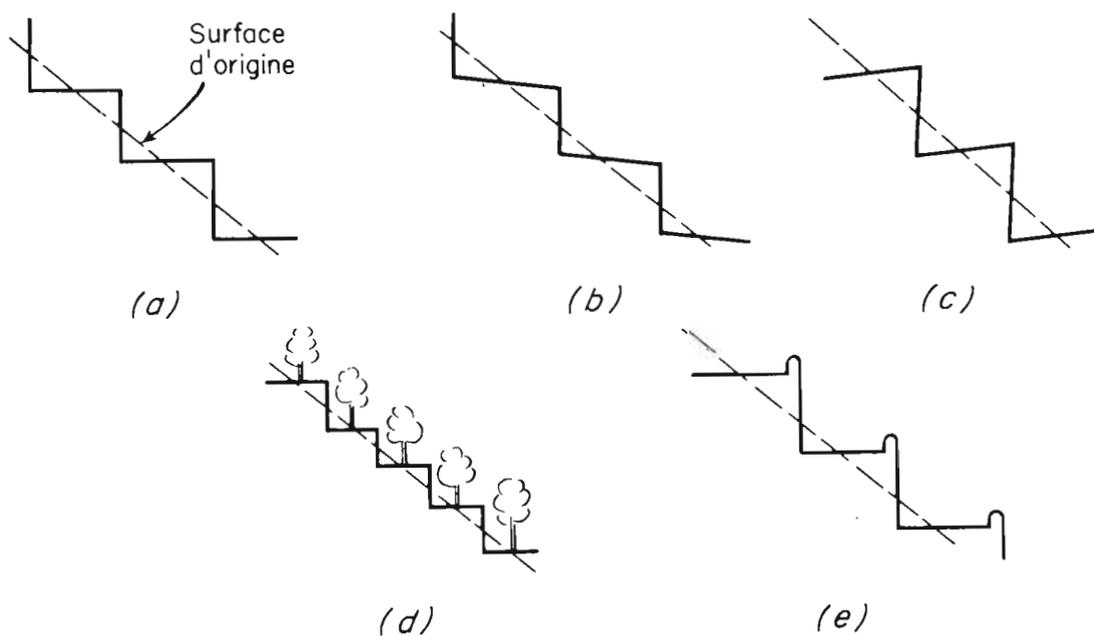


Figure 4.1 : différents types de terrasses en gradin en courbe de niveau
(a) terrasses planes (photo 4.6)
(b) terrasses à déclivité externe
(c) banquettes à déclivité interne (ou à profil renversé)
(d) terrasses en escalier (photo 4.7)
(e) terrasses pour l'irrigation (photo 4.5)



Photo 4.6 : terrasses en gradin dans la République Islamique du Yemen (H.Vogel)



Photo 4.7 : terrasses en escalier

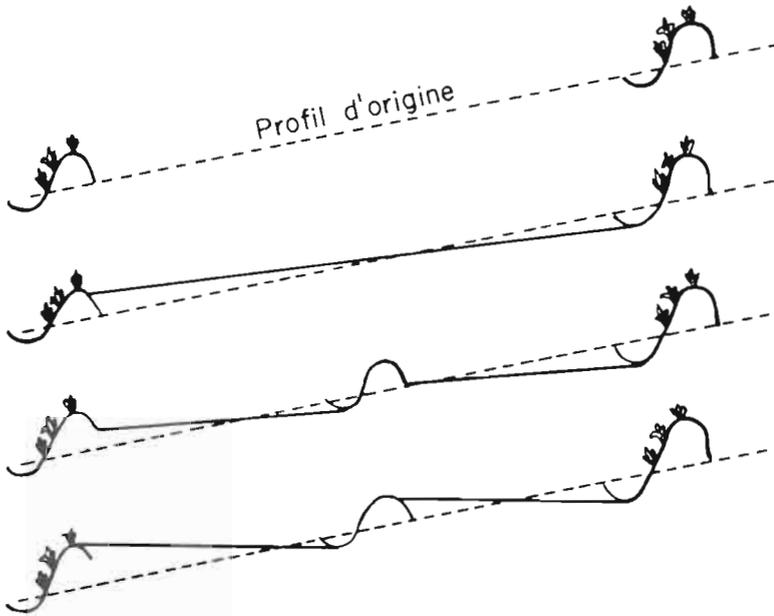


Figure 4.2 : phases successives de la construction de terrasses progressives suivant les courbes de niveau au moyen du système Fanya juu

1. terrasses construites à intervalle vertical de 2 mètres en rejetant le sol pris en amont pour former un talus que l'on plante en graminées fourragères
2. le travail du sol et l'érosion entraînent le sol vers le bas et la formation d'une terrasse plus bas
3. les banquettes principales sont plus élevées ; des terrasses intermédiaires sont ajoutées ensuite. Le nivellement se poursuit
4. le profil définitif est constitué de terrasses à peu près horizontales séparées par des bourrelets abondamment revêtus de végétation



Photo 4.8 : végétation plantée sur une terrasse Fanya juu (D.J. Thomas)



Photo 4.9 : terrasses Fanya juu au Kenya (D.J. Thomas)



Photo 4.10 : terrasse murundum au Brésil destinée à retenir la totalité du ruissellement superficiel, même lors d'orages violents (T.F. Shaxson)



Photo 4.11 : diguettes construites selon les courbes de niveau pour retenir à la fois le sol et l'eau

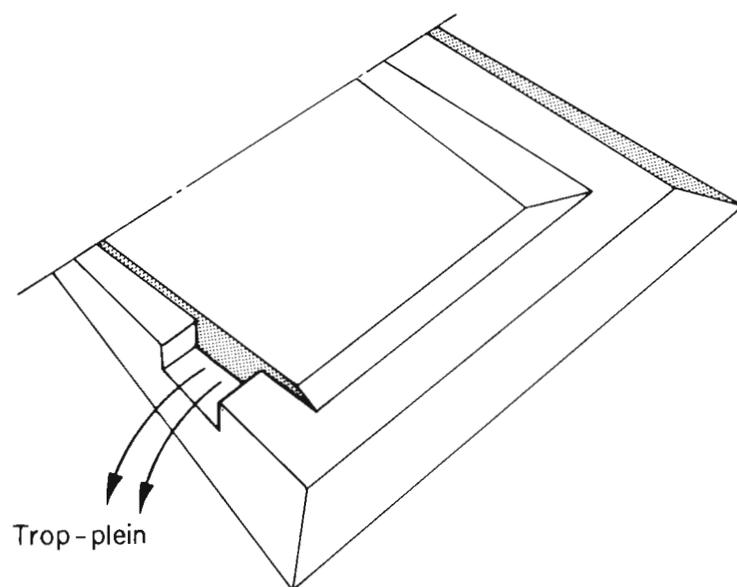


Figure 4.3 : croquis d'une diguette construite suivant la courbe de niveau pour retenir à la fois le sol et l'eau (photo 4.11)



Photo 4.12 : banquettes de déviation



Photo 4.13 : billonnage



Photo 4.14 : billonnage cloisonné en Tanzanie (Ministry of Agriculture, Forestry and Wildlife, Tanzanie)

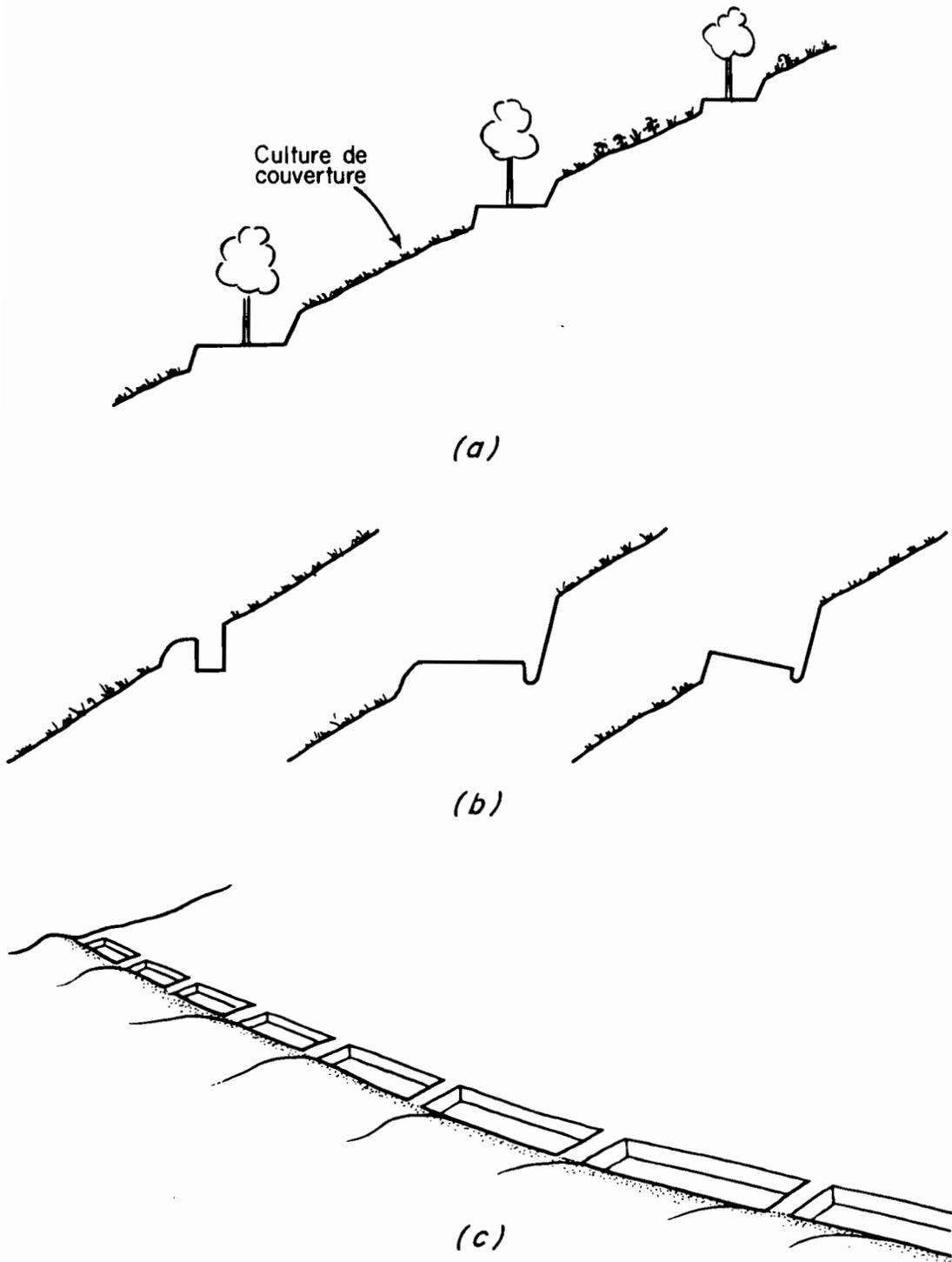


Figure 4.4 : terrasses intermittentes
(a) terrasses de verger (photo 4.15)
(b) fossés à flanc de colline
(c) drain à cloison et déversement (photo 4.16)

Photo 4.15 : exemple de terrasses de verger plantées en hévéa dans le sud de la Thaïlande



Photo 4.16 : fossé à flanc de colline avec drain à cloisons et déversoir (USDA)

on peut employer, comme cela a été fait avec succès dans le territoire septentrional de l'Australie (Fitzgerald, 1977) un simple pendule monté sur un tracteur. Mais quelle que soit la méthode utilisée pour tracer les lignes, il est bon de tracer une marque permanente à l'aide d'un tracteur ou d'un attelage. Les repères temporaires s'effacent facilement ou se déplacent si on laisse passer un certain temps entre la définition des courbes et la construction de structures. De même, si l'on doit façonner à la main des canaux ou des diguettes en terre, on peut réduire les besoins de main-d'oeuvre en sous-solant le sol ou en le labourant avec un tracteur ou un attelage.

Tout système de structure linéaire, banquettes ou bourrelets construits selon la courbe de niveau a pour effet secondaire d'encourager la culture suivant les courbes de niveaux. Cette pratique peut à elle seule, réduire le ruissellement et les pertes en terre dans une proportion qui peut atteindre 50 % dans certains cas, sur pentes faibles.

4.3.2 Construction de terrasses

Tous les types de terrasses répertoriés dans le tableau 4.1 ne sont guère susceptibles d'une large utilisation dans les zones semi-arides. Les terrasses horizontales méditerranéennes peuvent être indiquées quand on dispose d'eau pour l'irrigation (type 1) ; de même les terrasses horizontales intermittentes (type 8) peuvent être utilisées pour la culture irriguée par les eaux de ruissellement, d'impluvium dont il sera question dans la section 5.2.3. Les terrasses progressives (type 3, par exemple Fanya juu) offrent la possibilité d'obtenir en quelques années des terrasses de niveau avec un apport limité de main-d'oeuvre (figure 4.2). Les diguettes suivant les courbes de niveau peuvent être utiles car elles permettent de conserver à la fois le sol et l'eau (figure 4.3 et photo 4.11).

Il peut aussi y avoir des cas dans lesquels on se trouve en présence de sols peu profonds et dotés d'une faible capacité d'emmagasinement de l'eau qui combinés avec des averses intenses, produisent un ruissellement fréquent. Ce genre de situation requiert un système de banquettes de diversion, sans système de stockage (type 6) ou avec un certain stockage et un écoulement organisé au delà d'un certain seuil. Malheureusement un tel système a de fortes chances de se révéler coûteux par rapport à la productivité de la terre ; par ailleurs il est difficile d'entretenir des chemins d'eau enherbés pour l'évacuation de l'eau quand les précipitations sont faibles et peu fiables.

Les terrasses de niveau utilisées pour la culture en sec (type 2) ont été amplement utilisées dans le passé, par exemple en Ethiopie (photo 4.17), dans la République Islamique du Yémen et dans les pays du Magreb (Algérie, Maroc et Tunisie). La plupart ont été construites dans les temps anciens et sont maintenant de plus en plus négligées ou abandonnées, car l'entretien n'est plus rentable ou possible de par le manque de main-d'oeuvre. Les montagnes de Haraz dans la République Islamique du Yémen (district de Manakhah) en sont un exemple (photo 4.18). Jusqu'à une date récente, Haraz a été l'une des régions de haute montagne la plus peuplée du globe ; la quasi totalité des pentes étaient aménagées en terrasses ou utilisées pour collecter les eaux de pluie. Depuis la fin des années 1970, de vastes portions de cet écosystème artificiel ont été abandonnées. On estime que, dans ce district, 800 000 hommes, sur une population comprise entre 5 et 7 millions, ont quitté la République Islamique du Yémen pour aller chercher du travail dans les Etats pétroliers voisins. Plusieurs exemples semblables sont signalés dans certaines régions d'Afrique du Nord, où les migrants traversent la Méditerranée pour rejoindre l'Europe.

4.3.3 Evacuation des eaux

Nous avons vu qu'en régime semi-aride, il est rarement indiqué de détourner le ruissellement superficiel des terres arables ; la même remarque s'applique aux drains d'interception ou de dérivation installés à la lisière supérieure des terres arables pour les protéger du ruissellement superficiel provenant de terres incultes situées plus haut. Il peut y avoir des cas particuliers ; par exemple un sol saturé peu profond sera moins endommagé si l'eau qui dévale des collines peut être détournée. L'ennui c'est que le drain risque aussi de détourner un ruissellement résultant d'orages moins forts et qui aurait pu être utilement absorbé par la terre cultivée.



Photo 4.17 : terrasses anciennes à Konso, Ethiopie (H. Hurni)



Photo 4.18 : à Manahkak (République Islamique du Yemen) les anciennes terrasses ne sont plus aujourd'hui entretenues de façon adéquate (H. Vogel)

L'emploi d'ouvrages de dérivation sera donc limité au cas où un ruissellement non maîtrisé s'écoulant dans un canal ou une ravine serait perdu à moins d'être détourné à quelque fin utile. Cette question sera examinée dans le chapitre 5, à propos de l'aménagement du ruissellement à des fins agricoles. S'il existe un risque qu'un ouvrage destiné à recueillir le ruissellement déborde à l'occasion d'orages intenses, il est important de prévoir systématiquement des déversoirs qui fonctionneront comme des vannes de sécurité et évacueront le ruissellement là où il provoquera le moins de dommages.

4.3.4 Quelques mesures peu coûteuses

On a vu, à propos des terrassements et des travaux classiques de conservation des sols, qu'il est nettement préférable de recourir à des mesures simples et aisément applicables. La première de ces mesures doit être de toujours **travailler le sol suivant la courbe de niveau** sur pentes faibles. Cette mesure peut à elle seule réduire de près de moitié la perte de sol par rapport à ce qu'elle serait si l'on cultivait dans le sens de la pente. Nous avons déjà aussi vu que, même si, dans les zones semi-arides, les précipitations totales sont moins abondantes, elles peuvent quand même inclure des orages dévastateurs ; il est donc généralement profitable de prévoir quelques structures aptes à ralentir le ruissellement superficiel, à favoriser le dépôt des matériaux en suspension et à limiter la concentration du ruissellement superficiel dans les petites dépressions du terrain.

Les ouvrages installés suivant les courbes de niveau sont plus simples et plus économiques que les banquettes de diversion en pente douce, et ce pour trois raisons. Premièrement, il n'est pas nécessaire de leur donner un gradient précis. Ils doivent se trouver plus ou moins sur une courbe de niveau, mais les petites erreurs ne sont pas aussi graves que dans le cas d'une banquette de diversion (Roose, 1986). Deuxièmement, si l'eau doit être acheminée hors du terrain, il faut calculer l'écartement entre les terrasses car chaque banquette doit acheminer l'eau recueillie sur une superficie donnée. Par contre, pour les ouvrages installés suivant une courbe de niveau qui ne sont pas destinés à évacuer le ruissellement, on peut se passer de calculs théoriques. S'ils ont pour but de stocker le ruissellement total, ils doivent alors être conçus pour cet usage, comme le sont les terrasses fanya juu au Kenya (Thomas et al., 1980) ou les murundums au Brésil, dont il a été question dans la section 4.3.2. Si les ouvrages sont perméables ou peuvent sans risque déborder en cas d'orages violents, la distance qui les sépare n'entre pas en ligne de compte. Troisièmement, comme le but n'est pas d'acheminer l'eau le long de l'ouvrage en question, le problème de l'écoulement dans des drains ou des voies d'évacuation de l'eau ne se pose pas. Il faut éviter, cependant qu'une des banquettes aménagées suivant les courbes de niveau ne déborde, ce qui amènerait toutes les banquettes situées plus bas à céder l'une après l'autre, et ouvrirait la voie au ravinement. La photo 4.19 montre un incident de ce genre en Tanzanie.

L'expression généralement utilisée pour désigner les ouvrages simples installés suivant la courbe de niveau est "**ligne de défense contre le ruissellement**" ou "**microbarrage perméable**", qui définit clairement leur objet (Roose, 1986). La forme de ces lignes de défense dépend du type de matériaux disponibles. Sur un terrain pierreux, on utilisera les pierres pour façonner des cordons qui auront la double utilité de nettoyer le champ et de constituer des lignes de ralentissement du ruissellement. Si l'on dispose pas de pierres, on peut former des lignes de défense en empilant les résidus des cultures, parfois avec quelques pelletées de sol auxquelles on ajoutera peu à peu les mauvaises herbes sarclées à la houe. La photo 4.20 montre un exemple observé en Ethiopie. Aucun calcul n'est nécessaire ; le seul principe est qu'il n'est pas indiqué de construire des ouvrages importants ou élevés, surtout si l'on emploie des pierres, car il seront très perméables et que d'une manière générale un grand nombre de petits obstacles fonctionneront mieux qu'un petit nombre de grands ouvrages.

On peut aussi utiliser des **bandes enherbées** pour freiner le ruissellement. En Afrique de l'Ouest des bandes d'arrêt de un à quatre mètres de large ont réduit l'érosion au 1/3 et au 1/10 selon leur largeur et la pente du terrain (7 à 4 %). Elles sont d'autant plus efficaces qu'elles sont couvertes d'herbes et de légumineuses variées à tiges fines ou rampantes (Roose et Bertrand, 1971). Le Swaziland, par ailleurs, a



Photo 4.19 :
exemple de dégâts causés
par l'échec d'un système
de terrasses. Déversement
d'une banquette située au
sommet entraînant progres-
sivement l'échec de toutes
les autres (Aerofilms Ltd)



Photo 4.20 : simple microbarrage perméable (ligne freinant le ruissellement) constitué de pailles, de pierres et de terre à Konzo, Ethiopie (H. Hurni)

lancé un programme national de conservation fondé sur ce principe. Dans les années 1940 le roi a publié un édit royal, ordonnant que soient réservées sur toutes les terres labourées, des bandes de 2 mètres de large et à intervalle vertical de 2 mètres, couvertes de graminées indigènes. Cette règle a été rigoureusement appliquée et presque toutes les terres arables présentent aujourd'hui ces bandes enherbées que l'on voit sur la photo 4.21. Par manque d'instructeurs sur le terrain, beaucoup de ces bandes ne sont pas d'aplomb ; d'autres se trouvent sur des terres trop abruptes pour que l'érosion puisse être stoppée par cette méthode, comme le montre la photo 4.22, mais l'érosion au Swaziland serait bien plus grave si ces bandes n'existaient pas. Au Kenya, on plante parfois, dans le même but, des haies vives souvent constituées de sisal, d'euphorbe ou autres espèces résistantes à la sécherresse (photos 4.23 et 4.24). Dans les régions mieux arrosées, on peut planter une prairie dense qui sera fauchée pour obtenir du fourrage et formera progressivement une terrasse (photo 4.25).

- Une graminée à haut rendement telle que l'herbe à éléphant (**Pennisetum purpureum**) ou un hybride connu sous le nom de BANA GRASS convient pour les zones suffisamment arrosées (Thomas, 1988).
- Au cas où le bétail peut circuler partout dans la zone cultivée, il peut être nécessaire d'utiliser une herbe non appréciée par le bétail, par exemple le Vétiver (**Vetivaria zizanioides**) qui a fait ses preuves en Inde, et à Fidji (Greenfield 1989).

L'inconvénient de ces herbes vigoureuses est la concurrence que développent leurs racines vis-à-vis des cultures voisines. Il faut donc prévoir leur fertilisation si on les exploite comme fourrage et le maintien de leurs racines dans la zone qui leur est réservée (minimum 60 à 100 cm).

Quand ces micro-barrages perméables sont destinés à détourner l'eau dans de petits fossés, il est souhaitable de réduire la perméabilité en ce point. Pour cela, on utilise le principe du "filtre renversé". L'ouvrage principal se compose de grosses pierres ; puis, du côté amont, on accumule des pierres plus petites mais suffisamment grosses quand même pour qu'elles ne puissent pas passer à travers les interstices laissés entre les grosses pierres. En amont des petites pierres, on pose une couche de graviers. L'eau continuera de s'écouler au travers de l'ouvrage, mais lentement ; elle s'accumulera dans le fossé et s'écoulera de part et d'autre jusqu'à ce qu'elle se fraie son chemin à travers l'obstacle rocheux et continue de descendre le long de la pente. Ce principe peut être aussi utilisé sur une plus grande échelle pour lutter contre le ravinement.

Certaines applications des alignements de pierres ont parfois comme objectif principal la collecte de l'eau plutôt que la conservation des sols. Le ruissellement provenant des terres non cultivées situées en haut de la pente se déverse sur les terres cultivées et s'étale grâce à un alignement de pierres perméable, se conjugant au ruissellement qui naît sur la terre cultivée elle-même. Si tel est le but recherché, on n'installera pas de drain de dérivation à la lisière supérieure de la terre cultivée et la ligne de pierres sera dépourvue de "filtre renversé". Les applications de cette méthode sont nombreuses dans la province du Yatenga au Burkina Faso. Leur efficacité sur le ruissellement et l'érosion dépend en grande partie des interactions entre les alignements/cordons de pierres, la rugosité de la surface du sol et de son évolution au cours des averses (Bedu, 1986 ; Serpantie et Lamachère, 1989).

Si le but recherché est de piéger et retenir les sédiments en amont du bourrelet de pierre et de réduire la pente en créant des terrasses, il est souhaitable d'obtenir l'effet de filtre sur toute la longueur de la diguette. Il faut alors disposer de pierres de différentes tailles.

Cela démontre à quel point il importe d'avoir dès le départ une idée bien claire des objectifs que l'on vise. Même un dispositif aussi simple que le cordon de pierres peut être construit de façon à ce qu'il demeure perméable ou bien qu'il se colmate aussi rapidement que possible, ou encore qu'il se colmate uniquement dans les dépressions - en fonction de l'objectif choisi.



Photo 4.21 : depuis une quarantaine d'années, les bandes enherbées ont été mises en place sur la plupart des terres arables du Swaziland



Photo 4.22 : les bandes enherbées atténuent l'érosion, mais ne la supprime pas entièrement sur des terres très pentues (Swaziland)



Photo 4.23 : au Kenya des haies vives constituées d'espèces résistant à la sécheresse comme le sisal et l'euphorbe, sont utilisées pour empêcher le bétail d'errer



Photo 4.24 :
plantation récente d'*Euphorbia balsanifera* et d'*Andropogon gáianus* destinée à ralentir le ruissellement dans le sud du Mali (G. Hallam)



Photo 4.25 :
les bandes enherbées sont coupées pour
nourrir le bétail à l'étable et pour
favoriser la formation de terrasses (à
gauche) à Nakuru, Kenya (C. Matzon) et
(au-dessus) dans le nord-est du Brésil
(H. Lal)



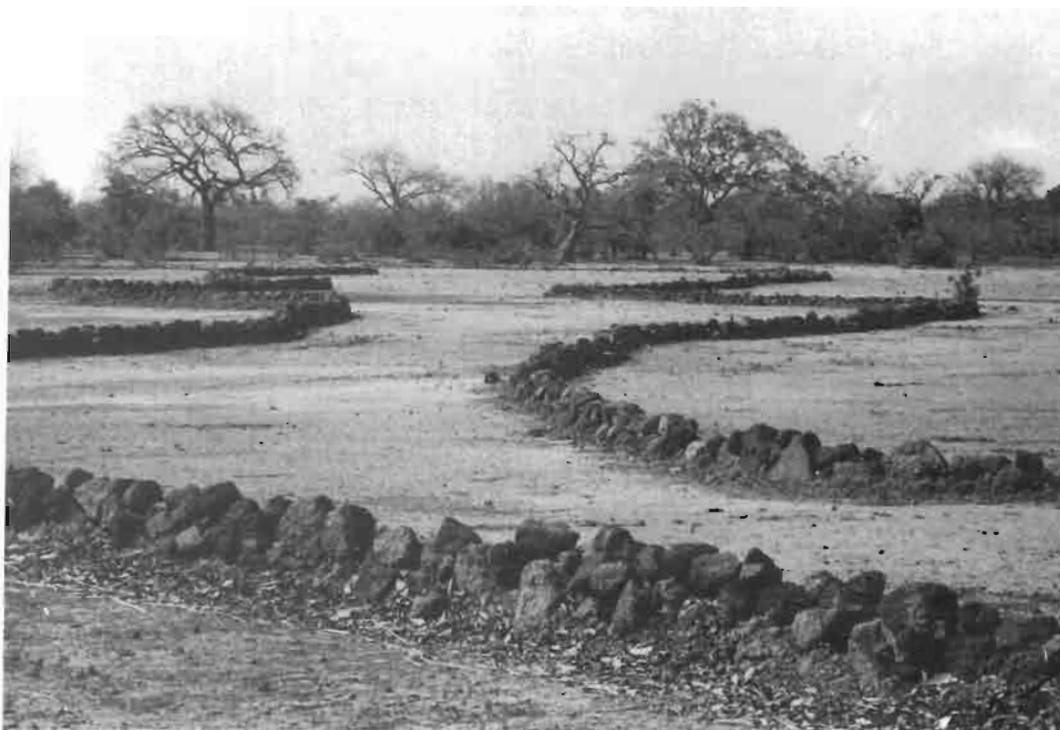


Photo 4.26 : cordons de pierres disposés suivant la courbe de niveau près de Ouahigoua, Burkina Faso, OXFAM



Photo 4.27 :
Grâce à l'humidité accrue et aux sédiments déposés, l'herbe pousse mieux au voisinage du cordon de pierres, Mali (G. Hallam)

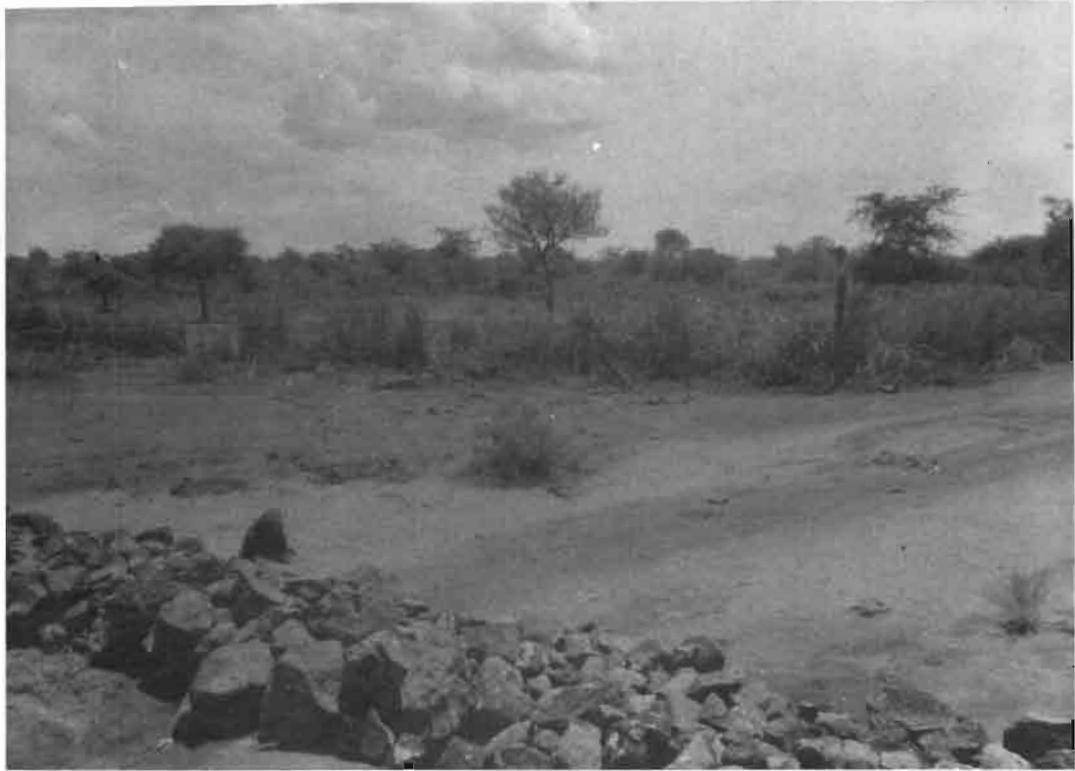


Photo 4.28 : cordon de pierres stabilisant un chemin érodé par le passage du bétail, Nakuru, Kenya



Photo 4.29 : petit seuil en pierres installé en travers d'une petite voie d'eau (ravineau) (G. Hallam)

Les exemples d'échecs et d'utilisation mal conçue des banquettes de diversion en milieu semi-aride ne manquent pas (Heusch, 1986 et Roose et Piot, 1984). Il existe aussi un certain nombre d'exemples d'utilisation réussie de petits ouvrages peu coûteux. Ainsi, sur les glacis en pente douce (<3 %) du plateau Mossi, au Burkina Faso, il est conseillé de construire des obstacles de faible hauteur (20-40 cm) à intervalles rapprochés (10-25 m), dont la structure de base est constituée de blocs de latérite stabilisés avec de l'herbe (Roose et Piot, 1984 ; Ouoba et Rodriguez, 1989). Un autre projet entrepris au Burkina Faso (représenté sur la photo 4.26 et décrit par Wright, 1984) a eu recours à de semblables alignements de pierres, méthode utilisée aussi avec succès au Mali (Hallam *et al.*, 1985 ; Roose, 1986). La photo 4.27 montre l'effet que peut avoir sur la végétation l'humidité retenue à proximité d'une simple ligne de pierres. La photo 4.28 montre une autre application de ce système dans la partie semi-aride du Sud-Est du Kenya, sur une piste empruntée par les troupeaux et érodée ; la photo 4.29 montre une simple barrière de pierres installée en travers d'un passage d'eau de ruissellement au Mali.

5. CONSERVATION DES EAUX

Ce chapitre traite des méthodes qui permettent d'accroître la quantité d'eau emmagasinée dans le profil du sol en piégeant ou retenant l'eau là où elle tombe, ou là où elle ne se déplace que localement sous forme de ruissellement superficiel. Les systèmes qui visent plus spécialement à capter et emmagasiner le ruissellement, en vue d'un usage ultérieur ou à une certaine distance du point de stockage, sont examinés au chapitre 6. Cette distinction en deux catégories est purement arbitraire, aussi a-t-on amplement utilisé les renvois de l'une à l'autre. Il existe aussi des liens avec l'efficacité de l'utilisation de l'eau, examinée dans la section 4.2 à propos de la conservation biologique des sols.

Certains auteurs utilisent les expressions "bassin de réception extérieur ou intérieur au champ d'utilisation". Les bassins de réception intérieur sont ceux dans lesquels la zone productrice de ruissellement est située à l'intérieur de la zone cultivée ; ce sont ceux que l'on examinera dans le chapitre 5. Les bassins de réception extérieures se réfèrent à des zones de ruissellement situées à l'extérieur de la zone cultivée, et sont examinés au chapitre 6.

5.1 PRINCIPES

5.1.1 Choix de la méthode

Il n'existe pas de système simple pour classer les méthodes de conservation des eaux. On peut par exemple comparer les précipitations avec les besoins de cultures (Narayana et Ram Babu, 1985) et distinguer trois conditions :

- i. Si les précipitations sont inférieures aux besoins des cultures : la stratégie comporte le traitement des versants pour accroître le ruissellement qui sera concentré vers les superficies cultivées, l'usage de la jachère pour la conservation de l'eau et le recours à des cultures tolérant la sécheresse, accompagnées de pratiques d'aménagement appropriées (run off et valley farming, Roose, 1989).
- ii. Si les précipitations sont égales aux besoins des cultures, la stratégie consiste à conserver localement le produit des précipitations, à emmagasiner au maximum l'eau dans le profil et à stocker le ruissellement excédentaire pour un usage ultérieur (rainfed farming, Roose, 1989).
- iii. Si les précipitations dépassent les besoins des cultures, la stratégie consiste alors à réduire l'érosion provoquée par la pluie, à drainer le ruissellement excédentaire et à le stocker pour un usage ultérieur (drainage farming, Roose, 1989).

Le point faible de cette approche est que dans les régions semi-arides, le régime pluviométrique se caractérise principalement par son caractère irrégulier et complètement imprévisible. Il peut y avoir d'énormes variations qui vont de la pénurie à l'excédent d'humidité, aussi bien au cours de chaque campagne que d'une campagne à l'autre. Une année sèche au cours de laquelle la pluviométrie totale est nettement inférieure à la moyenne à long terme peut encore inclure des périodes de pluies excessivement abondantes et d'inondations, alors qu'une saison très pluvieuse peut inclure des périodes de sécheresse.

C'est ce qui rend le choix de la méthode si difficile ; en effet, l'objectif visé peut changer d'une campagne à l'autre. Dans une région aride, il peut être raisonnable d'accroître les possibilités de stockage superficiel pour améliorer la production agricole la plupart des années ; mais si l'année est particulièrement humide, cela pourra entraîner l'engorgement des sols et diminuer les rendements. De même, l'installation d'un réseau de drainage peut avoir pour objectif d'accélérer l'écoulement des eaux excédentaires, mais aussi avoir pour effet indésirable d'exagérer les incidences d'une sécheresse.

Il y a donc peu d'intérêt pratique à concevoir des stratégies basées seulement sur des moyennes (Hudson 1987). L'art ou la science de la gestion de l'eau consiste à atténuer les effets des extrêmes que sont les crues et les sécheresses, tout en minimisant le coût des intrants durant les années à potentiel inférieur et en accumulant le plus de bénéfice possible en saisons favorables au travers d'ajustements appropriés des mesures.

Puisqu'il n'est pas efficace de classifier les méthodes seulement en fonction de conditions moyennes (Hudson 1987), Roose (1989), après avoir observé les relations étroites entre les stratégies traditionnelles de gestion de l'eau, des plantes et des sols en fonction des diverses situations écologiques, propose de subdiviser la zone Soudano-sahélienne d'Afrique occidentale en quatre sous-zones bien connues des écologistes et d'y développer des stratégies de gestion conservatoire de l'eau et des sols bien différentes, celles-ci étant les mieux adaptées aux ethnies rencontrées et aux conditions écologiques qui prévalent durant le plus grand nombre d'années:

- **drainage farming** chez les Sénoufos dans la zone Sud-Soudanienne de la Côte d'Ivoire où les pluies sont supérieures à 1 000 mm en 6 mois,
- **rainfed farming** chez les Mianianka dans la zone Nord-Soudanienne du centre du Mali (pluie 700-1000 mm),
- **runoff farming** chez les Mossi de la zone Soudano-Sahélienne du centre du Burkina Faso (pluie 700-400 mm),
- **valley farming** chez les Peulhs et divers éleveurs de la zone Sahélienne du Nord du Burkina Faso (pluie < 400 mm).

Pour profiter d'années humides ou faire face à des années particulièrement sèches, les paysans étalent leurs cultures sur l'ensemble de la toposéquence et associent les variétés cultivées.

Il est possible parfois d'avoir des méthodes répondant à un double objectif et qui peuvent être modifiées à mi-saison ; par exemple, on peut ouvrir les extrémités de banquettes construites suivant les courbes de niveau, pour évacuer l'eau excédentaire si le début de la campagne a été très humide, ou bloquer les exutoires si l'on veut obtenir l'effet contraire. Mais les méthodes présentant ce genre de souplesse sont rares et nous avons vu dans la section 2.3.1. que l'on n'a pas encore beaucoup avancé dans la mise au point de méthodes permettant de prédire ce que sera la suite de la campagne compte tenu de ses débuts.

En dehors des caprices de la pluviosité, il faut encore tenir compte d'une foule d'autres variables : le sol, l'utilisation du territoire, le système de culture et les structures sociales. D'un bout à l'autre des régions semi-arides du globe, les systèmes et les méthodes utilisés sont extrêmement variés, mais l'expérience a montré qu'il n'est pas toujours souhaitable de les transférer tels quels d'un milieu à un autre. Pacey (1985, chapitre 6) qui a fort bien analysé la question, fait observer qu'en dehors des différences techniques, il faut aussi que les méthodes soient compatibles avec le style de vie, le système social et les structures administratives de l'endroit. Le transfert de ce qui semble être des techniques simples exige non seulement une diffusion de l'information, mais aussi une adaptation aux conditions locales. Dans cet ouvrage, nous n'avons pas essayé, en décrivant les méthodes disponibles, de prescrire un traitement détaillé pour un problème particulier, mais plutôt de présenter une large gamme de solutions possibles parmi lesquelles la personne qui se trouve sur place pourra choisir celles qui seront testées localement.

Quand on choisit une méthode ou une technique, il faut être conscient des difficultés, tant physiques qu'humaines que l'on va rencontrer. Etant donné l'irrégularité des précipitations, il faut s'attendre à un faible taux de succès. Les espérances de réussite seront légèrement meilleures pour les herbes, les arbres et les arbustes que pour les cultures céréalières qui sont plus exigeantes en eau. En effet celles-ci demandent de la pluie au début de la campagne végétative, puis un certain nombre d'orages suffisamment abondants pour produire un ruissellement, à intervalles

suffisamment réguliers, car des écoulements trop rapprochés seraient perdus s'ils excédaient la capacité de rétention. Le sol doit donc posséder une capacité suffisante de stockage pour permettre à la culture de poursuivre sa croissance entre deux épisodes de ruissellement. Il sera souvent difficile de tenir le bétail à l'écart des zones améliorées. L'installation de clôtures métalliques coûte cher ; les haies vives demandent du temps et des soins, et les haies d'épineux nécessitent un entretien régulier. Tous les ouvrages tels que banquettes ou fossés nécessitent aussi un entretien.

Sur le plan humain, les problèmes qui peuvent se poser viennent de ce que les gens soient naturellement peu enclins à investir beaucoup d'efforts dans des projets qui n'aient que peu de chances de succès, ou quand la sécurité de l'usage des terres n'est pas assurée. Généralement dans les régions sèches, les populations sont fréquemment mobiles ou partiellement nomades et ne vivent pas toujours à demeure auprès d'emplacements propices à des projets de maîtrise du ruissellement. Beaucoup de projets sont aujourd'hui abandonnés et si les raisons de cet abandon étaient mieux connues alors une meilleure planification des nouveaux projets serait possible.

5.1.2 Quelques principes de conception

L'expression "**multiplicateur de précipitations**" (rainfall multipliers) décrit des méthodes au moyen desquelles le ruissellement provenant de terres incultes est détourné au profit de terres cultivées, qui bénéficient ainsi d'un apport d'eau supérieur à celui qu'elles reçoivent directement sous forme de pluie.

De plus, elles sont conçues pour optimiser le rapport entre la superficie qui produit du ruissellement et la superficie qui le reçoit. Etant donné que les besoins du sol et des cultures varient, surtout la variabilité des précipitations, il est impossible de calculer ce rapport de façon purement mathématique. Finkel (1985) a mis au point une formule que l'on peut utiliser comme point de départ pour des essais au champ, conjointement avec certaines valeurs empiriques établies pour la région de Turkana au Kenya :

$$\text{Rapport} = \frac{\text{Surface de l'impluvium}}{\text{Superficie cultivée}} = \frac{\text{Besoins en eau des cultures} - \text{pluies normales}}{\text{Précipitation normale} \times \text{Coefficient de ruissellement} \times \text{efficacité de l'eau pour la culture}}$$

- Pour estimer les besoins en eau d'une culture, on utilise les données relatives à l'évaporation auxquelles on applique un coefficient propre à la culture ;
- La pluviosité estimée est probablement inférieure à la pluviosité moyenne à long terme, de manière à obtenir une meilleure récolte en année de faible pluviosité ; alors qu'en année humide, le surplus peut être évacué ;
- le coefficient de ruissellement est le pourcentage du ruissellement sur les précipitations ;
- l'efficacité des pluies exprime la différence entre la répartition des pluies et les besoins d'eau de la culture.

Les projets comportant des bassins de réception intérieurs aux champs cultivés, demandent de gros apports d'énergie pour modifier la surface du sol ; ils se rencontrent donc plus couramment sur des terres cultivées et dans des zones où les précipitations annuelles sont égales ou supérieures à 250 mm. Le rapport entre la superficie de réception et la superficie cultivée sera en général compris entre 1:1 et 5:1. Les projets utilisant des bassins de réception externes aux parcelles peuvent avoir des rapports beaucoup plus élevés par exemple de 30:1 dans le cas du projet agricole alimenté par les eaux de ruissellement du désert du Néguev (Evenari et al., 1982). De tels systèmes peuvent fonctionner avec des hauteurs pluviométriques n'atteignant même pas 100 mm, ce qui serait impossible avec d'autres systèmes de culture intérieure au champ cultivé.

Voici deux exemples de dispositif "multiplicateur de précipitations" :

(a) Bassin de réception intérieur, rapport 2:1, précipitation nominale 250 mm.

$$\frac{2}{1} = \frac{500 - 250}{250 \times 60 \% \times 80 \%} = \frac{250}{120}$$

(b) Bassin de réception extérieur, rapport 20:1, précipitation nominale 100 mm.

$$\frac{20}{1} = \frac{500 - 100}{100 \times 25 \% \times 80 \%} = \frac{400}{20}$$

Le ruissellement acquis est supérieur en (b), de sorte que la capacité d'emmagasinement du sol doit être plus grande, ou les épisodes de ruissellement mieux distribués.

Dans les pays à économie développée, il est raisonnable de considérer les profits à long terme que produiront des projets demandant des investissements ; ce genre de considération est moins valable dans les régions semi-arides. Même si l'on dispose de relevés à long terme des précipitations et même s'il est possible de calculer des probabilités, les petits fermiers ou les pasteurs nomades ne font de projets qu'à très court terme. Finkel (1984) cite plusieurs exemples concernant le Kenya où des projets pourtant sérieusement préparés ont été abandonnés parce qu'au bout de un ou deux ans, ils n'avaient donné que de maigres résultats.

5.1.3 Les effets d'échelle

La taille des bassins de réception influe sur la production de ruissellement. Avec des conditions hydrologiques identiques, de petites superficies peuvent produire jusqu'à 50 % de ruissellement, alors que le ruissellement d'un bassin fluvial n'est que de 5 % (Stern, 1979). Cela s'explique de deux façons. Il y a d'abord plus de chances qu'un grand bassin de réception présente des dépressions superficielles où le ruissellement s'emmagasine temporairement. D'autre part, les petites zones de réception peuvent produire du ruissellement après de courtes averses alors que, dans le même temps, des étendues plus vastes ne produiront pas de ruissellement superficiel. Du point de vue hydrologique, cela s'explique par le fait que de petites superficies ont un temps de concentration plus court et produisent donc du ruissellement après des orages plus brefs mais de forte intensité. Par contre les averses provenant d'un large front de précipitations nécessitent un temps de concentration plus long pour produire du ruissellement sur de plus vastes bassins versants. Shanani et Tadmor (1979) donnent pour une pluviométrie annuelle de 100 mm, les ruissellements moyens suivants :

10-30 mm/ha/an pour des bassins de 0,02 ha
4-10 mm/ha/an pour des bassins de 3-10 ha
1 mm/ha/an pour des bassins de 300 à 500 ha

Les méthodes permettant d'estimer le taux et la quantité de ruissellement sont décrites dans les livres de Hudson (1981) et de la FAO (1981).

5.2 METHODES APPLICABLES AUX TERRES CULTIVEES

Les techniques décrites dans cette section supposent toutes un certain remodelage de la surface du sol et nécessitent de ce fait de substantiels apports d'énergie. Dans de nombreux cas, il n'est pas possible d'utiliser uniquement le travail manuel et il faut recourir à un outillage à traction animale ou motorisée. Certaines de ces méthodes offrent de bonnes chances d'accroître les rendements agricoles, de sorte que l'un des principaux aspects des travaux expérimentaux concerne la recherche de méthodes et de machines peu coûteuses, simples et faibles consommatrices d'énergie. La figure 5.1. reproduit schématiquement les méthodes décrites dans cette section.

5.2.1 Système des planches et fossés

Le système des planches larges séparées par un sillon a été principalement mis au point par l'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales

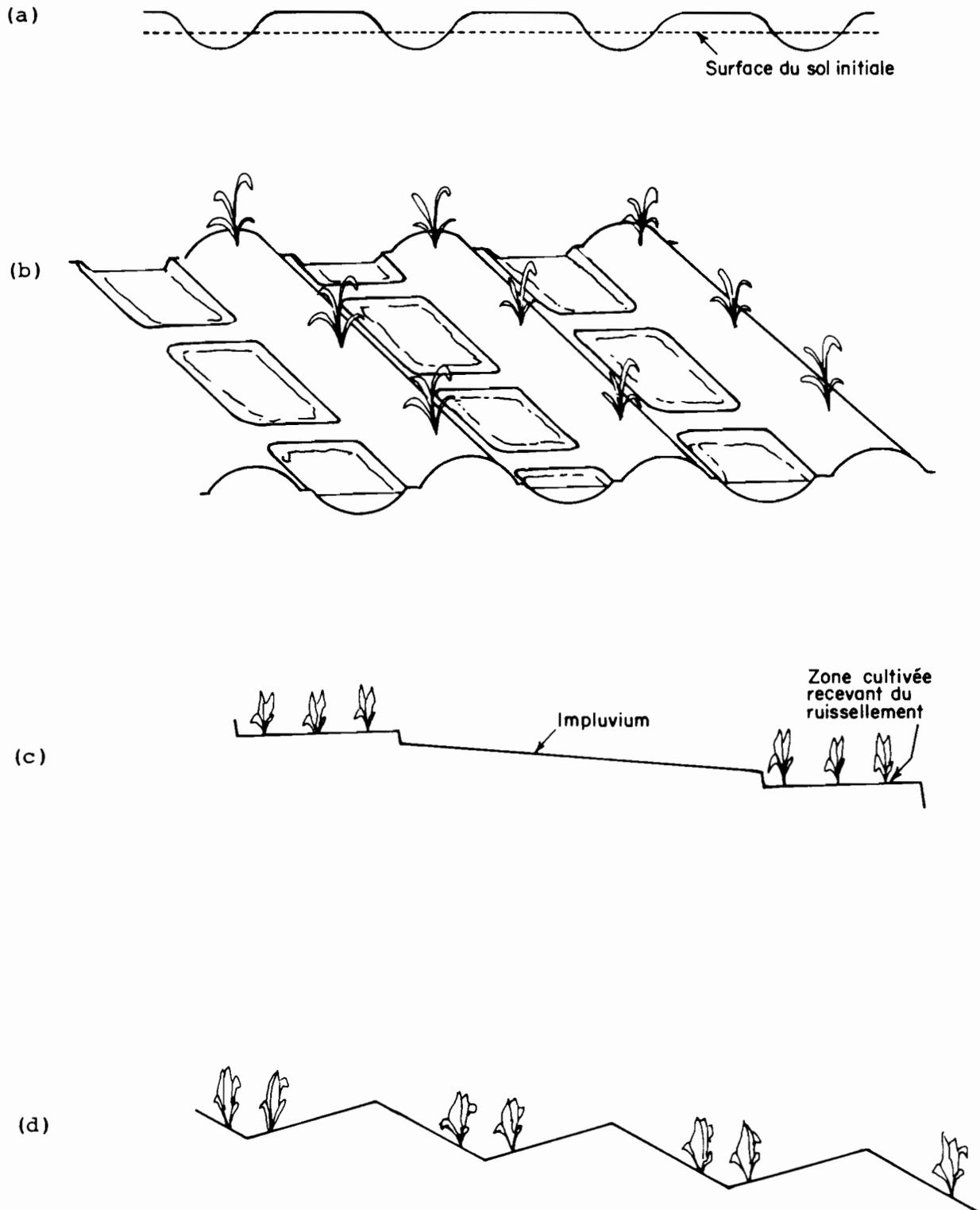


Figure 5.1 : méthodes consistant à modifier la surface du sol pour accroître la rétention des eaux de pluie sur les terres cultivées :

- (a) planche large et sillon
- (b) billonnage cloisonné
- (c) terrasses en gradins intermittentes
- (d) sillons suivant les courbes de niveaux ou travail du sol en bandes

semi-arides (ICRISAT) en Inde (Krantz 1981, Pathak et al., 1985). Un programme de recherche complet a été réalisé en stations pendant huit ans, avant de passer au stade de la recherche adaptative au niveau des exploitations, laquelle a été conduite à Tadthanapalle, dans le district de Medac (rapports annuels de l'ICRISAT, 1975-1984). Il s'agit d'une version moderne du système très ancien qui consiste à favoriser un drainage superficiel contrôlé en façonnant des planches à la surface du sol. Au moyen-âge, ce système a été utilisé en Grande-Bretagne pour améliorer les pâturages et s'appelait alors "billons et sillons" ; il a également été utilisé en Europe Continentale, en Amérique du Nord (Phillips, 1963) et en Afrique centrale (Cormack, 1954). On en connaît une variante au Kenya appelée "camber-bed" (Robinson et al, 1955). La photo 5.1 montre un des dispositifs expérimentaux de l'ICRISAT et la photo 5.2 le profil d'une planche.

Le système recommandé par l'ICRISAT se compose de planches d'environ 100 cm de largeur, séparées par des sillons profonds d'environ 50 cm de largeur. La meilleure pente le long du sillon sur des vertisols est comprise entre 0,4 et 0,8 %. Sur la planche elle-même, on peut planter 2, 3 ou 4 rangées de cultures et l'on peut faire varier la largeur de la planche et la géométrie de la culture en fonction de l'équipement utilisé pour les façons culturales et le semis. La figure 5.2. montre quelques exemples.

En Inde, ce système a été utilisé principalement sur des vertisols profonds (sols noirs très argileux, parfois appelés argile noire à coton) ; les planches larges ont une légère pente et sont façonnées au moyen d'engins portés ou montés sur roues et trainés par des boeufs (planche 5.3). Des applications de ce système ont été faites sur des sols analogues en Ethiopie (CIPEA, 1985) avec un modèle intéressant de billonneuse très simple, représenté sur la planche 5.4. Une autre variante, avec des billons plus petits, est actuellement mise au point par le Centre de recherche agricole pour les régions semi-arides (CPATSA) de l'Institut brésilien de recherche agricole (EMBRAPA) à Pérolina, Brésil (Lal, 1985 et 1986), (voir photo 5.18).

Tous ces projets ont, à des degrés variables, les objectifs suivants :

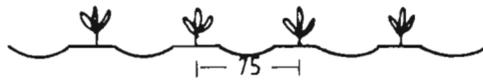
- i. Favoriser le stockage de l'humidité dans le profil du sol. Des vertisols profonds peuvent emmagasiner jusqu'à 250 mm d'humidité, ce qui suffit pour alimenter des végétaux si des périodes de sécheresse se produisent au milieu ou à la fin de la saison. Ce système augmente aussi les possibilités de double culture sous forme de cultures intercalaires ou échelonnées. La forte capacité de stockage de l'eau du sol favorise la croissance végétale pendant la période sèche mais plus fraîche qui fait suite à la saison des pluies.
- ii. Evacuer en toute sécurité et sans provoquer d'érosion un ruissellement superficiel excédentaire. On peut voir sur la photo 5.5. le type d'inondations qui peut se produire sur des vertisols.
- iii. Obtenir, sur les planches, un sol mieux drainé et plus facile à travailler. La gamme des conditions d'humidité entre lesquelles le sol peut être efficacement travaillé ou semé est étroite, aussi le facteur temps est-il déterminant. Environ 20 % seulement des vertisols profonds de l'Inde sont cultivés durant les pluies, généralement parce qu'ils sont difficiles à travailler quand ils sont mouillés. La situation est semblable en Ethiopie (photo 5.6.). Si une culture peut être établie dès les premières pluies, le profil du sol n'est généralement proche de la saturation que pendant de courtes périodes durant la seconde moitié de la campagne, alors l'eau est utilisée plus efficacement et il est moins nécessaire de recueillir et de stocker les eaux de ruissellement. On augmente aussi la possibilité d'une deuxième récolte grâce à des cultures intercalaires ou séquentielles (Kampen, 1979 et 1981). Il est parfois possible de travailler les planches surélevées avant les pluies, ce qui donne la possibilité de semer en sec avant que celles-ci n'arrivent, tout au moins dans les zones où le début de la saison des pluies est relativement fiable et où il y a de bonnes chances pour que les précipitations qui suivront permettent à la culture en train de germer de s'établir. L'emploi de planches larges et d'outils attelés a grandement contribué à faciliter la préparation des planches de semis en saison sèche dans ces sols argileux durs.



Photo 5.1 : bassin expérimental de réception des eaux de pluie aménagé par l'ICRISAT avec planches larges et sillons, voies d'eau enherbées pour l'évacuation du ruissellement en toute sécurité et bassin de stockage pour irrigation d'appoint (ICRISAT)



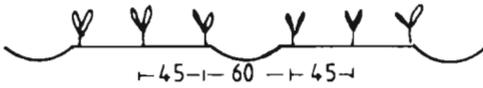
Photo 5.2 : vue transversale d'une planche large et d'un sillon



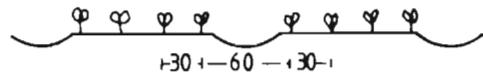
Les planches étroites et fossés ne sont adaptés qu'aux espacements de 75 cm seulement (par ex. le maïs)



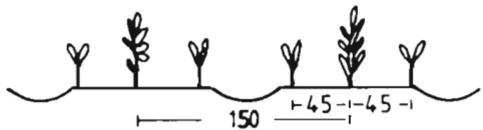
Les planches larges et fossés ont été adaptés à plusieurs espacements. Ex. 1 culture de maïs



Une culture de sorgho ou de mil



Culture d'arachide ou de pois chiche



Culture associée pois d'angola / sorgho ou bien maïs / pois d'angola

Figure 5.2 : différents dispositifs de cultures et lignes sur planches larges



Photo 5.3 : un des nombreux porte-outils expérimenté à l'ICRISAT pour façonner et travailler les planches (ICRISAT)

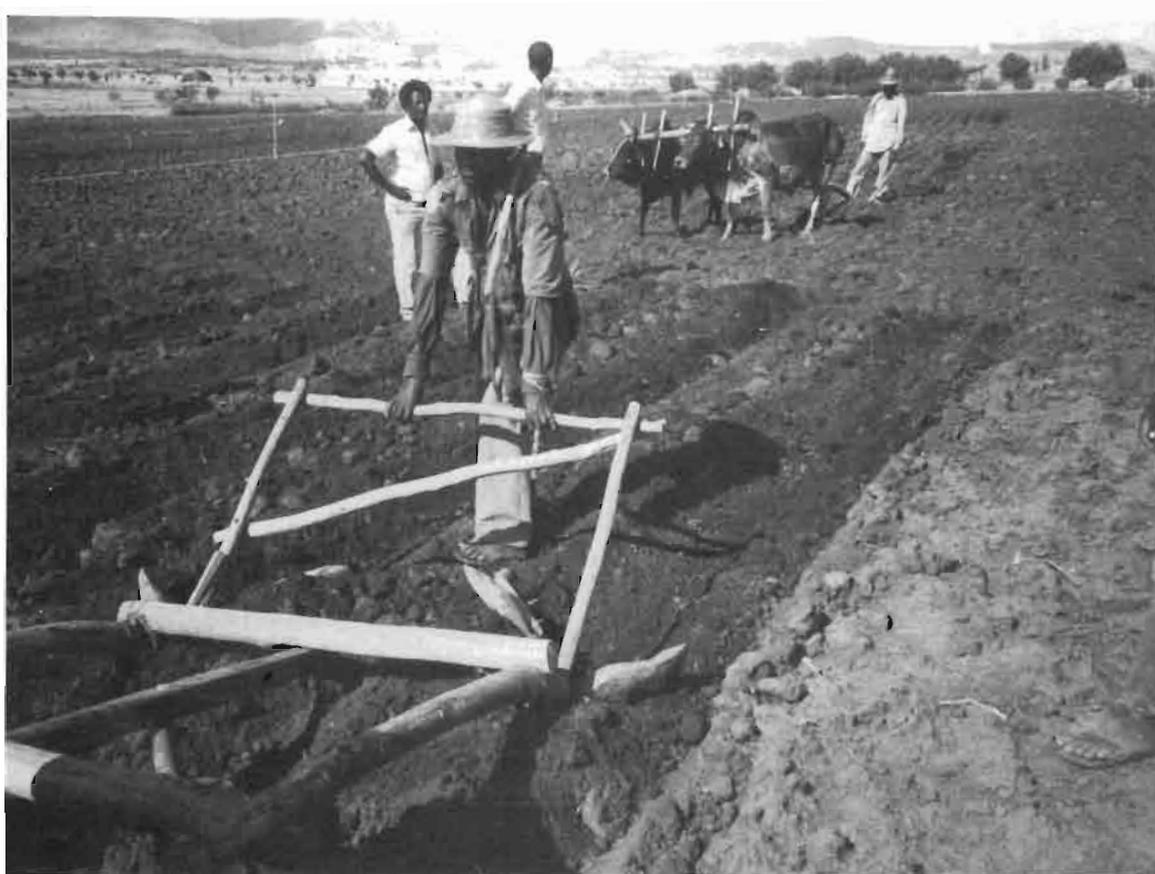


Photo 5.4 : billonneuse attelée simple, mise au point par le CIPEA en Ethiopie



Photo 5.5 : ruissellement et érosion sur un vertisol en Inde



Photo 5.6 : sur des sols argileux lourds en Ethiopie, des planches très larges avec des sillons ouverts assurent le drainage



Photo 5.7 : essais à l'ICRISAT d'un semoir à trois rangs sur planches larges (ICRISAT)

- iv. Réemployer les eaux de ruissellement stockées dans de petits bassins (planche 5.1). L'application de petites quantités d'eau d'irrigation peut être vraiment salvatrice durant les périodes de sécheresse qui se produisent en saison des pluies, en particulier sur les sols qui n'ont pas la capacité de stockage des vertisols profonds.

Le système des planches larges séparées par des sillons est particulièrement adapté aux vertisols. C'est sur les sols noirs profonds des régions qui peuvent compter sur une moyenne de 750 mm de précipitations au moins que cette technique fonctionne le mieux. Elle ne s'est pas révélée aussi productive dans les régions où les pluies sont moins fiables, ni sur des alfisols ou des vertisols moins épais - encore que dans ces cas la productivité obtenue ait été supérieure à celles des méthodes de culture traditionnelle. D'autres méthodes qui, dans un ensemble de techniques comprenant les planches larges séparées par des sillons, mettent davantage l'accent sur le stockage de l'eau et l'irrigation seraient probablement plus viables sur les alfisols (Ryan *et al.*, 1979). Tout au long de ses recherches, l'ICRISAT a aussi insisté sur le fait que le système des planches larges séparées par des sillons ne doit pas être considéré isolément mais dans le cadre d'un ensemble de pratiques agronomiques améliorées.

L'un des éléments importants de ce système est une barre portée sur roues et tirée par des boeufs ; cet instrument peut être utilisé avec des billonneurs pour former la planche surélevée et ensuite avec des semoirs ou plantoirs de précision (photo 5.7). Le porte-outil est utilisé initialement pour former les planches, puis pour les remodeler chaque année, ainsi que pour toutes les opérations de travail du sol, les plantations et les façons intercalaires. Même le plus simple des porte-outils fabriqué en usine coûte encore trop cher pour la plupart des paysans cultivateurs ; en revanche, le billonneur en bois vraiment très économique représenté sur la photo 5.4 s'annonce prometteur.

5.2.2 Billonnage et billonnage cloisonné

Cette méthode est également connue aux Etats-Unis sous les termes de sillon cloisonné (*furrow diking and basin listing*) et bassins de stockage. Le principe consiste à accroître le stockage de l'eau en surface, en façonnant d'abord des billons et des sillons, puis en fermant les sillons par de petits monticules de terre formant des cloisons (voir photo 4.14). L'emploi de billons en pente seul entraîne généralement une augmentation du ruissellement superficiel, comparé à une plantation à plat ; par contre, des billons cloisonnés ralentissent le ruissellement et augmentent le stockage (Roose et Piot, 1984). Selon la saison, on peut favoriser l'un ou l'autre de ces deux effets. La question qui se pose alors est de savoir quand il faut drainer et quand il faut emmagasiner l'eau. Pour faciliter le choix de la meilleure solution technique à long terme, un modèle a été mis au point (Morin *et al.*, 1984), mais ce n'est pas celle-ci qui empêchera ce même système de produire l'effet contraire à l'effet voulu au cours d'une campagne particulière. Ahn (1977) a bien émis l'idée qu'on pourrait essayer de se mettre à l'abri d'une telle éventualité au moyen de sillons alternativement cloisonnés ou drainants ; mais ce n'est pas une solution très satisfaisante. Certains prétendent que ce système restreint les dégâts que risque de provoquer un trop grand ruissellement ou une trop grande rétention d'eau mais on pourrait rétorquer qu'avec ce système la moitié de la terre ne recevra jamais le traitement adéquat.

Une possibilité intéressante consiste à utiliser conjointement le billonnage cloisonné et l'irrigation par aspersion pour obtenir des taux d'application plus élevés sous faible pression (Stuart *et al.*, 1981). Le billonnage cloisonné est généralement associé à la culture mécanisée. On a parfois tenté de le réaliser avec des outils attelés, mais le système nécessite réellement une forte puissance de traction car il faut travailler avec rapidité et précision si l'on veut pouvoir retracer ou étaler les billons les années suivantes.

Le billonnage simple ou le billonnage cloisonné, ont été occasionnellement pratiqués en utilisant le travail manuel mais, comme ces pratiques demandent beaucoup de main-d'oeuvre, ils ne sont généralement pas très populaires chez les petits

agriculteurs. De toute manière, les billons façonnés à la main sont en général moins efficaces. Il est fort probable qu'ils s'écartent de la vraie courbe de niveau et que la hauteur de billon soit irrégulière, défauts qui augmentent le risque de débordement.

Une variante de cette technique, qui se prête à une intervention manuelle, a été expérimentée sur une petite échelle au Burkina Faso et se présente sous la forme de buttage cloisonné, que l'on voit représentés sur la photo 5.8. La préparation du sol (labour ou griffage) se fait à plat pour gagner du temps ; mais 3 et 6 semaines après le semis, au cours du sarclage on rejette la terre sur les adventices le long du rang de plantation (buttage simple). On revient ensuite former une cloison perpendiculaire tous les 2 à 6 mètres entre les buttes continues. L'avantage de ce système c'est que l'on casse quatre fois la croûte de battance et que l'on améliore considérablement l'infiltration en début de cycle avant que le couvert de la culture ne protège efficacement le sol contre la battance des pluies (Nicou, Ouatarra, Some, 1987).



Photo 5.8 : expérience conduite au Burkina Faso en provoquant des précipitations simulées sur des "buttes cloisonnées" (J. Collinet)

i. Résultats divers du billonnage cloisonné :

Il existe une abondante littérature rendant compte des essais de billonnage cloisonné effectués dans de nombreux pays. Quelques uns de ces rapports font état de problèmes et d'échecs, mais la grande majorité d'entre eux affichent des succès si remarquables que l'on peut s'étonner que ce système ne soit pas plus largement répandu. Cette étrange situation s'explique peut-être par le fait que les bons résultats sont si occasionnels et si aléatoires que l'on comprend que cette technique n'ait pu se généraliser davantage.

El-Swaify **et al.** (1985) ont résumé comme suit les expériences faites en Afrique :

"Dans des circonstances bien précises, le système s'est révélé bénéfique en ce sens qu'il a non seulement réduit le ruissellement et la perte de sol, mais a aussi accru les rendements des cultures (Lawes, 1961, 1963 ; El-Swaify, 1983 ; Dagg et McCartney, 1968), (Roose, Piot, 1984). Cependant, en années de forte pluviosité ou années au cours desquelles la saison des pluies comprend des périodes relativement prolongées de grande humidité, il semble que les parcelles aménagées avec des billons cloisonnés aient donné des rendements sensiblement moindres que les parcelles en pente sur lesquelles l'eau n'a pu s'accumuler en surface (Lawes, 1963 ; Dagg et McCartney, 1968). Dans ce genre de conditions, le billonnage cloisonné accentue l'engorgement, crée des situations anaérobies dans la zone racinaire, un lessivage excessif des engrais et une remontée de la nappe phréatique dans les bas de versants."

Les rapports concernant d'autres pays sont contradictoires, mais signalent le plus souvent des succès. McCartney **et al.**, 1971, rapportent qu'en Tanzanie le billonnage cloisonné a amélioré les rendements en maïs non seulement en années peu pluvieuses mais aussi durant des années plus arrosées. Toutefois, les succès

sont plus fréquents lors des années à faible pluviométrie ; c'est ainsi que Njihia (1979) rapporte qu'à Katumani (Kenya), le billonnage cloisonné a permis d'obtenir une récolte de maïs en années peu pluvieuses, alors que des cultures plantées en terrain plat n'ont rien donné. Jones (1985) ajoute ceci :

"De même, sur un sol sableux situé à Lusitu, dans la vallée du Zambèze, l'emploi de billons cloisonnés a augmenté de 168, 159 et 16 % les rendements moyens des cultures (maïs, sorgho et mil) par rapport aux cultures faites en terrain plat, avec des pluviométries de 587, 623 et 724 mm par campagne (Honish, 1973). Sur des vertisols situés à Big Bend, au Swaziland, l'accroissement moyen des rendements en maïs, coton et sorgho a été de 64 % lors d'une année ayant reçu 508 mm de pluie, et de 308 % au cours d'une année ayant reçu 310 mm (Warwick, 1979, 1980). Il est clair que les réponses peuvent être spectaculaires, mais il semble d'après les travaux récents, dans des conditions extrêmement sévères au Botswana, que cette technique peut avoir des effets négatifs. La température du sol est plus élevée entre les billons, ce qui peut compromettre la germination des semences et, quand les averses sont légères, l'humidité pénètre moins profondément dans le sol que si le sol est plat (DLFRS, 1984).

Dans un autre rapport provenant du Botswana, on relève une réponse positive des rendements en sorgho au billonnage cloisonné au cours d'une campagne très sèche (1972/73) et d'une autre, beaucoup plus humide (1973/74) (DLFRS, 1973 ; 1974).

Dans le désert du Neguev en Israël, Rawitz *et al.* (1983) ont constaté que le billonnage cloisonné avait augmenté considérablement l'efficacité d'une jachère avant une culture de coton, par contre les essais faits avec une culture de blé avaient donné de moins bons résultats en raison de l'engorgement des cuvettes (photo 5.9). On a donc opté pour l'emploi de planches larges avec des sillons non cloisonnés, système qui a donné des rendements accrus ; mais il faut dire que le climat du Neguev est un peu particulier car il comporte des pluies hivernales et une pluviométrie annuelle moyenne très faible.

En Inde également, les billons larges ont donné de meilleurs rendements en sorgho que des cultures plantées en terrain plat ou sur des billons étroits (ICRISAT, 1976) ; Brahmabatt et Patel (1983) ont signalé des résultats analogues avec le sorgho et le ricin au Gujarat. Au Texas (Etats-Unis), Clark et Jones (1981) ont observé de notables accroissements des rendements en sorgho, qui sont passés de 1420 kg/ha pour une plantation à plat à 1650 kg/ha pour une plantation avec billonnage cloisonné. Dans une autre étude américaine faite au Texas, l'emploi de sillons cloisonnés s'est révélé efficace pour retenir et absorber des averses très intenses (Billbro et Hudspeth, 1979). Des applications également réussies de billonnage cloisonné ont été faites dans les grandes plaines des Etats-Unis, ainsi qu'il ressort d'un rapport établi par Stuart *et al.*, 1985 ; là encore, on aurait tendance à se demander pourquoi, face à des démonstrations expérimentales si positives, tout le Texas et toute la Tanzanie ne sont pas couverts de billons cloisonnés.



Photo 5.9 : Micro bassins en bande, employés en Israël pour la culture du blé (D. Rosenzweig)

L'une des raisons qui pourrait expliquer cette faible diffusion du système est peut-être l'effet thermique signalé par Jones. Une autre raison est le risque d'engorgement en années humides. L'effet de saturation peut encore être aggravé si le passage des tracteurs entraîne un compactage du fond du sillon, et l'on est en droit de se demander si dans ces conditions, les machines et outils utilisés sont aussi efficaces que ces rapports veulent bien le dire.

ii. Conditions dans lesquelles le billonnage cloisonné est indiqué :

Il y a danger d'érosion du sol si les billons débordent, de sorte que l'eau provisoirement emmagasinée dans les dépressions se libère brusquement dans la brèche. Cela n'arrivera pas si la quantité d'eau stockée en surface combinée avec la quantité qui s'infiltré dans le sol superficiel est supérieure aux précipitations fournies par les orages. Pour cela, il faut que la quantité d'eau stockée dans le sol soit importante ; c'est généralement le cas des sols profonds ayant de bonnes caractéristiques d'infiltration et de perméabilité. Dans certains systèmes, on accroît l'infiltration, soit par paillage du fond des sillons, soit par sous-solage ou travail du sol. Trois mesures de sécurité doivent être prises pour minimiser le risque d'érosion :

- les sillons doivent être en pente douce pour faciliter le ruissellement si les cloisons cèdent ;
- les cloisons doivent être de hauteur inférieure à celle des billons de sorte que les cloisons peuvent céder dans le sens du sillon avant que les billons ne débordent vers l'aval ;
- il faut prévoir un réseau de banquettes de diversion de type classique, pour éviter les dégâts si les billons débordent ou cèdent.

iii. Outils employés pour façonner des billons cloisonnés :

Fabriquer un outil qui puisse façonner des billons est chose facile ; ce qui est difficile à réaliser, c'est interrompre la confection du billon pour former une cloison. Les différentes solutions possibles sont les suivantes :

- relever l'outil à la main de façon intermittente, si la billonneuse est tirée par un tracteur ou par des boeufs (photo 5.10) ;
- employer un dispositif de levage automatique basé sur une roue excentrée (photo 5.11) ;
- utiliser un système de levage hydraulique intermittent, soit manuel, soit déclenché par la rotation des roues du tracteur.

Lyle et Dixon, 1977, ont donné une description des outils employés aux Etats-Unis ; Tregubov, 1981, l'a fait pour l'URSS. Une étude plus ancienne de Boa est utile mais l'édition est épuisée (FAO, 1966).

iv. Systèmes simplifiés pour la culture non mécanisée :

La confection des billons cloisonnés va généralement de pair avec la culture mécanisée car elle demande beaucoup de travail, mais il est tout à fait possible de les former à la main. La photo 5.12 montre un exemple pris en Ethiopie, où les billons et cloisons ont été façonnés en empilant et en alignant des résidus de sorgho, des racines et du sol.

5.2.3 Terrasses de conservation en gradins (bench terraces) (aussi appelées terrasses Zingg, terrasses méditerranéennes et terrasses d'absorption totale)

Ces terrasses ont aussi un effet "multiplicateur des précipitations" car elles utilisent une partie de la surface des terres comme impluvium pour fournir un



Photo 5.10 : les cloisons sont façonnées en soulevant le billonneur à la main, Malawi (T.F. Shaxson)



Photo 5.11 : ici, le billonneur est soulevé par une roue excentrée (T.F. Shaxson)



Photo 5.12 : billons et cloisons formés par des résidus de cultures, des racines et du sol, Ethiopie (H. Hurni)

ruissellement supplémentaire à des terrasses horizontales sur lesquelles sont plantées les cultures. Cette méthode est particulièrement indiquée dans le cas de la grande culture mécanisée, par exemple les terres à blé/sorgho du Sud-Ouest des Etats-Unis où Austin W. Zingg s'est fait le pionnier de cette méthode en 1955. Les premiers résultats expérimentaux ont été décrits en 1959 (Zingg et Hauser). Après des études détaillées faites à la station expérimentale de Bushlands au Texas et par Hayes au Kansas ; Hauser et Cox, 1962, en ont fait une évaluation économique et technique. Ces études ont abouti à des essais extensifs dans les six Etats de l'Ouest caractérisés par une faible pluviométrie ; ces essais ont fait l'objet d'études rapportées en détail (ASAE, 1968). Les terrasses de conservation en gradins ont été comparées avec la pratique traditionnelle des terrasses de niveau (c'est à dire horizontales dans le sens de la longueur, mais la pente reste telle qu'elle était à l'origine, entre les terrasses, ainsi qu'avec toutes les terrasses en banquettes de diversion (figure 5.3). Malgré un risque d'érosion du sol pendant les averses estivales de forte intensité, ce type de terrasse s'est révélé aussi efficace que les deux autres systèmes pour maîtriser l'érosion, et plus efficace pour réduire le ruissellement global. Les données tirées de ces essais ont permis d'établir des directives générales concernant la méthode mais étant donné l'extrême diversité des conditions de sols, de précipitations et de cultures, il vaut mieux éviter les modèles normalisés. La meilleure façon d'appliquer le système dans un contexte donné, sera toujours d'étudier d'abord les conditions locales.

Les conditions dans lesquelles on peut avoir des terrasses d'absorption totale en gradins sont les suivantes :

- Les pentes douces, de 0,5 à 1,5 %, sont les plus indiquées, encore que le système ait été utilisé sur des pentes allant jusqu'à 6 % dans le Nord Dakota. Comme avec tous les systèmes de terrasses, plus la pente est raide, plus le volume de terrassement est important.

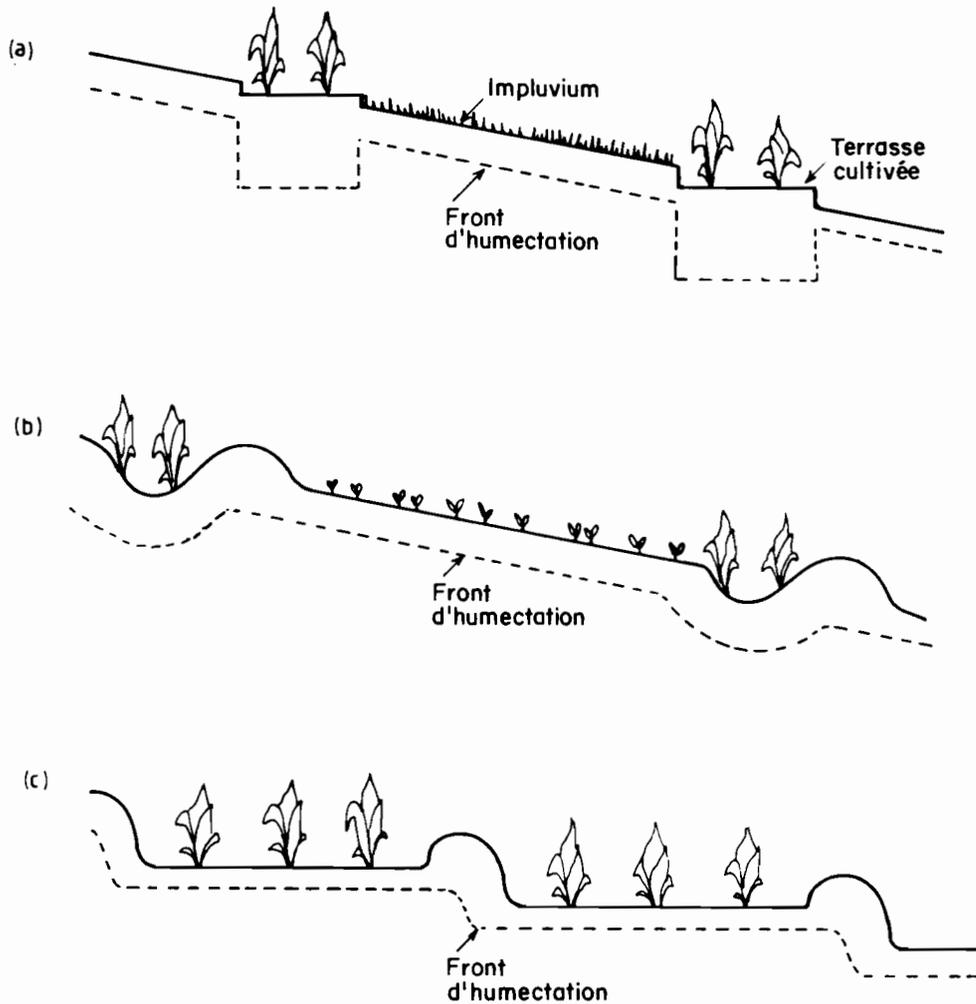


Figure 5.3 : Terrasses en gradins comparées à d'autres pratiques :
(a) les terrasses de conservation en gradins augmentent le stockage de l'humidité dans le sol sous la terrasse
(b) les diguettes isohypses augmentent aussi l'humidité du sol sous la banquette
(c) les terrasses en gradins de niveau n'ont pas cet effet multiplicateur

- Il faut un sol profond, à la fois pour emmagasiner suffisamment d'humidité dans le sol et pour atténuer l'effet de remodelage pendant la construction des terrasses. Plusieurs spécialistes des Etats-Unis mentionnent une baisse de rendement due à la perturbation du sol pendant les travaux de terrassement, baisse qui peut se prolonger pendant six ans. Certains vont jusqu'à mettre le sol humifère de côté pour le replacer après nivellement. Une bonne perméabilité est également nécessaire pour que les eaux de ruissellement retenues puissent être absorbées rapidement.
- Les pentes douces et homogènes sont un avantage dans le cas de la grande culture mécanisée, car on peut construire des terrasses parallèles et de largeur constante.
- Il importe de niveler avec précision les terrasses en gradins pour que l'humidité puisse s'accumuler de façon uniforme dans le sol.
- Si le ruissellement provenant de la zone de réception risque d'excéder la quantité qui peut être absorbée et emmagasinée sur la terrasse, il faut prévoir des exutoires aux extrémités pour que l'eau puisse se déverser dans des chemins d'eau enherbés ou autres dispositifs d'évacuation sûrs. Comme avec le billonnage

cloisonné, s'il doit y avoir un ruissellement superficiel, celui-ci doit s'écouler le long de la terrasse et non par dessus en dévalant la pente, ce qui entraînerait une érosion dangereuse. Une méthode couramment adoptée avec ce type de terrasses consiste à placer l'exutoire situé à l'extrémité de la terrasse à mi-hauteur du bourrelet, laissant ainsi une revanche égale à la moitié de la hauteur du bourrelet.

- Il s'agit là d'un système coûteux qui doit être couvert par des rendements élevés ; il faut donc prévoir les intrants correspondants, notamment semences, engrais et conduite de cultures adéquates. Des doses d'engrais suffisantes sont nécessaires si l'on veut éviter que la fertilité ne soit une contrainte une fois la limitation due à l'humidité éliminée.
- Les principaux critères de conception sont : la largeur de la terrasse nivelée et la proportion entre la superficie de la terrasse et celle de l'impluvium. La largeur de la terrasse dépend principalement de l'outillage que l'on prévoit d'utiliser. Comme la largeur des planteurs et semoirs ne cesse d'augmenter, celle des terrasses doit aussi augmenter mais dans les limites permises par la pente et l'épaisseur du sol. Normalement, la largeur va de 10 mètres sur des terres ayant une pente de 5-6 %, à 30 mètres pour des terres ayant une pente de 2 % et 50 ou plus pour des pentes de 1 %. Jones, 1981, parle de mini-terrasses de 9 mètres de largeur pour un rapport 1:1 avec des assolements différents sur la zone de réception et sur la terrasse. Le rendement total obtenu sur ces terrasses a doublé.
- Dans la pratique courante la terrasse en gradins est de niveau dans le sens de la longueur, mais il a été fait quelques essais avec des terrasses affectées d'un léger gradient de 1:400, ayant pour but de faciliter l'évacuation sans problème du ruissellement, si celui-ci devenait excessif.
- Le rapport entre la zone de réception et la terrasse peut être de 0:1 (auquel cas la totalité de la surface est transformée en terrasse de niveau) mais les valeurs les plus courantes sont 1:1 ou 2:1. En règle générale, plus les précipitations annuelles moyennes sont faibles, plus la zone de réception devra être étendue pour assurer une alimentation hydrique suffisante de la culture. Un autre élément à prendre en considération est le type de précipitations, car le ruissellement résulte uniquement d'averses dont l'intensité dépasse les possibilités d'infiltration de la zone de réception. Le traitement de la zone de réception aura également un effet sur la quantité de ruissellement. Dans les régions très sèches, la zone de réception peut être laissée inculte pour favoriser le ruissellement ; dans le Sud-Ouest des Etats-Unis, la pratique courante est de cultiver en permanence la terrasse en gradins et de faire un assolement sur la zone de réception. Le type d'assolement le plus fréquent est le suivant : blé/sorgho/jachère, ce qui donne deux récoltes en trois ans. On trouvera dans le tableau 5.1 des exemples de l'effet multiplicateur de précipitations.

Les résultats de l'expérience américaine montrent que la méthode est rentable et adaptée à la grande culture mécanisée, très technique, pratiquée dans la région. Le cultivateur peut escompter amortir les coûts d'aménagement de la terre en dix ans environ. L'aménagement en gradins de la totalité de la surface cultivable donne parfois le profit le plus élevé, car alors, la totalité de la terre est cultivée, mais le terrassement revient très cher. Avec un rapport de 1:2 entre la terrasse et la superficie de réception, le coût du terrassement est réduit des deux tiers. Plusieurs études ont montré que c'est alors le système le plus rentable (Jones et Shipley, 1975).

Parce que l'aménagement de terrasses de conservation en banquettes est une opération coûteuse, cette méthode n'est pas recommandée pour les régions à très faible pluviosité. La principale utilité du système est d'accroître la production ainsi que la fiabilité des rendements quand les précipitations sont presque suffisantes pour alimenter une culture, c'est-à-dire quand elles sont comprises entre 300 mm et 600 mm. Il importe parfois davantage d'améliorer la probabilité d'une récolte raisonnable que d'accroître quantitativement le rendement. En ce qui concerne les régions où les pluies sont moins abondantes, on trouvera dans la section 5.2.4 une description de méthodes

Tableau 5.1 EFFET "CONCENTRATION DE PRÉCIPITATIONS" DES TERRASSES DE CONSERVATION EN GRADINS (dans l'hypothèse qu'une culture de sorgho nécessite/500 mm d'eau)

	Rapport zone de réception	coefficient de ruissellement C%	apport du ruissellement total latéral (MAR x rapport x C)	Total
MAP = 250 mm	2	40	200	450
	2	50	250	500
	3	30	225	475
	3	40	300	550
	4	30	300	550
MAP = 350 mm	2	20	140	490
	2	25	175	525
	3	10	105	455
	3	15	157	507

* Le bilan réel dépendra de l'efficacité de l'eau, et en particulier des pentes par drainage et évaporation.

Remarque : un exemple de terrasses de conservation en gradins, utilisées pour cultiver du blé d'hiver provient de l'Arizona. La moyenne des précipitations d'hiver est de 180 mm et compte tenu d'un besoin en humidité de l'ordre de 585 mm et un ruissellement de 33 %, un rapport zone de réception de 6.8 a été employé (voir section 5.1.2) :

$$180 + (0.33 \times 180 \times 6.8) = 585$$

La largeur de la terrasse calculée donne une valeur de 2.4 m, et 16.3 m pour la zone de réception (donnée de Flug, 1981).

Ces calculs donnent des résultats satisfaisants à 100 %, par rapport à la méthode de Finkel.

simples qui peuvent y être utilisées et dans la section 5.3 une description de méthodes recourant à l'épandage de l'eau des rivières.

5.2.4 Fossés d'infiltration en courbes de niveau

(appelés aussi diguettes d'absorption totale en courbes de niveau et aridoculture en bandes)

Ce sont des variations sur le thème de la manipulation de la surface du sol. Ces fossés exigent un déplacement de sol moins important que la confection des terrasses de conservation en gradins et ont plus de chances d'être utilisés par de petits cultivateurs ou dans des zones à faible pluviosité. La culture se fait généralement de façon intermittente sur des bandes ou des rangs, la zone de réception étant laissée en jachère. Le principe est le même que pour les terrasses de conservation en gradins - c'est-à-dire recueillir le ruissellement provenant de la zone de réception pour augmenter l'humidité du profil dans la zone cultivée. La figure 5.4 montre des diguettes en courbes de niveau utilisées au Kenya. Des études ont été faites sur le profil d'humidité dans le sol (Smith and Critchley, 1983) en prenant un rapport de 2:1 pour la zone de réception ; une récolte satisfaisante de sorgho a été obtenue avec 270 mm de précipitations seulement. On a estimé que le ruissellement provenant de la zone de réception était de 30 pour cent, ce qui a donné 166 mm d'apport par ruissellement et 432 mm d'eau disponible pour les plantes :

$$(0,30 \times 2 \times 270) + 270 = 432$$

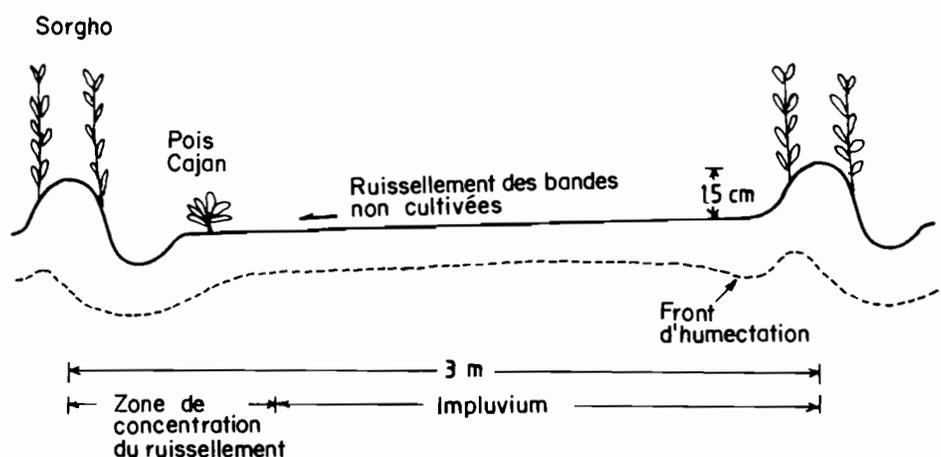


Figure 5.4 : Amélioration de l'humidité du sol au moyen de diguettes contruites suivant les courbes de niveau (d'après Smith and Critchley, 1983)

Sur des sols plus lourds, les diguettes de niveau risquent d'être moins efficaces car l'infiltration est plus lente. Des études faites sur des vertisols en Inde ont montré que les rendements étaient inférieurs à proximité des diguettes, tant en amont qu'en aval, par suite d'engorgement (ICRISAT, 1976).

En Ethiopie on utilise aussi les diguettes de niveau (photo 5.13) en partie pour la conservation des sols et en partie pour la conservation de l'eau. Les diguettes sont construites de niveau avec des cloisons à l'intérieur du fossé. Un muret en pierres est construit sur le côté inférieur de la diguette en terre, dans le but d'atténuer les dégâts si la planche venait à déborder. Cette technique n'a pas donné de très bons résultats et il vaudrait mieux donner un certain gradient aux banquettes si l'on pense qu'elles ne seront pas en mesure de retenir tout le ruissellement (Hurni, 1984). La question des banquettes construites suivant les courbes de niveau est également étudiée dans la section 4.3. La photo 5.14 montre un autre exemple réussi d'utilisation des banquettes de niveau en Ethiopie.

Si les fossés d'infiltration ne suivent pas les courbes de niveau avec précision ou si leur construction présente certaines irrégularités, on risque de voir l'eau s'accumuler en flaques plus ou moins profondes derrière la diguette. Il est possible de remédier à ce défaut en créant des bourrelets plus petits, à angle droit mais, comme avec le billonnage cloisonné, ces bourrelets doivent avoir une hauteur inférieure à celle de la diguette principale pour qu'en cas de débordement, l'eau puisse s'écouler latéralement dans le sens de la courbe de niveau, et ne pas franchir la diguette pour dévaler la pente. Dans certains cas on approfondit le fossé qui collecte l'eau, pour que, s'il se produit des orages exceptionnels, le ruissellement puisse s'écouler sans provoquer de dégâts.

Un des inconvénients des diguettes suivant les courbes de niveau disposées à intervalles donnés le long de la pente, est que la culture a tendance à être inégale, parallèlement au profil d'humidité du sol que montre la figure 5.4. Par ailleurs une petite partie du champ seulement peut être cultivée. Mais au moins, il est possible de cultiver quelque chose alors que, sans ce système les pluies ne permettraient aucune culture. La quantité d'énergie à mettre en oeuvre pour façonner les diguettes est encore considérable mais il existe divers types de billonneurs attelés et des barres porte-outils, plus coûteuses mais plus efficaces (voir section 5.2.1). Même si toute l'opération doit être conduite à la main, cela peut être une solution acceptable s'il s'agit de remplacer un système traditionnel qui a lui-même de gros besoins de main-d'oeuvre. Telle était la situation au Kenya, dans l'exemple cité par Smith et Critchley, où la méthode traditionnelle consistait à creuser profondément le sol à la main pour accroître l'infiltration et le stockage de l'humidité.



Photo 5.13 : Banquettes construites suivant les courbes de niveau en Ethiopie, avec cloisonnement à l'intérieur du fossé et muret de pierres renforçant le talus (H. Hurni)



Photo 5.14 : Les diguettes construites suivant les courbes de niveau au Tigré (Ethiopie), favorisent la croissance du couvert herbacé (J. Bennett, Andes Press Agency)

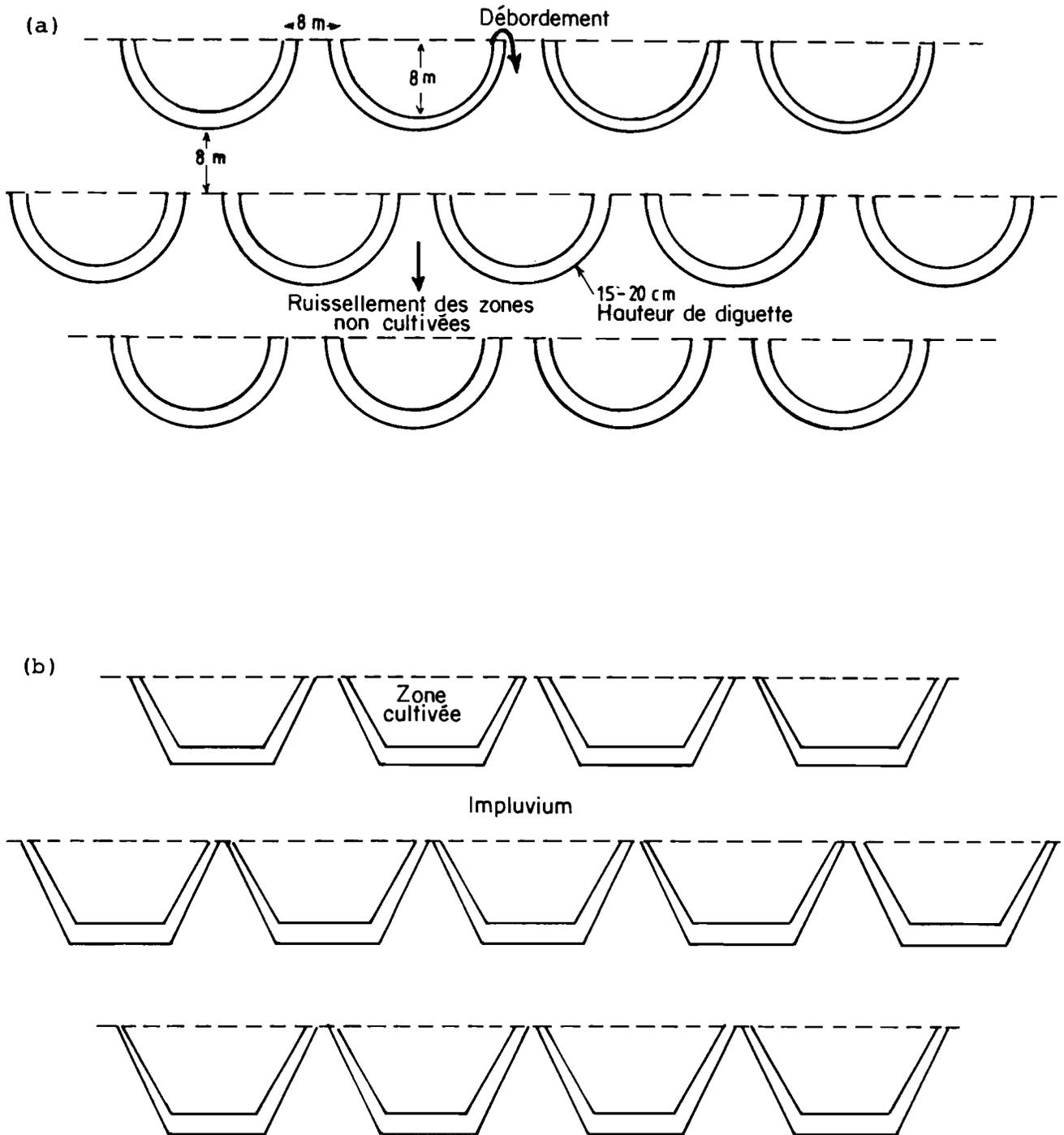


Figure 5.5 : Ouvrages simples conçus pour retenir le ruissellement superficiel

- (a) zones de réception semi-circulaires
- (b) cuvettes d'interception trapézoïdales

Pour emmagasiner l'eau en surface sur une partie du terrain, on peut aussi utiliser de petites zones d'interception semi-circulaires ou des ouvrages de formes rectangulaires ou trapézoïdales, de plus grandes dimensions (voir figure 5.5). Le grand nombre de bourrelets semi-circulaires ou trapézoïdaux indépendants répartit le risque de dégâts si des débordements venaient à se produire en cas de pluies exceptionnellement intenses, ou si l'un des bourrelets venait à céder. Les demi-cercles sont généralement construits à la main et représentent une version agrandie des scarifications utilisées pour favoriser le développement de la végétation sur les pâturages (voir section 7.1 et photos 7.5 et 7.6). Dans plusieurs zones semi-arides de l'Afrique, les cultivateurs se sont montrés plus intéressés par l'utilisation de ces techniques pour des cultures plutôt que pour l'amélioration des terrains de parcours (Smith et Critchley, 1983 à propos du travail fait à Baringo, Kenya ; et Wright, 1984, pour le Burkina Faso). Les banquettes trapézoïdales ont été mises au point par Finkel (1985) à Turkana (Kenya) et peuvent être construites, à la main ou à l'aide de machines. On verra à la section 7.2.2 (photo 7.21) des demi-lunes en pierres utilisées pour des plantations d'arbres.

Les diguettes trapézoïdales peuvent desservir de 0,5 à 2 ha, et sont donc mieux indiquées pour la culture. La zone qu'elles délimitent peut être nivelée pour assurer une distribution plus homogène de l'eau retenue mais ce n'est pas toujours recommandé si la fertilité est concentrée dans la couche superficielle du sol. Un des points de la diguette peut être légèrement abaissé pour servir de déversoir, que l'on protégera par un simple dallage en pierres s'il y a le moindre risque d'érosion. Les banquettes semi-circulaires comme les diguettes trapézoïdales peuvent être disposées en quinconce ; de cette façon l'eau se déverse d'une rangée à l'autre et toutes les cuvettes se remplissent avant que le ruissellement ne quitte le champ. Ces deux types d'ouvrages donnent les meilleurs résultats sur les pentes douces, notamment les diguettes trapézoïdales, qu'il vaut mieux utiliser sur des pentes inférieures à 2 %, car sur des pentes plus raides il faut qu'elles soient plus élevées, ce qui demande davantage de main-d'oeuvre. Un aménagement semblable utilisant des diguettes plus grandes a été testé en Somalie par le Projet de développement agricole de la région occidentale (NWRADP) financé par IBRD. Les diguettes en terre font un mètre de haut et leurs extrémités sont orientées vers l'amont. Ces aménagements construits par le projet avec des moyens mécaniques lourds ont été bien accueillis par les paysans, mais on peut douter de leur intérêt s'il leur fallait les construire à la main ou avec la traction animale vu la faible augmentation de rendement du sorgho.

Dans beaucoup de pays, on utilise, pour intercepter et emmagasiner l'eau, de petites cuvettes assez semblables aux billons cloisonnés dont il a été question dans la section 5.2.2. La photo 5.15 montre comment ces petites cuvettes sont utilisées pour retenir l'eau sur une plantation de thé au Malawi.

Quand la totalité de la surface du sol est ainsi modelée, le rapport entre zone d'impluvium et zone d'infiltration du ruissellement dépend de la configuration du terrain, comme le montrent la figure 5.6 et les photos 5.16 et 5.17. La terre peut être façonnée soit à la charrue (photo 5.17) soit avec un billonneur tiré par des boeufs, (photo 5.18) ou par un tracteur (photo 5.19). Les petites surfaces produisant un ruissellement sont

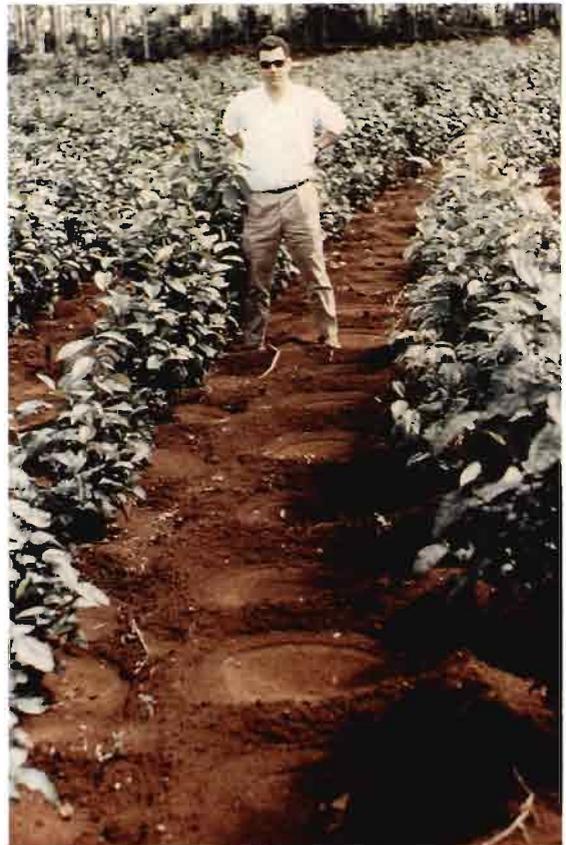


Photo 5.15 : Cuvettes utilisées sur un plantation de thé du Malawi pour accroître la rétention des eaux de surface

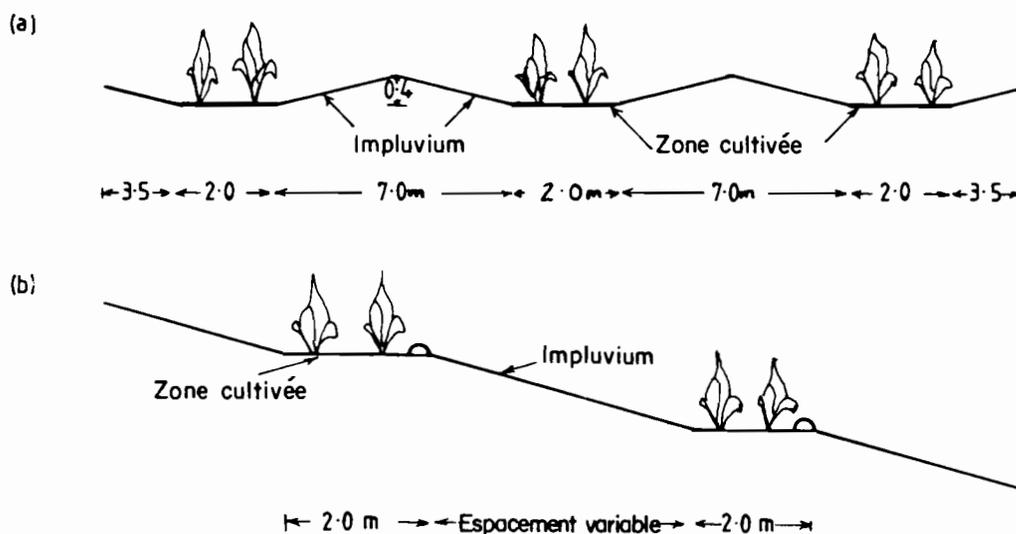


Figure 5.6 : Modelage de la totalité de la surface du sol tant en zones de départ du ruissellement qu'en zone de réception du ruissellement

avantagées par rapport aux grandes aires d'impluvium en ce sens qu'elles vont récolter du ruissellement même durant les petites averses. Cela a déjà été discuté dans la section 5.1.3. A l'Institut central de recherche sur les zones arides, en Inde, sur un dispositif constitué de bandes étroites ayant un rapport de 0,75 (zone d'interception) sur 1,0 (zone cultivée), les valeurs seuils de précipitations capables de produire un ruissellement ont été de 3 à 15 mm pour des surfaces humides et de 7 à 9 mm pour des surfaces sèches. On a constaté qu'il est possible d'accroître le ruissellement au moyen d'applications superficielles de bentonite ou de sédiments provenant de réservoirs, mais il est peu probable que cette mesure soit rentable. Une autre solution qui pourrait avoir des conséquences pratiques intéressantes consisterait à modifier la configuration du terrain pour accroître la pente de la zone de ruissellement (Jain, 1980). Un système consistant à ouvrir des sillons sur un terrain en pente en utilisant des billonneurs asymétriques s'est révélé une réussite dans le cadre d'une production expérimentale de maïs au Mexique (Garduno, 1981), (voir figure 5.7).

La photo 5.20 montre un dispositif étudié au Mexique pour des terrains plats ou en pente très douce. Fairbourn (1975), de son côté, a démontré au Colorado qu'un dispositif présentant le même profil mais sur plus petite échelle avait donné de bons résultats. Il est possible d'utiliser un cloisonnement de faible hauteur pour améliorer la distribution de l'eau, car c'est un moyen d'atténuer le ruissellement accidentel s'il y a une rupture des cordons. Fairbourn a également montré qu'il est possible d'accroître l'infiltration en enterrant les résidus des cultures dans une tranchée étroite pratiquée dans la zone cultivée ; c'est ce qu'il appelle "paillage vertical" mais le fait de creuser et garnir la tranchée représente une complication supplémentaire, aussi cette pratique ne fera-t-elle sans doute pas beaucoup d'adeptes (figure 5.8). Elle rappelle un peu une autre variante traditionnelle, plus simple, dans laquelle on déverse les résidus des cultures dans le fond des sillons ; puis on divise les billons en recouvrant les anciens sillons pour former le nouveau billon sur lequel sera plantée la culture de l'année suivante. Le sous-solage ou scarifiage profond effectué dans le sillon peut aussi être utilisé pour accroître l'infiltration, notamment quand on travaille une couche argileuse indurée ou une couche de latérite.

Le traitement de la zone de ruissellement au moyen d'additifs chimiques (photo 5.20) a peu de chances d'être rentable, mais on peut dans certains cas mettre à profit les propriétés naturelles du sol pour accroître le ruissellement. On pense au Botswana, par exemple, où les sols sableux connus sous le nom de "hardveld" durcissent et s'encroûtent après de fortes pluies. Nilsson a proposé là-bas une méthode qui consiste à façonner des billons permanents de faible hauteur, d'une largeur d'un mètre environ, sur



Photo 5.16 : fossés en courbe de niveau au nord-est du Brésil (H. Lal)



Photo 5.17 : fossés en courbe de niveau dans la province de Kitui, Kenya

Photo 5.18 : Billonneur attelé utilisé pour façonner les billons suivant les courbe de niveau (H. Lal)



Photo 5.19 : un tracteur tirant une billonneuse à lame (H. Lal)

Figure 5.7 : Engin mis au point au Mexique pour former des sillons asymétriques (d'après Garduno, 1981)

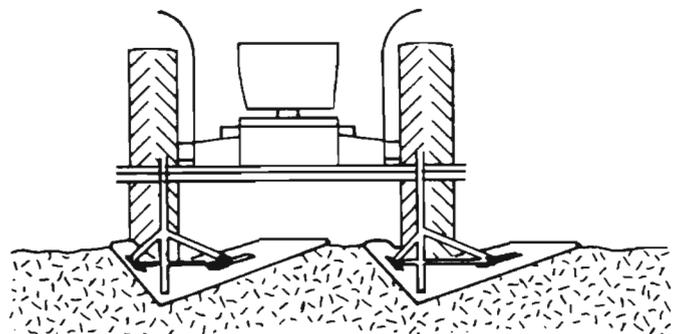




Photo 5.20 : Essais en champs de billons et de sillons suivant les courbes de niveau au Mexique, avec divers traitements de la zone d'interception visant à accroître le ruissellement (S. Gavande)

lesquels on laisse se former cette croûte dure tandis que l'on se limite à labourer, cultiver et planter les bandes étroites de 30 cm de largeur (figure 5.9). Une fois en place, ce système n'exige plus d'entretien.

Macartney et al. (1971), ont expérimenté en Tanzanie une technique de travail du sol en bandes suivant les courbes de niveau, avec scarifiage pour favoriser l'infiltration ; au Botswana, Willcocks, (1981), a montré qu'un travail précis du sol en bandes était plus efficace que d'autres méthodes de culture, notamment si les bandes pouvaient être régulièrement dessinées en suivant les rangs de la culture précédente.

La pratique qui consiste à se contenter de tracer des billons et des sillons suivant les courbes de niveau, sans autre modelage du terrain, a été décrite dans la section 4.2. Il semble qu'il soit plutôt d'usage de planter le maïs et le sorgho sur des billons, et les petites céréales dans les sillons. Wollen, (1974), signale qu'en Pologne on sème le blé, l'orge et le seigle dans de petits sillons, pratique couramment utilisée sur les terres à blé du Kazakhstan, en URSS.

Dans les zones de faible pluviométrie, la zone d'impluvium doit occuper une importante proportion du terrain par rapport à la superficie cultivée, mais il n'est pas facile de concevoir le système qui donnera le meilleur résultat dans tous les cas de variantes des pluies d'une année à l'autre. Lors d'expériences faites en Amérique du Nord, on a essayé une proportion de 33:1 qui, avec 190 mm de pluie, a donné 530 mm de ruissellement disponible pour la zone cultivée, ce qui est plus que nécessaire et plus que la quantité qui pouvait être absorbée. L'année suivante, on a ramené cette proportion à 15:1, mais la pluie fut plus importante (246 mm) avec un fort coefficient de ruissellement qui libéra 300 mm, taux suffisant pour les cultures. Le même rapport 15/1 l'année suivante donna 140 mm de pluie qui ne libéra que 220 mm, ce qui s'avéra insuffisant. Selon les auteurs (Morin et Matlock, 1975), la modélisation mathématique convient pour calculer le rapport optimal compte tenu des conditions variables de sol et de climat mais, comme on l'a déjà dit, quelque soit le système, il faut s'attendre à des résultats extrêmement variables, bons ou mauvais, d'une année à l'autre. Dans une région caractérisée par de faibles pluies hivernales Shanan et Tadmor, 1979, ont utilisé des billons en dents de scie façonnés avec une niveleuse et ont constaté que le meilleur rapport entre la zone de réception et la bande de plantation pouvait varier de 4 à 20. Cet écart extrêmement important laisse à penser que la méthode empirique est peut-être aussi efficace que les modèles mathématiques.

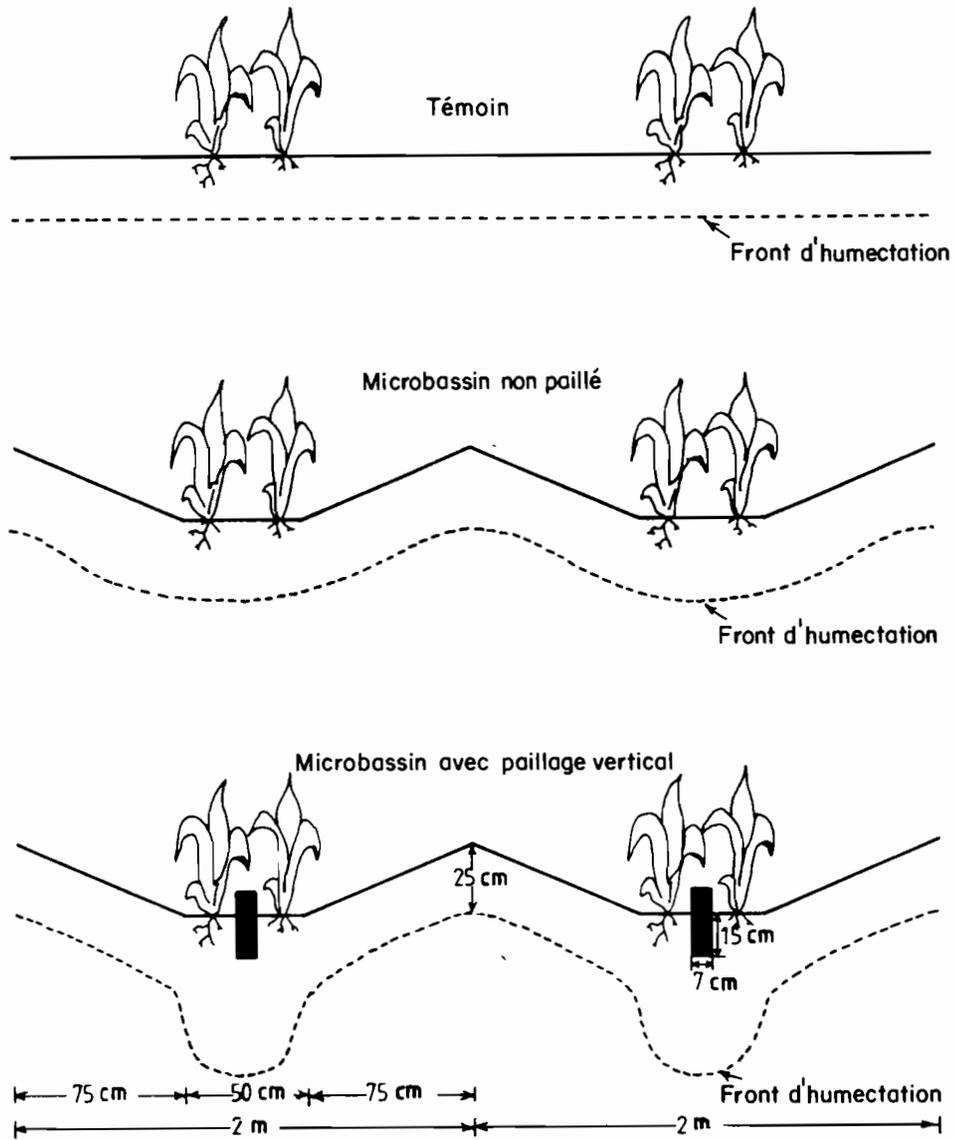


Figure 5.8 : Etudes des effets de billons et sillons construits suivant les courbes de niveau sur l'humidité du sol, ainsi que de l'influence du paillage déposé dans des tranchées à l'intérieur du sillon (Fairbourn, 1975 ; Gardner, 1975)

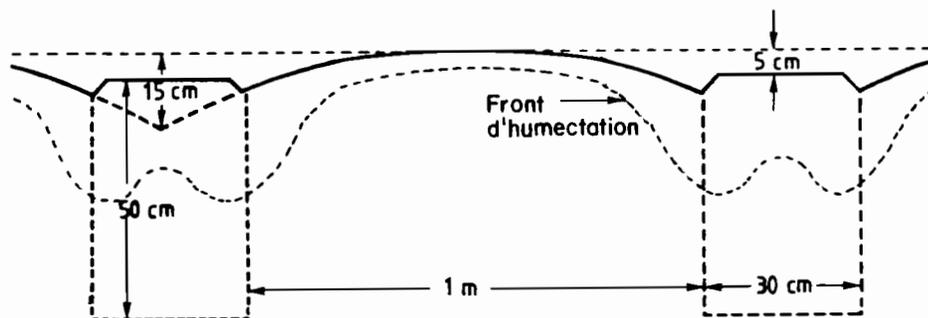


Figure 5.9 : Système de billonnage proposé pour le Botswana : une croûte dure se forme sur le billon non travaillé, ce qui accroît le ruissellement au bénéfice des bandes cultivées

5.3 EPANDAGE DE L'EAU (utilisation des zones d'épandage du ruissellement)

Là encore, nous nous trouvons en présence d'une grande diversité de méthodes applicables à des conditions différentes. Le type de sol influe de plusieurs manières sur le choix de la méthode. Les sols argileux ont de faibles taux d'infiltration et une forte capacité de stockage de l'humidité. Ils se prêtent donc à une submersion profonde suivie de culture ; citons à titre d'exemple les systèmes de réservoirs utilisés en Inde et décrits dans la section 5.3.3. Les sols sableux qui ont une vitesse d'infiltration supérieure et une capacité de stockage moindre, seront plutôt utilisés avec les systèmes de dérivation décrits dans la section 5.3.2. Un sol profond peut absorber de plus grandes quantités d'eau qu'un sol peu profond, lequel nécessitera éventuellement l'installation de déversoirs si l'on veut éviter de noyer la culture.

Le climat aussi influe sur le choix de la méthode. Les climats méditerranéens reçoivent des précipitations hivernales assorties d'une faible évaporation, ce qui rend possible la culture pluviale avec une pluviométrie annuelle moyenne de 100 mm à peine, comme c'est le cas dans le désert du Néguev en Israël (Evenari et al., 1982) et en Tunisie (Damagnez, 1979). En revanche, dans les régions tropicales caractérisées par des pluies estivales et une forte évaporation, la collecte d'eau sera probablement plus utile dans les zones recevant plus de 250 mm de pluie.

La probabilité de pluies de forte intensité influe sur la méthode. Dans le Néguev, les pluies tombent le plus souvent en averses légères ; l'objectif consiste donc à maximaliser le ruissellement (voir section 6.2). En Afrique tropicale, le problème consiste à profiter des crues soudaines provoquées par les violents orages d'été.

Si les pluies et la période végétative ne coïncident pas, il faudra stocker l'eau pour l'utiliser plus tard. Si la période de précipitations et la période végétative coïncident le but recherché sera de pratiquer plusieurs applications d'eau pendant la période de développement de la culture.

5.3.1 Ruissellement naturel

Il existe de nombreux exemples d'utilisation traditionnelle du ruissellement naturel pour augmenter l'apport pluviométrique dans les zones où la pluie seule n'est pas suffisante pour réussir les cultures. Certains auteurs décrivent ce système comme "l'exploitation de microniches dans l'environnement".

En Amérique du Nord, de nombreuses tribus indiennes ont pratiqué pendant des siècles un type de cultures qui mettait en oeuvre des méthodes simples d'épandage des eaux de crue. Par exemple, les Navajo en Arizona utilisent le ruissellement provenant d'affleurements de grès pour irriguer le sol alluvial qui se trouve au pied des collines (Billy, 1981). Avec une pluviosité de 300-400 mm par an, ils obtiennent de bonnes récoltes de maïs, de courges et de melons (figure 5.10a). Ce type d'aménagement ne nécessite généralement pas un gros apport de main-d'oeuvre pour la gestion de l'eau. Il permet de tirer parti de toute configuration favorable du terrain ; par exemple, une route peut faire fonction de drain collecteur (figure 5.10b) et il est possible, dans certaine mesure, d'exploiter le ruissellement en laissant la partie supérieure du champ sans plantation (figure 5.10c) ou en augmentant le stockage de l'eau au moyen d'une simple diguette (figure 5.10d).

Plusieurs autres tribus pratiquent ce mode de culture dans le Sud-Ouest de l'Amérique du Nord ; par exemple, les indiens Hopi cultivent ainsi les trois quarts de leurs terres, encore qu'aujourd'hui la superficie exploitée ne soit plus que le tiers de ce qu'elle était autrefois (PNUE, 1983).

Cette technique culturelle au moyen de méthodes simples, non améliorées, d'utilisation des eaux de ruissellement peut se révéler utile dans quatre types de situation :

- sur des dépôts alluviaux ou colluviaux situés au pied de crêtes ou d'escarpements ;

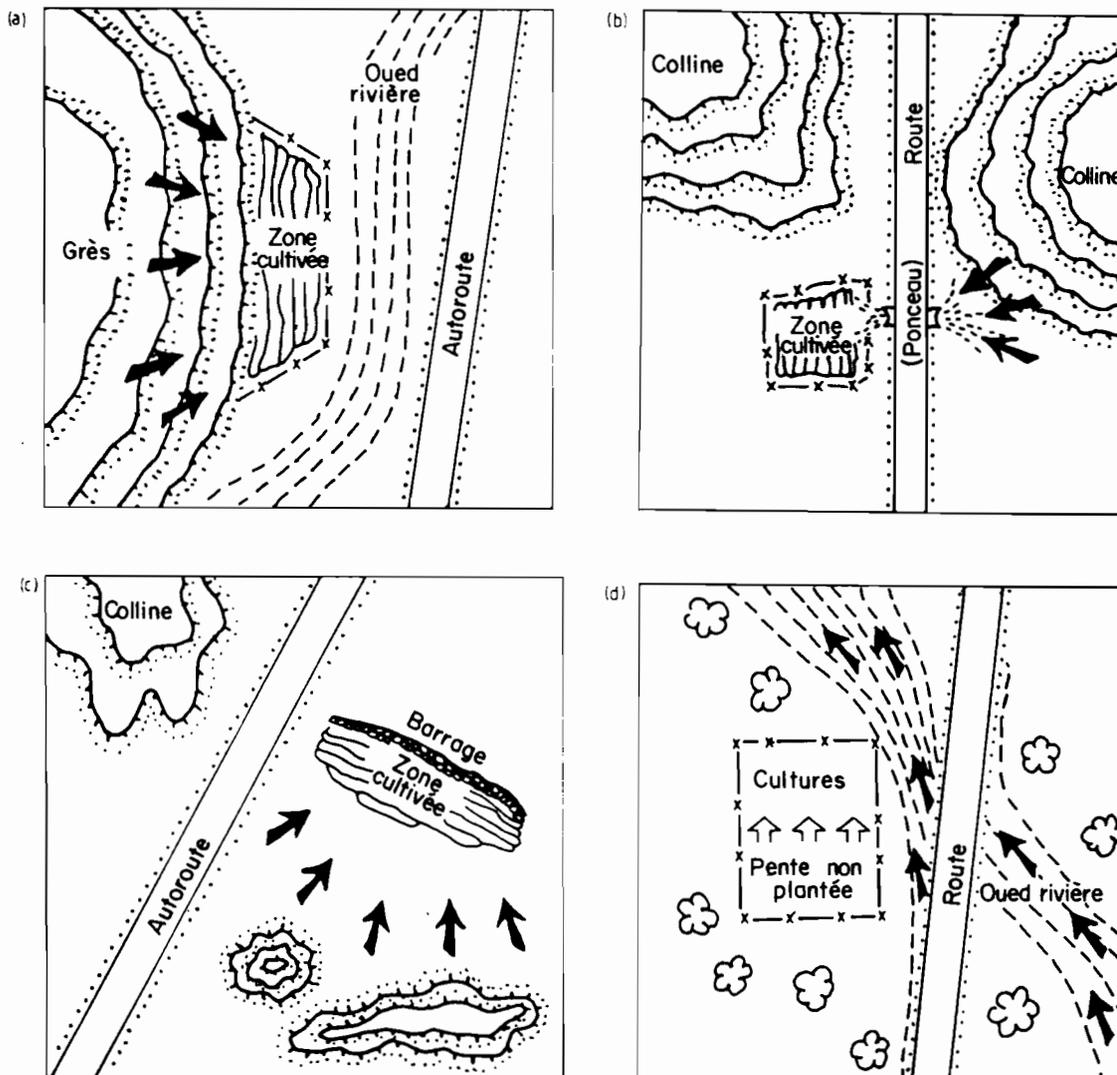


Figure 5.10 : Culture par épandage des eaux de crue en Arizona, telle que la pratiquent les indiens Navano (Billy, 1981)

- (a) cultures alimentées par des eaux de crue naturelles provenant d'une colline de grès
- (b) eaux de crue collectées dans un drain routier et acheminées à travers un ponceau
- (c) plantation après que les eaux de crue aient été retenues par une petite digue
- (d) plantation dans la moitié inférieure d'un champ qui reçoit les eaux de crue provenant de la partie supérieure

- sur les cônes alluviaux, à l'endroit où les cours d'eau quittent la zone des collines pour entrer dans des plaines plus plates ;
- sur les berges des cours d'eau qui sont inondées naturellement par intermittence ;
- là où les eaux de ruissellement se rassemblent dans des dépressions naturelles, telles que les "cuvettes" d'Afrique occidentale.

En Afrique, ces conditions sont toutes exploitées. Morgan (1974) et Hillman (1981) en ont décrit un exemple observé au Turkana (Kenya) où une collectivité essentiellement pastorale cultive, avec moins de 200 mm de précipitations annuelles, de petits champs de sorgho installés dans les trois premières situations mentionnées ci-dessus. L'observation des pratiques traditionnelles et une certaine familiarité avec les conditions locales peuvent être utiles quand on cherche des emplacements possibles pour la réalisation de projets plus ambitieux d'agriculture alimentée par des eaux de ruissellement, comme au Turkana (Cullis, 1985).

Même si les précipitations sont suffisantes pour des cultures pluviales (ce qui suppose en général plus de 500 mm de pluie), il est encore possible d'utiliser les zones de ruissellement pour accroître l'intensité des cultures. Quand on emploie des terrasses de conservation en gradins (section 5.2.3), on utilise des assolements distincts pour la zone d'impluvium et la terrasse d'infiltration du ruissellement. Le même principe s'applique au ruissellement naturel au Maroc (Kutsch, 1982 cité dans Pacey, 1986). Avec des cultures de blé ou d'orge, la densité est de 70-90 plants au m² sur des terres alimentées uniquement par les pluies ; elle passe à 90-120 plants au m² dans les dépressions où se rassemble le ruissellement. Il entre, dans ce système, un élément aléatoire que Pacey a expliqué en ces termes : "la réduction délibérée de la densité végétale entraîne, en termes de rendement, un certain sacrifice en année de précipitations abondantes mais elle accroît en année de sécheresse la certitude d'une production céréalière utile".

Kovda (1961) rapporte deux exemples d'utilisation du ruissellement naturel dans les zones arides de l'URSS. La culture "Kair" est le nom donné aux cultures pratiquées sur les terrasses d'inondation des grands fleuves de l'Asie centrale, où l'humidité du sol provient en partie de la submersion superficielle, mais aussi d'une infiltration latérale provenant du cours d'eau. Un autre exemple est celui de la culture "Khaki" au Turkménistan, où le ruissellement consécutif aux pluies tombant sur les versants montagneux, vient inonder les pentes douces des plaines. On laisse sécher les champs inondés puis on les prépare et on les plante dès que l'on peut les travailler. Carr (1979) signale une pratique analogue en Ethiopie. Dans les vallées du Voito et de l'OMO inférieur, dès que les crues annuelles se retirent, on défriche les plaines d'inondation et on les plante en maïs et en sorgho avec des densités d'ensemencement élevées, qui sont ensuite éclaircies.

5.3.2 Collecte et diversion du ruissellement

Il est décrit, dans la section précédente, quelques utilisations du ruissellement naturel ou non amélioré. Dans la présente section, il sera question de périmètres comportant une certaine manipulation, un aménagement soit de la terre soit du ruissellement. La différence n'est pas très importante, car certains systèmes n'emploient que des ouvrages très rudimentaires. Par exemple, le système de culture avec eaux de crue des indiens Hopi et Navajo du nord de l'Arizona, décrite dans la section 5.3.1 est très semblable à celui que pratiquent les indiens Papago du Sud de l'Arizona qui se servent d'obstacles simples faits de piquets en bois et de broussailles entremêlées pour répartir de façon plus égale les crues naturelles (Nabhan, 1979).

Peu importe que l'agriculture alimentée par les eaux de ruissellement soit ou non un type d'irrigation. Dans le cas des wadis aménagés en terrasses et autres systèmes de gestion des eaux dans les fonds de vallées, l'homme s'emploie à aménager aussi bien la terre que l'eau. La culture de fonds de vallées est une pratique très ancienne et l'on dispose à ce sujet d'une bonne documentation pour la Tunisie et le désert du Néguev en

Israël. Dans les Matmatas du Sud tunisien, le système s'appelle "Gessours". C'est une région où il ne tombe que 100 à 150 mm de pluie, pourtant on y trouve des rangées d'oliviers plantées en travers des fonds de vallées à proximité de petits barrages qui ralentissent les crues et favorisent le dépôt de limon qui forme ensuite une terrasse (photo 5.21). Des cultures de céréales sont faites sur chaque terrasse en amont des oliviers. Cet aménagement est semblable à celui des oueds en terrasse du Sud du Néguev, en Israël (photo 5.22). Dans certains cas, ces anciens périmètres sont aujourd'hui partiellement cultivés par des bédouins qui sont surtout des pasteurs (photo 5.23).



Photo 5.21 : "Gessours" sur des oueds aménagés en terrasses en Tunisie (J. Damagnez)

On connaît au Colorado, un autre exemple d'utilisation soigneusement maîtrisée de l'eau dans les fonds de vallées (Mickelson *et al.*, 1965). Des cuvettes horizontales, de 1 à 3 ha ont été façonnées dans de larges vallées où la pente est inférieure à 3 %. Il y tombe 400 mm de pluie, ce qui suffit pour quelques cultures de céréales ou de sorgho fourrager relativement aléatoires. Durant les fortes averses estivales, les terres cultivées récupèrent sous forme de ruissellement 5 à 10 % des précipitations. Le ruissellement provenant de 150 ha de terres cultivées se répand sur la première cuvette ; quand la hauteur dépasse 100 mm, le surplus déborde dans la seconde cuvette et ainsi de suite. Sur la durée de la campagne, un supplément de 200 mm d'eau assure, sur les cuvettes, de bonnes récoltes grâce auxquelles les frais d'installation peuvent être couverts en 3 à 5 ans. Sur la plupart des périmètres comportant une submersion des cultures, on prévoit généralement des exutoires en cas de débordement et éventuellement pour le drainage car il semble que des cultures en pleine végétation souffrent moins d'un passage lent et continu de l'eau que de la présence d'eau stagnante. D'ailleurs, la plupart des cultures ne supportent une complète saturation que pour un temps assez court.

Certains des anciens systèmes de culture des fonds de vallées du Néguev n'utilisaient que les eaux de ruissellement descendant la vallée, mais la plupart prévoyaient aussi la collecte du ruissellement provenant des collines environnantes. Les

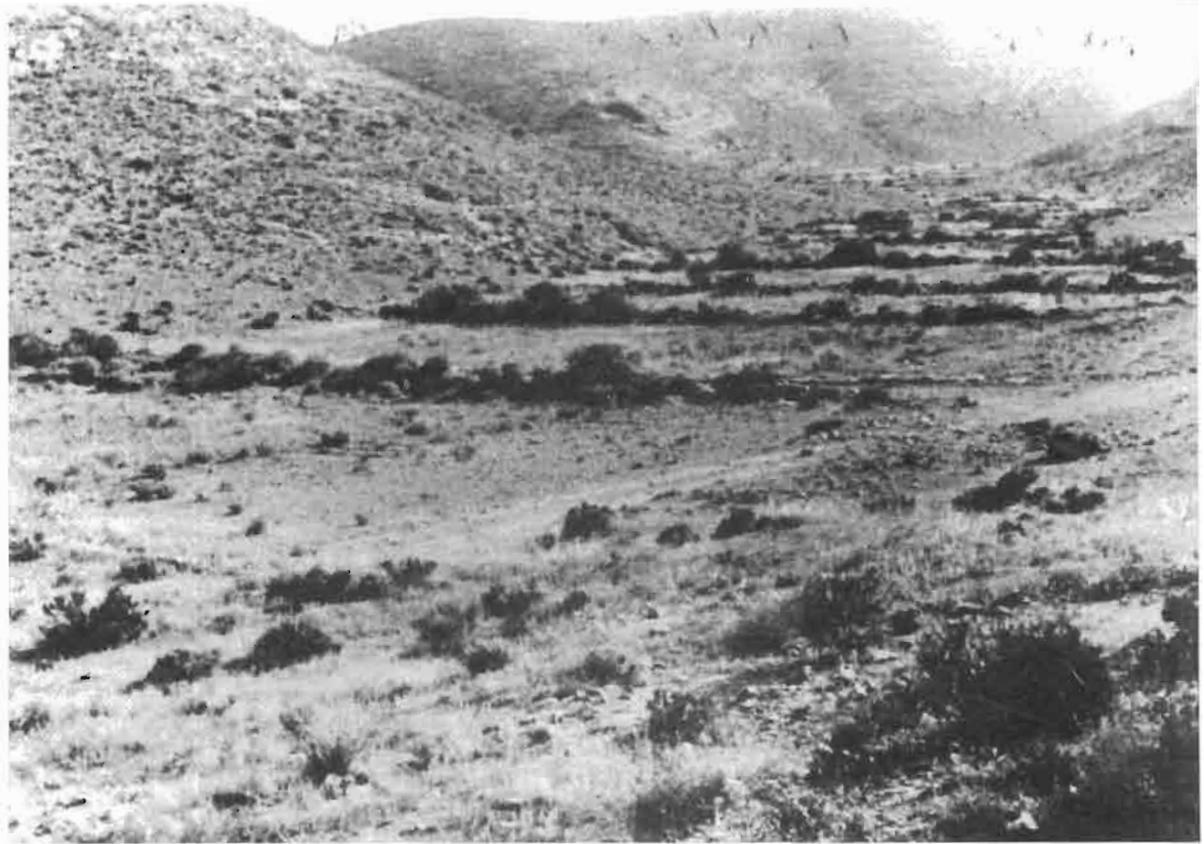


Photo 5.22 : Dans le sud du Négev (Israël), des oueds autrefois aménagés en terrasses et maintenant abandonnés (Me L. Evenari)

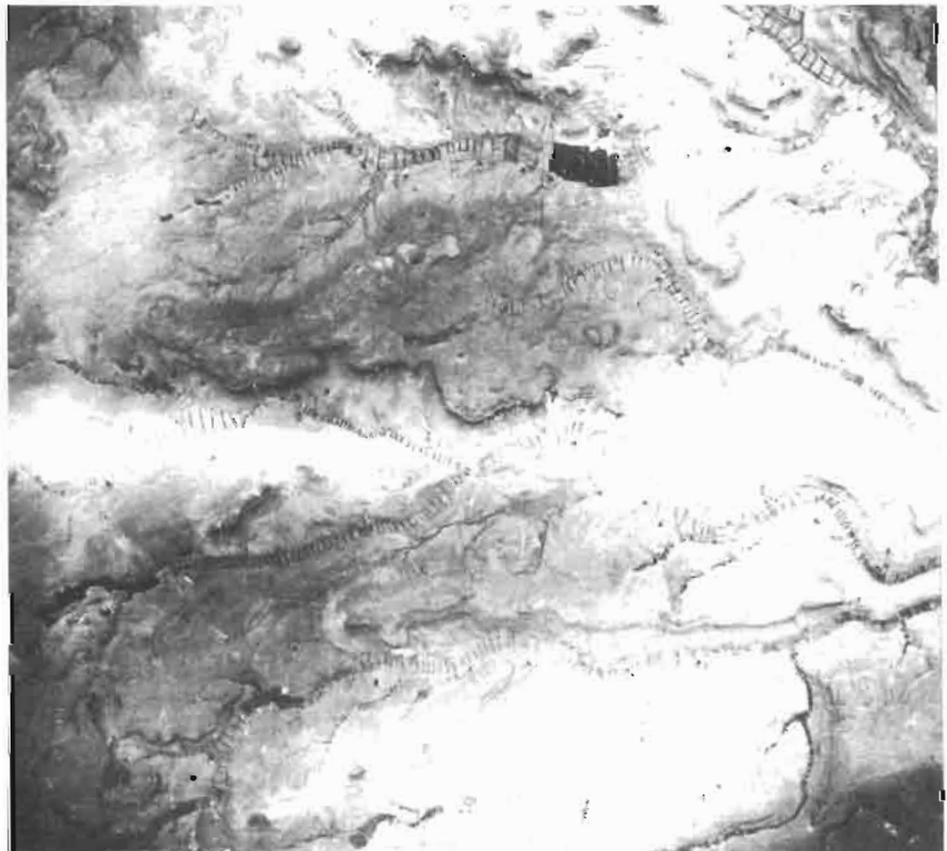


Photo 5.23 :

Vastes aménagements anciens d'oueds dans le Négev (Israël) ; la plupart sont abandonnés mais les terrasses de couleur sombre sont cultivées par les bédouins (Me L. Evenari)

photos 5.24a à 5.24d montrent quelques exemples. Certains utilisaient des méthodes sophistiquées pour favoriser le ruissellement, le collecter dans des rigoles, le répartir entre les divers champs en terrasses. Les universités et instituts de recherche Israéliennes ont conduit pendant vingt ans un fascinant programme de recherche, qui a été splendidement publié (Evenari et al., 1982). L'aménagement de la surface en vue de favoriser le ruissellement consistait à rassembler et amonceler toutes les pierres qui traînaient à la surface du terrain, et à façonner la surface en billons tout à fait semblables aux bassins utilisés aujourd'hui en Australie (voir photo 5.25). Les effets hydrologiques de l'enlèvement des pierres sont expliqués dans la section 6.2.1, et l'effet du billonnage dans la section 6.2.2.



Photo 5.24a : Une ancienne exploitation alimentée par les eaux de ruissellement dans le désert du Néguev a été reconstruite à Avdat (Israël) en utilisant les anciens fossés de collecte du ruissellement que l'on voit à l'arrière plan (Me L. Evenari)

Les systèmes de collecte du Néguev montrent que les principes de l'hydrologie étaient parfaitement compris. Des aqueducs revêtus de pierres servaient à amener l'eau rapidement jusqu'aux exploitations avec un minimum de pertes par infiltration et par évaporation ; les zones de réception correspondant à ces drains avaient une forme longue et étroite de façon à pouvoir récolter les eaux de pluie même durant les précipitations hivernales de faible intensité, habituelles dans cette région. Les systèmes de distribution étaient également de construction simple mais de conception poussée et permettaient de transporter l'eau et de la dériver autour de l'exploitation rapidement et efficacement avec un minimum de main-d'oeuvre.

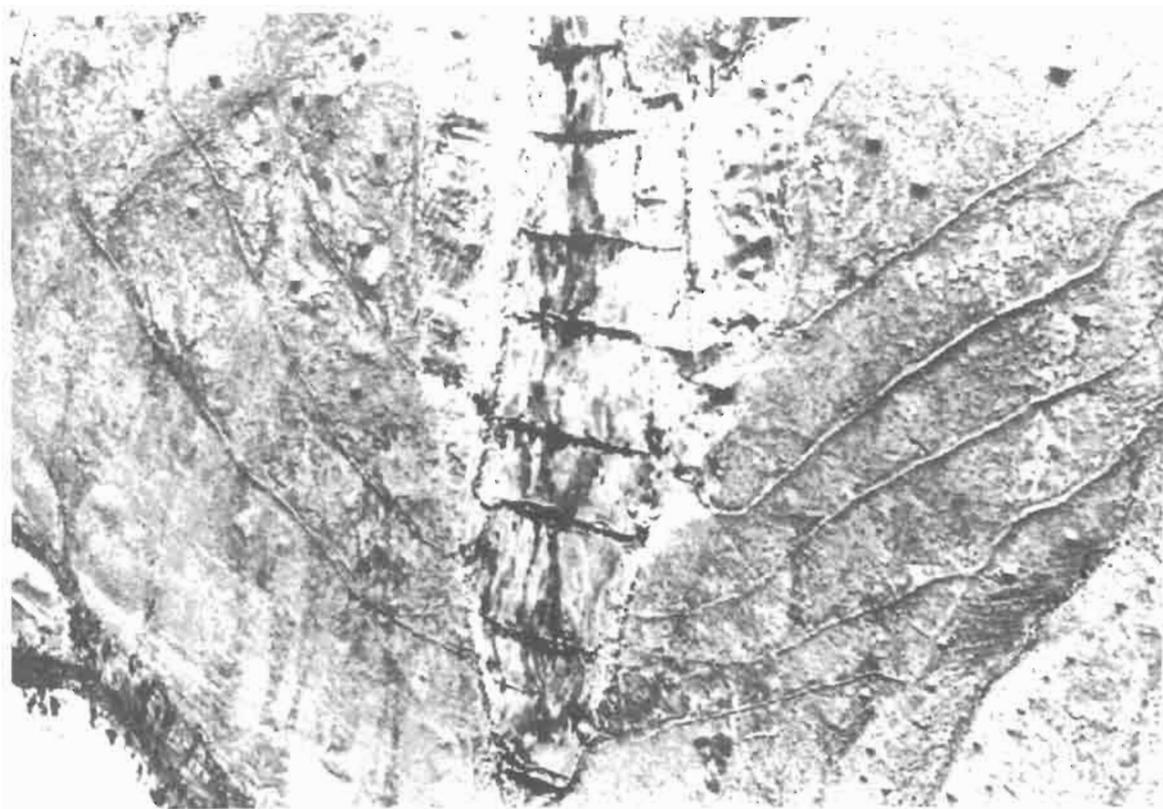


Photo 5.24b : Exploitation agricole près de Shiuta (Néguev, Israël), avec fossés acheminant le ruissellement vers les terrasses cultivées (Me L. Evenari)



Photo 5.24c : Nombreuses exploitations agricoles indépendantes en Israël, chacune avec ses propres fossés de collecte des eaux de ruissellement (Me L. Evenari)



Photo 5.24d : Grande exploitation agricole alimentée par les eaux de ruissellement, avec sur la droite une plantation d'arbres (Me L. Evenari)



Photo 5.25 : Bande de terre remodelée et couverte de gravier pour accroître le ruissellement et l'acheminer vers les champs cultivés dans la vallée, désert du Néguev, Israël (Me L. Evenari)

A la suite des études très encourageantes effectuées dans le désert du Néguev, des essais de culture avec les eaux de ruissellement ont été effectués dans la plaine de Khost (province de Paktia) en Afghanistan. Le terrain y est semblable à celui du Néguev : des collines dénudées et rocailleuses sur lesquelles le ruissellement est recueilli dans des rigoles et acheminé jusqu'à la plaine. Les champs de niveau, entourés de banquettes en terre sont disposés en gradins de faible hauteur, de façon à ce que l'eau descende la pente en passant d'un champ à un autre (photo 5.26). Quand le profil du sol est saturé, on y fait une culture de céréale, combinant de nouvelles irrigations s'il pleut et l'humidité entreposée dans le profil s'il fait sec.

Un autre système ancien de collecte des eaux appelé "meskats" existe dans la région de Sousse en Tunisie, qui reçoit environ 300 mm de pluie. Sur les meilleurs sols, en bas de pente, on cultive des oliviers. En haut des pentes, les sols ont tendance à former une croûte superficielle et produisent donc un ruissellement qui s'écoule le long de zones de réception longues et étroites, d'où l'eau est acheminée jusqu'aux oliveraies, par des rigoles (photo 5.27).

Ces méthodes, mises au point pour des régions qui reçoivent des précipitations hivernales, ne conviennent pas toujours aux tropiques semi-arides. Les pluies d'été y sont plus intenses ; la zone de réception n'a donc pas besoin d'être aussi étendue ; en revanche, il faut prévoir un passage pour l'écoulement en toute sécurité des débits de pointe exceptionnels des ruissellements. La figure 5.11 montre un système qui a été expérimenté sur une petite échelle dans deux zones du Kenya par des projets pilotes, à savoir dans le Baringo et dans la région de Katui, zones arides et semi-arides. Ce système ne s'est pas encore vraiment généralisé auprès des agriculteurs locaux mais comme le gouvernement a pour politique d'attribuer des terres à ceux qui traditionnellement étaient des pasteurs itinérants, il est probable que l'on assistera à une motivation plus forte à l'égard de la culture régulière de parcelles permanentes, laquelle ne pourra se faire sans une forme ou une autre de collecte de l'eau. Un ratio de 5:1 entre zones de réception et les terres cultivées est sans doute correcte. Pour que le système fonctionne convenablement, il est nécessaire de niveler la surface cultivée de façon à ce qu'il n'y ait que peu ou pas de pente latérale le long de chaque terrasse, et seulement une pente douce transversalement pour éviter des écoulement générateurs d'érosion. Grâce à des évacuateurs en pierres sèches installés dans la diguette en terre, l'excédent d'eau s'écoule progressivement le long de la pente vers les terrasses inférieures. Il faut éviter que les crues excessives n'endommagent l'installation, non pas en essayant de maîtriser l'eau une fois qu'elle a atteint la zone cultivée mais en détournant le trop plein vers le drain collecteur. Il est certain qu'un tel système peut fonctionner sur une base expérimentale ou démonstrative ; la question est de savoir si les contraintes de l'évolution de la société le rendront suffisamment attrayant pour des gens qui ne sont pas habitués à un système agricole demandant autant de précision et d'entretien.

Il existe en URSS un autre système d'épandage de l'eau appelé "irrigation liman" qui a été décrit par Kovda (1961). Ce système se compose de structures construites en travers de la pente et appelées remparts de niveau ; description sans doute appropriée car il s'agit de gros ouvrages atteignant 2 mètres de hauteur et 4 ou 5 mètres de largeur (semblables aux "murundum" utilisés dans l'état du Parana au Brésil pour la conservation de l'eau). Parfois ils comportent un trou de vidange qui sert à faire passer l'eau aux niveaux inférieurs, encore qu'un évacuateur ouvert serait semble-t-il une façon plus simple et plus efficace de contrôler le déplacement de l'eau.

En Algérie, vers les années 1960, voyant qu'il serait difficile de juguler les divers méfaits de l'érosion, d'autant plus que les paysans s'opposaient aux banquettes, le service de D.R.S (Défense et Restauration des Sols) a imaginé de construire dans des zones de développement rural des digues de terre de 3-4 mètres de haut et 6 à 8 mètres de large, "indestructibles", qui devaient servir de base à une agriculture intensifiée (Monjauze, 1961). "Ces monstres" n'ont guère changé la physionomie des systèmes agro-pastoraux extensifs traditionnels : les plantations forestières brise-vents prévues sur les cordons ont été broutés et les bandes "cultivables" sont plus désertiques et squelettiques qu'auparavant puisque l'on a raclé la terre fine. Vingt cinq ans plus tard, elles témoignent toujours de cette volonté de s'imposer des techniciens : les orages n'ont pas réussi à les détruire, mais que d'effort dépensé en pure perte (Roose, 1987).



Photo 5.26 : Champs en terrasses alimentés par les eaux de ruissellement provenant de la colline dénudée et caillouteuse que l'on voit à l'arrière plan, Afghanistan (D. Gebauer)



Photo 5.27 : Dans la région de Sousse, en Tunisie, des drains intercepteurs "meskats" acheminent les eaux de ruissellement jusqu'à l'olivieraie (J. Damagnez)

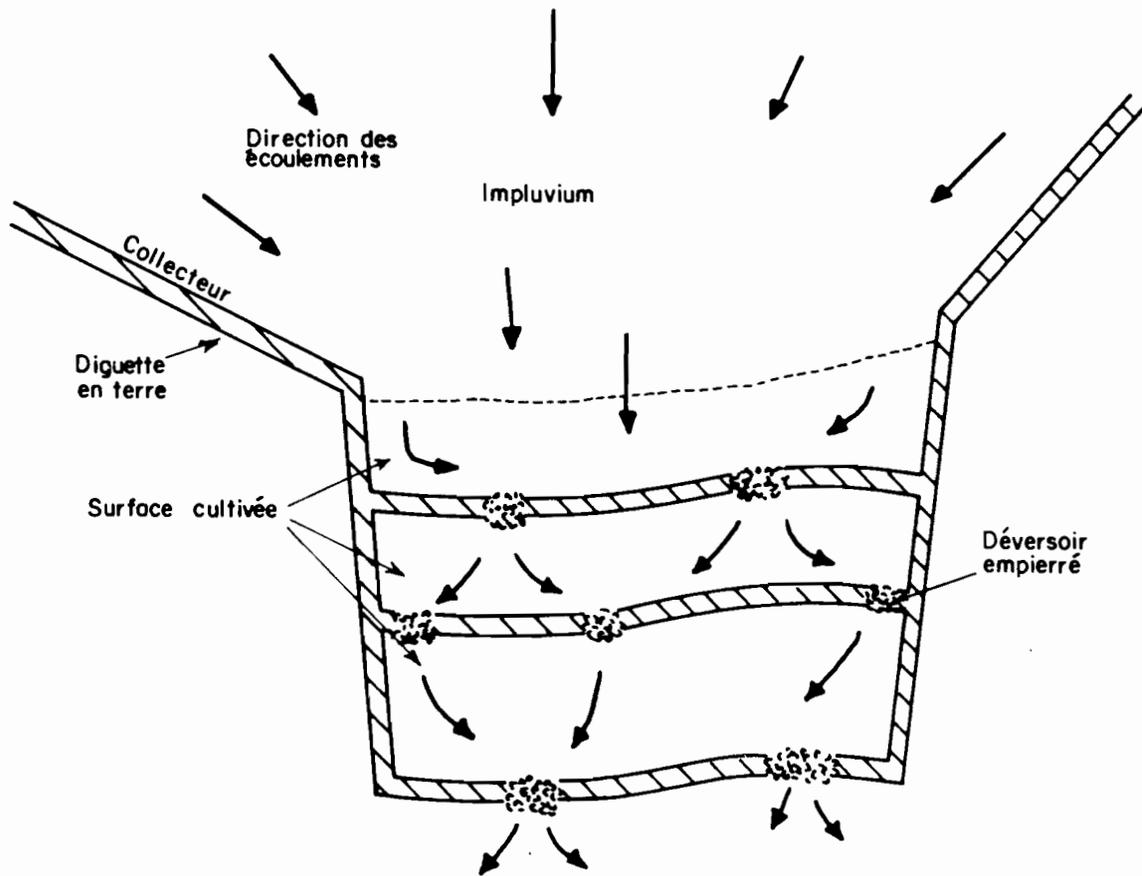


Figure 5.11 : Système de culture alimenté par les eaux de ruissellement, au Kenya (Charnock, 1985)

Le détournement des eaux de ruissellement vers des terrasses de niveau bien préparées est également une méthode ancienne très répandue. C'est le principe même de la riziculture irriguée dans les régions humides où les disponibilités en eau sont garanties, mais on peut aussi y recourir pour tirer parti de disponibilités hydriques intermittentes dans les régions semi-arides. Par exemple, dans les régions arides et montagneuses du Nord du Pakistan, dans le district de Gilgit et la vallée de la Hunza, l'agriculture est entièrement tributaire de la dérivation des eaux de source, des cours d'eau et des eaux résultant de la fonte des neiges et des glaciers, vers des cônes de déjection alluviaux façonnés en terrasses et justement appelés oasis (photo 5.28). Des prouesses techniques étonnantes ont été accomplies pour faire passer les "khuls" (ou rigoles d'amenée) à travers des éboulis instables ou pour les tailler laborieusement à la main le long des falaises (photo 5.29).

Un autre exemple intéressant de dérivation de l'eau vers des terrasses nous vient de la région de Manakhah, dans la République Islamique du Yémen (Damagnez, 1979 ; Vogel, 1985). Dans cette région où les précipitations annuelles sont de 400-600 mm, des terrasses de niveau ont été construites en gradins sur des pentes raides à flanc de colline, avec des murets en pierres de 2-3 mètres de hauteur et des champs en terrasses de 2 à 10 mètres de largeur (photos 5.30 et 5.31). Le ruissellement qui provient de terres situées plus haut, ni cultivées ni terrassées, est transporté jusqu'aux terrasses au moyen de rigoles creusées en diagonale qui rappellent celles du Négev. Des canaux revêtus de pierres transportent l'eau progressivement vers le bas à travers tout le réseau de terrasses, certains canaux passant sous les terrasses. Ce système perfectionné et efficace tombe actuellement en ruine (voir photo 4.18) car la main-d'oeuvre a émigré vers les pays producteurs de pétrole du Moyen-Orient. Un système semblable existe dans la République Islamique du Yémen où il s'appelle "irrigation sayl" ; il consiste à détourner les eaux de crue des oueds vers des terrasses de niveau.



Photo 5.28 : Une oasis de la vallée de la Hunza (nord du Pakistan). Les "Khuls" sont les lignes horizontales que l'on voit à flanc de colline



Photo 5.29 : Canaux d'amenée ou "khuls" aménagés le long des pentes abruptes



Photo 5.30 : Cultures en terrasses utilisant les eaux de ruissellement provenant des collines, République Islamique du Yémen (J. Damagnez)

L'aménagement des pâturages sera traité au chapitre 7 mais il est intéressant de mentionner ici un système d'épandage de l'eau utilisé en Australie. Dans la Nouvelle-Galles du Sud (Australie), le ruissellement provient de crêtes érodées et dégradées ; il est absorbé par les terres en pentes douces qui se trouvent au-dessous de la crête, mais ne produit qu'une végétation broussailleuse non comestible, parfois appelée "mulga" d'après l'arbuste dominant, *Acacia aneura*. Pour exploiter plus efficacement les précipitations, on se sert de deux méthodes. L'une consiste à favoriser l'installation d'un couvert herbacé utile en retenant l'eau sur les crêtes au moyen de petits sillons façonnés suivant les courbes de niveau (voir description à la section 7) (Cunningham, 1967 et 1975). L'autre méthode consiste à intercepter le ruissellement au moyen de drains et à l'acheminer jusqu'à l'endroit où il peut être répandu pour alimenter des cultures fourragères et des pâturages. Le drain d'interception a son bourrelet sur le côté inférieur ; le drain d'épandage a un cavalier du côté amont, de sorte que l'eau s'écoule uniformément par dessus la bordure aval (figure 5.12). En périodes de gros débits, l'eau s'accumule également sur le côté amont de la rigole d'épandage de sorte qu'il faut prévoir des ouvertures pour que cette eau puisse s'écouler dans la rigole d'épandage (Quilty, 1972).



Photo 5.31 : Cultures alimentées par les eaux de ruissellement, République Islamique du Yémen (J. Damagnez)

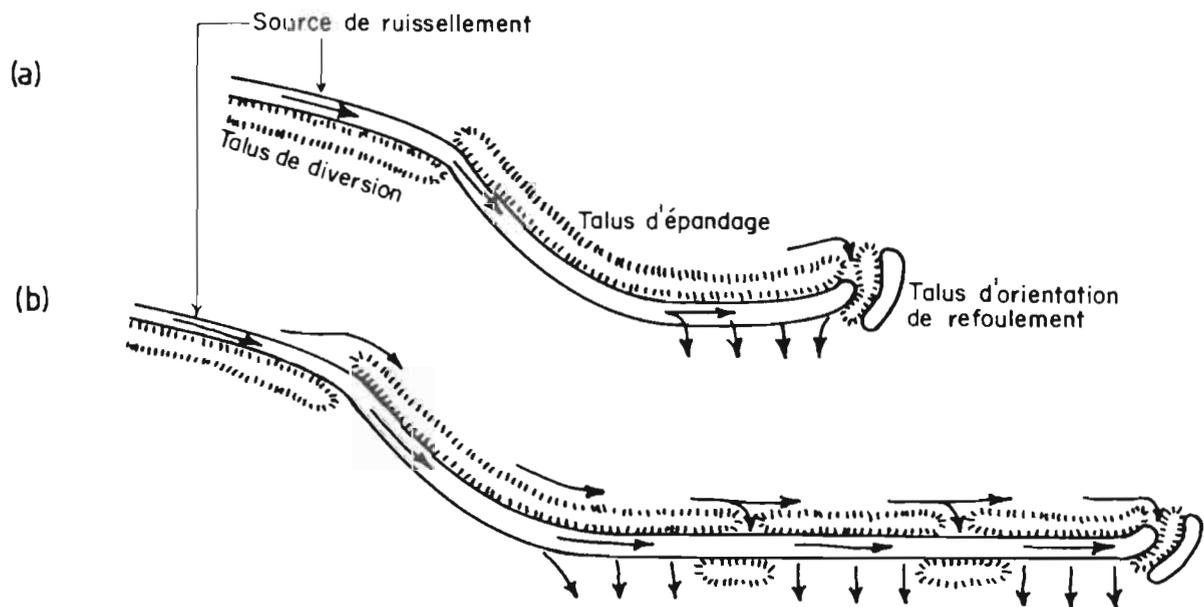


Figure 5.12 : Dérivation et épandage des eaux de ruissellement en Australie (d'après Guilty, 1972)

- (a) pour de faibles débits, la diguette d'épandage est ininterrompue
- (b) pour de plus gros débits, le ruissellement s'accumule en amont de la diguette d'épandage, laquelle comporte cependant des ouvertures par où l'eau passe dans le canal. Dans les deux cas, une diguette se trouve à la fin de la dérivation pour diriger l'écoulement du ruissellement détourné

5.3.3 Méthodes d'inondations par les eaux de crue

Dans la section 5.3.1 il a été décrit quelques exemples de crues de courte durée se produisant naturellement en général sur des plaines d'inondation et des fonds de vallée. Nous allons maintenant décrire des systèmes dans lesquels les eaux de crue s'accumulent et sont retenues suffisamment longtemps pour saturer le sol et pouvoir faire pousser une culture avec l'humidité emmagasinée dans le sol.

Au Soudan, des systèmes simples de petites dimensions sont utilisés. Sur des terrains en pente douce, des levées de terre appelées "teras" servent à collecter et à retenir le ruissellement superficiel ; quand le sol est imbibé d'eau, un mil à cycle végétatif court qui mûrit en 80 jours est semé (Pacey, 1986 p.131). Dans le Nord-Est du Brésil, région semi-aride, le CPATSA organisme gouvernemental de recherche, installé à Petrolina, a étudié une méthode similaire et mis au point des systèmes de diguettes de forme et de taille optimales. Il recommande aussi des méthodes de culture permettant d'utiliser au maximum l'humidité emmagasinée, le plan de culture pouvant être modifié en fonction du volume des précipitations et du ruissellement emmagasiné (EMBRAPA, 1981). Les zones inondées sont appelées "vazantes".

En Inde, l'emploi de diguettes suivant les courbes de niveau pour retenir les eaux de ruissellement s'est soldé à la fois par des succès et des échecs. Utilisées principalement comme mesures de conservation des sols et des eaux dans des zones raisonnablement arrosées (750 à 1250 mm) constituées de vertisols moyennement profonds, on s'est aperçu que les inconvénients résultant de l'engorgement du sol à proximité de la diguette, tant en amont qu'en aval, l'emportaient sur l'avantage de pouvoir compter sur l'humidité emmagasinée pour améliorer la récolte en année sèche (ICRISAT, 1975). Par contre, dans des zones moins bien arrosées comme le district de Siwana dans l'Ouest du Rajasthan, la méthode a donné de meilleurs résultats. Avec une pluviosité d'au moins 250 mm, des diguettes construites suivant les courbes de niveau et d'une hauteur d'à peine 0,3 m divisent la terre en bandes qui sont progressivement inondées sous 0,2 m d'eau pendant la mousson. Quand les pluies cessent, l'eau emmagasinée s'infiltré et on sème une culture d'hiver.

Dans les zones semi-arides de l'Inde, de grands périmètres d'irrigation par les eaux de ruissellement ont été exploités pendant des centaines d'années, certains avec des formes perfectionnées de maîtrise de l'eau et d'aménagement des terres. Dans le Bihar et l'Uttar Pradesh, il existe des milliers de "ahars" couvrant plus de 800 000 ha au total. Des diguettes en terre de faible hauteur sont construites pour retenir les eaux de ruissellement pendant la mousson, même si la pente est très faible (parfois 0,01 pour cent à peine), l'eau qui s'accumule sur une hauteur de 1 m refluera sur plusieurs kilomètres, de sortes que de vastes étendues seront couvertes. La plupart des "ahars" n'ont qu'une superficie submergée inférieure à 500 ha, mais certains atteignent 4000 ha (Kolarkar *et al.*, 1980 et 1983). Le volume d'eau emmagasinée est moins important que la superficie submergée. Le sol doit avoir une épaisseur et une capacité de rétention suffisante pour pouvoir stocker assez d'eau pour supporter une culture de cinq mois faite pendant la période "rabi", c'est à dire pendant la campagne hivernale sèche, succédant à la campagne "kharif" qui correspond à la mousson d'été.

La diguette de retenue n'a généralement pas plus de 3 mètres de hauteur mais elle peut suivre la courbe de niveau sur plusieurs kilomètres de longueur, dans certains cas jusqu'à 10 kilomètres. Le système comprend normalement un déversoir de grande largeur qui sert d'évacuateur de secours ; la crête du déversoir généralement à enrochement se trouve à un mètre au dessous du sommet de la digue, ce qui laisse une revanche d'un mètre pour le mouvement des vagues. L'évacuateur de secours est nécessaire d'une part parce qu'il peut y avoir une forte averse quand le réservoir est presque plein, et d'autre part parce que les "ahars" sont généralement construits en série dans le sens de la pente et que la défaillance de l'un d'entre eux mettrait en péril tous ceux qui se trouvent en aval.

Il est courant, aussi, d'installer des ouvrages en béton dotés de vannes métalliques pour pouvoir, si nécessaire vider rapidement le réservoir à la fin des pluies. L'eau libérée peut être recueillie dans l'ahar suivant. Parfois, des tuyaux sont posés en travers de la digue pour pouvoir réutiliser une partie de l'eau évacuée pour l'irrigation.

Le blé d'hiver est la culture principale, que l'on plante dès que les terres inondées sont suffisamment asséchées : il pousse ensuite sur l'humidité emmagasinée. On fait parfois une culture secondaire pendant la mousson d'été, quand la terre est submergée, en utilisant une variété de riz appelé "riz flottant" car il peut pousser dans l'eau stagnante. Cette technique qui consiste à faire une culture de riz flottant suivie d'une deuxième culture quand l'eau s'est retirée est également pratiquée en Thaïlande.

Ce système a un avantage secondaire pour les sols de ces zones semi-arides qui ont souvent tendance à se saliniser : la submersion par les eaux de crue permet de maîtriser ce phénomène, grâce à un lessivage régulier. L'infiltration de volumes d'eau considérables peut aussi avoir pour effet d'élever le niveau général de la nappe phréatique au voisinage des ahars, ce qui améliore la recharge des puits peu profonds.

Dans le district de Jaisalmer, au Rajasthan, il existe une autre forme de culture grâce aux eaux de crue (Kolarkar et al., 1983). Le relief y est plus accidenté et la méthode consiste à construire une digue en terre au travers de la vallée pour intercepter et emmagasiner le ruissellement et le limon qui proviennent des collines dénudées avoisinantes. On les appelle des bassins de submersion ou "khadins" (figure 5.13). Le district de Jaisalmer compte plus de 500 de ces bassins, dont la superficie submergée dépasse 12 000 ha. Le coefficient d'interception est habituellement d'au moins 15:1 et les bassins sont conçus pour se remplir avec 75-100 mm de précipitations, dans une zone où la pluviosité annuelle, quoique extrêmement variable, est de 165 mm. Les caractéristiques de construction sont essentiellement les mêmes que pour les ahars, c'est-à-dire que le bassin est équipé d'un large déversoir de secours et de vannes pour évacuer l'eau. La hauteur d'eau emmagasinée est de 0,5 à 1,25 m ; elle disparaît généralement par infiltration et évaporation dès le début du mois de novembre ; on sème alors la culture d'hiver qui est soit du blé d'hiver soit une légumineuse à graines *Cicer arietinum* (pois chiche). Il existe au Pakistan des systèmes analogues de culture avec les eaux de crue que l'on appelle "sailabas" et "kuskabas".

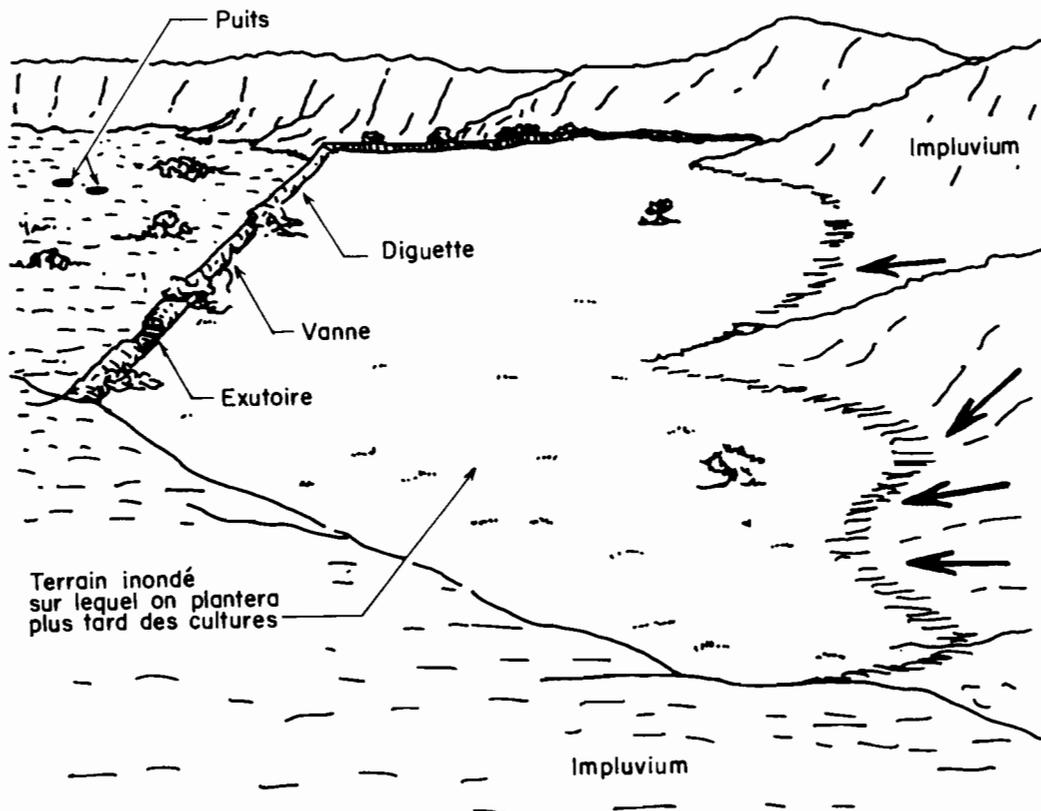


Figure 5.13 : Schéma d'un "khadin" ou bassin de submersion en Inde (d'après Pacey, 1986)

La plupart des systèmes alimentés par les eaux de crue ont accessoirement pour avantage de favoriser le lessivage des sels par l'eau emmagasinée et d'améliorer le rendement des puits situés en aval.

5.3.4 Dérivation des eaux de crue

On a traité, dans la section 5.3.2 de la dérivation des eaux de ruissellement. La présente section traite de la dérivation et de l'épandage des eaux de crue et autres débits intermittents.

La dérivation des eaux de crue hors du lit naturel d'un oued suppose généralement quelques ouvrages, barrages ou déversoirs pour détourner l'eau. Sur de petits périmètres, des dérivations simples peuvent être construites chaque année en pierres et galets, parfois enveloppés de grillage métallique ou soutenus au moyen de piquets et de brousaille s'il y en a. Il peut être raisonnable de ne consacrer qu'un effort limité à la construction de ces ouvrages si, comme cela est probable, ils ont toutes les chances d'être périodiquement emportés par des crues soudaines ; un exemple pris au Yémen est décrit dans la section 4.1.4. Il peut arriver aussi que les crues endommagent le fossé dans lequel l'eau est transportée, à moins que l'on ne prévoie des dispositifs de sécurité pour évacuer l'eau qui s'accumule lors de crues importantes. Pour éviter ce genre de problèmes, on utilise en Inde depuis des siècles des canaux alimentés au fil de l'eau appelés "pynes". On perce dans la berge de la rivière, un canal dont le lit se trouve à un niveau nettement plus haut que celui du cours d'eau. En période de basses eaux, le canal est à sec ; mais quand la crue monte, le canal de dérivation commence à fonctionner. Ce système ne nécessite aucun ouvrage dans le cours d'eau ou le canal. Il est largement utilisé dans la province du Sind, au Pakistan, pour recueillir les eaux provenant de l'Indus et de ses affluents pendant la période des crues qui va d'avril ou mai à septembre. Le gradient des canaux de distribution est légèrement plus faible que celui du lit de la rivière, pour contrôler plus facilement les eaux de dérivation. Cela signifie d'ailleurs qu'il se produit un important dépôt de sédiments, notamment en tête du canal, et qu'un nettoyage périodique est indispensable. Il faut aussi prévoir une certaine maîtrise des eaux de dérivation, qui s'obtient généralement au moyen d'un régulateur installé à plusieurs kilomètres de la rivière. Au-delà de ce point, la maîtrise et la distribution de l'eau se font comme sur tout autre périmètre d'irrigation de surface, si ce n'est que l'écoulement est saisonnier et qu'il est utilisé pour une submersion importante ne nécessitant pas un réglage très précis.

L'autre possibilité consiste à détourner les eaux de crue de leur voie d'écoulement en relevant le niveau de l'eau au moyen d'un déversoir ou barrage quelconque. Ces ouvrages peuvent être soit temporaires et renouvelables sur les périmètres simples, soit permanents. Sur tous les périmètres alimentés par dérivation des eaux de crue les problèmes à résoudre sont les suivants :

- dommages causés aux ouvrages de dérivation par des crues-éclair ;
- maîtrise et épandage des eaux de crue détournées ;
- dépôt des sédiments entraînés par les eaux de crue.

Dans certains cas, la sédimentation peut être considérée comme bénéfique ; citons l'irrigation par les eaux de crue dans la vallée du Nil, ou l'utilisation en Chine des eaux de crue des rivières chargées de limons ; c'est ce qu'on appelle l'atterrissement (warping), considéré comme faisant partie des moyens d'entretenir la fertilité. Les eaux de fonte des glaciers de l'Himalaya, chargées de mica, sont utilisées pour accroître le volume physique de sol en épandant l'eau sur des lits de gravier. Mais d'autre part, un dépôt excessif de sédiments peut entraîner d'inopportunes modifications de la texture du sol ou diminuer la production des terres herbagères.

Un autre exemple de système à grande échelle de dérivation des eaux de crue vient de la République Islamique du Yémen, où les vallées déversent leurs eaux d'écoulement dans le désert de la Tihama qui borde la mer rouge au moyen d'ouvrages de dérivation extrêmement élaborés tel que celui que l'on voit sur la photo 5.32 (Dagnez, 1979). La photo 5.33 montre une autre variante des grands systèmes d'utilisation des eaux de crue dans laquelle des ouvrages servent à maîtriser les eaux de crue après débordement



Photo 5.32 : Ouvrage de dérivation des eaux de crue dans la plaine de la Tihama, République Islamique du Yémen (J. Damagnez)



Photo 5.33 : Ouvrage de maîtrise des eaux de crue dans la plaine du Niger, Mali (J. Hartley, Oxfam, EuroAction)

naturel du Niger. La photo 5.34 montre un exemple dans lequel on utilise les eaux de crue pour inonder une oliveraie à Sfax (Tunisie) dans une zone qui reçoit 150 mm de pluie par an.



Photo 5.34 : Dérivation des eaux de crue pour inonder une oliveraie à Sfax, Tunisie (J. Damagnez)

La dérivation des eaux de crue peut aussi se pratiquer sur une plus petite échelle, comme le montre la figure 5.14 qui représente un intéressant projet réalisé au Tigré, en Ethiopie. L'eau est tout d'abord détournée de la rivière puis distribuée au moyen d'un réseau simple d'ouvrages construits en pierres locales (voir photos 5.35 et 5.36). Ce projet de développement est parrainé par une association charitable britannique appelée War on Want ; il se poursuit actuellement. Sur un projet pilote au Turkana (Kenya), il existe un périmètre analogue que l'on voit représenté sur la figure 5.15. Ce projet pilote a donné de bons résultats pendant une courte période mais a été très vite abandonné, d'abord parce que le déversoir s'est envasé et ensuite parce que la rivière a changé de cours. Un des principaux problèmes que pose l'introduction de périmètres de ce genre est que la culture permanente sur des sites sédentarisés ne fait pas partie du système agricole traditionnel, de sorte que les cultivateurs sont assez peu intéressés et guère motivés à l'égard de l'entretien périodique que nécessite ce genre d'installations. Il existe néanmoins quelques périmètres indigènes alimentés par épandage des eaux ; Pacey, (1986), en cite quelques exemples observés dans la zone sahélienne qui s'étend du Sud de la Mauritanie jusqu'au Soudan et à la Somalie en passant par le Niger. Dans une étude commanditée par le FIDA (1986), on trouve d'autres exemples de méthodes indigènes de conservation des sols et des eaux appliquées en Afrique subsaharienne.

On verra au chapitre 7 quelques exemples de dérivation des eaux de crue en vue d'améliorer les pâturages.

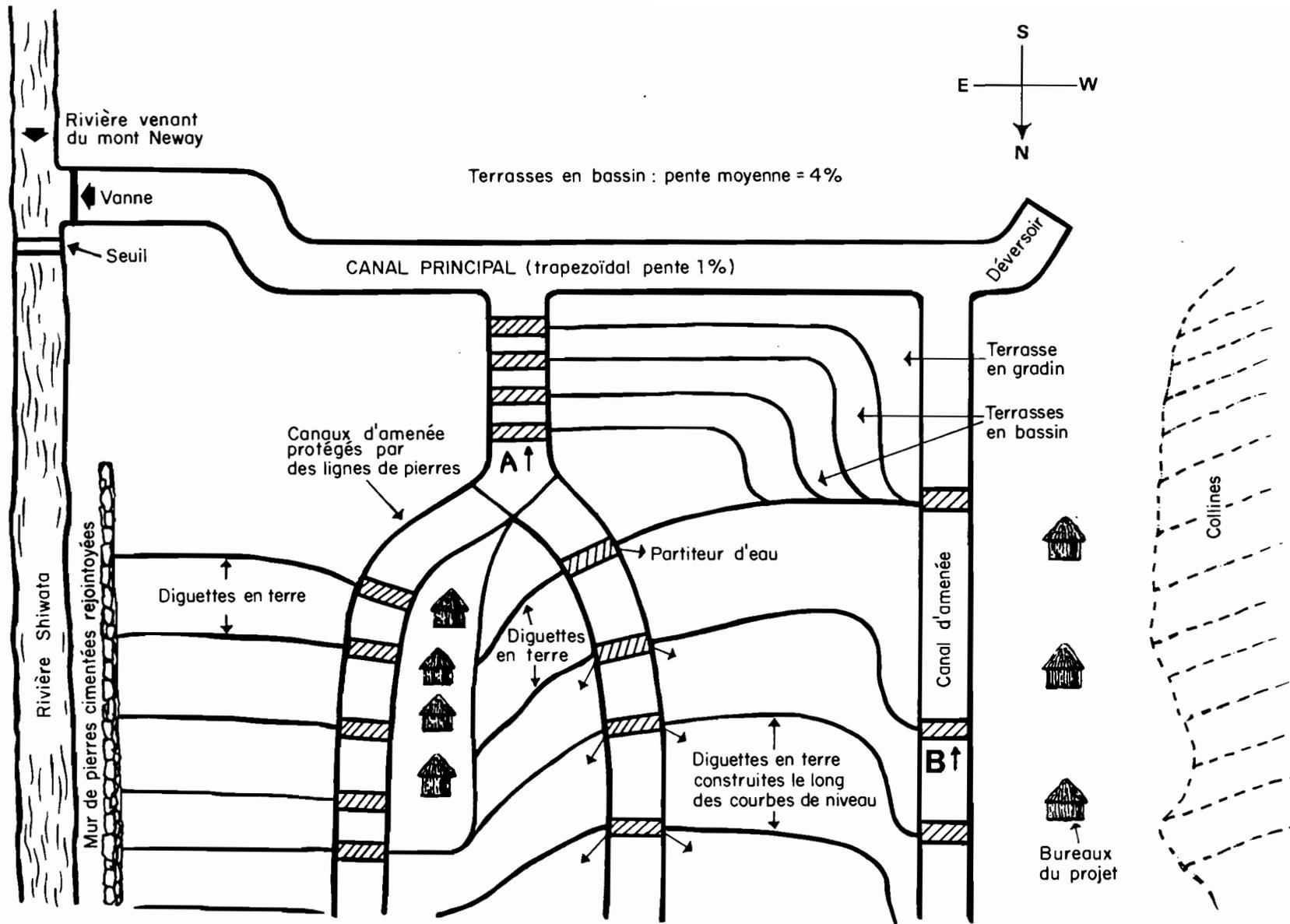


Figure 5.14 : Petit périmètre d'irrigation alimenté par dérivation des eaux de crue au Tigré, Ethiopie (Bennett, 1985)



Photo 5.35 : Ouvrages de dérivation des eaux de crue au Tigré, Ethiopie. Vue prise au point A de la figure 5.14 (J. Bennett, Andes Press Agency)



Photo 5.36 : Le canal de jonction qui amène l'eau jusqu'aux terrasses inférieures ; vue prise au point B de la figure 5.14 (J. Bennett, Andes Press Agency)

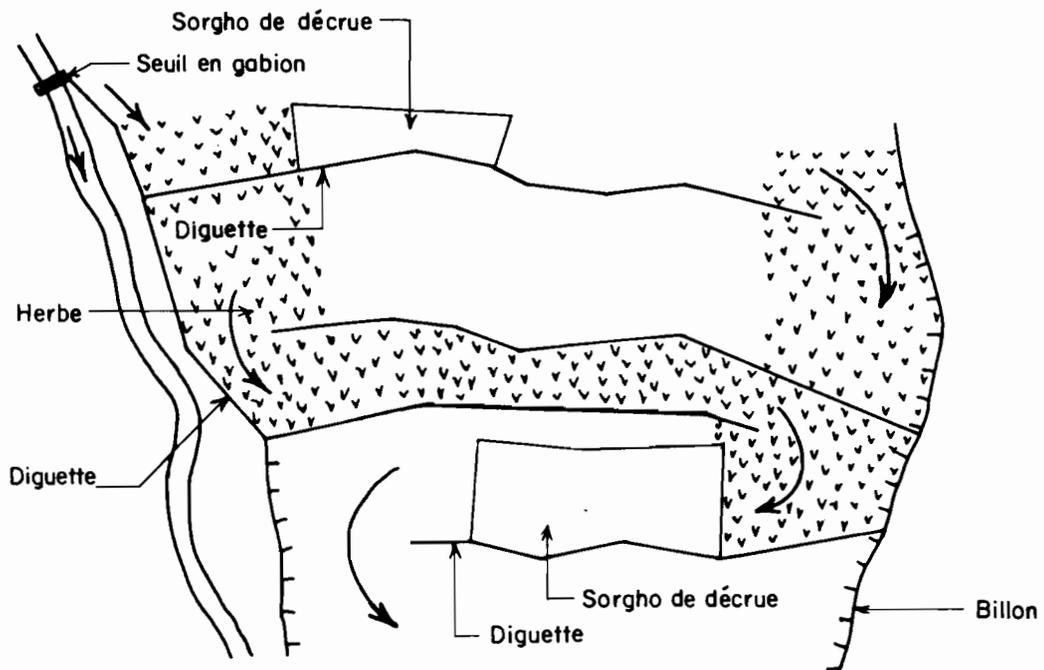


Figure 5.15 : Projet pilote au Turkana, Kenya, dans lequel les eaux de crue sont détournées vers des pâturages et les terres cultivées (Pacey, 1986)

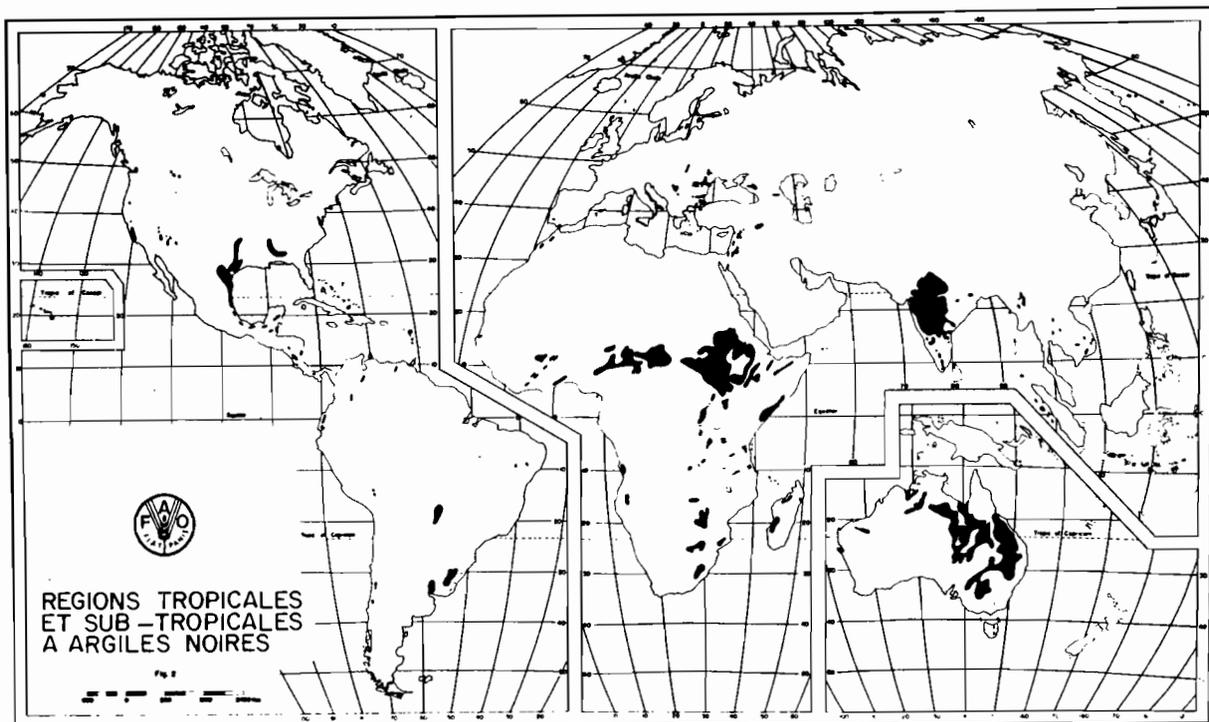


Figure 5.16 : Principales zones tropicales et subtropicales où l'on trouve des sols argileux lourds foncés (Dudal, 1965)

5.4 DRAINAGE SUPERFICIEL

Le principal problème des régions à climat semi-aride est le manque d'eau, mais il peut arriver aussi, à des moments particuliers ou en présence de conditions pédologiques spéciales, que le problème soit un excédent d'eau et qu'une certaine forme de drainage soit alors nécessaire.

Des sols sur lesquels, par exemple, une certaine forme de maîtrise de l'eau peut revêtir une certaine importance sont les vertisols, sols argileux lourds, généralement foncés, aussi appelés sols argileux noirs à fissuration profonde et à formation d'un mulch naturel, sols noirs à coton etc. Ils sont aussi connus dans le langage courant comme "sols d'un jour" car difficiles à travailler quand ils sont secs et durs et tout aussi peu maniables quand ils sont saturés et collants; mais il existe un moment pendant lequel l'humidité est juste suffisante pour qu'on puisse les travailler. Les propriétés physiques qui expliquent ce phénomène sont leur forte teneur en argile, le minéral argileux étant la montmorillonite mélangée à un peu d'illite ; de par sa structure en couches 2:1, cette argile se gonfle quand le sol est humide ; elle se rétrécit et se fissure quand il est sec (IBSRAM, 1987). Un aspect caractéristique de ce type de sol est sa surface inégale faite de bosses et de creux due à des cycles répétés d'humectation et de séchage ; cet aspect est connu en Australie sous le nom de "gilgai".

La figure 5.16 (tirée de Dudal, 1965) montre la distribution des vertisols dans le monde. Les deux principaux types de formation sont situés sur de vastes zones uniformes qui se sont développées in situ à partir de vastes coulées de basalte volcanique ou alors sur des dépôts alluviaux plus localisés en fond de vallée, comme en Ethiopie, au Zimbabwe et en Zambie. Dans les deux cas, ces vertisols ont une importance économique considérable car ils représentent une ressource en terre dont le potentiel est encore sous-utilisé pour la simple raison qu'ils sont difficiles à travailler.

Une solution technique consiste à installer un drainage subsuperficiel ; l'efficacité de cette solution a été démontrée il y a plus de vingt ans au Zimbabwe (Robertson, 1964). Les tuyaux en béton, argile cuite et bambou sont tous également efficaces, mais peu économiques en raison du coût des matériaux et du transport.

De nos jours, la méthode la plus appropriée consisterait à installer des drains tubulaires en plastique sans creuser de tranchées. La technologie existe mais seul un profit élevé justifierait les coûts d'installation. Des drains-taupes reviendraient moins cher mais dans des conditions aussi extrêmes d'humidité et de sécheresse, seraient de courte durée.

Le drainage superficiel est la solution la plus pratique ; elle a été étudiée à fond et expérimentée à l'ICRISAT en Inde, en utilisant la méthode des planches larges et sillons décrites dans la section 5.2.1 (Krantz et al., 1978 et 1981 ; Swindale et Miranda, 1984). En Inde, le drainage superficiel peut donner la possibilité de semer en sec très tôt, juste avant le début de la mousson si la date peut être prévue avec suffisamment de certitude (Krantz, 1981). Cela permet de faire deux récoltes, alors que dans la pratique traditionnelle, les vertisols sont laissés en jachère pendant la mousson et ne sont cultivés qu'en hiver en mettant à profit l'humidité emmagasinée dans le profil. En Ethiopie les vertisols occupent des superficies plus restreintes dans des fonds de vallée et sont soit totalement incultes soit cultivés uniquement vers la fin de la saison des pluies. L'installation d'un drainage superficiel avec soit des planches surélevées et des sillons soit des drains ouverts peu profonds, facilite le travail du sol et permettrait tant d'améliorer la production des zones actuellement cultivées que d'accroître considérablement les superficies cultivées.

Ce sont les vertisols qui se prêtent le mieux à l'emploi du drainage superficiel, mais dans d'autres cas aussi cette technique peut se révéler utile. Le système des planches larges et sillons a également été utilisé sur des alfisols du Nord-Est du Brésil (Lal, 1985), tandis qu'une variante sur le même thème billons et sillons a été employée sur des sols relativement légers du Zimbabwe et du Kenya. Dans ces deux derniers cas, les sols peu profonds s'engorgent car le profil n'a qu'une capacité limitée de stockage de l'humidité ; l'installation d'un réseau simple de drains superficiels peut améliorer les possibilités de culture et prolonger la campagne de

pâturage. La culture du teff en Ethiopie, où il est la principale céréale vivrière, offre un exemple intéressant quoique très particulier d'utilité du drainage superficiel. Les semences sont minuscules et sont semées à la volée sur un sol meuble très fin ; le moindre ruissellement peut les entraîner. La solution traditionnelle consiste à ouvrir de petits drains à ciel ouvert, d'un gradient très accentué pour intercepter un éventuel écoulement superficiel. La nécessité de prévenir le ruissellement superficiel est considérée par les cultivateurs comme l'emportant sur tout autre considération, que ce soit l'érosion du sol ou la conservation de l'humidité : d'où la situation absurde représentée sur la photo 5.37 où l'on voit des drains à ciel ouvert de type traditionnel creusés en travers de systèmes plus récents de terrasses de diversion.



Photo 5.37 : Drains superficiels de style traditionnel, creusés en diagonale et avec une forte pente, ont été recoupés par des terrasses de diversion modernes pour accroître le drainage superficiel

Le système des petits fossés (ou des doubles dérayures) creusés obliquement à la pente d'un coup d'araire ou de charrue après préparation du lit de semence est connu traditionnellement aussi bien sur les collines de la façade méditerranéenne de l'Algérie septentrionale (Greco, 1978) que sur les sols volcaniques des cordillères équatoriennes (2 à 4000 mètres d'altitude). L'objectif est d'évacuer le plus rapidement possible le ruissellement, sans attendre qu'il accumule une énergie suffisante pour décaper l'horizon ameubli.

Un autre exemple de drainage superficiel utilisé pour résoudre un problème particulier provient du Portugal, où le problème qui se pose est celui d'un engorgement temporaire au moment où l'on doit préparer ou planter des céréales d'hiver. La méthode utilisée s'appelle "pnudivales", qui sont de petits fossés aménagés après la préparation de lit de semence et avant les semailles. Ils sont confectionnés par trois passages d'un tracteur, la première fois avec une charrue à versoir pour former un sillon, et deux autres fois avec un billonneur pour obtenir un drain peu profond à ciel ouvert de 3 à 4

mètres de largeur et de 0,25 mètre de profondeur en son centre. On peut ensuite semer, sarcler et récolter en lignes droites, sans tenir compte des fossés à ciel ouvert. Ces derniers ont un léger gradient de 0,6 à 0,8 % (Sims, 1983).

5.5 AUTRES SOURCES D'EAU : NEIGE, ROSEE ET BRUME

5.5.1 Gestion de la neige

Sous les hautes latitudes, une partie ou la totalité des précipitations peut tomber sous forme de neige, en particulier dans l'hémisphère Nord ; dans les régions semi-arides, il est parfois possible d'accroître le rendement des précipitations par la gestion de la neige. Le piégeage de la neige pendant l'hiver pour accroître l'humidité disponible pendant la courte période estivale est une pratique courante sur les steppes semi-arides du Kazakhstan, dans l'Est de l'Union soviétique. Une partie de la première neige est retenue par les chaumes de la culture précédente ou, dans le cas d'une jachère estivale, par de petites rangées de moutarde plantées à cette fin. Dès que la neige s'est accumulée sur 50 ou 100 mm, on la repousse dans les billons au moyen de tracteurs lourds équipés à l'avant d'une lame en V et sur chacun des côtés, d'une demi lame de niveleuse inclinée vers l'intérieur de sorte que la neige est repoussée de part et d'autre du tracteur en deux andains ou bourrelets de neige. Le dispositif généralement obtenu a une largeur de 6 m entre les centres des bourrelets avec 3 m de neige intacte entre les deux. Les bourrelets peuvent atteindre 1 m de hauteur et 3 m de largeur et servent de brise-vents entre lesquels d'autres quantités de neige s'accumuleront. En année de très forte nivrosité, la quantité totale de neige qui s'accumule entre les billons peut atteindre 600 mm, mais c'est là plus qu'il n'en faut car l'eau produite par la fonte de cette neige provoque des problèmes d'érosion ; une hauteur de 400 mm est normale et préférable.

Les terrasses de conservation en gradins décrites dans la section 5.2.3 ont pour principal objet de retenir sur les terrasses de niveau le ruissellement provenant de zones d'interception situées en amont. Dans les deux Etats les plus septentrionaux des Etats-Unis où la méthode a été expérimentée, on a constaté qu'elles avaient aussi pour effet d'accroître la quantité de neige piégée, en partie parce que les terrasses fonctionnent comme des obstacles physiques mais en partie aussi parce que la neige est retenue par le chaume de la culture de l'été précédant (Hass et Willis, 1968 dans le Nord Dakota ; Black, 1968 dans le Montana). Neff (1980) rapporte que des sillons façonnés suivant les courbes de niveau ont intercepté une quantité de neige équivalente à 22 mm de pluie supplémentaire et ont d'autre part atténué le ruissellement des pluies hivernales et de la neige fondue au printemps. Dans l'Est du Montana, Saulmon (1973) a utilisé une barrière à neige normale (1,25 m de hauteur avec des lattes en bois verticales) pour piéger la neige sur de petites zones d'interception qui alimente ensuite, par ruissellement superficiel, des mares où le bétail vient s'abreuver. La hauteur supplémentaire de neige piégée a augmenté de 100 mm le ruissellement superficiel.

5.5.2 Rosée et brume

La vaste littérature consacrée à la rosée en tant que source d'approvisionnement en eau abonde en jugements qualitatifs concernant son importance ou son absence d'importance, mais ne comporte que bien peu d'études scientifiques quantitatives. L'étude la plus détaillée pour ce qui concerne les zones semi-arides est celle qui a été faite par Evenari et al. (1982) dans le Néguev. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que la quantité totale de rosée tombée durant l'année peut être appréciable comparée à la pluviosité annuelle. A Avdat par exemple, où la pluviométrie annuelle moyenne est de 150 mm, il tombe entre 25 et 30 mm de rosée. La formation de rosée est un phénomène infiniment plus fiable que la pluie de sorte qu'il peut arriver comme cela s'est produit en 1962/63, que la formation annuelle de rosée totalise 28,4 mm et dépasse la pluviosité qui a été cette année là de 25,6 mm. Ce chiffre est très nettement supérieur aux quantités de rosée mesurées avec précision en Angleterre par Monteith (1957), qui a trouvé une formation moyenne de rosée de 2 à 5 mm. Cependant, la rosée du désert est constituée d'un grand nombre de très petites quantités qui ne peuvent avoir d'utilité en

tant qu'approvisionnement en eau susceptible d'être collectée pour les formes les plus évoluées de la flore désertique, même si elle est utilisée dans une certaine mesure par des formes inférieures telles que les lichens et les algues xérophytes.

Les études faites au Néguev ont également montré que les empilements de pierres, dont on pensait autrefois qu'ils pouvaient être des collecteurs de rosée pour la production de vignes, ne reçoivent pas à la surface des pierres, suffisamment de rosée pour que celle-ci puisse s'égoutter, et que ces monticules ont en fait pour fonction d'accroître le ruissellement superficiel. On rapporte également de Chine, l'existence d'une longue tradition de culture de melons sur des planches de sol recouvertes d'une couche de gravier de 100-150 mm d'épaisseur, appelées "champs de graviers pour melons". La raison d'être de cette couche de gravier serait de favoriser la condensation et la formation de rosée qui s'égoutterait vers le sol. En fait, elle a peut-être pour effet de maintenir le sol à une température constante ou de réduire l'évaporation.

On pourrait citer un certain nombre d'exemples de collecteurs artificiels de rosée, par exemple les feuilles de plastiques utilisées pour recueillir suffisamment de rosée pour tenir en vie des plants forestiers dans le désert en Israël (Gindel, 1965), et une autre utilisation de feuilles en plastique pour constituer une réserve de secours d'eau potable en Australie, mais ces utilisations ne concernent pas l'agriculture.

On a parlé aussi de l'existence de puits aériens qui fournissent de l'eau potable dans un certain nombre de zones arides, parfois avec un réseau de canalisations, mais les études faites dans le Néguev indiqueraient plutôt que le procédé consiste plus vraisemblablement à favoriser l'interception et la condensation de brouillards ou de brumes, ou d'un ruissellement direct, plutôt que la formation de rosée (PNUE, 1983). La question de la formation de la rosée et de la condensation des brumes est intéressante et pleine de contradictions, mais on est obligé de conclure que ces phénomènes ne sauraient constituer une source d'approvisionnement significatif en eau pour l'agriculture.

6. RECOLTE ET UTILISATION DE L'EAU

Ce chapitre contient une description des méthodes qui consistent à collecter et à stocker les eaux de ruissellement dans des barrages, réservoirs ou citernes en vue d'un usage ultérieur. On trouvera des renseignements détaillés concernant ces méthodes dans les actes de deux réunions d'étude qui se sont tenues en Arizona (Frasier 1975, Dutt *et al.*, 1981). Hollick (1982) et El Amami (1983) ont fait une excellente synthèse sur la question.

6.1 METHODES DE COLLECTE DES EAUX

Le sujet peut être abordé de diverses façons :

- selon le but pour lequel on stocke l'eau : usage domestique, abreuvement du bétail, irrigation d'appoint ou irrigation intégrale ;
- selon le type et le volume du stockage : petites quantités destinées aux utilisations domestiques ou à l'abreuvement du bétail ; soit au-dessus du sol dans des réservoirs bétonnés ou recouverts de revêtements ou au-dessous du sol dans des citernes bétonnées ; ou en plus grandes quantités pour l'irrigation, généralement dans des étangs ou des retenues ;
- selon que la zone de réception reste à l'état naturel ou est traitée de quelque façon pour accroître le ruissellement.

Les systèmes de stockage modifient presque toujours le contexte naturel d'une manière ou d'une autre et supposent donc un certain travail de construction. Les facteurs à prendre en considération dans ce travail sont les suivants :

- le volume d'eau nécessaire qui peut être calculé à partir d'une estimation du nombre de personnes ou d'animaux concernés et de leurs besoins journaliers, ou d'après l'étendue et les besoins d'une culture ;
- les précipitations, leur probabilité de hauteur, fréquence et intensité qui, combinées avec l'état de la surface, déterminent le ruissellement et la nécessité d'intervenir ou non pour accroître le ruissellement (question traitée dans la section 6.2) ;
- les pertes d'eau emmagasinée par évaporation, infiltrations ou fuites.

Le nombre et l'importance des variantes à prendre en compte sont si importants que le calcul de chaque dispositif de stockage demanderait un exposé laborieux ; cependant il n'existe pas de solution standard convenant à toutes les situations. L'approche envisagée pourra donc consister à utiliser soit une expérience empirique, au besoin en l'intégrant dans des tables types comme cela a été fait dans l'Ouest de l'Australie (Hollick, 1975) soit des modèles d'ordinateur, comme celui de Frith *et al.* (1975) ou de Hanson (1975).

La dégradation des parcours du Sahel a obligé à prendre davantage conscience de la nécessité de préserver un juste équilibre entre les disponibilités en eau, la végétation disponible pour être broutée ou pâturée, et l'intensité de l'utilisation par le bétail. On pourrait citer maints exemples de modifications indésirables de l'écosystème consécutives à la mise en valeur des ressources souterraines pour augmenter les disponibilités en eau (au Botswana, exemple cité par M.L. et M.J. Odell, 1980 ; au Sahel par Wade, 1974, par Sinclair et Fryxell, 1985, et par Baral *et al.*, 1983). Le danger est moindre quand il s'agit de recueillir les eaux de surface, mais il n'existe pas moins. Il existe une méthode de récolte de l'eau qui peut mettre à profit la totalité des précipitations disponibles sans risque de perturber l'environnement, c'est le système de la membrane enterrée mis au point par Shanan *et al.*, 1981. L'idée consiste à approvisionner de petits points d'eau pour le bétail avec les eaux de ruissellement captées sur des zones d'interception dans lesquelles on a enterré une membrane en

plastique juste au-dessous de la surface du sol. La quantité d'eau récoltée est proportionnelle aux précipitations, et il en va de même pour la végétation environnante. Si l'on fait délibérément en sorte que la quantité d'eau emmagasinée soit peu importante, celle-ci s'épuisera avant la végétation et les troupeaux nomades seront obligés de se déplacer jusqu'au prochain point d'eau avant que la végétation ne soit endommagée par le surpâturage.

Au Yatenga, au Nord-Ouest du Burkina Faso les paysans Mossi creusent traditionnellement des trous d'eau (nommés Bouli) permettant de stocker quelques dizaines de m³ de ruissellement au pied des collines, à la limite des parcours et des terres cultivées. L'objectif est double. D'une part abreuver le bétail familial pour réduire la longue marche en quête d'un point d'eau. D'autre part, pratiquer une irrigation d'appoint pour quelques ares de jardins en cultures précoces (maïs précoce et pastèques) (Dugue, 1986 ; Roose, 1987 ; Rodriguez et Yameogo, 1988).

Deux pays possèdent une vaste expérience des méthodes de récolte de l'eau : l'Amérique du Nord et en particulier l'Arizona, étudiés par Cluff (1975) et l'Ouest de l'Australie, étudié par Laing (1981a).

6.2 TRAITEMENT DES ZONES D'INTERCEPTION

6.2.1 Impluvium naturel et modifications mineures

Sous les tropiques semi-arides, les précipitations estivales se produisent généralement sous forme d'averses de courte durée mais de forte intensité qui donnent un ruissellement abondant et intense. Cela tient en partie à ce que les pluies de forte intensité peuvent temporairement excéder le taux d'infiltration mais aussi au fait que l'infiltration est ralentie par la formation de croûtes superficielles dues à la destruction de la structure du sol par la pluie et à de fortes températures de la surface, comme l'a démontré Valentin (1985) pour le Niger. Au Burkina Faso, Roose (1979-1980), Roose et Piot (1984) ont mesuré des taux annuels de ruissellement de 30 à 40 % sur des terres surpâturées ou cultivées ; lors de fortes averses, ce ruissellement peut atteindre 70 %. En Australie, même de faibles chutes de pluie (inférieures à 15 mm) peuvent produire un ruissellement équivalent à plus de 50 % de la quantité de pluie tombée si la terre porte une végétation éparsée (Pressland et Lehane, 1982). Dans les régions semi-arides où tombent des pluies hivernales, une plus grande proportion des pluies tombe par petites quantités et avec de faibles intensités. Toutefois, des averses rares mais de forte intensité peuvent provoquer des crues catastrophiques même avec une pluviométrie hivernale inférieure à 100 mm.

L'effet de la taille de la zone d'interception a été examiné dans la section 5.1.3. Une petite zone de réception peut produire davantage de ruissellement par unité de surface qu'une zone très étendue et c'est une caractéristique que l'on utilise souvent dans la conception et le traitement des zones d'interception, comme on le verra dans la section 6.2.2.

Il est possible d'obtenir des accroissements significatifs de la production de ruissellement par simple traitement de la surface, par exemple si on enlève la végétation ou si on déplace les pierres qui se trouvent à la surface du sol. Dans le Nord du Néguev, en Israël, où la pluviométrie est de 250 mm, l'enlèvement de la végétation a réduit de 40 à 50 % le taux d'infiltration et augmenté le ruissellement de 7 à 21 % (Tadmar et Shanan, 1969). Ces auteurs ont observé un résultat analogue dans l'état de Utah, où le fait d'avoir ramené de 40 à 16 % le couvert végétal a augmenté d'environ 60 % le ruissellement annuel. Cet effet s'explique en partie par le fait que le couvert végétal assure une protection contre l'impact des gouttes de pluies et diminue l'effet d'encroûtement, tandis que les racines des végétaux et la litière superficielle augmentent l'infiltration. Une autre méthode simple qui a aussi pour effet d'accroître le ruissellement par des processus hydrologiques moins évidents et même inattendus, consiste à enlever les pierres qui se trouvent à la surface du sol. Dans les études maintes fois citées déjà, qui ont été consacrées à l'agriculture alimentées par les eaux de ruissellement dans le désert du Néguev, un des thèmes de recherche concernait le grand nombre de monticules ou d'alignements de pierres qui occupent de

vastes étendues des zones d'interception fournissant en eau les fermes de la vallée. Une analyse superficielle des conditions hydrologiques donnait à penser que si la surface du sol est occupée par une quantité appréciable de pierres, le ruissellement provenant de cette surface imperméable viendra accroître le ruissellement global. Pourtant des études détaillées conduites sur des parcelles expérimentales de ruissellement pendant un certain nombre d'années, ont donné deux résultats que les auteurs qualifient eux-mêmes de "surprenants". Le premier de ces résultats est à quelques exceptions près, que le ruissellement est moins abondant sur les pentes abruptes, et deuxièmement que le fait d'enlever les pierres de la surface du sol et de les entasser en monticules augmente le ruissellement. Le lecteur qui souhaiterait connaître l'explication de ces processus hydrologiques compliqués pourra se reporter au chapitre 9 de l'ouvrage intitulé "Le Néguev" de Evenari et al., 1982 dont les résultats ont été récemment confirmés par des études de laboratoire exécutées par Poesen (1986).

Il est donc évident que l'on peut utiliser comme zones d'interception tout affleurement rocheux naturel, et les exemples de telles utilisations ne manquent pas de par le monde, en particulier pour les usages domestiques et pour l'abreuvement du bétail qui demandent de petites quantités d'eau mais de l'eau de bonne qualité. Le soubassement géologique de l'Afrique comprend souvent de vastes affleurements granitiques qui, au Zimbabwe (Richards, 1972) et au Kenya (photo 6.1), ont de tous temps été utilisés pour l'approvisionnement en eau des foyers. Des dispositifs semblables existent dans l'Ouest de l'Australie (Davies, 1977, cité dans Hollick, 1982), en Amérique du Nord (Chiarella et Beck, 1975), et aussi en Inde et à Sri Lanka. Il faut un simple chenal de collecte, généralement constitué par un long mur de briques ou de maçonnerie. Le coefficient de ruissellement n'est pas toujours aussi élevé que ce que l'on attendrait d'une surface rocheuse dénudée et peut descendre à moins de 50 % par suite des pertes par évaporation, stockage dans les dépressions et infiltrations dans des fissures et craquelures. Les marnes sont généralement altérées et fissurées et peuvent ne donner que 25 % du ruissellement, alors qu'un granite résistant et en pente raide peut donner 80 ou 90 %. Il est parfois possible d'augmenter la production en colmatant les fissures avec du ciment ou du bitume.



Photo 6.1 : collecte de ruissellement sur un pointement granitique au Kenya. Un mur de pierre de 20 cm de haut guide le ruissellement vers un réservoir situé à droite, hors de la photo

6.2.2 Remodelage des zones d'interception

Deux méthodes de récolte de l'eau couramment utilisées dans l'Ouest de l'Australie comportent un remodelage soigneux de la surface du sol et généralement quelques traitements ultérieurs de la surface pour améliorer le ruissellement. La figure 6.1 et les photos 6.2 à 6.5 illustrent le principe des "bassins compactés" (roaded catchment). Le fait de façonner la terre en "bandes de roulement compactées" augmente le ruissellement en diminuant les pertes. En aplanissant la terre, on diminue le stockage dans les dépressions du relief et en acheminant l'eau rapidement vers les bassins de stockage, on réduit les pertes par évaporation et infiltration. Les pertes par infiltration peuvent être ultérieurement diminuées en compactant la surface du sol avec un rouleau ou en répandant une couverture d'argile avant de faire passer le rouleau, si la surface est sableuse et si l'on dispose d'argile. Plusieurs milliers de systèmes d'interception de ce type fonctionnent dans l'Ouest de l'Australie, certains pour des entreprises commerciales d'élevage, d'autres pour approvisionner en eau des villages et des petites villes. On a estimé que plus de 3 500 de ces installations étaient en service en 1980. Dans des régions caractérisées par une pluviométrie annuelle de 300-400 mm, la proportion des eaux de pluie qui peut être récoltée varie de 24 à 41 %, avec une moyenne de 35 %.

Si l'eau sert à alimenter une ville, on peut appliquer du bitume pour accroître le ruissellement, mais cette méthode est généralement trop coûteuse pour les utilisations agricoles. A la suite de cette expérience à grande échelle, des procédures détaillées de conception ont été publiées (Frith, 1975 et 1977, et Laing, 1981b). Des modèles ont également été publiés par le Département de l'Agriculture australien occidental dans ses "Farm Notes" 109/84 et 129/84. Il existe un modèle mathématique permettant d'optimiser le coût combiné d'une retenue et d'une zone de captage avec voies compactées : elle est disponible avec une solution soit graphique (Note technique 4/76) soit informatique (Fritt et al., 1975). La méthode a également été utilisée sur une base expérimentale restreinte en Arizona et au Texas, où les résultats sont, semblent-il, comparables à ceux qui ont été obtenus en Australie occidentale (Hollick, 1982).

Les bassins plats talutés (flat batter dam) ou bassins d'épandage (spread-bank dam) sont une autre méthode de récolte de l'eau ; c'est une solution qui provient de la côte Sud de l'Australie occidentale (photo 6.6). Cette région reçoit environ 400 mm de pluies le plus souvent de faible intensité. Le terrain est plat ou légèrement en pente, constitué de sols sableux recouvrant des argiles ce qui, joint à la faible intensité des pluies ne permet pas d'utiliser les bassins compactés.

Pour construire un bassin plat taluté on utilise des bulldozers et des niveleuses routières pour étaler le sol superficiel sableux et former une soucoupe circulaire autour du futur bassin. On creuse ensuite le réservoir dans la couche argileuse, que l'on répand sur une épaisseur de 0,1 m par dessus le talus sableux pour constituer la zone d'interception du ruissellement. La pente interne est d'environ 1 % dans le bassin pour passer à 2 % sur le bord extérieur. La zone de réception peut avoir de 50 à 100 mètres de diamètre. Le rendement en ruissellement est comparable à celui des zones de réception avec voies compactées c'est-à-dire qu'elle peut atteindre 40 %. Ce type de retenue peut être utilisé sur des emplacements plats qui ne devraient normalement pas produire de ruissellement ; un autre avantage est qu'il est possible de les installer en position sommitale, ce qui permet de distribuer l'eau par gravité (Laing et al., 1980).

6.2.3 Traitements chimiques

Une grande diversité de produits chimiques ont été essayés pour accroître le ruissellement par colmatage de la surface ; Hollick (1982) a fait un tour d'horizon complet des méthodes expérimentées ; c'est de ce travail que provient une bonne partie des matériaux utilisés dans la présente section. Outre la composition des produits chimiques, les éléments à prendre en considération sont la méthode et le coût d'application, la durée d'efficacité du traitement et l'entretien nécessaire pour que le traitement reste efficace. Il faut chiffrer tous ces coûts car si certaines des méthodes proposées ou expérimentées peuvent se justifier s'il s'agit d'utilisations domestiques, bien peu semblent rentables pour des utilisations agricoles. Plusieurs essais

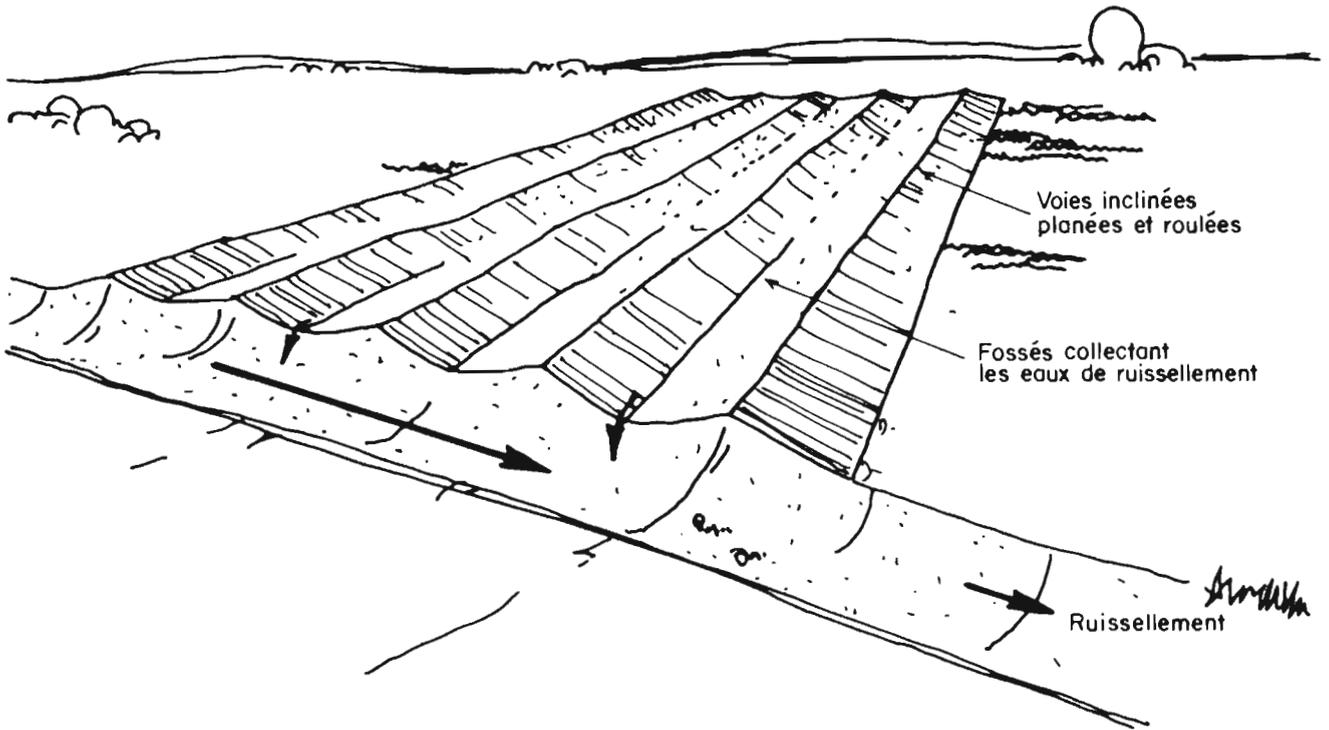


Figure 6.1 : les bassins roulés comme des routes sont largement utilisés en Australie orientale pour collecter du ruissellement pour la consommation domestique et pour le bétail



Photo 6.2 : façonnement de la surface du sol en vue de la récolte du ruissellement sur un impluvium damé comme une route (I.A.F Laing)



Photo 6.3 : lissage et compactage des chemins d'eau "façonnés comme une route" sur un impluvium en Australie (I.A.F. Laing)



Photo 6.4 : l'érosion peut-être un problème sur les chemins d'eau "façonnés comme une route" dans un impluvium (I.A.F. Laing)

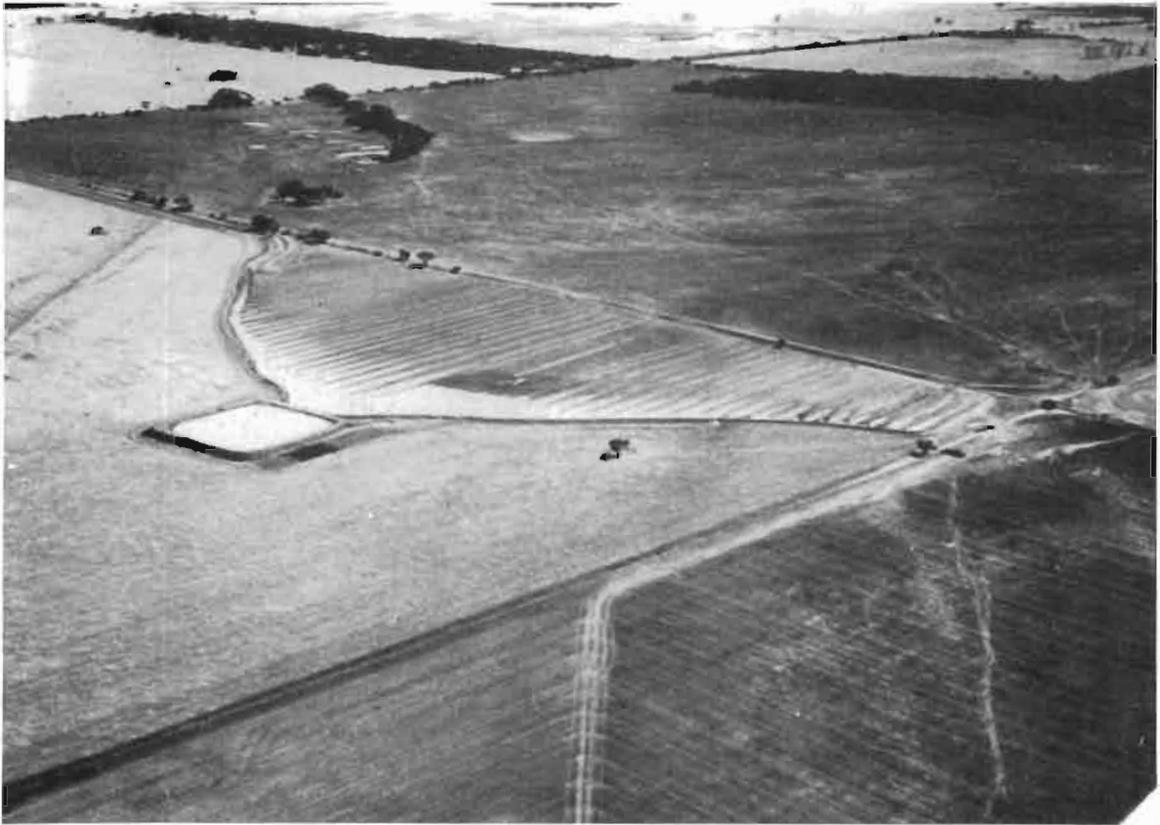


Photo 6.5 : deux présentations différentes d'un impluvium "façonné comme une route", Australie orientale (I.A.F. Laing)

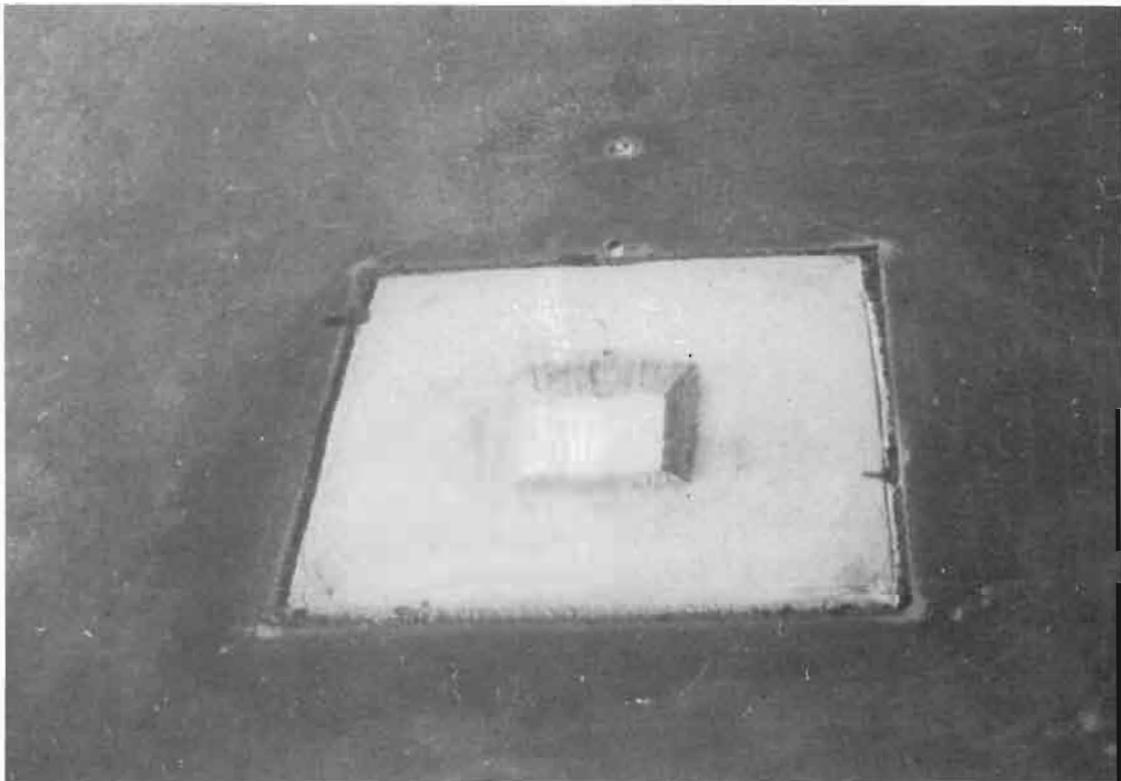


Photo 6.6 : deux exemples de réservoir en assiette creuse en Australie orientale (I.A.F. Laing)

comparatifs des performances ont été effectués aux Etats-Unis (Frasier et Cooley, 1979 ; Fink, 1984 ; Fink et Ehrler, 1981).

L'une des rares méthodes qui ait fait l'objet d'une utilisation prolongée prévoit l'emploi de divers types de pulvérisations à base de bitume ou d'asphalte émulsifié et coupé d'eau qui ont été utilisés en Australie pendant vingt ans pour l'alimentation en eau de la campagne. C'est un système qui pose des problèmes de décoloration de l'eau, encore que la contamination soit sans odeur et sans saveur. La préparation et l'application de ces produits demandent beaucoup de soins et d'attention dans les détails ; d'autre part les besoins de surveillance et d'entretien rendent la méthode moins attrayante dans le domaine agricole. Laing et Prout (1975) ont constaté que, pour la plupart des utilisations agricoles, l'argile compactée est plus pratique et plus économique. Dans une étude plus récente (1981b), Laing a observé que le compactage seul produit 40 pour cent de ruissellement, une couche de bitume sur terre compactée 65 % et deux couches de bitume après compactage 89 % de ruissellement. Le choix de la méthode dépend donc des résultats de l'analyse des coûts et de la valeur du ruissellement stocké.

Une autre approche consiste à utiliser des produits hydrophobes par exemple les cires qui ont été étudiées en détail par Fink en Arizona (1984) et les silicones, étudiés par Plueddemann (1975). Hollick a décrit des essais effectués avec de nombreuses autres substances chimiques hydrophobes mais, à ce jour, aucune ne s'est révélée posséder les propriétés voulues quant au prix et à la durée de vie.

Une autre solution pour réduire l'infiltration consiste à obturer physiquement les pores du sol en surface. On peut pour cela appliquer de la bentonite, une argile colloïdale très fine utilisée pour colmater le plancher de réservoirs qui fuient, ou mélanger du ciment au sol superficiel pour former une couche stable sol-ciment. Les sels de sodium ont aussi été abondamment étudiés, par exemple par Dutt (1981) aux Etats-Unis, et par Karam et Julka (1981) en Inde. Ces sels déflocculent le sol, produisant ainsi de fines particules qui colmatent la surface de la même façon que la bentonite. Cette solution présente les problèmes habituels de coût et de durée d'efficacité, et elle a en outre pour inconvénient que le sol défloculé résiste moins bien à l'érosion résultant d'un ruissellement accru.

6.2.4 Membranes imperméables

Les membranes ont également été étudiées par Hollick (1982). Elles présentent les mêmes inconvénients que les additifs chimiques, en ce sens qu'elles sont coûteuses comparées à leur durée de vie. Une approche qui semble prometteuse, car neuf zones expérimentales d'interception ont fonctionné dans des conditions raisonnablement bonnes pendant douze ans (Myers et Frazier, 1974), consiste à combiner l'emploi d'une natte, pour obtenir une certaine résistance à la tension et d'une émulsion pulvérisée qui rend cette natte imperméable. Myers a utilisé la fibre de verre pour la natte et plusieurs applications d'asphalte, mais d'autres combinaisons ont aussi été essayées.

Il existe également des membranes souples, particulièrement en polyéthylène et polyvinyle, ainsi que des caoutchoucs synthétiques, acryliques et butyliques. Les principaux problèmes des plastiques sont qu'ils se déchirent facilement et se dégradent rapidement ; le butyle de caoutchouc est moins fragile mais il est le plus souvent trop coûteux pour l'usage envisagé.

Les matériaux rigides sont en général trop coûteux. Des membranes en béton ont été utilisées et ont une durée de vie raisonnablement longue, mais elles coûtent très cher et le ruissellement est étonnamment faible (56 à 80 %), probablement parce que l'eau s'accumule dans les dépressions superficielles d'où elle s'évapore ensuite, ou en raison de pertes à travers les fissures. Les feuilles de tôle ondulée donnent des coefficients de ruissellement plus élevés mais leur coût en limite l'application à la collecte de petits volumes d'eau destinée aux utilisations domestiques, par exemple à partir des toitures. Elles sont aussi utilisées en Australie, où elles constituent le seul revêtement efficace qui puisse être appliqué à la surface des argiles noires sujettes au gonflement et à la fissuration. Un matériel moins coûteux est le feutre de

toiture qui peut être étalé par bandes, dont les bords sont ensuite réunis et scellés. Quelques applications en ont été faites aux Etats-Unis, mais ce matériau s'abîme trop facilement et dure trop peu pour que son coût se justifie.

Plusieurs études complètes et détaillées ont été consacrées, en particulier aux Etats-Unis, aux différentes méthodes utilisables. Chiarella et Beck (1975), par exemple, ont étudié dans des réserves indiennes, une cinquantaine de zones d'interception utilisant différents traitements et combinaisons de traitements. Ils sont arrivés à la conclusion que les résultats sont très variables et que le plus gros problème est celui du mauvais fonctionnement résultant d'un manque d'entretien, car personne ne se considère comme responsable d'installations se trouvant sur des terres communales d'utilisation partagée. Un essai semblable a été fait par McBride et Shiflet (1975) avec des résultats similaires ; là encore le problème a été celui de l'entretien d'installations d'utilité commune. Mickelson (1975) a décrit de son côté des essais de performances et de durabilité de diverses membranes et traitements chimiques ; au Pakistan, une étude a été conduite sur une trentaine de parcelles d'interception avec dix traitements (Sheikh, Shah et Aleem, 1982). Tous les essais entrepris ici et là concordent ce qui laisse à penser que, techniquement, il existe un certain nombre de méthodes qui compte tenu des caractéristiques du sol et du site, peuvent fonctionner dans des conditions expérimentales. Mais les difficultés liées au coût et à l'entretien sont telles qu'il est peu probable qu'aucune des méthodes expérimentées jusqu'ici se révèle un jour rentable, sauf dans le cas particulier où l'eau, même en petites quantités représente un bien suffisamment précieux car indispensable à la consommation humaine ou animale.

6.3 STOCKAGE DE L'EAU

La récolte et le stockage de l'eau dans des retenues, bassins, réservoirs, citernes et autres récipients artificiels est une question trop vaste pour qu'on puisse la traiter en détail. Nous nous limiterons dans la présente section, à passer en revue les principes sur lesquels reposent les systèmes de stockage les plus courants ; le lecteur qui souhaiterait avoir plus de détails peut consulter les manuels cités dans la bibliographie.

6.3.1 Petits barrages en terre

Les petits barrages en terre sont probablement le système le plus courant de stockage artificiel de l'eau ; pour peu que l'emplacement s'y prête, ils sont efficaces et économiques. Ils nécessitent bien quelque attention au stade de la conception et de la construction, de même qu'un entretien régulier, mais ces questions ont été traitées dans nombre de publications, livres et manuels qui offrent des renseignements et des avis de tous niveaux (Hudson, 1975; Berton, 1988).

i. Planification des barrages en terre

La première chose à faire quand on planifie un barrage est de définir très clairement l'objectif qu'il doit remplir de façon à pouvoir identifier des critères de conception. S'il s'agit par exemple de construire un point d'eau pour l'abreuvement du bétail et l'exploitation en pâturages d'une zone déterminée, il est inutile d'aller chercher un emplacement en dehors de la zone en question. Si l'eau doit être disponible tout au long de l'année, le barrage doit avoir une profondeur minimum telle qu'il y aura toujours de l'eau malgré l'évaporation. D'autre part, le volume d'eau nécessaire pour abreuver des troupeaux est beaucoup moins important que celui d'un barrage conçu pour l'irrigation. Si l'objectif est au contraire l'irrigation, cela signifie que le volume d'eau à stocker, de même que la période pendant laquelle on aura besoin d'eau sont clairement définis. Quand l'objectif est bien posé, il est facile d'étudier les facteurs suivants.

a. Emplacement

L'emplacement est généralement dicté par l'objectif ; on l'a vu dans l'exemple ci-dessus où il s'agissait d'alimenter en eau une zone de pâturage déterminée. Si

l'objectif est l'irrigation, le choix de l'emplacement découlera des réponses que l'on pourra apporter à des questions telles que :

- "Le périmètre peut-il être installé n'importe où dans le district, ou bien s'agit-t-il d'irriguer une pièce de terre particulière et faudra-t-il installer le barrage à proximité de cette terre ?"
- "Le périmètre est-il irrigué par gravité, de sorte que le barrage devra être situé plus haut que la parcelle ? Ou sera-t-il possible de pomper à partir d'un niveau inférieur ?"
- "Peut-on installer le barrage en amont et faire descendre l'eau vers l'aval ?"
- "Si le barrage se trouve à une certaine distance du périmètre, le canal d'amenée devra-t-il être revêtu ?"

b. Capacité de stockage

Pour calculer la capacité du barrage les questions qu'il faut se poser sont les suivantes "quelle est la quantité d'eau provenant du barrage qui sera utilisée et dans quelle proportion la demande va-t-elle fluctuer durant l'année ? Quelle est la demande maximum ? Quelles seront les conséquences si le barrage s'assèche ? Est-il nécessaire ou souhaitable d'avoir un emmagasinement inter-annuel (report d'une année sur l'autre) ? Quelles seront les pertes par évaporation et par infiltration ?"

La configuration de la vallée influe sur la quantité d'eau qui sera stockée en amont de la paroi d'un barrage d'une hauteur donnée. Le site idéal a un long "retour en arrière" (throwback), c'est-à-dire que la surface du volume d'eau emmagasinée remonte loin en amont, ce qui donne une grande capacité de stockage. Il a d'autre part des versants abrupts, de façon à ce que le mur en terre soit court. Si la vallée a des versants en pente douce, il faudra construire un mur long et coûteux. Si l'évaporation est élevée, il vaut mieux avoir une grande profondeur d'eau et une petite surface, qu'une grande surface d'eau peu profonde. C'est souvent à l'endroit où le cours d'eau sort d'une large vallée par une gorge étroite, là où le lit du cours d'eau passe d'un faible gradient à un gradient plus marqué, ou encore au confluent de deux cours d'eau que l'on trouve des emplacements offrant de bonnes possibilités pour l'emmagasinement de l'eau, auquel cas on peut avoir deux bassins pour un seul mur.

c. Sols

Le site doit présenter des conditions pédologiques appropriées à la construction d'un barrage en terre. Le sol du bassin ne doit pas être poreux et l'emplacement où le mur sera construit doit être exempt de galets et de termitières. Il faut disposer, à proximité, d'un sol convenant à la construction du mur. On verra dans les paragraphes consacrés aux levées de terre ou murs de barrages et à la succession des opérations de construction, quels sont les meilleurs types de sols à utiliser pour les différents éléments de la paroi. Certains sols ne conviennent pas pour la construction de barrages, notamment :

- les sols salins, alcalins ou sodiques, ou tout sol ayant une chimie anormale ;
- les tourbes ou autres sols riches en matières organiques ;
- les argiles lourdes qui sont sujettes aux gonflements, aux retrécissement et aux fissurations ;
- les sables légers ;
- les sols contenant une forte proportion de limons fins.

ii. Evacuateurs

Rares sont les barrages construits sur les cours d'eau et les rivières qui peuvent être prévus suffisamment grands pour stocker la totalité de l'écoulement et il est nécessaire de prendre des dispositions pour évacuer le surplus des eaux de crue quand le barrage est plein. L'évacuateur est un ouvrage (fossé, conduite ou déversoir) conçu spécialement dans ce but. Le coût des petits barrages en terre augmente dans des proportions considérables, s'il faut construire des évacuateurs en béton ou matériaux similaires ; il faut donc chercher, quand on choisit un emplacement, des sites sur lesquels le trop-plein peut être évacué en toute sécurité par dessus des évacuateurs gazonnés.

a. Evacuateurs en déblais

Dans le cas de petits barrages de conservation, on peut choisir comme solution de percer dans la berge, sur le côté de la paroi du barrage, un chenal à ciel ouvert qui sert d'évacuateur (Figure 6.2). C'est une solution économique et efficace mais qui présente un certain risque d'érosion si l'eau s'écoule trop rapidement. S'il est possible d'entretenir un bon couvert gazonné, cela permet de réduire la dimension de l'évacuateur mais les chenaux gazonnés doivent être conçus et construits avec beaucoup de soin et ils sont parfois difficile à installer et à entretenir dans les régions ne recevant que de faibles précipitations. Dans les régions semi-arides, il est sage de limiter à 500 hectares l'étendue maximum du plan d'eau des barrages équipés d'évacuateurs gazonnés.

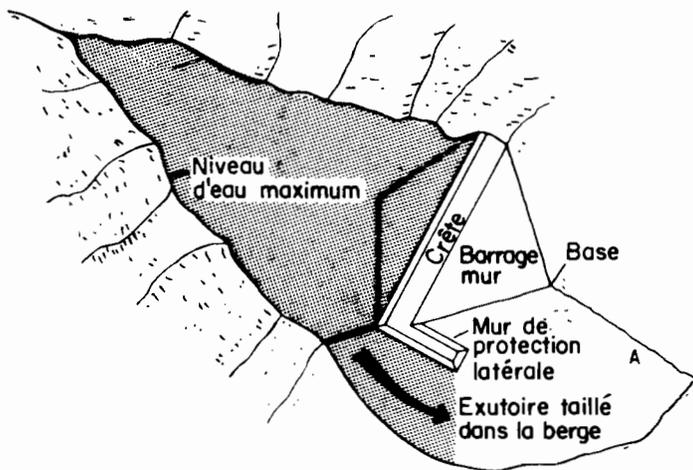


Figure 6.2 : plan d'un petit barrage en terre avec un exutoire en déblais

Le point le plus vulnérable de ce type d'évacuateurs est celui où l'eau rejoint le cours d'eau. Pour prévenir l'érosion en ce point (A sur la figure 6.2), il faut façonner la berge du cours d'eau en lui donnant une pente et la tapisser de gazon comme le reste de l'évacuateur. Une autre solution consiste à construire en ce point une chute en béton ou en maçonnerie.

Il n'est pas souhaitable que les évacuateurs enherbés soient constamment sous l'eau. Cela les rend plus vulnérables à l'érosion car les types d'herbe qui conviennent le mieux ne supportent pas un milieu constamment humide. Si l'on croit donc qu'un cours d'eau a un débit constant peu important, ou un écoulement qui se prolonge pendant un temps considérable après chaque averse, il faut prévoir un exutoire d'étiage. Ce type d'exutoire peut prendre la forme d'un petit canal revêtu de briques ou de béton installé dans l'évacuateur même ; on peut aussi utiliser un tuyau de petit diamètre qui traverse la paroi du barrage, de préférence sur la rive opposée à l'évacuateur.

S'il n'est pas possible de protéger l'évacuateur avec de l'herbe, il faudra peut-être protéger ses parties les plus vulnérables par des enrochements ou du béton.

b. Evacuateurs naturels

On utilise ce type d'évacuateur quand les caractéristiques du site permettent de détourner les eaux de crue dans une voie d'eau ou un chenal existant naturellement. On peut voir sur la figure 6.3 un exemple dans lequel la crue est détournée par dessus une crête naturelle vers la vallée adjacente. La crête doit être approximativement de niveau entre A et B de façon que l'écoulement puisse s'étaler ; la pente qui descend en direction du cours d'eau doit être douce et présenter un couvert suffisamment dense pour qu'il n'y ait pas de risque d'érosion.

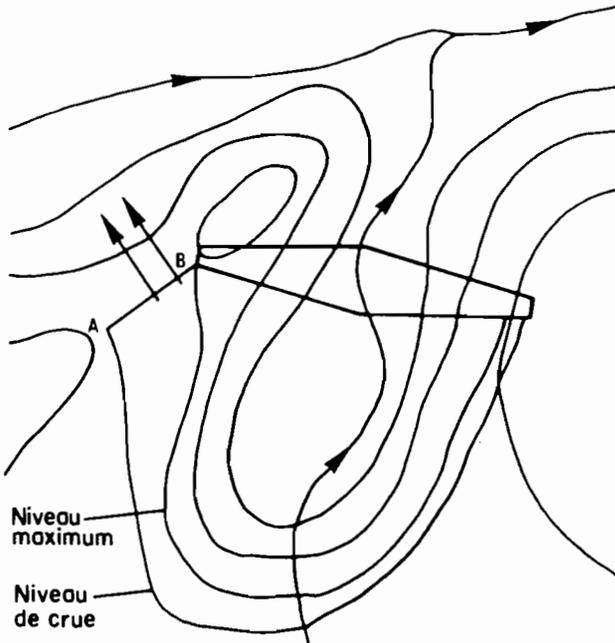


Figure 6.3 : un réservoir avec un exutoire naturel dans un vallon adjacent

c. Evacuateurs mécaniques

Ce sont des canalisations qui font passer les eaux de crue à travers la levée de terre. Comme il ne serait pas pratique d'avoir un tuyau suffisamment gros pour acheminer l'écoulement maximum, on prévoit une marge d'accumulation provisoire des eaux de crue au-dessus du tuyau. Celui-ci se remplit pendant la période de hautes eaux et se vide par la canalisation une fois que l'écoulement de pointe est passé (figure 6.4). Un évacuateur de secours est également prévu pour les crues exceptionnelles. La capacité des conduites d'évacuation est indiquée dans le tableau 6.1. Des déversoirs circulaires sont souvent installés à l'entrée des évacuateurs en conduites, d'un part pour assurer un bon débit dans le tuyau et d'autre part pour que celui-ci puisse être enterré au-dessous de la paroi du barrage, comme on le voit sur la figure 6.5.

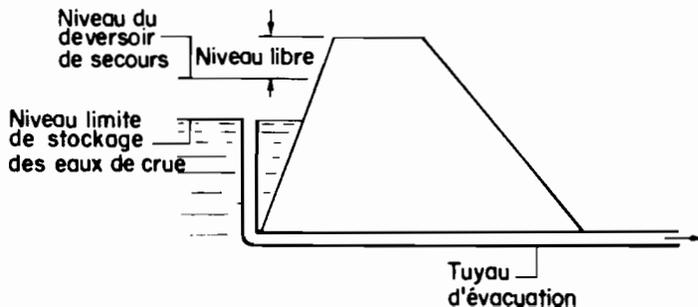


Figure 6.4 : un réservoir avec un exutoire mécanique (conduite) et un évacuateur de crues de secours

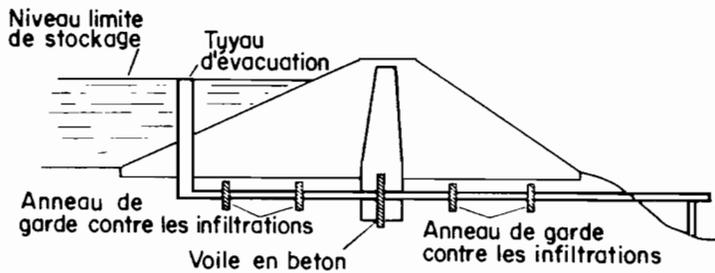


Figure 6.5 : installation d'une canalisation servant d'exutoire sous le mur du barrage

Tableau 6.1 CARACTÉRISTIQUES D'UN EXUTOIRE MÉCANIQUE

Diamètre de la canalisation d'évacuation mm	Débit approximatif l/s	Diamètre du déversoir circulaire mm
200	5 600	200
250	7 100	250
300	8 500	300
400	11 300	500
500	14 200	600-750
600	17 100	750-1000

iii. La digue de retenue ou barrage

a. Tranchée d'ancrage

Il faut éviter que des infiltrations ne se produisent à travers ou par dessous la paroi du barrage, ou du moins les réduire au point de les rendre négligeables. A moins que la totalité de la paroi ne soit construite en matériau imperméable, il faudra installer un noyau central en argile compactée comme celui que l'on voit représenté sur la figure 6.6. La largeur pourra être adaptée suivant la méthode de construction. Si la tranchée est creusée à la main et si le matériau constituant le noyau est placé également à la main, le noyau d'étanchéité pourra ne pas dépasser 1 mètre de largeur ; par contre si le travail est fait à la machine, il devra avoir au minimum la largeur de l'engin. Le matériau excavé pourra être utilisé pour le côté aval de la digue. Les points importants de la construction de la tranchée d'ancrage sont les suivants :

- le noyau doit descendre jusqu'à une couche imperméable et y être logé de façon à ce qu'il n'y ait aucun risque d'infiltration par dessous ;
- il doit se prolonger vers le haut légèrement au-dessus du niveau maximum de retenue, sur toute la longueur du barrage et jusqu'aux deux extrémités ;
- le matériau utilisé pour confectionner le noyau d'étanchéité doit contenir suffisamment d'argile pour être plastique et facile à travailler à l'état humide. Dans le cas de barrages qui resteront pleins la plupart du temps, et pour lesquels le noyau ne sèchera donc pas, on pourra utiliser de l'argile pure. Pour des barrages plus petits qui sont susceptibles de s'assécher, l'argile pure pouvant se rétrécir et se fissurer, il vaudra donc mieux utiliser un sable argileux ;
- le matériau doit être placé et compacté correctement. La meilleure méthode consiste à placer l'argile en couches minces, ajouter suffisamment d'eau pour la rendre plastique et la "mettre en boue", c'est-à-dire que les ouvriers doivent la dammer avec des pilons. Une autre bonne méthode consiste à faire

piétiner chaque couche d'argile en faisant aller et venir du bétail, boeufs ou buffles. Quand on utilise des engins de terrassement le sol doit être déposé en couches minces au moyen d'un scraper, puis compacté à l'état humide par des tracteurs à roue ou par des rouleaux pied-de-mouton. Il n'est pas recommandé de placer le sol au moyen de bulldozers, ni de le compacter au moyen de tracteurs à chenilles.

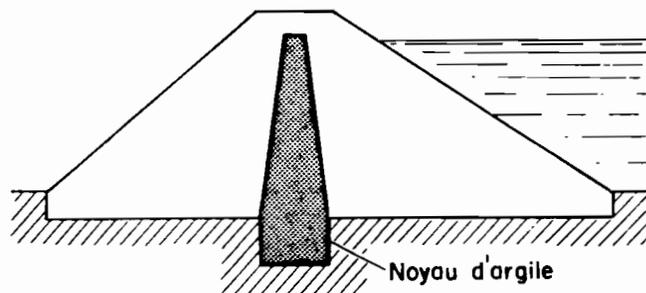


Figure 6.6 : un barrage de terre avec une tranchée d'ancrage

b. Pente des talus

L'angle d'inclinaison des talus du barrage doit être calculé de manière à être stable. Le sol saturé étant moins stable que le sol sec, le côté de la paroi qui se trouvera face à l'eau devra donc être moins incliné que le côté aval. Avec la plupart des sols, la pente ne doit pas dépasser 3:1 du côté amont et 2:1 du côté aval. Si le sol est un mélange approchant de la granulométrie idéale et s'il est soigneusement placé et bien compacté, la pente peut être portée à 2:1 en amont et 1,5:1 en aval. Des sols difficiles à compacter devront avoir une pente de 3:1 ou 4:1. Pour de petits barrages, la pente influence peu le coût total et si l'on a le moindre doute, il faut utiliser la pente la plus faible.

c. Largeur de crête

Le sommet de la digue du barrage doit être suffisamment large pour permettre le passage tant des engins de construction que des véhicules si la digue doit servir de route. Il est inutile de la faire trop large, car cela augmenterait le volume de terrassements. Pour le passage de piétons et de bicyclettes uniquement, une largeur de 2 mètres suffira ; si l'on veut faire passer des véhicules, il faut au minimum 3 mètres.

d. Tassement

Quel que soit le soin avec lequel on place et compacte la terre, il se produira au fil des ans un certain tassement. Il faut donc prévoir une certaine marge de sécurité pour compenser cet effet. Pour des sols moyens, raisonnablement compactés, il faut ajouter 10 % à la hauteur définitive. Le barrage nouvellement construit aura un sommet convexe car la marge de tassement doit être plus grande au milieu qu'à ses extrémités. Il n'est pas recommandé de construire des digues en terre sans les compacter ; c'est le cas par exemple des digues construites au bulldozer. Si l'on ne peut éviter de recourir à ce mode de construction, la marge de tassement à prévoir doit être de 20 %.

iv. Succession des opérations de construction

a. Préparation du site

Les contours de la digue seront délimités sur le sol au moyen de jalons, et tous les arbres, arbustes et racines seront enlevés. Dans un second temps la couche superficielle du sol, les herbes et les racines devront être éliminées sur une profondeur de 10 cm. Ces matériaux seront empilés en aval à proximité de

l'emplacement car ils serviront à la fin de la construction à appliquer une couche de sol superficiel sur l'ensemble de la digue.

b. Zones d'emprunt

Le sol utilisé pour confectionner la digue en terre doit être prélevé à l'intérieur de la zone destinée à être submergée. C'est une façon d'accroître la capacité de la retenue et d'autre part cela évite d'avoir des zones dénudées qui seront exposées à l'érosion. La zone d'emprunt doit se trouver à proximité du barrage pour réduire la distance de transport, mais pas à moins de 10 mètres si l'on ne veut pas courir le risque d'augmenter les infiltrations sous la digue. Le sol superficiel doit être enlevé au bulldozer dans les zones d'emprunt et mis en réserve, comme le sol superficiel pris sur l'emplacement du barrage.

c. Conduites d'évacuation

Il est toujours difficile de consolider la terre placée autour d'un tuyau déjà en place. La meilleure méthode consiste à poser le tuyau dans le sol en place sous la digue du barrage, comme on le voit sur la figure 6.5. Les raccords des tuyaux doivent être faits avec soin et leur étanchéité doit être vérifiée car des fuites menaceraient la sécurité du barrage. Les anneaux d'étanchéité servent à la fois à maintenir le tuyau en place et à prévenir les infiltrations le long du tuyau. Les anneaux sont coulés directement dans la terre en place, c'est-à-dire sans utiliser de coffrages. Si la digue comprend un noyau d'étanchéité en argile, le tuyau peut traverser la tranchée du noyau grâce à un voile de béton (voir figure 6.5).

d. Construction du remblai

Les règles à observer pour mettre en place la terre qui constituera le remblai sont les mêmes que pour le noyau, c'est-à-dire que le sol doit être posé en couches minces et bien compactées. L'adjonction d'eau peut faciliter le compactage, mais il s'agit là d'un détail qui n'est généralement pas nécessaire dans le cas de petits barrages. Il n'est jamais recommandé de mettre en place le sol au bulldozer, car le compactage n'est jamais bon.

e. Ouvrages de finition

Le remblai doit être recouvert d'une mince couche de sol superficiel, pris sur l'emplacement de la digue et sur les zones d'emprunt ; cette couche de sol superficiel sera ensuite plantée ou semée d'un gazon approprié. La crête et le talus aval du barrage doivent être recouverts d'une bonne plante grimpante résistante à la sécheresse, tandis que pour le côté amont on choisira une plante qui supporte d'être occasionnellement noyée. L'évacuateur et la digue devront aussi être soigneusement enherbés et éventuellement protégés d'une façon ou d'une autre, par exemple par un enrochement.

Il est toujours bon de clôturer la digue et l'évacuateur ; et si le bétail doit aller s'abreuver dans la retenue, il est préférable de la clôturer en totalité et d'amener l'eau par une conduite jusqu'à un abreuvoir situé en aval.

6.3.2 Petits seuils-déversoirs

Les seuils-déversoirs sont des ouvrages en béton, briques ou maçonnerie par dessus lesquels l'eau s'écoule quand la retenue est pleine. Parfois ils sont préférables aux barrages en terre, par exemple :

- quand le débit de base est trop important pour le faire passer par un évacuateur ;
- quand le but consiste à élever le niveau de l'eau de façon à pouvoir déverser une partie de l'écoulement dans un canal sans qu'il soit nécessaire de stocker l'eau (barrages de dérivation) ;

- quand l'objectif est de maîtriser le ravinement ou de piéger les sédiments.

La figure 6.7 montre les principaux types de déversoirs. Les déversoirs poids sont des ouvrages dont la stabilité est assurée uniquement par le poids de l'ouvrage. On peut utiliser une section symétrique (figure 6.7a), mais la section représentée sur la figure 6.7b qui permet d'avoir la même hauteur avec moins de matériaux, est plus économique. Pour les déversoirs qui ne sont pas construits en gradins (figure 6.7c), la face aval doit avoir une pente de 3:2.

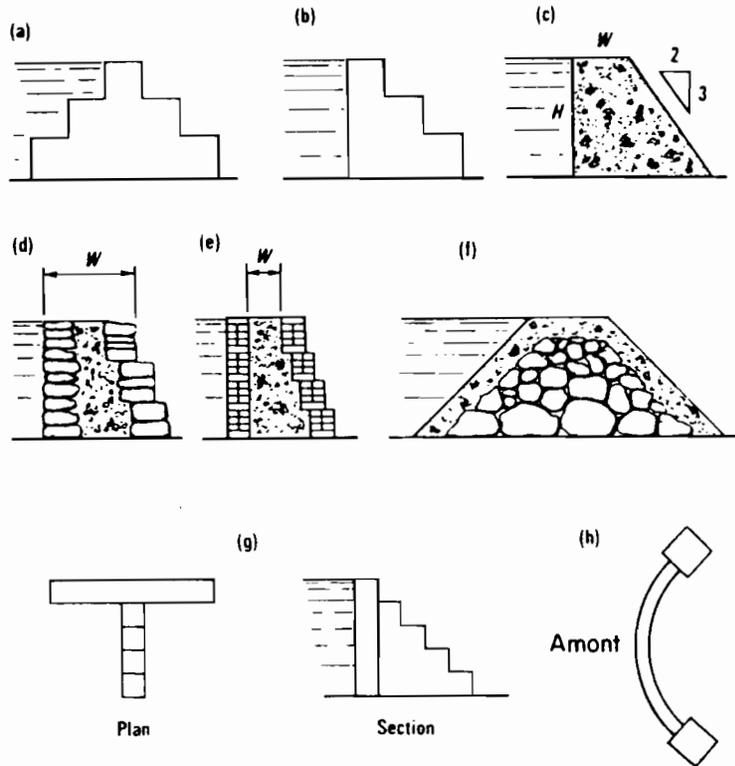


Figure 6.7 : exemples de petits seuils :

- (a), (b) et (c) sections en travers de barrages poids
- (d) seuil en maçonnerie rempli de béton
- (e) seuil en briques rempli de béton
- (f) seuil en enrochements recouvert d'un voile de béton
- (g) seuil avec une salle en béton et un contrefort en parpaings
- (h) seuil en forme de voûte

La largeur de la crête est fonction de la hauteur de la paroi :

- jusqu'à 1 m de hauteur il faut une largeur de crête de 0,3 m ;
- pour une hauteur de 1-1,5 m, la largeur de la crête est de 0,4 m ;
- pour une hauteur de 1,5-2 m, la largeur de la crête est de 0,5 m.

Le déversoir peut être construit entièrement en béton (figure 6.7c) en le coulant dans un coffrage en bois. On peut aussi construire en maçonnerie les parements extérieurs, qui serviront alors de coffrage (figure 6.7d). On peut aussi utiliser des briques (figure 6.7e). Un autre type de déversoir-poids est le barrage en enrochement (figure 6.7f), dans lequel un empilement de roches et de galets assure la stabilité, tandis qu'un revêtement en béton assure l'étanchéité de l'ouvrage.

Les déversoirs de type poids nécessitent une grande quantité de matériaux ; un peu moins dans le cas de barrages déversoirs à contreforts et à dalle plane (figure

6.7g) ou de barrage-voûte (figure 6.7h). Dans le déversoir à contreforts et à dalle plane, la dalle s'appuie sur un ou plusieurs contreforts pour résister à la pression de l'eau ; dans le barrage voûte, ce sont les contreforts situés à chaque extrémité qui résistent à la poussée de l'eau. Ces deux types de barrages déservoirs peuvent être construits en béton, en briques ou en maçonnerie et, jusqu'à 1 mètre de hauteur, ne nécessitent pas de calcul théorique. Pour des barrages plus importants et dans les cas où une défaillance de l'ouvrage pourrait avoir de graves conséquences, il faut faire appel à un ingénieur.

i. Construction

Une solide fondation rocheuse s'étendant sur toute la largeur du lit du cours d'eau est nécessaire pour tous les types de barrages-déversoirs. Il est possible de construire des barrages déversoirs sur des fondations médiocres ou sur une barre rocheuse qui ne traverse que la moitié du cours d'eau, mais c'est une entreprise qu'il vaut mieux confier à des ingénieurs.

La première opération consiste à dégager l'emplacement de tout ce qui l'encombre et du sol qui le recouvre, à faire sauter toutes les roches altérées ou fissurées ; si la surface a été polie par le passage de l'eau, il faut l'écailler pour la rendre rugueuse. Pour obtenir une bonne liaison entre la fondation et le béton, il faut brosser la surface de la roche avec un "coulis" (mélange de ciment et d'eau ayant la consistance d'une crème épaisse). On construit un coffrage en briques et maçonnerie en utilisant un mortier composé de six parts de sable pour une part de ciment (en volume) ; tous les interstices doivent être jointoyés avec ce mortier. Le béton d'un barrage-poids n'a pas besoin d'avoir une résistance considérable mais cette résistance doit être obtenue en employant un mélange économique de bons matériaux plutôt qu'en se servant de matériaux médiocres. Le ciment doit être frais et le sable doit être propre, exempt de particules de sol, d'impuretés et de matières organiques. Le sable de rivière est tout à fait adapté s'il est propre ; sinon, il faut le laver. Les agrégats de grosses pierres doivent être propres et exempts de sol et d'impuretés.

L'idéal est un mélange calibré de pierres de 2 à 50 mm. Les galets et graviers de rivière conviennent, s'ils sont propres. Le mélange approprié est constitué d'une part de ciment, de trois parts de sable et de six parts de pierres en volume. Pour 1 m³ de béton il faut 0,15 m³ de ciment, 0,5 m³ de sable, 1 m³ de pierres et 70 litres d'eau. L'ordre dans lequel ces matériaux sont mélangés n'est pas le même si l'on utilise des mélangeurs mécaniques ou si on les travaille à la main. Si l'on utilise des mélangeurs mécaniques, on met d'abord les pierres, puis le sable, puis le ciment et enfin l'eau. Pour un mélange fait à la main, on travaille à fond le ciment et le sable secs, puis on ajoute les pierres et enfin l'eau.

Il ne faut pas faire sécher trop vite le béton frais car il risque de se rétrécir, de se fissurer et de perdre sa résistance. Il faut le protéger pendant au moins sept jours, en le recouvrant de sacs mouillés. Les causes les plus courantes de la mauvaise qualité du béton sont les suivantes :

- utilisation de sable ou de pierres souillés de terre ;
- utilisation d'une trop grande quantité d'eau ;
- séchage incorrect.

6.3.3 Barrages d'inféroflux dans le sable (sand dams)

Le stockage de l'eau ne se fait pas nécessairement sous la forme d'une nappe d'eau libre en contact avec l'atmosphère. Le sable peut stocker des quantités importantes d'eau dans les interstices qui séparent les particules, si ceux-ci ne sont pas remplis de particules plus fines. Un sable grossier de granulométrie uniforme peut stocker jusqu'à 45 % d'eau en volume. Le sable du lit des cours d'eau est généralement constitué d'un mélange de particules de différents calibres, mais il peut retenir jusqu'à 30 % d'eau dont la moitié peut être drainée par gravité. Tous les habitants des

déserts, hommes et animaux savent que le lit sableux de cours d'eau apparemment à sec peut receler de l'eau à une profondeur accessible. (Lefevre au Tchad).

Le volume de sable qui peut être piégé derrière un barrage dépend du choix de l'emplacement et la capacité de stockage augmente parfois avec le temps. Si le barrage est construit graduellement, par étapes d'un mètre environ, les crues déposeront du sable grossier en arrière du barrage tandis que le limon et l'argile seront transportés en suspension par dessus le déversoir. On peut alors ajouter un second étage au barrage pour piéger une seconde couche et ainsi de suite jusqu'à que l'on ait la hauteur voulue (photos 6.7 et 6.8). Cette technique a été utilisée sur divers cours d'eau dans le désert du Kalahari en Namibie et au Botswana, en Afrique australe ; certains de ces dispositifs fournissent suffisamment d'eau pour que de petites agglomérations puissent s'approvisionner en pompant l'eau de nombreux puits reliés entre eux.

Cette solution présente certains avantages :

- quand le niveau d'eau se trouve à 1 mètre de profondeur, les pertes par évaporation sont négligeables ;
- ce type de stockage réduit considérablement le risque de maladies transmises par l'eau telles que le paludisme et la bilharziose, ou la contamination par les animaux ;
- en installant une conduite à travers le barrage, on peut avoir, en aval de la digue, un approvisionnement en eau propre.

Cette pratique est utilisée également en Amérique Latine où l'on appelle "trincheras" des barrages désableurs, et au Mexique où l'on trouve de grands pièges à sable appelés "atajadizos".

6.3.4 Stockage de l'eau en dehors du cours d'eau

Dans certains cas, il n'est pas possible de construire un ouvrage de retenue directement sur le cours d'eau ; la solution peut alors consister à emmagasiner l'eau à l'écart du cours d'eau, c'est-à-dire dans un réservoir que l'on remplit soit en dérivant l'eau, soit en la pompant. L'emmagasinement en dehors du cours d'eau est généralement plus coûteux car on ne peut pas profiter de la capacité de stockage du lit lui-même ; on n'y aura donc probablement recours que dans les cas où ce surcoût se justifie, comme pour l'abreuvement du bétail ou pour les usages domestiques. S'il s'agit d'abreuver le bétail, l'emmagasinement hors cours d'eau a cet avantage qu'il peut être installé exactement là où on en a besoin - par exemple dans un parc d'élevage ou à proximité d'un forage. Le réservoir taluté décrit dans la section 6.2.2 constitue une forme particulière de stockage hors cours d'eau doté de sa propre zone de captage.

Le coût de l'eau dépend essentiellement du rapport entre le volume d'eau emmagasiné et le volume de terre excavée, appelé rapport stockage/fouilles (S/F). Si on se limite à creuser un trou et à y stocker l'eau, on aura un rapport S/F de 1 mais il est généralement possible d'augmenter ce rapport en utilisant le sol excavé pour façonner un rebord à l'intérieur duquel le volume occupé par l'eau pourra dépasser le niveau initial du sol. On peut aussi obtenir un bon rapport S/F en exploitant une dépression naturelle. Plusieurs formes ont été étudiées en vue d'obtenir le meilleur rapport S/F pour différentes conditions. Pour choisir la meilleure dimension et la meilleure forme, il faut tenir compte de la pente du terrain, du type d'alimentation en eau et de l'utilisation que l'on entend faire de cette eau.

Un terrain légèrement pentu (de 1 à 4 %) donnera un meilleur rapport S/F qu'un terrain plat et son remplissage par écoulement gravitaire des eaux de crue coûtera moins cher que si l'on doit pomper l'eau dans un cours d'eau ou dans un puit. Dans les régions peu arrosées, il est courant d'avoir des systèmes combinés dans lesquels on se sert de fossés d'interception pour augmenter la superficie de captage et d'un système de pompage pour obtenir le niveau voulu si les pluies sont insuffisantes (figure 6.8). Sous les climats chauds et arides, il peut être important de minimiser l'évaporation en



Photo 6.7 : une simple seuil piégeant le sable, Zimbabwe



Photo 6.8 : un grand barrage piégeant les sédiments, Afrique du sud, utilisant une ingénieuse méthode de construction qui réduit le volume de béton consommé. Le coffrage des arches est réalisé avec des tôles ceintrées en fer

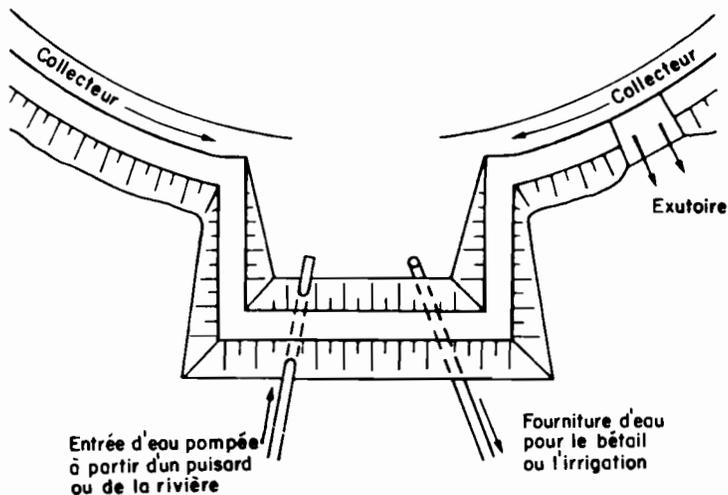


Figure 6.8 : Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne digue

augmentant la profondeur et en diminuant la surface exposée, comme on le verra dans la section 6.4.2.

Le matériel de terrassement nécessaire pour construire des retenues à l'écart des cours d'eau se compose de lames niveleuses remorquées ("SCRAPER") que l'on utilise pour les barrages en terre, mais aussi de bulldozers et d'excavateurs à benne traînante. Il existe aussi des méthodes plus simples, dont les godets métalliques tirés par des tracteurs, par des boeufs ou par d'autres animaux de trait. En matière de terrassement, des prouesses extraordinaires ont été accomplies en Chine avec de simples brouettes et dans beaucoup de pays d'Asie et d'Afrique en transportant la terre sur la tête dans des paniers.

i. Hafirs et réservoirs

Le stockage de l'eau dans des barrages-réservoirs est une pratique très ancienne et très répandue dans la plupart des zones semi-arides. Dans tous les pays arabes d'Afrique du Nord, on les appelle "hafirs". Ce peuvent être de simples trous d'eau situés dans des dépressions naturelles, ou des ouvrages dont la capacité a été augmentée par excavation, la terre déblayée étant utilisée pour construire une digue de retenue. On utilise aussi des fossés d'interception qui permettent d'accroître la superficie de la zone de réception. Jadis, les hafirs étaient soigneusement aménagés, entourés de clôtures pour écarter le bétail et l'empêcher de piétiner les berges, l'eau étant amenée par un tuyau jusqu'à l'abreuvoir. Selon Stanford (1983), on ne trouve ce type d'aménagement soigneux que quand l'eau n'est utilisée que par une seule tribu ou collectivité. Quand la société évolue et que ce n'est plus le cas, l'entretien périclité et les hafirs se dégradent et s'ensablent. Il cite l'exemple du Kenya, où la plupart des hafirs construits dans le Nord-Est du pays après 1969 sont envasés parce qu'aucune communauté ne veut les entretenir sous prétexte qu'ils doivent être accessibles à tout le monde.

En Inde également, l'emménagement de l'eau hors des cours d'eau, dans ce qu'on appelle des réservoirs ("tanks"), est une pratique très répandue. Très souvent, ces ouvrages ont été, comme les réservoirs et khadins, utilisés pour l'irrigation par submersion décrits dans la section 5.3.5, des systèmes de maîtrise de l'eau extrêmement sophistiqués ; les réservoirs sont souvent polyvalents et servent simultanément aux usages domestiques, à l'abreuvement du bétail, à la pisciculture et à l'irrigation. Il existe parfois, à l'intérieur du réservoir des bassins plus profonds où le poisson peut survivre entre deux saisons des pluies, la pêche n'étant pas autorisée dans ces bassins sanctuaires.

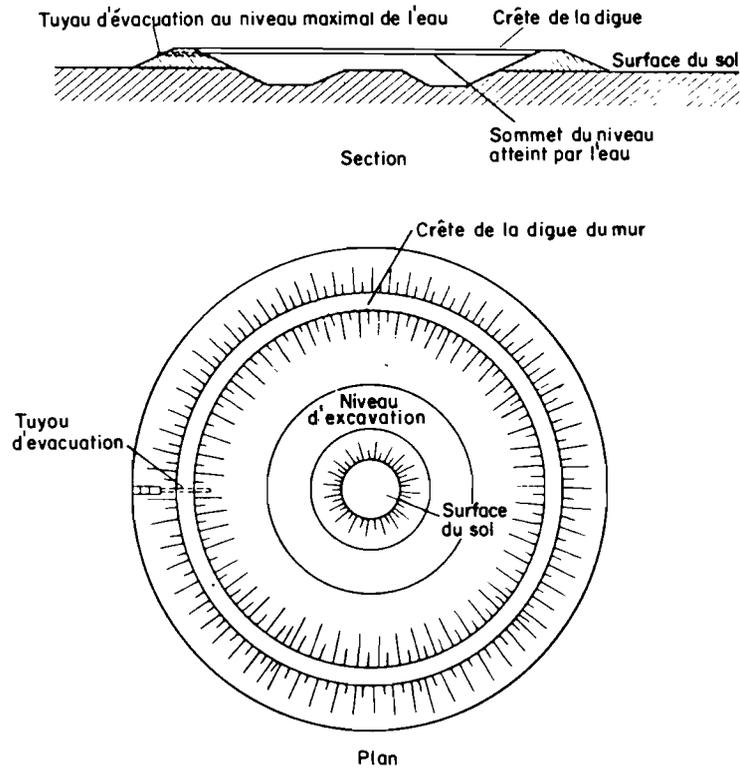


Figure 6.9 : Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne annulaire

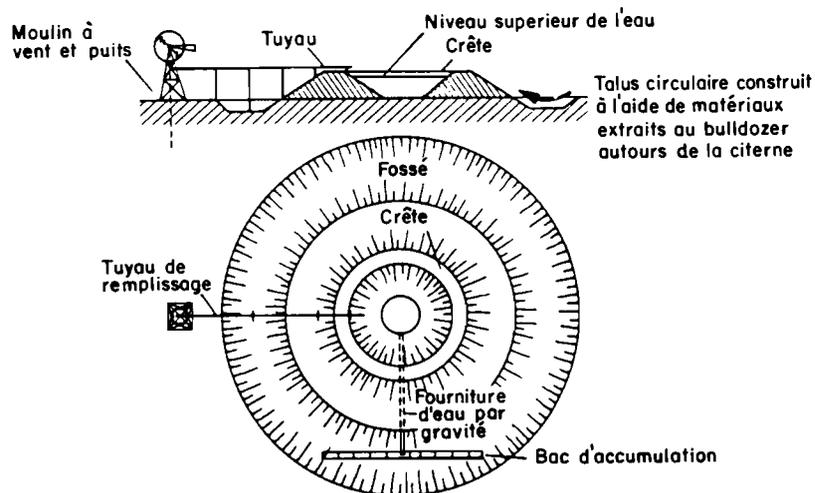


Figure 6.10 : Stockage d'eau hors du lit de la rivière dans une citerne en nid de poule

ii. Réservoirs rectangulaires

C'est la forme la plus indiquée pour les terrains en pente douce ; elle peut donner un rapport S/F de 1,5 à 2,5 (figure 6.8). Des fossés d'interception recueillent le ruissellement superficiel et quand le réservoir est plein, l'eau en excédent se déverse sans problème à travers des évacuateurs dans les drains d'interception suivant. On les appelle aussi barrages-réservoirs. Pour l'abreuvement du bétail, on peut construire des réservoirs de petite taille à des conditions économiques, en utilisant soit un excavateur à benne traînante, soit un petit tracteur agricole équipé d'un godet, soit à la main.

iii. Réservoirs en anneaux (ring dam)

Sur un terrain plat ou presque plat, le meilleur rapport S/F s'obtient avec des réservoirs ronds plutôt que carrés (figure 6.9). Pour des raisons de géométrie, le rapport S/F progresse avec la taille ; il est d'environ 1,5 pour un réservoir de 50 m de diamètre contenant environ 35 000 m³ et passe à 4,5 pour un réservoir de 200 m de diamètre contenant 200 000 m³.

iv. Réservoirs en nid de poule (Turkeys nest tank)

La caractéristique de ce type de retenue, dont l'Australie est le promoteur, est que l'eau est emmagasinée au-dessus du niveau du sol (figure 6.10), ce qui peut être un avantage dans l'un ou l'autre des deux cas ci-après :

- si la surface du sol est relativement imperméable mais recouvre un matériau plus poreux ;
- si l'on a intérêt à pouvoir distribuer l'eau par gravité.

Le rapport S/F est médiocre ; il va de 0,2 pour 200 m³ à 0,4 pour environ 5 000 m³. Ce système sert souvent à remplacer les petites citernes en tôle ondulée remplies par pompage et utilisées pour abreuver le bétail.

6.3.5 Stockage au-dessous du niveau du sol

L'emmagasinement de l'eau dans des réservoirs ou citernes creusés dans le sol est aussi une pratique ancienne, très répandue. Ce mode de stockage est traditionnellement employé au Mexique ; autrefois il a aussi constitué un élément essentiel du système d'aridoculture pratiqué dans le désert du Négev (Evenari et al., 1982). Le groupe de développement des technologies intermédiaires a mis au point une variante moderne qui a été testée au Soudan et au Botswana (ITDG, 1969). Le principe consiste à creuser une citerne ou un réservoir et à le revêtir intérieurement de simples blocs de construction appelés "saucisses" qui sont fabriqués en remplissant des tubes de plastique avec un mélange de sable et de ciment. Les saucisses sont mises en place quand elles sont sèches et souples ; elles deviendront ensuite une paroi rigide. On utilise aussi des feuilles de plastique pour former, sur le côté extérieur des saucisses de plastique, un revêtement imperméable (photo 6.9). C'est là un exemple d'application réussie de technologies intermédiaires, c'est-à-dire de technologies qui consistent à utiliser le produit d'une technologie avancée (les tuyaux de plastique) dans le cadre d'une méthode de construction simple et très économique ne nécessitant qu'un minimum d'outillage et de matériel. Bien qu'il s'agisse sans aucun doute d'une idée brillante, dont il a été démontré qu'elle est techniquement valable, cette méthode ne s'est pas répandue de façon aussi spectaculaire qu'on aurait pu s'y attendre. Cela s'explique peut-être par le fait fréquemment observé que les populations des régions semi-arides, habituées à un mode de vie précaire souvent nomades, ont quelquefois du mal à s'adapter à des méthodes et à des systèmes qui nécessitent un certain entretien.

6.4 PERTES D'EAU EMMAGASINÉE

Les principales causes de pertes de l'eau emmagasinée sont : l'infiltration lorsque la paroi du bassin ou du réservoir présentent des fuites, et l'évaporation à

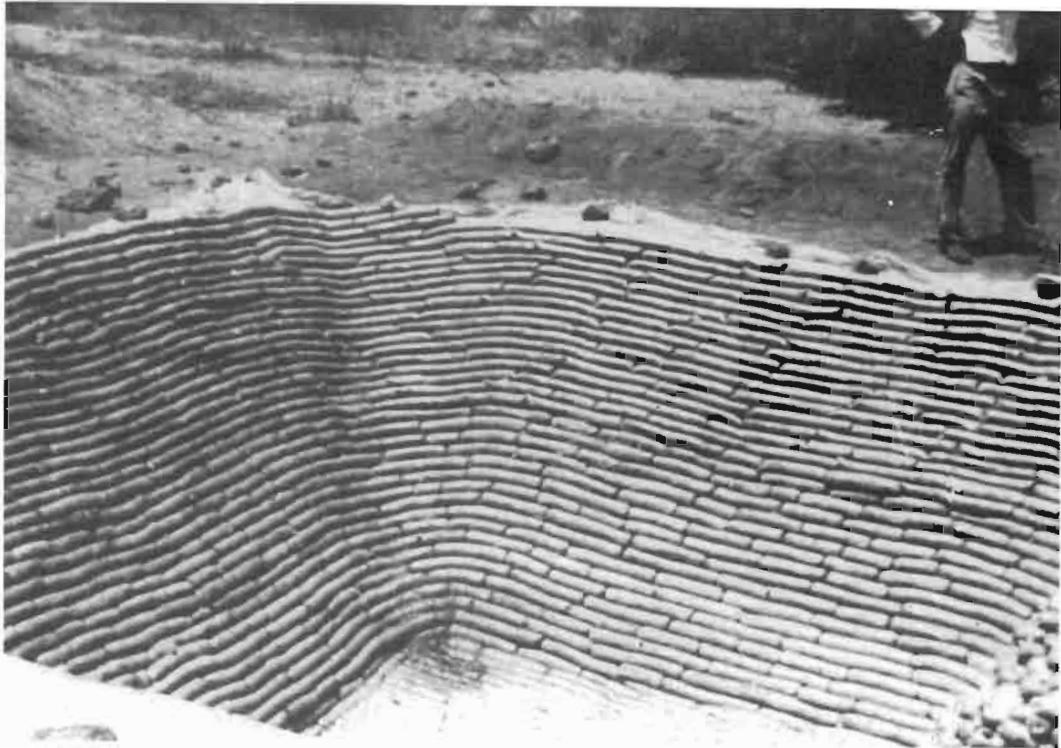


Photo 6.9 : deux exemples de réservoirs d'eau construits par la méthode des saucisses (groupe de développement de méthodologie intermédiaire)

partir de la surface. De nombreuses méthodes ont été mises au point pour remédier à ces deux problèmes mais bien peu sont économiquement attrayantes. Le sujet a été abondamment étudié aux Etats Unis et dans l'Ouest de l'Australie. Laing (1975) et Hollick (1982) ont très bien fait le point de la question.

6.4.1 Pertes par infiltration

On peut, dans une certaine mesure réduire les pertes par infiltration en choisissant judicieusement l'emplacement du réservoir et en évitant d'utiliser du sable et des graviers. L'expérience australienne montre qu'il est souvent plus économique de construire un nouveau réservoir sur un autre emplacement que d'essayer de réparer les fuites d'un réservoir existant (Laing, 1975).

Une méthode peu coûteuse qui fonctionne parfois consiste à améliorer le compactage du bassin en le travaillant pendant qu'il est humide, soit en faisant passer des tracteurs à roues tout autour du bassin, soit en y faisant paître des troupeaux. Les ovins en Australie et les bovins en Afrique sont souvent utilisés pour piétiner la surface du sol de la même façon que l'on compacte le noyau argileux d'un barrage en terre (section 6.3.1.iv). L'effet de compactage peut être en partie dû aux déjections des animaux et d'autres rapportent qu'en Afrique du Sud et dans le Missouri, il arrive que l'on incorpore des quantités supplémentaires de fumier.

D'autres additifs chimiques sont utilisés. Un certain type d'additif (sels de sodium ou polyphosphates) agit par défloculation, c'est-à-dire qu'il disperse les agrégats et colmate les pores. Il existe dans le commerce une argile colloïdale vendue sous le nom de "Bentonite" qui a un effet de défloculation dû à sa teneur en sel de sodium ; cette argile se disperse sous forme de fines particules qui contribuent alors au colmatage. Généralement, les additifs chimiques ne sont économiques que si l'on peut trouver sur place des produits peu coûteux.

La quantité de produit nécessaire varie selon le sol et doit être établie au moyen de tests ; par exemple, un sol bien calibré nécessitera environ 5 kg de Bentonite au mètre carré, quantité qui peut atteindre 20 kg sur des sols sableux. Les membranes superficielles (section 6.3) utilisées pour améliorer le ruissellement provenant des zones d'interception sont aussi des solutions possibles pour réduire les infiltrations à partir des réservoirs généralement avec les mêmes résultats. Certaines membranes fines et peu coûteuses, comme les polyéthylènes, ne sont ni suffisamment robustes ni durables ; des matériaux plus solides et plus durables comme le caoutchouc de butyle sont par contre trop onéreux.

6.4.2 Pertes par évaporation

Dans une certaine mesure la réduction des pertes par évaporation est une question d'aménagement. Le fait de réduire la surface d'emmagasinement en augmentant la profondeur permet à la fois de diminuer la superficie d'évaporation et de réduire le rayonnement incident et l'effet de chauffe. Il est possible aussi de réduire la surface exposée au soleil en stockant l'eau dans un réservoir compartimenté et en pompant l'eau d'un compartiment dans un autre à mesure de sa consommation, de façon à avoir un certain nombre de compartiments pleins et des compartiments vides au lieu d'avoir une seule lame d'eau peu épaisse si le réservoir est en partie vide (Cluff, 1981). Un examen des différentes méthodes utilisées pour supprimer l'évaporation en Arizona et en Australie a abouti à des conclusions différentes quant à leur validité probable. En Australie, Laing et Pepper (1976) sont arrivés à la conclusion que la solution la plus économique consiste à accroître le volume d'eau emmagasiné pour réduire l'évaporation. Cooley (1975) estime pour sa part que certaines méthodes pourraient être économiques, comme celles d'installer une couverture flottante ou de faire de l'ombre.

Le fait d'ombrager la surface de l'eau peut réduire substantiellement l'évaporation. Crow et Manges (1967) ont montré qu'un maillage de plastique ne fournissant que 6 % d'ombre réduit déjà l'évaporation de 26 %, tandis qu'un filet fournissant 47 % d'ombre réduit l'évaporation de 44 %. Il n'en demeure pas moins que

l'installation de filets ou de branchages suspendus au-dessus de la surface de l'eau est une opération coûteuse et qu'aucun maillage flottant n'a à ce jour donné de résultats satisfaisants.

De grands espoirs avaient été fondés sur la méthode introduite dans les années 50 qui consistait à utiliser des produits chimiques ayant la capacité de former, à la surface de l'eau, une pellicule qui n'avait qu'une molécule d'épaisseur mais qui avait pour effet de réduire substantiellement l'évaporation. L'un de ces produits chimiques était le cétyle-alcool. Le problème est malheureusement que cette pellicule se brise facilement et se disperse sous l'effet du vent et des vagues, aussi la méthode elle est peu utilisée aujourd'hui. Une autre approche a été d'utiliser une pellicule superficielle plus robuste et parmi les possibilités expérimentées, il y a eu les couvertures flottantes de polystyrène expansé ou de caoutchouc (Dedrick et al., 1973), ainsi que divers matériaux flottants tels que des blocs de béton léger ou des boules de plastique. Toutes ces méthodes peuvent faire l'objet de démonstrations satisfaisantes à l'échelle de petits réservoirs et d'étangs expérimentaux, mais elles ne se sont pas répandues.

6.5 MISE EN VALEUR DES EAUX SOUTERRAINES

Nous avons examiné, dans le chapitre 5, la question de l'emmagasinement de l'eau dans le profil de sol et dans la section 6.3, celle du stockage au moyen d'ouvrages et dans le lit ensablé des rivières. La présente section traite de l'emmagasinement de l'eau en profondeur et de son extraction.

6.5.1 Recharge des nappes d'eau souterraine

Pour recharger des nappes souterraines, les sources potentielles sont les eaux de crue qui se déversent dans les cours d'eau, le ruissellement recueilli par des sillons ou fossés et le ruissellement emmagasiné dans des réservoirs ou barrages.

Les conditions à réunir pour pouvoir réalimenter les nappes souterraines sont les suivantes :

- il faut une bonne infiltration à travers la surface du sol pour que l'eau puisse être absorbée, et une bonne perméabilité pour qu'elle puisse descendre sous la surface ;
- il faut une bonne capacité d'emmagasinement de l'eau. Dans le cas d'une roche, c'est ce qu'on appelle le rendement spécifique en eau, ou encore le volume qui s'écoule d'une roche par gravité. On l'exprime en pourcentage du volume total de la roche, comme la porosité pour les sols . S'agissant de roches, le rendement spécifique dépend du degré d'altération et de la quantité des joints, des cassures et des fissures ;
- une bonne conductivité hydraulique est nécessaire : la vitesse avec laquelle l'eau peut-être extraite de la roche ou réintroduite dans la roche dépend de la conductivité hydraulique du matériau.

Deux problèmes peuvent se poser pour la recharge des nappes souterraines : la salinité et l'envasement. Les eaux de ruissellement résultant de grosses averses et les eaux de crue qui s'écoulent dans les cours d'eau et les rivières contiennent généralement peu de sels en raison de leur dilution ; mais sur certains sols salins semi-arides, même les eaux de crue et de ruissellement sont salées. Le problème le plus fréquent en ce qui concerne la salinité est celui qui se pose quand la remontée de la nappe phréatique amène une eau souterraine salée à proximité des puits ou des racines des végétaux.

Le problème de l'envasement est dû au fait que les crues soudaines qui se produisent dans les régions semi-arides transportent généralement une forte charge en sédiments. Ces sédiments peuvent obturer la surface du sol et réduire l'infiltration.

Pour remédier à ce problème, on utilise souvent des pièges à sédiments. C'est le cas par exemple des dispositifs de recharge des nappes souterraines de la vallée de San Joaquin en Californie.

i. Méthodes de recharge

L'épandage de nappe présenté en section 5.3 peut aussi être utilisé pour recharger les nappes souterraines soit en amenant le ruissellement dans une zone d'infiltration soit par infiltration de façon complètement accidentelle à travers le fond du canal. Les infiltrations accidentelles à partir des canaux peuvent être bénéfiques là où la remontée du plan phréatique rend service, mais elles peuvent avoir aussi des résultats indésirables en provoquant des problèmes d'engorgement ou de salinité.

La présence de couches aquifères, de gravier par exemple, située à une profondeur modérée par rapport à la surface du sol, permet d'employer la méthode des bassins. Cette méthode consiste à creuser des bassins assez profonds pour arriver jusqu'à l'aquifère ; le bassin peut être rempli à partir d'un canal, après quoi on laisse l'eau filtrer dans l'aquifère et l'on remplit à nouveau le bassin. Les réservoirs ou khadins décrits dans la section 5.3 furent initialement destinés à humecter le profil du sol sous le plancher du réservoir, mais ils ont pour objectif secondaire la réalimentation de la nappe, ce qui améliore la production des puits peu profonds en aval du réservoir. Si les bassins sont spécialement construits pour réalimenter la nappe souterraine, il faut éviter qu'ils ne soient obturés par les sédiments contenus dans l'eau. On peut employer pour cela des pièges à sédiments ; une autre méthode consiste à enlever périodiquement une mince couche du sol superficiel dans le bassin.

Une autre variante, utilisée quand l'aquifère est trop profond pour qu'on puisse se servir de bassins, consiste à déverser l'eau dans des puisards ou puits creusés dans l'aquifère. Dans ce cas, il est plus difficile de corriger les effets du colmatage par les sédiments, encore que cela puisse se faire en recourant à un système de chasse par reflux. Le meilleur système est encore d'utiliser une eau exempte de sédiments.

6.5.2 Pompage des nappes

Nous avons parlé dans la section 2.2, du danger que constitue pour l'environnement la surexploitation des ressources en eaux souterraines, en particulier des eaux fossiles, c'est-à-dire des eaux d'origine géologique ancienne qui ne peuvent être reconstituées. Le risque, en ce qui concerne les zones arides et semi-arides, est d'autant plus grand aujourd'hui que l'on connaît des méthodes efficaces permettant de localiser l'eau souterraine. A très grande échelle, les images prises de satellites sont de plus en plus utiles pour interpréter la géomorphologie et identifier les zones à explorer. A une échelle plus réduite, la photo aérienne permet une étude plus détaillée de l'hydrogéologie ; enfin les prospections géophysiques pratiquées de nos jours sur le terrain font appel à des techniques très sophistiquées telles que les techniques sismiques, électromagnétiques et la résistivité. Toutes ces techniques ont beaucoup progressé ces dernières années, du fait d'un intérêt accru pour les prospections pétrolières.

L'exploitation des eaux souterraines en période de sécheresse peut apporter un soulagement temporaire, alors que se poursuit la recherche d'une solution plus durable. En voici un exemple au Zimbabwe. Dans le cadre d'un secours d'urgence, 282 petits forages équipés de pompes manuelles ont été installés en six mois, et 40 autres emplacements ont été repérés pour la création de puits creusés à la main. On s'est servi de méthodes électromagnétiques et d'études de la résistivité, ainsi que d'une analyse faite par ordinateur sur le terrain, pour localiser ces emplacements : elles ont donné un taux de succès de 90 % (Houston, 1985).

Les eaux souterraines peu profondes peuvent être exploitées comme les lits

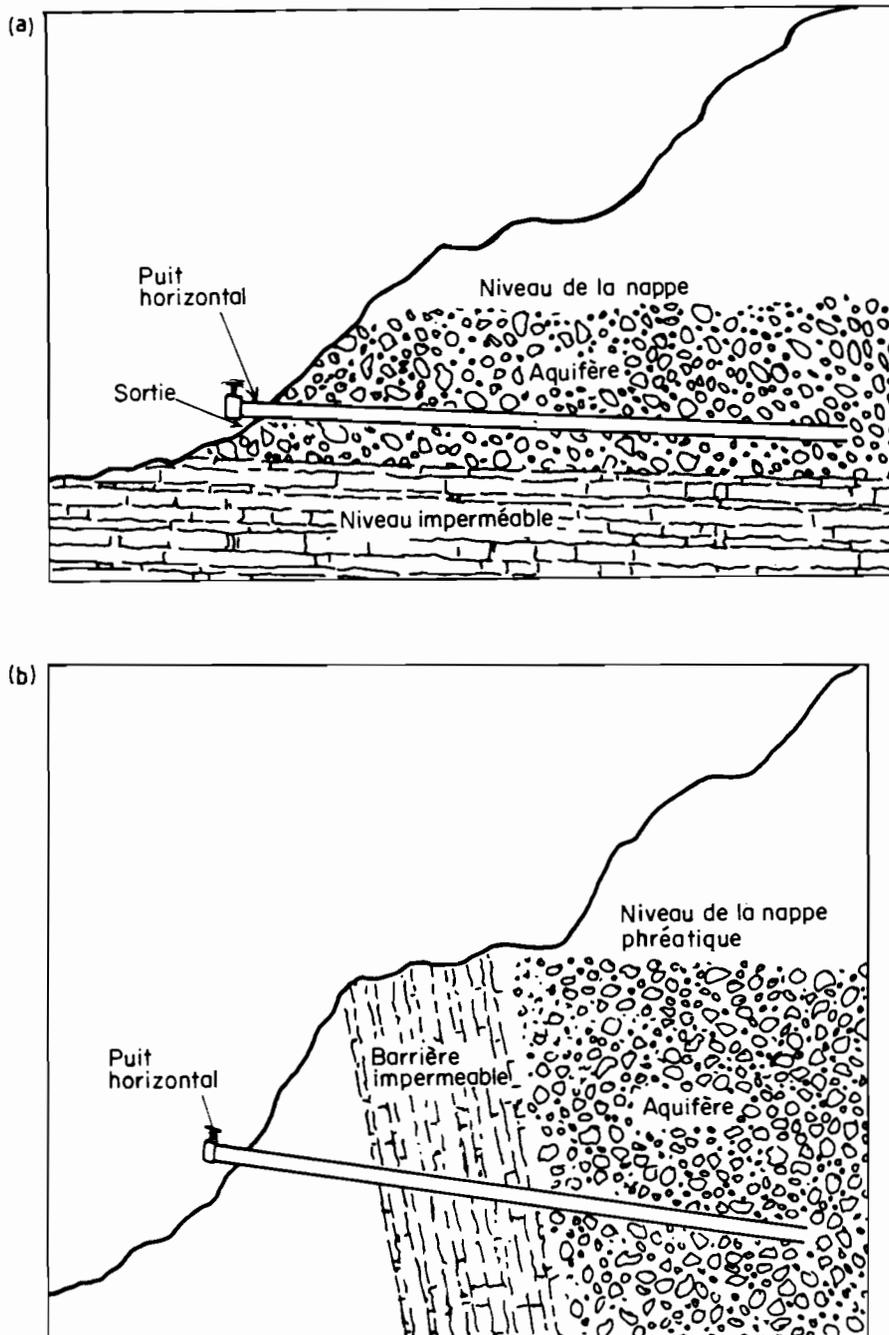


Figure 6.11 : puits horizontaux (Welchert et Freeman, 1973)

(a) creusé dans un aquifère détecté par la végétation luxuriante dans la zone de source

(b) puit creusé dans un aquifère prisonnier

ensablés des rivières (section 6.3.4). Les couches de graviers que l'on trouve dans les plaines d'inondation ou sur les berges des cours d'eau offrent des possibilités de ce genre et peuvent souvent être réalimentées avec les eaux de crue.

Les puits peu profonds sont très courants dans l'exploitation des eaux souterraines. En Inde, le type le plus courant est un puit circulaire avec revêtement en pierres, de 10 ou 15 m de diamètre et de profondeur semblable, ou un puit rectangulaire de même capacité. Cette importante capacité est nécessaire car aussi bien le sol argileux que la roche sous-jacente ont une faible conductivité hydraulique. Le puit est vidé chaque jour pour les besoins domestiques, l'abreuvement des troupeaux et la petite irrigation ; il se remplit pendant la nuit. Cette méthode traditionnelle a fonctionné avec succès pendant des siècles lorsque l'eau était puisée à la main ou avec des boeufs ; dans certains districts cependant, depuis que les pompes actionnées d'abord par des moteurs diesel, puis par des moteurs électriques, se sont propagées, l'eau peut être prélevée beaucoup plus rapidement. On a donc fait des recherches pour accroître la capacité de ces puits et du système de distribution. Sur le plateau du Deccan, un dispositif courant consiste à construire de petits forages (30-50 mm) en diagonale et horizontalement pour tenter d'exploiter un plus grand nombre de failles et fissures de la roche. La même technique pour accroître la production des puits est utilisée en Iran, où les collecteurs horizontaux sont des tunnels creusés à la main. Kennedy et Rogers (1985), Fraenkel (1986) ont passé en revue les dispositifs simples d'élévation de l'eau.

Un autre type de forage horizontal est utilisé dans l'Ouest des Etats-Unis (Welchert et Freeman, 1973) quand de petites quantités d'eau sont nécessaires pour abreuver les troupeaux. Ces puits horizontaux sont aussi appelés "sources tubées", car ils visent surtout à valoriser des sources existantes, comme on le voit sur la figure 6.11.a, ou à libérer une nappe captive, comme à la figure 6.11.b. Avec un matériel de forage spécial, on perce un trou horizontal dans lequel on insère un tube métallique de 50 mm de diamètre. Le tuyau est scellé de manière étanche et muni d'une vanne de façon à ce qu'il n'y ait aucun risque de contamination. Le trou est percé sous un angle légèrement descendant, de façon à ce que le tuyau reste constamment plein et que l'eau puisse s'écouler sous la pression de l'aquifère.

Il s'agit là d'une version moderne d'un système ancestral qui consiste à percer un tunnel horizontal dans le flanc d'une colline jusqu'à ce qu'il atteigne la nappe phréatique et que l'eau puisse s'écouler par gravité à travers le tunnel (figure 6.12).

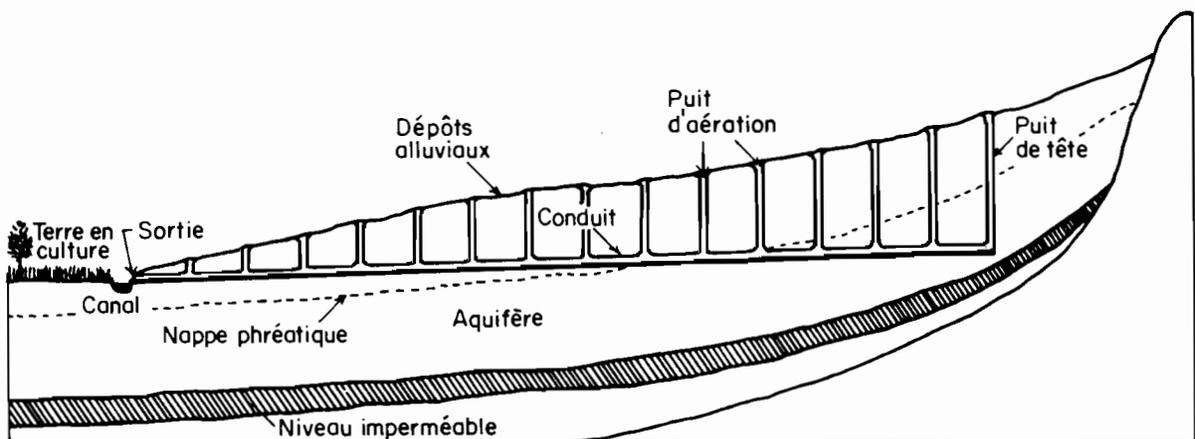


Figure 6.12 : un système de puit horizontal nommé "qanat" (d'après Wulff, 1968)

C'est une méthode encore très répandue dans toute l'Afrique du Nord et l'Asie occidentale. En Afghanistan et au Pakistan, ces tunnels sont appelés "karez" ; en

Afrique du Nord "foggaras" ; dans les Emirats arabes unis "falaj", et en Iran "qanats". On estime qu'il y a en Iran 40 000 qanats d'une longueur totale de 270 000 km qui assurent 35 % de l'approvisionnement en eau du pays : ils sont généralement situés dans des régions où la pluviosité annuelle moyenne est de 150-250 mm. Jusqu'à une époque récente c'est-à-dire jusqu'à la construction d'un réservoir de stockage, la totalité de l'alimentation en eau des 2 millions d'habitants de la ville de Téhéran était assurée grâce à ces qanats. Leur construction étant une opération extrêmement ardue et dangereuse, cette technique n'est plus aujourd'hui utilisée, mais des centaines de milliers de qanats sont encore en service. Il devrait être possible, grâce aux techniques modernes de construction de tunnels présentant des conditions de sécurité acceptables, de mettre au point une version actuelle de cette méthode ancienne et parfaitement fonctionnelle.

7. APPLICATIONS DE LA CONSERVATION DES EAUX

7.1 PATURAGES

7.1.1 Problèmes

Nous n'allons pas aborder ici l'ensemble du problème de l'aménagement des pâturages ; nous nous limiterons à examiner brièvement certaines applications de la conservation et de la gestion des eaux aux zones de pâturages. Harrington *et al.* (1984) ont analysé les expériences faites en Australie en matière d'aménagement des terrains de parcours ; aux Etats-Unis, ce travail a été fait par Valentine (1971). La dégradation des terres de parcours, en particulier dans certaines zones semi-arides de l'Afrique suscite beaucoup de préoccupations (photo 7.1). Il est aussi inquiétant de constater que dans certains cas, l'augmentation de cette dégradation est le résultat d'une politique de développement du cheptel, animée d'excellentes intentions ; c'est une thèse présentée de façon très convaincante par Ormerod (1978) et Le Houérou (1979). Les images obtenues par satellites montrent incontestablement que la dégradation du Sahel et du Sud-Ouest de l'Afrique est causée par l'homme et qu'elle est due au surpâturage.



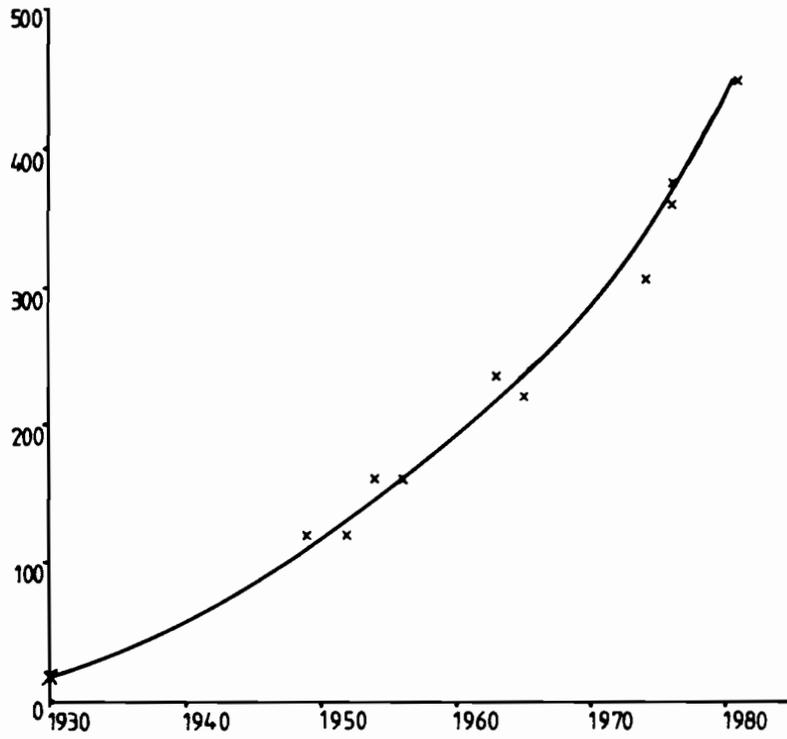
Photo 7.1 : Dégradation de la couverture végétale par le surpâturage dans la zone semi-aride du Zimbabwe

L'un des problèmes est l'augmentation de la pression qu'exerce sur la terre, dans la plupart des pays, un cheptel de plus en plus nombreux. La figure 7.1 montre deux exemples, le premier sur le plateau de Mambilla, à la frontière entre le Nigeria et le Cameroun et le deuxième au Swaziland. Au Swaziland, la taille moyenne du troupeau familial n'a pas augmenté ; l'augmentation du cheptel national est proportionnelle à l'accroissement démographique (Fowler, 1981). Au Nigeria, elle résulte d'une sédentarisation accrue des Fulani qui abandonnent leur mode de vie traditionnel fait de migrations saisonnières avec leurs troupeaux. Dans les deux cas, il est indéniable que l'écosystème subit actuellement une dégradation irréversible. Ces deux schémas se retrouvent un peu partout dans l'Afrique semi-aride. Les difficultés auxquelles on se heurte quand on essaie de réduire la taille des troupeaux ont été étudiées par Stocking (1985) à propos d'une tribu de Tanzanie ; l'auteur résume la situation en ces mots "le



Photo 7.2 : Image par satellite montrant les effets du surpâturage en Namibie. Les zones de couleur sombre sont celles dans lesquelles le surpâturage est maîtrisé ; en haut, à gauche, on peut voir un élevage commercial de bovins géré correctement ; en bas, à droite, le parc national d'Etosha où la faune est protégée (Centre de Télédétection de la FAO).

(a)



(b)

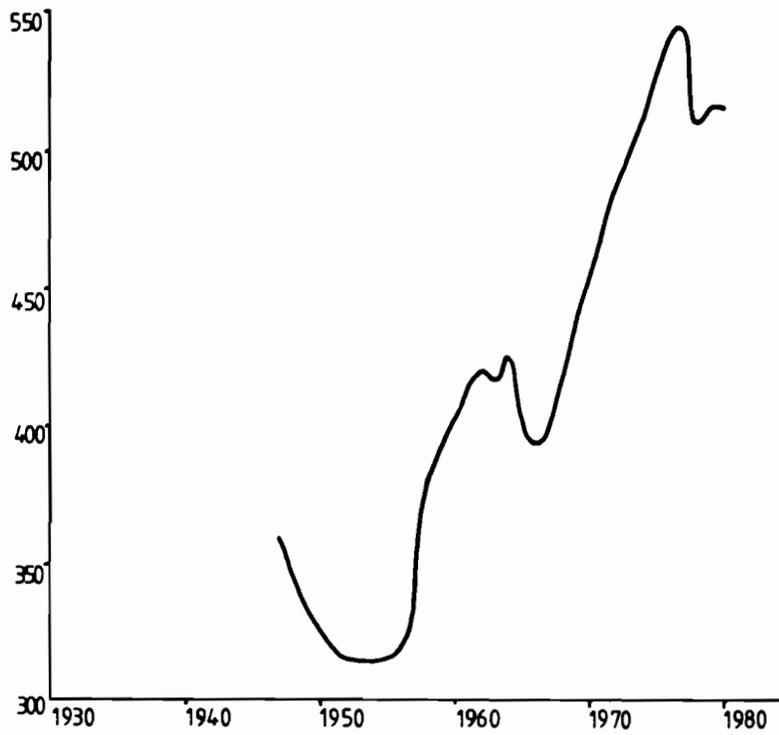


Figure 7.1 : Evolution de la population bovine
(a) plateau de Mambilla, Nigéria, 1930-1980
(b) Swaziland, 1947-1980

message est clair : l'érosion des terres de parcours est un problème qui ne peut être résolu par la réduction des troupeaux. La constitution de troupeaux démesurés est un symptôme qui recouvre des problèmes plus profonds et il est inutile de traiter uniquement les symptômes".

La mobilité décroissante des pasteurs nomades ou semi-nomades a plusieurs raisons ; certaines politiques nationales peuvent avoir pour effet de freiner le franchissement des frontières ; l'installation de clôtures est venue entraver les déplacements habituels ; les troubles civils peuvent détourner les pasteurs de leurs itinéraires traditionnels ; certains gouvernements pratiquent une politique de distribution des terres pour sédentariser les nomades. M.L. et M.J. Odell (1980), analysant ce type de politiques au Botswana, ont passé en revue toute une série de projets de développement de l'élevage et, à propos de l'un des plus récents de ces projets, ils déclarent : "A l'arrière plan de la formulation de ce projet se trouve la conviction qu'en accordant à des personnes et à des collectivités le droit exclusif d'exploiter des secteurs nettement délimités de terres de parcours que les gens seront motivés pour surveiller la taille de leur troupeau". Ces programmes visent aussi à améliorer l'aménagement des troupeaux et des terrains de parcours et à augmenter la productivité grâce à des ressources en eau supplémentaires. Pour les eaux de surface, le gouvernement finance la construction d'un grand nombre de petits barrages qui seront gérés par des groupes d'agriculteurs locaux. La quantité d'eau emmagasinée et la quantité d'herbage obtenue dépendent l'une et l'autre des précipitations ; quand la réserve d'eau s'épuise, on conduit les troupeaux vers de nouveaux pâturages. Néanmoins, populations et troupeaux se concentrent traditionnellement dans ce qu'on appelle des "points de regroupement du bétail", dont la localisation est liée à la présence de cours d'eau, de puits ou autres ressources hydriques de surface. Le système traditionnel consistait à éloigner le troupeau du village pendant la saison des pluies, de façon à protéger le pâturage en prévision de son retour au village pendant la saison sèche (Fortmann et Roe, 1981). Dans certains cas la source d'approvisionnement en eau a été remplacée par des forages qui vont chercher l'eau en profondeur dans les sables du Kalahari. Cela a permis d'améliorer les disponibilités en eau à proximité des points de regroupement de bétail et de restreindre les déplacements saisonniers vers les pâturages traditionnels relativement éloignés. D'où un grave surpâturage et une dégradation au voisinage des centres habités (Baral et al., 1983).

Il convient de citer deux rapports qui décrivent des programmes d'aménagement collectifs à succès. Pacey (1986) décrit la formation au Niger, au début des années 1980, d'associations de pasteurs regroupant une vingtaine de ménages, se chargeant d'aménager les terres de pâturages sur une base coopérative. L'autre exemple est celui d'un projet PNUD réalisé dans l'Est du Sénégal (PNUD, 1984). Pour tenter de résoudre les problèmes de l'utilisation communale des pâturages, on a alloué des droits permanents à des unités de 100 familles, espérant grâce à cette initiative, arriver à :

- planifier la gestion des pâturages de façon à exploiter plus rationnellement les terres de parcours ;
- créer des stimulants sous forme d'accroissement de revenu résultant d'une vente accrue et d'une meilleure productivité des troupeaux ;
- mettre en place un cadre d'investissement pour des installations hydrauliques, des services de vulgarisation pour l'élevage, des activités de formation et des facilités de crédit.

Le programme a été considéré comme largement réussi. Entre 1977 et 1983, la composition du troupeau s'est améliorée, la mortalité a diminué et le taux de velage a augmenté. La décharge et la taille du troupeau ont l'une et l'autre augmentée. Entre 1980 et 1982, le revenu moyen par famille vivant de l'élevage a augmenté de 48 % grâce à une augmentation du volume des ventes combinée à de meilleurs prix.

7.1.2 Aménagement des zones de pâturages

i. Gestion de l'eau

La gestion de l'eau est généralement le facteur décisif quand on veut augmenter la productivité des terrains de pâture semi-arides. Un bon aménagement comprend bien d'autres aspects tels que l'utilisation d'un taux de charge approprié, l'alternance de périodes de pâture et de périodes de repos, l'utilisation contrôlée des feux et l'amélioration de la composition des herbages, mais la gestion de l'eau est en général l'élément le plus important. Lors d'essais en champ fait dans l'Ouest du Colorado, le contrôle du pâturage a permis à lui seul de réduire de 30 % le ruissellement et de 35 % la production de sédiments (Hadley, 1977). En Arizona, la modification de la végétation, d'arbustes ligneux en graminées, a diminué le volume du ruissellement et augmenté la capacité de charge ; les auteurs qui ont décrits cette expérience (Simanton et al., 1977) ont observé que "vu l'étendue des terrains de parcours semi-arides dans le monde - similaire à la zone en question - une telle conversion des terrains de parcours peut avoir un effet considérable sur la production agricole et les résultats économiques". Dans le cadre d'une expérience factorielle in situ faite au Nebraska avec une pluviosité annuelle de 500 mm, le ruissellement économisé grâce à des sillons dessinés suivant les courbes de niveau a représenté jusqu'à 30 % des précipitations (Dragoun et Kuhlman, 1968).

Un autre exemple des relations étroites qui existent entre la gestion des pâturages et les disponibilités en eau, similaire à celui du Botswana décrit dans la section précédente, nous vient de la région de Butana au Soudan qui reçoit en moyenne 200 mm de pluie par an. Les pasteurs nomades pratiquent aujourd'hui encore une technique dont on pense qu'elle remonte à plus de 2 000 ans. Ils creusent des puits dans lesquels l'eau s'emmagine durant les orages d'été. Dès le début des pluies, il emmènent les troupeaux des berges de la rivière Atbara vers les herbages du Butana et reviennent plus tard pour utiliser l'eau emmagasinée et les pâturages voisins (Hays, 1981).

Une autre forme d'utilisation des disponibilités en eau pour aménager les pâturages existe en Arizona, où la pluviosité annuelle moyenne est de 150 mm. Un parcours de 1 500 hectares dispose de trois points d'eau permanents et de deux sources saisonnières d'approvisionnement. Au lieu de poser à grand prix des clôtures pour contrôler le pâturage, on a aménagé celui-ci en clôturant chaque point d'eau et en les ouvrant à tour de rôle. Pour encourager le bétail à utiliser le point d'eau ouvert, on y dispose des blocs de sel. La première année, il a fallu éloigner le troupeau des points d'eau fermés, mais en l'espace d'un an, le troupeau a appris à aller lui-même à la recherche du point d'eau ouvert (Martin et Ward, 1970).

ii. Aménagement de la surface des terrains de parcours sur une grande échelle

Il existe un certain nombre de méthodes qui permettent de réduire le ruissellement superficiel. Ces méthodes consistent à aménager la surface du sol de façon à ralentir l'écoulement ou à augmenter l'emménagement de l'eau dans les dépressions superficielles. Comme il s'agit généralement d'intercepter et de retenir l'eau temporairement dans des sillons ou des dépressions, on peut profiter de ces circonstances pour réensemencer le parcours et améliorer la composition des herbages ou pour introduire de nouvelles espèces. La question de l'épandage de l'eau par dérivation des crues a été examinée dans la section 5.3.2. Les méthodes simples d'épandage de l'eau donnent une distribution qui n'est peut-être pas suffisamment uniforme pour des cultures mais qui permet, pour un coût modique d'améliorer la production herbagère même si l'effet est irrégulier. Cette pratique, dont a parlé Valentine (1971), a depuis longtemps fait ses preuves dans les Etats semi-arides de l'Ouest des Etats-Unis. La photo 7.3 montre un exemple australien. Si les eaux de crues sont très chargées en limons, le dépôt de sédiments risque de compromettre la productivité des herbages, aussi des pièges à sédiments sont-ils parfois intégrés dans le réseau de distribution.



Photo 7.3 : Epannage des eaux de crue pour améliorer le pâturage, Australie
(service de la conservation des sols de New South Wales)



Photo 7.4 : Fossés de pâturage pour disperser le ruissellement superficiel, Australie

Des diguettes d'épandage largement dimensionnées peuvent présenter un inconvénient si la terre est utilisée en rotation avec des cultures. Dans ce cas, on peut utiliser une version plus petite des diguettes comme celle que montre la photo 7.4 prise en Australie occidentale. Dans cet exemple, le blé alterne avec un pâturage spontané de graminées et de trèfle souterrain. Dans les pâturages on fait courir les petits sillons le long d'une vraie courbe de niveau, et tout le sol excavé est répandu en une couche mince sur le côté amont. Les sillons interceptent et répartissent de petites quantités de ruissellement ; si l'écoulement dépasse la capacité d'emmagasinement, il déborde vers l'aval sans provoquer de problèmes d'érosion. Des machines ont été mises au point aux Etats-Unis pour façonner de petits sillons et appliquer des engrais, des graines herbagères et des graines de légumineuses en un seul passage (Erickson et Currie, 1982). Sur les terrains plats de l'Australie on utilise des petits sillons de prairie disposés suivant une grille rectangulaire pour favoriser l'accumulation de l'eau et son infiltration sur les terrains de parcours dégradés (Cunningham, 1974). Dragoun et Kuhlman (1968), Neff et Wright (1981) ont montré que les sillons suivant les courbes de niveau se sont révélés efficaces aux Etats-Unis. L'effet est suffisant pour justifier de coûteuses opérations dans le cas d'élevages commerciaux, mais non pour l'élevage de subsistance tel que le pratiquent les pasteurs nomades ou semi-nomades.

iii. Petites modifications de la surface

Il est parfois possible de remplacer les intrants en capital ou en machines par de la main-d'oeuvre ; on en a un exemple au Niger, avec les demi-lunes décrites dans la section 5.2.4. Ce sont de petites cuvettes creusées à la houe de façon à former de petits sillons (20 cm de profondeur) selon un quadrillage de 10 mètres de côté. On y répand de la poudrette de fumier et l'on y jette quelques semences de graminées pour améliorer la croissance végétale (Gallacher, 1974). Une autre méthode qui ne demande que de la main-d'oeuvre et des matériaux locaux consiste à construire les cordons de pierres ou diguettes, dont il a été question dans la section 7.2.2 et qui sont représentés sur les photos 7.5 et 7.6. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour faire pousser des cultures fourragères et vivrières, le choix étant fonction des précipitations et des souhaits de la population locale. Au Burkina Faso et au Kenya, des projets ont été lancés dans le but d'améliorer l'alimentation du bétail mais ont ensuite viré vers la production vivrière. Un autre exemple de changement d'objectifs concerne le désert du Néguev où des micro-impluvium ont été aménagés de façon à diriger la totalité du ruissellement vers le point le plus bas de la cuvette, où un arbre fruitier peut être cultivé. Les bédouins nomades estiment qu'ils ont davantage besoin d'arbustes fourragers que de fruits. Les microzones d'interception sont décrites et illustrées dans la section 7.2.

iv. Outils et machines

En ce qui concerne le stockage des eaux de surface, il est à signaler que la technique décrite dans la section 5.2.2, qui consiste à retenir les eaux de pluie dans de petits sillons ou dépressions peut aussi s'appliquer aux terrains de parcours; plusieurs machines ont été mises au point pour cet usage. Une de ces machines est une charrue à disques modifiés, schématiquement représentée sur la figure 7.2 ; certains disques ont été enlevés tandis que ceux qui sont laissés en place sont partiellement découpés, ce qui a pour effet de former des sillons peu profonds divisés en courts tronçons. Utilisée en Arizona, cette technique s'est révélée efficace pour atténuer le ruissellement superficiel et augmenter la densité du couvert herbacé (Tromble, 1976). En Australie, deux outils ont été mis au point pour obtenir un effet similaire ; le premier est une machine à disques opposés ("opposed disc pitter") (photo 7.7), l'autre est un scarificateur équipé de disques opposés (photo 7.8). Les résultats obtenus sont illustrés par la photo 7.9 prise dans le Nord-Est de l'Australie occidentale et la photo 7.10 prise dans l'Ouest de la Nouvelle Galles du Sud. Pour créer des poches de forte infiltration et emmagasinement de l'eau, on utilise aussi un scarificateur à dents ("tine pitter"), qui comprend une série de grosses dents montées sur un axe ou tambour rotatif ("spiked roller"); la photo 7.11 en montre une variante, le rouleau à



Photo 7.5 : Des demi-lunes sont tracées en creusant légèrement l'emplacement, Burkina Faso (OXFAM)



Photo 7.6 : On construit de petits cordons de pierres avec des blocs de latérite, Burkina Faso (OXFAM)

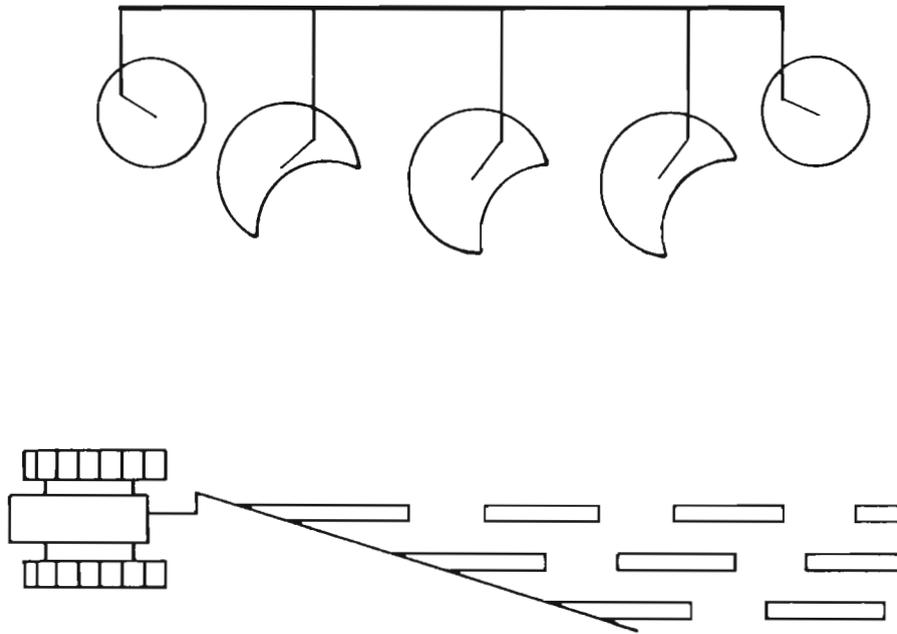


Figure 7.2 : Charrue à disques modifiés pour creuser de petits fossés dans les terrains de parcours



Photo 7.7 : Outil à disques opposés utilisé pour améliorer l'emmagasinement de l'eau en surface. Noter le couplage universel entre les deux paires de disques (Département de l'agriculture, Australie occidentale)

pointes. Une autre machine mise au point en Arizona (Dixon, 1983) également fabriquée en Australie, sert à dessiner des "empreintes" ("land imprinter") sur le sol et à améliorer l'emmagasinement de l'eau en surface grâce à la formation de petites dépressions (photo 7.12).



Photo 7.8 : Outil à disques opposés, avec scarificateur et semoir pour semis d'herbages (Département de l'Agriculture, Australie occidentale)

7.1.3 Restauration des parcours dégradés

Les terres de parcours dégradées par le surpâturage ont parfois une capacité de récupération tout à fait remarquable quand elles sont mises au repos. La photo 7.13 montre un exemple pris en Ethiopie, où l'exclusion totale du bétail sur une des rives du cours d'eau a permis à ces terres d'être restaurées rapidement. Les trois photos de la photo 7.14 montre un autre exemple en Inde. Pour faire respecter l'exclusion totale du bétail, on a posté un gardien ; des arbres ont été plantés pour obtenir du fourrage et du combustible ; ce programme a été conduit par la collectivité locale. Là encore, il a suffi de quelques campagnes pour assurer la restauration des terres herbagères.

Si la dégradation est aggravée par la sécheresse ou par des précipitations irrégulières, il faut recourir à des techniques plus intensives de restauration nécessitant des machines. Certaines de ces techniques sont représentées sur les photos 7.7 à 7.12, 7.15 et 7.16. En Australie deux projets ont donné de bons résultats, l'un en Australie centrale présenté par Keetch (1981), l'autre par Fitzgerald (1976) dans le Territoire Nord.

Une autre activité de remise en état qui a été beaucoup étudiée en Australie est celle qui vise à améliorer ce qu'on appelle des zones "pelées" ; ce sont des zones sur lesquelles la salinité s'accumule en se combinant avec la formation d'une croûte superficielle ce qui donne une surface à peu près complètement dénudée. De nombreuses techniques ont été expérimentées de façon poussée ; l'une de celles qui a donné les



Photo 7.9 : Formation de fossés et de sillons sur de vastes étendues, projet de restauration de la rivière Ord (Département de l'agriculture, Australie occidentale)

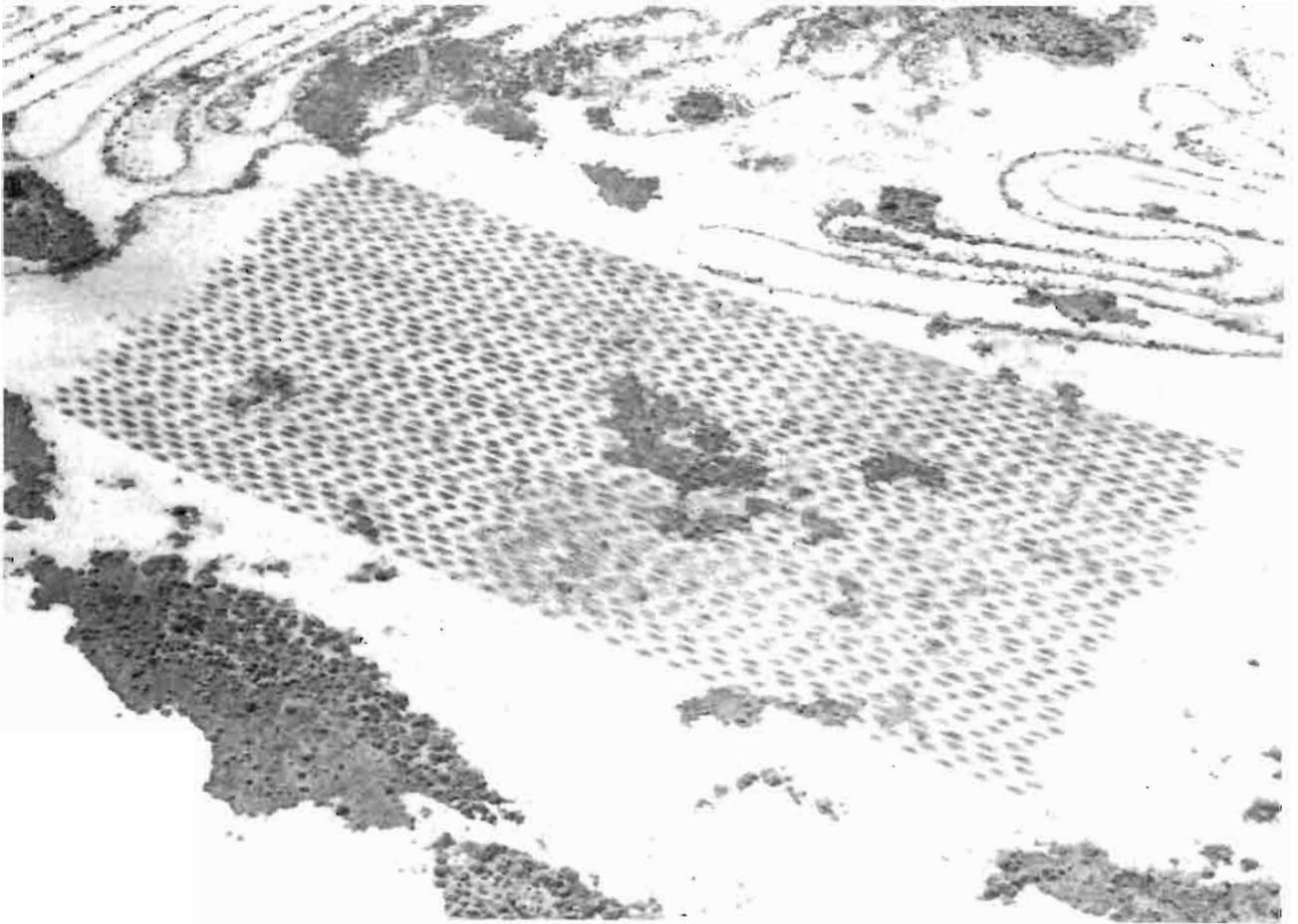


Photo 7.10 : Creusement de petits fossés dans la zone occidentale semi-aride de la Nouvelle Galle du sud, Australie (Département de l'agriculture de l'Australie occidentale)

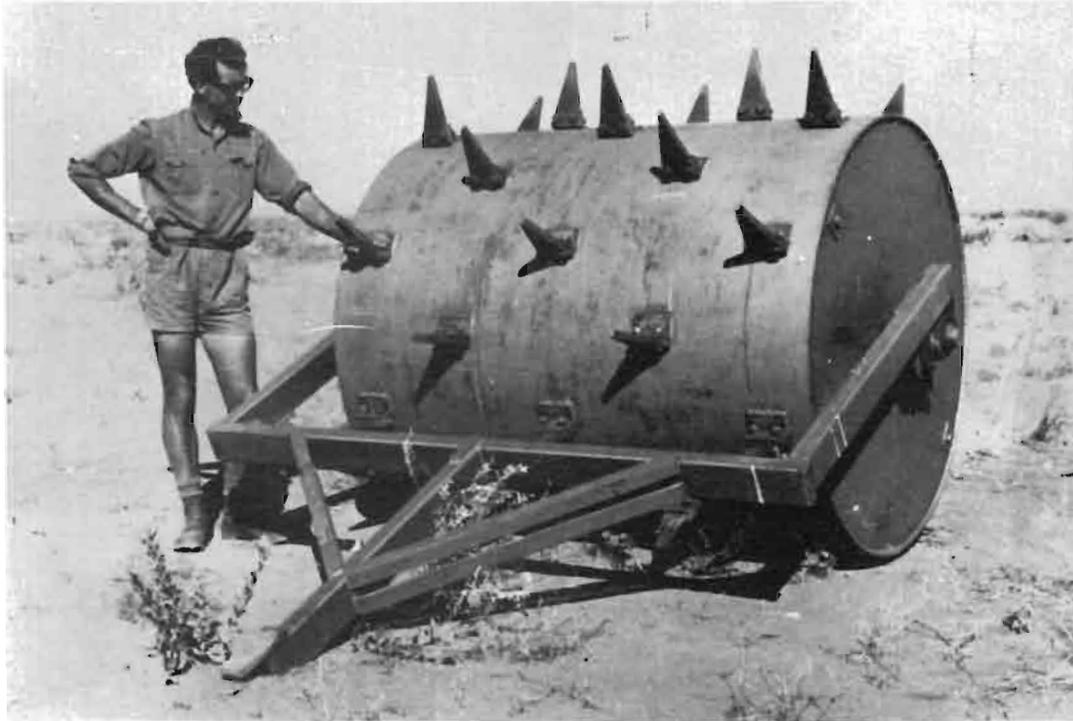


Photo 7.11 : Un rouleau armé d'épines pour améliorer les parcours ; il peut être rempli d'eau pour augmenter son poids si nécessaire (Département de l'Agriculture d'Australie occidentale)

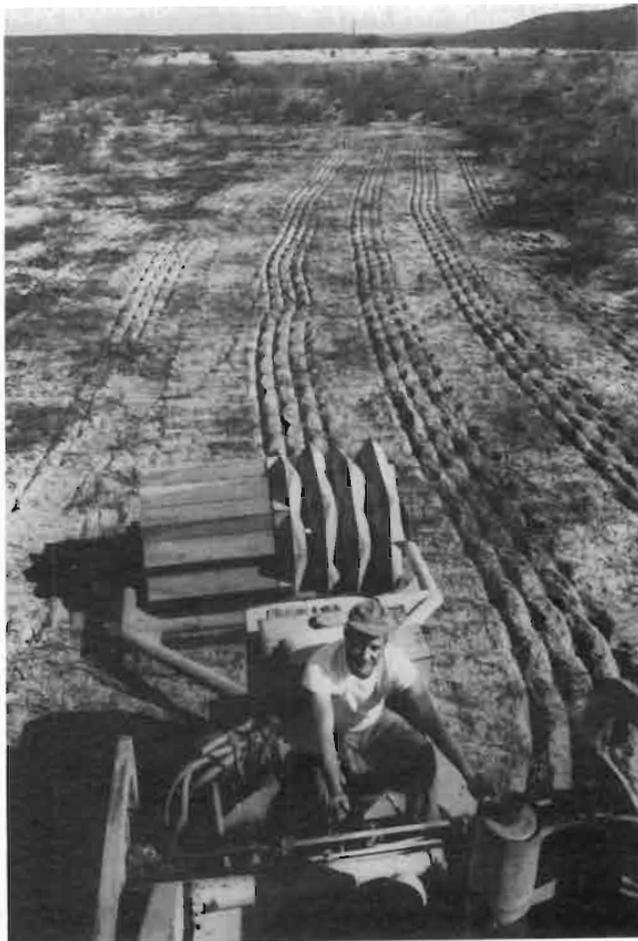


Photo 7.12 : Cette machine appelée "imprinter" dessine à la surface du sol de petites ondulations, qui favorisent le stockage en surface des eaux de pluie (R.M.Dixon, USDA-ARS)



Photo 7.13 : Résultat obtenu en Ethiopie après suppression du pâturage ; sur la rive droite, le pâturage a été complètement interdit ; sur la rive gauche le surpâturage s'est poursuivi

meilleurs résultats est celle dont parle Jones (1967) et qui est représentée sur la photo 7.17. Elle consiste à retenir l'eau derrière des diguettes de faible hauteur pour lessiver la salinité. D'autres méthodes consistent à scarifier la surface, à tracer des sillons en spirales (photo 7.18) et à semer en poquets des plantes herbacées (photo 7.19).

7.2 ARBRES ET ARBUSTES

7.2.1. Problèmes

Dans les régions semi-arides, les terres boisées, la brousse, les pâturages et les terres arables ne se présentent pas comme des formes distinctes d'utilisation des terres. Le paysage est toujours un mélange de plusieurs ou de l'ensemble de ces éléments, et les arbres ou arbustes font toujours partie de l'écosystème. Ils pourvoient à un grand nombre de besoins : combustible, pacage aérien, matériaux de construction, cultures vivrières et cultures de rente - en général diversement combinées (Le Houérou, 1987).

La raréfaction des peuplements naturels d'arbres et d'arbustes est l'indice d'une charge excessive susceptible d'entraîner une dégradation accélérée des terres. Brown (1985) a proposé sur la base du modèle de Newcombe et après des études faites en Ethiopie une description du processus de dégradation progressive. Dans un premier stade, la forêt naturelle recule devant l'extension des cultures, mais les disponibilités en bois restent suffisantes et la baisse graduelle de la fertilité des terres passe inaperçue. A mesure que la population augmente, il se crée un marché du bois, qui est alors coupé et vendu par les paysans, alors qu'eux mêmes utilisent comme combustible les résidus des cultures et les déjections des animaux. La forêt s'épuise, la fertilité des terres cultivées baisse et l'érosion du sol s'accélère.



Photo 7.14 : Restauration de terres de pâturages en Inde (T.F. Shaxson)

(a) les parcours communaux ont été pratiquement dénudés par le surpâturage



(b) le conseil du village décide d'essayer une politique consistant à suspendre totalement le pâturage, à planter des arbres et à engager un gardien



(c) il a suffi de deux saisons pour que les arbres prospèrent et que le couvert herbacé se rétablisse



Photo 7.15 : Rouleau hacheur utilisé pour lutter contre les broussailles inutiles qui envahissent les terrains de parcours (Service de conservation des sols, Nouvelle Galle du sud)



Photo 7.16 : Sillons en quinconce formés en vue d'accroître l'infiltration ; les sillons ont été tracés au moyen de la charrue à disques opposés et semoir, voir la photo 7.8 (Commission de conservation du territoire Nord, Australie).



Photo 7.17 : Diguettes utilisées pour retenir l'eau, lessiver les sels et encourager la végétation à se reconstituer sur des zones "pelées" (Service de conservation des sols de la Nouvelle Galle du Sud)



Photo 7.18 : Sur des zones dénudées, horizontales, on trace des sillons en spirale pour favoriser la repousse de la végétation. Sur un terrain meuble, on peut utiliser seule la charrue à disques opposés, représentée sur la photo 7.7. Sur un terrain plus dur, il faut utiliser le "ripper" scarificateur, représenté sur la photo 7.8.

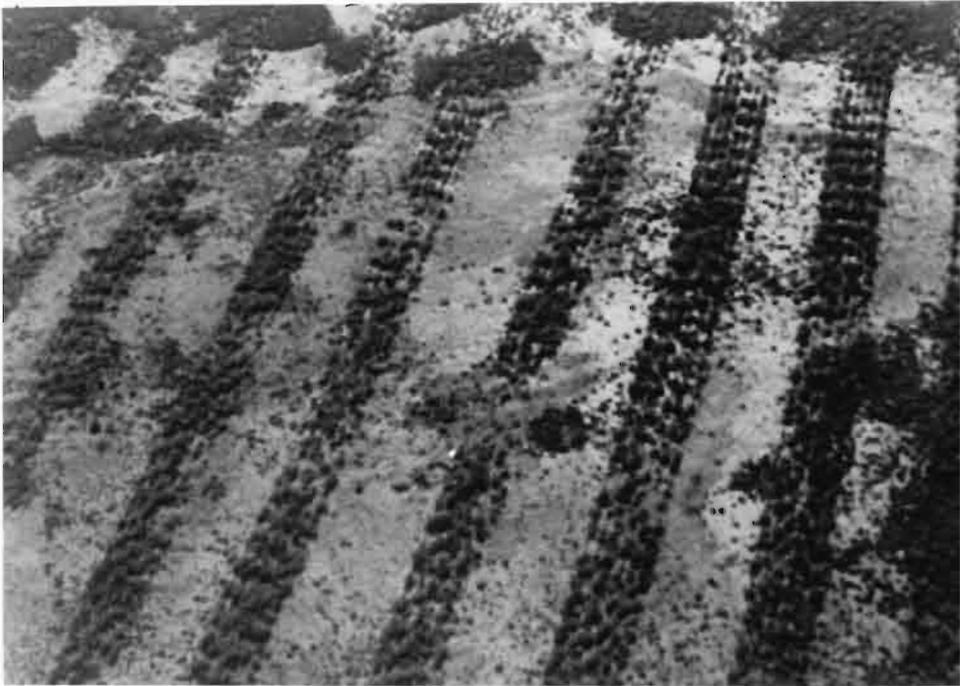


Photo 7.19 : Ensemencement en poquets de bandes enherbées (*Cenchrus ciliaris*) sur une zone dénudée, située près d'Alice Springs, par un décompacteur à dents équipé d'une roue excentrée qui permet de relever l'engin par intermittence. La plante est semée dans un même temps (Commission de conservation du territoire Nord de l'Australie)

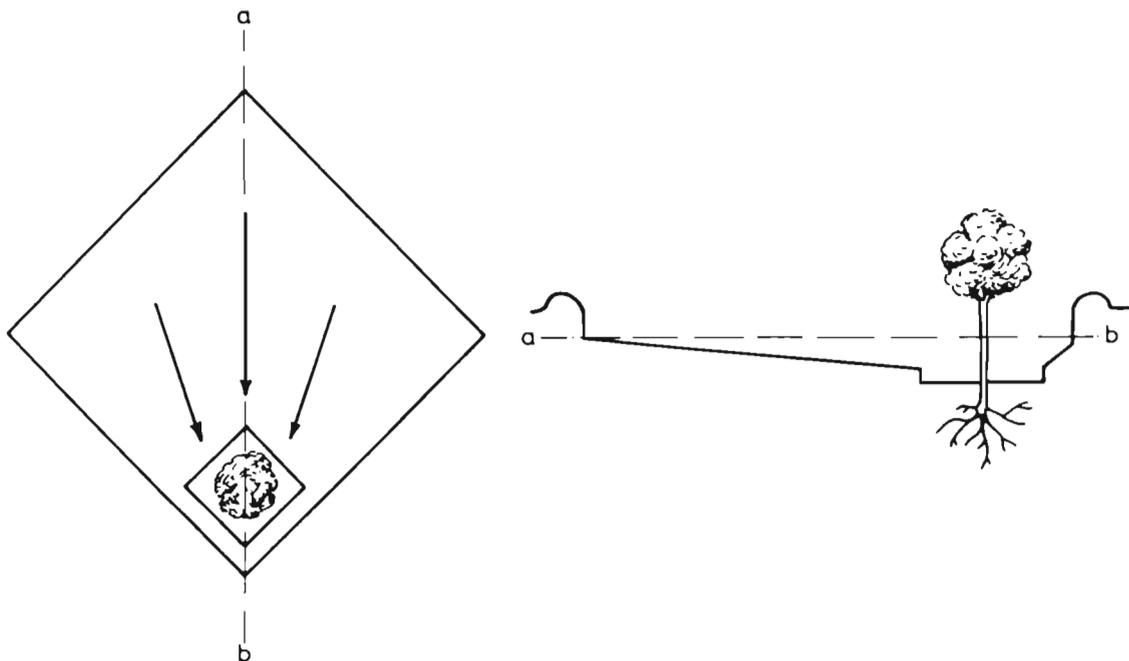


Figure 7.3 : Vue en plan et section transversale d'une parcelle "negrin" ; les flèches indiquent le sens du ruissellement (Evenari et al. 1982)

A mesure que disparaissent les arbres situés à proximité, on voit apparaître sur les marchés les bouses de vache et les résidus des cultures alors que, jusque là seul le bois était vendu. Enfin, la bouse de vache devient la principale source de combustible dans les villages et la principale production monnayable des fermes avoisinantes. Les familles rurales utilisent les résidus des cultures pour cuisiner et pour nourrir leurs animaux qui ne trouvent plus rien à broûter sur les terres de parcours. Sur le sol érodé et épuisé, les mauvaises récoltes se succèdent et les sécheresses qui autrefois pouvaient être supportées, tournent dès lors au désastre. Au dernier stade, une série de saisons médiocrement arrosées entraînent l'effondrement du système. Les familles ne peuvent plus ni subvenir à leurs besoins, ni nourrir leur bétail et il se produit un exode massif. Comme dit Newcombe "le passage du premier stade est en train de se réaliser à travers toute l'Ethiopie et certaines parties du Tigré et de l'Erythrée en sont déjà à la phase terminale". Un scénario analogue se déroule dans beaucoup d'autres régions semi-arides : dans le reste de l'Afrique orientale et australe semi-aride, au Sahel, en Inde, dans le Nord-Est du Brésil, etc.

Dans beaucoup de pays, la pénurie croissante de bois de feu est devenue aussi critique que la pénurie de vivres (Eckholm, 1976, chapitre 6). En Inde, le Comité National pour l'Agriculture a estimé que les besoins de bois de chauffe de l'Inde sont actuellement de 250 millions m³, auxquels s'ajoutent environ 60 à 80 millions de tonnes de bouse de vache séchée. En 1990, le déficit atteindra sans doute 100 millions de m³. Dans ce contexte, la nécessité de conserver ou d'augmenter la production d'arbres et d'arbustes en recourant à des méthodes et à des programmes de conservation des sols et des eaux est de toute évidence un des principaux déficit des régions semi-arides.

7.2.2 Méthodes et techniques

Les techniques habituelles de reboisement sont rarement adaptées aux régions semi-arides. Le caractère aléatoire des précipitations fait qu'il est difficile de faire franchir aux arbres ou arbustes les premiers stades de leur développement même si les précipitations annuelles sont suffisantes pour faire vivre des sujets adultes des mêmes essences. Les sols sont souvent médiocres, peu épais et pourvus d'une faible capacité de rétention de l'humidité. Même si l'on peut résoudre ces problèmes physiques, il reste difficile de protéger les jeunes plants. Dans les économies pastorales, on utilise peu de clôtures, si ce n'est occasionnellement pour protéger des cultures vivrières ; les habitudes vont plutôt dans le sens d'une complète liberté de pacage ou d'un contrôle superficiel avec un vague regroupement en troupeaux. Là où il est possible d'exclure totalement les troupeaux, comme dans l'exemple décrit dans la section 7.1.3, la protection des herbages peut être étendue aux arbres et aux arbustes.

Plusieurs méthodes ont été mises au point pour augmenter la quantité d'eau disponible pour la production arborée en recourant à l'effet multiplicateur de précipitations décrit dans le chapitre 5. En Israël les microbassins ou "negarin" ont été mis au point dans le cadre d'études consacrées à l'agriculture sous impluvium ("run-off farming") dans le désert du Néguev (Shanan et Tadmor, 1979). Le système le plus courant consiste à utiliser comme zones de réception un bassin de 250 m² entouré d'une levée de terre de faible hauteur. Au point le plus bas du bassin, on creuse une cuvette plus profonde d'environ 3,5 m x 3,5 m dans laquelle on plante un arbre (voir figure 7.3). Le système a été utilisé avec succès pour cultiver des amandiers et des arbres fruitiers, comme on le voit sur la photo 7.20. Au Kenya, dans une région qui reçoit 300 à 600 mm de pluie, une méthode légèrement différente a été utilisée. On a creusé des trous de plantation de 60 x 60 cm de côté et 30 cm de profondeur, ainsi qu'un drain collecteur formant deux bras en V qui amène le ruissellement jusqu'au trou de plantation. Par forte pluie, le ruissellement excédentaire déborde à l'extrémité des drains collecteurs. Ces derniers ont une longueur recommandée de 3 à 5 m et un écartement de 5 m x 5 m, ce qui donne 400 arbres à l'hectare (Barrow, 1983). Il existe diverses variantes à ce système : on forme de petites lunettes (photo 7.21), des lignes de demi-cercles ou de zigzags (figure 7.4). Dans les régions recevant très peu de pluies, la production des microzones de réception peut être renforcée en traitant la surface de façon à accroître le ruissellement ; c'est ce qu'ont démontré Rawitz et Hillel (1975) qui ont constaté qu'il est nécessaire de traiter la surface des limons sablonneux de loess profonds en les compactant et en les pulvérisant avec du pétrole

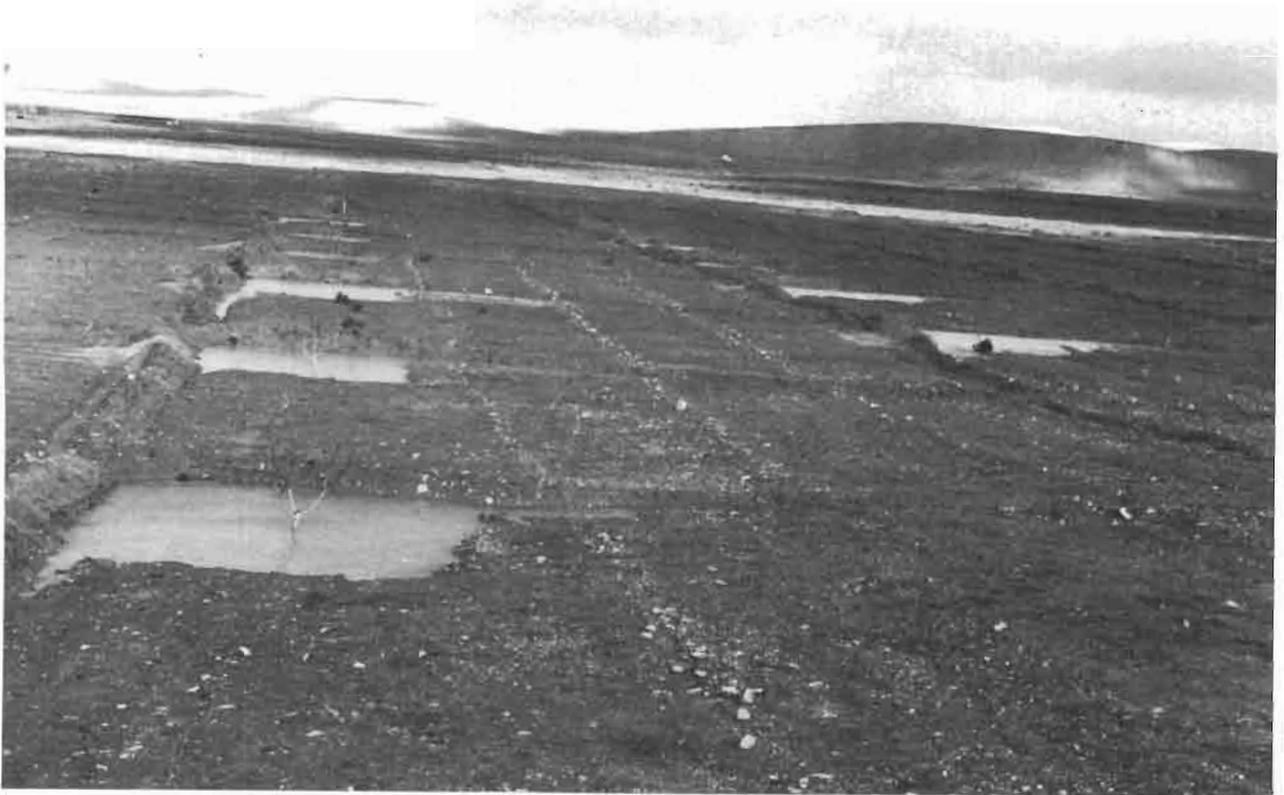


Photo 7.20 : Amandiers installés dans des microzones de réception dans la vallée du Wadi Mashesh, Israël (U. Nessler)



Photo 7.21 : "Lunes" façonnées pour planter des arbres au Niger (R. Gallacher)

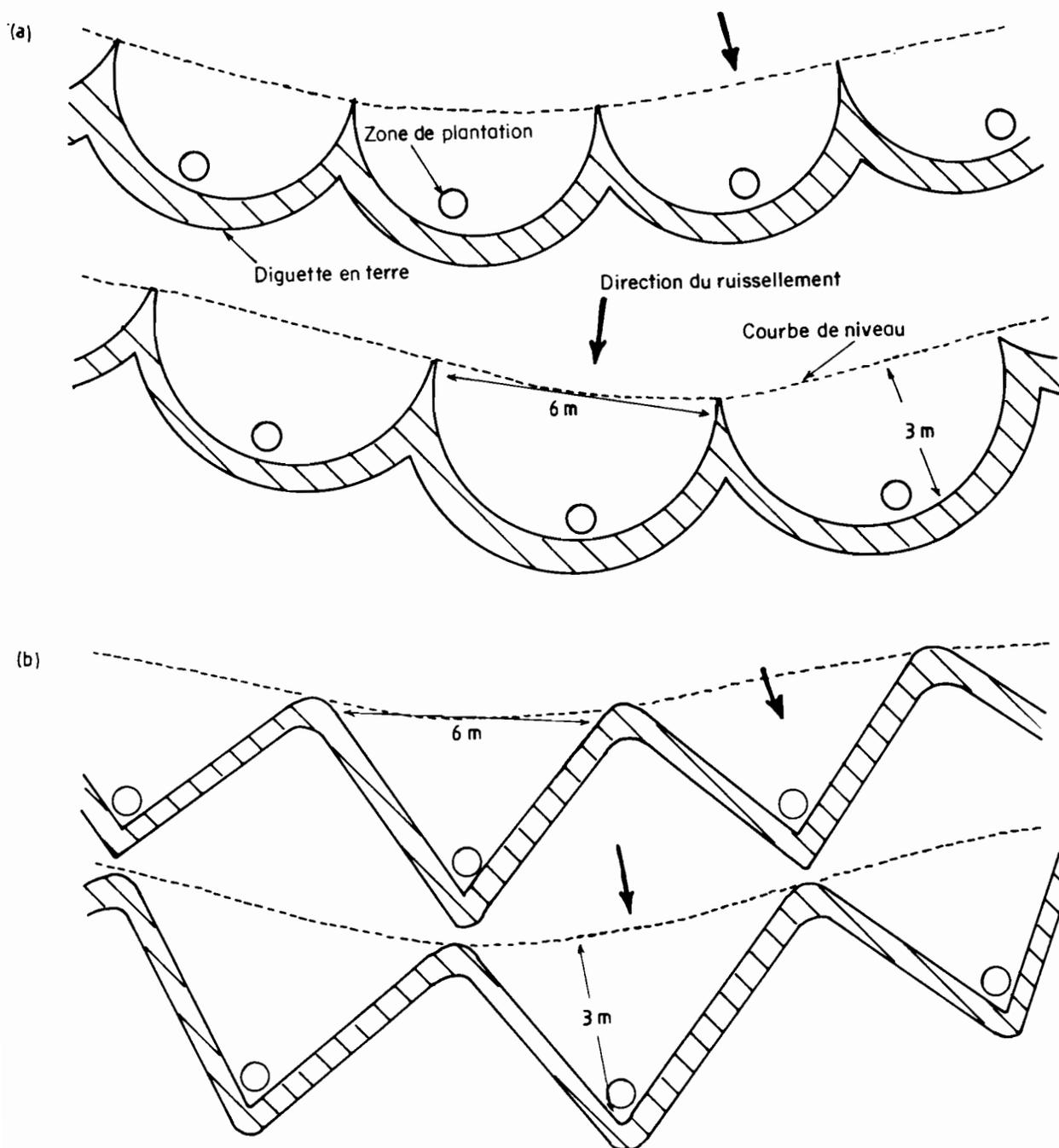


Figure 7.4 : Microbassins de réception utilisées pour planter des arbres (Projet pilote de Baringo sur les zones semi-arides)

dilué. Avec un rapport d'interception de 3:1 et une pluviosité de 200 à 250 mm, cette méthode a donné, sur le point de plantation, une précipitation efficace de 600 mm, satisfaisante pour des vergers d'amandiers. Etant donné le coût de préparation et d'entretien des microzones de réception, il va de soi que cette technique n'est rentable que dans le cas de cultures très productives telles que les fruits ou les noix, à moins que l'on puisse recourir à une méthode peu coûteuse, comme dans l'exemple du Kenya (Boers, 1983). La méthode des "empreintes" mentionnée dans la section 7.1.2 pour la création d'herbage est aussi utilisée pour l'établissement de plantules (Anderson, 1986).

On peut s'inspirer du même principe pour planter des arbres ou des arbustes en lignes dans lesquelles l'eau est retenue en plus grande quantité grâce à des sillons tracés selon les courbes de niveau. En Tunisie, on utilise des cordons de pierres,

simples empilements triangulaires de pierres, disposées selon les courbes de niveau juste au-dessous de lignes tracées au moyen d'une dent, sous-solant profondément et d'un tracteur lourd. Le fait d'ameublir la surface et de briser le sol jusqu'à la couche calcaire indurée améliore l'infiltration et l'eau s'accumule en arrière du cordon, comme on le voit sur la figure 7.5 (Viertmann, 1984). En Iran, pour créer des ceintures vertes (shelter belt), on a construit suivant les courbes de niveau, des terrasses de 2 m de largeur à intervalle de 5 m, sur des pentes de 30 degrés. Le taux de survie des plants a substantiellement augmenté, notamment quand la zone d'interception a été pulvérisée avec de l'asphalte (Kowsar, 1982).

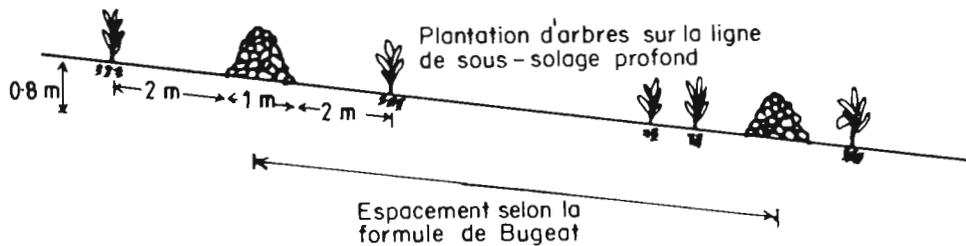


Figure 7.5 : Plantation d'arbres le long de scarifications profondes au voisinage de cordons de pierres, Niger

7.2.3 Agroforesterie

Depuis quelques années, et plus particulièrement depuis la création du Conseil International de Recherches Agroforestières (CIRAF), on a vu se manifester un net regain d'intérêt pour les systèmes agronomiques qui combinent arbres et cultures annuelles (agroforesterie) ou arbres et herbages (système sylvopastoral). Certains systèmes s'inspirent d'une longue pratique. Par exemple, dans beaucoup de systèmes agricoles traditionnels des régions semi-arides de l'Afrique du l'Ouest, on propage certaines essences indigènes en les plantant dans de faibles dépressions où l'eau s'accumule naturellement. C'est le cas par exemple d'*Acacia albida* qui est cultivé en association avec des céréales en raison de sa remarquable aptitude à fixer l'azote, ou d'*Acacia senegal* qui est cultivé en culture mixte pour obtenir la gomme arabique (Le Houérou, 1980). Il y a aussi des nouveautés qui ont été mises au point par des centres internationaux de recherche ; citons par exemple le système dans lequel on plante des rangs de *Leucaena* séparés par de l'herbe (photo 7.22) ou par des cultures annuelles (photo 7.23). On trouvera dans la bibliographie relative à ce chapitre quelques titres qui apporteront au lecteur des informations complémentaires concernant l'agroforesterie.



Photo 7.22 : Un essai de système sylvopastoral. L'herbe qui pousse entre les leucaena est fauchée pour nourrir le bétail à l'étable. Le sol est superficiel et graveleux et ne peut supporter une culture (ICRISAT)

Photo 7.23 : Double rang de *Leucaena* produisant du paillage ou du fourrage. Une plante annuelle sera cultivée entre les rangs en saison pluvieuse (ICRISAT)



REFERENCES

- Adams M.E. A development plan for semi-arid areas in Western Sudan. *Experimental Agriculture* 1975 11:277-287.
- Ahn P.M. Soil factors affecting rainfed agriculture in semi-arid regions, with particular reference to the Sahel Zone of Africa. In: Proc. Int. Symp. on Rainfed Agriculture in Semi-Arid Regions, Riverside, California, April 1977.
- Alchin B.M. Species trials in semi-arid south western New South Wales, 1956-1971. *J. Soil Cons. Serv. New South Wales*, 30(1): 46-73.
- Aldrick J.M., Howe D.F. and Dunlop C.R. Report on lands of the Ord River Catchment, Northern Territory. Animal Husbandry and Agriculture Branch, Dept. of Northern Territory, Australia, Tech. Bull. 24.
- Anderson R. Imprinting technique offers new scope for reforestation. *Ceres*, 19(3):3-5. 1986
- Anon. A strategy on the role of forestry in combatting desertification. Paper presented at the Int. Arid Lands Research and Development Conference - Arid Lands Today and Tomorrow - Tucson, Arizona, Oct. 1985.
- Arabi M., Kouidri R. et Roose E. Effet de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en nappe dans une zone montagneuse méditerranéenne. Station INRF de Ouzera près de Médéa, Algérie 1984-89. *Bull. Réseau Erosion n f9*, 39-51.
- Arabi M. et Roose E. Influence des systèmes de production et du sol sur le ruissellement en nappe et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (station INRF de OUZERA en Algérie) *Bull Réseau Erosion nf9* : 39-51.
- Armitage F.B. Irrigated Forestry in Arid and Semi-Arid Lands: A Synthesis. IDRC Publication 234E, Ottawa. 1985
- ASAE. A series of papers on tests of conservation bench terracing in six western States of USA. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Michigan*. 1968
- Aubert G. Quelques remarques sur la susceptibilité des sols de la région de Médéa vis-à-vis de l'érosion hydrique - Séminaire INRF de Médéa Efficacité de la DRS" - Bulletin nf7 Réseau Erosion : 97-99.
- Baral H., Benefice E., Parent G., Valentin C., Santoir C. et Noel J. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région de FERLO - Synthèse - ACC GRIZA (LAT) Ministère Recherche Paris, Gerdar - ORSTOM, 172 p.
- Barhi A., Pontanier R. et Dridi B. Conséquences des façons culturales en fin de saison sèche sur le régime hydrique et l'érosion des terres du KAIROUANNAIS (Tunisie). Ministère Agriculture Direction des Sols, Tunis, 31 p + Ann.
- Barlet F. La gestion de l'eau au niveau de la parcelle : aménagement et petite irrigation dans un village du Nord du Yatenga (SABOUNA) - CNEARC - IBRAZ - ENITA - CIRAD/DSA Montpellier 186 p.
- Barrow E.G.G. Use of microcatchment for tree planting in soil conservation in semi-arid areas. In: *Soil and Water Conservation in Kenya*. Thomas D.B. and Senga W.M. (eds). Inst. Dev. Studies and Fac. of Agric. Univ. Nairobi, pp 324-332.
- Bedu L. Contribution à la mise en valeur des sols du Yatenga. Projet d'aménagement de ZIGA. CNEARC - INERA - CIRAD/DSA - ENSA Dijon: 90 p.
- Bennett J. Tigrayan Test-bed. *World Water*, May 1985. 1985

- Berry L. Agro-forestry in the West African Sahel. Advisory Committee on the Sahel. Nat. Res. Council, Washington, USA. 1984
- Berton S. La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et microbarrages en Afrique de l'Ouest. Min. Coopération, GRET, AFUP. Paris 474 p. 1988
- Bilbro J.D. and Hudspeth E.B. Furrow diking for basin tillage. Experiment Station, Lubbock. World Farming, 221, 7, 48: 104-105. Texas, USA. 1979
- Billy B. Water harvesting for dryland and floodwater farming on the Navajo Indian reservation, 3-7. In: Rainfall Collection for Agriculture in Arid and Semi-Arid Regions. Dutt G.R., Hutchinson C.F. and Garduno M.A. (eds) Workshop at Tucson, Arizona, USA. Pub. by Commonwealth Agric. Bureau, Farnham Royal, Bucks. UK. 1981
- Boers T.M. Economic evaluation of water harvesting in microcatchments. Water Resources Research 19(5): 1099-1105. 1983
- Boers T.M. et Ben Asher J. A review of rainwater harvesting. Agricultural water management 5 : 145-158. 1982
- Boers T.M. and Ben-Asher J. Harvesting water in the desert. In: Annual Report 1979, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Wageningen, Netherlands. 1979
- Boersma L. and Jackson T.L. Fundamentals of water conservation practices used in the summer fallow system of farming. In: Proc. Int. Symp. on Rainfed Agriculture in Semi-Arid Regions, Riverside, California, April 1977. 1977
- Bolton F.E. and Booster D.E. Tillage, moisture conservation and water use efficiency for dryland cereal production in winter rainfall regions. In: Proc. International Symposium on Rainfed Agriculture in Semi-Arid Regions, Riverside, California, 17-22 April 1977. Cannell G.H. (ed). University of California. 1977
- Bonsu M. Organic residues for less erosion and more grain in Ghana. In: Soil Erosion and Conservation. El-Swaify, Moldenhauer and Lo (eds). Soil Cons. Soc. Amer., Ankeny, Iowa. 1965
- Bonvallot J. Tabias et jessour du sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parades à l'érosion. Cah. ORSTOM Pédol., 22,2 : 163-172. 1986
- Bourges J., Floret Ch. et Pontanier R. Etude d'un milieu représentatif du Sud Tunisien (type SEGUI) : la citerne TELMAN (1972-74) ORSTOM Tunis, 147 p. 1977
- Brahmbatt B.M. and Patel A.S. Role of moisture conservation practices for semi-arid condition of Gujarat. Gujarat Agri. Univ. Res. J. 1983
- Breman H. and Vithol P.W.J. The Primary Production in the Sahel (PPS) Project - A Bird's-eye View. CABO, Wageningen, Netherlands. 1984
- Brown L.R. Reversing Africa's Decline. Worldwatch Paper 65, Washington DC. 1985
- Bryan R. and Yair A. (eds). Badland geomorphology and piping. Geo Books, Norwich, UK. 1982
- Buins H.J., Evenari M. et Nessler U. Rainwater harvesting agriculture for food production in arid zones : the challenge of the african famine. Applied geography, 6 : 13-32. 1986
- Buritz K., Dudeck E. et al., Le projet Agro-Ecologie (PAE). Philosophie et principes d'intervention après 4 ans d'expérience. ORD du Yatenga et du Sahel, B.F. 1986

- Burton J. Water Storage on the Farm. Water Research Foundation of Australia.
1965
- Cannell G.H. (ed). Proceedings of an International Symposium on Rainfed Agriculture in
1977 Semi-Arid Regions, Riverside, California, April 1977.
- Carr M.K.V. Land use and irrigated agriculture in the Woito and Lower Omo river valleys.
1979 UNDP/FAO Project ETH/78/013 Development of Irrigated Agriculture.
- Casenave A. et Valentin C. Les états de surface de la zone sahélienne - Influence sur
1988 l'infiltration. ORSTOM - CEE, 202 p + Ann.
- Chambers R. Rapid rural appraisal: rationale and repertoire. Public Administration and
1981 Development 1: 95-106.
- Chandler T. and Spurgeon D. International Cooperation in Agro-forestry. ICRAF, Nairobi,
1979 Kenya.
- Charman P.E.V. (ed). Conservation Farming. Soil Conservation Service of New South Wales,
1985 Australia.
- Charnock G. Learning the hard way at Baringo (Kenya). World Water, May 1985.
1985
- Charreau C. et Nicou R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et
1971 sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences
agronomiques. Agronomie tropicale 26,9 : 903-978 ; 26,11 : 483-1247.
- Charreau C., Yermanes D.M., Fauck R., Hall A.E., Dancette C.L. and Turk K.J. Dryland
1977 farming practices: semi-arid tropics. In: Proc. Int. Symp. Rainfed Agriculture
in Semi-Arid Regions, Riverside, California, April 1977. Cannell G.H. (ed).
University of California.
- Chiarella J.W. and Beck W.H. Water harvesting catchments on Indian lands in the South-
1975 west. In: Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974.
Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 104-111.
- Chleq J.L. et Dupriez H. "Eau et terres en fuite : métiers de l'eau au sahel". Terres et
1984 eaux, Nivelles, 136 p.
- Clark R.N. and Jones O.R. Furrow dams for conserving rainwater in a semi-arid climate.
1981 Proc. ASAE Conf. on Crop Production with Conservation in the 80's. Chicago,
Illinois, Dec. 1980.
- Cluff C.B. Engineering aspects of water harvesting research at the Univ. of Arizona. In:
1975 Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W.
(ed). USDA-ARS-W-22, pp 27-39.
- Cluff C.B. Surface storage for water-harvesting agrisystems. Proc. Workshop sponsored
1981 by University of Arizona, USA and University of Chapingo, Mexico, at Tucson,
Arizona, Sept 1980. Published by Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham
Royal, UK, pp 23-30.
- Cluff C.B. Water harvesting systems in arid lands. Comm. KUWAIT Symposium on Management
1987 and Technology of Water Ressources in Arid Zones. KUWAIT October 5-7 1987.
- Collett J. and Boyd J. Eight simple surveying levels. Ag. Equipment leaflet 42. Int.
1977 Tech. Pubs. London.
- Collinet J. Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest -
1988 Evolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies - Thèse
Strasbourg, 513 p + Ann.

- Collinson M. A low-cost approach to understanding small farmers. *Agricultural Administration* 8: 433-450.
1981
- Cooley K.R. Evaporation suppression for conserving water supplies. In: *Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974.* Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22.
1975
- Cooley K.R., Dedrick A.R. and Frasier G. W. Water harvesting: state of the art. In: *Watershed Management. Proc. Symp. 11-13 August 1975.*
1975
- Cormack R.M.M. The causes and remedies for waterlogging of crops. *Rhodesia Agricultural Bulletin* No. 1719.
1954
- Cormary Y. et Masson J. Etude de conservation des eaux et du sol au centre de recherche du Génie Rural de Tunisie. Application à un projet type de la formule de perte de sol de WISCHMEIER. *Cah. ORSTOM Pédol.* 2,3 : 3-26.
1964
- Critchley W. Some lessons from water harvesting in sub-saharian Africa. Report from a workshop in BARINGO, KENYA, 13-17 Oct. 1986 - East and Southern Africa project Dept of World Bank.
1987
- Crow F.R. and Manges H.L. Comparison of chemical and non-chemical techniques for suppressing evaporation from small reservoirs. *Trans. ASAE* 10(2): 172-174.
1967
- Cullis A. Small Steps Forward. *World Water*, May 1985.
1985
- Cunningham G.M. Furrowing aids revegetation at Cobar despite the worst drought on record. *J. Soil Water Conserv. of N.S.W.* 23(3): 192-202.
1967
- Cunningham G.M. Regeneration of scalded duplex soils in the Coolabah district of New South Wales. *J. Soil Cons. Serv. of New South Wales.* 30(3): 157-169.
1974
- Cunningham G.M. Waterspreading, Cobar, Byrock District. *J. Soil Water Conserv. of NSW.* 31(2): 82-94.
1975
- Dagg M. and Macartney J.C. The agronomic efficiency of the NIAE mechanized tied ridge system of cultivation. *Exp. Agr.* 4: 279-294.
1968
- Damagnez J. Mediterranean climates, the economic use of water, and crop production. In: *Soils in Mediterranean Type Climates and their Yield Potential*, pp 43-55. Proc. 14th Colloq. Int. Potash Inst. Berne, Switzerland.
1979
- Dancette C. Conservation des eaux et du sol au Sénégal. Rapport Nat. Séminaire CILLS. Cap Vert, Institut du Sahel, Mali.
1984
- Dedrick A.R., Hansen T.D. and Williamson W.R. Floating sheets of foam rubber for reducing stock tank evaporation. *J. Range Man.* 26(6): 404-406.
1973
- Delhoume J.P. Ruissellement et érosion en bioclimat méditerranéen semi-aride de Tunisie Centrale. In : "Processus et mesure de l'érosion" Edit. CNRS Paris : 487-507 p.
1987
- Delwaulle J.C. Résultats de six années d'observations sur l'érosion au Niger - Bois et Forêts Tropicaux., 150 : 15-37.
1973
- Demmak A. Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins : application au cas algérien. *IAHS Publ.* 144 : 403-414.
1984
- Dennett M.D., Elston J. and Prasad P.C. Seasonal rainfall forecasting in Fiji and the southern oscillation. *Agric. Meteor* 19: 11-22.
1978
- Dennett M.D. and Rodgers J.A. A comparison of rainfall regimes at several sites using a rainfall model: An example from Botswana. In press.
1986

- Dennett M.D., Rogers J.A. and Stern R.D. Independence of rainfalls through the rainy season and the implications for the estimation of rainfall probabilities. J. Climatology 3: 375-384.
- Dept. of Agriculture, Western Australia. A method for optimising cost of dam and roaded catchment combination. Technote 4/76 DAMCAT. 1979
- Dept. of Agriculture, Western Australia. Roaded catchment design and construction. Farmnote 109. Roaded catchments: maintenance. Farmnote 129. 1984
- Dixon R.M. Land imprinting for controlling infiltration and desertification processes. 1983 ASAE Paper 83-2514.
- DLFRS. Fifth annual report of the Dryland Farming Research Scheme (Phase III). Agr. Res. 1984 Stn. Sebele, Botswana.
- Doolette J.B. The application of the Australian lay farming system in North Africa. In: 1977 Proc. Int. Symp. on Rainfed Agriculture in Semi-Arid Regions. Riverside, California, April 1977.
- Dragoun F.J. and Kuhlman A.R. Effect of pasture management practice on run-off. J. Soil 1968 Water Cons. 23(2): 55-57.
- Dudal R. Dark Clay Soils of Tropical and Subtropical Regions. FAO Agr. Dev. Paper No. 1965 83, FAO, Rome.
- Dugue P. La préparation du sol en zone Soudano-Sahélienne : atouts et contraintes. In : 1985 OHM and Nagy eds. : "Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. Purdue University. West Lafayette - USA.
- Dugue P. Appropriation des techniques de lutte contre l'érosion et le ruissellement par 1986 les paysans du Yatenga. 3ème séminaire "Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production" CIRAD/DSA Montpellier Déc 1986.
- Dugue P. L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village : perspectives de 1986 développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche au Yatenga - contraintes techniques et économiques. Document Systèmes Agraires nf6, CIRAD/DSA.
- Dugue P. Possibilités et limites de l'intensification des systèmes de culture vivriers 1989 en zone soudano-sahélienne. Le cas du Yatenga (B.F). Thèse ENSA Montpellier, 269 p + ANN.
- Dugue P. Programme de recherche - développement au Yatenga. Rapport de synthèse 1988. 1989 INERA - CIRAD, Ouagadougou 96 p + Ann.
- Dumas J. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. 1965 Cah. ORSTOM Pédol., 3,4 : 307-333.
- Dutt G.R. Establishment of NaCl-treated catchments. Proc. Workshop sponsored by University of Arizona, USA and University of Chapingo, Mexico at Tucson, Arizona, 1981 Sept 1980. Published by Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK.
- Dutt G.R., Hutchinson C.F. and Garduno M.A. Rainfall Collection for Agriculture in Arid 1981 and Semi-Arid Regions. Proc. Workshop sponsored by University of Arizona, USA and University of Chapingo, Mexico, at Tucson, Arizona, Sept 1980. Published by Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK.
- Eckholm E.P. Losing Ground: Environmental Stress and World Food Prospects. Norton, New 1976 York.
- EIER. Conservation des eaux et des sols au Sud du Sahara. Rapport de synthèse. Ecole 1983 inter-états Ingénieurs de l'équipement rural, Ouagadougou, B.F.

- El Amami S. Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. Centre de Recherche
1983 du Génie Rural. Tunis, Tunisie, 69 p.
- El-Swaify S.A. Conservation-effective farming systems for the semi-arid tropics.
1983 ICRISAT, Hyderabad, India.
- El-Swaify E.S., Pathak P., Rego T.J. and Singh S. Soil management for optimized produc-
1985 tivity under rainfed conditions in the semi-arid tropics. Advances in Soil
Science No. 1: 1-64. Stewart B.A. (ed), Springer-Verlag, New York.
- EMBRAPA (Brazilian Enterprise for Agricultural Research). Pequena Irrigação para o
1981 tropico semi-arido vazantes e capsulas porosas. Bulletin de pesquisa No. 3,
Jan. 1981. Agricultural Research Centre for Semi-arid Tropics (CPATSA),
Petrolina, Brazil.
- Erickson L.R. and Currie P.O. A multifunction rangeland improvement machine for semi-
1982 arid regions. ASAE Paper 82-1021.
- Escadafal R., Mtimet A. et Asseline J. Etude expérimentale de la dynamique superficielle
1986 d'un sol aride ; ORSTOM Paris, 63 p.
- Evenari M., Shanan L. and Tadmor N. The Negev, The Challenge of a Desert. 2nd Edition.
1982 Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Fairbourn M.L. Field evaluation of micro-watershed and vertical mulch systems. In: Proc.
1975 Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed).
USDA-ARS-W-22.
- Fauk R. Soil erosion in the Sahelian zone of Africa. Proc. Int. Symposium on Rainfed
1977 Agriculture in semi-arid regions, Univ. of California, Riverside p 371-397.
- FAO. Equipment and methods for tied ridge cultivation. Farm Power and Machinery Informal
1966 Working Bulletin 28. Rome.
- FAO. Water laws in Moslem countries. Irrigation and Drainage Paper 20/1. Rome.
1976
- FAO. Soil conservation for developing countries. Soils Bulletin 30, Rome.
1976
- FAO. Conservation in arid and semi-arid zones. Conservation Guide 3, Rome.
1976
- FAO. Agro-ecological zones project. World Soil Resources Report 48. Rome.
1978
- FAO. Arid zone hydrology. Irrigation and Drainage Paper 37. Rome.
1981
- FAO. World Agricultural Statistics. FAO Statistical Pocketbook, Rome.
1985
- FAO. Water lifting devices. P.L. Frenkel. Irrigation and Drainage Paper 43. Rome.
1986
- FAO. Watershed Management Field Manual. FAO Conservation Guide Volume 13/2 Water
1986 Harvesting. FAO, Rome.
- Fink D.H. Paraffin-wax water-harvesting soil treatments improved with antistripping
1984 agents. Soil Science 138(1): 46-53.
- Finkel M. Report on Water Harvesting in Turkana, Kenya. Field Document FAO-AGO-GCP/
1984 Kenya/048/NOD.

- Finkel M. Turkana, Water Harvesting Manual. Prepared by Finkel and Finkel, Consulting Engineers, Israel, for a training course in Kenya sponsored by FAO, NORAD and TIDP.
1985
- Finkel M. Draft TURKANA water harvesting manual. Kenya, Min. Agriculture.
1987
- Fitzgerald K. Management and regeneration of degraded catchments and eroded pastoral land with particular reference to range reseeding. In: Conservation in arid and semi-arid zones. Conservation Guide 3, pp 41-60, FAO, Rome.
1976
- Floret C., le Floch E., Romane F. et Pontanier R. Dynamique de systèmes écologiques de la zone aride. Acta Oecologica 2(3): 195-214.
1981
- Floret C. et Pontanier R. L'aridité en Tunisie présaharienne ; ORSTOM Paris, Série travaux et documents nf150, 544 p.
1982
- Flug M. Production of annual crops on microcatchments. Soils, Water and Eng. Dept., Univ. of Arizona, Tucson, Arizona, USA. CAB Farnham Royal, Bucks, UK.
1981
- Fortmann L. and Roe E. Dam groups in Botswana. Pastoral Network Paper 12b, ODI, London.
1981
- Fowler M. Overgrazing in Swaziland. A review of the technical efficiency of the Swaziland herd. Pastoral Network Paper 12d, ODI, London.
1981
- Franke R.W. and Chasin B.H. Peasants, peanuts, profits, and pastoralists. Ecologist 11: 156-168.
1981
- Frasier G.W. (ed.) Proceedings of Water Harvesting Symposium. Phoenix, Arizona, March 1974. USDA-ARS-W-22.
1975
- Frasier G.W. and Cooley K.R. Performance evaluation of water harvesting catchments. J. Range Management, 32, 6, Nov. 1979.
1979
- Frasier G.W. and Myer L.E. Handbook of Water Harvesting. Agricultural Handbook 600, USDA-ARS.
1983
- Frith J.L. Design and construction of roaded catchments. In: Proc. Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 122-127.
1975
- Frith J.L. Design standards for farm surface water supplies. Wheatbelt Water Supply Seminar. Water Res. Foundation of Australia, Northam WA.
1977
- Frith J.L., Nulsen R.A. and Nicol H.I. A computer model for optimizing design of improved catchment. In: Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 151-157.
1975
- Gallacher R. Niger - Conservation des eaux et des sols. FAO, Rome.
1974
- Gardner H. An analysis of the efficiency of micro-watershed systems. In: Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. USDA-ARS-W-22.
1975
- Garduno M.A. Research methodologies for in situ rain harvesting in rainfed agriculture. In: Rainfall Collection for Agriculture in Arid and Semi-arid Regions, pp 43-47. Dutt, Hutchinson and Garduno (eds). CAB Farnham Royal, Bucks, UK.
1981
- Gilbertson D.D. Runoff (floodwater) farming and rural water supply in arid lands. Applied Geography 6:5-11.
1986
- Gindel I. Irrigation of plants with atmospheric water within the desert. Nature 207: 1173-5.
1965

- Greco J. La défense des sols contre l'érosion. La Maison Rustique, Paris. 183 p.
1973
- Hadley R.F. Evaluation of land-use and land-treatment practices in semi-arid western
1977 United States. US Geol. Survey, Denver, Colorado, USA. Philosophical
Transactions of the Royal Society of London, B. 1977, 278, 962, 543-554.
- Hall A.E., Cannell G.H. and Lawton H.W. (eds). Agriculture in semi-arid environments.
Springer-Verlag, New York.
- Hallam G.M. and Van Campen W. Reacting to farmers' complaints of agriculturally in-
1985 tensive farms in southern Mali: from fixed answers to flexible response. Paper
to IVth Int. Conf. on Soil Conservation, Maracay, Venezuela, Nov. 1985.
- Hanson C.L., Neff E.L. and Woolhiser D.A. Hydrologic aspects of water harvesting in the
1975 northern Great Plains. In: Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona,
March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 129-140.
- Harrington G.N., Wilson A.D. and Young M.D. Management of Australia's Rangelands. Div.
1984 of Wildlife and Rangelands Research, CSIRO.
- Hauser V.L. and Cox M.B. Evaluation of Zingg conservation bench terraces. Ag. Eng. 43:
1962 462-464, 467.
- Hays T.R. Modern and ancient utilization of rainfall in the Sudanese Butana (abstract)
1981 Assoc. for Arid Lands Studies, Proc. Vol. IV. Publ: Lubbock, Texas, USA.
- Heusch B. L'érosion du PRE-RIF. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les
1970 collines du pré-Rif occidental. In : Annales de la Recherche Forestière au
Maroc, Rabat, n°12 : 9-176.
- Heusch B. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Bilan des
1985 connaissances et synthèse bibliographique : recherche bibliographique sur
l'Afrique du Nord. Projet RAB/80/011 - PNUD/1982, 83 p.
- Heusch B. 50 Years of soil conservation in North Africa: a review. Proc. 10th Int. Conf.
1985 on Agric. Eng., Sept. 1984, Budapest, I, 1/6, 50-57.
- Heusch B. Cinquante ans de banquettes de DRS - CES en Afrique du Nord : un bilan. Cah.
1986 ORSTOM Pédol., 22,2 : 153-162.
- Hillman F. Water Harvesting in Turkana District, Kenya. Pastoral Network Paper 10d. ODI,
1980 London.
- Hollick M. The design of roaded catchments for maximum run-off. In: Proc. Water Harvest-
1975 ing Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-
22, pp 210-220.
- Hollick M. Water harvesting in the arid lands. Scientific Reviews on Arid Zone Research
1982 1: 173-247. Scientific Publishers, Jodhpur, India.
- Honisch O. Water conservation in three grain crops in the Zambesi valley. Dept. Agric.
1973 Lusaka, Zambia.
- Houston J. Rapid relief for Zimbabwe. World Water, May 1985, p 31.
1985
- Hudson N.W. Field Engineering for Agricultural Development. Oxford Univ. Press.
1975
- Hudson N.W. Soil Conservation. 2nd Edition, Batsford, London and Cornell Univ. Press,
1981 Ithaca, NY.

- Hudson N.W. Soil water conservation in semi-arid areas. FAO Soils Bull. 57, 172 p.
1987
- Hurni H. Third Progress Report (Year 1983), Soil Conservation Research Project. Univ. of
1984 Berne, Switzerland.
- Hutchinson, Sir Joseph. Preface to: Resource Development in Semi-Arid Lands. Royal
1977 Society, London.
- IBSRAM. Proceedings of the 1st Regional Seminar on the Management of Vertisols under
1987 Semi-arid Conditions. Dec. 1986. Nairobi, Kenya. Bangkok, IBSRAM Proceedings
No. 6.
- ICARDA. Annual Report, 1982. ICARDA, Aleppo, Syria.
1982
- ICRISAT. Farming Systems Research at ICRISAT. IARC Workshop on Farming Systems Research,
1986 Hyderabad, India, Feb.
- ICRISAT. Farming Systems Annual Reports 1975-1984. ICRISAT, Hyderabad, India.
1975-84
- IFAD. Soil and water conservation in sub-Saharan Africa: Issues and Options. Centre for
1986 Development Cooperation Studies, Free Univ. Amsterdam, for IFAD, Rome.
- ILCA. The First Years. International Livestock Centre for Africa. Addis Ababa, Ethiopia.
1980
- ILCA. Livestock research and food production in Africa. Annual Report 1984, ILCA, Addis
1985 Ababa, Ethiopia.
- ILCA. Increasing African food production: ILCA's Highlands programme proposes new
1985 approach. Newsletter 4, 3 July 1985. Addis Ababa, Ethiopia.
- ITDG. The introduction of rainwater catchment tanks and micro-irrigation to Botswana.
1969 Intermediate Technology Pubs., London.
- Jain B.L. and Singh R.P. Run-off as influenced by rainfall characteristics, slope and
1980 surface treatment of micro-catchments. Central Arid Zone Res. Inst., Jodhpur,
India.
- Johl S.S. Drought loss management: strategies for minimizing the risks of drought in
1981 India. In: Proc. Expert Meeting on Management, Conservation and Development of
Agricultural Resources in the ECWA Region, May 1981, Damascus, Syrian Arab
Republic. Vol. 2. Pub. by UN Econ. and Social Council, New York.
- Jones M.J. Programme for improved land and water management systems for Southern Africa.
1984 Proc. SDCC Agric. Res. Conf. Gaborone, Botswana, February 1984. Dept. of Agric.
Research, Gaborone.
- Jones M.J. Conservation systems and crop production. In: Agricultural Development in
1986 Drought-prone Africa. L.J. Foster (ed.) ODI, London.
- Jones O.R. Land farming effects on dryland sorghum production in the Southern Great
1981 Plains. J. Soil Sci. Soc. Am. 45: 606-611.
- Jones O.R. and Shipley J.L. Economics of land levelling for dryland grain production. J.
1975 Soil and Water Cons. 30: 177.
- Jones R.M. Scald reclamation studies in the Hay District of New South Wales: Part III.
1967 Reclamation by ponding banks. J. Soil Cons. Serv. of N.S.W. 23(1): 57-71.
- Kampen J. Watershed management and technology transfer in the semi-arid tropics. Int.
1979 Symp. on Development and Transfer of Technology for Rainfed Agriculture and the
SAT Farmer. ICRISAT, Hyderabad, India.

- Kampen J. and Burford J. Production systems, soil-related constraints and potentials in 1980 the semi-arid tropics with special reference to India. In: Soil-related constraints to food production in the Tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.
- Kampen J., Hari Krishna J. and Pathak P. Rainy season cropping on deep vertisols in the 1981 semi-arid tropics - effects on hydrology and soil erosion. Tropical Agricultural Hydrology. Lal R. and Russell E.W.J. (eds). Wiley.
- Karan F. and Julka R. The use of soda-clay in reducing seepage in water harvest tech- 1981 nology (Storage and conservation methods, India). Trans. Ind. Soc. Desert Technology and Univ. Centre of Desert Studies. 6,1, Jan. 1981.
- Keatinge J.D.H., Dennett M.D. and Rodgers J. The influence of precipitation regime on 1980 the management of three-course crop rotations in northern Syria. J. Agric. Sci., Cambridge 104:281-287.
- Keech M.A. The evaluation of erosion change using aerial photographs. Paper presented to 1985 Annual Meeting of Brit. Soc. Soil Sci. at Cambridge, UK.
- Keetch R.I. Rangeland rehabilitation in Central Australia. Land Cons. Unit, Conservation 1981 Commission of the Northern Territory.
- Kennedy W.K. and Rogers T.A. Human and animal-powered water lifting devices. Inter- 1985 mediate Technology Pub., London.
- Kolarkar A.S., Murthy K.N.K. and Singh N. Water harvesting and run-off farming in arid 1980 Rajasthan. Indian J. Soil Cons. 8(2): 113-119.
- Kolarkar A.S., Murthy K.N.K. and Singh N. Khadin - a method of harvesting water. J. of 1983 Arid Environments 6: 59-66.
- Kovda V.A. Land use development in the arid regions of the Russian plain, the Caucasus, 1961 and Central Asia. In: A history of land use in arid regions. Arid Zone Research Vol XVII. Unesco, Paris.
- Kowsar A. Water harvesting for afforestation. II. Dependence of tree growth on amount 1982 and distribution of precipitation. J. Soil Sci. Soc. Amer. 46(4): 802-807.
- Krantz B.A. Water conservation, management, and utilization in semi-arid lands. In: 1981 Advances in Food Producing Systems for Arid and Semi-arid Lands, Part A, pp 339-378. University of California, Davis.
- Krantz B.A., Kampen J. and Russell M.B. Soil management differences of Alfisols and 1978 Vertisols in the semi-arid tropics. In: Diversity of Soils in the Tropics. Amer. Soc. of Agron., S. Sci. Soc. Am., ASA Sp. Pub No. 34, pp 77-95.
- Kronstad W.E. The Turkish experience in increasing food production in arid and semi-arid 1981 lands. In: Part A of Advances in food-producing systems for arid and semi-arid lands. Manassah, Brickey, Davenport, and Hagen (eds). Academic Press, New York.
- Laing I.A.F. Sealing leaking excavated tanks on farms in Western Australia. In: Proc. 1975 Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 159-174.
- Laing I.A.F. Rainfall collection in Australia. Proc. Workshop sponsored by University of 1981a Arizona, USA and University of Chapingo, Mexico, at Tucson, Arizona, Sept 1980. Published by Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK., pp 61-66.
- Laing I.A.F. Evaluation of small catchment surface treatments. Aust. Water Res. Council, 1981b Tech. Paper 61. Canberra.
- Laing I.A.F. and Pepper R.G. Sealing farm dams. J. Agric. Western Australia 17(2): 2-7. 1976

- Laing I.A.F. and Prout A.L. Bitumen oil, and clay surfaces on a deep sand to increase
1975 run-off from catchments for excavated tanks in Western Australia. In: Proc.
Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed).
USDA-ARS-W-22.
- Laing I.A.F., Pepper R.G. and Prout A.L. Flat batter dams suit difficult sites. J.
1980 Agric. Western Australia 4: 110-112.
- Lal H. Animal-drawn wheeled tool carrier: An appropriate mechanization for improved
1985 farming systems. Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America,
16(1): 38-44.
- Lal H. Development of appropriate mechanization for the "W"-form soil management system.
1986 Soil and Tillage Research 8, Special Issue Nov. 1986, pp 145-160.
- Lamachère J.M. et Serpantié G. Valorisation agricole des eaux de ruissellement en zone
1989 Soudano-Sahélienne : Région de Bidi au Burkina Faso - Séminaire CIEH,
Ouagadougou, 12 p, ORTOM, Burkina Faso.
- Lawes D.A. Rainfall conservation and the yield of cotton in Northern Nigeria. Empire
1961 J. Experimental Agriculture, 29(116): 307-318.
- Lawes D.A. A new cultivation technique in Tropical Africa. Nature, 198: 1328.
1963
- Lawes D.A. Rainfall conservation and the yields of sorghum and groundnut in Northern
1966 Nigeria. Experimental Agriculture, 2: 139-146.
- Lefevre R. Mesures de l'inféoflux du Mayo de TSANAGA (Cameroun) ORSTOM Cameroun, 22 p.
1969
- Le Houérou H.N. La végétation de la Tunisie steppique ; Thèse Fac Marseille 622 p -
1969 Annales INRA Tunis, 42,2.
- Le Houérou H.N. La désertification des régions semi-arides - La Recherche n f99, 10 :
1979 336-344.
- Le Houérou H.N. Agroforestry techniques for the conservation and improvement of soil
1980 fertility in arid and semi-arid zones. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia.
- Le Houérou H.N. Indigenous shrubs and trees in the silvopastoral systems of Africa. In :
1987 "Agroforestry a decade of development" Chap. 9 - ICRAF, Nairobi p 139-156.
- Lindhauer M.G. Effect of potassium on water use efficiency. In: Nutrient balances and
1983 the need for fertilizers in semi-arid and arid regions. Int. Potash Inst.,
Berne, Switzerland.
- Lowdermilk W.C. Conquest of the land through 7000 years. Agricultural Information Bulletin
1975 99. USDA-SCS. Washington DC.
- LRDC. The natural resources of Northern Nigeria. Land Resources Development Centre,
1968 Tolworth Tower, Surbiton, Surrey.
- LRDC. The natural resources of Lesotho. Land Resources Development Centre, Tolworth
1968 Tower, Surbiton, Surrey.
- Lundgren B. and Nair P.K.R. Agro-forestry for soil conservation. In: Soil Erosion and
1985 Conservation. El-Swaify, Moldenhauer, and Lo (eds). pp 703-717. Soil Cons.
Soc. Amer., Ankeny, Iowa.
- Lyle W.M. and Dixon O.R. Basin tillage for rainfall retention. Trans. ASAE 20:1013-1017.
1977

- Macartney J.C., Northwood P.J., Dagg M. and Lawson R. The effect of different cultivation techniques on soil moisture conservation and the establishment and yield of maize at Kongwa, Central Tanzania. *Trop. Agric. Trinidad*, 48: 9-23.
1971
- Manichon H. Experimental bases of dry farming techniques in arid and semi-arid zones. In: Nutrient balances and the need for fertilizers in the semi-arid and arid regions. 211-222. *Int. Potash Inst.*, Berne, Switzerland.
1983
- Mann R.D. The complexity of problem identification among small-holder farmers in Africa. NCAE Silsoe/Project Report No. 3. *Intermed. Tech. Dev. Group*. London.
1974
- Mannering J.V. and Fenster C.R. What is conservation tillage? *J. Soil and Water Conserv.* 38(3):141-143. Special ed. on Conservation Tillage.
1983
- Marchal J.Y. L'espace des techniciens et celui des paysans. *Mémoire ORSTOM Paris n f89* : 245-252.
1979
- Marchal J.Y. Vingt ans de lutte antiérosive au Nord du Burkina Faso. *Cah. ORSTOM Pédol.* 22,2 : 173-180.
1986
- Marchal P. L'espace des techniciens et celui des paysans. *Mémoire ORSTOM Paris n f 89* : 245-252.
1979
- Martin C.S. and Ward D.E. Rotating access to water to improve semidesert cattle range near water. *J. Range Management* 23(1): 22-26.
1970
- Martinelli B. et Serpantié G. La confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. Analyses d'un agronome et d'un ethnologue. In : *Cahiers de la Recherche-Développement n f 14-15*. Extrait des actes du séminaire CIRAD décembre 1986 "Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production".
1987
- Matlock W.G. and Dutt G.R. A Primer on Water Harvesting and Run-off Farming. 2nd Ed. Agric. Eng. Dept., College of Agriculture, University of Arizona.
1986
- McBride M.W. and Shiflet L.W. Water harvesting catchments in the Safford District, south eastern Arizona. In: *Proc. Water Harvesting Symposium*, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 115-121.
1975
- Mickelson R.H. Performance and durability of sheet metal, butyl rubber, asphalt roofing, and bentonite for harvesting precipitation. In: *Proc. Water Harvesting Symposium*, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22.
1975
- Mickelson R.H., Cox M.B. and Musick J. Runoff water spreading on levelled cropland. *J. Soil and Water Cons.* 20(2): 57-60.
1965
- Mietton M. Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. *Cah. ORSTOM Pédol.*, 22,2 : 181-196.
1986
- Mietton M. Les données de l'érosion sur les bassins versants du Burkina Faso. *Rev. Géogr. Alpine* 74, 1-2 : 119-127.
1986
- Ministry of Agriculture. "Water harvesting and water spreading in TURKANA : a field worker's manual". *Min Agriculture of Kenya*.
1986
- Monjauze A. Rénovation rurale : rôle et dispositifs des aménagements d'infiltration. *Délégation générale, Dept. Forêt, service DRS, Alger*, 16 p.
1962
- Monteith J.L. Dew. *Quart. J. Royal Meteorological Soc.* 83: 322-341.
1957
- Morgan W.T.W. Sorghum gardens in South Turkana. *Geographical Journal* 140: 80-93.
1974

- Morin G.C.A. and Matlock W.G. Desert strip farming - computer simulation of an ancient
1975 water harvesting technique. US Agric. Res. Stn. Service, Western Region ARS-W
Agric. Res. Serv. US Dep. Agric. Res. Serv. 22, 141-150. Feb. 1975.
- Morin J., Rawitz E., Hoogmoed W.B. and Benyamini Y. Tillage practice for soil and water
1984 conservation in the semi-arid zone. III Run-off modeling as a tool for
conservation tillage design. Soil and Tillage Research 4: 215-224.
- Muchiri G. and Gichuki F.N. Conservation tillage in semi-arid areas of Kenya. In: Soil
1983 and Water Conservation in Kenya. Occas. Paper 42, Inst. for Development
Studies, Univ. of Kenya.
- Myers L.E. and Frasier G.W. Asphalt-fibreglass for precipitation catchments. J. Range
1974 Management 27(1): 12-15. Jan. 1974.
- Naghan G.P. Ecology of floodwater farming in N. America. Agro-ecosystem, 5: 245-255.
1979
- Nair P.K.R. Agro-forestry Species: a crop sheets manual. Pub. 003E. ICRAF, Nairobi,
1980 Kenya.
- Narayana V.V. Dhruva and Ram Babu. Soil and water conservation in semi-arid regions of
1985 India. Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute,
Dehradun, India.
- National Academy of Sciences. More Water for Arid Lands. Board of Science and Technology
1974 for International Development, Commission on International Relations. NAS,
Washington DC.
- Neff E.L. Snow trapping by contour furrows in southeastern Montana. USDA, SEA-AR,
1980 Northern Plains Soil and Water Research Center, Montana, USA. J. of Range
Management. 33(3): 221-223.
- Neff E.L. and Wright J.R. Contour furrowing as a range management practice. In: Proc.
1980 Symp. on Watershed Management, Boise, Idaho, July 1980. 2, 827-835. ACSE, New
York.
- Newcombe K. An Economic Justification for Rural Afforestation: the Case of Ethiopia.
1984 Energy Department Paper 16, World Bank, Washington DC.
- Nicou R., Ouattara B. et Some L. Effets des techniques culturelles d'économie de l'eau à
1987 la parcelle INERA - CIRAD, Ouagadougou, 77 p.
- Njihia C.M. The effect of tied ridges, stover mulch, and farmyard manure on water con-
1979 servation in a medium potential area, Katumani, Kenya. In: Soil Tillage and
Crop Production, pp 295-302. Lal R. (ed). IITA, Ibadan, Nigeria.
- Nissen-Petersen E. Rain Catchment and Water Supply in Rural Africa: A Manual. Hodder and
1982 Stoughton, London.
- Nilsson Gosta I. A strip-ploughing method, suggested for trial on dryland farms. Unpub.
Memo, Botswana.
- Odell M.L. and Odell M.J. The evolution of a strategy for livestock development in the
1980 communal areas of Botswana. Pastoral Network Paper 10b, ODI, London.
- Oertli J.J. Adaptation of plants to limited water availability. In: Nutrient balances
1983 and the need for fertilizers in semi-arid and arid regions. Int. Potash Inst.,
Berne, Switzerland.
- Ohm H.W. et Nagy J.C. Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de
1985 l'Afrique de l'Ouest. Purdue University, West Lafayette, USA.

- Ouoba B. et Rodriguez L. Projet de recherche - Développement à l'ORD du Yatenga. Rapport 1989 de synthèse 1988 - ORD du Yatenga, BP 39, Ouahigouya, Burkina Faso, 102 p + Ann.
- Ormerod W.E. The relationship between economic development and ecological degradation: 1978 How degradation has occurred in West Africa and how its progress might be halted. *J. Arid Environments*, 1: 357-379.
- ORSTOM. Efficacité des méthodes érosives. Cah. ORSTOM Sér. Pédol. spécial érosion 22,2 : 1986 119-258.
- ORSTOM. Catalogue des Editions de l'ORSTOM, ORSTOM Paris, 100 p. 1989
- Pacey A. and Cullis A. Rainwater Harvesting - the Collection of Rainfall and Run-off in 1986 Rural Areas. Intermediate Technology Publications, London.
- Palit S.B. Species for wood, food, and fodder in arid and semi-arid zones of India. In: 1985 Sand dune stabilization, shelterbelts, and afforestation in dry zones. Conservation Guide 10, pp 183-188. FAO, Rome.
- Park P. Social dimensions of harvesting rainwater in Turkana. *Waterlines*, April 1986. 1986
- Pathak P., Miranda S.M. and El-Swaify S.A. Improved rainfed farming for semi-arid 1985 tropics - implications for soil and water conservation. In: Soil Erosion and Conservation, pp 338-354. El-Swaify, Moldenhauer and Lo (eds). S. Cons. Soc. Am.
- Pereira H.C., Wood R.A., Brzostowski H.W. and Hosegood P.H. Water conservation by 1958 fallowing in semi-arid tropical East Africa. *Empire J. Exptl. Agric.* 26: 215-228.
- Phillips R.L. Surface drainage systems for farm lands (Eastern United States and 1963 Canada). *Transactions Am. Soc. Agric. Eng.* 6: 313-317, 319.
- Pickup G. and Nelson D.J. Use of Landsat radiance parameters to distinguish soil 1984 erosion, stability and deposition in arid central Australia. *Remote Sensing of the Environment* 16(3): 195-209.
- Pieri C. Conduite de la fertilisation des cultures vivrières en zones semi-arides. In : 1984 Colloque "Résistance à la sécheresse en milieu intertropical" Dakar, CIRAD-DSA et ISRA. Montpellier : 363-381.
- Plueddemann E.P. Soil treatment with silicones for water harvesting. In: Proc. Water 1975 Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 76-83.
- Poesen J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones 1986 in the top layer of loose sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 11: 1-10.
- Pressland A.J. and Lehane K.J. Run-off and the ameliorating effect of plant cover in the 1982 Mulga communities of south western Queensland. *Aust. Rangeland J.* 4(1): 16-20.
- Quilty J.A. Soil Conservation structures for marginal arable areas: Diversion spreader 1972 banks and tank drains. *J. Soil Water Cons. of N.S.W.* 28(4) 157-168.
- Rainey R.C. Rainfall: scarce resource in "opportunity country". In: Resource Development 1977 in Semi-arid Lands. pp 1-16. Royal Society, London.
- Rawitz E. and Hillel D. Water harvesting by run-off inducement for irrigation of an 1975 almond orchard in a semi-arid climate. In: Proc. Water Harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, March 1974. Frasier G.W. (ed). USDA-ARS-W-22, pp 223-232.

- Rawitz E., Morin J., Hoogmoed W.B., Margolin M. and Etkin H. Tillage practices for soil and water conservation in the semi-arid zone. I. Management of fallow during the rainy season preceding cotton. Soil and Tillage Research 3: 211-231. 1983
- Reij C. L'état actuel de la conservatoire des eaux et du sol dans le Sahel. OCDE/CILLS/1989 Club du Sahel, 41 p.
- Reij C., Mulder P. and Begemann L. Water harvesting for plant production - World Bank, 1989 Technical paper 91, 123 p.
- Richards K.S. Rain-water harvesting for domestic purposes. In: Water in Agriculture. 1972 Rhodesian Agric. J. Tech. Bull. 15, pp 45-51.
- Robertson L.A.N. Report on single-line tile drainage experiments in Southern Rhodesia. 1964 Res. Bull. 16. Dept. of Cons. and Extension, Harare, Zimbabwe.
- Robinson J.B.D., Brook T.R. and de Vink H.H. A cultivation system for groundwater soils, 1955 Part 1. E. African Agric. J. 21: 69.
- Rodriguez L. et Yameogo C. Projet de recherche - développement sur le thème conservation des sols à l'ORD du Yatenga. Rapport d'activités 1987 ORD du Yatenga B.F. 1988
- Roose E. Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agron. Trop. 1967 22,2 : 123-152.
- Roose E. Conservation de l'eau et du sol en vue de l'intensification de l'exploitation de l'espace agricole tropical ; In : "Colloque Seneca" L'eau et les activités agricoles - Paris 3-5 mars 1976 - Com nf 322, 7 p. 1976
- Roose E. Use of the universal soil loss equation to prevent erosion in West Africa ; In : "soil erosion : prediction and control" Soil Conservation Soc. Am, Special publication nf21 : 60-74. ANKENY - USA. 1976
- Roose E. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Paris ORSTOM série TED nf 78, 108 p. 1977
- Roose E. Pédogénèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du plateau Mossi. Gonsé (Haute-Volta) 1968-74 - ORSTOM Paris 121 p - In : Cah. ORSTOM Pédol. 16,2 : 193-223. 1978
- Roose E. Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse Doct. Es Science ORLEANS, ORSTOM Travaux et Documents n f 130-569 p. 1980
- Roose E. Terrasses de diversion ou microbarrages perméables. Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. Cah. ORSTOM. Pédol. 22,2 : 197-208. 1986
- Roose E. Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique Occidentale : stratégies anciennes et nouvelles. In : "Séminaire INRAN - ICRISAT gestion des eaux, des sols et des plantes" Niamey, 11-16 janvier 1987 - ORSTOM Montpellier, 19 p ICRISAT sous presse. 1987
- Roose E. Evolution des stratégies de lutte antiérosive. In : C.R du séminaire "Efficacité de la DRS" Médéa, Novembre 1987, 7 p. Bulletin Réseau Erosion n f7 : 91-96. 1987
- Roose E. Aménagement intégré et lutte contre le ruissellement et l'érosion en région soudano-sahélienne du N.O du B.F. Rapport 2ème mission d'appui auprès du projet recherche-développement du Yatenga - CIRAD/ORSTOM/INERA/ORD du Yatenga 23 p. 1987
- Roose E. Bilan de trois années de recherche en coopération sur les thèmes de quantification de l'érosion et gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols en Algérie. INRF - ORSTOM, Montpellier, 25 p. 1988

- Roose E. Diversité des stratégies traditionnelles et modernes en fonction des conditions
1989 écologiques et ethniques en zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale. In :
"L'aridité, une contrainte au développement" Réseau zones arides - ORSTOM - CN.
- Roose E., Arrivets J. et Poulain C. Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux
1978 tropicaux indurés issus de granite sous sorgho et sous savane soudano-
sahélienne. Station IRAT de SARIA (Haute-Volta) 1971-74 - ORSTOM Paris, 123 p.
- Roose E. et Bertrand R. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour
1971 lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Agron. Trop. 26,11 :
1270-1283.
- Roose E. and Cavalié J. New strategy of water management and soil conservation. Applica-
1988 tion in developed and developing countries. ISCO 5, Bangkok - sous presse -
ORSTOM Montpellier, 14 p.
- Roose E. and Piot J. Run-off erosion, and soil fertility restoration on the Mossi
1984 Plateau (Central Upper Volta). In: Challenges in African Hydrology and Water
Resources. Proc. Harare Symp., July 1984. IAHS Pub. 144, pp 485-498.
- Roose E. et Sarrailh J.M. Erodibilité de quelques sols tropicaux - Cah. ORSTOM Pédol. :
1989 25,1 - sous presse.
- Ryan J.G., Sarin R. and Pereira M. Assessment of prospective soil, water, and crop
1979 management technologies for the semi-arid tropics of peninsular India. Proc.
Int. Workshop on Socio-economic Constraints to Development of Semi-Arid
Tropical Agriculture, ICRISAT, Hyderabad, India. 19-23 Feb. 1979.
- Sandford S. Management of Pastoral Development in the Third World. Wiley, Chichester,
1983 UK.
- Saulmon R.W. Snowdrift management can increase water-harvesting yields. J. Soil Water
1973 Cons. 28(3): 118-121.
- Serpantié G. et Lamachère J.M. Pour une connaissance des conditions de mise en service
1989 des aménagements du ruissellement. Communication à l'atelier sur les systèmes
de collecte du ruissellement. FEER, Ouagadougou, 7-8 mars 1989, sous presse,
ORSTOM, 24 p.
- Serpantié G. et Lamachère J.M. Valorisation agricole des eaux de ruissellement en zone
1989 soudano-sahélienne au B.F. Région de Bidi/Yatenga. Séminaire CIEH sur
l'hydrologie. ORSTOM Ouagadougou - 12 p.
- Shanan L, Morin Y. and Cohen M. A buried membrane collector for harvesting rainfall in
1981 sandy areas. Proc. Workshop sponsored by University of Arizona, USA, and
University of Chapingo, Mexico, at Tucson, Arizona, Sept 1980. Published by
Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, UK. pp 67-76.
- Shanan L. and Tadmor N.H. Micro-catchment systems for arid zone development. Centre Int.
1979 Agric. Cooperation, Min. of Agriculture, Rehovot, Israel.
- Sharon D. The spottiness of rainfall in a desert area. J. Hydrology, 17: 161-175.
1972
- Shaxson T.F., Hudson N.W., Sanders D.W., Roose E. and Moldenhauer W.C. Land husbandry. A
1989 framework for soil and water conservation. Soil and Water Conservation Society,
Ankeny, USA. 64 p.
- Sheikh M.I., Shah B.H. and Aleem A. Artificial catchments for rainwater harvesting in
1982 deserts of Pakistan. Pakistan For. Inst., Peshawar, Pakistan. 32(1): 7-17.
- Simanton J.R., Osborn H.B. and Reynard K.G. Effects of brush to grass conversion on the
1977 hydrology and erosion of a semi-arid southwestern rangeland watershed.
Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, 7: 249-256.

- Sims D. Pnudivales, a practical and effective way of reducing winter waterlogging and preventing soil erosion on cereal land. Project Working Paper, Drainage and Soil Cons. in the Alentejo Region of Portugal, POR/81/002. FAO, Rome.
1983
- Sinclair A.R.E. and Fryxell J.M. The Sahel of Africa: ecology of a disaster. Canadian Journal of Zoology, 63(5): 987-999.
1985
- Sinclair J. Persistence of rainfall patterns through the season in Botswana. Bulletin of Agric. Res. in Botswana, No. 3. Gaborone.
1985
- Smith P.D. and Critchley W.R.S. The potential of run-off harvesting for crop production and range rehabilitation in semi-arid Baringo. In: Soil and Water Conservation in Kenya. Proc. Second National Workshop, Nairobi, Kenya, March 1982. Occ. Paper 42, Inst. for Devel. Studies, Univ. of Nairobi.
1983
- Stern P.H. Small-scale Irrigation. Intermediate Technology Pubs., London.
1979
- Stewart B.A., Dusek D.A. and Musick J.T. A management system for the conjunctive use of rainfall and limited irrigation of graded furrows. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 413-419.
1981
- Stewart J.I. and Hash C.T. Impact of weather analysis on agricultural production and planning decisions in the semi-arid areas of Kenya. J. Applied Meteorology 21: 477-494.
1982
- Stewart B.A., Unger P.W. and Jones O.R. Soil and water conservation in semi-arid regions. In: Soil Erosion and Conservation. El-Swaify S.A., Moldenhauer W.C. and Lo A. (eds). Soil Cons. Soc. Amer., Ankeny, Iowa.
1985
- Stocking M.A. Development projects for the small farmer: Lessons from eastern and central Africa in adapting conservation. In: Soil Erosion and Conservation. El-Swaify, Moldenhauer and Lo (eds). Soil Cons. Soc. Amer., Ankeny, Iowa.
1985
- Stocking M.J. and Peake L. Crop yield losses from the erosion of alfisols. Tropical Agriculture 63(1): 41-45.
1986
- Swaminathan M.S. Rainfall and dryland agriculture. Proc. Symp. on Rainwater and Dryland Agriculture. IARC, New Delhi, Oct. 1980.
1982
- Swindale L.D. and Miranda S.M. The distribution and management in dryland agriculture of vertisols in the semi-arid tropics. Proc. Symp. on the Properties and Utilization of Cracking Clay Soils, August 1981. In: Reviews in Rural Science No. 5, 1984, Univ. of New England, Australia.
1984
- Tadmor N.H. and Shanan L. Run-off inducement in an arid region by removal of vegetation. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 33(5): 790-793.
1969
- Tejwani K.G. Water harvesting and recycling in submontane high rainfall areas. Symposium on Rainwater and Dryland Agriculture pp 147-158, Indian Nat. Science Academy, New Delhi.
1982
- Thalen D.C.P. Discussion on "Experience in the Middle East" by V.C. Robertson, p. 96. In: Resources Development in Semi-arid Lands. Royal Society, London.
1977
- Thomas D.B., Barber R.G. and Moore T.R. Terracing of cropland in low rainfall areas of Machakos District, Kenya. J. Agric. Eng. Res. 25: 57-63.
1980
- Thomas G.W. Elephant grass for soil erosion control and livestock feed. In: Conservation Farming on Steeplands. W. Moldenhauer and N. Hudson (eds.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. 188 p.
1988
- Thomas R.G. Ancient spate irrigation in Wadi Beiham, People's Democratic Republic of Yemen. FAO, Rome.
1982

- Tregubov P.S. Effective erosion control in the USSR. In: Soil Conservation: Problems and Prospects, p 454. Morgan R.P.C. (ed). Wiley, 1981
- Tromble J.M. Semi-arid rangeland treatment and surface run-off. *J. Range Management*, 29 (3): 251-255, 1976
- UNEP. Rain and Stormwater Harvesting in Rural Areas. Ed. UNEP, Tycooly International, 1983 Dublin.
- UNDP. Project completion report, Eastern Senegal Livestock Development Project. Western Africa Projects Dept. (WAPAC), World Bank, Washington DC, 1984
- Valentin C. Organisations pelliculaires superficielles de quelque sols de région sub-désertique. Agadez, Rep. de Niger. Collection Etudes et Thèses. ORSTOM, Paris, 1985
- Valentine J.F. Range Development and Improvements, Brigham Young University Press, Utah, USA, 1971
- Valet S. Première approche du fonctionnement hydrique des paysages agraires au Sine-Saloum ISRA - IRAT/DEVE, 31 p ; Test d'aménagement de la parcelle pour l'amélioration du bilan hydrique et de la lutte contre l'érosion - essais en milieu paysan en 1984 - IRAT/DEVE Montpellier 112 p.
- Viertmann W. Aménagements agro-sylvo-pastoraux dans les bassins versants du centre et du nord-ouest Tunisien. Final Report on Watershed Management TUN/81/004. FAO, Rome. 59p, 1984
- Virmani S.M. Climatic approach to transfer of farming systems technology in the semi-arid tropics. In: Development and Transfer of Technology for Rainfed Agriculture and the SAT Farmer. Int. Symp., Aug. 1979, ICRISAT, India, 1979
- Vogel H. Terrace farming in the Yemen Arab Republic. Traditional forms of soil and water conservation and their present degradation, a case study of the Manakhah Region. Paper presented to IVth Int. Conf. on Soil Conservation, Maracay, Venezuela, 3-9 Nov. 1985, 1985
- Wade N. Sahelian drought: no victory for western aid. *Science* (Washington DC) 185: 234-237, 1974
- Walker P.J. Cropping and soil conservation in semi-arid western New South Wales (Australia). *J. Soil Conservation Service of New South Wales*, 38(2): 49-56, July 1982, 1982
- Warwick D.A. Annual Reports 1978/79 and 1979/81, Dryland Crop Agronomy Section (Big Bend). Agric. Res. Div., Min. of Ag. Swaziland, 1979/80
- Welchert W.T. and Freeman B.N. Horizontal Walls. *J. Range Management* 26(4): 253-256, 1973
- Whiteman P.T.S. Moisture conservation by fallowing in Botswana. *Experimental Agriculture* 11: 305-314, 1975
- Willcocks T.J. The tillage of clod-farming sandy loam soils in the semi-arid climate of Botswana. *Soil Tillage Research* 1: 3223-350, 1981
- Willcocks T.J. Tillage requirements in relation to soil type in semi-arid rainfed agriculture. *J. Agric. Eng. Res.* 30: 327-336, 1984
- Wittmuss H. and Yazar A. Moisture storage, water use, and corn yields for seven tillage systems under water stress. Proc. ASAE Conf. on Crop Production with Conservation in the 80's. Dec. 1980, Chicago, Illinois, 1981
- Wollen L. Furrow cultivation (sowing) of cereals in Poland. *Akademia Rolnicza, Krakow, Poland. Postepy Nauk Rolniczych*, 1974, No. 4: 17-26, 1974

- Wright P. La gestion des eaux de ruissellement. OXFAM, Ouagadougou, Burkina Faso.
1984
- Wright P. La gestion des eaux de ruissellement. OXFAM, Projet Agro-Forestier (PAF),
1985 Ouagadougou, Burkina Faso.
- Wright P. La gestion des eaux de ruissellement au Yatenga (B.F) OXFAM, Ouagadougou 38 p.
1985
- Wright P. La conservation des eaux et des sols par les paysans. In : Ohm W. and Nagy J.
1985 Editors "Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de
l'Afrique de l'Ouest : 60-67 - Purdue University, West Lafayette, USA.
- Wulff H.W. The qanats of Iran, Scientific American, 218: 94-101.
1968
- Yadav R.C. Note on the effect of mulches on the conservation of soil moisture and on
1974 maize yield under semi-arid conditions. Central Arid Zone Res. Inst., Jodhpur,
Rajasthan, India. Indian J. of Agric. Sci. 44(4): 241-242.
- Zanderer J. and Hutchinson C.F. A review of water harvesting techniques of the arid S.W.
1989 U.S and N. Mexico. Banque mondiale, Etude sur la collecte de l'eau en zone
sub-saharienne : 53 p.
- Zingg A.W. and Hauser V.I. Terrace benching to save potential run-off for semi-arid
1959 land. Agron. J. 51: 289-292.

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE

- ANAFID. L'érosion et l'aménagement des bassins versants dans les pays méditerranéens.
1985 Edit. Inst. Agronomique et Vétérinaire, Rabat. 179 p.
- Asseline J., Mtimet A., Pontanier R. et Clery J. Une méthode de caractérisation, en zone
1987 semi-aride, des états de surfaces élémentaires soumises à des averses simulées.
Direction des Sols, Tunis, Mission ORSTOM. 17 p. 1 Ann.
- Baltissen G. et Coulibaly L. Plan d'aménagement du terrain villageois de Kaniko. CMDT-
1988 IRRT-Univ. Agron, Wageningen.
- Bedel J., Koohafkan P. et Roose E. Erosion hydrique et restauration des sols : 15 ans de
1985 travaux menés par les organismes de recherches et les Sociétés de développement
français. Min. Environnement-ENGREF, Montpellier. 95 p.
- Bonvallot J. Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Medenine
1979 (Sud Tunisien) au cours des pluies exceptionnelles de mars 1979. Cah. ORSTOM
Sciences Humaines 16,3:233-249.
- Breuleux F. Inventaire des travaux de conservation des eaux et des sols en Tunisie. SIDA
1976 Tunis. 5,13, 24 p.
- Brouwers M. La dégradation des sols au Sud du 16e parallèle, son importance et ses
1988 causes. Propositions pour la restauration et la conservation des potentialités
agricoles. Rapport de Mission de conservation des sols. In Projet de
réhabilitation du secteur agricole du Tchad. IRAT/DRN/Lagephy No. 6. 22 p.
- Bus G. A soil conservation research project in Southern Mali. Comm. Symp. Effectiveness
1985 of Rural Development Cooperation. Amsterdam. 30 sept- à 4 oct. 1985
- Chevallier P., Claude J., Pouyau B. et Bernard A. Pluies et crues au Sahel. Hydrologie
1985 de la mare d'OURSIS (Burkina Faso: 1976-81). Edit. ORSTOM, Paris. Coll. Trav. et
Doc. No. 190. 251 p.
- Collinet J. et Valentin C. Analyse de différents facteurs intervenant sur l'hydro-
1979 dynamique superficielle. Nouvelles perspectives, applications agronomiques.
Cah. ORSTOM Pédol. 15:283-328.
- Collinet J. and Valentin C. Evaluation of factors influencing water erosion in West
1984 Africa using rainfall simulation. IAHS Publication No. 144. pp. 451-461.
- Cormary Y Prédétermination des crues dans le cadre des mesures de CES en Tunisie. Thèse
1972 Doct. Ing., Montpellier. 681 p.
- Delhaume J.P. Etudes en milieu méditerranéen semi-aride. Ruissellement et érosion en
1981 zone montagneuse de Tunisie Centrale (Djebel Semmama). Résultats de 1975 à 79.
Tunis Division des Sols, ORSTOM, Mission Tunisie. 188 p.
- Delhaume J.P. Etudes en milieu méditerranéen semi-aride. Ruissellement et érosion en
1985 zone piémont de Tunisie Centrale (Djebel Semmama). Résultats 1976 à 81. Tunis.
Direction des Sols, Mission ORSTOM. 154 p.
- Delhaume J.P., Asseline J., Ruiz Valdes J. et Viramontes D. Ruissellement et érosion en
1989 zone aride du Nord du Mexique (Réserve de la Biosphère de Mapimi). Résultats de
1987 à 88. Instituto de Ecología de México, ORSTOM Mexico à paraître.
- Dezilleau D., Minoza F. et Rochette R. Le Sahel en lutte contre la désertification.
1988 Expérience des diguettes filtrantes : Rissiam Et BAM (Burkina Faso). AFVP-
CILSS, Ouagadougou. 21 p.
- Dubucq M. Télédétection spatiale et érosion des sols : étude bibliographique. Cah.
1986 ORSTOM Pédol. 22,2:247-258.

- El Amani S. et Chaabouni Z. Les aménagements hydrauliques traditionnels (Meskats et
1981 Jessours). Moyens de lutte contre l'érosion. 2e Coll. Arabe sur les ressources
en eau, Rabat. Sept. 1981.
- Fauck R. Erosion and mechanization. In: Soil Conservation and Management in the Semi-
1977 arid Tropics. Greenland and Lal (eds.). John Wiley and Sons. pp. 189-193.
- Fauck R. Les sols sub-arides au Sud du Sahara. Cah. ORSTOM Pédol. 18,3:189-192.
1980
- Fauck R. Evaluation of soil resources by ORSTOM. Soil Resource Inventories and Develop-
1981 ment Planning. Proc. Workshop at Cornell University, NY. pp 263-270
- Floret C., Le Houérou H.N. and Pontanier R. Climatic hazards and development: a compara-
1989 tive study of arid zones North and South of the Sahara. In: L'aridité,
contrainte au développement. ORSTOM-CNRS, Montpellier. 25 p. Sous presse.
- Grouzis M. Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques Sahéliens (Mare
1988 d'OURSIS, Burkina Faso). Edit. ORSTOM, Paris. Coll. Etudes et Thèses. 336 p.
- Heusch B. L'érosion hydraulique au Maroc : son calcul et son contrôle. Al Awamia No. 36:
1970 39-63.
- Heusch B. Contraintes sociologiques en conservation des sols. Etude du cas des montagnes
1980 du Rif, Maroc. ISCO, 2 Silsoe. Ed. Wiley and Sons. pp. 419-424.
- Heusch B. Erosion in the Ader-Dutchi Massif (Niger). C.P. Séminaire sur l'évaluation de
1980 l'érosion, Gand. 1978. In: Assessment of Erosion. Ed Wiley and Sons. pp.
521-529.
- Heusch B. Techniques de lutte contre l'érosion. CNEARC, Montpellier. 199 + 55 pp.
1988
- Hoogmoed W.b. and Stroosnijder L. Crust formation on sandy soils in the Sahel. 1. Rain-
1984 fall and infiltration. Soil and Tillage Research, Amsterdam 4: 5-23.
- Hulugalle N.R., de Koning J. and Matlon P. Soil and water conservation with rock bunds
1987 and tied ridges in the Sudan Savanna of Burkina Faso. INERA, Ouagadougou.
- Lefay O. Etude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. Rapport ORSTOM-CNEARC-
1986 INRF. 50 p. + Ann.
- Le Houérou H.N. Browse in Africa - The current state of knowledge. ILCA, Addis Ababa.
1980 491 p.
- Le Houérou H.N. Impact of man and his animals on Mediterranean vegetation. In: Mediter-
1981 ranean-type Shrublands. Di Castri, Goodal et Specht (eds). Elsevier, Amsterdam.
Chap. 25:479-521.
- Le Houérou H.N. La régénération des steppes algériennes. Minist. Rel. Ext. Paris. Idoui,
1985 Min. Agric. Alger.
- Le Houérou H.N. Agroforestry and sylvopastoralism to combat land degradation in the
1987 Mediterranean basin: old approaches to new problems. In: Workshop
Desertification, Madrid. 25-27 May 1987. EEC, in press.
- Le Houérou H.N. and Gillet H. Conservation versus desertization in African arid lands.
s.d. In: Conservation Biology, the Science of Scarcity and Diversity. Edit. M.
Soulé, Michigan. Chap. 22:444-461.
- Mainguet M. A dynamic classification of mobile dunes. In: FAO Conservation Guide No. 10.
1985 Sand dune stabilization, shelterbelts and afforestation in dry zones. FAO,
Rome. pp. 17-25.

- Mainguet M. et Chemin M.C. Lutte contre l'ensablement des palmeraies et des oasis dans
1979 le Sud Marocain. Rapport technique: étude préliminaire de l'avancement du
sable. FAO, Rome. 32 p.
- Mainguet M., Chemin M.C. et Mozet M.P. Analyse des causes de la désertification due au
1984 vent dans les oasis du Sud Marocain. Recherches Géographiques, Strasbourg No.
22: 111-120.
- Marchal J.Y. La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien Le Yatenga (Nord Haute-
1980 Volta. ORSTOM, Paris. Sér. Travaux et Doc. No. 167. 872 p. + Ann.
- Martin P. Lutte contre le ruissellement et l'érosion en pays Sahéliens. Séminaire Lutan,
1984 Niamey. Rapport de Synthèse CIEPAC/ENDA, Dakar.
- Mietton M. Lutte antiérosive et participation paysanne en Haute-Volta. Géo. Eco. Trop.,
1981 Liège. 5,1:57-72.
- Mietton M. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en
1988 zone de savane. Thèse Géographique Grenoble, Editc. Caen 511 p. + 227 p.
Annexes.
- Morel A. Faire renaître le Sahel ? Expériences de développement agricole dans le Massif
1976 de l'AIR au Niger. Cultures et développement 8:266-286.
- Nicou R. et Charreau C. Travail du sol et économie de l'eau en Afrique de l'Ouest. In:
1985 Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de
l'Ouest. Ohm et Nagy (eds.). Purdue University, West Lafayette, USA.
- Ouoba B. Ressources fourragères et possibilités d'amélioration de l'élevage au Yatenga:
1985 approche quantitative de la pâture arborée à Boukere. Mémoire IDR, Ouagadougou.
- Piot J. et Millago E. Rapport de synthèse de 6 années d'étude du ruissellement et de
1980 l'érosion à Linoghin (Haute-Volta). CTFT Ouagadougou.
- Plantié L. Technique française algérienne des banquettes de DRS. Délégation générale,
1961 Dept. Agriculture, Service DRS, ORAN. 22 p.
- Pontanier R. Maitrise et utilisation des eaux de ruissellement en zone aride.
1988 Amélioration du régime hydrique des sols - conservation des eaux et des sols.
Synthèse bibliographique sélective. ORSTOM, Tunisie, Projet RAB/84/025. 33 p.
- Rausser T. Les effets de la récolte d'eau et de la fertilisation sur la production
1987 agricole. Rapport final d'une recherche agro-forestière exécutée sur des
terrains dégradés de la forêt classée de Guesselbadi, PUSF, Niamey.
- Reij C. Evolution de la lutte antiérosive en Haute Volta depuis l'Indépendance. Vers une
1983 plus grande participation de la population. Inst. for Environmental Studies,
Amsterdam.
- Reij C. Impact des techniques de conservation des eaux et du sol sur les rendements
1988 agricoles: analyse succincte des données disponibles pour le Plateau Central du
Burkina Faso. AGRISK, Univ. de Groningen et de Ouagadougou.
- Reij C., Tierner S.D. et Kuhlman T. Conservation des sols et des eaux en Afrique Sub-
1986 saharienne. Les problèmes et leurs solutions. CDCS, Univ. Libre Amsterdam/FIDA.
- Robert R. Comportement des systèmes antiérosifs de l'Administration des forêts dans le
1970 Pré Rif (Maroc). Bull. Liaison Ing. Forestiers Maroc 2:33-46.
- Souley H. et Carucci R. Développement rural intégré dans l'Ader Doutchi Moggia Vallée de
1987 Keita (Niger). FAO Doc. GCP/NER/028/ITA. Rome.
- Weber F. et Hoskings M.W. Fiches techniques de conservation du sol. Edit. OCDE-CILSS,
1983 Paris. 112 p.

GLOSSAIRE DES NOMS LOCAUX

- AHAR : Nord de l'Inde ; diguette en terre en courbe de niveau pour retenir l'eau de débordement d'une rivière (section 5.3.3)
- ATA JADIZO : Mexique ; barrage servant à piéger les sédiments fins (silt) et à stocker l'eau dans la porosité des sédiments (section 6.3.3)
- BOULI : Province du Yatenga au Burkina Faso ; trou d'eau plus ou moins aménagé, creusé à la frontière des parcours et des terres de culture et collectant quelques dizaines de m³ de ruissellement pour abreuver le bétail et/ou pour procurer une irrigation d'appoint à un jardin de quelques ares cultivé intensivement.
- CAAG : Somalie ; grosse digue en courbe de niveau retenant le ruissellement (section 5.2.4)
- CORDON DE PIERRES : Afrique francophone ; diguette formée d'une accumulation de pierres en courbe de niveau, renforcée ou non par une végétation spécialement plantée (herbes devant, végétation arbustive derrière) (section 7.2.2)
- CUVETTE : Afrique francophone : petit bassin peu profond collectant le ruissellement pour améliorer la croissance de céréales, de fourrage ou d'arbres (section 5.3.1 et 7.1.2)
- DIGUE DE DIVERSION : Afrique francophone ; grosse digue (H = 2 à 3 mètres) avec vannes de contrôle pour capter et gérer les eaux de débordement des rivières (section 5.3.4)
- DIGUETTE : Afrique francophone ; gros billon de terre (H = 40 à 80 cm) en courbe de niveau ou en pente légère pour évacuer les excès d'eau, plus ou moins protégé par des herbes (Burkina Faso) ou des pierres (Niger) pour retarder le ruissellement, améliorer l'infiltration et la production de céréales ou de fourrages (section 7.1.2)
- FANYA JUU : Kenya ; fossé en courbe de niveau dont la terre est rejetée vers l'amont pour former un talus enherbé et des terrasses progressives (très voisins des fossés aveugles introduits par les belges au Rwanda et Burundi vers 1945)
- GESSOUR (ou JESSOUR) : Tunisie ; fond de vallée comportant un impluvium et des champs cultivés (céréales sous arbres) en amont d'une tabbia (talus empierré) (section 5.3.2)
- GILGAI : Australie ; surface des vertisols fissurée profondément formant un réseau hexagonal (section 5.4)
- HAFIR : Afrique arabophone ; citerne creusée pour conserver l'eau (section 5.4)
- KAIR : URSS ; système agraire comportant la culture de terrasses régulièrement inondées par la rivière (section 5.3.1)
- KHADIN : Inde, Rajasthan ; digue en terre permettant de retenir l'eau débordant de la rivière pour inonder les terres et les cultiver dès qu'elles sont suffisamment ressuyées (section 5.3.3)
- KHAKI : URSS, Turkmenistan ; système de culture utilisant les eaux de rivière (section 5.3.1)
- KHARIF : Inde ; la saison de la mousson d'été (section 5.3.3)
- KHUL : Nord de l'Inde et du Pakistan ; canaux de collecte du ruissellement taillés dans les flancs raides des vallées en vue de l'irrigation (section 5.3.2)
- KUSKABA : Pakistan ; système de culture de décrue utilisant les eaux de crue des rivières ; SAILABAS est aussi utilisé (section 5.3.3)
- LIMAN : URSS ; culture de ruissellement par épandage des eaux de crue avec de grosses digues de terre (section 5.3.2)

- LUNETTE : DEMI-LUNES ; Afrique francophone ; petite dépression entourée d'une diguette en forme de demi-lune concentrant les eaux de ruissellement sur le trou de plantation d'un arbre (section 7.2.2) ou de quelques pieds de mil-sorgho
- MESKAT : Tunisie ; culture de ruissellement pour les oliviers comportant un impluvium et des canaux d'amenée des eaux sur le champ cultivé (section 5.3.2)
- MULGA : Australie ; nom local de l'Acacia aneura, un buisson non apété par le bétail (section 5.3.2)
- MURUNDUM : Brésil ; gros talus en terre interceptant et stockant le ruissellement sur les terres cultivées (section 4.3.1 et 5.3.2)
- NEGARIN : Israël ; terme dérivé de NEGER : ruissellement et appliqué à différents types d'aménagements de la surface du sol en micro-bassins (section 7.2.2)
- PANI PANCHAYAT : Inde ; comité local qui s'occupe de tous les problèmes de gestion des eaux et d'aménagement (section 1.1)
- PNUDIVALE : Portugal ; formation d'une légère ondulation (drain peu profond entouré de deux billons aplatis) permettant le drainage de terres cultivées mécaniquement (section 5.4)
- PYNE : Inde ; canal de diversion des eaux de crue creusé au dessus du lit de la rivière pour capter les hautes eaux en vue de culture de décrue (section 5.3.4)
- QANAT : Iran et autres pays d'Afrique du Nord et d'Asie Occidentale aussi dénommé "KAREZ", "FOGGARA", "FALAS" ; puits horizontaux (section 6.5.2)
- RABI : Inde ; la période de culture de la saison sèche hivernale après la mousson (section 5.3.3)
- SAILABA : voir KUSKABAS
- SAWAGI : République Islamique du Yémen ; irrigation d'appoint utilisant le ruissellement collecté sur les terrasses de culture sèche (section 5.3.2)
- SAYL : République Islamique du Yémen ; irrigation par les eaux de crue dérivées des oueds vers des terrasses cultivées et nivelées (section 5.3.2)
- TABIA : petite digue en terre et en pierre barrant un talweg avec ou sans déversoir en vue de retenir les eaux de ruissellement et leurs sédiments pour la culture de céréales et de divers arbres fruitiers
- TERA : Soudan ; zone inondée, cultivée derrière des digues en terre (section 5.3.3)
- TRINCHERÁ : Amérique Latine ; barrage captant le sable pour stocker l'eau dans sa porosité (section 6.3.3)
- VAZANTE : Brésil ; aire inondée par le ruissellement accumulé derrière une diguette en terre semi-circulaire (section 5.3.3)
- WADI : Afrique arabophone ; ou oued = lit d'une rivière à sec la plupart du temps avec des crues soudaines intermittantes (section 5.3.2)
- WARABUNDI : Inde et Pakistan ; comité local s'occupant des problèmes d'irrigation = PUKKA WARABUNDI si l'association est officielle ou KATCHA WARABUNDI dans le cas contraire (section 1.1)
- WARPING : Chine ; irrigation avec de l'eau chargée de sédiments pour maintenir la fertilité (section 5.3.4)
- ZAI : Burkina Faso ; cuvettes chargées en matière organique pour attirer les termites et stocker les eaux de ruissellement, permettant de récupérer les (zipellé) terres encroûtées et tassées, complètement dégradées

**RESUME DU SYSTEME FAO-UNESCO DE CLASSIFICATION DES SOLS ET SON ANALOGIE
AVEC LE SYSTEME TAXONOMIQUE DES ETATS-UNIS**

Système FAO-Unesco			
Symbole	Unité de sol	Description	Analogie avec l'actuel système taxonomique des Etats-Unis
J	Fluvisols	Sols de dépôts alluviaux et de plaines d'inondation	Fluvents
G	Gleysols eutriques dystriques	Sols hydromorphes	Haplaquents, Psammaquents Tropaquents, Andaquepts, Fragiaquepts, Haplaquents, Tropaquepts
	molliques humiques plinthiques géliques		Haplaquolls Humaquepts Plinthaquepts Pergelique cryaquepts
R	Régosols	Sols faiblement ou non évolués recouvrant un matériau meuble	Orthents, Psamments
I	Lithosols	Sols d'érosion peu profonds sur roche-mère dure	Inceptisols
Q	Arénosols	Sols à texture grossière et à profil peu différencié	Psamments
E	Rendzines	Sols carbonatés peu profonds contenant de l'humus	Rendolls
U	Rankers	Sols acides peu profonds contenant de l'humus	Haplumbrepts
T	Andosols	Sols formés sur roche volcanique, riches en éléments vitreux et présentant généralement un horizon superficiel humique de couleur sombre	Andepts
V	Vertisols pelliques chromiques	Sols foncés ou noirâtres à argile gonflante	Vertisols Pelluderts, Pellusterts, Pelloxerts Chromuderts, Chromusterts, Chromoxererts, Torrerts
Z	Solonchaks orthiques molliques	Sols salins	Aquepts, Orthids Salorthids Salorthidic Calciustolls, Salorthidic, Haplustolls
	gleyiques		Halaquepts
S	Solonetz orthiques	Sols sodiques	Alfisol, Aridisols, Mollisols Natrustalfs, Natrixeralfs, Natrargids, Nadurargids Natrabolls, Natriborolls, Natrustolls Natrixerolls Natraqualfs
	molliques		Aridisols
Y	Yermosols	Sols arides	Camborthids, Durorthids Calciorthids Gypsiorthids Argids
	hapliques calciques gypsiques luviques		
X	Xérosols hapliques	Sols bruns subarides	Mollic Aridisols Mollic (xerollic ou ustollic) Camborthids et Durorthids Mollic (xerollic ou ustollic) Calciorthids Mollic (xerollic ou ustollic) Calciorthids Mollic (xerollic ou ustollic) Haplargids et Durargids
	calciques gypsiques luviques		
K	Kastanozems	Sols bruns ou châtaîns, riches en matière organique	Ustolls
	hapliques calciques luviques		Haplustolls, Aridic Haploborolls Calciustolls, Aridic Calciborol Argiustolls, Aridic Argiborolls
C	Chernozems	Sols noirs calcaires, riches en matière organique	Ustolls
	hapliques calciques luviques		Haploborolls, Vermiborolls Calciborolls Argiborolls
H	Phaeozems	Sols foncés, riches en matière organique	Ustolls Hapludolls Vermudolls Argiudolls Argiaquolls
	hapliques calciques luviques gleyiques		

**RESUME DU SYSTEME FAO-UNESCO DE CLASSIFICATION DES SOLS ET SON ANALOGIE
AVEC LE SYSTEME TAXONOMIQUE DES ETATS-UNIS**

Système FAO-Unesco			
Symbole	Unité de sol	Description	Analogie avec l'actuel système taxonomique des Etats-Unis
M	Greyzems orthiques gleyiques	Sols gris, riches en matière organique	Ustolls Argiborolls Aquolls
B	Cambisols eutriques dystiques humiques gleyiques calciques chromiques vertiques ferraliques	Sols altérés in situ peu évolués	Inceptisols Eutrochrepts, Ochrepts, Tropepts, Ustochrepts, Xerochrepts, Eutropepts Dystrochrepts, Dystropepts Haplumbrepts, Humitropepts Aquic Dystrochrepts ou Eutrochrepts Eutrochrepts, Ustochrepts, Xerochrepts Xerochrepts Vertic Tropepts Oxic Tropepts
L	Luvisols orthiques chromiques vertiques ferriques albiques plinthiques gleyiques	Sols présentant une accumulation illuviale d'argile dans l'horizon B	Alfisols Hapludalfs, Haploxeralfs Rhodoxeralfs, Haploxeralfs Vertic Haploxeralfs -
B	Podzoluvisols eutriques dystriques gleyiques	Sols présentant une accumulation illuviale d'argile, irrégulière	Boralfs, Aqualfs Glossoboralfs - Glossaqualfs, Aquic Glossaqualfs Aquic Glossoboralfs
P	Podzols orthiques leptiques ferriques humiques placiques gleyiques		Spodosols Orthods - Ferrods Humods Placorthods, Placohumods Aquods
W	Planosols eutriques dystriques molliques humiques solodiques	Sols à horizons argileux, à drainage lent	Albaqualfs Albaquults Mollic Albaqualfs, Argialnolls - -
A	Acrisols orthiques ferriques humiques plinthiques gleyiques	Sols ayant un faible taux de saturation en bases	Ultisols Hapludults, Haplustults, Haploxerults Palexerults, Paleustults Humults Plinthaquults, Plinthudults, Plinthustults Aquults
N	Nitosols eutriques dystriques humiques	Sols ferrallitiques de structure polyédrique angulaire	Alfisols, Ultisols Tropudalfs, Paleudalfs, Rhodustalfs Tropudults, Rhodudults, Rhodustults, Palexerults Tropohumults
F	Ferralsols orthiques xanthiques humiques acriques plinthiques	Sols à capacité d'échange cationique faible	Oxisols Orthox, Torrox, Ustox Orthox, Torrox, Ustox Humox Acrox Plinthaquox

LES BULLETINS PÉDOLOGIQUES DE LA FAO

1. Soils of the arid zones of Chile, 1965 (A'')
2. A survey of soil laboratories in 64 FAO member countries, 1965 (A'')
3. Guide on general and specialized equipment for soil laboratories, 1966 (A'')
4. Guide to 60 soil and water conservation practices, 1966 (A')
5. Le choix des sols à cacao, 1966 (A'' E'' F')
6. L'interprétation des photographies aériennes dans les études pédologiques, 1967 (A'' C'' E'' F')
7. A practical manual of soil microbiology laboratory methods, 1967 (A'')
8. Soil survey interpretation and its use, 1967 (A'')
9. La préparation des rapports de prospection pédologique, 1970 (A'' E'' F'')
10. Méthodes d'analyse physique et chimique des sols et des eaux, 1970 (A' E' F')
11. Manuel pour les enquêtes de fertilité des sols effectuées dans les champs des agriculteurs, 1970 (A' E' F')
12. A study on the response of wheat to fertilizers, 1971 (A')
13. Land degradation, 1971 (A'' C'')
14. Amélioration de la fertilité des sols en Afrique, 1971 (A'' F'')
15. Legislative principles of soil conservation, 1971 (A')
16. Effects of intensive fertilizer use on the human environment, 1982 (A')
17. Les éléments-traces dans les sols et en agriculture, 1972 (A' E'' F')
18. Le calibrage des essais de sols pour les recommandations en matière d'engrais, 1973 (A' E'')
19. Interprétation des prospections pédologiques à l'usage de l'ingénieur, 1974 (A' E'' F'')
20. Fertilizer legislation, 1973 (A'' E')
21. Sols calcaires, 1973 (A' F'')
22. Approaches to land classification, 1974 (A'')
23. Management properties of ferralsols, 1974 (A')
24. L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique, 1974 (A'' E' F')
25. Sandy soils, 1975 (A')
26. Planning and organization of fertilizer use development in Africa, 1975 (A'')
27. Emploi des matières organiques comme engrais, 1975 (A' E'' F'')
28. S.I. units and nomenclature in soil science, 1975 (A*)
29. Land evaluation in Europe, 1976 (A'')
30. La conservation des sols dans les pays en développement, 1976 (A' Ar' C'' E'' F'')
31. Prognosis of salinity and alkalinity, 1976 (A*)
32. Cadre pour l'évaluation des sols, 1976 (A' C'' E'' F')
33. La conservation et l'aménagement des sols dans les pays en développement, 1986 (E' F')
34. Assessing soil degradation, 1977 (A'')
35. Organic materials and soil productivity, 1977 (A' C'')
36. Organic recycling in Asia, 1978 (A'' C')
37. Improved use of plant nutrients, 1978 (A' C'')
- 38/1. Soil and plant testing and analysis, 1980 (A')
- 38/2. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations, 1980 (A'' E'')
39. Salt-affected soils and their management, 1988 (A' Ar')
40. Chine: recyclage des matières organiques en agriculture, 1979 (A' E' F')
41. Chine: multiplication de l'azolla et technologie de la production artisanale de biogaz, 1981 (A' E' F')
42. Etudes et prospections pédologiques en vue de l'irrigation, 1979 (A' C'' F'')
43. Organic recycling in Africa, 1980 (A*)
44. Aménagement des bassins versants, 1986 (A' C'' E' F')
45. Organic materials and soil productivity in the Near East, 1982 (A avec sommaire en Ar')
46. Blue-green algae for rice production — a manual for its promotion, 1981 (A')
47. Le recyclage de résidus agricoles organiques en Afrique, 1982 (F')
48. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study, 1982 (A')
49. Application des systèmes fixateurs d'azote dans l'amélioration et l'aménagement des sols, 1986 (A' C'' E' F')
50. Garder la terre en vie: l'érosion des sols — ses causes et ses remèdes, 1983 (A' E' F')
51. El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina, 1983 (E')
52. Directives: évaluation des terres pour l'agriculture pluviale, 1988 (A' E' F')
53. Systèmes de production améliorés susceptibles de remplacer l'agriculture itinérante, 1987 (A' E' F')
54. Conservation des sols et des eaux: façons culturales appropriées, 1989 (A' C'' E'' F'')
55. Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: directives, 1989 (A' C'' E'' F'')
56. Aménagement du sol: production et usage du compost en milieu tropical et subtropical, 1988 (A' E'' F'')
57. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides, 1990 (A' F')
58. Guidelines: land evaluation for extensive grazing, 1988 (A'')
59. Nature and management of tropical peat soils, 1988 (A')
60. Soil conservation for small farmers in the humid tropics, 1989 (A' E'')
61. Radioactive fallout in soils, crops and food, 1989 (A' F'')
62. Management of gypsiferous soils, 1990 (A')

Disponibilité: avril 1990

A	—	Anglais	· Disponible
Ar	—	Arabe	·· Epuisé
C	—	Chinois	··· En préparation
E	—	Espagnol	
F	—	Français	

On peut se procurer les Bulletins pédologiques de la FAO auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement à la Section distribution et ventes, FAO, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.