

Université Jean Moulin Lyon III
Faculté des Lettres et Civilisations
Laboratoire de Géographie Physique

- juin 1993-

**LES PETITS AMENAGEMENTS
HYDRAULIQUES RURAUX :**

**UNE REPONSE
A L'ARIDITE ET A LA SECHERESSE.**

**L'exemple de la zone soudano-sahélienne
d'Afrique de l'ouest.**

mémoire de maîtrise
"aménagement du territoire"

Yves BOS

sous la direction du Professeur **Marcel LEROUX**

AVANT-PROPOS

Le présent travail n'aurait jamais vu le jour s'il m'avait fallu le mener seul à son terme. C'est pourquoi je tiens à exprimer ici ma vive reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, directement ou non, à l'élaborer.

Le Professeur Marcel Leroux doit être assuré ici de ma plus profonde gratitude pour ses conseils précieux, son soutien constant, actif et toujours encourageant.

Je profite de l'occasion pour faire part à tous les chercheurs et étudiants du laboratoire de géographie physique, et tout particulièrement à son directeur, le Professeur Gérard Mottet, de la joie d'avoir partagé, toujours dans une atmosphère de convivialité, leurs bureaux sept mois durant.

Je salue de la même façon le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier pour son accueil sympathique, et principalement madame Nadine Muther et monsieur Bernard Thébé.

D'avoir consacré une partie de leur temps en des discussions parfois houleuses, mais toujours enrichissantes, sur le thème des aménagements de petite hydraulique rurale, je souhaite remercier l'ensemble des personnes suivantes :

- Alain Gioda, chercheur de l'ORSTOM, qui fut par ailleurs un précieux soutien lors de mon stage,
- Yves Travi, Professeur à la Faculté des sciences d'Avignon,
- Marc Morell, directeur du laboratoire d'hydrologie à l'ORSTOM,
- Eric Roose, directeur du laboratoire de pédologie,
- Thierry Ruf, chercheur au laboratoire d'études agraires,
- Jean Noël Reyniers et Patrice Dugué, chercheurs au CIRAD,
- Jean Louis Sabatier, directeur d'études au CNEARC,
- Christian Puech, chercheur au CEMAGREF,
- Joseph et Maryse Goubier, responsables de l'IRRA,
- Bernard Collignon, de l'AFVP,
- Jacques Mercoiret et Pierre Martin, du CIEPAC,
- Marc Levy, chargé des communications au GRET.

Que mademoiselle Dugas de la Catonnière, documentaliste du laboratoire de géographie rodhanienne, trouve ici le témoignage de ma gratitude pour son aide et son dévouement lors de mes recherches bibliographiques.

Je terminerai en remerciant chaleureusement, pour leurs critiques amicales mais néanmoins déterminantes, Ousmane Dione, Marie-Aude Bos, Christian et Martine Bidabe ainsi que Valérie.

RESUME

Cette recherche est basée sur une étude bibliographique et des contacts avec quelques organismes de recherche et de développement français. Son objectif est de récapituler l'ensemble des méthodes accessibles aux populations rurales, de rétention, d'augmentation ou de création d'une ressource en eau précieuse dans les milieux arides tels que le Sahel.

La première partie s'attache à définir les termes du bilan en eau de cette zone, ainsi que leur évolution : la ressource rare et capricieuse s'estompe à l'issue de deux décennies de sécheresse, les besoins importants augmentent au rythme de la croissance démographique.

La description technique des procédés nombreux et divers, développés à tous les stades du cycle de l'eau, témoigne, dans la seconde partie de l'existence de réponses fiables aux besoins locaux des populations rurales.

La troisième partie nous apprend que, malgré l'extrême diversité des situations, certains problèmes se retrouvent dans toutes les opérations : une non ou mauvaise intégration des ouvrages, un manque de sérieux des travaux d'entretien, des conditions sanitaires souvent déplorables, des conflits d'usage, une accélération locale de la désertification et un épuisement de certaines nappes. Les principales sources de ces difficultés viennent du fait que les techniques modernes proposées sont inadaptées aux capacités des utilisateurs, ces derniers ne sont pas considérés comme des interlocuteurs à part entière, aucune information, ni formation, ne leur est fournie, les infrastructures étatiques sont insuffisantes pour assurer le suivi des ouvrages.

La conclusion rassemble quelques remarques personnelles sur le rôle des organismes impliqués dans le développement. Le manque de coordination des actions, de collaboration entre les différents acteurs, admis par beaucoup comme principale cause des échecs de l'aménagement en milieu rural, ne se traduit pas pour autant par une quelconque modification du système en place, que personne n'ose initier. L'inertie générale des intervenants du développement semble devoir rester pour longtemps encore un frein à sa propre action, de même que, pour le même motif, s'opposer à toute initiative innovatrice.

SOMMAIRE

	pages
INTRODUCTION	1

PREMIERE PARTIE LE MILIEU SAHELIEU : BASES NATURELLE ET HUMAINE DE L'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE

I - "TYRANNIE DES PLUIES" (Toupet, 1992, p. 12).	4
I - 1. Un facteur permanent : l'aridité.	4
I - 1.1. <u>Une structure aérologique particulière.</u>	4
I - 1.2. <u>Des conditions de pluviogenèse restrictives.</u>	6
I - 1.3. <u>La zonation climatique.</u>	8
I - 2. Une variable : la durée et l'intensité des sécheresses.	11
I - 2.1. <u>L'inégale répartition au sol de la pluviométrie.</u>	12
I - 2.2. <u>La succession de périodes "sèches" et "humides".</u>	13
I - 3. Des conditions de vie imposées par le climat.	13
II - UNE RESSOURCE EN EAU LIMITEE MAIS EXPLOITABLE.	16
II - 1. Un écoulement de surface localisé.	16
II - 1.1. <u>L'endoréisme.</u>	16
II - 1.2. <u>Les grands fleuves exogènes avec leurs affluents.</u>	17
II - 2. Une ressource souterraine diffuse.	23
II - 2.1. <u>Des réservoirs potentiels.</u>	24
II - 2.2. <u>Recherche des gisements aquifères.</u>	27
II - 2.3. <u>Un remplissage conditionné avant tout par les pluies.</u>	27
II - 2.4. <u>Une qualité de potabilité pas toujours assurée.</u>	30
II - 3. Intérêts, limites des eaux de surface et souterraines.	31
III - BESOINS EN EAU ET LIMITES A SON EXPLOITATION.	31
III - 1. L'eau rare à partager.	32
III - 1.1. <u>Un besoin croissant.</u>	32
III - 1.2. <u>Des besoins variés.</u>	34
III - 2. Les limites et contraintes liées à l'exploitation de l'eau.	36
III - 2.1. <u>Les maladies liées à l'eau.</u>	36
III - 2.2. <u>La dégradation accélérée du milieu.</u>	36

DEUXIEME PARTIE
LES TECHNIQUES

I - LES OUVRAGES DE RECUPERATION DES EAUX DE PLUIE.	44
II - LES OUVRAGES DE MAITRISE DES EAUX DE SURFACE.	45
II - 1. La lutte contre l'érosion diffuse.	45
II - 1.1. <u>Les procédés mécaniques.</u>	46
II - 1.2. <u>Les procédés biologiques et les façons culturales.</u>	49
II - 2. Stockage des crues, lutte anti-érosive localisée dans les bas-fonds.	50
II - 2.1. <u>Les barrages de surface.</u>	51
II - 2.2. <u>Les barrages de sable.</u>	53
II - 2.3. <u>Les barrages souterrains.</u>	57
II - 2.4. <u>L'amélioration du stockage naturel de l'eau : les boulis.</u>	58
III - MOBILISATION DES EAUX SOUTERRAINES.	60
III - 1. Principe et conditions d'utilisation.	60
III - 2. Atteindre l'eau.	60
III - 2.1. <u>Les puits.</u>	60
III - 2.2. <u>Les forages.</u>	72
III - 3. Extraire l'eau.	74
III - 3.1. <u>Quelques méthodes traditionnelles.</u>	74
III - 3.2. <u>La pompe à main.</u>	76
III - 3.3. <u>Les éoliennes de pompage.</u>	78
III - 3.4. <u>Les groupes Diesel ou à essence.</u>	80
III - 3.5. <u>L'entraînement électrique du pompage.</u>	80
III - 3.6. <u>Le pompage solaire.</u>	80
III - 4. L'abondance des techniques d'exploitation de l'eau souterraine.	81
IV - LA MAITRISE DE L'EAU A L'ETAT DE VAPEUR.	81

TROISIEME PARTIE
ADAPTATION
DES MOYENS AUX BESOINS

I - LA RECUPERATION D'EAU DE PLUIE : OUTIL DE DEVELOPPEMENT ?	85
II - LA LUTTE CONTRE L'EROSION : LIMITEE AU MILIEU AGRICOLE.	87
II - 1. Des procédés traditionnels efficaces et éprouvés.	88
II - 2. L'inégale perception de la part des paysans de l'intérêt des techniques traditionnelles.	88
II - 3. Les déboires de la lutte anti-érosive moderne.	89
II - 4. Quel avenir pour les aménagements de la lutte anti-érosive ?	90
III - LES BARRAGES DE RETENUE D'EAU : MULTI-USAGES.	91
III - 1. La polyvalence des barrages.	91
III - 2. Les points sombres de la construction.	92
III - 3. Les points sombres de la mise en valeur de l'aménagement.	94
III - 3.1. <u>L'étonnante absence de conflit d'usage.</u>	94
III - 3.2. <u>La virulence de la critique sanitaire.</u>	95
III - 4. Un bilan mitigé pour l'aménagement de surface.	96
IV - LES EAUX SOUTERRAINES : LA RESSOURCE MIRACLE ?	97
IV - 1. L'incontestable intérêt de la ressource souterraine.	97
IV - 2. Le manque d'entretien des ouvrages : conséquence de leur non intégration dans les systèmes villageois.	98
IV - 3. Le captage de l'eau souterraine et les maladies liées à l'eau.	101
IV - 4. Les captages d'eau : source de conflits d'usage.	101
IV - 5. La surexploitation des points d'eau : désertification et épuisement des nappes.	102
IV - 6. Conclusion : l'eau souterraine, une ressource mal mise en valeur.	104
V - DES TECHNIQUES DE MAITRISE DE L'EVAPORATION PEU CONNUES DANS LES REGIONS SOUDANO-SAHELIENNES.	105

CONCLUSION

REFLEXIONS SUR LES ACTIONS DE DEVELOPPEMENT LIEES AUX PETITS AMENAGEMENTS D'HYDRAULIQUE RURALE
--

LE CONCEPT "D'AMENAGEMENT" A MODIFIER.	108
LE CONCEPT DE "DEVELOPPEMENT" A REVOIR.	110
UN PREALABLE AUX ACTIONS FUTURES : LE COMPLEMENT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE FOND.	110
<u>L'état actuel des données de base.</u>	111
<u>La nécessité de chiffrer toutes les réalisations passées.</u>	112
<u>La nécessaire connaissance des besoins réels des populations.</u>	113
<u>La nécessité d'adapter perpétuellement la recherche scientifique en fonction des besoins locaux.</u>	114

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE CLASSEE PAR PARTIES PUIS PAR THEMES.	119
TABLEAU DES CONFERENCES SUIVIES	129
LISTE DES ILLUSTRATIONS	130
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	132

INTRODUCTION

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail universitaire, qui trouve son origine dans un désir personnel profond. Son existence repose en effet sur deux motivations principales.

Sans reprendre les phrases dévastatrices des médias, devenues maintenant clichés, sur le Sahel, l'atrocité d'une sécheresse qui y sévit depuis un quart de siècle, l'impérieuse nécessité de maîtriser l'eau pour le maintien en vie des populations et la lutte contre l'avancée d'un désert humain, nous justifions simplement cette recherche par notre curiosité pour l'Afrique, d'autant plus prononcée, certes, que l'eau y tient une place vitale, au sens le plus strict du terme.

La seconde motivation prend sa source d'une passion inaltérable pour l'eau. Toujours l'eau a été le centre de nos préoccupations d'étudiant, mais toujours les travaux se sont limités à des considérations techniques : irrigation, drainage, forages..., d'où l'envie d'une vision nouvelle, élargie, des relations entre cette eau et l'homme, car maîtriser l'eau n'est pas une fin en soi, mais une étape vers l'amélioration des conditions de vie des hommes. D'une façon ou d'une autre, nous nous serions ainsi intéressés aux zones arides et semi-arides de l'Afrique. La maîtrise "aménagement du territoire" nous a offert de concrétiser le dernier pas vers la définition finale du sujet, l'étude des petits aménagements d'hydraulique rurale au Sahel, qui s'intègre dans l'optique de l'option "*aide aux pays en voie de développement*". Car l'urgence des besoins en eau des régions sahéniennes est réelle, même si la médiatisation est responsable de leur banalisation, de leur vulgarisation, dans nos pays industrialisés où nous acceptons les faits, sans autre forme de procès.

Ce travail est un compromis entre curiosité personnelle et volonté de travailler aux contacts de réalités difficiles. Le réaliser fut pour nous un plaisir, duquel nous n'avons jamais voulu séparer l'efficacité, en n'y inscrivant que les résultats qui nous semblaient essentiels, tirés d'une littérature aussi variée qu'abondante.

Ce mémoire s'appuie en effet avant tout, et surtout, sur la lecture de tout ce qui, du manuel technique au texte de l'anthropologue, concerne les aménagements de la petite hydraulique rurale sahénienne. Cette approche uniquement bibliographique a l'inconvénient de ne rendre compte que difficilement et partiellement des réalités de terrain. En revanche, la multiplicité des sources et des avis fournit une base solide à la réflexion, et nous autorise un essai de synthèse objective.

Un stage de deux mois à l'ORSTOM¹ de Montpellier a par ailleurs renforcé notre connaissance du milieu de la recherche et du développement axé sur l'hydraulique rurale ouest africaine. Les entretiens avec de nombreux chercheurs et responsables de l'ORSTOM, mais aussi du CIRAD², du CNEARC³, du CEMAGREF⁴, du GRET⁵, et d'O.N.G.⁶

¹ Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.

² Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

³ Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes.

⁴ Centre national d'Expérimentation du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

⁵ Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques.

⁶ Organisations Non Gouvernementales.

telles que l'AFVP⁷ et le CIEPAC⁸, ont été très révélateurs de l'état d'esprit, du mode de fonctionnement, des avantages et des limites de chacune des institutions, de chacun des organismes impliqués dans le développement, en Afrique de façon générale, dans le domaine de l'hydraulique en particulier. A l'issue de ces recherches, plus ou moins formelles, nous sommes en mesure de proposer un bilan des techniques de maîtrise de l'eau mises en oeuvre au Sahel, à l'échelle du village rural.

Les méthodes que nous allons décrire s'attachent à répondre à un besoin issu du déséquilibre entre ce qu'offre le milieu naturel et ce que consomment les sociétés y demeurant, dont les modes de vie sont par ailleurs ancrés dans des traditions très anciennes. Il nous paraît primordial, pour juger de la pertinence de ces procédés, d'analyser séparément leurs résultats purement techniques, que l'on pourrait qualifier d'expérimentaux, de leur fonctionnement in-situ.

Les deux premières parties définissent donc, successivement et respectivement, les deux variables de notre sujet : le milieu sahélien et les techniques de maîtrise de l'eau.

La première partie nous permet de prendre connaissance de la situation de déséquilibre entre l'offre et la demande. Nous sommes donc progressivement amenés à définir les problèmes sahéliens en terme de bilan entre les ressources et les besoins en eau.

Dans la seconde partie nous nous limitons à décrire les procédés de maîtrise de l'eau, à donner les résultats techniques obtenus, sans encore aborder l'aspect social de l'aménagement. Cette segmentation permet de faire la part des choses entre les qualités intrinsèques d'un aménagement, son potentiel, et les avantages qu'en retireront les populations auxquelles il est destiné, ses résultats réels.

La troisième partie analyse le fonctionnement des techniques in-situ et dévoile les problèmes liés à l'utilisation des aménagements, que l'on retrouve quel que soit le lieu, le moment, le procédé, le projet, les intervenants et les populations concernées.

Ceci nous amène à conclure, de manière beaucoup plus personnelle, sur la fonction, et la façon de la remplir, des intervenants extérieurs, organismes de recherche et de développement, dans le fonctionnement des petits aménagements d'hydraulique rurale dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'ouest.

⁷ Association Française des Volontaires du Progrès.

⁸ Centre International pour l'Education Permanente et l'Aménagement concerté.

PREMIERE PARTIE

<p>LE MILIEU SAHELIEU :</p> <p>BASES NATURELLE ET HUMAINE DE L'AMENAGEMENT HYDRAULIQUE</p>
--

- | | |
|---|----|
| I - "TYRANNIE DES PLUIES" (Toupet, 1992, p. 12). | 4 |
| II - UNE RESSOURCE EN EAU LIMITEE MAIS EXPLOITABLE. | 16 |
| III - BESOINS EN EAU ET LIMITES A SON EXPLOITATION. | 31 |

Au mot "Sahel", chacun peut associer : "Afrique", "aridité", "sécheresse". Nous savons tous également que les pays industrialisés, et notamment la France, envoient de l'aide à ces pays sahéliens ; de l'aide alimentaire parfois, de l'aide technique régulièrement (dans le domaine de l'hydraulique en particulier).

Mais quelle image nous donnent nos médias de ces régions ? Quelle représentation nous faisons-nous, ici en Europe, de ce que sont les difficultés de là-bas ? Agir sur un milieu nécessite au préalable de le connaître parfaitement, ou bien la probabilité de courir à l'erreur est grande. Notre réflexion sur les aménagements hydrauliques du Sahel doit, pour se fonder sur une base objective solide, comporter une approche du domaine sahélien.

Cette première partie consiste en une recherche progressive de ce que recouvrent en réalité les mots "Sahel", "aridité", "sécheresse". L'aridité et la sécheresse : quelles causes, quelles conséquences pour l'environnement et pour l'homme ? Il s'agit d'identifier les composantes du milieu responsables des difficultés du développement dans les zones arides et, par la même occasion, de sentir les niveaux auxquels des interventions peuvent être envisagées. Nous devons donc fixer les limites imposées par les acteurs que sont la nature et l'homme à une intervention extérieure : en l'occurrence, les aménagements d'hydraulique villageoise.

* * * * *

I - "TYRANNIE DES PLUIES" (Toupet, 1992, p. 12).

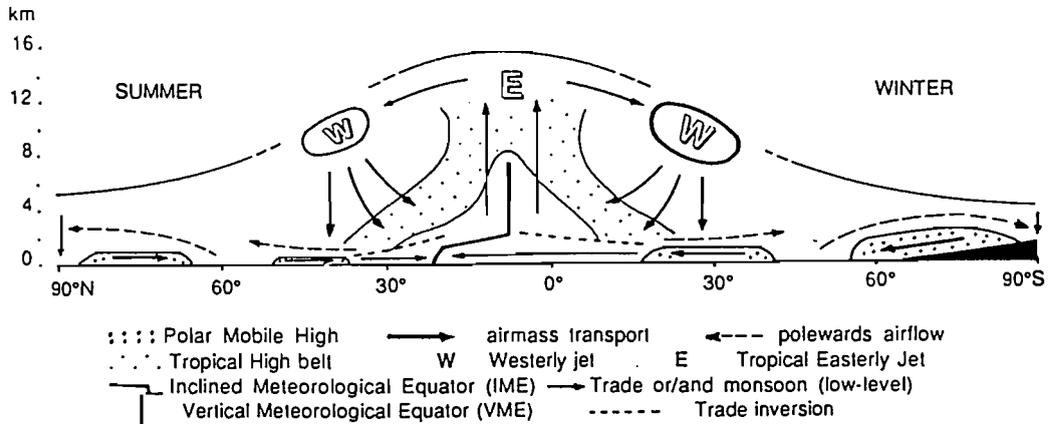
L'homme a besoin d'eau pour vivre, et une grande partie de cette ressource disponible au Sahel provient des pluies. Pour bien comprendre la contrainte qu'elle représente, nous devons rappeler, dans leurs grandes lignes, les mécanismes climatiques qui régissent son apparition.

I - 1. Un facteur permanent : l'aridité.

I - 1.1. Une structure aérologique particulière.

La structure particulière de la troposphère tropicale et la circulation atmosphérique conditionnent le climat de l'Afrique occidentale. Comme le précise la figure 1 (page suivante), cette structure est limitée au nord et au sud par deux anticyclones qui se rejoignent en altitude. A l'intérieur de cette cloche de hautes pressions, une zone dépressionnaire, d'origine dynamique, correspond à l'Equateur météorologique. Les masses d'air issues des hautes pressions confluent vers ces basses pressions.

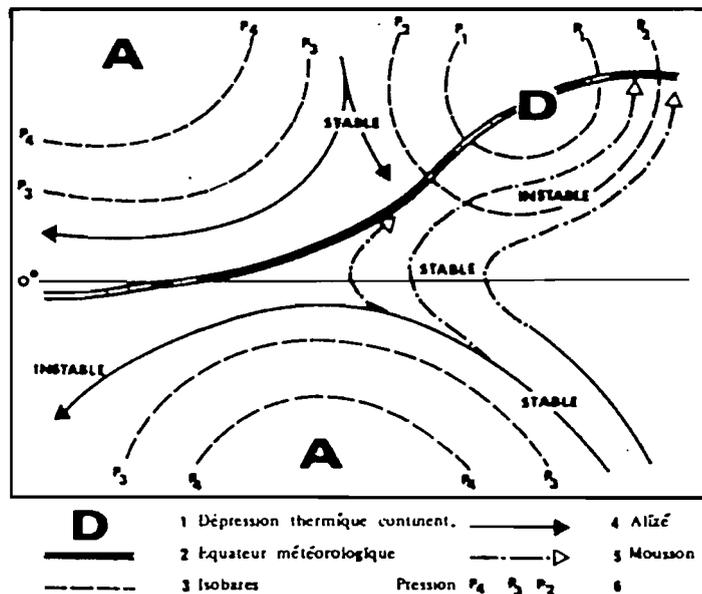
figure 1 :
Structure verticale schématique de la troposphère tropicale.
(d'après Leroux, 1993)



L'ensemble du système se déplace dans les basses couches suivant le mouvement de l'équateur thermique. "C'est ce déplacement de l'équateur météorologique de part et d'autre de l'équateur géographique qui est principalement à l'origine des deux circulations spécifiques de la zone intertropicale : la circulation d'alizé et la circulation de mousson" (Leroux, 1975).

Comme l'indique la figure 2, les alizés sont dans le cas de l'Afrique de l'ouest des flux boréaux stables, tandis que la mousson est un flux d'origine australe dévié, qui devient instable lors du maximum de déviation vers l'est, et source de formations nuageuses et de pluies.

figure 2 :
La circulation intertropicale : alizé et mousson.
(d'après Leroux, 1975)



Les caractéristiques climatiques de l'Afrique de l'ouest, et notamment les précipitations, découlent donc directement du mouvement de l'Equateur Météorologique Incliné (E.M.I.), anciennement appelé Front Inter-Tropical (F.I.T.) et des flux d'alizé et de mousson qui y sont liés. Mais d'autres conditions favorables conditionnent l'apparition de la pluie.

1 - 1.2. Des conditions de pluviogenèse restrictives.

Trois facteurs essentiels doivent être réunis pour qu'il y ait pluie :

- la présence d'un potentiel précipitable qui, sur l'Afrique de l'ouest, provient principalement de l'Atlantique par la mousson,
- l'action d'un facteur déclenchant qui provoque l'ascendance indispensable à la pluviogenèse -relief par exemple, rôle joué par le Fouta Djallon pour l'Afrique occidentale-,
- et surtout la présence d'une structure aérologique favorable aux ascendances.

Trois situations différentes sont ainsi offertes à la pluviogenèse de l'Afrique de l'ouest.

La structure la plus septentrionale de l'Equateur Météorologique, l'E.M.I., est stérilisante à cause des discontinuités brutales d'humidité entre la mousson et l'harmattan qui la surmonte, d'où un fort potentiel précipitable non exploité et des précipitations faibles. Parfois le passage d'est en ouest de lignes de grains, associé à des situations conflictuelles passagères, donne naissance à des pluies brèves, violentes, orageuses mais peu abondantes.

La structure "centrale" de l'équateur météorologique, jusqu'alors appelée Z.I.C. (Zone Intertropicale de Convergence), et récemment redéfinie sous le concept d'E.M.V. (Equateur Météorologique Vertical), est l'axe de confluence entre la strate supérieure de l'alizé austral et l'alizé boréal, au-dessus de la mousson (Leroux, 1993). Les formations nuageuses y sont denses et les pluies abondantes, continues, peu orageuses mais avec des foyers d'activité plus intense.

Au sud de l'E.M.V., on rencontre la structure habituelle de l'alizé, caractérisée par sa stratification rigoureuse et stérilisante, d'où l'absence de pluie.

La figure 3 (page 7) révèle ces trois structures pour le mois d'août, avec les types de pluies qui les caractérisent :

- pluies rares, orageuses, brèves, peu abondantes de la structure E.M.I. (12° à 17° N),
- pluies abondantes, plus continues de la structure E.M.V. (8° à 12° N),
- absence de pluies de la structure habituelle de l'alizé austral (5° à 8° N).

Le déplacement de l'ensemble de la structure sur l'Afrique de l'ouest et les caractéristiques des précipitations qui y sont liées contribuent à établir une gradation sud-nord de zones de moins en moins arrosées. Des domaines climatiques particuliers se distinguent ainsi.

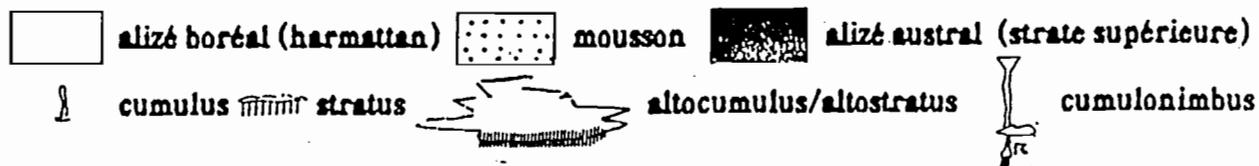
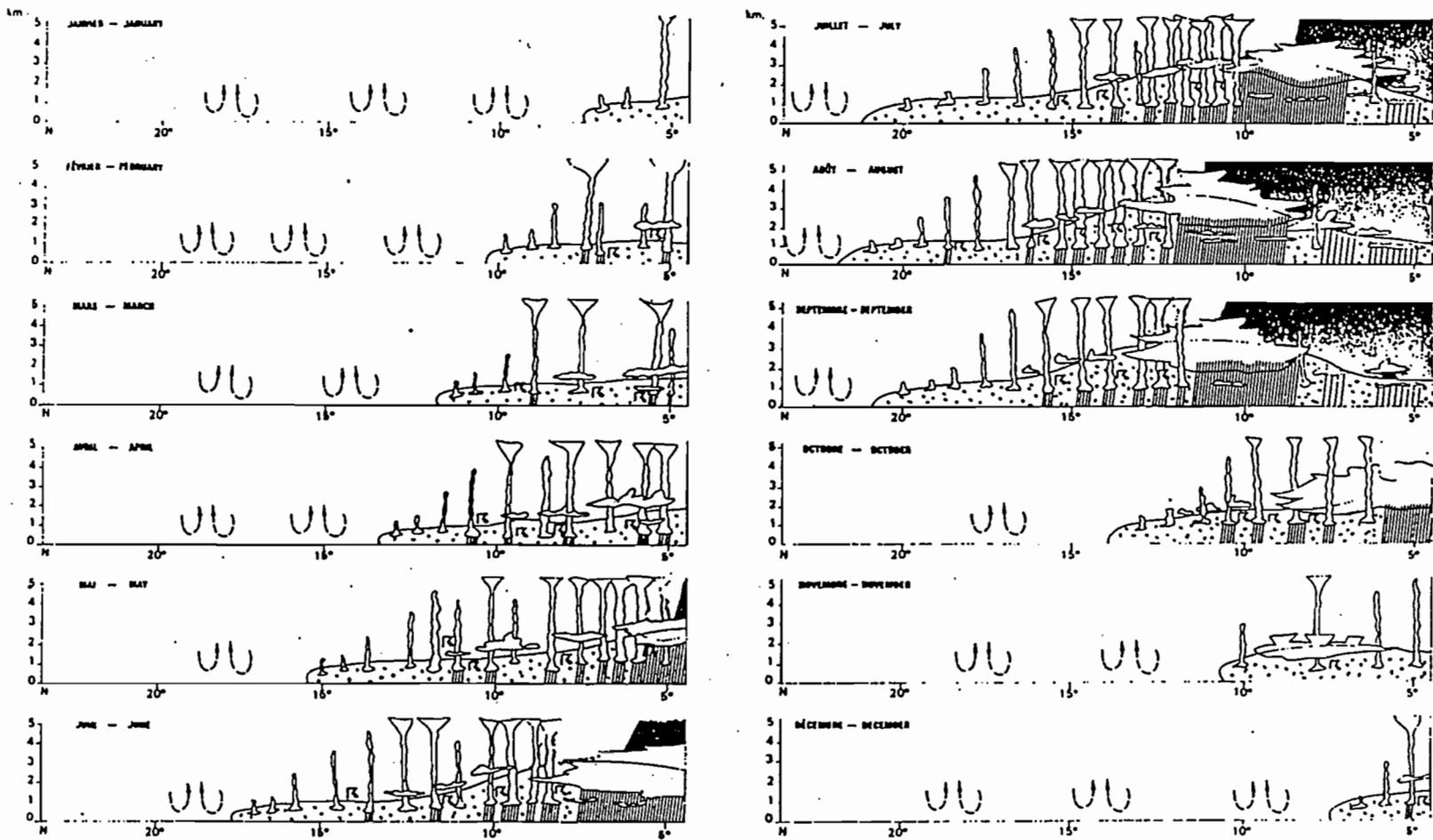


figure 3 :
 coupes schématiques mensuelles dans les basses couches
 au voisinage du méridien 0°
 (d'après Leroux, 1978)

I - 1.3. La zonation climatique.

La carte 1, établie à partir de la carte 2 (pages 9 et 10), permet de fractionner l'espace climatique ouest africain en 5 grands domaines principaux, en relation avec la pluviométrie annuelle moyenne.

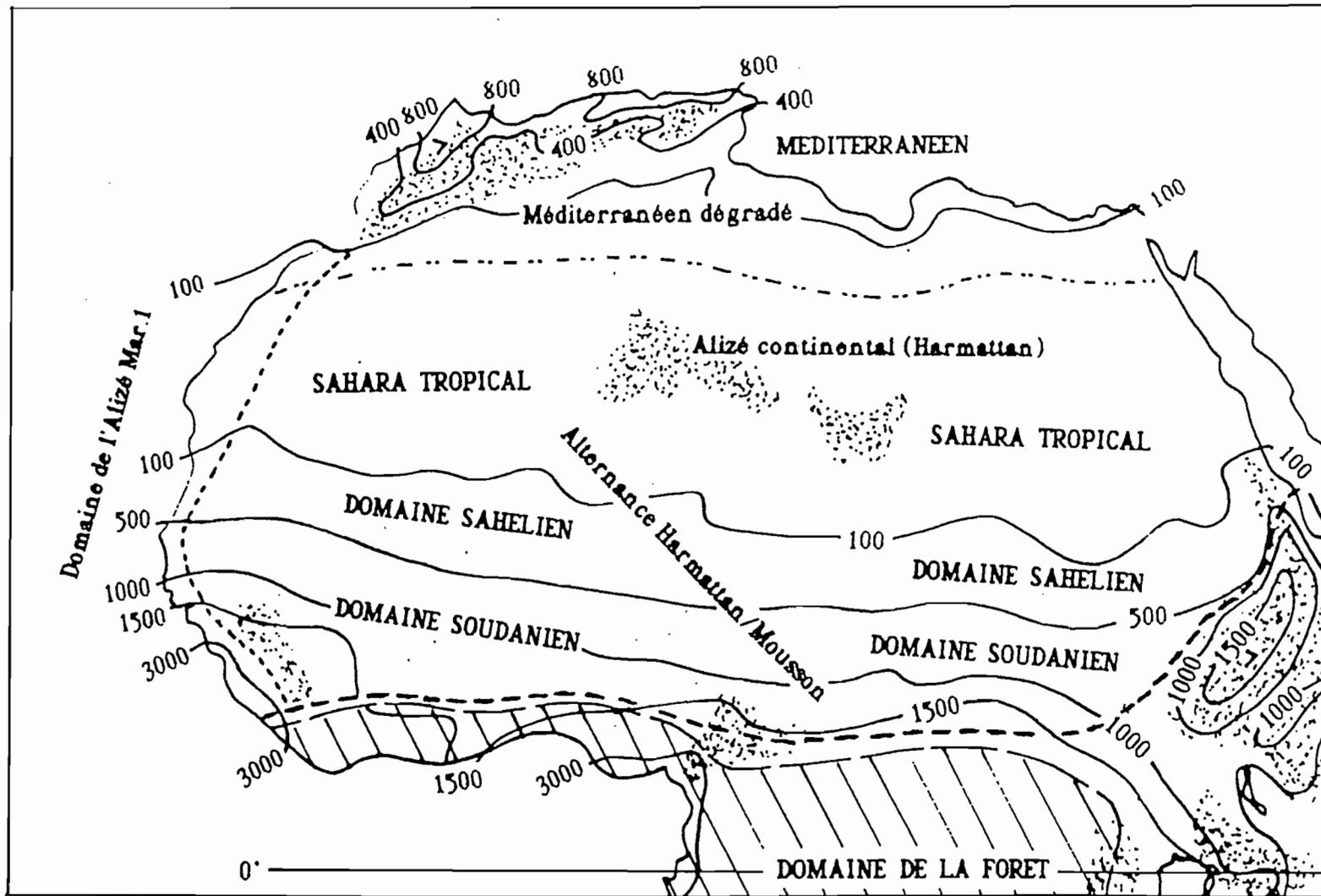
Le tableau 1 nous montre que cette structuration est beaucoup moins évidente pour l'évaporation. Ce paramètre est cependant le plus difficile à mesurer car il est fortement lié aux particularités locales : altitude, vents, humidité de l'air, turbulences artificielles, ...

tableau 1 :
Quelques valeurs mensuelles d'évaporation des régions sud-sahariennes d'Afrique de l'ouest (en mm).
 (d'après Griffiths, 1972)

	Tamanrasset 22°42 N 05°31 O 1 400 m.	Dakar 14°44 N 17°30 O 23 m.	Tambacounda 13°46 N 13°38 O 55 m.	Ouagadougou 12°22 N 01°31 O 300 m.	Niamey 13°30 N 02°07 E 220 m.	Enugu 06°28 N 07°33 E 140 m.	Abéché 13°51 N 20°51 E 550 m.
Jan.	227	142	125	141	161	201	141
Fev.	257	134	133	149	167	206	152
Mars	336	155	172	189	207	259	189
Avr.	382	173	176	192	209	236	206
Mai	447	166	193	188	219	212	203
Jui.	443	169	146	148	203	230	175
Juit.	476	159	114	133	156	175	152
Août	454	141	106	112	131	177	119
Sept.	366	142	106	119	137	152	138
Oct.	284	149	119	148	171	154	164
Nov.	200	149	112	133	158	175	156
Dec.	196	151	114	131	143	177	132
Année	4068	1827	1615	1783	2057	2352	1926

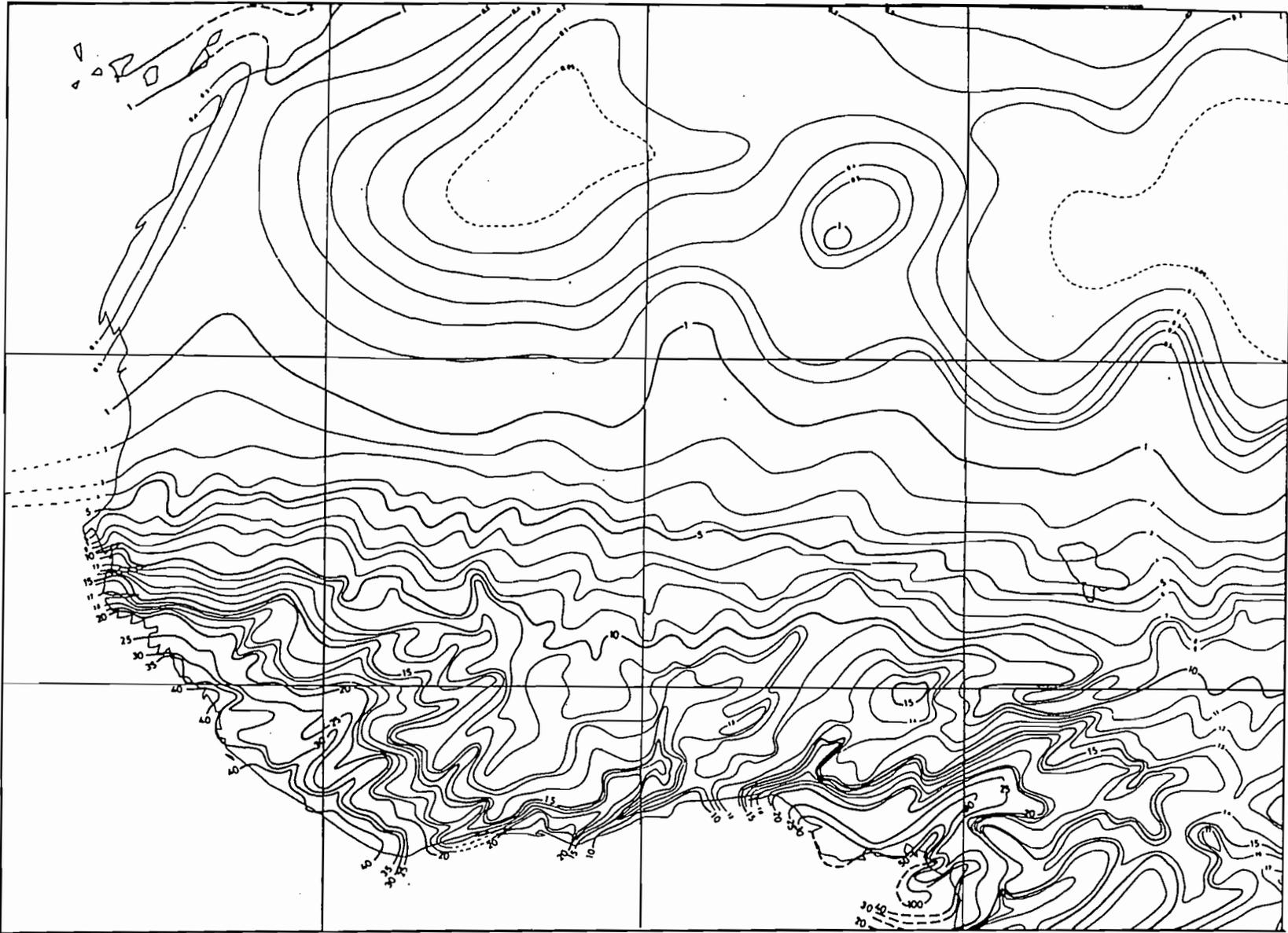
Pour cette raison nous avons volontairement choisi des exemples dans toutes les situations possibles. Quels que soient les cas, les valeurs sont extrêmement fortes, le maximum étant atteint au centre du désert du Sahara, à Tamanrasset, où les quantités évaporées annuellement sont supérieures à 4 mètres. On remarque que la station littorale de Dakar présente une moyenne annuelle identique aux stations plus continentales de même latitude. Le phénomène d'aridité touche donc toutes les zones, sans épargner la bordure atlantique ; maîtriser l'eau est nécessaire en tous lieux de ces régions.

Le climat conditionne donc directement la vie végétale, animale et par extension humaine des espaces considérés. A l'échelle régionale on apprécie donc l'aridité par des indices climatiques qui se réfèrent uniquement aux précipitations, aux températures et à l'évaporation. A un niveau plus local on définit une aridité dite édaphique qui prend en compte le facteur sol et qui caractérise les quantités d'eau disponibles pour les êtres vivants, après redistribution des précipitations par la topographie et par le sol.



carte 1 :
 les principaux traits climatiques de l'Afrique de l'ouest.
 (d'après Leroux, 1983)

- Isohyète moyenne annuelle (mm)
- — — Limite Nord des régimes pluviométriques bimodaux (à 2 saisons des pluies)
- · · · · Discontinuité d'Alizés : limite Est du domaine de l'alizé maritime de type 1 (littoral W)
- · · · · Climat influencé par l'altitude



carte 2 :
précipitations moyennes annuelles sur l'Afrique de l'ouest.
(d'après Leroux, 1983)

Bien que les auteurs ne soient pas tous d'accord sur la terminologie, il est ainsi possible de faire correspondre à une zone climatique une dénomination particulière et une typologie de la végétation et de l'occupation des sols présentées dans le tableau 2.

tableau 2 :
Zonation climatique de l'Afrique de l'ouest,
occupation du sol par les végétaux et l'homme.
(d'après Le Houérou, 1979)

LATITUDE (nord)	ZONE CLIMATIQUE	PLUVIOSITE	VEGETATION	OCCUPATION DU SOL
> 15°	DESERTIQUE	P < 100	Contractée	nomadisme pastoral
12° < < 15°	ARIDE TROPICALE	100 < P < 400	Diffuse : épineux et herbacées annuelles	nomadisme pastoral pâturage extensif, cultures épisodiques de bas-fonds
8° < < 12°	SEMI-ARIDE TROPICALE	400 < P < 600	savane	pâturages et cultures pluviales : mil, arachides
< 8°	SUB-HUMIDE	600 < P < 1200	savané et forêt soudaniennes	forêts, pâturages, coton, sorgho, arachides

Dans le cadre de cette étude sur les aménagements hydrauliques, l'intérêt est limité aux régions à la fois sujettes à l'aridité et habitées par l'homme. Nous laisserons désormais de côté la partie méditerranéenne et son climat particulier, le domaine saharien très difficile et peu fréquenté, le domaine de la forêt tropicale qui ne connaît pas à proprement parler de problèmes de manque d'eau, mais plutôt des difficultés de maîtrise de la gestion et de l'exploitation de cette ressource ; ce sujet pouvant faire à lui seul l'objet d'une étude particulière.

Au caractère d'aridité des zones sahéennes s'ajoute un facteur qui aggrave les conditions de vie déjà difficiles : la sécheresse.

1 - 2. Une variable : la durée et l'intensité des sécheresses.

Les domaines sahéien et nord-soudanien (au nord de 12° N, c'est à dire au nord de la position extrême de l'E.M.V.) ne connaissent que les pluies estivales provenant des lignes de grains de la structure E.M.I.. Le rythme pluviométrique est unimodal avec un maximum en août (voir carte 1). Le total annuel ne dépasse pas 500 mm dans le Sahel et 1000 mm dans le domaine nord-soudanien. Les données de Tessalit et Niamey, présentées dans le tableau 3, témoignent de la longueur de la saison sèche et de la faible pluviométrie annuelle.

tableau 3 :
Température, pluviométrie et humidité relative de quelques stations
d'Afrique de l'Ouest.
(d'après Guiraud et al., 1990)

Tessalit (20°N)	janv	fév	mar.	avr.	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	an.
température (°C)	20,1	22,6	25,9	29,5	33,1	33,5	34,5	33,1	32,9	30,9	25,9	20,4	28,7
pluviométrie (mm)	1	0	1	0	2	7	23	55	27	1	1	0	110
humidité relative (%)	21	17	17	15	17	22	30	38	31	20	21	22	23
Namey (14°N)	janv	fév	mar.	avr.	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	an.
température (°C)	24,7	27,1	31	33,6	33,4	30,9	28,3	26,8	28	30,1	28,1	24,7	28,9
pluviométrie (mm)	0	0	1	3	46	79	181	206	101	21	0	0	638
humidité relative (%)	22	17	18	26	42	55	68	77	72	54	33	26	43
Bobo-dioulasso (11°N)	janv	fév	mar.	avr.	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	an.
température (°C)	25,1	27,3	29,6	30,3	28,6	26,9	25,5	25	25,4	26,9	26,9	25	26,9
pluviométrie (mm)	1	3	20	47	116	132	229	336	211	75	13	2	1185
humidité relative (%)	28	29	36	50	64	73	78	82	80	71	55	36	57

Vers le sud, la saison des pluies devient de plus en plus longue et la moyenne annuelle augmente : le caractère d'aridité s'atténue progressivement dans le domaine soudanien avec l'apparition de la structure E.M.V. et ses pluies orageuses, comme en témoignent les données de Bobo-Dioulasso.

Ces caractéristiques générales qui permettent de différencier des secteurs du sud au nord cachent cependant de fortes variations spatiales et temporelles de la pluviométrie.

1 - 2.1. L'inégale répartition au sol de la pluviométrie.

Le phénomène se traduit sur le terrain par des inégalités de répartition du couvert végétal facilement décelables. Par contre, l'obtention de données chiffrées reste difficile du fait de l'espacement des stations météorologiques. Des études précises menées par des hydrogéologues de l'ORSTOM permettent de se faire une idée des écarts pluviométriques sur de faibles distances. Un exemple peut être donné à partir du tableau 4 ci-dessous, établi par Carré en 1974.

tableau 4 :
Illustration de la variation spatiale de la pluviométrie.
(d'après Carré, 1974 ; in UNESCO, 1983)

STATIONS	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
P1 (mm)	0,0	0,5	32,5	80,4	0,2	113,6
P2 (mm)	0,0	4,2	31,2	45,8	0,2	81,4
P3 (mm)	0,0	2,3	25,0	91,5	0,0	118,8
Agadez (mm)	0,0	10,8	39,4	17,9	0,1	*75,3

* : dont 8,1 mm en avril.

5 km environ séparent le premier pluviomètre, P1, de P2 et P2 de P3, 10 km séparent P1 de P3 et 30 km séparent Agadez du pluviomètre le plus proche. On peut noter la différence considérable entre P2 et P3 au mois d'août. Le passage d'un orage conditionne donc fortement la répartition de la pluviométrie d'une région et peut représenter, comme

c'est ici le cas, une part essentielle du total annuel. En aucun lieu il n'est donc possible d'être assuré d'une ressource minimale car la répartition pluviométrique est beaucoup trop aléatoire. Cette irrégularité de la ressource pluviale est vérifiée non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.

I - 2.2. La succession de périodes "sèches" et "humides".

Pour connaître l'ensemble de la variabilité des phénomènes pluviométriques, il convient d'analyser les données chiffrées de la période dite "instrumentale".

Bien qu'il n'existe que peu de stations pour apprécier la pluviométrie depuis le début du siècle, différents chercheurs ont pu établir des indices annuels afin d'évaluer commodément les variations des précipitations. On note ainsi sur la figure 4 (page 14):

- une période sèche (1910-1916), sévère et étendue,
- une période humide (1920-1935),
- une période sèche (1940-1949), mais qui se présente sous forme d'années déficitaires groupées n'affectant pas tout le Sahel,
- une période humide (1950-1965),
- une période sèche (1968 à nos jours) la plus intense des trois de ce siècle où les isohyètes inter-annuelles descendent vers le sud de plusieurs centaines de kilomètres, et où les déficits moyens sont de 20 à 30 %.

Un rapport de l'OMM⁹ précise que cette dernière sécheresse a été généralisée et que "rien n'indique que cette tendance soit sur le point de s'inverser" (OMM, 1983).

I - 3. Des conditions de vie imposées par le climat.

L'Afrique de l'ouest doit ses particularités climatiques au système de circulation atmosphérique original qui balaie sa surface.

La carte 3 (page 15) montre qu'en Afrique de l'ouest l'année est divisée en deux saisons de durée variable selon la latitude. La période sèche est caractérisée par sa pluviométrie nulle et de fortes valeurs d'évaporation. La saison des pluies se compose quant à elle d'une succession d'épisodes pluviométriques parfois très espacés. Les exemples de nombres de jours de pluie de l'année 1987, répertoriés dans le tableau 5, témoignent de la rareté des averses. J.B. Djong assure que cette année 1987 est pourtant la plus pluvieuse des trois qu'il a étudiées : 1985, 1986 et 1987 (Djong, 1991).

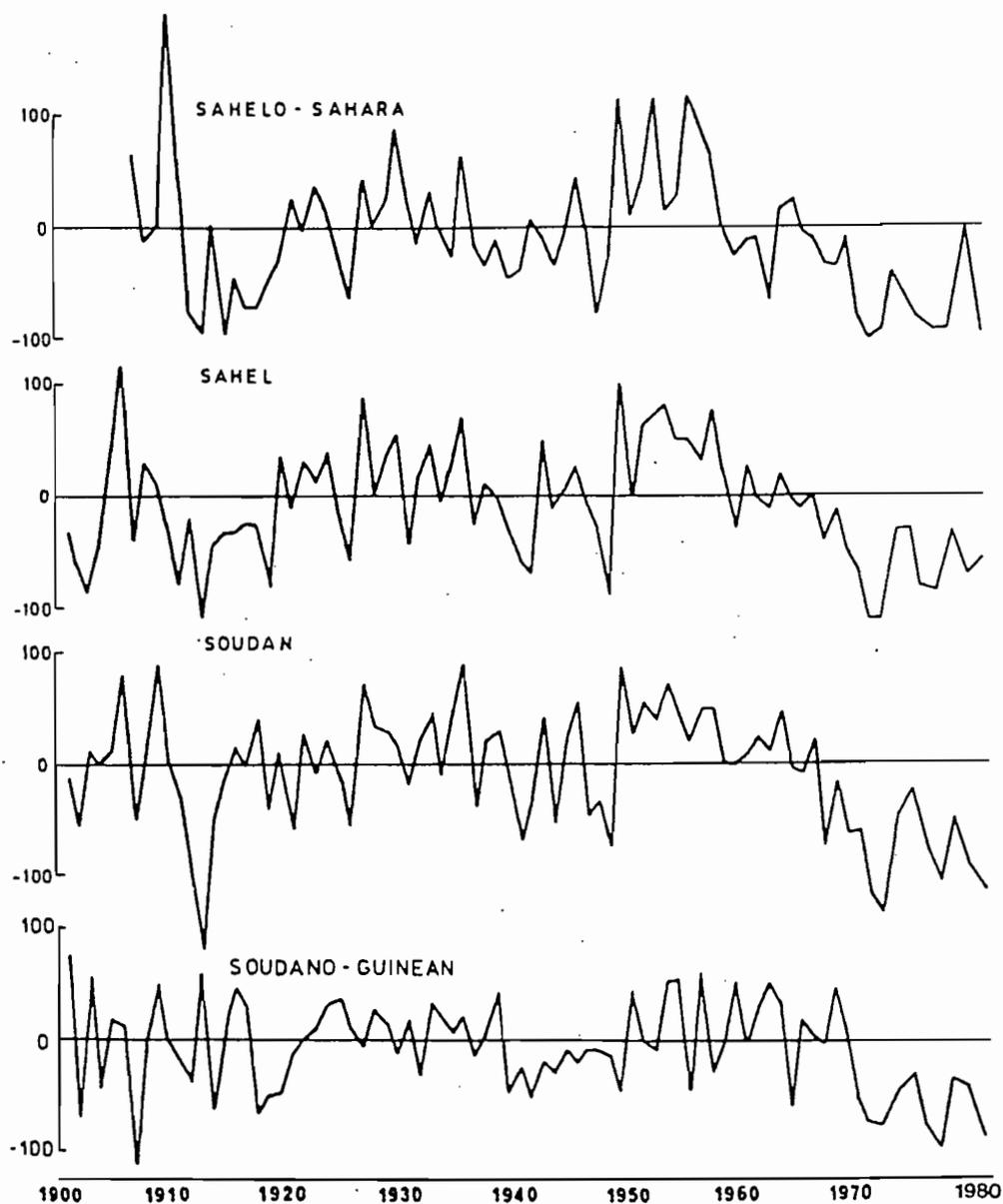
tableau 5 :
Nombres de jours de pluie en 1987 à Nouakchott, Kaédi et Kédougou.
(d'après Ndong J.B., 1991)

	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre
Nouakchott (18°N)	-	Traces *	Traces	3	3	1
Kaédi (16°N)	-	2	5	5	7	2
Kédougou (12°N)	7	10	19	17	16	9

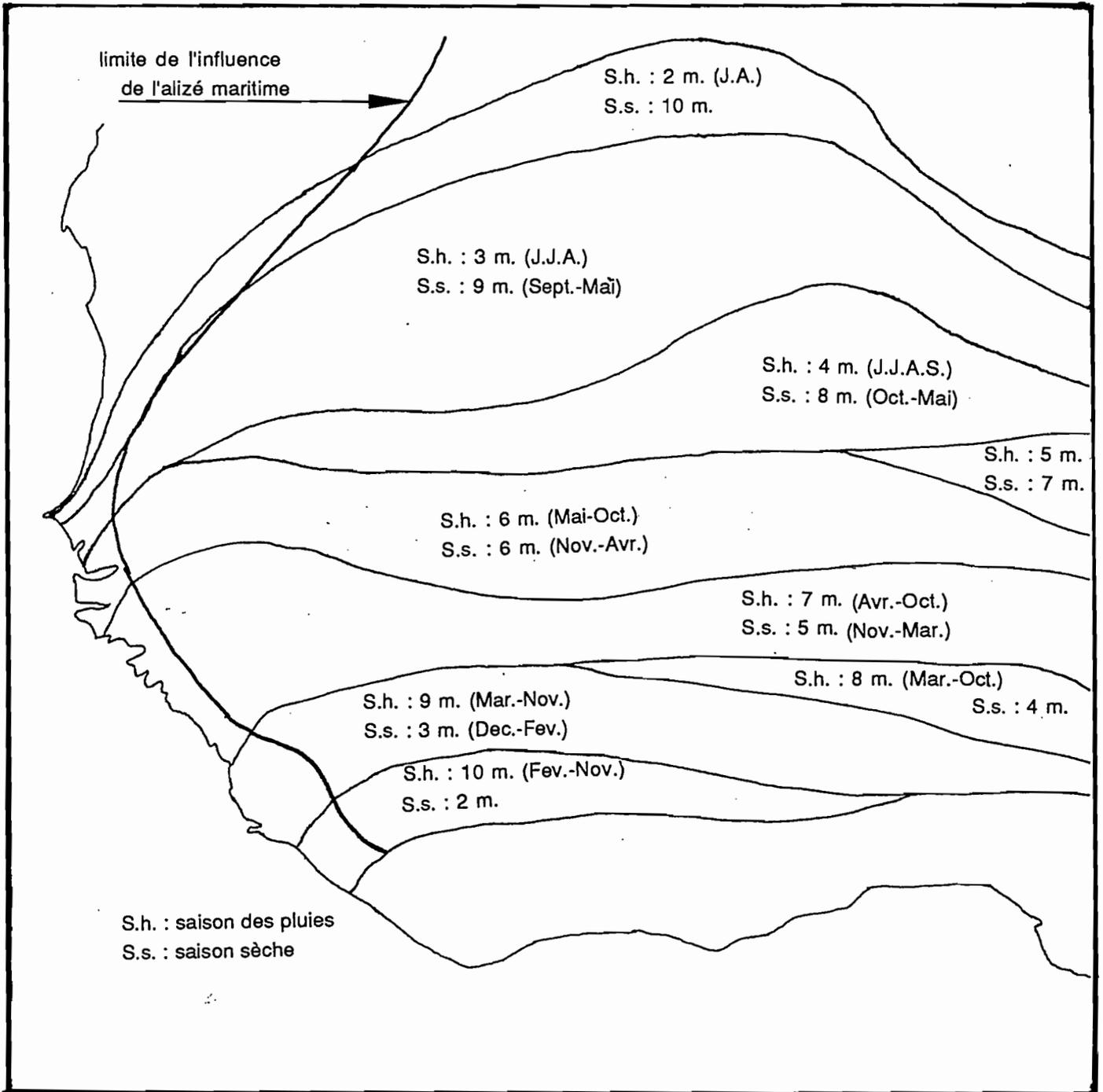
* : traces : pluies non mesurables, inférieures à 1/10 mm.

⁹ Organisation Mondiale de la Météorologie.

figure 4 :
Evolution de la pluviométrie depuis le début du siècle
au sud du Sahara d'Afrique occidentale.
(exprimée en écarts normalisés)
(d'après Nicholson, 1982 ; in OMM, 1983)



carte 3 :
 durée de la saison des pluies et de la saison sèche
 en Afrique de l'ouest,
 (d'après Leroux, 1983)



L'eau apportée au cours de cette saison est à l'origine d'une zonation de l'Afrique occidentale en bandes parallèles à l'équateur géographique, où la tendance à l'aridité va en s'accroissant vers le nord. Il est ainsi possible de délimiter des régions qualifiées d'arides et semi-arides : le Sahel et le domaine nord-soudanien.

Depuis un quart de siècle, vient s'ajouter à ce facteur habituel une sécheresse généralisée dont la fin est imprévisible.

L'homme doit donc faire face à une situation extrêmement difficile où l'eau est rare et son apparition très variable. Le climat et ses fantaisies conditionnent, avant toute chose, la présence de la vie en tout lieu. Plus on s'éloigne de l'équateur, plus on avance dans la saison sèche, plus longtemps dure la sécheresse, plus aléatoire et ardue devient la quête de l'eau.

Même au cours de la saison humide, durant laquelle plusieurs semaines peuvent s'écouler sans une averse, la pluie peut devenir un facteur limitant de l'agriculture.

Un des premiers enjeux des petits aménagements d'hydraulique rurale serait de sécuriser les paysans vis à vis de ces risques, en créant une ressource tampon, de jointure entre deux pluies, ou de "prolongement" de la saison des pluies jusqu'à la maturité des plantations.

L'eau météorique constitue en soi un élément difficile à gérer, à cause de son caractère imprévisible. Dans la grande majorité des cas la maîtrise de l'eau ne peut s'effectuer que sur le sol. C'est pourquoi nous devons traiter maintenant du devenir de l'eau de pluie sur le terrain et des réserves potentielles qu'elle représente. Nous commencerons cette présentation en débutant par les éléments les plus directement liés au climat et aux précipitations : l'hydrologie et l'hydrogéologie.

II - UNE RESSOURCE EN EAU LIMITEE MAIS EXPLOITABLE.

II - 1. Un écoulement de surface localisé.

Les mares, les cours d'eau et les lacs constituent l'ensemble de la ressource en eau de surface.

II - 1.1. L'endoréisme.

L'écoulement endoréique se manifeste par des cours d'eau temporaires, les oueds, qui terminent leur course dans des dépressions continentales appelées mares, bien que quelques fois très vastes.

Les oueds ne coulent qu'en saison des pluies. Les mares subissent en saison sèche une évaporation qui peut conduire à l'assèchement. L'endoréisme est de plus très limité dans l'espace et ne peut donc faire l'objet d'une étude globale.

L'eau apportée par les oueds en saison humide, et stockée dans les mares durant la même période et pendant une partie de la saison sèche, peut cependant être localement très précieuse dans les zones privées de ressource en eau pérenne.

II - 1.2. Les grands fleuves exogènes avec leurs affluents.

Comme le montre la carte 4 (page 18), le réseau hydrographique est marqué par la zonalité climatique de l'Afrique de l'ouest. On remarque que les zones arides, au nord de 12°N de latitude, se situent à la limite septentrionale de nombreux bassins versants qui s'écoulent vers le Golfe de Guinée.

Les rivières sahéliennes sont peu nombreuses et les grands fleuves exogènes - Sénégal, Niger, Logone-Chari- représentent environ la moitié des disponibilités en eau des régions sahéliennes.

Les mesures plus ou moins régulières sur les cours d'eau et les lacs permettent de caractériser leur comportement vis à vis du climat, et ainsi la ressource qu'ils sont susceptibles de fournir.

a) *Les cours d'eau.*

D'après J. Sircoulon les grands fleuves tropicaux "*présentent des fluctuations inter-annuelles bien marquées qui reflètent bien les variations climatiques que connaît cette vaste région*" (Sircoulon, 1989, p. 35).

La figure 5 (page 19), établie à partir d'observations de ce même auteur, fait apparaître qu'en ce qui concerne les cours d'eau sahéliens, les contrastes années humides - années sèches sont nettement moins évidents que dans le cas des cours tropicaux.

b) *Les grands ensembles lacustres :*

Au Mali, la cuvette du fleuve Niger, représentée par la figure 6 (page 20), s'étend sur 60 000 km². Cette cuvette est composée d'un ensemble de petits lacs inondables par le Niger.

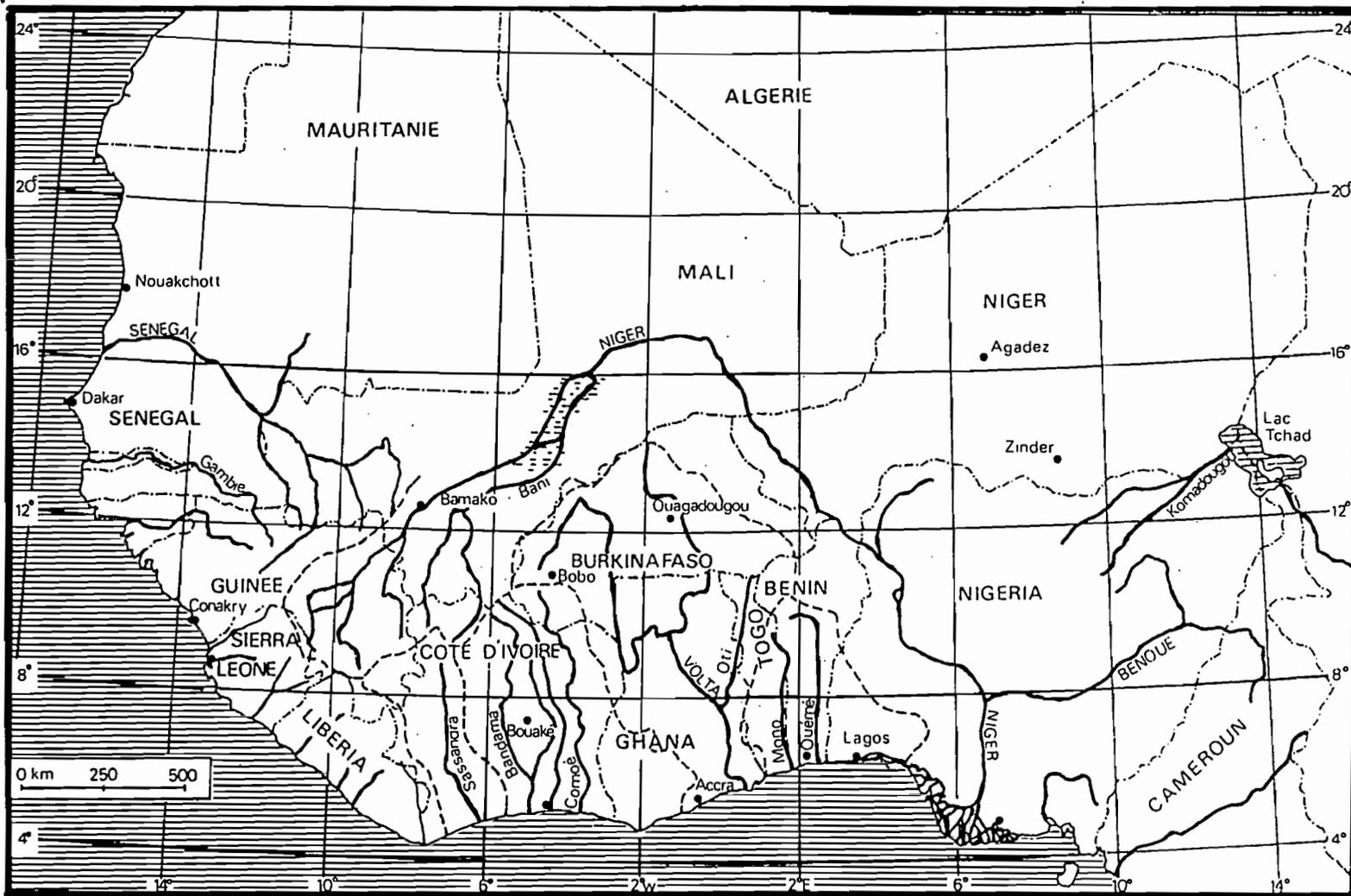
Le lac Tchad connaît quant à lui des oscillations de niveau considérables et sa surface varie entre 10 000 et 25 000 km² suivant les apports du Logone-Chari, fournisseur à 80 % des apports annuels. Suivant la superficie, on peut distinguer sur la figure 7 (page 21) le "grand-Tchad", le "moyen-Tchad" et le "petit-Tchad".

La figure 8 (page 22) témoigne bien de la correspondance entre la pluviométrie et le niveau du lac Tchad ; le minimum de juillet et le maximum de décembre-janvier résultant de l'équilibre entre les apports et les pertes par évaporation et infiltration.

La sécheresse qui sévit depuis vingt cinq ans n'a fait, dans la plupart des cas, qu'aggraver le déficit d'écoulement. Les apports du Chari étant déficitaires chaque année, le niveau du lac Tchad baisse progressivement depuis 1965, le résultat frappant étant représenté sur la figure 9 (page 23).

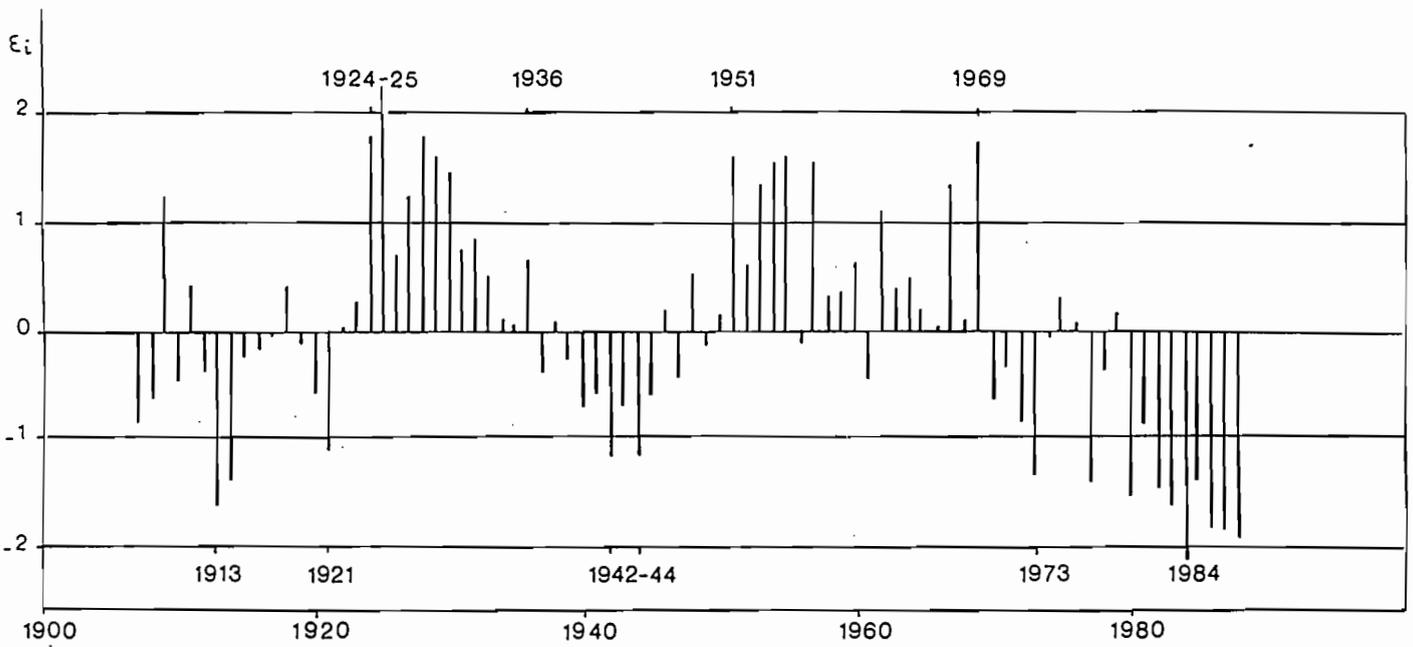
Les cours d'eau sahéliens réagissent eux différemment suivant leur taille. Les coefficients d'écoulement et les écoulements ont diminué pour les bassins de superficie supérieure à 10 ou 20 000 km². Par contre, pour les bassins plus petits, la tendance est inverse. La diminution des pluies est compensée par une augmentation très sensible des coefficients de ruissellement. Ceci est dû à la diminution du couvert herbacé et à l'extension des zones cultivées, tassées et érodées, liées à l'action conjuguée du climat et de l'homme.

Notons toutefois que, sous l'effet combiné de l'évaporation et de l'infiltration, les plus petits bassins n'alimentent même plus ce qui était anciennement des cours d'eau temporaires, qui aujourd'hui restent secs toute l'année (Sircoulon, 1989).



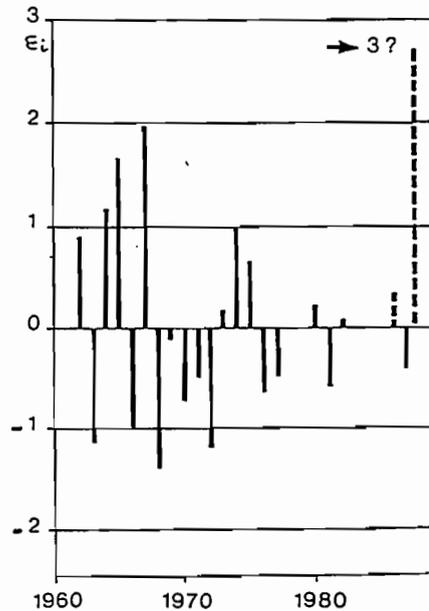
----- Limites des principaux bassins versants

carte 4 :
 le réseau hydrographique de l'Afrique de l'ouest.
 (d'après Biscaldi, 1967 ; in Guiraud et al., 1990)

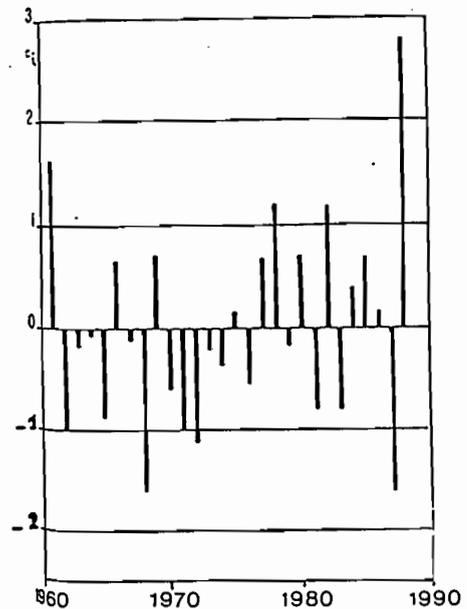


Le NIGER à KOULIKORO

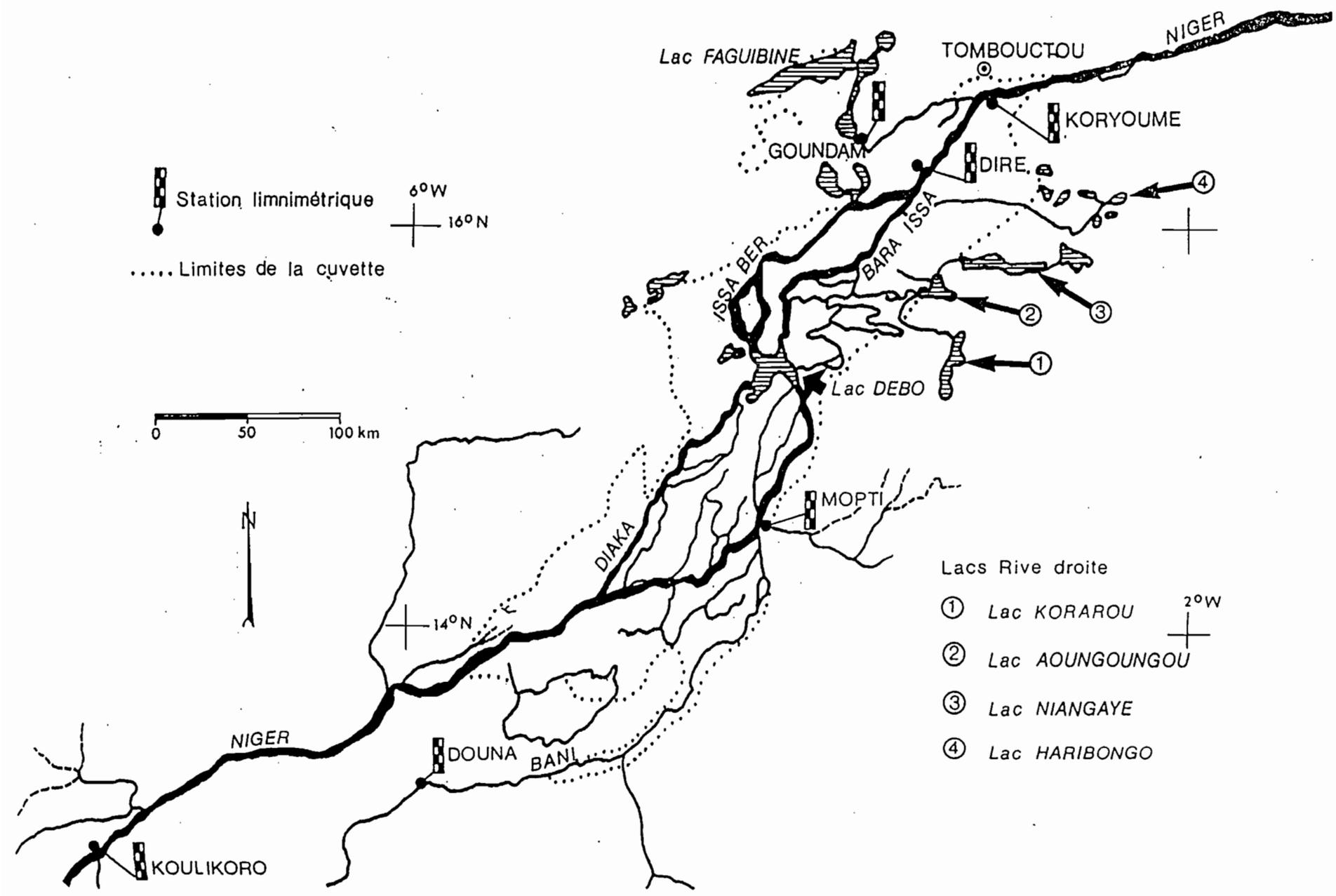
figure 5 :
 Comparaison des variations d'apports annuels entre
 deux cours d'eau sahéliens et le Niger à Koulikoro.
 (variations exprimées en écarts type réduit)
 (d'après Sircoulon, 1989)



Le SIRBA à GARBE-KOUROU



Le GOROUL à DOLBEL



 Station limnimétrique
 Limites de la cuvette

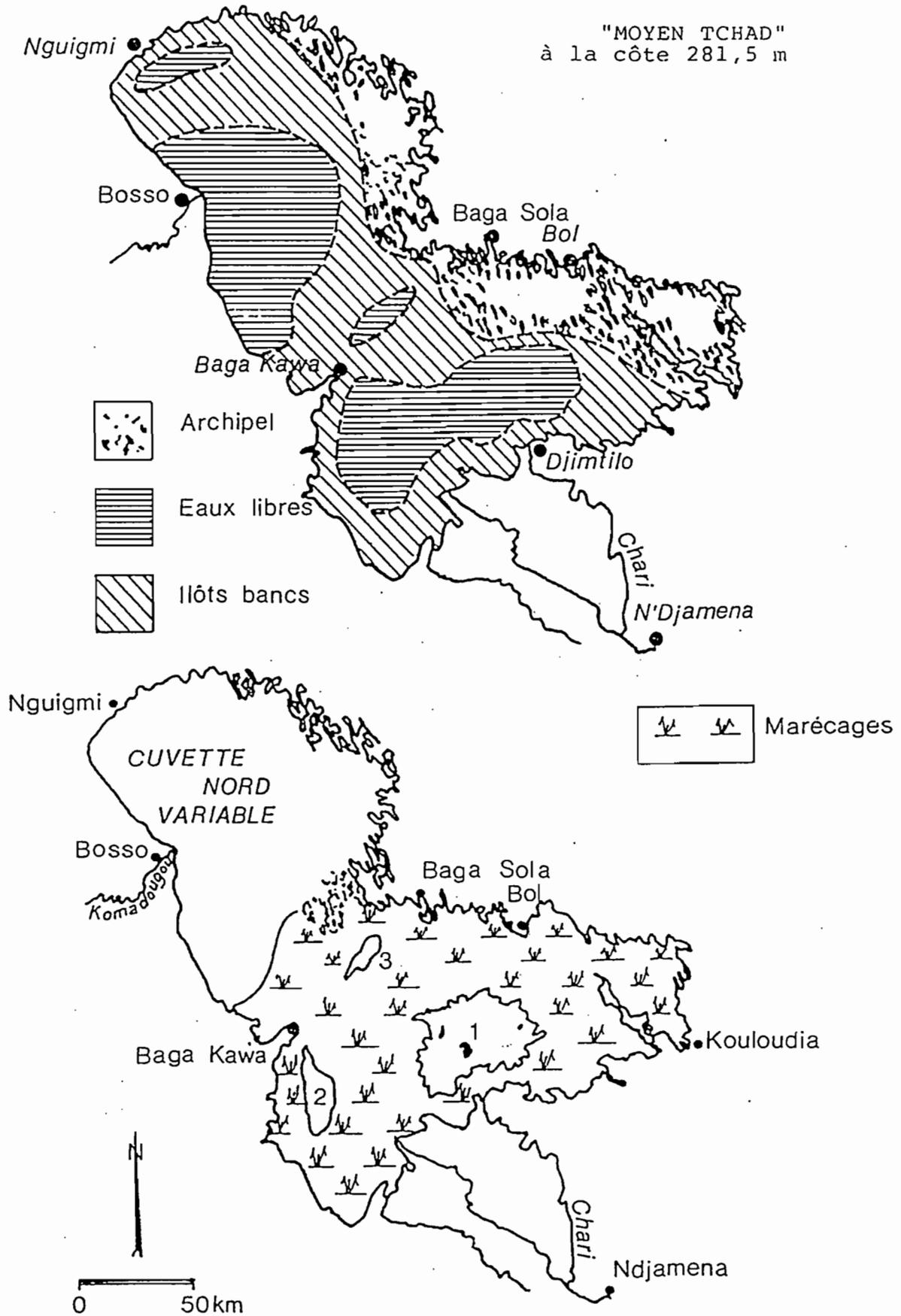
0 50 100 km



- Lacs Rive droite
- ① Lac KORAROU
 - ② Lac AOUNGOUNGOU
 - ③ Lac NIANGAYE
 - ④ Lac HARIBONGO

figure 6 :
 Cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali).
 (d'après Sircoulon, 1989)

figure 7 :
Différents aspects du lac Tchad suivant l'époque de l'année.
(d'après Sircoulon, 1989)



"Petit Tchad" (1 : Eaux libres du Sud-Est
2 : " " " Sud
3 : " " " Sud-Ouest)

figure 8 :
Variations interannuelles du niveau du lac Tchad de 1900 à 1978
(station de Bol, à partir de 1973 les hauteurs ne sont plus
représentatives de l'ensemble du lac).
(d'après Sircoulon, 1989)

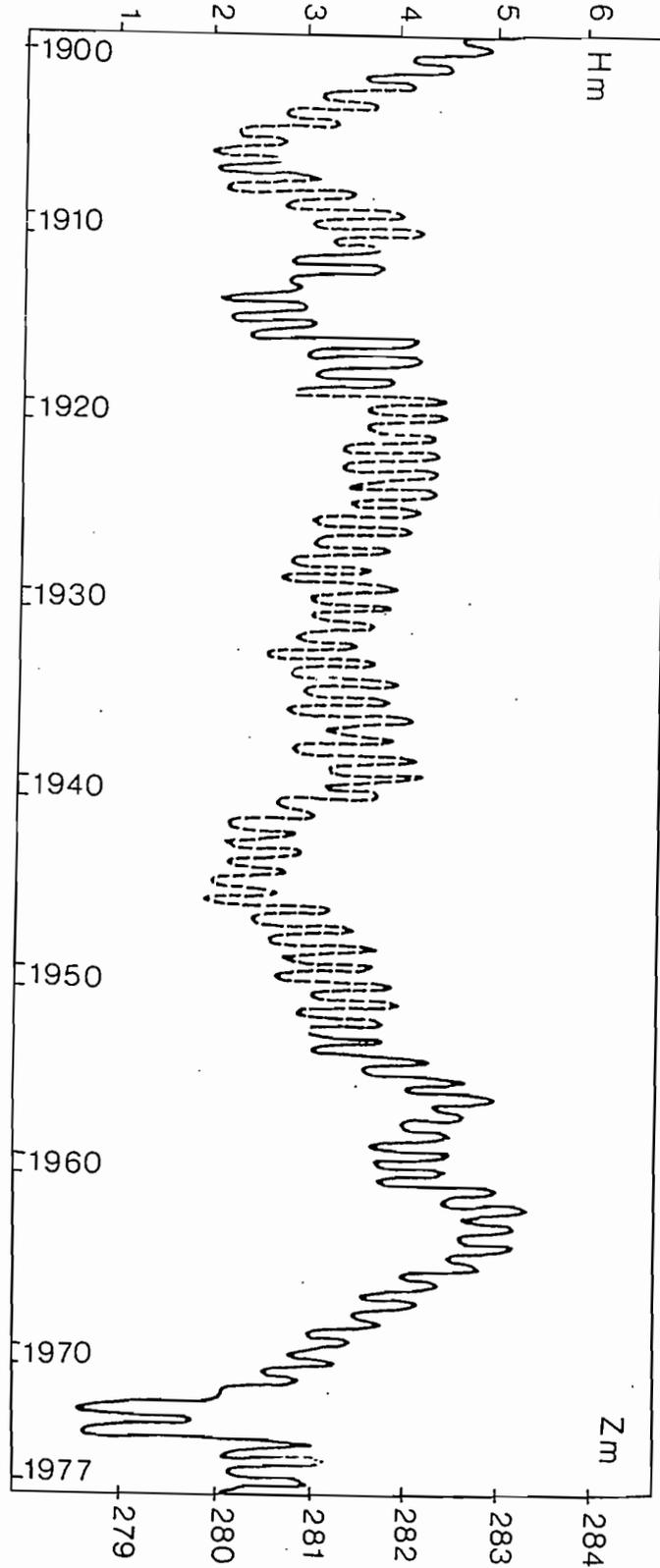
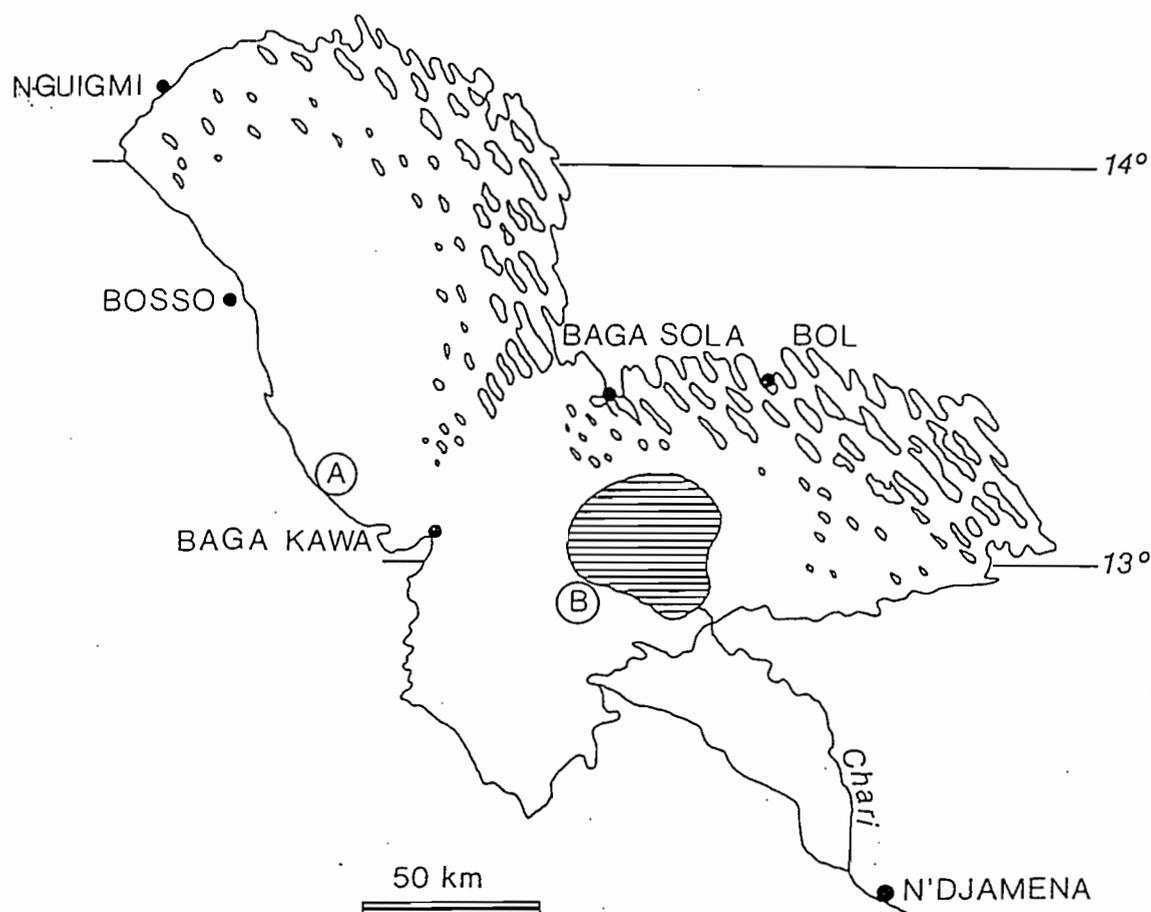


figure 9 :
le lac Tchad :
A : situation au début des années 1960.
B : situation des années 1985 en fin de saison sèche.
 (d'après Sircoulon, 1989)



A l'image de l'évolution de la pluviométrie, les ressources en eau superficielle s'estompent. Les sociétés rurales dont l'économie est entièrement tributaire des réactions des fleuves s'inquiètent de plus en plus des chutes brutales et trop rapides des niveaux, parfois responsables de la perte de toute une année de culture. Deux solutions leurs sont offertes : s'adapter à ces nouveautés ou rechercher une autre ressource, dans le sous-sol par exemple.

II - 2. Une ressource souterraine diffuse.

Les aquifères constituent une ressource bien moins visible mais non moins intéressante. Un aquifère est défini comme étant un milieu naturel saturé d'eau, reposant sur un substratum imperméable (ou de moindre perméabilité), limité à sa partie supérieure par un "toit" imperméable (nappe captive), ou bien par une surface libre (nappe libre). L'eau circule dans les fissures ou les fractures des roches compactes, ou dans les interstices des roches sédimentaires poreuses. La géologie et la tectonique conditionnent donc la présence de la ressource souterraine, son exploitabilité et ses qualités.

II - 2.1. Des réservoirs potentiels.

a) La géologie et la tectonique.

Le Sahel, parcouru d'ouest en est, est une succession de grands bassins et de régions de socles. La carte 5 (page 25) y révèle :

- le bassin sénégalo-mauritanien,
- les mauritanides,
- le bassin de Taoudenni,
- le sud du bouclier du Hoggar et le nord du bouclier éburnéen,
- le bassin des lullemeden ou bassin du Niger,
- le bassin du Tchad.

Les régions de socles peuvent elles-mêmes être granito-gneissiques et schisto-gréseuses. Les domaines granito-gneissiques doivent à leur extrême ancienneté une histoire tectonique riche. Les failles d'envergures variées, de la centaine de mètres à plusieurs kilomètres, jalonnent ces formations. Cette fracturation est complétée par une fissuration locale très marquée.

Les roches schisto-gréseuses d'origine précambrienne -de l'ordre du milliard d'années- marquent le début de la sédimentation. Ces terrains ont subi de nombreuses altérations et contraintes, ils ont été plus ou moins métamorphosés -gneiss, quartzites- et se sont trouvés mélangés à des roches volcaniques d'éruptions sous-marines. Cette longue histoire confère à ces roches un caractère très fracturé. Parfois, des filons de quartz tardifs, venus des profondeurs, cassent cette structure et ajoutent des nouvelles zones broyées. Des grès, très cimentés et pouvant couvrir plusieurs milliers de mètres de profondeur, représentent la majorité des formations sédimentaires du paléozoïque -primaire : entre 300 millions et 1 milliard d'années- qui peuvent être aussi des argiles plus ou moins schistosées et des calcaires. Ces sédiments fortement compactés ont subi l'action de la tectonique, s'ouvrant en zones de fractures et de fissures.

Les bassins sédimentaires récents -secondaire et tertiaire- contiennent des sédiments épais et variés -grès, sables, marnes, calcaires-, marins ou continentaux.

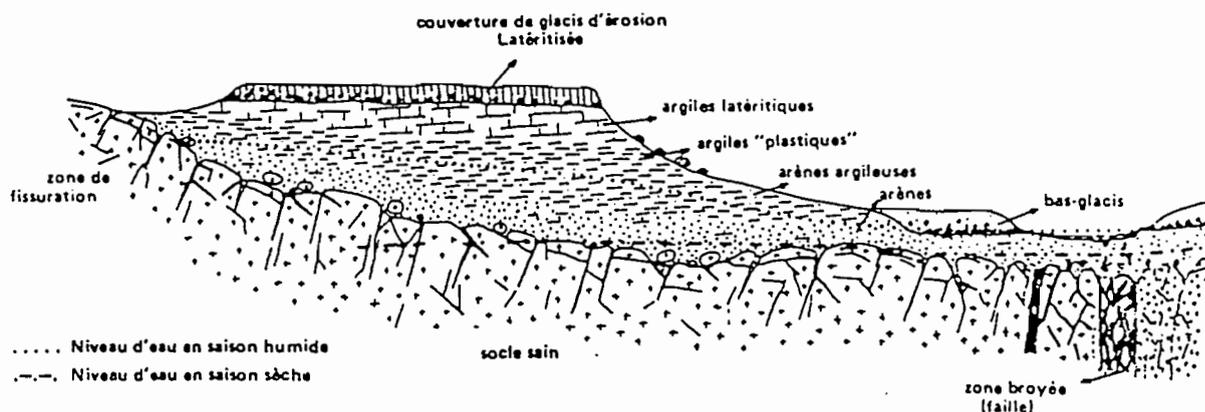
Toutes ces formations peuvent être cachées localement par des terrains récents d'origine continentale :

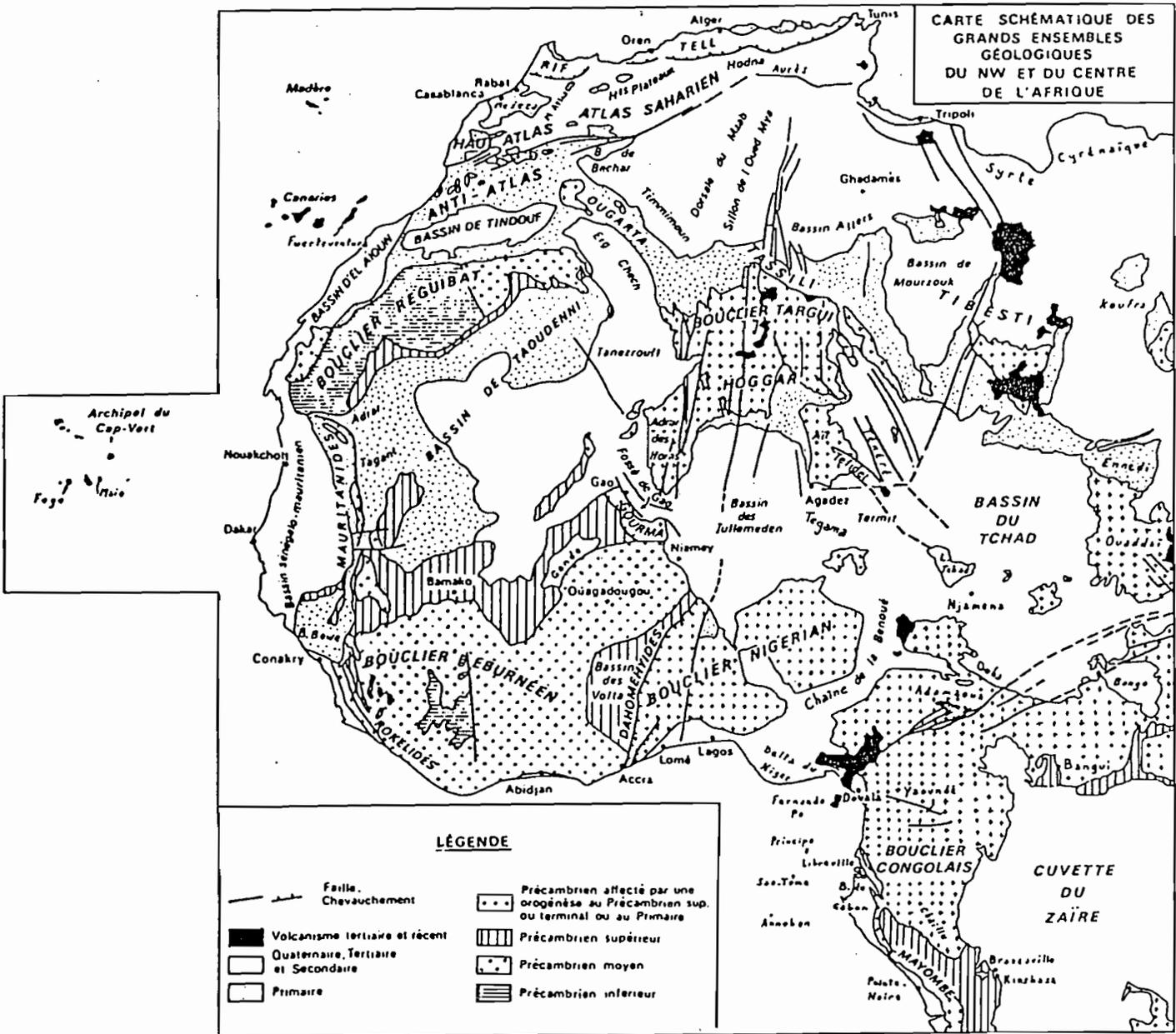
- des formations d'altérites provenant de la décomposition sous l'effet du climat des roches en place, arènes granitiques par exemple. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Sur la figure 10 nous remarquons que les cuirasses latéritiques, d'oxyde de fer ou d'alumines concrétionnées, couronnent souvent ces tranches altérées,
- Les alluvions des cours d'eau et bas-fonds et surtout les sables dunaires éoliens peuvent, au Sahel, couvrir d'immenses superficies.

figure 10 :

Coupe schématique des formations aquifères en région granitique.

(d'après Guiraud et al., 1990)





carte 5 :
 représentation schématique des grands ensembles géologiques
 de l'Afrique occidentale et centrale.
 (d'après Guiraud et al., 1990)

Cette histoire géologique explique à tous points de vue les vastes étendues du Sahel. Le socle pénéplainé et les couvertures de sédiments gréseux imposent au départ une forte horizontalité, entamée par endroits d'inselbergs, édifices granitiques -Adrar des Iforhas, Aïr, Ouaddaï, ...-, d'escarpements gréseux -Adrar mauritanien, Tagant, falaises de Bandiagara, ...- ou de quelques reliefs volcaniques -Djebel Marra-. Les cuirasses ferrugineuses et les dunes fixées ne font que renforcer la platitude générale.

La composition physico-chimique du substratum et son degré d'altération conditionnent la qualité de l'aquifère qui peut s'y loger.

b) Les différents types de réservoirs.

Nous venons de voir que, selon le type de roche, son âge, son origine et son altération, des fractures, des fissures et des milieux poreux se constituent. Ces réservoirs potentiels peuvent être classés en trois groupes :

- Les réservoirs d'altérites.

En domaine granito-gneissique, ce réservoir est divisé de haut en bas en trois horizons : la cuirasse latéritique, les argiles d'altération, les arènes grenues. Dans les schistes, une couche argileuse épaisse les caractérise.

En terrains sédimentaires ces réservoirs peuvent être des sables, des argiles ou plus fréquemment des sables dunaires dans le nord du Sahel. Il sont très souvent absents dans les sédiments anciens.

- Les réservoirs de fissures.

Sous la couche d'altérites, la roche saine est plus ou moins fissurée et altérée. Les fissures et diaclases sont ouvertes mais fréquemment remplies de produits d'altération. Bien que la profondeur de ce réservoir soit encore mal connue, elle est estimée à 40-50 mètres pour les roches du socle et semble beaucoup plus forte dans les terrains sédimentaires anciens.

- Les réservoirs de failles et fractures majeures.

Les failles créées lors d'épisodes tectoniques nombreux et puissants se rencontrent dans toutes les formations géologiques. Ces fractures s'accompagnent de zones broyées très profondes, larges de quelques mètres à quelques centaines de mètres, et souvent sièges de circulation d'eau. Notons la présence fréquente de fractures horizontales apparues lors de l'altération de la roche mère sous l'action de la décomposition lithostatique.

Selon les conditions climatiques et géomorphologiques, des nappes temporaires ou permanentes naissent dans ces différents types d'aquifères potentiels. Leur localisation constitue souvent une difficulté pour les hydrogéologues.

II - 2.2. Recherche des gisements aquifères.

La ressource en eau souterraine est une réalité. Sa localisation en est une autre, parfois vouée à l'échec tant il est mal aisé de travailler sur de l'invisible. Le technicien doit faire appel à des méthodes indirectes de recherche. La photo-interprétation est la base de cette prospection, complétant ou remplaçant même parfois les cartes topographiques, géologiques, pédologiques... Elle permet d'une part de donner un ordre d'idée de la profondeur de la couche d'altération (tableau 6, page 28), et d'autre part de localiser les zones de fractures, zones privilégiées pour les forages. Les résultats positifs d'implantations, grâce à la photo-interprétation seule, sont de 90 % dans les schistes mais seulement de 50 à 70 % dans les granito-gneiss, d'où la nécessité parfois de compléter cette recherche par des méthodes plus précises telle que la géophysique.

On peut signaler ici l'intérêt de la télédétection par images satellites qui pour de forts débits "(...)peut se révéler un guide précieux pour l'hydrogéologue dans l'implantation des forages" (Guiraud et al., 1990, p. 38).

La géophysique apporte des renseignements sur le sous-sol masqué par l'altération de surface, et donc invisibles sur les photos aériennes. Les diverses méthodes reposent sur la connaissance d'au moins un caractère physique de la roche -densité, propriétés électriques et magnétiques, vitesse de propagation d'une onde sonore, ...-. Plus les techniques sont perfectionnées, plus elles sont chères et difficiles à mettre en oeuvre et à maîtriser.

Dans le cas de l'hydraulique villageoise, les puits et les forages doivent permettre d'alimenter une population rurale dont les moyens techniques et financiers sont le plus souvent très limités. Il faut donc bien cerner cet environnement socio-économique prioritaire avant de faire appel à ces moyens coûteux.

L'aquifère ayant été localisé, il convient de déterminer l'intérêt qu'il représente : la quantité d'eau exploitable et sa qualité physico-chimique.

II - 2.3. Un remplissage conditionné avant tout par les pluies.

a) Le système d'alimentation.

Les aquifères sont de plus en plus exploités actuellement et il devient crucial de connaître les quantités maximales exploitables sans rompre l'équilibre de la nappe, c'est à dire sans prélever plus qu'elle ne reçoit. Bien que l'alimentation ne soit pas le seul facteur régissant la dynamique d'une nappe -interviennent aussi les flux sortants et le rôle régularisateur du réservoir, effet capacité-, elle reste l'élément actif unique commandé par des éléments extérieurs -régime pluviométrique, topographie, lithostratigraphie- dont nous devons souligner l'importance.

Dans le cas des zones arides et semi-arides qui nous intéresse ici, un processus d'infiltration domine, représenté sur la figure 11 ci-dessous.

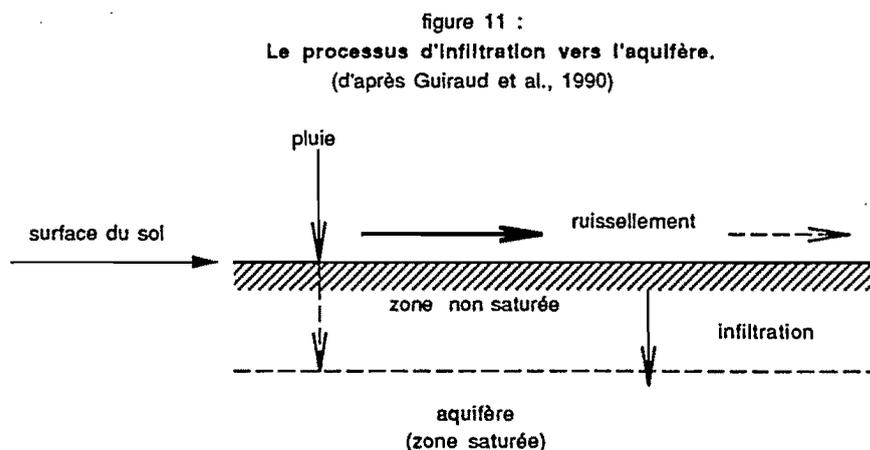
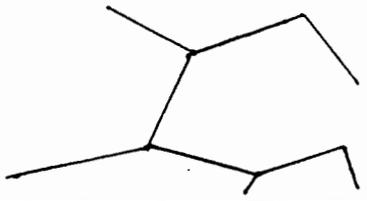
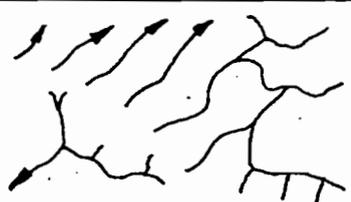
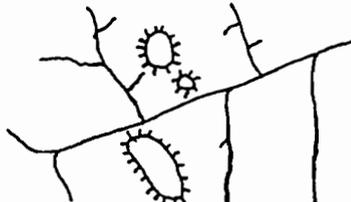
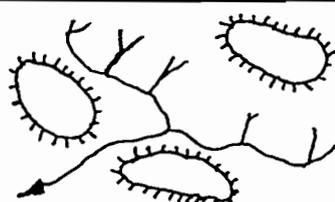


Tableau 6 :
Aspects du réseau hydrographique et
épaisseurs d'altération correspondantes.
(d'après Burgeap 1979, in Guiraud et al., 1992)

aspect du réseau hydrographique	épaisseur d'altération (m)
	20 à 25
	10 à 15
	15 à 20
	15 à 24
	variable
	> 27
	> 60
	15 à 35

L'alimentation est localisée selon le schéma du ruissellement et suivant l'organisation de la zone non saturée. Les flux d'infiltration ne sont pas uniformes dans l'espace et l'aire d'alimentation est linéaire -cours temporaires- ou ponctuelle -bassins endoréiques-. Dans le temps, la discontinuité d'apport des flux est encore vraie et conditionnée principalement par le régime pluviométrique -quantité et intensité des pluies-.

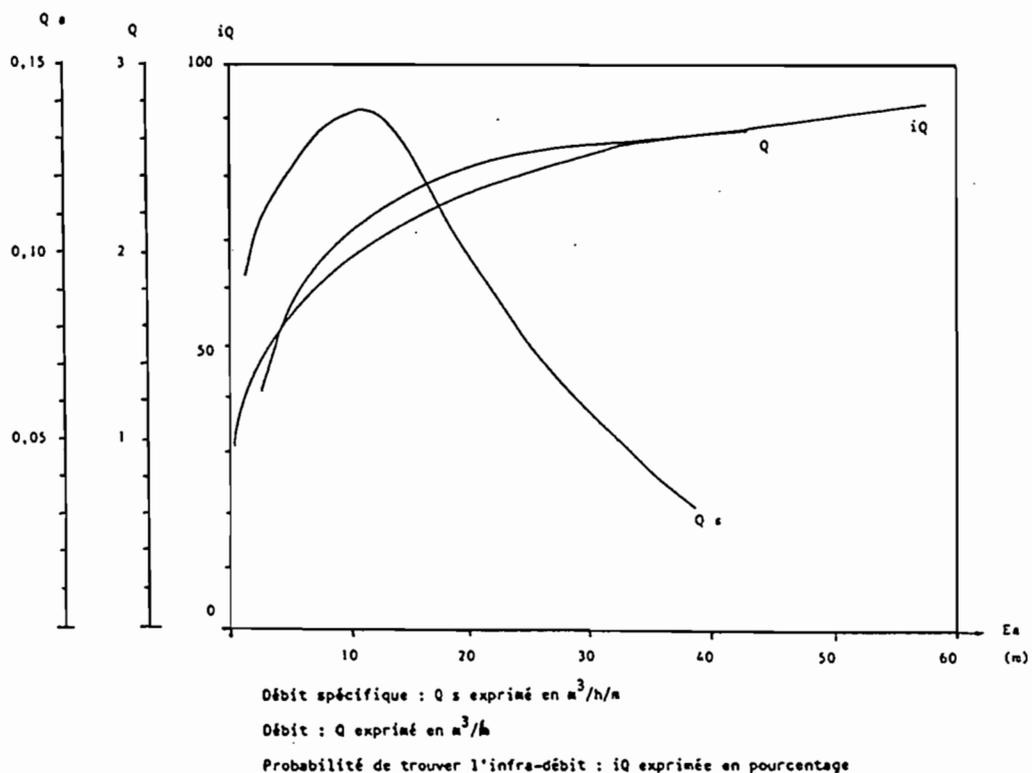
Les altérites, recouvrement semi-perméable, se comportent surtout comme un réservoir capacitif. Les fissures et les failles en profondeur drainent la couverture et jouent le rôle de conducteur. Ce système peut être drainé à son tour par un aquifère de fractures majeures dont la fonction est avant tout conductrice. La couche inférieure des fissures ou des failles est souvent saturée, sauf dans le nord du Sahel où le niveau piézométrique peut se situer dans la zone fissurée. "De nombreuses observations hydrologiques actuelles tendent à montrer que la nappe d'eau des altérites, des fissures et des failles ne constitue en fait qu'un même système aquifère contenu dans des réservoirs ayant des caractéristiques physiques distinctes" (Guiraud et al., 1990, p. 50).

Les méthodes actuelles d'estimation du flux d'alimentation ne permettent pas encore de donner des valeurs fiables. On peut cependant retenir qu'il est lié avant tout aux précipitations. La prudence doit être de mise dans l'exploitation de cette ressource afin d'éviter tout déséquilibre du bilan.

b) Les quantités disponibles.

La figure 12, issue de l'analyse statistique de forages déjà réalisés dans le socle d'Afrique centrale, représente la relation positive entre l'épaisseur du réservoir capacitif (altérites), le débit (Q) et le débit spécifique (Q_s), dans le cas des altérites. La fonction débits spécifiques/épaisseur des altérites atteste par ailleurs la présence d'un seuil critique de la productivité au-delà de 35 mètres de couverture d'altérites.

figure 12 :
Influence de la puissance du réservoir capacitif
sur le débit (Q) et le débit spécifique (Q_s) de l'aquifère.
(d'après Detay et al., 1989 ; in Guiraud et al., 1989)



Pour la recherche en eau dans les fissures, les valeurs suivantes semblent reconnues par de nombreux spécialistes (Berger et al, 1980-81 - Sourisseau, 1980 - Assouma, 1988 in Guiraud et al., 1990, p. 56) :

- au delà de 50 m, la productivité des forages tend à baisser,
- après 50 à 60 m au dessous de la couche d'altération les venues d'eau sont aléatoires. Les débits sont liés à la fois à l'ouverture et au degré de colmatage des fissures et à la profondeur de la fissuration -au delà, les fissures se referment ou deviennent rares-.

Enfin, les failles souvent très étendues -jusqu'à plusieurs kilomètres de longueur- s'enfoncent aussi très profondément et des venues d'eau intéressantes apparaissent jusqu'à 80-100 mètres. Le problème est ici la localisation des axes des fractures les moins altérées, souvent productives, mais qui malheureusement sont les plus difficiles à repérer par la géophysique.

La profondeur et le débit de l'ouvrage de captage dépendront du type d'aquifère sollicité. Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que deux grands types d'ouvrages se distinguent. Les eaux peu profondes peuvent être captées par des ouvrages simples, tandis que les eaux profondes ne peuvent être atteintes que par des techniques faisant appel à des infrastructures beaucoup plus lourdes.

Nous savons maintenant que la ressource en eau souterraine existe, qu'elle est exploitable, mais un critère doit encore être satisfait pour qu'elle soit utilisable par l'homme : sa potabilité.

II - 2.4. Une qualité pour la consommation pas toujours assurée.

Pour qu'une eau soit consommable sans danger pour la santé de l'homme ou de ses animaux, elle doit satisfaire certaines normes physico-chimiques. L'analyse de ces paramètres, outre les renseignements qu'elle peut fournir sur l'origine de l'eau, est absolument nécessaire pour s'assurer de l'absence de risques. Bien que "*la teneur en éléments majeurs et traces ne dépasse pas, sauf dans quelques cas précis, les normes de potabilité (...) on constate que les points d'eau n'ont pas toujours fait l'objet d'analyses complètes*" (Guiraud et al., 1990, p. 99). Le non respect de ces normes peut, à court ou long terme, avoir une influence néfaste considérable sur la santé. Citons l'exemple des nitrates (NO₃-), bien connu dans les pays d'agriculture intensive. L'incidence de cet élément est de deux ordres :

- toxicité en quantités excessives, particulièrement chez les jeunes enfants méthémoglobinémie,
- indice d'une pollution bactériologique.

La présence de teneurs supérieures à la norme -45 mg/l- est fréquente en Afrique de l'ouest et pose un réel problème. L'origine principale semble être une pollution domestique directe ou diffuse autour des puits ; la migration de l'élément jusqu'à la nappe étant accentuée par la réduction du couvert végétal (Faillat, 1986, in Guiraud et al., 1990, p. 104). Nous évoquons là une situation de non potabilité de l'eau due à une action anthropique. Dans certains cas la qualité propre à l'eau, eaux très fluorées par exemple,

la rend impropre à la consommation humaine, ou tout au moins dangereuse pour ses utilisateurs.

II - 3. Intérêts et limites des eaux de surface et souterraines.

Les eaux de surface sont très localisées dans l'espace, concentrées sur quelques rivières et lacs rares. Les niveaux de ces rivières sont sujets à des variations annuelles notables en relation avec la pluviométrie et l'évaporation et il en va de même pour les plans d'eau. La sécheresse de ces dernières années n'a fait qu'accentuer le déficit de l'écoulement général.

Pour la suite de l'étude on retiendra les éléments essentiels suivants :

- l'écoulement de surface se caractérise par la faiblesse de ses modules, mais aussi par son régime capricieux,
- l'endoréisme apporte des quantités d'eau précieuses, pendant au moins une partie de l'année.

Les eaux souterraines constituent une ressource potentielle à ne pas négliger. Leur localisation nécessite des connaissances préalables de la géologie régionale et fait appel à des techniques de prospection qui vont de l'observation de terrain à la géophysique, en passant par la photographie aérienne. Les quantités disponibles sont difficiles à évaluer, mais dépendent en grande partie de la pluviométrie locale. Les débits exploitables sont quant à eux conditionnés par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère -perméabilité, transmissivité- qui dépendent de sa structure géométrique -fissures, fractures, interstices poreux- mais aussi de sa profondeur.

La potabilité de cette eau peut dépendre des qualités intrinsèques de la roche ou du mode d'exploitation. Il apparaît que cette caractéristique est encore trop peu étudiée bien que composante essentielle de l'exploitabilité d'un site.

Connaissant les possibilités et les limites de ce que nous pouvons considérer être l'offre -les ressources pluviales, en eaux de surface et souterraines- il nous faut déterminer les besoins et leurs caractéristiques.

III - BESOINS EN EAU ET LIMITES A SON EXPLOITATION.

Les aménagements hydrauliques doivent permettre de maintenir la vie dans les régions arides. La croissance démographique, additionnée à la sécheresse de ces dernières années a conduit l'homme à intensifier et augmenter ses productions : la nécessité va grandissante tandis que la ressource s'atténue.

III - 1. L'eau rare à partager.

III - 1.1. Un besoin croissant.

A la suite de la seconde Guerre Mondiale les pays en voie de développement, dont l'Afrique et particulièrement les régions arides de l'Afrique, ont vu leur taux de mortalité chuter rapidement. L'exportation de la part des pays industrialisés de médicaments, jusqu'alors inconnus, explique en grande partie le processus qui conduit aujourd'hui à une explosion démographique. Le nombre global de bouches à nourrir augmente et aucun ralentissement n'est prévu par les démographes avant longtemps. Chiffrer la croissance n'est pas aisé. Les données démographiques manquent foncièrement de précision à cause de l'absence d'état civil, des lacunes et erreurs des rares recensements, et des mouvements constants des nomades, dans les pays où ils représentent un fort pourcentage. Pour donner malgré cela un exemple, on peut citer Ch. Toupet : *"Il semble que la population du Sénégal dépassait le million au début du siècle, pour atteindre 2,5 millions d'habitants dans les années 50, plus de 5 millions en 1976 et environ 7,5 millions en 1990"* (Toupet, 1992, p. 105). La population du Soudan grandit quant à elle dans les proportions suivantes :

1956 : 10,2 millions d'habitants
 1983 : 21,6 millions d'habitants
 1990 : 27,3 millions d'habitants

Les quelques caractéristiques démographiques des autres principaux pays sahéliens, rassemblées dans le tableau 7, confirment que cette croissance est une des bases fondamentales du problème actuel du Sahel, comme pour beaucoup d'autres pays en voie de développement.

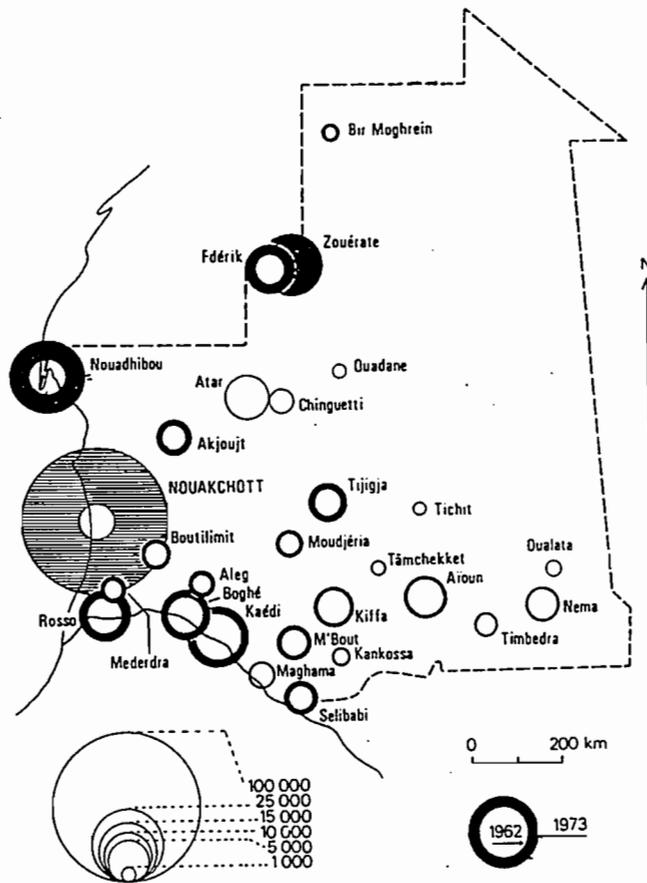
tableau 7 :

Données démographiques du Mali, de la Mauritanie, du Tchad et du Niger.
 (d'après Atlas statistique Encyclopédia Universalis, 1990)

	Population actuelle (estimation 1989) habitants x 1000	Projections (2000 et 2010) habitants x 1000	accroissement naturel (taux en pour mille)
Mali	7 911	9 535 11 299	29
Mauritanie	1 900	2 673 3 616	27
Tchad	5 538	7 337 9 491	25
Niger	7 523	10 000 14 500	30

Parallèlement à l'évolution de l'ensemble de la population on observe une urbanisation forte, bien illustrée par l'exemple de Nouakchott (Carte 6, page 33). Cet exode rural s'accompagne d'une redistribution de la demande en eau à prendre en compte pour la définition des projets d'hydraulique. Les besoins en eau augmentent donc très rapidement dans les villes, mais continuent de croître dans les campagnes.

carte 6 :
 la croissance urbaine en Mauritanie de 1962 à 1973.
 (D'après Pitte, 1975 ; in Toupet, 1992)



III - 1.2. Des besoins variés.

Le Sahel est pour les hommes une terre de rencontre. Il compte de multiples ethnies, comme le montre le tableau 8, partagées entre deux principaux modes de vie : le nomadisme et la sédentarité. Les nomades tiennent leur origine de civilisations arabo-berbères méditerranéennes, les sédentaires de civilisations soudanaises ; bien que les Peuls soient des nomades originaire de la région soudanienne.

tableau 8 :
Répartition de la population des principaux pays sahéliens suivant les ethnies
(en % de la population totale).
(d'après Atlas statistique Encyclopédia Universalis, 1990)

ETHNIES	SENEGAL	NIGER	MAURITANIE	MALI	BURKINA FASO
ARABES	1			1,2	
BAMBARAS				31,9	
BOBOS				2,4	6,8
DIOLAS	8,1			2,9	
DJERMAS		14,7			
DOGONS				4	
GOURMANCHES					4,8
GRUSIS					5,1
HAOUSSAS		52			
KANOURIS		8,7			
LOBIS					6,9
MALINKES				6,6	
MANDES					8,8
MANDINGUES	6,5				
MAJRES			81,5		
MOSSIS					47,9
OULOFS	36,2		6,8		
PEULS	17,8	10,4	1,1	13,9	8,3
SENOUFOS				12	5,3
SERERES	17				
SONGHAIS		8,1		7,2	
SONINKES	2,1		2,8	8,8	
TOUAREGS		3		7,3	3,3
TOUCOULEURS	9,7		5,3		
AUTRES	1,6	3,1	2,5	1,8	2,8

La vie des sédentaires ruraux, agriculteurs en grande majorité, reste rythmée par les saisons. Les paysans pratiquent des cultures dites "sous pluies". Le début des travaux agricoles concorde parfaitement avec l'arrivée des premières pluies. La croissance des plantes est entièrement livrée aux conditions atmosphériques. L'extrême variabilité des phénomènes pluvieux, sur laquelle nous avons insisté précédemment, peut donc compromettre, à tout moment, les récoltes. Une durée trop grande entre deux averses, un raccourcissement de la saison des pluies, peut suffire à tuer les plantations avant qu'elle n'achèvent leur cycle végétatif complet, et réduire ainsi à néant le travail d'une année.

Ces agriculteurs trouveraient un grand intérêt à maintenir, pendant ces périodes précises, des réserves d'eau disponible pour assurer la survie ou l'arrivée à maturité de leurs cultures.

Les habitants des berges des grands fleuves pratiquent une agriculture différente, mais toujours étroitement associée aux apports d'eau : les cultures de décrue. Au fur et à mesure que le niveau du fleuve descend, après la phase pluvieuse, les cultivateurs ensemencent les terres ainsi libérées et encore humides. Dans cette situation, toute baisse trop rapide du fleuve entraîne un assèchement prématuré des sols : la croissance des plantes est ralentie, voire stoppée.

Pour ces paysans-là, le prolongement dans le temps d'une ressource en eau utilisable pour leurs cultures, parfois de quelques jours seulement, est garant de la sauvegarde des récoltes, et donc de leur maintien en vie.

Récemment, en marge de ces pratiques traditionnelles, sont apparues des techniques de cultures de contre-saison importées des pays industrialisés. Tout le cycle de la plante se déroule hors saison des pluies, ce qui signifie que l'ensemble de ses besoins en eau doit être apporté par l'homme.

Pour les nomades le problème se pose en d'autres termes. Itinérants, ils sillonnent les régions sahéennes du nord au sud à la recherche de pâturages pour leurs troupeaux. Leurs besoins s'étalent donc sur l'ensemble de l'année et correspondent à la consommation des hommes et de tout le bétail.

Toute action suppose donc de connaître et de comprendre les besoins de chacun pour adapter les aménagements aux particularités de chaque situation. Par ailleurs nous réalisons avec ces quelques lignes que les civilisations traditionnelles rurales se sont adaptées formidablement à leur milieu naturel, sans toutefois chercher à s'affranchir des contraintes liées à la ressource en eau.

Nous rappellerons à ce propos que jadis, les peuples nomades s'arrêtaient aux portes de la zone soudanienne pour une raison qu'un proverbe maure résume fort bien : *"La terre des Noirs tue les Blancs"*. *Les maladies liées à l'eau, " le paludisme, la fièvre jaune, les bilharzioses, les trypanosomiasés humaine et animale formaient un obstacle infranchissable."* (Toupet, 1992, p. 31). Cette peur originelle explique l'appréhension actuelle des paysans à l'égard de l'introduction de l'irrigation dans leurs systèmes de culture. La connaissance de ce phénomène est fondamentale pour comprendre aujourd'hui les réactions locales et gérer l'aménagement en fonction de celles-ci, en gardant toujours à l'esprit que les mentalités s'opposent plus facilement à la présence de l'eau qu'elles ne la recherchent.

Dans l'espace, l'occupation des terres par les hommes est partagée suivant la logique climatique imparable :

- rareté des pluies vers le nord, végétation clairsemée et pauvre, territoire des nomades,
- pluviométrie plus élevée vers le sud, récoltes possibles, terrains cultivés par les sédentaires.

Malgré cette zonalité relative, les conflits pour l'eau sont une réalité mise en relief par la sécheresse récente. La dualité des deux modes de vie, nomades et sédentaires, réside principalement dans la nécessité pour les nomades de l'accès aux points d'eau pour abreuver leurs troupeaux, ce qui dans le cas des fleuves ne peut se faire qu'en traversant les cultures des paysans. Ch. Toupet signale que les rapports ne sont toutefois pas toujours conflictuels, preuve en est les contrats d'usage partagé de l'eau entre pasteurs et paysans.

Il reste qu'il faut compter avec des usages variés, parfois opposés, et grandissants d'un même point d'eau, qu'il soit naturel ou artificiel et que les besoins sont

considérables. Malgré cette urgence les sociétés rurales continuent souvent de s'opposer à tout développement d'activité autour de l'eau. Cette résistance locale risque de ne rendre que plus ardue les tentatives de maîtrise de la ressource.

La gestion efficace des points d'eau passe par la bonne connaissance des conditions liées à la demande mais aussi des limites de l'offre, car l'eau peut en effet représenter certains dangers.

III - 2. Les limites et contraintes liées à l'exploitation de l'eau.

Tenter de maîtriser l'eau peut offrir des avantages inestimables pour les hommes des régions arides et semi-arides. Pour donner les meilleurs résultats, cette exploitation des ressources doit être menée en tenant compte des risques liés à l'eau, mais aussi des limites à ne pas dépasser pour éviter toute surexploitation du milieu.

III - 2.1. Les maladies liées à l'eau.

Dans le domaine tropical, l'eau transmet les maladies de nombreuses façons :

- par consommation,
- par contact,
- par la seule proximité.

Nous ne ferons ici qu'évoquer succinctement les différentes maladies, les dangers qu'elles représentent et dans quels milieux, thèmes développés en détail dans L'homme et l'eau dans le domaine tropical, (Neuvy, 1991, p. 72 à 89).

Il ressort du tableau 9 (page 37) que bon nombre d'insectes vecteurs de maladies graves ont pour biotope l'eau, stagnante dans certains cas, vive dans d'autres. Certaines de ces maladies semblent impossibles à éliminer du fait de leur étendue épidémiologique. G. Neuvy signale en outre que "(...) *les aménagements ruraux, par leurs besoins en eau sans cesse croissants, tendent à favoriser la prolifération d'insectes vecteurs ou hôtes intermédiaires. Les parasitoses endémiques semblent devoir être pour longtemps encore, un obstacle au développement.*" (Neuvy, 1991, p. 89). Cet avertissement alarmant doit être une mise en garde sévère à ne pas oublier dans le futur.

III - 2.2. La dégradation accélérée du milieu.

a) *Un milieu adapté à l'aridité mais fragile.*

Les sols jouent le rôle primordial de support et de réservoir d'eau pour la végétation. Leurs caractéristiques conditionnent en partie la vie d'une région et leur disparition entraîne souvent des modifications importantes du milieu. Comme tous les sols, ceux des régions arides proviennent de l'altération de la roche mère et leur qualité en découle en partie. L'intensité, la profondeur et le mode d'altération conduisent ensuite à des types différents.

tableau 9 :
Les différentes maladies liées à l'eau.

MALADIES	AGENTS PATHOGENES	VECTEURS	MILIEUX FAVORABLES AU DEVELOPPEMENT DE LA MALADIE	TRANSMISSION
PALUDISME (MALARIA)	protozoaire parasite du sang	moustique anophèle	cours d'eau, lacs, lagunes selon l'espèce	piqûre de l'insecte
ONCHOCERCOSE (CECITE DES RIVIERES)	ver onchocerca volvulus	moucheron similie	eaux vives oxygénées	piqûre de l'insecte
TRYPANOSOMIASE (MALADIE DU SOMMEIL)	protozoaire flagellé	mouche glossine (tsé-tsé)	cours d'eau en forêt, savane sèche selon l'espèce	piqûre de l'insecte
BILHARZIOSE (SCHISTOSOMIASE)	ver plat schistosome	mollusque d'eau douce	eaux stagnantes, douces, 24-30°C ou cours d'eau à très faible vitesse	simple contact avec le mollusque
FILARIOSE DE BANCROFT	ver filaire	moustique culex ou aêdes	réserves d'eau stagnante	piqûre de l'insecte
DRACUNCULOSE (VER DE GUINEE)	larves du ver	-	eaux stagnantes	ingestion d'eau
ANKYLOSTOMIASE	larves du ver ankylostome	-	eaux boueuses	simple contact
ASCARIDIOSE	ver ascaris	-	eaux stagnantes	ingestion d'eau
AMIBIASE	protozoaire amibe	-	eaux stagnantes	ingestion d'eau
FIEVRE JAUNE	virus amaril	moustique aède	eaux stagnantes	piqûre de l'insecte
CHOLERA	bacille	-	eaux croupies	ingestion d'eau
POLIOMYELITE ET HEPATITES	virus	-	eaux croupies	ingestion d'eau simple contact

Les sols sahéliens suivent la grande règle d'étape de transition entre le Sahara, constitué de dunes vives, et les sols des forêts tropicales. Le passage entre le Sahara et le domaine sahélien se fait par une bande sableuse irrégulière dans laquelle dunes vives et vêtues se juxtaposent ou se superposent. Le Sahel est lui constitué d'édifices sableux vêtus d'une végétation clairsemée adaptée à la sécheresse.

L'évolution des sols des grandes vallées est quelque peu différente. La proximité de la nappe aquifère, les inondations et dessèchements successifs ont conduit à deux types de sols : les vertisols et les sols hydromorphes. L'argile constitue plus de 30 % des vertisols. C'est une montmorillonite gonflante très sensible à la présence de l'eau : elle se rétracte en saison sèche donnant un sol craquelé et se gonfle en période humide devenant imperméable. Les sols hydromorphes se situent aux endroits où la nappe est la plus proche de la surface du sol. Si l'engorgement est permanent tout au long de l'année, on parle de gley, s'il est provisoire par une baisse du niveau de la nappe après les crues, on parle de pseudo-gley.

En fonction des caractéristiques précédentes, l'intérêt agricole et la sensibilité à l'érosion hydrique seront différents.

La fertilité du sol, et par conséquent son potentiel agricole, est associée en premier lieu à la situation dans le réseau hydrographique :

- les étendues dunaires sableuses ne sont valorisées que par l'élevage nomade qui s'adapte à la végétation naturelle,
- les grandes vallées fluviales sont plus propices à l'agriculture et dans certains cas même à l'irrigation.

La sensibilité à l'érosion hydrique est la plus forte dans les dunes. La topographie, la structure instable des sables et la faible densité du couvert végétal, accentuée par la sécheresse actuelle, favorisent la prise de vitesse de l'eau et l'entraînement des particules.

La fragilité et le faible potentiel naturel des sols sont une caractéristique première du domaine sahélien. Ils réclament attention et protection de la part des utilisateurs.

La végétation naturelle cherche quant à elle à s'adapter aux conditions hydriques imposées par le milieu. L'aridité du domaine sahélien impose deux types d'adaptation :

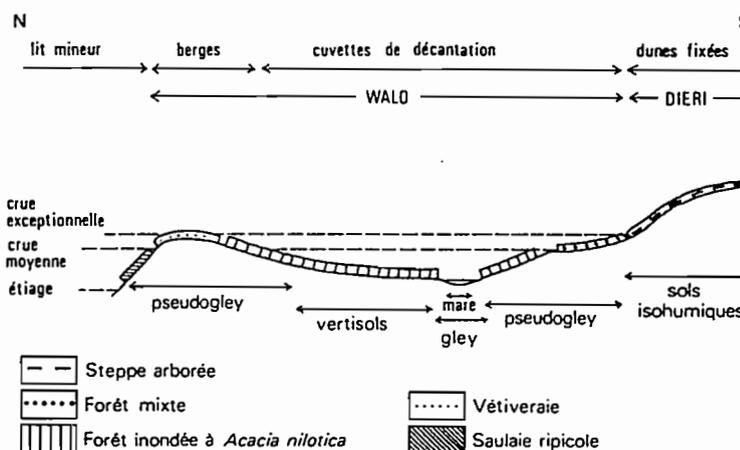
- un couvert végétal clairsemé, forcé à exploiter un volume de sol considérable pour s'alimenter, et obligé de limiter sa transpiration par une réduction de la surface foliaire et par la fréquence des épines,
- une zonalité liée à la pluviométrie.

Le passage du désert au domaine équatorial se fait par une densification du couvert et une modification des variétés en fonction de leur adaptation à la sécheresse. Le tableau 2 (page 11) résume les différents types de végétation suivant le domaine climatique.

La présence des fleuves allogènes modifie localement cette distribution générale, comme pour les sols. La coupe schématique de la figure 13 montre les relations entre formations végétales et sols à travers la vallée du Sénégal. Sur les dunes fixées, les sols isohumiques supportent une steppe arborée et quelques graminées éparses. Une forêt mixte d'arbres, arbustes et graminées couvre une plage de transition qui peut être atteinte par les hautes eaux. L'*Acacia nilotica*, qui a la capacité de supporter plusieurs mois de submersion des racines et de la base du tronc, constitue la seule formation

arborée capable de pousser dans les cuvettes de décantation. Sur les berges, on ne rencontre souvent que le vétivier qui peut descendre dans la cuvette quand la forêt d'acacia est défrichée. Le talus de la berge est occupé par des saules capables de supporter une submersion totale.

figure 13 :
Coupe schématique des modelés des sols
et des formations végétales de la vallée du Sénégal.
(d'après Toupet et al., 1992)



Ces milieux sont tous très fragiles et la moindre action anthropique est fortement ressentie. Si les conditions climatiques ajoutent leurs effets à cette action, le résultat peut être considérable.

b) La désertification : résultat de l'effet cumulé de l'homme et du climat.

L'homme cherche une eau devenue rare là où elle est le plus accessible, c'est à dire aux endroits des puits et des forages. Ceci est vrai aussi bien pour les nomades que pour les sédentaires. On assiste ainsi à une concentration humaine et animale autour des points d'eau qui accroît le taux d'exploitation d'un espace réduit. Les paysans et les pasteurs coupent le bois pour construire, se chauffer. Ils le vendent parfois même aux citadins de plus en plus nombreux ; fait bien illustré par l'exemple de Nouakchott (carte 6, page 33), qui voit sa population multipliée par 20 en 10 ans. Les animaux broutent la moindre plante et piétinent tout. La végétation naturelle ne tarde pas à disparaître autour des puits et le long des routes.

La désertification se caractérise ainsi par une destruction du couvert végétal autour de points de concentration en hommes et animaux, et non pas par une progression linéaire du Sahara vers le sud comme il a souvent été dit. Cette diminution de la densité végétale conduit à favoriser l'érosion hydraulique, à dégrader la structure et la fertilité des terres.

La sécheresse de presque trente années associée à l'action anthropique a profondément modifié la zonation végétale. Le déplacement vers le sud des isohyètes annuelles s'est accompagné d'une disparition de nombreuses espèces, conduisant à une désertification du milieu.

* * * * *

De ce tour d'horizon des problèmes du Sahel, il ressort d'abord la persistance de certains éléments.

La faiblesse et la répartition très aléatoire de la ressource en eau météorique sont les plus remarquables. On notera cependant que les grands fleuves exogènes et les aquifères représentent une ressource d'un intérêt majeur.

L'emprise de plusieurs civilisations opposées, aux traditions culturelles fortement ancrées, persiste : pasteurs nomades et paysans.

S'ajoutent à cela des faits nouveaux :

- le quart de siècle de sécheresse particulièrement long et sévère,
- la croissance démographique, l'urbanisation et l'industrialisation,
- la dégradation du milieu, dernière étape des modifications du contexte hydroclimatique et humain.

Le raisonnement de l'aménagement doit être fondé sur cette base constituée à la fois d'éléments stables et instables. L'eau existe en quantités non négligeables en surface et dans le sous-sol, même si sa présence constitue une variable importante. Son abondance varie en fonction de nombreux facteurs :

- pluviométrie et intensité de la pluie,
- état de la surface de réception pour les cours d'eau,
- qualité du réservoir, profondeur, étendue de la zone d'alimentation pour les aquifères.

Le but de l'aménagement hydraulique est de diminuer la dépendance vis à vis de ces variables pour assurer, dans les limites du possible, la constance de la ressource. Suivant la cible de l'intervention, les problèmes ne sont pas les mêmes -exploiter les gisements dans le cas d'eau souterraine, retenir l'eau qui s'enfuit dans les rivières tout en évitant qu'elle ne s'évapore dans l'atmosphère, réduire l'énergie des cours d'eau érosifs, ...-.

On peut déjà percevoir la diversité des réalisations envisageables qui résulte d'autant de situations différentes. Chaque étude doit être adaptée au contexte naturel local, même si une logique d'ensemble demeure basée sur les données fondamentales.

Ainsi, gardons toujours en vue les quelques constantes suivantes déjà évoquées :

- le besoin en eau pour l'homme est vital, impérieux et augmente au rythme de la croissance démographique,

- plusieurs civilisations habitent le Sahel, leurs relations sont souvent conflictuelles, leurs besoins différents et même parfois concurrents,
- l'eau, et ce qu'elle apporte, n'est pas forcément bien tolérée de toutes les civilisations, notamment certains nomades,
- la nature tend à se dégrader et une action s'impose pour réparer les dégâts déjà faits et stopper cette progression.

Il va de soi que tout ne peut pas être réglé par les seuls aménagements hydrauliques. Leur contribution au redressement de la situation peut cependant être grande, si dès le départ certaines règles sont respectées.

Le terme même d'aménagement hydraulique recouvre des types d'interventions très différents où les organismes impliqués, l'envergure des réalisations, leur coût, leur impact sur le milieu diffèrent énormément. Pour restreindre l'ampleur de notre étude nous circonscrivons nos recherches au domaine de la petite hydraulique rurale. Nous entendons par là traiter des aménagements dont les caractéristiques technologiques et financières les rendent entièrement accessibles par les populations rurales, du début des études d'implantation des ouvrages à leur utilisation courante. Ceci implique que nous ne parlerons ni des aménagements de grande envergure, tels les barrages de Diama et Manantali, ni de la maîtrise de l'eau en milieu urbain. Par ailleurs nous limitons notre propos aux aménagements qui permettent soit de créer une ressource nouvelle soit d'augmenter une ressource trop faible, sans traiter des techniques de mise en valeur de cette ressource, comme l'irrigation par exemple.

Nous nous proposons donc maintenant de faire le bilan des petits aménagements d'hydraulique rurale dans les régions arides et semi-arides, d'en analyser les résultats, de chercher les imperfections et proposer des solutions.

* * * * *

DEUXIEME PARTIE

LES TECHNIQUES

I - LES OUVRAGES DE RECUPERATION DES EAUX DE PLUIE.	4 4
II - LES OUVRAGES DE MAITRISE DES EAUX DE SURFACE.	4 5
III - MOBILISATION DES EAUX SOUTERRAINES.	6 0
IV - LA MAITRISE DE L'EAU A L'ETAT DE VAPEUR.	8 1

Rappelons le fil conducteur de notre travail. L'objectif final est de comprendre comment dans un milieu donné, où la ressource en eau constitue le facteur limitant principal de la vie, l'homme peut par l'aménagement de son territoire s'adapter aux conditions naturelles qui lui sont imposées et maintenir sa présence dans cet espace.

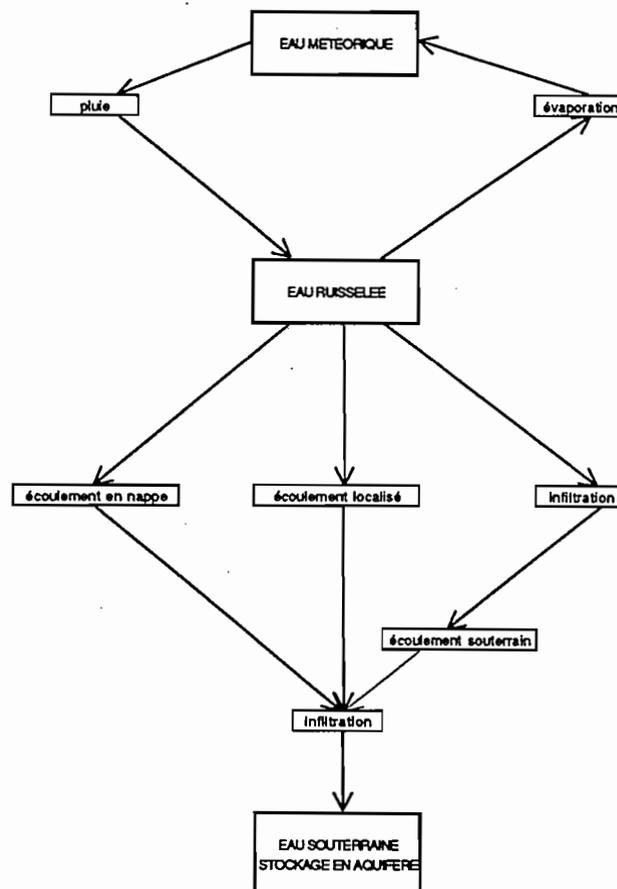
Nous nous attacherons dans cette seconde partie à décrire les petits aménagements hydrauliques ruraux qui répondent à ces besoins dans les conditions définies. A partir de documents bibliographiques nous tenterons de faire un inventaire aussi complet que possible de toutes les méthodes développées en milieu rural pour subvenir aux besoins en eau, qu'ils soient agricoles, pastoraux ou domestiques.

Chaque type d'aménagement est étudié seulement sous son aspect technique, de façon à définir les caractéristiques qui lui sont propres, ses limites d'utilisation constantes quelle que soit la manière dont il est utilisé.

De la sorte, à l'issue de cette première phase du travail nous connaissons d'une part le milieu, environnement naturel et humain, et d'autre part les procédés de maîtrise de l'eau employés au Sahel. Cette approche segmentée permettra dans un deuxième temps, lors de l'analyse des relations entre ces deux éléments, de comprendre plus facilement les difficultés d'adaptation de l'une à l'autre, et d'analyser correctement la part de responsabilité qui revient à chacune d'elles.

De façon à n'oublier aucun type d'aménagement et pour garder aisément en mémoire le déroulement de cette partie, nous choisissons de décrire les différents procédés en suivant le parcours naturel de l'eau, depuis son état de vapeur atmosphérique jusqu'à son stockage en aquifères. Les différentes étapes de cette approche sont symbolisées sur le schéma ci-dessous (figure 14).

figure 14 :
Schéma du cycle de l'eau.

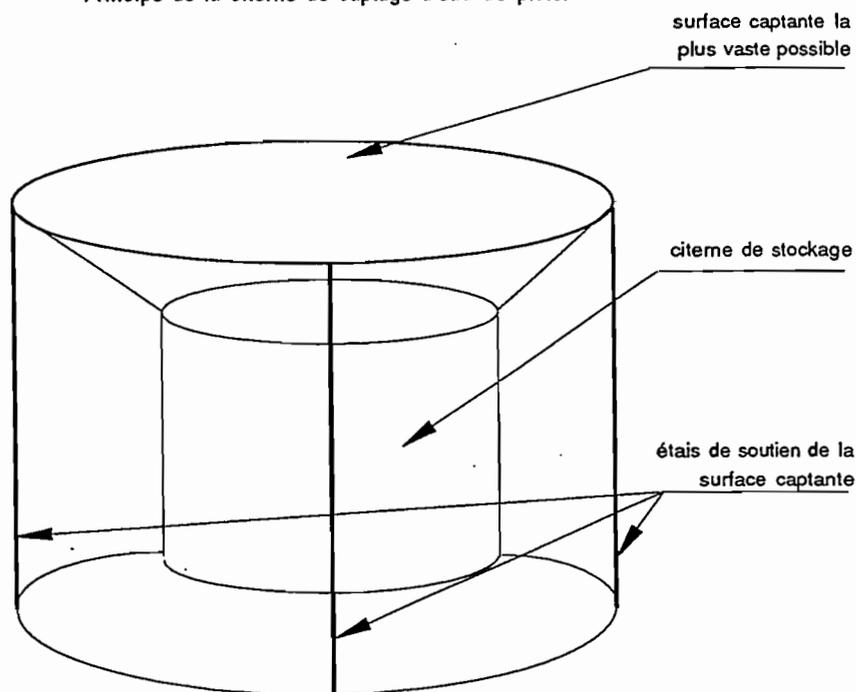


I - LES OUVRAGES DE RECUPERATION DES EAUX DE PLUIE.

Cette première catégorie d'ouvrages est destinée à recevoir, stocker et éviter la disparition de l'eau, avant même qu'elle ne commence son cycle terrestre. Le principe est d'intercepter l'eau de pluie par une surface aussi vaste que possible et de la concentrer ensuite dans un réservoir tout en évitant son évaporation.

Le plus couramment on construit des citernes peu profondes -2 mètres environ-, dont le rayon est un compromis entre des impératifs purement techniques -maçonnerie, charpente- et la volonté de couvrir une surface telle qu'un maximum d'eau soit récupéré. La figure 15 illustre le principe de la citerne.

figure 15 :
Principe de la citerne de captage d'eau de pluie.



Mais il existe aussi des citernes de construction traditionnelle qui ne font pas appel aux techniques du maçon ou du charpentier. La plus simple consiste en un édifice dont les murs, en terre, sont recouverts d'argile ainsi que le fond, dans le but d'imperméabiliser le réservoir ainsi constitué. Aucun impluvium ne concentre les pluies et seule l'eau tombée au droit de la réserve est récupérée : plus vaste est sa surface, meilleur est son rendement.

Dans certaines régions où la maîtrise de la ressource en eau est bien développée, ces systèmes sont améliorés. Dans les îles Canaries les citernes sont couvertes suivant le principe moderne, ce dernier s'étant en réalité inspiré des techniques anciennes. Le toit sert d'impluvium, limite l'évaporation et protège l'eau contre les dépôts poussiéreux.

En Casamance, au Sénégal, ce sont les cases qui servent d'impluvium. Leur toit est construit en forme d'entonnoir. Les eaux s'écoulent sur les pentes et sont récupérées dans des récipients, à l'intérieur de l'habitation.

Entre ces méthodes traditionnelles et leurs copies modernes, souvent très chères car maçonnées, des techniques intermédiaires faisant appel aux matières plastiques ont été développées. Un film plastique est posé à même le sol, relevé sur les bords par des murets de terre. La cuvette ainsi obtenue est parfaitement imperméable. Parfois, les particularités du relief forment des dépressions naturelles, entre les dunes, que l'on imperméabilise par un film plastique, créant ainsi une mare artificielle. L'avantage de la matière plastique est sans conteste son coût beaucoup plus abordable que les constructions

de ciment, mais elle reste un matériau fragile. Elle doit être considérée comme une technique non pérenne, à entretenir soigneusement et à renouveler régulièrement.

Les quantités stockées dépendent uniquement de la pluviométrie à l'emplacement précis de la réserve. Connaissant l'irrégularité spatiale des pluies sahéliennes on comprend le caractère hautement aléatoire de cette "maîtrise de l'eau".

La qualité de l'eau météorique, avant stockage, se prête par ailleurs à toutes les utilisations : agricole, animale et humaine.

Ces ouvrages font l'objet d'une documentation technique très restreinte, contrairement aux aménagements mis en place au stade du cycle de l'eau qui fait directement suite à la pluie : l'écoulement de surface.

II - LES OUVRAGES DE MAITRISE DES EAUX DE SURFACE.

L'écoulement de l'eau à la surface du sol pose deux problèmes majeurs que doivent essayer de résoudre les aménagements hydrauliques. Le premier est l'entraînement du sol et la perte concomitante de la matière organique fertilisante nécessaire à l'agriculture. Le second est l'évanouissement d'une ressource en eau, précieuse pour l'alimentation hydrique des cultures, des animaux et des hommes.

La lutte contre cette fuite de l'eau et du sol se raisonne habituellement en deux temps. Il s'agit en premier lieu de réduire l'érosion, facteur de désertification. Ensuite seulement il est possible d'envisager un stockage de l'eau pour la réutiliser sur place. Ces deux temps successifs correspondent à une double réalité spatiale : la première action est menée sur la partie amont des bassins versants tandis que la seconde n'a lieu qu'au droit des exutoires ou dans les bas-fonds.

Ceci nous amène à définir deux types d'érosion : l'érosion diffuse, ou en nappe, et l'érosion localisée, concentrée en ravines, qui correspondent respectivement aux deux espaces définis précédemment.

Les caractéristiques propres à chaque secteur imposent des moyens de lutte adaptés, donc des types d'ouvrages différents que nous allons décrire maintenant.

II - 1. La lutte contre l'érosion diffuse.

L'image la plus répandue évocatrice de la lutte contre l'érosion hydrique est probablement celle d'alignements de diguettes perpendiculaires à la pente, derrière lesquels s'accumulent brindilles, paille et diverses matières végétales. Cette méthode ne représente cependant qu'une catégorie des aménagements de lutte anti-érosive, dits mécaniques et que l'on oppose aux procédés biologiques, et une seule des nombreuses variantes à l'intérieur même de cette première classe.

Cette section tente de rassembler l'essentiel des moyens anti-érosifs déployés actuellement dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'ouest.

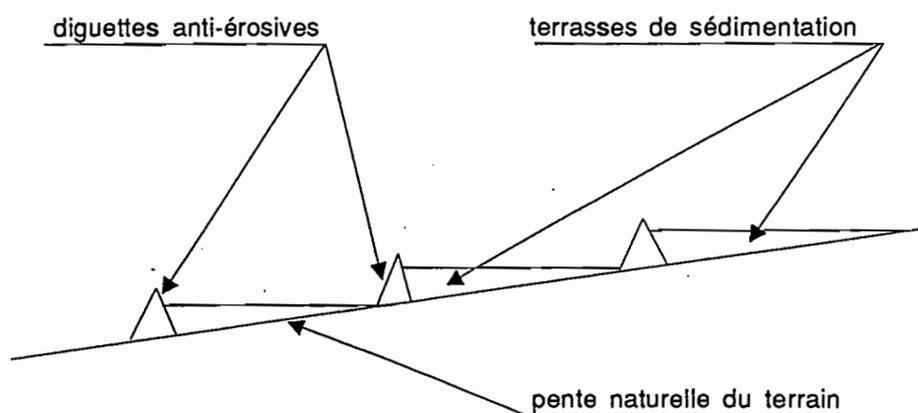
II - 1.1. Les procédés mécaniques.

Certaines méthodes traditionnelles, encore utilisées de nos jours par les paysans, sont connues depuis fort longtemps : on les appelle aujourd'hui "barrages perméables".

Ce système simple, et sans doute le plus courant, est matérialisé par des enclos de blocs rocheux autour de parcelles cultivées. Le principe consiste à ralentir l'eau, diminuer sa capacité de transport et favoriser ainsi le dépôt des sédiments en suspension : sables, limons et débris organiques. Seules les matières solides sont retenues et si son énergie est trop grande, lors des fortes averses de la saison des pluies par exemple, l'eau peut continuer son chemin débarrassée de sa charge solide. La sédimentation progressive se solde par une diminution de la pente du terrain et une augmentation de la rugosité du sol qui renforce le freinage de l'eau. Le profil recherché indiqué sur la figure 16 est celui d'une succession de terrasses, dont la qualité agronomique est améliorée grâce aux dépôts de terre fertile.

figure 16 :

Principe des diguettes anti-érosives semi-perméables.



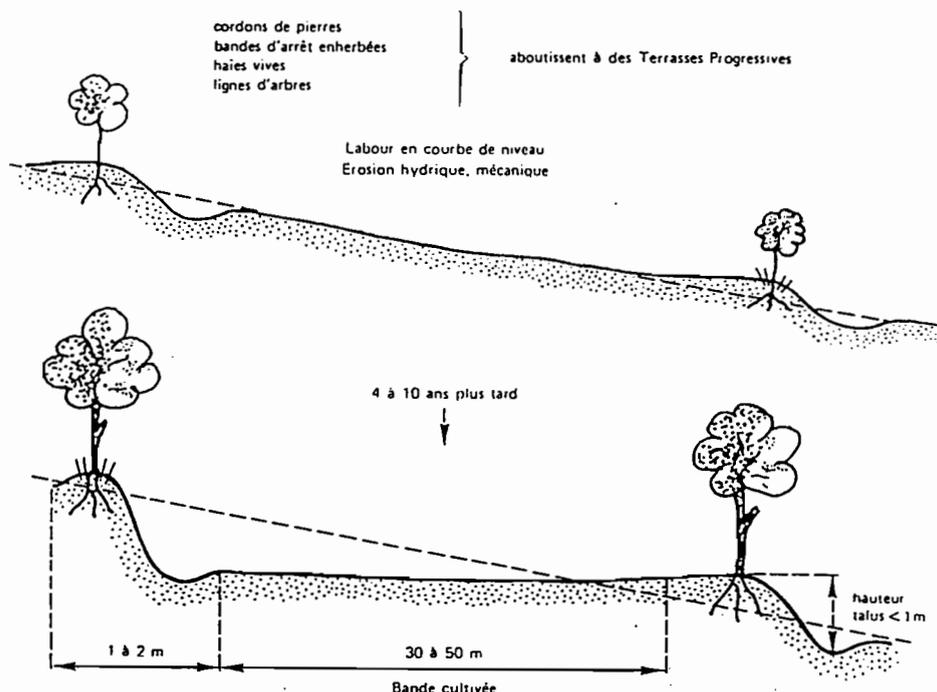
L'entraînement naturel progressif de la terre arable de l'amont vers l'aval risque parfois d'aboutir à la mise à nu de la roche-mère dans la partie amont de la parcelle. Cet inconvénient est minimisé par un travail du sol opéré en remontant la terre du bas vers le haut de la parcelle, pour assurer un volume de terre meuble suffisant à l'enracinement sur l'ensemble de la surface cultivée.

Le principe du clayonnage et du fascinage, micro-barrages de paille de mil ou de branches, s'apparente à la méthode des barrages perméables rocheux. La durée de vie de ces aménagements à base de végétaux morts reste très restreinte du fait de l'action habituelle des bactéries dans la dégradation des matières organiques ou de celle des termites.

La plantation de haies composées d'espèces locales -euphorbe, andropogon, etc.-, dont la fonction première est pour les paysans celle de délimitation des parcelles, contribue à contrarier l'écoulement et à réduire l'érosion des sols.

La figure 17 rappelle le principe général d'action de cette première catégorie d'aménagements.

figure 17 :
Principe du micro-barrage semi-perméable.
(d'après Roose, 1986)

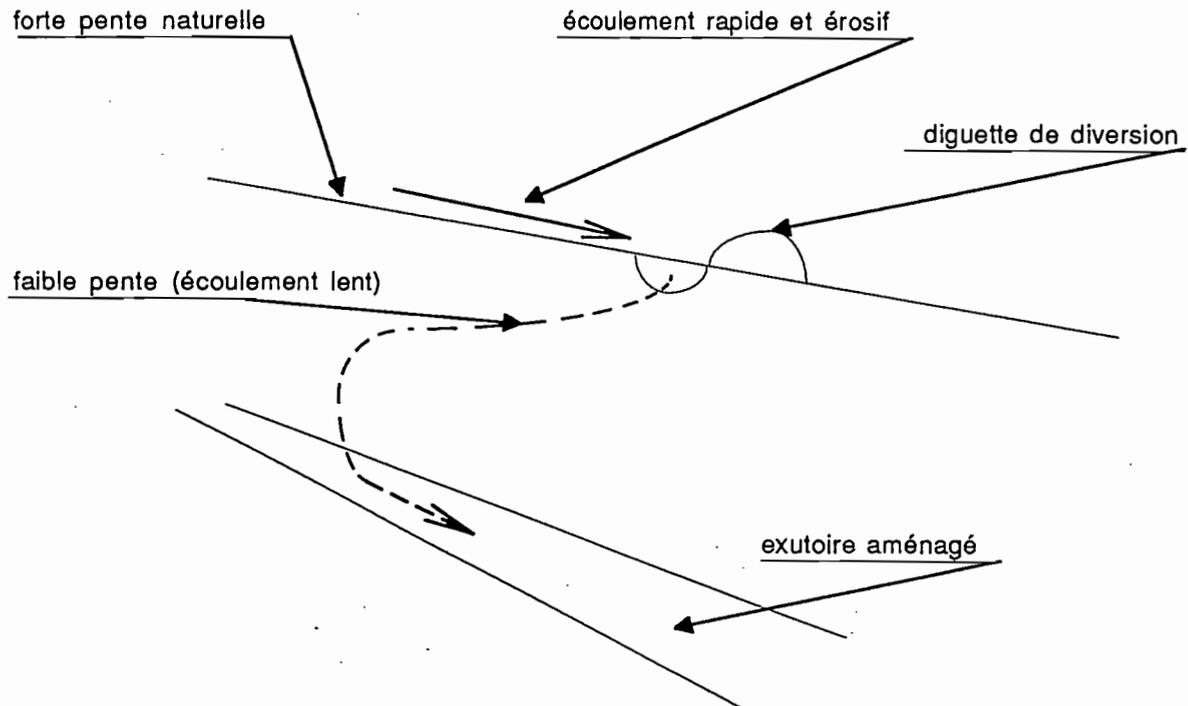


Des pédologues de l'ORSTOM, entre autres, ont étudié de façon approfondie l'intérêt agronomique de ces techniques de lutte anti-érosive. Il s'avère que l'impact sur la production agricole, globalement positif, varie selon la situation topographique de la parcelle. A cet égard nous rappelons les résultats de G. Serpantié qui affirme, à propos d'un essai de 7 hectares sur une pente sableuse d'un bassin versant de Bidi au nord de Ouahigouya, au Burkina Faso, que : *"S'il n'y a pas de grave période sèche de fin de cycle, l'amélioration des rendements liée à la meilleure satisfaction des besoins des plantes est très significative. L'accroissement du rendement en grain sec par rapport au témoin [non aménagé] est de l'ordre de 20 % en haut de parcelle, 40 % en bas de parcelle, à cause de l'effet cumulatif des cordons filtrants. Sous le climat actuel, cet accroissement serait assuré 2 année sur 3."* (Serpantié, 1988a, p. 11). Les études menées sur les bas-fonds, toujours sur ce même site, conduisent G. Serpantié à conclure à l'effet positif des digues semi-filtrantes sur les rendements de variétés de riz local. Ce constat est cependant mitigé par le fait que *"... des contraintes très diverses pèsent sur le processus d'élaboration du rendement (hétérogénéité des itinéraires techniques) qui réduisent considérablement l'espérance de rendement au niveau de l'aménagement global."* (Serpantié, 1988b, p. 12). A cette observation l'auteur rattache la mauvaise rentabilité monétaire de ces aménagements et rappelle l'intérêt d'agir sur les pentes des bassins versants, et pas seulement dans les bas-fonds.

Les moyens financiers des organismes publics et de certaines organisations non gouvernementales, sans commune mesure avec ceux des villageois, leur ont permis de concevoir et de mettre à l'épreuve de nouvelles techniques plus sophistiquées.

L'idée générale est de canaliser l'eau que le sol est incapable d'absorber vers des exutoires naturels ou aménagés. Dans le même temps on cherche, comme le font les techniques traditionnelles, à limiter l'énergie érosive. Ici on empêche l'eau de prendre trop de vitesse en la stoppant à intervalles réguliers le long de la pente par construction de diguettes parallèles aux courbes de niveau (figure 18).

figure 18 :
Principe d'action des diguettes de diversion.
(d'après Roose, 1986)



Techniquement les résultats semblent satisfaisants, au moins sur certains points. On a en effet pu mesurer une meilleure recharge des puits à proximité d'aménagements de ce type ainsi que des teneurs en eau du sol plus élevées en tout point des sites aménagés, attestant d'une amélioration sensible de l'infiltration (tableau 10).

tableau 10 :
Humidité comparée entre zones aménagées en diguettes parallèles aux courbes de niveau (A, B, C) et une parcelle témoin non aménagée, exprimée en % de masse.
(d'après Mietton, 1986)

Localisation Profondeur	A	B	C	Non aménagé
0 - 10 cm	10,6	9,4	9,6	8,6
10 - 20 cm	13,6	11,7	11,8	10,3
20 - 30 cm	14,3	12	13,7	11,1

Il existe d'autres procédés que ceux dits mécaniques, beaucoup moins connus par les non spécialistes, certainement du fait de leur plus grande discrétion.

II - 1.2. Les procédés biologiques et les façons culturales.

Cette rubrique rassemble des pratiques qui ne sont pas à proprement parler des aménagements, au sens de la construction, mais qui le sont néanmoins si on considère leurs effets sur le ruissellement, comparables à ceux des aménagements bâtis.

M. Mietton est à l'origine d'essais sur les cultures associées. Le tableau 11 donne les résultats pour l'association mil-niébé.

tableau 11 :
Erosion comparée avec et sans association de culture.
(d'après Mietton, 1986)

année	1978 (mil seul)	1979 (mil+niébé)
indice annuel d'agressivité des pluies	362	232
coefficient de ruissellement annuel moyen	14,10%	18,20%
érosion (t/ha/an)	1,43	0,91

Cette pratique a deux effets :

- l'érosion diminue, et ce de façon suffisante pour que la réduction de l'indice d'agressivité de la pluie n'explique pas à lui seul cette baisse,
- le niébé, plante rampante, protège contre l'érosion pluviale, dit "effet splash", et piège les particules transportées ; le coefficient de ruissellement augmente sensiblement.

L'encroûtement du sol et l'entraînement de la terre fine sont donc limités, mais dans le même temps l'eau s'écoule plus facilement hors de la parcelle au détriment de l'infiltration.

Signalons que cet usage est diversement répandu selon les ethnies et que le but initial et primordial de l'opération consiste, pour le paysan, à diminuer les risques de mauvaises récoltes en années à pluviométrie défavorable, à assurer une production accrue les bonnes années, et non à lutter contre l'érosion.

Le paillage des terres de cultures (photo 1, page 50) est pratiqué très inégalement sur un même terroir malgré tous ses aspects bénéfiques. Comme l'association de cultures il réduit l'érosion pluviale, donc la battance, et retient les particules fines. En outre il limite l'évaporation et apporte une fumure organique aux cultures tout en favorisant la vie microbienne. L'emploi non systématique de cette méthode tient principalement à une trop grande concurrence entre les différentes utilités de ce matériel végétal : les pailles sont en priorité destinées à la construction -toitures, clôtures-, à la cuisine ou au chauffage en saison fraîche.

photo 1 :
Paillage d'une parcelle de culture.
 (d'après Chleq, 1984)



Le sarclage, émiettage de la couche superficielle cultivée, mérite d'être évoqué, quoique les techniques diffèrent selon les ethnies et la force de travail disponible localement. Cette préparation du sol réduit l'érosion en augmentant considérablement la rugosité du couvert. L'eau est piégée dans la parcelle : l'humidité du sol et l'infiltration augmentent. L'efficacité du système est améliorée lorsqu'y est associé le buttage. Pour assurer leur pérennité, il est nécessaire de maintenir en bon état et de régulièrement renouveler ces aménagements.

Si nous partons maintenant du principe que l'érosion dite diffuse, en tête de bassin versant, est stoppée nous pouvons alors envisager une action anti-érosive plus en aval, ainsi que la récupération de l'eau en excès pour la réutiliser à des fins agricoles, pour l'élevage ou pour l'alimentation humaine.

II - 2. Stockage des crues, lutte anti-érosive localisée dans les bas-fonds.

Suivant l'action prioritairement envisagée, l'aménagement des bas-fonds revêt des caractéristiques particulières. S'il s'agit de lutter contre l'érosion les micro-barrages sont équipés de digues déversantes ou filtrantes, ce qui n'est pas le cas quand leur fonction est uniquement le stockage des crues. De plus les barrages de stockage d'eau n'arrêtent pas forcément que les flux de surface. On distingue ainsi trois grandes catégories de barrages :

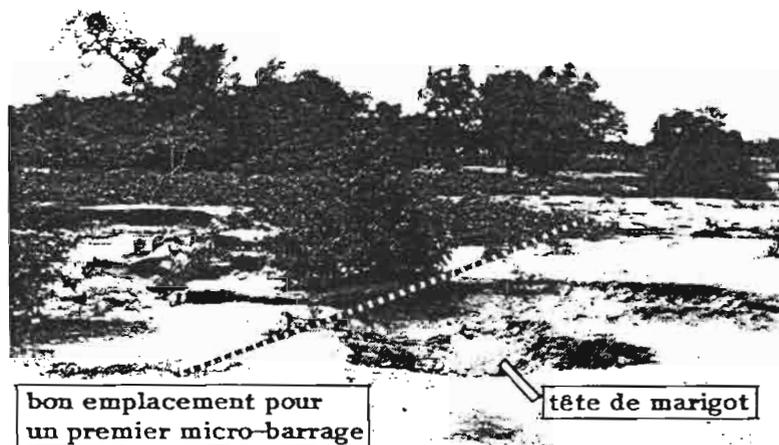
- barrages de surface,
- barrages de sable,
- barrages souterrains.

Nous évoquerons successivement dans cette partie, pour chaque type de barrage, le but général de l'ouvrage et les conditions d'implantation, le principe de construction et les aménagements annexes qui peuvent être associés à la retenue pour faciliter la mise en valeur de l'eau ainsi gardée.

II 2.1. Les barrages de surface.

Ils sont de loin le type de barrage le plus courant à travers le monde, et tout particulièrement au Sahel. Selon les sites, ils remplissent à la fois ou séparément le rôle d'agent de lutte contre l'érosion et de réserve d'eau. Pour atteindre une efficacité maximale, il est souhaitable d'associer les deux fonctions pour chaque ouvrage ou de placer plusieurs ouvrages sur un même talweg. On comprend en effet aisément que si l'objectif unique est de stocker de l'eau, on cherche à placer la retenue le plus en aval possible sur le talweg, pour augmenter simultanément la quantité ruisselée captée et le volume disponible de stockage. Dans cette situation l'eau conserve au départ des ravines toute son énergie potentielle et l'érosion hydrique continue son travail de dégradation des terres. Il est souvent préférable d'attaquer le mal à sa source en multipliant le nombre de petites digues, de façon à stopper la formation des ravines le plus en amont possible, quitte à obtenir une même quantité d'eau stockée mais divisée en plusieurs bassins. La photo 2 illustre un emplacement choisi sur la base de ce double objectif.

photo 2 :
Emplacement choisi pour un futur barrage anti-érosif.
 (d'après Chleq, 1984)

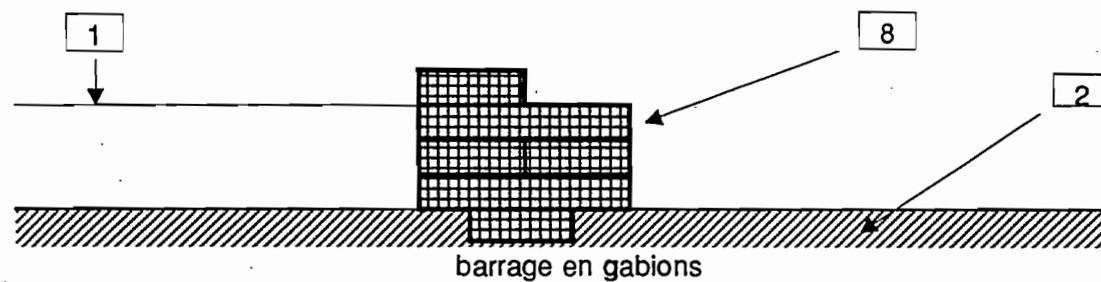
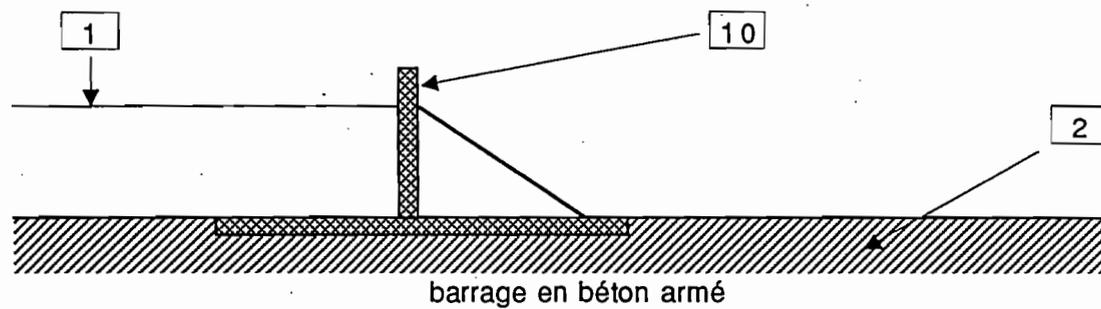
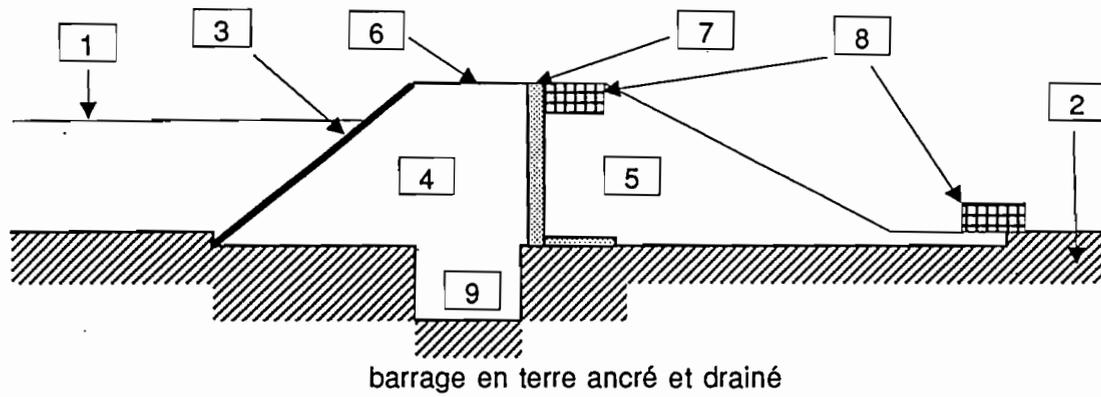
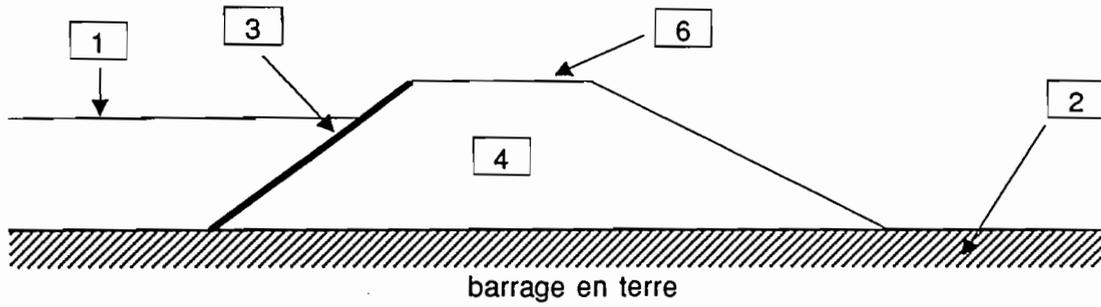


La construction des digues varie dans le principe de mise en place et dans le choix des matériaux, qui influe lui-même sur le coût d'investissement de l'ouvrage. La méthode la plus développée consiste à élever la digue en étapes successives, réparties sur plusieurs années. Ce choix repose sur les principes suivants :

- l'investissement est étalé dans le temps,
- les risques de destruction par des crues violentes sont minimisés car le débordement est plus facilement possible,
- en cas de rupture les pertes financières et les conséquences morales sont moindres,
- l'alluvionnement est progressif.

Parmi les différents types de digues présentés sur la figure 19, le gabionnage reste celui qui autorise le plus aisément ce fractionnement de la construction que nous allons succinctement décrire.

figure 19 :
Les différents types de barrages de retenue d'eau.



légende

- 1 : niveau lors des hautes eaux
- 2 : substratum
- 3 : parement amont renforcé d'une protection anti-batillage
- 4 : terre compactée (argile)

- 5 : massif de blocs rocheux
- 6 : passage empierré
- 7 : drain filtre
- 8 : gabion
- 9 : ancrage dans le socle
- 10 : mur de béton armé

Les gabions sont des paniers, confectionnés de grillage de fil de fer, remplis de pierres (photo 3, page 54). Une tranchée est creusée dans laquelle une première rangée de gabions assure l'assise de l'ensemble (photo 4). Des rangées sont ensuite empilées sur cette fondation (photo 5), avec la possibilité d'augmenter chaque année la hauteur de la digue par ajout d'un étage de gabions (photo 6).

Quel que soit le matériau de construction, l'expérience a montré qu'un déversoir de crue s'avère utile pour protéger l'ensemble du barrage de dégâts souvent onéreux.

Le rôle anti-érosif des micro-barrages est en général bien rempli. L'effet obtenu est semblable à celui des diguettes : apparition progressive d'un alluvionnement en amont de la digue, blocage de la fuite du sol et de l'érosion en ravines.

Le stockage de l'eau dépend principalement de l'imperméabilité du substratum, mais aussi du matériau constitutif de la digue. Les gabions laissent filtrer l'eau lentement. On leur associe parfois une couche d'argile imperméable sur la face amont, lorsqu'il est impératif de créer une réserve durable. En cas de forte imperméabilité du terrain, l'eau stagne un long moment derrière la digue. Elle peut être utilisée à des fins agricoles, pour l'irrigation, ou pour l'abreuvement des animaux, mais sa qualité sanitaire -bactériologique notamment- la rend impropre à la consommation humaine. L'évaporation contribue de plus à faire disparaître cette réserve, et ce d'autant plus rapidement que la surface d'évaporation est grande.

Si la perméabilité du sol favorise une infiltration rapide, le barrage permet alors une recharge de la nappe alluviale. Il n'en reste pas moins que la surface qui s'est trouvée momentanément en eau est favorable à la culture de végétaux, grâce aux dépôts de limons et à l'augmentation temporaire de l'humidité du sol.

La construction d'un puits à l'aval du barrage permet éventuellement de récupérer une partie de l'eau infiltrée. La connaissance des volumes et du débit alors disponibles passe par une étude du contexte hydrogéologique local : épaisseur de la nappe aquifère, conditions aux limites, conditions d'exutoire, porosité, perméabilité, gradient hydraulique. L'eau est dans ce cas préservée des pollutions occurrentes en surface et consommable par l'homme, dans les limites où sa qualité physico-chimique intrinsèque l'autorise.

Avant de passer à l'étude des barrages d'inferoflux, écoulement souterrain de la nappe alluviale, nous voudrions rappeler que le principe de tous ces aménagements n'est pas nouveau, mais copié sur des techniques anciennes traditionnelles. A ce propos Bonvallot évoque les "tabias" et "jessour" de la Tunisie du sud, représentés sur la figure 20 (page 55), en insistant sur le fait que "*Les techniques ne sont pas propres au Sud tunisien. Elles ont été mises en oeuvre dès l'Antiquité, partout en zone aride et semi-aride, chaque fois que le climat ne garantissait pas la régularité des récoltes*" (Bonvallot, 1986, p. 165). Rien n'a donc été inventé, mais tout a simplement été amélioré grâce aux matériaux et matériels modernes, d'ailleurs souvent coûteux.

II - 2.2. Les barrages de sable.

Ces aménagements trouvent leur milieu de prédilection dans les régions granitiques ou gneissiques. Les averses de forte intensité qui interviennent en saison des pluies arrachent des matériaux aux massifs rocheux et le ruissellement les emporte dans les vallées. Les argiles et les limons les plus légers sont emportés sur de longues distances, laissant derrière eux le sable qui se dépose dès que le débit diminue. Le dépôt a lieu préférentiellement derrière des barrières de roches non altérées, comme le montre la figure 21 (page 56). Ce barrage naturel arrête le sable mais aussi le flux souterrain engendré par les fortes pluies et qui se prolonge après la disparition de l'écoulement de surface. L'objectif des barrages de sable est d'améliorer ou de recréer de toute pièce ce stockage momentané d'eau en un point donné.



photo 3 :
Le gabion : cage de grillage rempli de blocs rocheux.
 (d'après Chleq, 1984)



photo 4 :
Tranchée assurant l'assise du barrage en gabion.
 (d'après Chleq, 1984)



photo 5 :
Digue d'un barrage en gabions après la première campagne.
 (d'après Chleq, 1984)



photo 6 :
Augmentation du volume du barrage par ajout de gabions.
 (d'après Chleq, 1984)

figure 20 :
Le principe des tabias du Sud tunisien.
(d'après Bonvallot, 1986)

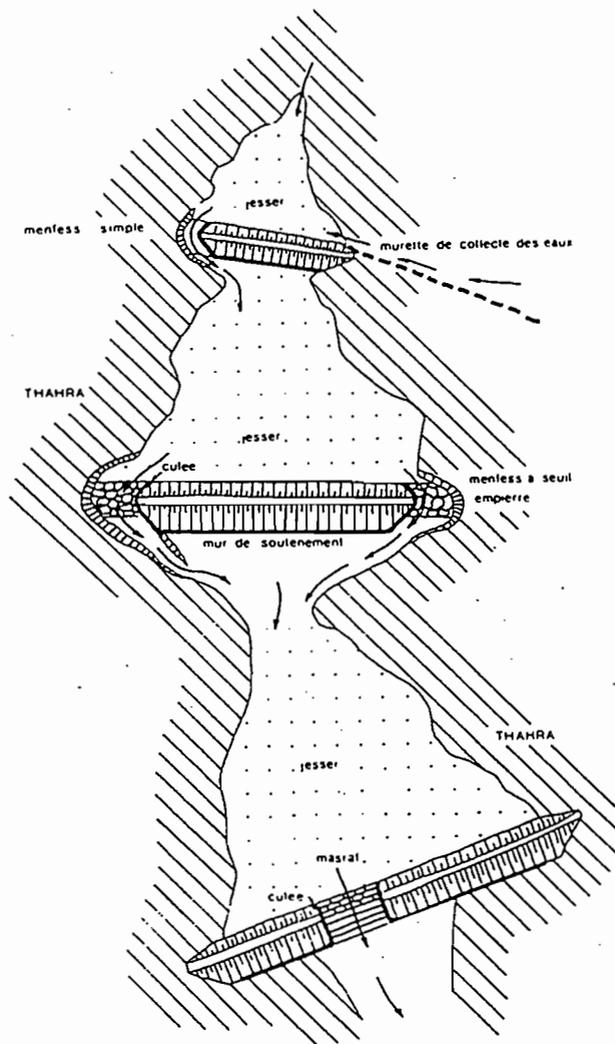
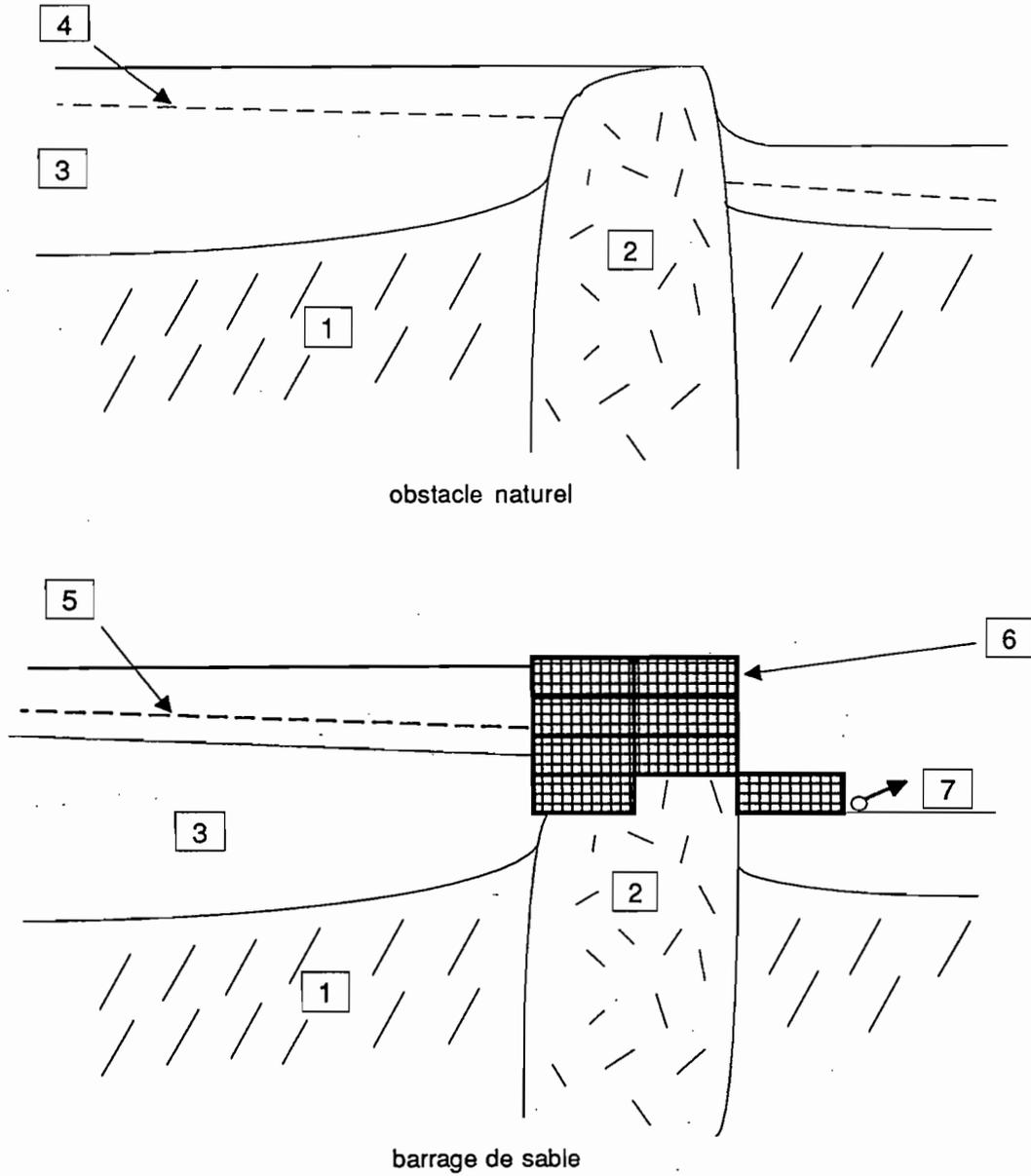


figure 21 :
Principe du barrage de sable.
(d'après Guiraud et al., 1990)



légende

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 : substratum imperméable | 5 : niveau piézométrique relevé |
| 2 : obstacle rocheux naturel | 6 : gabions |
| 3 : nappe aquifère | 7 : source |
| 4 : niveau piézométrique initial | |

Les techniques de construction et leurs caractéristiques sont ici les mêmes que pour les barrages au sol -gabions, sacs plastiques remplis de sable, de cailloux ou d'argile, murs bétonnés-, avec un impératif supplémentaire : la digue doit être suffisamment résistante pour supporter la poussée du sable en amont.

Le niveau de l'eau se situe sous le sol et l'évaporation est réduite. Une distance minimale entre la surface du sol et le niveau de la nappe de 3 à 5 mètres -suivant les auteurs- assure la non remontée des sels dans le profil et des pertes par évaporation nulles.

Le volume disponible dépend de la géométrie du bassin de stockage mais aussi, et contrairement aux barrages de surface, de la porosité des alluvions qui le contiennent. Pour une digue de même longueur et de même hauteur la réserve disponible est donc inférieure à celle d'une retenue au sol. L'eau est extraite par un puits de faible profondeur implanté directement à l'amont de la digue. Ce puits est construit suivant les techniques habituelles détaillées au chapitre sur l'exploitation des eaux souterraines. Les caractéristiques hydrologiques de l'aquifère -perméabilité, gradient hydraulique- doivent être déterminées in-situ pour connaître le débit disponible.

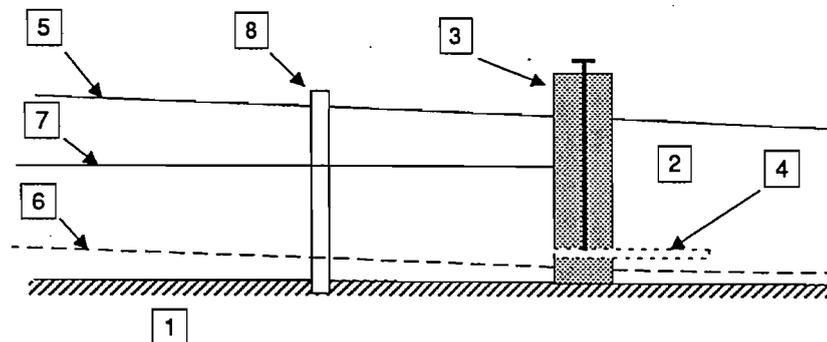
Les inconvénients sanitaires liés aux eaux de surface -maladies hydriques, pollution par les activités humaines- sont ici aussi éliminés et l'eau peut alors à la fois servir à la consommation des plantes, des animaux et des hommes.

R. Guiraud donne des exemples de telles réalisations au Cameroun, en Somalie, au Botswana, et en zone sahélienne seulement au Tchad (Guiraud et al, 1990). Il faut cependant garder à l'esprit la nécessité d'un contexte géologique particulier propre à certaines régions qui limite les possibilités d'implantation de ces ouvrages.

II - 2.3. Les barrages souterrains.

Lorsque le dépôt alluvial sableux existe déjà en un lieu donné, le même objectif que celui des barrages de sable peut être atteint par la construction de barrages souterrains. La digue est bâtie pour relever le niveau de la nappe aquifère, comme indiqué sur la figure 22, qui descend considérablement en fin de saison sèche.

figure 22 :
Principe du barrage souterrain.
(d'après Guiraud et al., 1990)



légende

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 : substratum imperméable | 5 : niveau du sol |
| 2 : dépôts alluviaux | 6 : niveau piézométrique avant aménagement |
| 3 : barrage | 7 : niveau piézométrique après aménagement |
| 4 : captage pour irrigation en aval | 8 : puits pérenne |

la géologie du site est déterminante par sa capacité à former un réservoir naturel sur lequel il n'y aurait plus qu'à ajouter une bonde. L'implantation des digues est envisageable au droit de rétrécissements de vallées, là où les alluvions sont peu épaisses, le substratum et les épontes imperméables.

Les techniques de construction varient mais les étapes restent les mêmes :

- creusement des alluvions jusqu'au substrat imperméable,
- construction de la digue dans l'excavation obtenue suivant différents procédés - argile compactée tenue dans un film plastique ou non, murs maçonnés-,
- mise en place d'un drain à la base de la digue ou creusement d'un puits en amont de celle-ci pour l'exploitation de la réserve.

Comme pour les barrages de sable, le volume disponible et le débit d'exploitation sont conditionnés par les caractéristiques hydrologiques de la nappe : porosité, perméabilité et gradient hydraulique. Il en va de même pour l'exploitation : conditions sanitaires meilleures que celles des barrages de surface et utilisation possible pour l'homme, ses animaux et ses cultures.

Le contexte géologique conditionne ici aussi la rentabilité de tels ouvrages. Andreini et Bourguet insistent sur ce point en signalant les conditions préalables à la construction de tels barrages -souterrains, mais aussi barrages de sable- (Andréini & Bouguet, 1984) :

- un écoulement peu profond et suffisant, au moins temporairement, pour que le débit disponible se justifie en regard de l'investissement représenté par l'ouvrage,
- une perméabilité assez forte et des épontes imperméables pour assurer une exploitation maximale des réserves de la nappe et des pertes minimales,
- un site permettant la mise en place d'une digue dont la largeur et surtout la hauteur n'augmentent pas démesurément le coût de la construction.

L'ensemble des ouvrages que nous venons d'évoquer s'adresse aux eaux de surface en mouvement. Il existe aussi des réserves naturelles d'eau stagnante, dont l'efficacité peut être accrue.

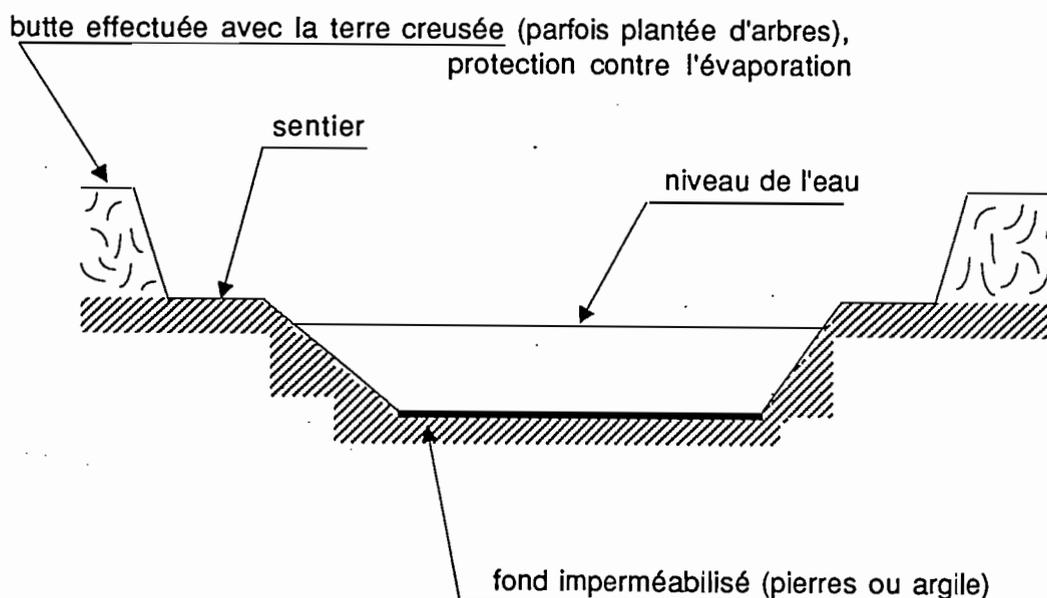
II - 2.4. L'amélioration des stockages naturels d'eau : les boulis.

Comme nous l'avons précisé dans la première partie de ce travail, les mares sont des bas-fonds endoréiques où l'eau finit sa course quand elle ne rejoint pas un cours d'eau pérenne. Le niveau de ces mares baisse au fur et à mesure que s'avance la saison sèche, jusqu'à assèchement total du point d'eau. Dans le paragraphe sur l'exploitation des eaux souterraines, nous évoquons certaines pratiques traditionnelles d'accès à la nappe alluviale. Il existe un autre procédé basé sur une idée très ancienne : le prolongement de la durée de vie des mares, appelée technique du "bouli".

Le principe est de créer une réserve de surface directement accessible par les hommes et les animaux, contrairement aux puits, tout en limitant l'évaporation. Pour cela on opère de la façon suivante (figure 23) :

- approfondissement de la mare naturelle, d'où réduction du rapport surface d'évaporation sur volume stocké,
- réduction de l'effet du vent en entourant la mare avec la terre récupérée et par la plantation d'arbres,
- si possible imperméabilisation du fond par de l'argile, des pierres plates ou un film plastique.

figure 23 :
Schéma de principe du bouli, mare améliorée.
(d'après Chleq, 1984)



Cet aménagement suppose toutefois la présence d'une nappe peu profonde et est soumis aux mêmes conditions d'utilisation que les barrages superficiels : qualité de l'eau impropre à la consommation humaine.

F. Gadelle formule par ailleurs quelques remarques sur l'intérêt et les limites à l'utilisation de ces mares améliorées : *"Du fait de leur utilisation seulement deux à trois mois par an, les mares sont plus chères que les puits (...). La courte durée de vie des mares limite les risques de surpâturage en cas d'année à faible pluviométrie"* (Gadelle, 1989, p. 77). L'assèchement progressif de ces mares est donc à la fois responsable d'un avantage, éviter la dégradation du milieu par une exploitation trop intensive tout au long de l'année, et d'un inconvénient, à coût de construction identique le système est moins rentable car il ne peut être utilisé que quelques mois par an. Cette solution offre donc, par ses caractéristiques opposées à celles des puits, une alternative complémentaire de la mise en valeur des eaux souterraines.

III - MOBILISATION DES EAUX SOUTERRAINES.

Les techniques d'exploitation de la ressource souterraine sont variées et très répandues en Afrique occidentale. Cette section tâche de répertorier l'ensemble des méthodes actuellement employées dans ce domaine.

III - 1. Principe et conditions d'utilisation.

Nous ne reviendrons pas sur la localisation des gisements et la détermination de leur intérêt pour l'exploitation, ces problèmes ont été traités dans la première partie. Rappelons simplement que les réservoirs d'altérites, de fissures ou de fractures conditionnent, par leurs caractéristiques propres de fonctionnement hydraulique, le moyen le plus approprié à la mobilisation de l'eau : puits ou forage. Ces deux grands types d'ouvrage présentent autant de variantes qu'il existe de situations naturelles différentes.

III - 2. Atteindre l'eau.

III - 2.1. Les puits.

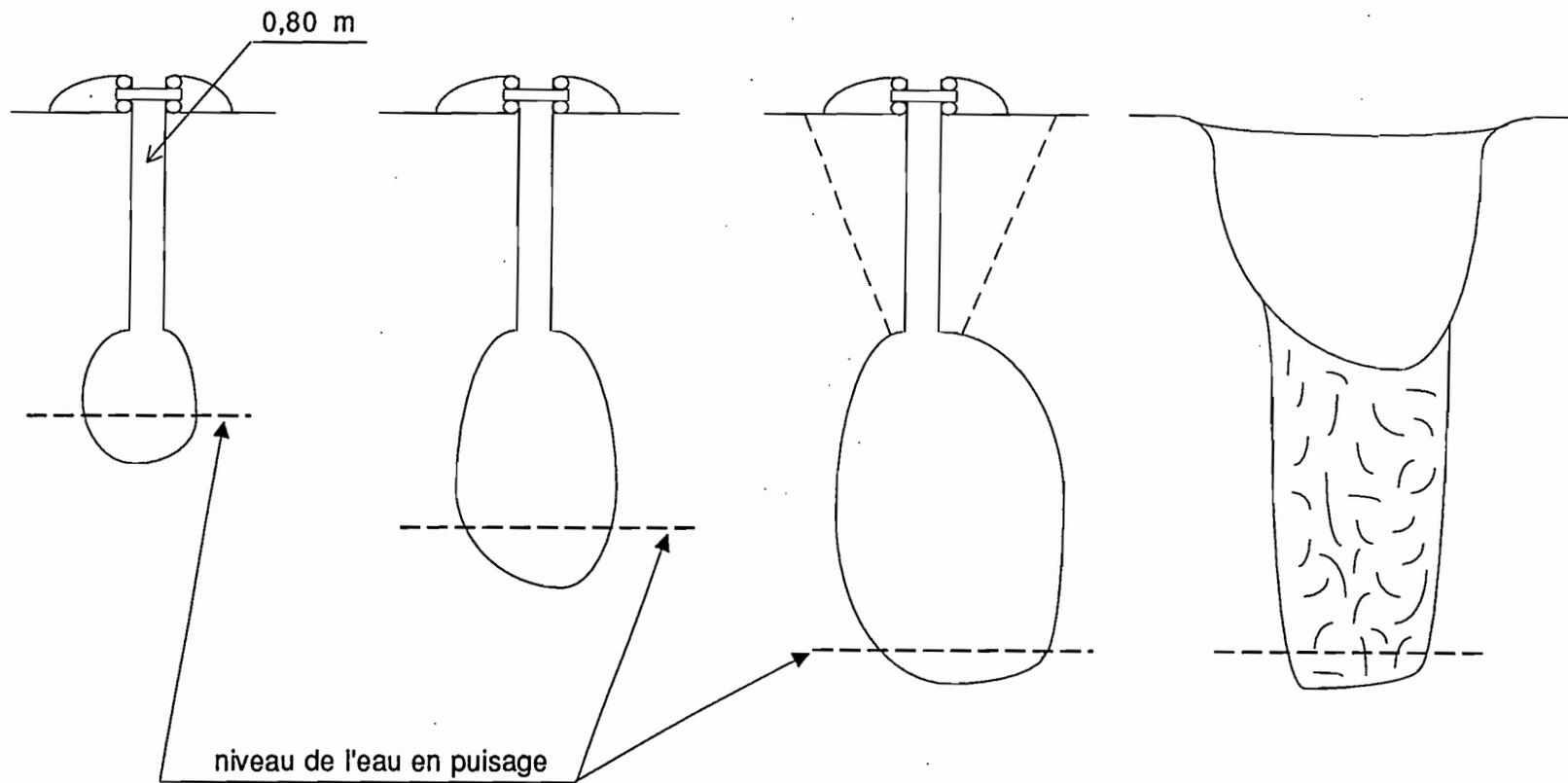
"Un puits est une excavation, en général cylindrique, permettant d'atteindre et d'exploiter le niveau aquifère le plus proche du sol ou nappe "phréatique" (Lemoine, 1980, p. 51). construire un puits suppose donc de descendre dans la terre. Les civilisations rurales traditionnelles sahéliennes craignent l'inconnu des profondeurs, toutes n'osent pas, ou ne peuvent pas, creuser des puits. Le métier originel de puisatier est souvent casté et seules certaines ethnies, notamment nomades, creusent et utilisent les puits depuis fort longtemps.

L'eau peut être captée dans une nappe alluviale ou dans le fonds d'une dépression. On parle alors de puisard temporaire. Le niveau dans ces ouvrages suit le rythme des saisons et l'amplitude des variations est souvent forte. Pour pallier l'assèchement progressif au cours de la saison sèche, le puits est régulièrement recreusé. Les terrains sableux se prêtent difficilement à ce genre d'exploitation et évoluent rapidement selon le schéma de la figure 24 (page 61), pour souvent se solder par l'effondrement du puits.

Ces puisards sont recreusés chaque année en fonction des besoins. Cette technique semble bien adaptée aux conditions locales : la multiplication du nombre des trous permet de compenser les faibles débits naturels de ces nappes, peu perméables et peu épaisses.

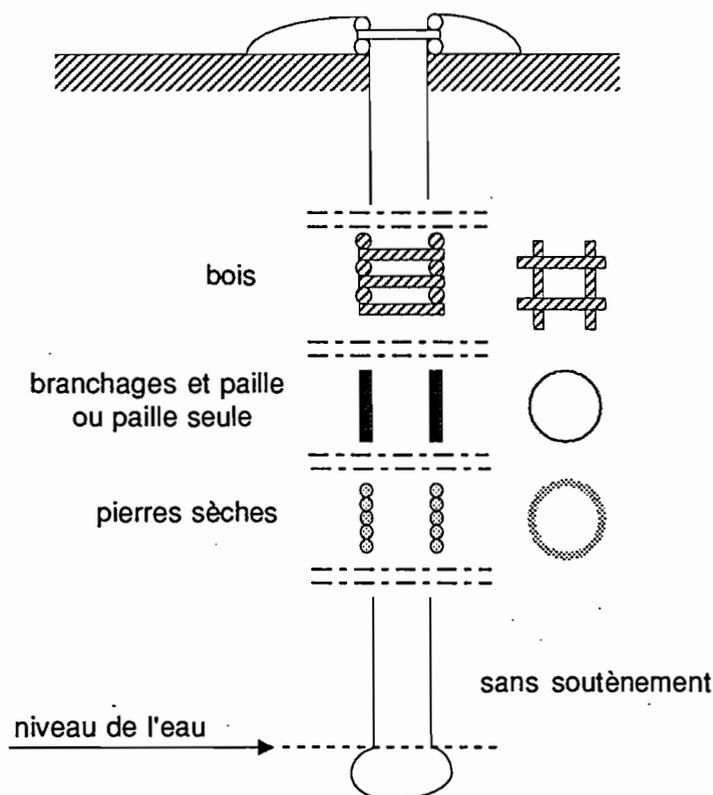
Il existe dans les Niayes sénégalaises, un type particulier d'ouvrage pour atteindre la nappe : la séanne. Il s'agit d'un puits dont un des côtés est creusé en plan incliné. Les utilisateurs descendent jusqu'au fond de la séanne par ce passage et remplissent leurs récipients, sans avoir recours à des moyens d'exhaure.

Figure 24 :
Schéma de l'évolution d'un puits en terrain friable
au fur et à mesure de la baisse du niveau de l'eau.
(d'après Lemoine, 1980)



Dans les régions plus arides encore où l'eau ne se rencontre qu'exceptionnellement en surface, les autochtones creusent des puits pérennes à de très grandes profondeurs. Le trou est renforcé, aux endroits de mauvaise tenue uniquement, par des matériaux divers en fonction de leur disponibilité sur place (figure 25).

figure 25 :
Schéma des différents modes de soutènement des parois.
(d'après Lemoine, 1980)



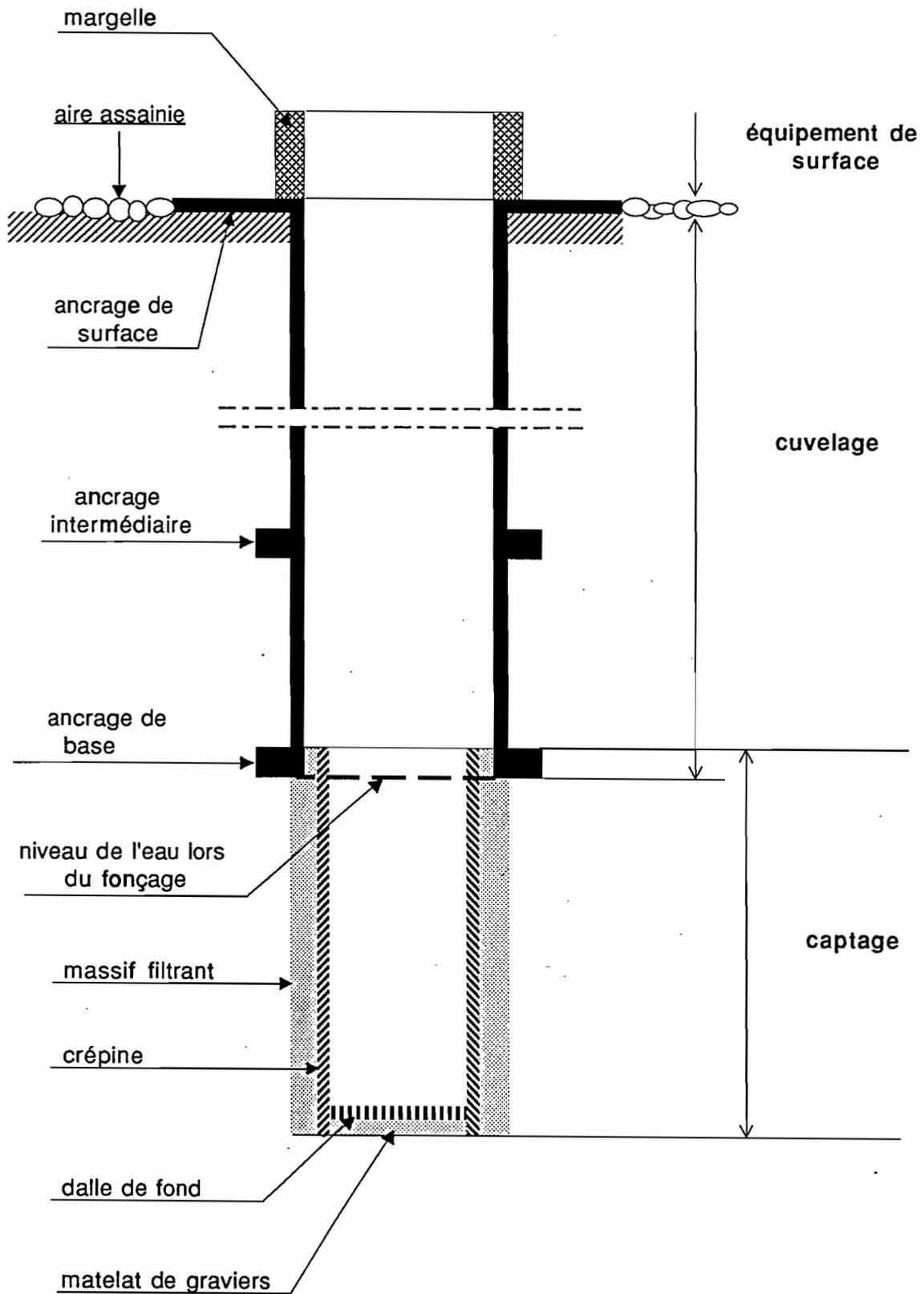
L'installation de ces puits est tributaire de la qualité du terrain qui ne peut être ni trop dur -fonçage impossible-, ni trop friable -risques d'éboulements-. Dans la plupart des cas, ces ouvrages ne permettent d'exploiter la nappe que très partiellement : le creusement sous l'eau reste difficile et la moindre baisse du niveau conduit à l'assèchement.

Dans de nombreux cas où l'eau peut être de première nécessité, ces méthodes traditionnelles sont apparues insuffisantes, ou insatisfaisantes, et ont été améliorées ou remplacées par des techniques modernes de construction, adaptées aux difficultés de la géologie locale.

Le puits moderne est composé de 3 éléments principaux (figure 26, page 63) :

- le cuvelage qui protège des éboulements,
- le captage qui doit permettre les arrivées d'eau sans ensablement,
- l'équipement de surface destiné à éviter les chutes et la pollution de l'aquifère, et à faciliter l'exploitation dans de bonnes conditions sanitaires.

figure 26 :
 Les différents éléments constitutifs des puits modernes.
 (d'après Lemoine, 1980)



Trois étapes de la construction sont dépendantes de la nature du terrain :

- a) le fonçage du trou,
- b) le cuvelage des parois,
- c) la réalisation du captage,
- d) la mise en place des équipements de surface,

que nous étudierons successivement en y ajoutant un paragraphe consacré à l'entretien et aux réparations éventuelles.

Le tableau 12 répertorie les différentes techniques utilisées pour chaque phase en fonction de la dureté et de la granulométrie des terrains à traverser.

tableau 12 :
Choix des procédés de construction des puits
en fonction de la nature du terrain.
 (d'après Lemoine, 1979)

Nature du terrain	fonçage	cuvelage	captage
terrains instables : sable bouillant, argile kaolinique	houe, pelle	havage (< 30 m)	base du cuvelage havage à niveau constant
terrains tendres : (sable argileux, grès tendre, marne tendre, latérite, calcaire tendre arène grenue, schiste altéré)	pioche, pic, barre à mine	havage, béton armé ou métallique	base du cuvelage havage manuel avec épuisement du puits
terrains durs : (grès, marne indurée, calcaire et dolomie, schistes à filons de quartz, granite peu altéré)	marteau piqueur	béton armé ou métallique	mise en place en remontant après le fonçage, avec épuisement
terrains très durs : (grès compact, calcaire dur, quartzite, granite sain fissuré)	explosif	pas de cuvelage mais ancrage de surface de 3 m minimum	trou nu, pas de colonne de captage

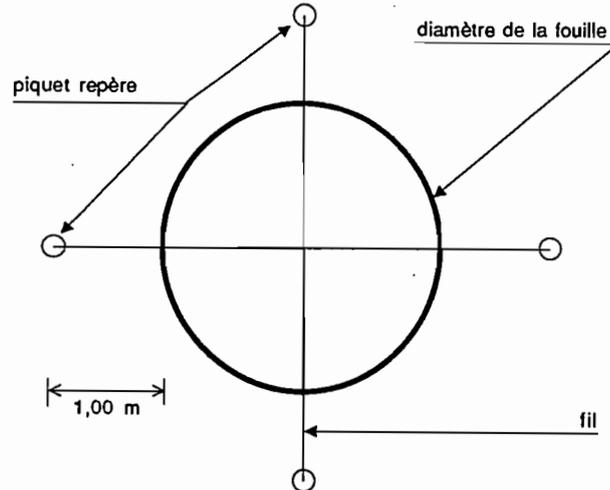
a) Le fonçage :

L'opération consiste à atteindre le niveau de l'eau, elle se déroule donc en terrain sec. La forme circulaire généralement donnée aux trous offre deux avantages techniques : une résistance maximale à la poussée du sol en place et une surface minimale de paroi.

Avant même que la fouille ne commence, il est impératif de repérer l'axe d'excavation, pour pouvoir s'y repérer à n'importe quel moment des travaux et assurer ainsi la verticalité du puits. Le repérage se fait par la mise en place de piquets permettant

de retrouver le centre du cercle creusé, comme indiqué sur la figure 27. Tout au long du chantier, un gabarit est laissé au fond de la fouille pour garantir une progression régulière conforme aux dimensions du futur cuvelage.

figure 27 :
Repérage de l'axe de fouille d'un puits.
(d'après Lemoine, 1980)



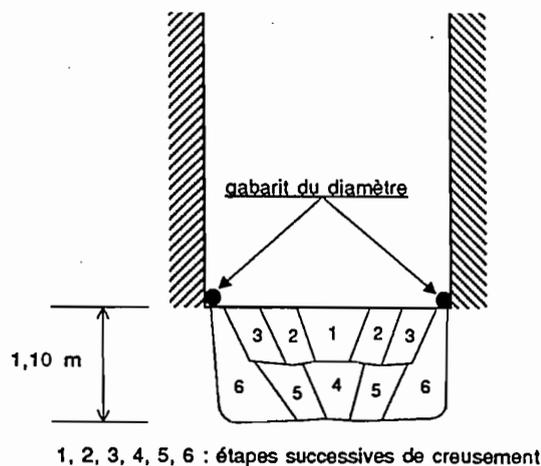
Si les caractéristiques du terrain ou la profondeur de la nappe ne sont pas connues avec précision, il peut être nécessaire de forer un avant-trou d'un diamètre de l'ordre de 0,90 à 1 m.

Suivant la nature du terrain -tendre, instable, dur, très dur- les techniques de fonçage varient.

- terrain tendre :

Ce terme de "tendre" rassemble les formations facilement attaquables avec un outillage simple -pic, barre à mine, houë- que sont les sables consolidés, les argiles, les grès ou schistes tendres et les altérites de granite ou de gneiss. Ce creusement ne requiert pas de personnel qualifié et progresse rapidement, de l'ordre de 1m / jour à deux personnes. La méthode employée est exposée sur la figure 28.

figure 28 :
Etapes de creusement d'un puits.
(d'après Lemoine, 1980)



Lorsque certains passages, ou l'ensemble des horizons rencontrés, se désagrègent facilement, on parle de terrains instables et l'opération se complique.

- terrains instables :

Les sables dunaires très fluides se révèlent l'exemple le plus représentatif et le plus difficile à négocier de cette variété de formations, mais le problème peut aussi se poser dans les terrains évoqués ci-dessus.

La seule technique efficace pour les sols bouillants reste le "havage". Le soutènement des parois est installé avant le creusement du fond. Une fois les buses enfoncées, les déblais sont retirés jusqu'à la base de la protection en place. Le travail peut être rapide : 1 à 2 m / jour et parfois plus.

Dans les cas intermédiaires, où les zones instables ne constituent que des passées dans le profil, il faut disposer le cuvelage, protection contre les éboulements, au fur et à mesure de l'excavation. Cette opération est délicate et longue. Les volumes à extraire de la fouille retardent l'avancement et il faut compter une journée pour progresser de 20 à 50 cm.

- terrains durs :

Les grès, les calcaires, les dolomies, les terrains cristallins peu altérés font partie de cette catégorie. Le marteau-piqueur apparaît alors très utile pour éviter des efforts considérables et une baisse de rendement, inévitable si l'on utilise les outils précédemment cités. Il permet d'atteindre une vitesse de 1 m / jour, mais son emploi réclame une main d'oeuvre qualifiée.

La tenue des formations permet en général de progresser d'une dizaine de mètres avant que la mise en place du cuvelage soit nécessaire.

- terrains très durs :

Il peut s'agir là de calcaires, de grès, de quartzites ou toute autre roche destructible uniquement à l'aide d'explosifs. Ce travail qui demande un personnel très qualifié se déroule en deux étapes : la perforation des trous de mine et le minage.

La vitesse de progression varie avec les types de roches de 0,5 à 1 ou 2 m / jour. L'extraction des déblais peut en effet demander beaucoup de temps et le marteau-piqueur s'avère même parfois utile.

Certaines roches ayant tendance à se désagréger ou à se fissurer au contact de l'air, il est quelquefois obligatoire d'installer un cuvelage.

L'évacuation des déblais est accomplie à l'aide de seaux ou de "cuffats" dont la capacité varie entre 10 et 100 l. Selon les possibilités locales, la remontée est manuelle -simple corde ou treuil- ou mécanisée -treuil à moteur-, et ce faisant plus ou moins rapide.

Ces déblais sont épandus à bonne distance du chantier pour ne pas le gêner. Les géologues et hydrogéologues demandent en général que soit portée une attention particulière à la mise à l'écart d'un échantillon pour chaque mètre de terrain traversé, en vue de la reconstitution du profil géologique.

b) Le cuvelage :

Cette opération a pour but de tenir les parois naturelles du puits par des buses cylindriques, ajustées au diamètre d'excavation, et d'assurer ainsi sa longévité. La nature de la formation conditionne la technique à employer, mais quelle que soit cette dernière, certaines règles sont à respecter dès le départ.

De la qualité des matériaux constitutifs des mortiers ou des bétons dépend la durée de vie de l'ouvrage. Les éléments qui entrent ici en jeu sont les sables, les graviers, le ciment et les fers.

Les sables et graviers peuvent être trouvés dans les alentours du chantier. Leurs propriétés ne conviennent cependant pas toujours à la construction des puits.

Les sables siliceux, exempts d'argile et de matières organiques, correspondent le mieux aux exigences de préparation des mortiers et bétons. Les sables éoliens -dunaires-, fins et souvent argileux, ne satisfont pas ces impératifs, contrairement aux sables alluviaux. Les bas-fonds recèlent donc le matériau le plus propice à la construction des puits. Un simple tamisage suffit à éliminer les matières organiques éventuelles.

La dureté et la résistance sont les qualités principales demandées aux graviers. Les matériaux calcaires et siliceux conviennent parfaitement, ce qui n'est pas toujours le cas des matériaux ferreux d'origine latéritique qui se désagrègent facilement en présence d'eau. La granulométrie recherchée peut être obtenue par concassage de blocs de pierres et tamisage des poussières et des morceaux trop fins.

Les ferrures et le ciment doivent répondre à des normes strictes, toujours dans le souci d'assurer la pérennité du puits. Les armatures métalliques, fers cylindriques lisses en acier doux, doivent être entièrement noyées dans le béton, qui peut être lui-même vibré, pour diminuer autant que possible les risques de corrosion.

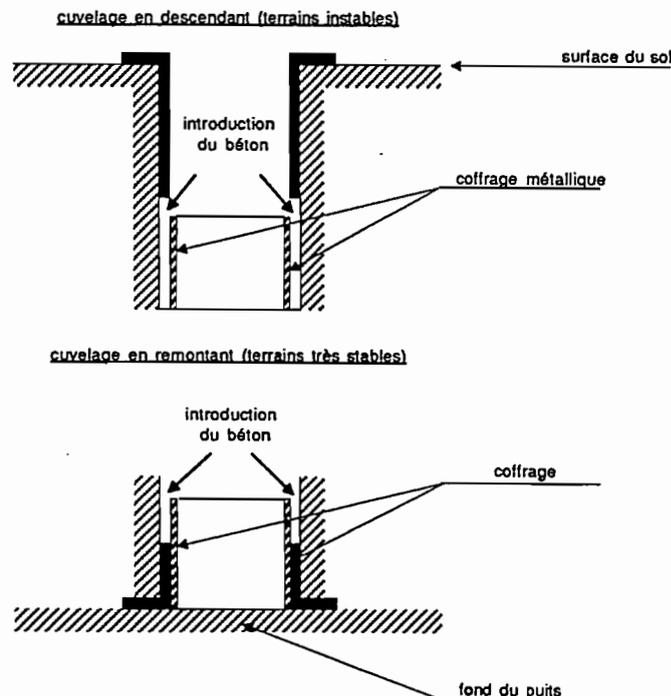
Les mortiers et bétons remplissent respectivement les fonctions d'enduit protecteur et de structure rigide du cuvelage.

Les diamètres des puits d'Afrique francophone ont tendance à se normaliser à la valeur 1,80 m. Les diamètres 1,40 m, très fréquents dans les débuts de la construction des puits dits "modernes", sont quasiment abandonnés aujourd'hui. On ne les rencontre que dans les cas où la fréquentation du point d'eau est modérée -habitat dispersé-. Le diamètre 1,80 m offre en effet un confort accru lors du chantier, pour un coût peu supérieur, et 10 à 12 personnes peuvent y puiser simultanément.

Les techniques de cuvelage sont variées mais les méthodes les plus courantes demeurent le béton armé et le cuvelage métallique.

Dans le cas du béton armé on distingue un procédé de cuvelage en remontant ou en descendant, suivant que le terrain est stable ou non. Le déroulement logique de l'opération diffère alors comme le montre la figure 29.

figure 29 :
Schémas d'exécution du cuvelage à la descente ou en remontant.
(d'après Lemoins, 1980)



Quelle que soit la situation, il convient de réaliser en surface un ancrage solide de la colonne de buses. Sa fonction est de supporter le poids de tous les éléments du cuvelage, ce poids diminuant avec le temps au fur et à mesure que le terrain s'appuie sur les parois du puits. Cet ancrage se prolonge tout le long de l'ouvrage pour consolider le béton et assurer l'unité des éléments juxtaposés. Lorsque la profondeur est grande il peut être utile de fixer des ancrages intermédiaires dans les zones les plus stables du terrain traversé.

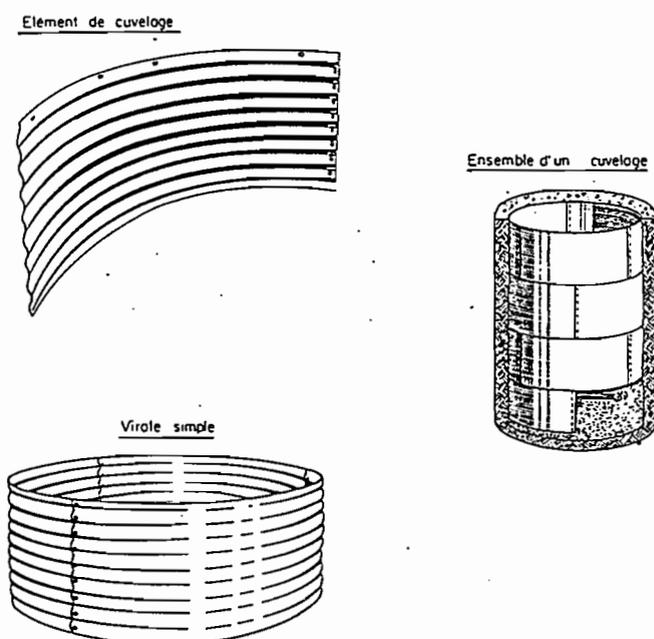
Quand les conditions locales -accès difficile, sables, graviers, eau- interdisent l'emploi du béton, le cuvelage métallique offre une solution de rechange intéressante. Son domaine de mise en oeuvre se limite cependant aux eaux non agressives.

Le principe est d'assembler des éléments de 0,60 m de hauteur pour former ce qui s'appelle une "virole". Ces viroles emboîtées constituent l'ensemble du cuvelage représenté sur la figure 30. Un minimum de béton est cependant nécessaire à la réalisation de l'ancrage de surface sur 1 m de profondeur.

figure 30 :

Les cuvelages métalliques, l'exemple du cuvelage ARMCO.

(d'après Lemoine, 1980)



La méthode Friry longtemps utilisée, qui consiste à noyer une armature métallique entre deux couches de mortier projetées successivement, tend à disparaître. Sa faible résistance à la poussée des terrains et sa dégradation rapide ne peuvent plus concurrencer la fiabilité et la durée de vie des constructions en béton armé actuelles.

Des techniques nouvelles sont mises sur le marché, telles les lamelles de bois collées ou le P.R.V. (Polyéthylène Renforcé de fibres de Verre), dont l'intérêt est limité, vu leurs prix prohibitifs, aux cas délicats d'exploitation d'eaux très agressives.

c) *Le captage :*

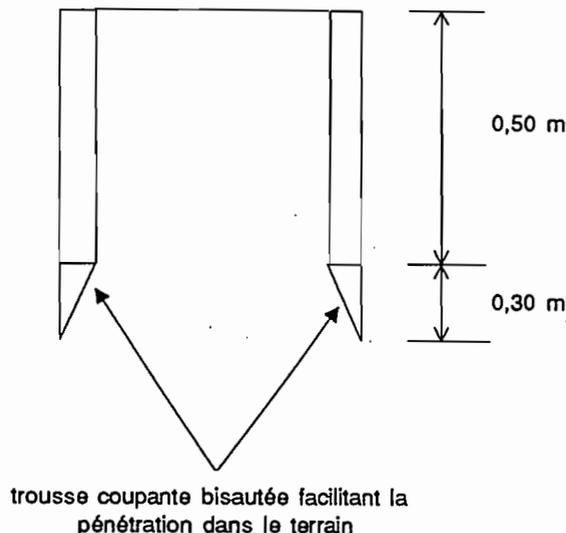
Le captage est la partie immergée de l'ouvrage destinée à capter l'eau de l'aquifère. Les arrivées d'eau doivent être freinées au minimum pour assurer le meilleur débit. Le passage de certaines particules du terrain doit être autorisé pour éviter le colmatage derrière les parois captantes. Deux problèmes peuvent alors se poser :

- l'ensablement par passage d'un trop grand nombre d'éléments fins et le risque consécutif d'affouillement du terrain,
- le colmatage dû à la concentration derrière le captage de particules fines qui imperméabilisent alors le puits.

Tout l'art de la réalisation d'un captage efficace et durable réside dans l'obtention du meilleur compromis entre facilité du passage de l'eau et arrêt des éléments du terrain. Cet arrangement n'étant jamais définitif, il faut surveiller ce captage et prévenir toute modification de son comportement avant que le prix des travaux de réparation ne concurrence celui d'un nouveau puits. Dans cette optique, cette partie doit être indépendante du reste de l'ouvrage pour permettre les éventuelles opérations.

Une colonne de buses, perforée de trous appelés "barbacanes", compose la crépine. Ces buses sont liées les unes aux autres pour former un tout. Le moulage des éléments de la colonne se fait en général à la surface, solution la plus facile mais qui suppose la présence sur le chantier d'un matériel de levage puissant capable de supporter environ une tonne. Dans le cas contraire le captage doit être coulé directement au fond du puits et son diamètre légèrement diminué pour autoriser l'enlèvement du moule extérieur. La seule technique envisageable pour la descente de la colonne est alors le havage. La forme de la buse du fond est dans ce cas particulière pour faciliter la pénétration dans le terrain (figure 31).

figure 31 :
Buse de fond pour captage.
(d'après Lemoine, 1980)



Si la granulométrie du terrain est exceptionnellement fine, des crépines en acier, plus performantes, arrêtent le sol et laissent passer l'eau. Inadaptées aux eaux agressives, leur prix et leur relative fragilité les réservent aux situations les plus embarrassantes.

Pour éviter la remontée dans l'ouvrage des particules fines, le fond du puits est fermé par une dalle reposant sur un lit de graviers.

Entre la crépine et le terrain naturel, il est souhaitable d'intercaler un massif de gravier d'une dizaine de centimètres d'épaisseur pour arrêter le sol et laisser passer l'eau. Ce massif est l'élément le plus instable du système qui demande une surveillance et un entretien des plus assidus.

Comme pour le fonçage, la manière dont se déroule le chantier change selon que le support géologique est stable, instable, tendre ou dur.

Pour les secteurs instables, le havage à niveau constant reste la seule solution qui diminue autant que possible les risques d'effondrement. La crépine est entièrement assemblée avant le début du creusement pour augmenter la charge sur la trousse coupante et faciliter l'enfoncement de l'ensemble, au fur et à mesure que les déblais sont retirés. Ce procédé nécessite du matériel et un personnel spécialisés.

Quand les horizons captés sont tendres mais suffisamment stables, le havage se fait à la main : l'eau est pompée continuellement et le fond du puits maintenu sec.

La hauteur totale de la crépine doit, de plus, dépasser l'épaisseur stricte à capter afin de pallier les enfoncements fréquents dans ces types de formations.

Dans les terrains de bonne tenue le havage n'est pas obligatoire. La colonne est descendue à la fin du fonçage, il suffit d'extraire l'eau au fur et à mesure des travaux. La crépine et le massif filtrant ont l'avantage de prévenir les dangers possibles de dégradation de l'horizon capté. Dans les roches très dures -granites, quartzites, calcaires compacts- foncées à l'explosif, le soutènement et le massif filtrant ne sont pas justifiés.

Pour les nappes peu profondes il peut être économique et plus rapide de se servir du cuvelage comme captage.

Il est ensuite possible d'améliorer les caractéristiques hydrauliques du puits, notamment son débit. Le principe est ici d'augmenter le pourcentage des vides du terrain et de faciliter ainsi la circulation de l'eau dans les interstices alors plus grands et plus nombreux puisqu'on élimine les particules les plus fines. Il suffit de créer des surpressions et dépressions successives dans l'eau, à l'aide d'un cuffat à soupape ou d'une pompe, pour attirer le sable fin dans le fond du puits. L'eau sableuse est ensuite extraite à la surface. Quand l'eau extraite est à nouveau claire, on recommence le pistonnage et ainsi de suite jusqu'à obtention du débit désiré. Il est impératif d'opérer progressivement, que ce soit pour l'agitation de l'eau ou pour le pompage, pour ne pas détruire l'ensemble de la structure du terrain aux alentours du captage. Un développement mené dans de bonnes conditions se traduit par une augmentation notable du débit pour un même rabattement -débit spécifique- et autorise donc une exploitation plus intense et plus longue du point d'eau.

Il existe à l'heure actuelle des matériels mécaniques de creusement. Leur avantage indéniable est la rapidité d'exécution du chantier, mais leur prix est prohibitif pour la majorité des villages. Deux méthodes méritent cependant d'être citées : la tarière, outil rotatif, et la benne trépan, outil de battage.

L'utilisation de la tarière n'est envisageable que dans les terrains tendres de bonne tenue. Le puits doit être équipé dans la journée, au moins pour ce qui est du captage, pour éviter les risques d'effondrement. Ce type de matériel présente de plus l'inconvénient de ne pouvoir forer qu'à une profondeur limitée à 30 m, ce qui restreint son usage aux nappes superficielles dont le niveau est au maximum à 20 m sous le sol.

La benne trépan fore, quant à elle, jusqu'à 100 m de profondeur et dans des terrains beaucoup plus durs. Les facteurs limitants de ces chantiers sont le poids considérable de l'ensemble de la machine, qui ne permet pas l'accès en tout lieu, et son prix encore supérieur à celui de la tarière.

d) Les équipements de surface :

La fonction de cet ensemble d'éléments que nous allons décrire maintenant est d'assurer une utilisation commode du puits dans les meilleures conditions de sécurité et de salubrité. Le plus couramment on rencontrera les parties suivantes : la margelle, le trottoir, l'aire assainie et l'abreuvoir.

La margelle sert à prévenir la chute des hommes et des animaux, faciliter l'usage du puits et réduire les risques de pollution de l'ouvrage par des éléments exogènes.

Le trottoir, espace bétonné autour du point d'eau, est théoriquement destiné à assurer la propreté des alentours du point d'eau. Ce trottoir doit être prolongé par un dallage de pierre, appelé "aire assainie", pour éviter l'apparition d'un borbier consécutif au piétinement des hommes et des animaux dans l'eau de puisage.

L'abreuvoir qui accompagne cet ensemble doit être dimensionné en fonction des besoins locaux et du débit disponible -deux impératifs pas toujours compatibles- et construit suffisamment loin du puits pour garder les animaux à distance respectable, et limiter ainsi les risques de pollution.

e) Entretien et réparations :

Un puits évolue constamment parce que le niveau de l'eau qu'il contient n'est jamais le même, qu'il est souvent fort sollicité de la part des utilisateurs. Tous les éléments sont susceptibles de subir des dégradations. La solution la plus économique est l'entretien par des visites régulières de l'ouvrage mais cette opération est dans la pratique rarement réalisée dans les temps voulus. Il faut donc envisager les réparations à effectuer.

Rappelons les deux dangers qui menacent la partie captante de l'ouvrage : l'ensablement et le colmatage. Le premier problème peut être résolu par curage. Il faut aussi vérifier que la dimension des barbacanes est bien adaptée à la granulométrie du terrain pour éviter le passage continu des éléments fins dans le puits et la création de cavernes dans la formation géologique.

Le décolmatage doit être réalisé avec un matériel spécialisé et des procédés chimiques -polyphosphates, acide- ou physiques -pompage intensif, agitation- qui nécessitent l'intervention d'un personnel qualifié.

Dans les zones instables la colonne captante a tendance à s'enfoncer. La seule solution est alors de rajouter au sommet de celle-ci de nouvelles buses.

Les cas de détérioration du cuvelage sont rares, si sa mise en place s'est faite dans les règles. Le remède à toute fissuration ou cassure passe par le doublage des buses détériorées à l'aide de buses de diamètre inférieur.

Le principal problème relatif aux équipements de surface est l'apparition rapide d'un borbier qu'il suffit de combler par un remblai régulièrement renouvelé.

Enfin, les variations du niveau des nappes, notamment en condition de sécheresse, peuvent aboutir au tarissement du puits qui ne peut être remis en eau que par un approfondissement du captage.

III - 22. Les forages.

a) *Les forages manuels :*

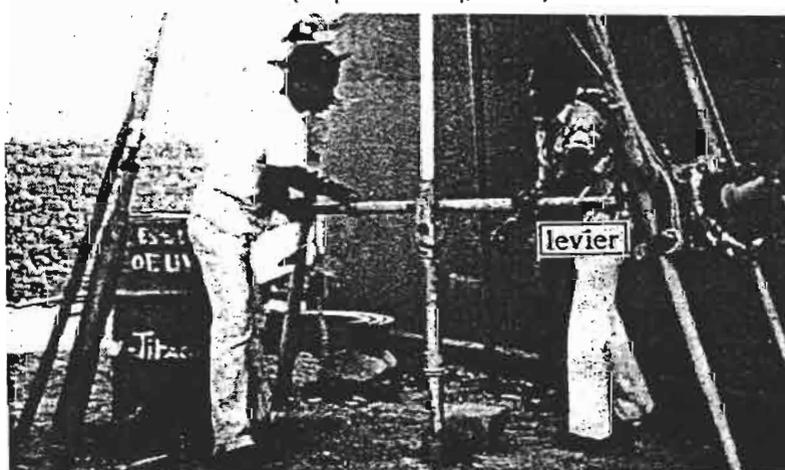
Dans le langage courant, le mot "forage" sous-entend implicitement que l'on parle d'ouvrages de grande profondeur creusés avec l'aide de moyens mécaniques puissants. Nous devons cependant évoquer ici l'existence de techniques manuelles de recherche d'eau profonde, dont les caractéristiques sont intermédiaires entre celles des puits et celles des forages mécaniques.

Le diamètre d'excavation, les étapes du chantier, les matériaux disposés dans la terre sont identiques à ceux des forages mécaniques. Seul le procédé de foration diffère, l'énergie étant fournie par des hommes. La photo 7 illustre ce propos. A ce titre le forage manuel n'est envisageable qu'en terrain relativement tendre.

photo 7 :

Forage manuel à la tarière par deux personnes.

(d'après Chleq, 1984)



La différence principale entre puits, forage mécanique et forage manuel tient au degré de technicité. On envisagera le forage manuel là où la nappe est trop profonde pour être atteinte par un puits et où le secours d'une foreuse n'est pas techniquement obligatoire.

b) *Les forages mécaniques :*

Les forages mécanisés font appel à des matériels et des matériaux souvent chers, nécessitant des infrastructures lourdes à gérer et des moyens financiers considérables. Pour toutes ces raisons nous pensons que le classement de ces méthodes dans le domaine dit de "la petite hydraulique rurale" n'est pas justifié. En effet ces technologies ne sont maîtrisables à aucun stade des projets, ou même des chantiers, par les villageois eux-mêmes.

Nombreux sont les auteurs qui considèrent malgré cela que les forages mécaniques font partie des techniques de petite hydraulique, dans le sens où le point d'eau créé est géré par le village. Ce point de vue nous oblige à consacrer un paragraphe aux forages mécanisés ; paragraphe dans lequel nous n'insisterons que sur les particularités des forages mécaniques qui les différencient des méthodes précédemment décrites.

Le but et le principe de fonctionnement du forage sont identiques à ceux du puits : atteindre et capter une nappe aquifère. Seuls les procédés de creusement et les caractéristiques dimensionnelles qui en découlent diffèrent.

Les forages mécaniques ont été développés pour se départir des limites de l'énergie humaine qui restreignent les profondeurs accessibles et la vitesse des chantiers. De ce fait, différentes méthodes ont été créées en fonction des caractéristiques géologiques particulières à chaque région. Deux grands types de foreuses mécaniques existent ainsi :

- le marteau fond de trou, dit MFT,
- le rotary.

Le MFT fonctionne comme un marteau-piqueur, par concassage des roches. L'outil de percussion est entraîné par de l'air comprimé, envoyé par l'intérieur des tiges creuses qui le relient à la surface. Cet air sert aussi à la remontée des déblais de roche broyée. Cette technique convient aux formations géologiques dures et cohérentes.

Pour les roches tendres et friables, il est nécessaire de soutenir les parois du trou pour éviter les éboulements. On emploie alors le rotary dit "à la boue". Dans ce cas l'outil arrache les morceaux de roche par rotation. L'énergie de mise en rotation est fournie en surface par un moteur thermique, et transmise par un train de tiges à l'outil d'attaque. Par leur poids ces mêmes tiges appuient sur l'outil et assurent ainsi son enfoncement.

Tout au long du chantier, le trou de forage est rempli d'une boue dont la fonction est double : maintenir les parois en place, remonter les déblais à la surface.

Cette boue circule en effet en permanence. Elle est envoyée au fond par l'intérieur des tiges, sort par l'outil et remonte chargée des morceaux de roche broyée par l'excavation. Récupérée en surface elle est tamisée, nettoyée des déblais rocheux et réenvoyée dans le forage. En fin de forage et avant l'enlèvement de la boue un tubage est posé, destiné à protéger l'excavation des effondrements.

Dans tous les cas la mise en place du cuvelage, du captage et le développement d'un forage se déroulent de la même façon que pour un puits avec, cependant, des matériaux différents : P.V.C. ou acier.

Quelle que soit la technique employée le chantier fait appel à une main-d'oeuvre qualifiée et à des machines lourdes et coûteuses. Le diamètre des forages reste tel que l'extraction de l'eau ne peut se faire que par pompage ; l'emploi des seaux est proscrit.

Finalement les forages mécaniques ont pour avantage d'être rapides, "*quelques jours, contre 2 à 3 mois pour un puits*" (Lemoine, 1980, p.15), envisageables à toutes profondeurs et dans tous les types de formations géologiques. Les prix de revient des ouvrages sont tels que "*du point de vue de l'investissement, le puits ne le [le forage] concurrence plus aujourd'hui, que difficilement*" (Lemoine, 1980, p.15).

Par contre les chantiers doivent être menés par un personnel qualifié, donc non gérables par les populations rurales, qui dépendent par ailleurs entièrement de la qualité de fonctionnement d'un système de pompage mécanique, dont nous allons voir les limites dans le chapitre qui vient.

En effet, un inconvénient de la ressource en eau souterraine réside dans le fait qu'elle n'est pas directement accessible, contrairement aux eaux de surface. Ceci implique la nécessité d'introduire des techniques supplémentaires de mise à disposition en surface de cette eau profonde : les moyens d'exhaure.

III - 3. Extraire l'eau.

Aujourd'hui, les techniques d'exhaure vont du simple seau jeté dans le puits au bout d'une corde à la station de plusieurs pompes automatiques, équipées de sécurités électroniques.

Entre les deux existe une multitude de variantes : le choix est difficile. Les "spécialistes du développement" ne s'accordent pas tous quant à la solution la meilleure, c'est à dire la plus adaptée au contexte local. Les partisans du seau -traditionnels s'opposent aux constructeurs de stations ou bien encore aux expérimentateurs de la technologie solaire. Pour essayer d'y voir un peu plus clair et de se donner les moyens de comparer et de juger ces différentes techniques, nous proposons ici de faire un rapide aperçu de ce qui se fait actuellement dans le domaine de l'exhaure.

III - 31. Quelques méthodes traditionnelles.

Dans les régions sahéniennes, la corde et le seau demeurent le puisage traditionnel le plus connu. Le "seau" est en fait un récipient fabriqué avec une peau, une chute de chambre à air ou toute autre matière imperméable. Il est jeté dans le puits et remonté par une corde qui glisse sur le bord de la margelle.

Cette méthode est réputée assez polluante. A chaque fois que la corde est rejetée dans le puits, elle entraîne avec elle toute les particules qui s'y sont accrochées à la surface -déjections animales, terre, etc.-.

Ce procédé est parfois amélioré par l'installation d'un portique au-dessus du trou auquel est suspendue une poulie, ce qui permet d'éviter le frottement de la corde sur la margelle. Ceci n'empêche toutefois que très difficilement l'introduction de corps étrangers dans l'ouvrage.

Avant de parler des pompes manuelles, introduites après ces constats de pollution dans un but essentiellement sanitaire, nous aimerions apporter quelques compléments sur les méthodes traditionnelles. A travers le monde de nombreux procédés ingénieux ont été imaginés, sans être pour autant inefficaces, bien au contraire. Il nous paraît intéressant d'évoquer ces techniques, inconnues des régions sahéniennes de l'Afrique de l'ouest, mais qui pourraient offrir des alternatives simples et adaptées aux connaissances et aux pratiques des populations rurales.

Dans certains cas, le système de seau et de corde est simplement amélioré, comme en Inde où l'on utilise le rati, ou charki, représenté sur la figure 32a (page 75).

La civilisation égyptienne, où l'hydraulique est très développée, se sert de méthodes variées. Les figures 32b et 32c illustrent le système à balancier du chadouf et de la sakieh. Le contrepoids fixé à l'extrémité la plus courte facilite la remontée de l'eau. La corde ne traîne jamais sur le sol car elle reste en permanence attachée à la perche.

D'autres techniques font appel à l'énergie animale. La noria égyptienne, représentée sur la figure 32d, est entraînée par deux bovins. Les volumes d'eau extraits chaque jour sont très supérieurs à ceux sortis par l'homme, qui ne dépense en outre aucune énergie pour l'opération d'exhaure.

Malgré l'intérêt de ces procédés, personne ne s'y est intéressé pour essayer de les mettre en oeuvre dans les zones arides de l'Afrique de l'ouest. Les organismes de développement ont en effet dès le départ pris le parti de défendre les techniques issues de leurs pays d'origine, technologiquement avancés, fait qui se ressent sur les procédés proposés.

figure 32 :
Quelques procédés traditionnels d'exhaure.
 (d'après Commission Internationale des Irrigations et du Drainage, 1967)

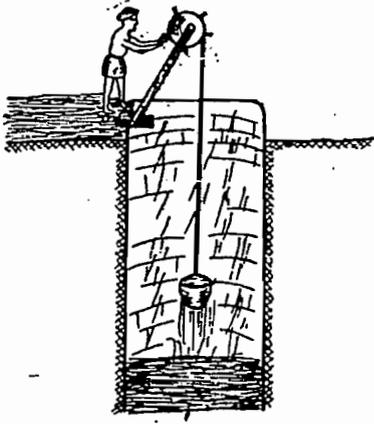


figure 32a : le rati, ou charki indien.

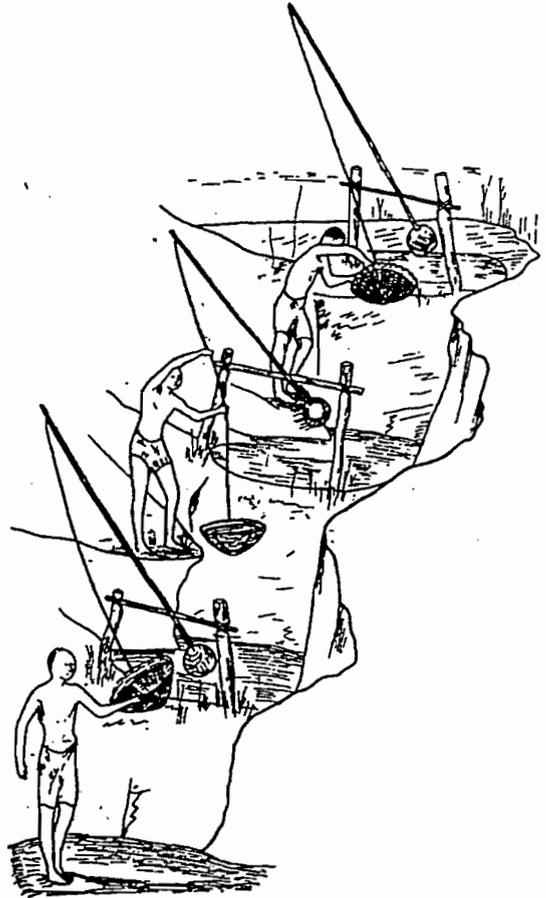


figure 32b : chadouf égyptien.

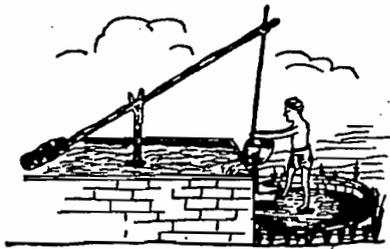


figure 32c : la sakieh égyptienne.

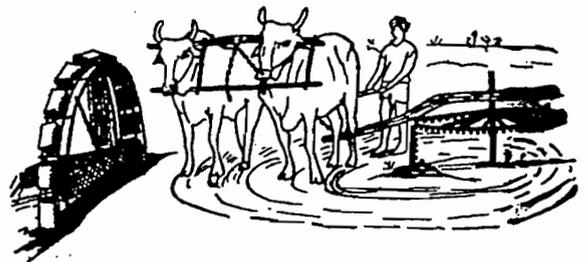


figure 32d : la noria égyptienne.

III - 32. La pompe à main.

Elle consiste en un dispositif mécanique d'aspiration de l'eau grâce à l'énergie humaine. Les trois parties suivantes la composent (figure 33, page 77) :

- la superstructure qui reçoit l'énergie humaine et la transmet au système,
- un système de transmission de cette énergie vers le dispositif de pompage,
- le mécanisme de pompage qui aspire l'eau et la refoule vers la surface.

Les caractéristiques des pompes manuelles sont variées et nous les avons répertoriées dans le tableau 13.

tableau 13 :
Différentes caractéristiques possibles des pompes manuelles.
(d'après Diluca, 1987)

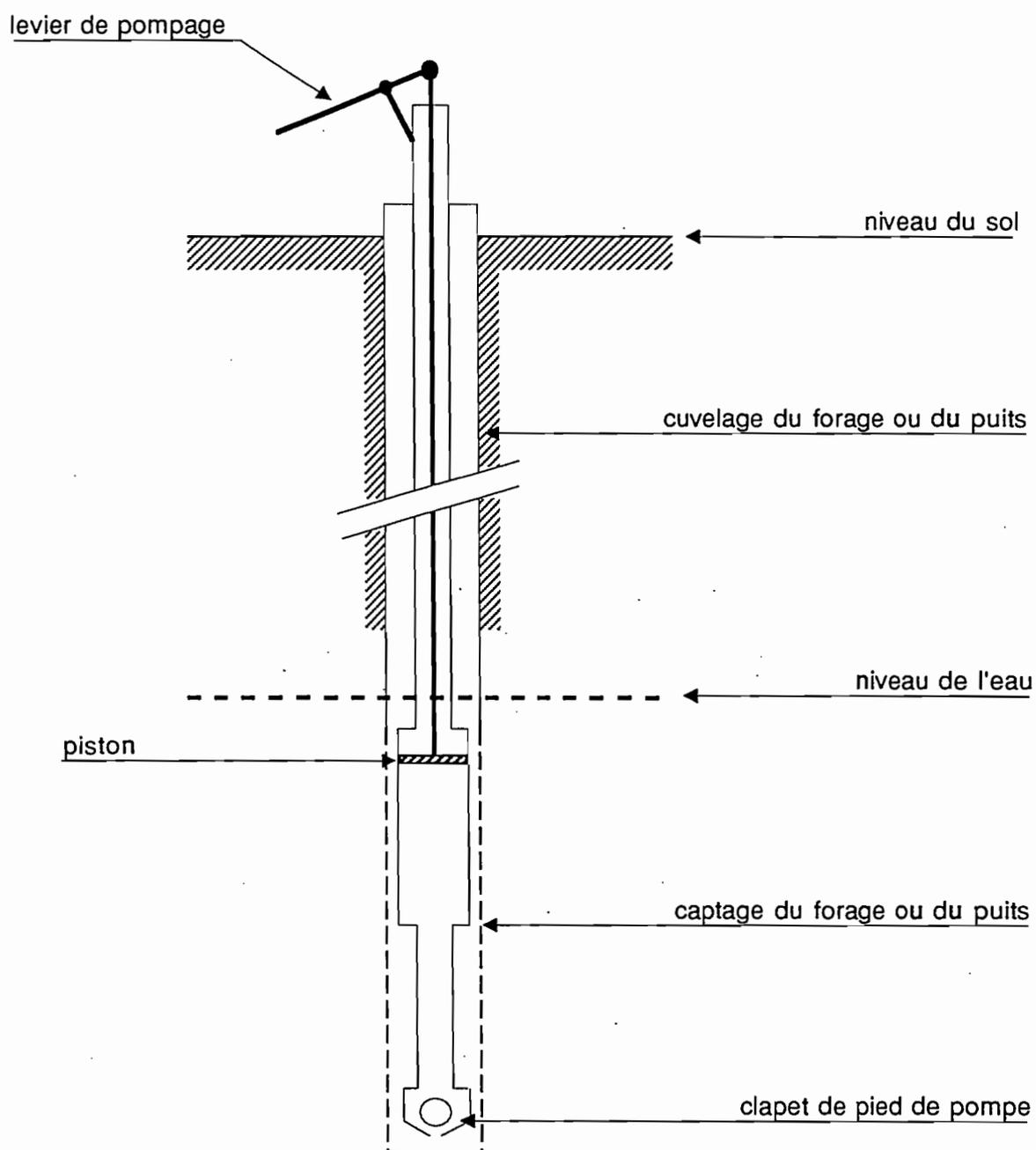
dispositif	option
pompage	cylindre/piston enceinte élastique (baudruche) rotor/stator
transmission	tringlerie câble chaîne (en tête) hydraulique (par tuyaux souples)
commande	levier volant manivelle

L'étude détaillée des différents systèmes serait trop longue. Nous nous bornerons à présenter les avantages et inconvénients de chaque type de pompe au tableau 14.

tableau 14 :
Avantages et inconvénients des différents types de pompes.
(d'après Diluca, 1987)

types de pompe	avantages	inconvénients
commande hydraulique	grandes profondeurs (max. 50 m), matériaux modernes (acier, inox, ...) éliminant les problèmes de corrosion, pièces d'usure en surface, installation et entretien à la portée des villageois, plusieurs pompes possibles sur un même ouvrage	mauvaise protection du piston, érosion par le sable des segments et bagues de guidage, pannes de réamorçage, éclatement de la baudruche, usure rapide des segments et bagues de guidage
piston et tringlerie	rustique, très simple, très robuste	rupture des tiges par oxydation, diamètre insuffisant et filetages fragiles, pompes lourdes non démontables par les villageois car nécessitant des moyens lourds de levage
hydraulique à commande mécanique	grandes profondeurs, pièces d'usure accessibles en surface, protection contre le sable, équipe légère d'intervention	fragilité de la tête (peu d'expérience)
rotor hélicoïdal	débit constant avec la profondeur, pas de tringlerie ni piston	mécanisme de tête compliquée et fragile (engrenages, joints, ...), effort important au démarrage car collage du rotor et du stator, usure du stator par sable : mauvaise étanchéité

figure 33 :
Principe de fonctionnement des pompes manuelles.
Exemple d'une pompe à tringle et piston.



Que ressort-il d'important de ce résumé ? Le gros problème des pompes est en fait leur fragilité. Dans l'ensemble, elles ne résistent ni au rythme de travail, ni à la corrosion qu'impose un milieu naturel rude ; et nous ne parlons ici que des problèmes strictement d'ordre technique. Il semble par ailleurs que la conception, la fabrication et l'installation aient tendance à être bâclées, ce qui ne joue pas en leur faveur (Diluca, 1987).

Certains systèmes proposent de remplacer la force de l'homme par des machines entièrement autonomes et entraînées par diverses sources d'énergie : vent, combustion de carburants, électricité, et même soleil.

III - 33. Les éoliennes de pompage.

Les pays sahéliens parcourus par les alizés semblent a priori favorables à ce type de machines. Quelques faits majeurs ne doivent cependant pas trahir la vigilance des projeteurs :

- les vents irréguliers -l'harmattan en particulier qui en pleine journée "souffle" très mal, par bouffée- ne permettent pas d'assurer une ressource constante,
- lors des perturbations, leurs vitesses très grandes risquent de causer de graves dommages,
- le mécanisme de l'éolienne est encore plus complexe que celui des pompes manuelles et nécessite un entretien soutenu.

Dans ce domaine les constructeurs font encore preuve d'imagination ; comme en témoigne la photo 8 (page 79). Rappelons à cet égard le rôle des éoliennes dans la marche vers l'ouest des pionniers du continent nord américain : nombreux sont les systèmes efficaces dans ces régions, qui pourtant connaissent des tornades violentes.

Le modèle "multipale lente" reste le plus répandu car son mécanisme est sobre et d'un entretien aisé et minimal. De plus la roue s'oriente en fonction de la vitesse du vent de façon à fonctionner à son rendement optimal et ne pas casser en cas de tempête.

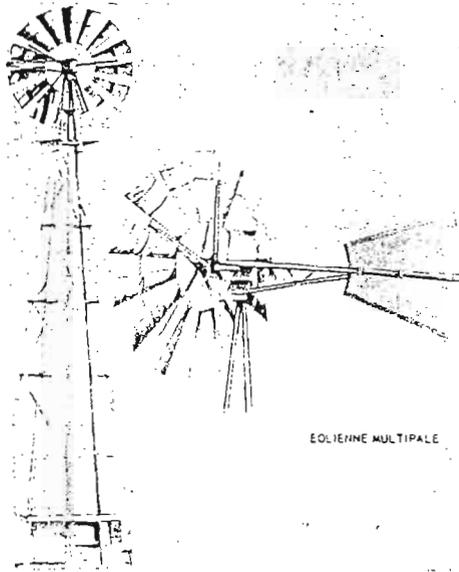
L'utilisation de la "tripale rapide", aérogénérateur, est limitée à la fabrication d'électricité, servant alors à l'alimentation d'un moteur électrique, entraînant lui même une pompe. Cet appareil sophistiqué nécessite la présence permanente d'un personnel qualifié pour son maintien en bon état et supporte difficilement les brusques variations de vitesse du vent.

Les performances modestes de la "Savonius", modèle adapté aux rudes conditions de l'Afrique de l'ouest, restreignent ses occasions d'emploi.

Quel que soit le type d'éolienne utilisé, le coût des installations reste souvent un obstacle à la multiplication des éoliennes.

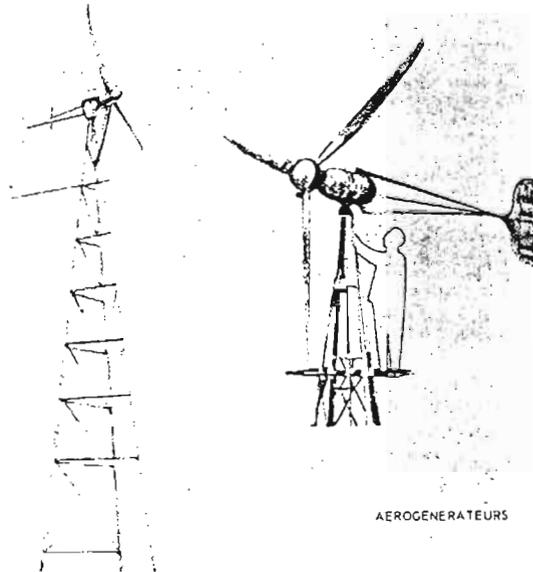
photo 8 :
Quelques éoliennes utilisées en Afrique de l'ouest.
(d'après SOGREA, 1978)

EOLIENNE MULTIPALE LENTE



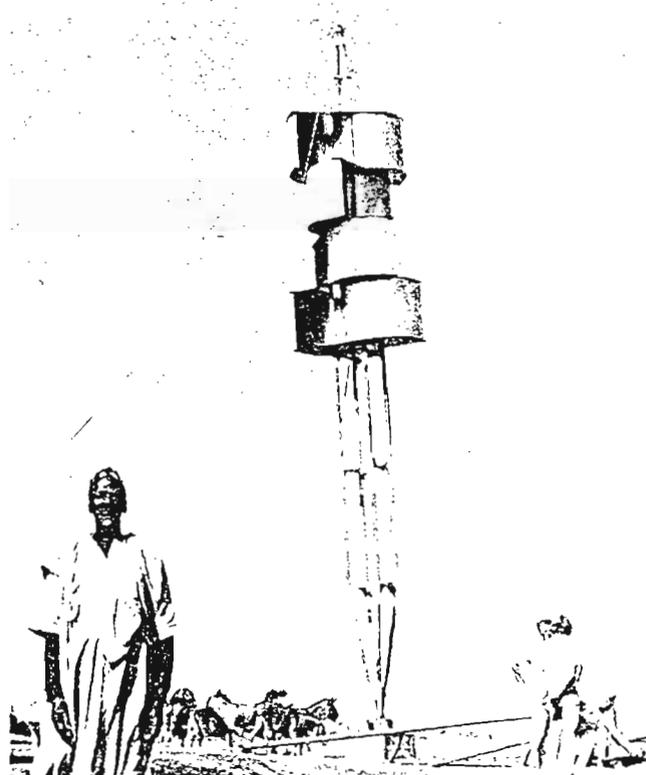
EOLIENNE MULTIPALE

EOLIENNE TRIPALE RAPIDE
AEROGENERATEUR



AEROGENERATEURS

EOLIENNE SAVONIUS



III - 34. Les groupes Diesel ou à essence.

Nous passons ici au degré supérieur de technologie, avec les avantages et les inconvénients que cela suppose. Nous nous limitons à donner les grandes caractéristiques des moteurs thermiques, un inventaire de toutes les variantes qui existent étant inconcevable, pour pouvoir néanmoins juger de la pertinence de leur utilisation dans le domaine sahélien.

L'entraînement d'une pompe par un moteur à essence coûte très cher du simple fait du prix du carburant lui-même. A cela il faut ajouter un rendement très faible de l'ordre de 20 à 25 % et la nécessité de porter une attention particulière à une mécanique compliquée.

Le rendement du pompage au Diesel, environ 30 à 40 %, est meilleur, le prix du carburant est moindre, mais l'entretien plus difficile car la mécanique est encore plus sophistiquée.

La remarque concernant le prix de revient des installations d'éoliennes est ici encore amplifiée.

III - 35. L'entraînement électrique du pompage.

A moins de se situer à proximité d'une ligne électrique, cas rare en zone rurale sahélienne, le principe est d'entraîner la pompe par un moteur électrique, lui-même entraîné par un moteur thermique. L'avantage de cette installation réside dans le fait qu'avec un moteur électrique la gestion du pompage -régulation du débit, de la pression- est plus souple et plus précise qu'avec un simple moteur Diesel. Il n'en reste pas moins que le rendement du système diminue -les rendements des deux moteurs sont multipliés l'un par l'autre- et que l'investissement et le coût de fonctionnement augmentent considérablement.

III - 36. Le pompage solaire.

Au Sahel l'énergie solaire ne constitue pas un problème en soi : le rayonnement est fort et sa répartition est régulière dans l'espace et dans le temps. Les difficultés commencent quand il faut transformer cette énergie potentielle en énergie mécanique, seule capable de mettre en mouvement, de translation ou rotatif, la pompe. Les systèmes sont ainsi conçus pour passer de l'énergie solaire à l'énergie thermique ou électrique, elles-mêmes converties en énergie mécanique.

La maîtrise de la technique et les coûts de ces systèmes sont encore à l'heure actuelle du ressort de la recherche, et leur utilisation réservée à des spécialistes, même si certaines expériences sont opérationnelles.

III - 4. L'abondance des techniques d'exploitation de l'eau souterraine.

La longueur du chapitre que nous venons de traiter illustre à elle seule la large dominance de ce secteur de l'aménagement sur les autres. Les potentialités qu'offre cette ressource, plus indépendante de la pluie que l'eau de surface, et donc des aléas climatiques, est à l'origine de l'engouement de nombreux organismes pour la recherche dans le domaine des eaux souterraines. Cet intérêt largement reconnu a conduit à quantités d'études et de réalisations qui autorisent une approche détaillée, tant sur le plan technique que social, des méthodes d'exploitation des eaux souterraines.

La diversité des procédés évoqués laisse pressentir par ailleurs la multiplicité des problèmes qui peuvent se poser ainsi que la difficulté d'actions curatives efficaces, adaptables à toutes les situations ; question que nous traitons dans la troisième partie de ce travail.

Cette abondance de références n'est malheureusement pas disponible pour tous les types d'aménagements. Ceci est particulièrement vrai pour les méthodes de lutte contre l'évaporation.

IV - LA MAITRISE DE L'EAU A L'ETAT DE VAPEUR.

Les techniques de maîtrise de l'évaporation sont très peu répandues dans les régions sahéennes. Nous évoquons ici leur existence car certains auteurs y font référence, G. Neuvy notamment, en assurant qu'elles peuvent, au moins localement, intéresser certains paysans. Il s'agit de pratiques d'irrigation dites "occultes" des cultures, très développées actuellement sur les îles Canaries et au Yémen. Insistons sur le fait que le qualificatif "occulte" leur est attribué à tort, car les processus physiques mis en jeu sont parfaitement connus ; nous bannirons désormais l'emploi de ce terme.

Le sol est entièrement couvert de 60 cm de pierres, laissant libre uniquement l'emplacement nécessaire à la croissance des végétaux cultivés (photo 9, page 82). Les paysans cherchent de cette façon à la fois à réduire le phénomène évaporatoire et à favoriser la condensation de l'eau contenue dans l'air proche de la surface du sol (figure 34).

Lors des épisodes pluvieux, l'eau percole facilement à travers la couche de pierre très perméable et humidifie le sol en profondeur. Lorsque l'insolation redevient puissante, les pierres constituent un obstacle au rayonnement, protégeant ainsi le sol humide d'un dessèchement prématuré.

S'ajoute à cela le phénomène de condensation interne. Les matériaux solides, tels que le sol ou les pierres, sont moins rapidement sujets aux variations thermiques diurnes et nocturnes que l'air. Après une nuit froide le soleil réchauffe l'atmosphère tandis que le sol reste frais. En passant dans ce sol frais, l'air chaud et humide atteint son point de rosée, température à laquelle l'air est saturé en eau. Lorsque le sol est couvert de pierres, les nombreux espaces libres favorisent cette circulation d'air chaud et humide, qui condense alors à la surface des pierres et percole vers le sol.

Dans les îles Canaries, les habitants utilisent ce même principe pour récupérer l'eau de rosée.

TROISIEME PARTIE

ADAPTATION DES MOYENS AUX BESOINS

- | | |
|--|-----|
| I - LA RECUPERATION D'EAU DE PLUIE : OUTIL DE DEVELOPPEMENT ? | 8 5 |
| II - LA LUTTE CONTRE L'EROSION : LIMITEE AU MILIEU AGRICOLE. | 8 7 |
| III - LES BARRAGES DE RETENUE D'EAU : MULTI-USAGES. | 9 1 |
| IV - LES EAUX SOUTERRAINES : LA RESSOURCE MIRACLE ? | 9 7 |
| V - DES TECHNIQUES DE MAITRISE DE L'EVAPORATION PEU
CONNUES DANS LES REGIONS SOUDANO-SAHELIENNES. | 105 |

Toujours dans ces îles, mais aussi et surtout au Chili, des chercheurs développent aujourd'hui des techniques de captage de l'eau de brouillard (Giorda, 1992). Des grillages de type moustiquaire, à mailles très fines, parfois montés sur girouettes, sont tendus face aux vents dominants. L'humidité de l'air se fixe sur les mailles et percole sous l'effet de la gravité. L'eau est ensuite récupérée par une gouttière et sert à l'alimentation de plantations, et même, sur certains sites, à celle des hommes.

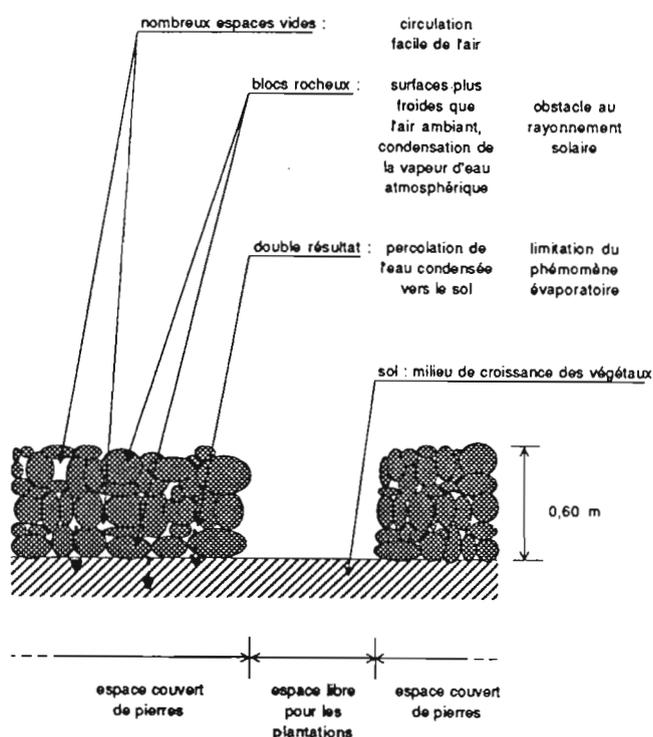
photo 9 :

Limitation de l'évaporation et condensation artificielle,
couverture du sol par 60 cm de pierres.

(d'après Neuvy, 1991)

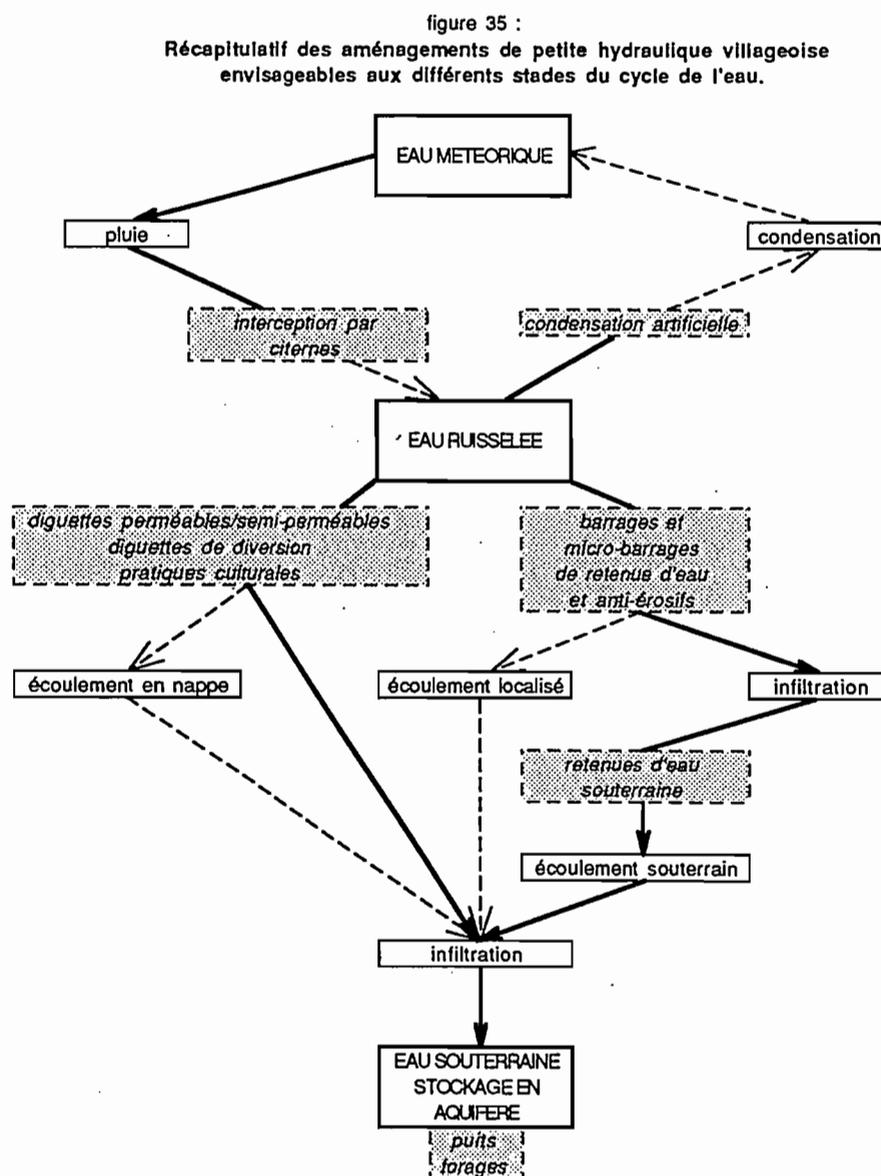


figure 34 :
Schéma de principe des actions de limitation de l'évaporation
et de condensation artificielle.



* * * * *

A tous les stades du cycle naturel de l'eau il est possible de conserver celle-ci, ou tout au moins de ralentir sa fuite. De plus, à chacune de ces étapes s'offre une gamme importante de procédés divers, plus ou moins rustiques, plus ou moins simples, plus ou moins bon marché. Pour résumer l'ensemble des méthodes évoquées dans cette partie nous complétons ci-dessous le schéma d'introduction (figure 35).



Finalement la variété des techniques de maîtrise de l'eau en milieu rural, à l'échelle d'un village, est telle qu'une réponse existe à presque chaque situation problématique vis à vis de la ressource en eau. Ceci nous amène à poser la question suivante : tous ces ouvrages hydrauliques répondent-ils aux besoins de chaque situation et comment sont-ils mis en valeur ?

Nous connaissons maintenant aussi bien les caractéristiques propres au milieu sahélien, définies dans la première partie, que celles propres aux petits aménagements d'hydraulique rurale, étudiées dans la seconde. La première phase nous a permis de cerner la demande, les besoins en eau des populations rurales du Sahel et les conditions de leur satisfaction. La deuxième phase avait pour but d'étudier un des moyens de répondre à la demande : les outils de maîtrise de l'eau développés dans le cadre villageois.

Parmi toutes ces techniques, lesquelles répondent le mieux aux besoins des utilisateurs et dans quelles conditions sont-elles valorisées ? Cette question alimente bien plus de polémiques et provoque bien plus de réactions que toutes les précédentes. Mais pour l'instant, peu importent les causes et la nature des conflits qui opposent les divers acteurs du développement, nous y reviendrons plus tard. L'essentiel reste pour nous un des résultats de ces confrontations : le volume et la variété des ouvrages qui traitent du problème. Cette masse de littérature, bien que de qualité variable, donne un aperçu des avis de tous bords et nous autorise à présenter ici une approche qui se veut à la fois objective et synthétique.

Nous résumerons donc pour chaque catégorie d'aménagement les qualités et les faiblesses qui leurs ont été reconnues, suivant la même logique de présentation que pour la partie précédente : au fil de l'eau.

* * * * *

I - LA RECUPERATION D'EAU DE PLUIE : OUTIL DE DEVELOPPEMENT ?

L'étude de cas concrets est une tâche ardue quand il s'agit d'établir un bilan global de l'intérêt que représentent les diverses techniques de récupération d'eau météorique. Les exemples restent rares en région sahélienne. Cette indifférence apparente témoigne-t-elle d'un manque de maîtrise de la technique, d'une inadaptation des procédés aux besoins, ou tout simplement d'une incompatibilité avec les faits naturels ?

Les quelques textes faisant allusion à ce genre d'aménagement ne signalent pas de difficultés majeures dans l'utilisation des citernes par les habitants. La construction est entièrement maîtrisée par les villageois, avec parfois simplement l'aide d'un technicien. A ce stade des travaux les difficultés ne dépassent pas celles de la construction d'un puits selon les méthodes traditionnellement employées et la pratique semble être entrée dans les moeurs.

L'investissement concurrence celui d'un puits de faible profondeur. Dans la plupart des cas les bénéficiaires financent une partie seulement du total, le reste étant subventionné par l'Etat. L'aspect pécuniaire n'entrave pas lui non plus le développement de ce type d'aménagements.

Dans les espaces sahéliens vierges de toute activité industrielle, encore vastes, on ne parle pas encore de pollution atmosphérique. L'eau récoltée et concentrée dans les citernes n'a aucun contact avec le sol et sa qualité de départ n'est pas altérée : la ressource est potable, au moins au moment de sa réception. Les imperfections du système surgissent

après, dans l'ordre où nous les abordons, car nous verrons qu'elles apparaissent bien plus tôt si l'on suit la logique du cycle naturel de l'eau, et non celle de la construction de l'ouvrage.

L'eau stockée stagne dans la citerne jusqu'à épuisement de la réserve. Inévitablement sa qualité se détériore. De nombreux animaux et débris végétaux tombent et se décomposent dans cette eau. Le vent couvre la surface liquide d'une pellicule de poussière qui finit par décanter. Le problème de l'utilisation est donc avant tout un problème de qualité. Un minimum d'entretien suffirait certainement à atténuer cet effet au point de le rendre négligeable, mais il n'est pas effectif. Nous reviendrons plus en détail sur cette question dans les sections concernant les aménagements de surface et les ouvrages de captage de l'eau souterraine. Les données disponibles ici sont trop claires, alors que le sujet est abondamment traité dans les parties que nous venons de citer.

la qualité de l'eau, ou plus précisément sa conservation, est en cause mais ne doit pas cacher la raison majeure du faible engouement des populations locales pour ces réservoirs d'eau de pluie.

Sans qu'il soit possible d'établir une carte de répartition de ces ouvrages par manque d'informations pertinentes, nous pouvons tout de même affirmer, en nous basant sur la provenance des notes rédigées à propos de ces citernes, que ce type d'aménagement se rencontre en effet principalement dans les zones sahéliennes les plus méridionales, qui sont aussi les régions les plus arrosées, en Casamance notamment. Le premier responsable semble donc bien être la pluviométrie. Les volumes disponibles dépendent uniquement des aléas de la répartition spatiale et temporelle de la pluie. Connaissant ses fantaisies, que ce soit à travers la sécheresse actuelle prolongée ou au regard des chiffres donnés en exemple dans le tableau 2, on comprend aisément que personne ne désire asseoir le développement d'un village uniquement sur cette ressource, incertaine tant dans l'espace que dans le temps.

W. Séné affirme l'idée inverse dans le cadre du séminaire sénégalais sur la lutte contre la désertification de 1985. Selon lui les gouvernements, sénégalais en l'occurrence, devraient pour enrayer "*...la montée fougueuse du désert [...] favoriser la promotion de la mise en place sur toute l'étendue du territoire d'un arsenal de réseaux d'ouvrages hydrauliques permettant la collecte, le stockage et la redistribution des eaux de pluie par l'installation de dispositifs de captage direct des précipitations...*" (Séné, 1985, p. 7). L'ambition est de taille et un tel objectif, dans la mesure où il s'avère économiquement rentable, ne peut être poursuivi qu'avec les moyens d'un Etat entier.

En revanche, à l'échelle d'un village, son intégration dans un système de maîtrise de l'ensemble du cycle de l'eau, à un endroit donné, peut s'avérer une opération intéressante. Autrement dit, ce type de ressource jouerait le rôle d'appoint en complément d'autres méthodes -barrages par exemple-. Dans cette optique, des alternatives peuvent et doivent être recherchées : constructions moins onéreuses, adaptées à toutes les situations. Nous pouvons rappeler ici la récupération des eaux écoulées sur les toitures sur le modèle casamançais, ou par de simples gouttières. Ceci n'est qu'un exemple et toutes les techniques traditionnelles de citernes en terre, imperméabilisées par de l'argile, couvertes ou non, offrent des solutions accessibles à tous points de vue par les populations rurales. Le rôle de la citerne doit être étudié en conséquence : l'eau non potable étant réservée alors aux usages domestiques, agricoles ou à l'élevage.

A ce stade de notre développement nous pouvons déjà faire quelques remarques sur le concept général "d'aménagement" tel qu'on l'entend aujourd'hui.

En effet, la conception et la réalisation des ouvrages hydrauliques ne suivent pas la logique basée sur le cycle naturel de l'eau, telle que nous l'avons volontairement abordée

dans ce travail, car d'autres facteurs de décision entrent en jeu : politiques, financiers, sociaux, pour ne citer que ceux-là. Il reste toutefois que dans la réalité l'eau suit bien toujours le même chemin, et qu'à toutes les étapes de ce cycle les moyens de la conserver, ou de la récupérer, existent et sont dans la plupart des cas techniquement fiables.

Nous pensons ainsi que chaque village doit tirer profit de cette gamme de techniques pour mettre toutes les chances de son côté. Cette recherche de maîtrise globale du cycle de l'eau peut permettre une complémentarité entre les ressources. Si les conditions climatiques, topographiques, hydrologiques et hydrogéologiques le permettent, il est possible par exemple de concevoir la mise en valeur associée d'une nappe souterraine et de l'écoulement superficiel. Nous sentons cependant que plusieurs types de contraintes dirigent et limitent par là même les associations imaginables. Prenons par exemple le cas fictif et peu probable d'une localité équipée à la fois de réservoirs de récupération d'eau de pluie, d'un puits, d'une retenue de surface et d'un système complet de maîtrise de l'érosion. On conçoit aisément que le prix de certaines réalisations -barrage et puits notamment- interdisent leur mise en place simultanée.

Par contre les procédés traditionnels demandent des investissements très réduits, comme la lutte anti-érosive par diguettes perméables. Chaque aménagement ne fournit par ailleurs pas de l'eau au même moment, de façon aussi durable et de qualité identique. Les facteurs décisifs sont variés et d'importance inégale. Nous pouvons les classer par ordre d'importance :

- possibilité d'envisager la technique sur le site,
- intérêt de l'aménagement pour l'économie locale -agricole, pastorale, etc.-,
- investissement financier lors de la construction et à l'entretien,
- pérennité de la ressource issue de l'aménagement entrepris,
- qualité sanitaire de cette ressource et son évolution avec le temps.

Nous concevons donc chaque type d'aménagement plus comme un simple élément d'un système intégré de maîtrise de la ressource, que comme la base unique et définitive du développement des villages des régions aides. Chaque catégorie d'ouvrage présente cependant des caractéristiques qui lui sont propres et que nous devons détailler séparément.

II - LA LUTTE CONTRE L'EROSION : LIMITEE AU MILIEU AGRICOLE.

Contrairement aux aménagements de captage d'eau de pluie, les publications concernant les ouvrages anti-érosifs ne manquent pas. Nous avons vu que de nombreux essais sur parcelles d'expérimentation fournissent des résultats chiffrés de l'intérêt pédologique et agronomique de ces aménagements. Les réalisations in-situ autorisent quant à elles un jugement fondé du degré d'intégration de ces procédés dans le monde agricole. Il s'avère en effet que la population paysanne soit la seule concernée, les pasteurs nomades n'attachant que peu d'importance à ce problème essentiellement foncier.

II - 1. Des procédés traditionnels efficaces et éprouvés.

La construction de barrages perméables autour des parcelles de cultures est depuis longtemps maîtrisée par les paysans d'ethnies nombreuses et variées. La diversité des techniques témoignent par ailleurs d'un souci de s'adapter aux conditions du lieu et du moment en fonction de l'objectif recherché. Quels que soient les cas, les solutions font toujours appel à des matériaux récupérés sur place et très peu onéreux.

Les recherches menées par certains pédologues, de l'ORSTOM notamment, montrent que l'effet de ces diguettes n'est pas une utopie. La rétention de la terre fine autorise en effet des récoltes là où auparavant rien n'eût poussé. L'augmentation de la teneur en eau contribue par ailleurs à assurer des rendements corrects et à augmenter la production sur les parcelles qui étaient déjà en culture mais non aménagées. A ce propos nous rappellerons les résultats évoqués par les tableaux 9 et 10.

Les méthodes traditionnelles de lutte contre l'érosion, employées à l'échelle de la parcelle, apportent sans conteste des avantages agronomiques pour le paysan. Malgré cela leur emploi est loin d'être généralisé et aboutit rarement aux résultats obtenus lors des essais expérimentaux pour diverses raisons, toutes très pratiques.

II - 2. L'inégale perception de la part des paysans de l'intérêt des techniques traditionnelles.

A la suite des échecs des procédés modernes de lutte anti-érosive, certaines organisations tentent de revenir aux méthodes traditionnelles. Les réalisations obtiennent des succès encourageants mais restent très ponctuelles.

Les points noirs qui subsistent résultent principalement d'une prise de conscience inégale chez les paysans de l'avantage de ces aménagements. Les activités annexes à l'agriculture entrent facilement en concurrence avec cette dernière et l'handicapent. Citons simplement pour illustration un exemple concernant les matériaux de construction des diguettes. Nous avons vu que les résidus de récoltes peuvent être réutilisés, en l'absence de pierre notamment, à la confection de diguettes autour des parcelles de cultures. Cette destination ne leur est attribuée qu'à la seule condition que les besoins domestiques soient préalablement satisfaits. Les pailles de mil, de sorgho ou de maïs sont en effet employées comme combustibles pour la cuisine ou le chauffage en hiver ou comme matériau de construction. Nous évoquons là un cas particulier mais il semble que la lutte contre l'érosion ne préoccupe en règle générale que peu les paysans.

Par ailleurs dans les endroits où cette lutte est effective, il semble que le but de ces aménagements ne soit consciemment reconnu que comme un moyen de rétention de l'eau et non comme un système complet de sauvegarde de la fertilité des terres (Mietton, 1986). Le paysan n'a pleinement conscience ni de l'étendue des conséquences du phénomène érosif, ni de la diversité des avantages qu'il peut retirer des barrages perméables.

La fréquence élevée des constatations de dégradation et de non entretien de ces aménagements s'explique certainement en grande partie par les mêmes causes. L'ouvrage anti-érosif n'est pas employé en tant que tel par le paysan, mais comme un outil d'amélioration de la production par "irrigation" d'une parcelle à un moment donné. C'est l'urgence du besoin qui pousse à l'action. L'urgence passée, l'outil est délaissé.

Il semble donc que la généralisation de l'emploi des techniques anti-érosives et leur maintien en bon état de fonctionnement par les paysans, à l'échelle de leurs parcelles, passent par un préalable obligatoire : l'explication par les aménageurs des phénomènes naturels fondamentaux. Nous entendons par là une sensibilisation des populations au principe de l'érosion, à ses effets et à la variété des rôles des diguettes perméables : lutte contre l'entraînement du sol, fertilisation organique des terres et augmentation des quantités de production.

Le nombre des problèmes croît lorsqu'on sort du cadre très restrictif des méthodes traditionnelles, gérées par les paysans eux-mêmes dans le cadre de leur exploitation.

II - 3. Les déboires de la lutte anti-érosive moderne.

A côté des petites diguettes perméables employées par certains paysans autour de leurs parcelles, des techniques anti-érosives de grande envergure ont été étudiées et mises en place sur l'initiative d'organismes publics (Marchal, 1986). Aujourd'hui le constat d'insatisfaction n'épargne aucun aspect de ces réalisations : techniquement les résultats escomptés ne sont pas atteints, socialement les aménagements ne s'intègrent pas à l'organisation rurale en place.

Les imperfections naissent avant tout d'un dimensionnement trop hasardeux des ouvrages. Les valeurs des pluies extrêmes, qui servent de base au calcul des caractéristiques de taille des digues, sont mal connues et approchées. Cette première approximation de la réalité associée aux problèmes pratiques de la construction -difficulté de superposer exactement les cordons pierreux aux courbes de niveau- conduit souvent à des dégradations rapides par des flux supérieurs à ceux prévus.

Contrairement aux ouvrages des agriculteurs, les techniques développées visent directement et uniquement la lutte contre l'érosion. Les moyens alors déployés correspondent aux ambitions, faisant fi des structures en place, priorité étant donnée à l'efficacité : la terre doit rester où elle se trouve, coûte que coûte. Des kilomètres de terrasses de diversion se superposent alors à une occupation ancienne de l'espace -sentiers d'animaux et d'hommes, division de la propriété foncière- sans logique apparente puisqu'elles sillonnent le paysage parallèlement à des courbes de niveau entièrement fictives, invisibles sur le terrain. Aux yeux des habitants, ce nouvel élément de l'espace ne remplit aucune fonction et constitue bien au contraire une gêne pour beaucoup. Les digues ne sont exploitables par personne, elles sont détruites par le passage des animaux et des hommes aux endroits habituels de circulation, non entretenues et encore moins réparées. Les digues n'intéressent personne, personne ne s'y intéresse. Là est la source de l'échec "social" de ces aménagements, et en partie de l'échec technique que soulignent les constatations de dégradation portées dans le tableau 15.

tableau 15 :
Dégats constatés sur diguettes anti-érosives de type "courbe de niveau".
(d'après Mietton, 1986)

sites	nombres de brèches (long. moyenne de 4 m)		sections diguettes (long. moyenne de 20 m)		tronçons vulnérables	tronçons disparus
	ouvertes (1)	comblées (2)	abaissées (3)	laminées (4)	(2)+(3)	(1)+(4)
Komsilga	29	72	65	0	1 580 m 25,9%	120 m 1,9%
Ipelce	169	20	14	0	360 m 3,2%	680 m 6,1%
Guisma	126	40	20	9	560 m 5,1%	680 m 6,3%
Singdin	253	26	64	72	1 400 m 5,1%	2 450 m 8,9%

De plus, de quelque type d'aménagement qu'il s'agisse, le nombre très restreint des résultats obtenus ne permet pas de définir le degré de fiabilité et de rentabilité des opérations. E. Roose signale que : "*on continue pourtant à appliquer aveuglément les méthodes définies par Bennet, il y a près de 50 ans dans les conditions très particulières de l'agriculture intensive des climats tempérés de la Grande Plaine américaine.*" (Roose, 1986, p. 207).

Finalement, la lutte anti-érosive raisonnée sur l'ensemble d'un terroir, c'est à dire sur des surfaces non exploitées par l'agriculture, semble compromise. Les procédés modernes nécessaires dans ces cas-là demandent des fonds financiers et une technicité sans commune mesure avec les réalités locales. Ils ne peuvent alors être créés que par une organisation publique à un échelon supérieur. La réussite de tels programmes passe par une gestion extérieure au village dont la passivité vis à vis de ce genre de réalisation à déjà été démontrée.

II - 4. Quel avenir pour les aménagements de la lutte anti-érosive ?

L'intéressé principal, bénéficiaire et acteur de l'opération de lutte contre l'érosion, est le paysan. Leur mise en place ne peut donc se concevoir qu'avec lui, qui vit de ce sol. L'action de ce dernier, cultivateur, est uniquement dictée par des besoins personnels et immédiats ; elle bloque toute évolution tant que n'est pas démontré le parti qu'il peut tirer d'un changement dans ses pratiques, en l'occurrence la systématisation de l'utilisation des ouvrages anti-érosifs et leur entretien. Tout progrès dans la lutte anti-érosive à l'échelle de la parcelle n'est envisageable, à notre sens, qu'après une première étape d'apport de connaissances de base auprès des personnes concernées, étape actuellement absente de bon nombre d'actions de développement.

Cette réflexion nous conduit à poser le problème du mode d'intervention des organismes de l'aménagement. Nous anticipons sur les autres types d'ouvrages, car ces difficultés réapparaissent partout identiques. Nous n'évoquerons que le premier rôle que nous semble devoir remplir tout aménageur, et que pour lors il ne tient pas : celui d'informateur et de formateur.

L'information consiste à faire savoir aux villages qui ne le savent pas, ou mal, qu'il est possible de les aider en leur apportant des connaissances générales sur le fonctionnement de leur environnement et sur les techniques qui permettent certaines adaptations à ce milieu. Elle passe aussi par le partage des connaissances entre paysans de différentes régions et l'utilisation de projets positifs comme modèles, moteurs des actions futures. Sur la base de projets réussis, A. Shaïkh observe que "*les agriculteurs modèles fournissent des démonstrations fortes et positives.*" (Shaïkh, 1989, p. 13) La formation est l'étape suivante qui implique la mise en pratique d'un enseignement général.

Ces premières phases ne peuvent qu'inciter les gens intéressés à chercher à en savoir plus et éventuellement passer à l'action. A. Shaïkh annonce encore "*Nous avons constaté que le laps de temps entre le moment où une population était initiée à de nouvelles techniques et où elle commençait à les adopter était au moins aussi important que le temps nécessaire pour qu'une approche technique donnée fournisse des résultats une fois adoptée.*" (Shaïkh, 1989, p. 9). Il confirme ainsi que la réussite d'un projet passe obligatoirement par une phase de compréhension des processus de la part des futurs utilisateurs.

Le rôle formateur de l'aménageur peut ensuite se changer en conseiller et entrepreneur. Le travail consiste alors à aider les villageois à faire leur choix, orienter leur démarche et assurer la partie technique des opérations, toujours en restant à leur écoute, en adoptant les solutions techniques à leurs besoins, et non l'inverse. M. Le Moigne appuie cette idée en soulignant l'importance "(...) de promouvoir une nouvelle génération "d'encadreurs" assurant le conseil, et acceptant de s'effacer derrière l'agriculteur." (Le Moigne, 1986, p. 66).

Nous verrons dans les paragraphes à venir que ces remarques sont valables pour tous les types d'aménagements.

III - LES BARRAGES DE RETENUE D'EAU : MULTI-USAGES.

Le développement rapide et intense des barrages de surface a donné naissance à une foule de publications qui facilitent l'analyse critique de ces réalisations. Les barrages souterrains font quant à eux l'objet de nombreuses recherches sur le plan technique. Les informations obtenues ainsi, associées et recoupées, apportent suffisamment de variété dans les sources pour que l'établissement d'un bilan objectif soit envisageable.

III - 1. La polyvalence des barrages.

L'eau stockée derrière les digues de surface est accessible à tous. Il en va de même pour les barrages souterrains où l'eau est extraite du sous-sol par l'intermédiaire d'un puits. Ces aménagements autorisent a priori la satisfaction des besoins de chacun : abreuvement des animaux, irrigation des cultures et boisson par l'homme, dans certaines conditions sanitaires cependant, sur lesquelles nous reviendrons.

Nous avons vu que dans de nombreux cas ces barrages jouent également un rôle dans la lutte contre l'érosion : ils retiennent la terre, créent des terrasses de terre fine et fertile de la même façon que les digues perméables.

Les procédés de construction testés pendant de nombreuses années ont été progressivement adaptés aux capacités locales, tant sur le plan financier que sur le plan purement technique. Les variantes actuelles dans ce genre d'aménagements satisfont toutes les situations, à partir du moment où la ressource existe, en surface ou sous forme de nappe alluviale.

L'entretien reste une tâche qui demande un investissement en temps de la part des utilisateurs beaucoup plus modeste que dans le cas des ouvrages anti-érosifs. Par ailleurs la dégradation des différents éléments qui composent le barrage est aisément détectable, contrairement aux puits ou aux forages, et la réparation peut être immédiate pour éviter une détérioration accélérée.

Aujourd'hui il semble que l'ensemble de la maîtrise du barrage proprement dit soit acquise par les populations concernées. D'At de Saint Foulc signale en effet que l'utilisation des barrages est multiple (D'At de Saint Foulc, 1985) :

- alimentation en eau des populations par puisage de l'eau de la nappe,
- réalimentation des nappes,
- abreuvement des troupeaux des pasteurs,
- irrigation des cultures,
- pisciculture.

Ce bilan s'appuie uniquement sur un ensemble de cas réussis. De nombreuses imperfections entachent ce constat positif. La recherche des voies d'amélioration passe par la définition préalable de ces problèmes.

III - 2. Les points sombres de la construction.

Rappelons avant tout un fait qui semble évident mais dont l'importance est capitale. Les sites éventuellement favorables à l'implantation de tels barrages -de surface ou souterrains- requièrent la satisfaction d'un ensemble de conditions restrictives telles que le régime hydrologique -débit disponible, durée et intensité de l'écoulement-, le contexte géologique et hydrogéologique -texture des matériaux de surface, imperméabilité et porosité des horizons- la morphologie du terrain, la végétation, qui sont autant de paramètres à prendre en compte lors de la prise de décision de construction d'un barrage et le choix des techniques à employer. Seule une étude qui rassemble des données concernant l'ensemble de ces caractéristiques diminue les risques d'échec ou d'imprévus qui mettent en péril la fiabilité ou même l'existence des ouvrages. D'At de Saint Foulc rappelle alors que les avatars majeurs rencontrés sur ces réserves ne proviennent pas de défauts de construction à proprement parler, mais d'une méconnaissance du contexte naturel dans lequel s'inscrit l'ouvrage. Les résultats réels ne satisfont pas les espérances pour des causes diverses :

- des crues supérieures à celles attendues détruisent les digues,
- les apports par les pluies ne suffisent pas à remplir les réservoirs,
- la forme des retenues ne permet pas de stocker un maximum d'eau,
- les pertes par évaporation conduisent à un épuisement rapide de la réserve,
- l'infiltration en profondeur n'est pas maîtrisable et l'eau irrécupérable,

Ces études d'approche, très théoriques, sont souvent mal réalisées par les projeteurs. S'ajoute à cela le manque fréquent des données de base nécessaires à ces études. Il semble que des lacunes à ce niveau constituent un obstacle supplémentaire.

De nombreux projets ont été mis en place par des organisations publiques, sans même que les villageois prennent une part active, ne serait-ce que dans la construction de la digue, car les matériaux et les techniques de construction employés n'étaient adaptés ni aux capacités financières ni aux connaissances des villageois (D'At de Saint Foulc, 1985). Ces essais de modernisation des techniques se sont soldés semble-t-il par une mauvaise intégration des ouvrages dans l'activité du village. Faire la part des responsabilités entre le manque d'intérêt pour un élément nouveau entièrement importé et l'inadaptation de la technique au contexte local reste finalement mal aisé, car ces deux causes sont fortement imbriquées.

Dans d'autres cas les ouvrages sont offerts aux villages par les services de l'hydraulique. Les facteurs déterminant le besoin, ou le non besoin, d'un aménagement sont basés sur des critères purement techniques : distance du village au premier point d'eau, nombre d'habitants... La "participation" des futurs bénéficiaires se limite alors à la construction, aucun avis ne leur est demandé. Dans ces conditions les gens ne se sentent pas concernés par ce qu'on leur impose, la motivation n'est pas suffisante pour assurer le maintien en état de fonctionnement des barrages ainsi construits. Le programme aboutit à un échec.

Nous reformulons donc ici notre remarque à propos des aménagements de lutte anti-érosive selon laquelle une première étape d'information, de partage du savoir, passe en priorité devant l'action tous azimuts. Mais nous pouvons pousser la critique encore plus loin en remettant en cause l'ensemble des politiques actuelles d'intervention en matière de développement. En effet, tous les projets sont conçus et réalisés sur des principes qui diffèrent très peu.

L'image qui nous reste de l'analyse des relations entre "développeurs" et villageois, à travers ce premier aperçu des aménagements de petite hydraulique de surface, mais valable pour tous les types d'ouvrages, est celle d'un contraste extrême ; contraste entre celui qui sait et celui qui ignore, celui qui dirige et celui qui obéit. Le "développeur" ne considère pas le villageois comme son égal, ni même ne lui autorise à prendre la parole. J. M. Bordage note à cet effet que "*La mobilisation du travail paysan s'est faite dans le cadre d'un rapport de force et non pas de dialogue et de discussion.*" (Bordage, 1991, p. 937). La position de l'intervenant extérieur est justifiée par le fait que ses connaissances techniques sont supérieures à celles de son interlocuteur. Ceci ne lui donne cependant pas droit de refus au dialogue. Le villageois connaît lui le milieu physique dans lequel il vit, il connaît les habitudes du village, son organisation, les relations entre habitants que le technicien ignore. Seuls les échanges entre les deux intervenants peuvent améliorer le savoir de chacun.

L'union collaboratrice entre villageois et aménageurs doit fonctionner tout au long du projet, avant, pendant et après le chantier de construction. Le rôle de l'habitant ne doit pas se limiter à celui d'un manoeuvre.

Il faut laisser la parole aux villageois avant même la phase de projet pour s'assurer que l'ouvrage est clairement désiré, condition *sine qua non* de son intégration. Leur intervention à chaque stade des travaux doit ensuite être possible pour confirmer que ce qui va leur être livré correspond bien à leur attente. La prise en compte du savoir paysan permet en outre de mieux cerner, et plus rapidement, les composantes du milieu et son fonctionnement. La remarque de G. Serpantié à propos de la lutte anti-érosive est valable pour tous les projets : "(...) *l'aménagement du conditionnement du ruissellement pour l'agriculture est une affaire d'agriculteurs, car les conditions nécessaires à l'efficacité de ces travaux sont compatibles avec les connaissances paysannes sur le rôle du ruissellement et le fonctionnement de la culture, connaissances qui manquent parfois aux "aménageurs"*" (Serpantié, 1988a, p. 14). Il est possible à l'inverse que les avantages des ouvrages hydrauliques ne soient pas compris par les villageois, et ce par manque de connaissances claires de la question, comme le rappelle Martinelli : "*Une approche ethnologique montre de quelle façon l'interprétation faite par les participants sur le sens de ces réalisations peut rester très éloignée du discours technique de leurs promoteurs.*" (Martinelli & Serpantié, 1988, p. 1).

La politique "participative" pratiquée depuis quelques années s'est contentée d'associer les bénéficiaires des ouvrages uniquement à l'étape d'édification. Même si l'idée de départ semblait bonne, elle n'a pas eu les résultats escomptés, la motivation des employés locaux se bornant au salaire dispensé pour le travail fourni. B. Collignon, responsable à l'association des Volontaires du Progrès, affirme que cette nouvelle politique de collaboration est dorénavant prônée dans tous les nouveaux projets (communication personnelle). Les procédés changent donc effectivement, mais le changement nous paraît lent quand on rappelle que la question est soulevée depuis déjà plus de dix ans. Le CRID¹⁰ va même plus loin. Partant du constat "*d'échec des politiques de développement depuis 30 ans*", il demande au gouvernement français "*de reconnaître le droit des peuples à participer aux décisions qui les concernent.*" (CRID, 1992, p. 85).

De nombreux auteurs s'accordent pour dire que, malgré ces déclarations d'intention, la tendance actuelle n'est pas sur le point de s'inverser, car comme le rappelle J. Kalbermatten, premier conseiller du Président du Collaborative Council, dans

¹⁰ Centre de Recherche et d'Information pour le Développement.

le dossier de A. Zolty : "les bailleurs de fonds trouvent qu'il est plus conforme à leurs principes de financer des grands projets centralisés." (Zolty, 1990, p. 14).

Ces politiques de développement peu enclines au dialogue se soldent non seulement par des difficultés lors de la construction, mais aussi dès les premiers moments de l'utilisation.

III - 3. Les points sombres de la mise en valeur de l'aménagement.

Les paragraphes qui vont suivre traitent essentiellement des aménagements de surface. Le mode d'utilisation de l'eau dans le cas des barrages souterrains se rapproche plus de celui des ouvrages de captage d'aquifères, traité dans la prochaine partie de ce travail.

III - 3.1. L'étonnante absence de conflit d'usage.

Nous verrons à propos des ouvrages de captage des eaux souterraines qu'une de leurs difficultés réside dans le partage de l'eau entre les divers usages : alimentation en eau potable et élevage surtout. Très peu de publications évoquent cette question à propos des eaux de surface, ce qui semble vouloir dire, à priori, que le problème ne se pose pas ...

Prenons un exemple fictif, mais néanmoins possible, d'une retenue bâtie sur l'initiative et par des paysans pour irriguer leurs cultures. Que se passe-t-il quand des nomades se présentent pour faire boire leurs troupeaux ?

Nous savons que l'animal est un symbole de richesse et de puissance et qu'en conséquence les nomades sont prioritaires, mais imaginons que le partage de la ressource s'opère sans difficulté car la somme des besoins de tous ne dépasse pas les capacités du réservoir. Comment risquent d'évoluer les relations en cas de crise climatique renforcée, cas d'actualité ?

A la lumière des problèmes soulevés par cette question dans le cas d'exploitation des eaux souterraines, nous restons sceptiques et interrogatifs tant que rien ne prouve que les conflits d'usage n'existent pas et ont peu de chance d'éclorre, et tant que ces affirmations ne sont pas justifiées par des données précises ; ce qui implique la nécessité de telles recherches. G. Serpantié donne à ce propos un élément de réponse, mais il est le seul : "*La plupart des études réalisées dans la région [Ouahigouya, nord Burkina Faso] sur les rapports agriculture-élevage font état d'une évolution des rapports entre spécialistes tendant à une baisse des contrats d'interdépendance et un durcissement des conflits*" (Serpantié, 1988c, p. 15)

La critique des aménagements de surface s'attaque plus volontiers aux questions sanitaires, sans pour autant être plus convaincante.

III - 3.2. La virulence de la critique sanitaire.

Les publications traitant des maladies hydriques en liaison avec le développement des aménagements ne manquent pas. Leurs parutions récentes témoignent par ailleurs de l'intérêt tout nouveau pour ce genre de problèmes, mais ne permettent pas de conclure, bien au contraire.

Les arguments d'accusation mis en avant se basent sur plusieurs observations concernant les problèmes sanitaires généraux en Afrique.

D'une part le développement de nombreuses maladies est lié à la présence d'eau, fait évoqué dans notre première partie consacrée aux dangers de l'eau. Plusieurs cas de figures se différencient selon que la maladie se transmet directement par contact ou ingestion de l'eau, ou que sa présence favorise la prolifération d'insectes vecteurs de maladies.

D'autre part les études actuelles de l'OMS¹¹ montrent que les régions tropicales sont encore durement touchées par des maladies que l'on espérait éradiquées à jamais, telles le paludisme et la bilharziose. Dès lors aucun doute n'est possible, les conclusions vont bon train : les aménagements hydrauliques sont responsables de la reprise de vitalité des maladies liées à l'eau par la multiplication des lieux favorables au développement des vecteurs. On lit ainsi, dans un dossier spécial consacré aux maladies infectieuses intitulé "la revanche des microbes", paru dans un magazine destiné au grand public, que "*la schistosomiase (bilharziose) est souvent le tribut que paie la population aux politiques de "développement", car les barrages, les bassins de retenue, les canaux d'irrigation facilitent la propagation des larves*" (Science et Vie, n° 906, mars 1993, p. 38). La question se pose dès lors de savoir sur quels chiffres s'appuient de telles affirmations, ce que la revue ne fournit pas. Une mise au clair de ce que l'on sait exactement s'avère donc nécessaire.

Il apparaît qu'effectivement, dans certains cas, les aménagements hydrauliques peuvent avoir des répercussions néfastes sur les conditions sanitaires du milieu. P. Handschumacher, de l'ORSTOM, évoque dans un article, paru dans le numéro 4 de Sécheresse de 1992, le cas de l'aménagement hydro-agricole de Richard Toll dans la basse vallée du Sénégal. Cet aménagement consiste en un vaste programme de développement de grands périmètres irrigués. En liaison avec la forte activité nécessaire pour l'entretien des périmètres, la densité de population a considérablement augmenté dans la région à l'issue des travaux. Les infrastructures sanitaires n'ont pas suivi et les épidémies se sont multipliées.

Il s'agit là d'un cas particulier de grande envergure. Dans les cas d'aménagements villageois les exemples sont beaucoup moins nombreux et moins flagrants. Par ailleurs la création de cette zone irriguée est-elle la seule responsable, et directement responsable ? Ne faut-il pas y associer d'autres facteurs tels que le manque de respect de règles d'hygiène, considérées élémentaires par les pays industrialisés ; ou une rupture dans le rythme de vie habituel ? A propos de l'hygiène, A Dodin de l'Institut Pasteur affirme, parlant du choléra, qu'il ne s'agit pas uniquement d'une maladie hydrique mais qu'elle est aussi une "*maladie des mains sales*" (Dodin, 1992).

Enfin, et surtout, l'ensemble des auteurs s'accorde à dire que la définition du rôle des aménagements hydrauliques n'est pas tâche facile. A Prost de l'OMS donne des exemples des facteurs qui peuvent entrer en jeu dans la reprise de vigueur d'une maladie et qui aident à comprendre que le problème est complexe : malnutrition, qualitative mais

¹¹ Organisation Mondiale de la Santé.

surtout quantitative, déstabilisation d'équilibres précaires par l'aide extérieure, ... (Prost, 1991). Enfin, l'absence totale de données chiffrées fiables (tableau 16) interdit toute mesure de la responsabilité réelle des aménagements dans cette résurgence des maladies parasitaires en Afrique.

tableau 16 :
Nombre de références bibliographiques éditées par le CIID relatives aux études de l'impact sanitaire des aménagements hydrauliques.
 (in Sécheresse, n° 4, 1992)

années	1976	1977	1978	1979	1980	1981
références totales	2155	2069	2092	2190	1805	1885
références relatives aux maladies hydriques	0	0	0	0	0	0
références relatives aux effets écologiques des projets hydrauliques	17	14	13	13	12	6
années	1983	1984	1985	1987	1989-90	
références totales	1812	1800	1047	1245	1141	
références relatives aux maladies hydriques	0	1	2	0	1	
références relatives aux effets écologiques des projets hydrauliques	0	2	29	2	13	

D. Morin affirme, à l'issue d'une étude sur les schistosomiasés, la nécessité d'une collaboration "(...) des organisations et des institutions canadiennes impliquées dans la mise en place d'infrastructures hydro-agricoles avec le PNLIS (Programme National de Lutte contre les Schistosomiasés) de telle sorte qu'il soit possible de mesurer les indicateurs sanitaires d'infection avant et après la mise en oeuvre des travaux. Cela, dans le but de mieux documenter l'impact des travaux de petite et moyenne envergure, pour lesquels on ne possède que très peu de données." (Morin, 1990, p. 35).

Un fait demeure indéniable : la connaissance de règles d'hygiène, qui seule assure la prévention des maladies, reste trop précaire pour soutenir une utilisation de l'eau dans de bonnes conditions. Une attention toute particulière sur ce point s'impose donc de la part des aménageurs. Bien souvent aucune information sanitaire n'a été faite en préalable à la réalisation des retenues d'eau. Seule une action curative d'urgence est actuellement entreprise par l'ensemble des organismes qui interviennent dans les pays sahéliens, et elle coûte cher.

III - 4. Un bilan mitigé pour l'aménagement de surface.

Contrairement à ce que laisse supposer un certain nombre d'écrits, les techniques de construction des barrages passent assez bien auprès des populations, qui cherchent parfois même à développer ces aménagements sans se contenter de subir l'action des "développeurs". La seule contrainte à un développement efficace et durable réside dans le respect du cadre existant, aussi bien du point de vue technique, financier qu'humain. Un des éléments primordiaux pour assurer le succès des barrages est la volonté d'adapter les connaissances scientifiques et techniques aux personnes concernées, et non de chercher à adapter ces dernières à des principes qui leurs sont étrangers.

Les bénéficiaires des aménagements ne sont pas tant à l'origine des difficultés de la petite hydraulique rurale que les aménageurs eux-mêmes et l'ensemble des personnes qui participent au développement de l'hydraulique : la base manque de stabilité.

Que ce soit pour les études d'implantation des ouvrages ou des conséquences techniques, sanitaires et humaines -conflits d'usage-, les recensements d'expériences manquent considérablement. En ce sens un effort de dénombrement des réalisations passées et de la même façon de suivi de leurs performances s'impose à chaque fois que possible.

Comme pour la lutte anti-érosive, les populations ne sont ni formées pour comprendre la base des processus qui rendent les barrages intéressants, ni informées des avantages et limites d'utilisation de ces derniers.

Le maintien de maladies hydriques, pourtant fortement combattues, est à l'origine de la prise de conscience de l'intérêt de l'information, de la formation et d'un début d'action.

L'observation sérieuse des faits, sur la base d'études chiffrées, doit permettre, dès que le besoin s'en fait sentir, d'ajuster des procédés d'intervention mal adaptés et de servir de modèle dans les autres domaines.

IV - LES EAUX SOUTERRAINES : LA RESSOURCE MIRACLE ?

La littérature consacrée aux eaux souterraines abonde. Il semble en effet que la plupart des états sahéliens ait choisi de lutter contre la sécheresse et de parfaire leur maîtrise de l'eau principalement par une exploitation accrue des réserves du sous-sol. W. Séné, directeur des études et de la planification au ministère de l'enseignement supérieur sénégalais, constate à cet effet : "*(...) on assiste de plus en plus à un accroissement sans précédent des ouvrages en hydraulique souterraine (forages, puits, etc.)...*" (Séné, 1985, p. 2).

Les nombreuses recherches nécessaires au développement de ces aménagements et les expériences de terrain fournissent ainsi une masse de données considérable sur le plan technique. Les mauvais résultats obtenus persistent par ailleurs à alimenter une presse critique virulente. Toutes ces informations facilitent l'approche objective de la fiabilité des ouvrages de captage des eaux souterraines que nous désirons faire maintenant.

IV - 1. L'incontestable intérêt de la ressource souterraine.

L'avantage majeur de cette ressource par rapport aux autres -barrages de surface, récupération d'eau de pluie- est de ne pas dépendre uniquement du régime des pluies. On note, il est vrai, des baisses de niveau au fur et à mesure que la saison sèche avance pour les nappes alluviales, mais dans l'ensemble les aquifères fournissent régulièrement tout au long de l'année des quantités d'eau non négligeables ; ce qui, comme nous le verrons plus loin, n'est par forcément synonyme de suffisant.

Les aménagements de surface sont conçus dans le but de ne pas perdre une ressource qui s'enfuit rapidement pour étaler son utilisation tout au long de l'année. Le

but des ouvrages de captage diffère de ce dernier : il s'agit d'apporter une ressource là où elle est absente ou inutilisable. Cette ressource doit se suffire à elle-même pour satisfaire l'ensemble des besoins locaux.

Nous avons vu que selon les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir aquifère le débit disponible varie considérablement, mais aussi que la multiplication des ouvrages permet de pallier la trop grande faiblesse des débits de certains d'entre eux.

Les techniques de recherche des aquifères et de construction des ouvrages sont bien maîtrisées. Le creusement des puits peut poser des problèmes si le niveau de la nappe est à une trop grande profondeur, ou si la texture trop dure ou trop friable des horizons à percer n'autorise pas le travail manuel. Dans ces cas difficiles les forages mécaniques constituent une issue envisageable là où les besoins sont impérieux.

Finalement les facteurs qui conditionnent la possibilité de créer un captage ne sont pas d'ordre technique, car la majorité des aquifères peut être exploitée, mais plutôt d'ordre humain.

IV - 2. Le manque d'entretien des ouvrages : conséquence de leur non intégration dans les systèmes villageois.

Rappelons que ces ouvrages, puits et forages, sont utilisés dans les régions les plus arides, et servent en conséquence à l'alimentation des hommes, très souvent des nomades, de leurs animaux, parfois de jardins, mais très rarement à l'agriculture.

L'observation un tant soit peu approfondie de la documentation nous apprend que les ouvrages mis en place par les organismes publics ne sont pas employés, ou le sont mais mal. L'opération se solde par un échec : les problèmes d'alimentation en eau ne sont pas résolus, de nouveaux surgissent parfois même. Là seulement on cherche à savoir pourquoi les habitants n'acceptent pas, ou partiellement, le puits ou le forage qui est mis à leur disposition.

Nous n'insisterons pas sur les causes des problèmes d'entretien car elles sont exactement identiques à celles évoquées pour les aménagements des eaux de surface : l'ouvrage est un élément nouveau dont l'effet naturellement déstabilisateur est renforcé par les attitudes dirigistes des aménageurs. Seuls les résultats diffèrent, répondant ainsi à la question de Martinelli : "*La société s'oppose-t-elle à toute modification ou appropriation spontanée de l'aménagement parce qu'elle se sent menacée dans son existence par cette nouvelle façon de gérer l'espace et l'inconnu qu'elle réserve ?*" (Martinelli, 1988, p. 15).

L'absence d'entretien affecte tous les composants des puits ou des forages. Il convient cependant de distinguer les parties profondes, invisibles, et inaccessibles dans le cas des forages, des parties aériennes, visibles, au contact quotidien des utilisateurs. Cette distinction se justifie par le fait que la responsabilité des usagers n'entre pas à parts égales dans chaque situation.

Dans le chapitre consacré à la technique de construction des puits et des forages nous avons vu que les éléments les plus sensibles aux dégradations se situent au fond de l'ouvrage, au droit du captage proprement dit. Ces parties assurent en effet le passage de l'eau de l'aquifère vers la zone à l'air libre. Les défaillances qui surviennent à ces endroits -ensablement, colmatage, enfouissement de la colonne captante- mettent en péril la pérennité de l'ouvrage si sa réparation n'est pas entreprise en temps voulu.

Dans le cas des forages, l'action à ce niveau reste très difficile et la qualité du captage dépend uniquement des entrepreneurs qui l'ont mis en place. Les interventions de

remise en état -développement pour décolmater le captage par exemple- ne sont réalisables que par des services spécialisés publics. A ce titre, le forage constitue un outil de maîtrise de l'eau difficilement gérable par les utilisateurs. Le classement des forages dans les ouvrages de petite hydraulique rurale se discute encore.

Sur les puits, les visites par l'homme sont possibles et conseillées pour s'assurer régulièrement du bon état des diverses pièces qui le constituent. Dans la pratique ces visites ne sont entreprises par personne et les seules opérations effectuées sur les puits sont des réparations de dégâts déjà avancés. La cause essentielle de ce manque de conscience de la part des utilisateurs semble pouvoir être mise sur le compte de la non connaissance du fonctionnement du système puits et de ses limites. N'oublions pas toutefois le fait que cette partie enterrée du puits reste invisible : l'insouciance s'installe vite tant qu'aucun mauvais fonctionnement ne survient.

A la surface le problème est différent. Les constats de dégradation sont les plus fréquents sur les moyens d'exhaure (Diluca, 1987). Plus le matériel est compliqué, plus le pourcentage de pannes augmente et plus les réparations sont difficiles et coûteuses. Dans un dossier d'Afrique Agriculture entièrement consacré à l'hydraulique rurale, A. Zolty résume la question par une remarque souvent entendue : "*Trop de pannes, trop de types de pompes.*" (Zolty, 1990, p. 17).

La mécanisation de l'exhaure a pour objectifs essentiels de rendre l'homme moins dépendant de cette tâche difficile et d'essayer d'améliorer des conditions d'hygiène souvent désastreuses. Ainsi, grâce à l'emploi de pompes manuelles, d'éoliennes et éventuellement de groupes Diesel, les puits n'ont plus besoin de rester ouverts, ils sont couverts par sécurité et pour éviter la pollution par la chute de matières indésirables dans l'eau de l'aquifère. L'avantage du point de vue de l'hygiène et de l'énergie à fournir sont incontestables, si toutefois on est auparavant assuré de pouvoir disposer en tout temps de la ressource.

L'inconvénient des systèmes mécaniques modernes se situe justement à ce niveau. Tout mécanisme, quel qu'il soit, complique la chaîne de transmission de l'énergie. Si on rappelle l'ensemble des organes fragiles sur une pompe, que l'on y ajoute les défauts de construction, on comprend facilement que ces systèmes fassent l'objet de nombreuses dégradations. De tels inconvénients ne portent pas à conséquence dans nos pays industrialisés car les réseaux de distribution de pièces détachées fonctionnent suffisamment bien pour que les dégâts soient réparés facilement et rapidement. Au Sahel la complexité des relations entre les organismes chargés de la maintenance et les villages constitue un premier obstacle à la résolution du problème. S'ajoutent à cela des distances parfois considérables entre les villages et les centres de stockage des pièces de rechange, moyennement bien fournis car ces dernières, importées des pays industrialisés, sont chères.

Finalement les premières pompes offertes par des pays tels que la France, l'Italie, avec quelques pièces de rechange, tombent en panne dès le départ des ONG pour cause d'absence de service après-vente.

De plus la réparation des pompes n'est dans bien des cas pas réalisable par les villageois eux-mêmes qui doivent alors attendre l'intervention des services spécialisés, trop peu nombreux et énormément sollicités.

Certains problèmes caractéristiques des autres types d'aménagements se retrouvent ici. Citons principalement l'inadéquation entre la connaissance des villageois et la technicité des matériels qui leur sont fournis. Les constructeurs commencent, à la suite des casses répétées de leurs pompes, à chercher des systèmes mécaniques plus adaptés aux conditions qui leurs sont imposées par une utilisation continue dans un milieu naturellement rude. Le bilan présenté au chapitre technique concernant les pompes manuelles reste cependant bien sombre.

Cette dépense désordonnée de temps, d'argent, d'énergie et de réflexion est stupéfiante : tous tentent d'imposer des systèmes modernes, de pays industrialisés, dans des zones où n'existe aucun des moyens nécessaires à leur bon fonctionnement, connaissance et argent entre autres. A côté de cela, les chadoufs, norias et autres procédés

traditionnels d'exhaure, utilisés depuis des siècles par des civilisations de niveau de développement équivalent, permettraient une accoutumance progressive aux usages de l'eau.

Malgré cela, si on considère que l'implantation de ces types de matériel est utile au bon développement de la maîtrise des eaux souterraines, alors la formation technique des populations concernées semble encore une fois être indispensable, ainsi que l'amélioration de l'efficacité des services publics de l'hydraulique de chaque Etat. Parmi ces derniers, certains proposent des options en faveur de la construction artisanale locale des matériels nécessaires, de façon à limiter autant que possible les importations, réduire l'assujettissement aux fabricants concernés, et diminuer ainsi les prix et les délais d'attente. Par ailleurs le développement des entreprises privées de construction et de réparation des ouvrages est encouragée. L'Etat ne désire plus intervenir que pour des pannes graves qui demandent le concours de spécialistes. Dans son dossier d'Afrique Agriculture, A. Zolty confirme cette observation : "[Les dirigeants nigériens] ont choisi d'avoir recours à un seul type de pompe fabriqué localement." (Zolty, 1990, p. 18), "*Les récents programmes ont mis en place un réseau d'artisans réparateurs et magasins décentralisés de fournisseurs qui apparaît comme le point fort du système* [au Burkina Faso]." (Zolty, 1990, p. 20).

Les quelques initiatives dans ce sens sont trop ponctuelles pour qu'il soit possible d'affirmer leur intérêt, mais ces choix donnent pour l'heure des résultats positifs. Leur principe rejoint celui des alternatives que nous proposons à propos du mode d'intervention des organismes de développement. L'indépendance des villageois est recherchée, les services publics n'étant plus que des conseillers et n'intervenant plus que pour les opérations spéciales. Une certaine activité économique doit se développer autour de l'aménagement hydraulique.

Notons tout de même que les raisons qui motivent certains pays à agir de la sorte sont plus d'ordre financier qu'humain. Les budgets consacrés à l'hydraulique sont tous déficitaires et les Etats espèrent réduire les dépenses de ce secteur en concédant aux villages une certaine autonomie d'action et de gestion des biens. J.L. Sabatier, du CNEARC, et T. Ruf, de l'ORSTOM, résument l'idée pour les aménagements hydro-agricoles ; idée néanmoins vraie pour la petite hydraulique rurale en générale : "*Ces projets ont endetté considérablement certains pays sans que les taux de rentabilité interne prévus dans les études préalables aient été jamais atteints.*" (ORSTOM & CNEARC, 1992, p. 5) Quelles que soient les raisons politiques, cette tendance nous semble bénéfique à une meilleure mise en valeur des aménagements hydrauliques.

En définitive le manque d'intérêt accordé aux ouvrages se solde très fréquemment par la négligence de l'entretien, qui aboutit elle-même à une dégradation rapide et accélérée des aménagements. Dans les circonstances les plus extrêmes, le résultat final peut même être l'impossibilité technique totale d'utiliser l'ouvrage en question.

Les cas de puits, ou de forages, d'utilité reconnue par les villageois ne vont pas non plus sans aucune difficulté. On pense alors tout de suite, phénomène d'actualité oblige, aux maladies hydriques.

IV - 3. Le captage de l'eau souterraine et les maladies liées à l'eau.

Les caractéristiques du phénomène diffèrent de celles des aménagements de surface. Pour ces derniers nous avons insisté sur la polémique autour des maladies transmises par des parasites dont la prolifération est favorisée par la présence d'étendues d'eau stagnante. Les ouvrages de captage d'eau souterraine ne donnent naissance à aucune surface inondée. Les seules maladies à risque ici sont celles transmises par ingestion d'eau, mais restent malgré tout un inconvénient important de ces aménagements.

La confusion entre les différentes causes envisageables de maladies aux alentours des puits n'est donc pas permise. Ceci nous permet de bien cerner l'ampleur du manque de respect de règles d'hygiène, évoquée à propos des barrages.

La qualité intrinsèque de l'eau des aquifères suffit en général à assurer sa potabilité. Sa dégradation n'intervient qu'à l'utilisation, lorsque les usagers polluent progressivement l'eau du puits en y introduisant les souillures de la surface -terre, excréments d'animaux, ...- accrochés aux différents récipients de puisage. La conséquence est donc double : le puits est pollué, et risque à terme de ne plus pouvoir être exploité, les villageois consomment une eau dangereuse pour leur santé.

Il est clair qu'au départ les habitants locaux n'imaginent pas mal agir par le simple fait de jeter un seau dans un puits. Encore une fois l'absence de formation des populations concernées, avant même le démarrage de tout projet, apporte des difficultés supplémentaires. Il semble donc que cet aspect éducatif pénalise énormément l'ensemble des campagnes de développement dans les régions rurales des pays sahéliens, comme le résume A. Zolty en insistant sur "(...) l'importance des problèmes sanitaires et de l'information pertinente des utilisateurs." (Zolty, 1990, p. 19)

Toutefois les organisations intervenant dans ces domaines ont pris progressivement conscience de cette erreur d'appréciation. Elles mettent en place actuellement des programmes d'enseignement sanitaire en parallèle à chaque réalisation technique.

Enfin signalons l'importance capitale des analyses physico-chimiques de l'eau de l'aquifère. Les expériences de terrain montrent que cette phase préalable à la construction de tout puits ou forage est souvent escamotée. Elle assure pourtant l'intérêt des travaux et justifie les dépenses.

Par ailleurs l'analyse périodique et fréquente de la qualité de l'eau d'un ouvrage en service permet de déceler toute pollution au plus tôt et d'agir de manière préventive plutôt que curative.

Avec ces questions sanitaires nous arrivons au terme des effets liés à l'ouvrage proprement dit ; soit que la technique n'est pas adaptée au contexte, soit que le mode d'intervention des développeurs manque de rigueur et de diplomatie. L'importation de ces aménagements ne se limite pas à ces désagréments et sème parfois la zizanie entre les différents usagers.

IV - 4. Les captages d'eau : source de conflits d'usage.

L'implantation des puits et des forages se fait prioritairement dans les zones les plus arides, les plus rudes, où la ressource en eau de surface demeure souvent absente tout au long de l'année et où en conséquence l'agriculture est une activité peu courante. Les utilisateurs principaux sont donc les villageois pour la boisson, ou éventuellement

l'arrosage d'un petit jardin, et les pasteurs pour l'abreuvement de leurs troupeaux. Tant que le débit est suffisant pour satisfaire les besoins de tous, le partage se déroule relativement correctement, mais des déséquilibres s'instaurent parfois et chacun tire alors les couvertures à soi : des tensions naissent.

Pourquoi la ressource peut-elle venir à ne plus satisfaire les besoins ? Deux causes expliquent cela avec des probabilités d'apparition très différentes. L'événement le plus rare est la baisse du débit du puits par des colmatages. Dans ce cas les villageois font appel au service public de l'hydraulique pour arranger leur problème. Le niveau de la nappe peut descendre, certaines années particulièrement sèches, suffisamment bas pour que l'ouvrage tarisse. Là encore les villageois font appel aux autorités compétentes ou recréent eux-même le puits s'ils en ont les moyens.

Plus souvent le déséquilibre naît non pas de la diminution de la ressource mais d'un accroissement de la consommation. La ressource ne faisant pas faute à priori, chaque utilisateur s'autorise à augmenter sa consommation, créant son propre jardin et essayant de vivre mieux. Mais le responsable le plus accusé reste le nomade et ses troupeaux.

La politique de développement des captages a consisté à chercher des sites à forts débits. Ces points d'eau, peu nombreux, rapidement connus, sont aujourd'hui assaillis par les pasteurs des régions proches. Le nombre de bêtes à alimenter dépasse ainsi largement la charge prévue par les projeteurs. Nous verrons que cette évolution imprévue n'a pas pour unique conséquence les conflits d'usage. Il reste que de nombreux points d'eau sont l'objet de disputes parfois acharnées. L'appropriation de la manivelle d'une pompe manuelle par un villageois, pour interdire son utilisation par tout autre que lui, en donne un exemple frappant. Personne n'a pu s'opposer à sa décision car l'homme en question avait payé seul le changement d'une pièce défectueuse, sa position financière confortable le lui autorisant.

Ce genre de réactions se rencontre fréquemment et illustre bien les changements dans les mentalités à la suite d'implantations d'ouvrages hydrauliques. L'aménagement n'est pas adapté au contexte social existant, les villageois modifient leurs habitudes. Les comportements, à l'origine très communautaires, s'orientent vers une individualisation des intérêts. L'organisation complète d'un village est ainsi modifiée. L'économie, la hiérarchie sociale, les relations amicales se transforment insidieusement en rapports de force où le plus riche devient le plus fort et s'approprie le point d'eau. Un système capitaliste fondé sur le pouvoir monétaire remplace progressivement le système communautaire traditionnel basé sur le soutien mutuel.

Outre ces faits de société, que nous tenons pour fondamentaux, certains aspects de l'écologie sont aussi menacés, non moins capitaux.

IV - 5. La surexploitation des points d'eau : désertification et épuisement des nappes.

Toutes les publications concernant les effets néfastes des aménagements d'hydraulique souterraine rappellent les conséquences considérables de ces derniers sur le milieu naturel, végétal en particulier. Le phénomène de désertification, révélé aussi bien dans les magazines à grand tirages que dans les publications scientifiques, ne représentent cependant qu'un des deux impacts majeurs de la surexploitation des points d'eau : la baisse du niveau de certaines nappes est souvent laissée pour compte. Il est vrai que la désertification se remarque d'autant plus qu'elle est visible.

Ceci n'empêche pas G. Serpantié de noter que sous l'effet cumulé de la sécheresse et de l'exploitation intensive des points d'eau "*la nappe phréatique affleurante il y a 30 ans s'épuise au point que seuls un ou deux puits ne tarissent pas en fin de saison sèche.*" (Serpantié, 1988c, p. 2)

Nous avons suggéré la cause de cette surexploitation en parlant des conflits d'usage : l'augmentation des besoins due à une concentration des troupeaux autour de points d'eau peu nombreux à fort débit (Le Houérou, 1979). Cette remarque révèle deux faits.

D'une part on constate une concentration des troupeaux. Il ne faut pas oublier que l'amélioration du suivi sanitaire des troupeaux, par les traitements antiparasitaires notamment, s'est traduit par une baisse de la mortalité et une augmentation des effectifs de chaque troupeau ; augmentation toujours recherchée par les éleveurs pour qui la richesse se compte en têtes de bétail et non en poids de viande.

D'autre part on note un faible nombre de puits dont les débits sont forts, ce qui les autorise à satisfaire des besoins considérables.

La concentration massive, très localisée et imprévue autour des points d'eau, de centaines de bêtes est donc la rançon commune de ces deux événements associés.

Les nomades font pâturer leur bétail à proximité des puits car les distances parcourables en une journée sont limitées à quelques kilomètres, particulièrement en saison sèche. Par ailleurs le temps d'attente au point d'eau est d'autant plus accru que les animaux qui patientent pour boire sont nombreux. Tous ces éléments ont deux conséquences majeures (Thome, communication à la conférence de l'ISARA¹², 1993):

- un piétinement du sol long et durable par des bêtes en grand nombre,
- la consommation de toute la végétation autour du point d'eau par ces mêmes animaux.

Rapidement la région n'a plus aucun intérêt naturel pour le pastoralisme car la végétation trop fragilisée finit par ne plus pousser. De plus la disparition de ce couvert végétal correspond à l'enlèvement des quelques éléments protecteurs contre l'érosion hydrique et éolienne du sol (Brabant, 1992). En saison des pluies aucun obstacle ne dissipe l'énergie de l'eau avant son arrivée au sol et la sensibilité à l'érosion est maximale. L'aridité édaphique augmente, le maintien de la vie devient de plus en plus difficile ainsi que la maîtrise de l'eau. Peyre de Fabrègues conclut qu'"*il faut que les éleveurs soient conscients que leur situation de compétition au niveau des ressources naturelles, pour justifiée qu'elle soit, les conduit à leur perte et le pays avec eux.*" (Peyre de Fabrègues, 1987, p. 334). Cela n'implique cependant pas pour lui, contrairement à de nombreux États, la nécessité d'en finir avec le pastoralisme : "*C'est peut être une chance pour certains pays de posséder encore des ethnies traditionnellement orientées vers un mode d'existence aussi frustré -et accepté- et seules capables de transformer une ressource végétale spontanée diffuse, très difficilement utilisable sans elles, en une production animale, laitière d'abord, de viande ensuite.*" (Peyre de Fabrègues, 1987, p. 339).

Finalement, l'objectif initial des aménagements d'hydraulique souterraine aboutit à un résultat en opposition avec les espoirs d'amélioration des conditions de vie. Signalons toutefois qu'ils ne sont pas les seuls responsables. La sécheresse de ces dernières années joue terriblement en défaveur de la gestion de l'espace au Sahel et principalement du pastoralisme, dont le développement est axé uniquement sur les ressources naturelles. En ce sens les aménagements hydrauliques ne sont qu'un des multiples aspects du développement et les aménageurs doivent faire face sur tous les fronts.

¹² Institut Supérieur d'Agronomie de la région Rhône Alpes.

Actuellement les décisions prises par les organismes responsables de la gestion du pastoralisme tendent à favoriser une meilleure intégration de l'élevage dans l'économie générale (Thébaud, 1990). Un des objectifs est notamment d'essayer de complémentariser l'agriculture et l'élevage l'un par l'autre. Cette association doit permettre de nourrir les animaux avec les résidus de récolte, et d'utiliser les déjections animales comme engrais pour les cultures. Dans le domaine de l'hydraulique, les aménageurs envisagent de multiplier le nombre des forages et des puits, chacun d'entre eux ne devant fournir qu'un petit débit pour ne pas risquer de les voir envahis par trop d'animaux.

Il semble toutefois que le développement de l'élevage reste très aléatoire car le dialogue avec les nomades n'est pas facile du fait de leur mode de vie particulier.

IV - 6. Conclusion : l'eau souterraine, une ressource mal mise en valeur.

Les avantages pratiques liés à l'exploitation de la ressource souterraine sont énormes. A partir du moment où une nappe aquifère existe en un lieu, l'extraction de l'eau jusqu'à la surface s'effectue sans trop de difficultés techniques dans la majorité des cas. C'est en réalité au niveau de la mise à disposition de l'eau auprès des populations rurales qu'on observe les échecs les plus notoires.

La première nécessité, avant même de proposer une étude technique, demeure bien la connaissance parfaite des composantes du milieu dans lequel on prévoit de travailler. Ceci sous-entend d'appréhender les paramètres naturels -géologie, hydrogéologie, végétation, ...- mais aussi les caractéristiques propres à chaque village : hiérarchie sociale, organisation de l'économie, relation avec le milieu extérieur.

Si ces règles fondamentales ne sont pas respectées, la pérennité et la qualité du travail risquent fortement d'être compromises. Les conséquences de tels actes dépassent largement la simple déception que peuvent éprouver les aménageurs, elles peuvent remettre en cause toute l'organisation d'un espace, sur le plan humain, naturel, et parfois même sur les deux à la fois. La synthèse ci-dessus se résume en quelques phrases :

- l'acceptation de l'ouvrage par les populations rurales,
- son utilisation dans de bonnes conditions sanitaires et sociales,
- la sauvegarde du milieu naturel,

passent par une étape préalable indispensable de connaissance du milieu humain.

De plus le taux de réussite de projets augmente si les villageois sont les initiateurs des travaux. Une phase d'information et éventuellement de formation auprès des intéressés accroît ensuite encore les chances de bon fonctionnement de l'ouvrage. Les futurs utilisateurs perçoivent en effet plus clairement le fonctionnement, les capacités et les limites de l'aménagement, donc ce qu'il est en mesure de leur apporter et dans quelles conditions.

Tous ces impératifs n'assurent en aucune façon à eux seuls l'entière réussite de l'opération, ils ne font que restreindre les risques d'échec. Une multitude d'autres facteurs entrent effectivement en jeu, en relation avec les problèmes plus spécifiques à l'agriculture, à l'élevage, à l'organisation des services publics, aux relations entre ces derniers et les villages, aux politiques d'interventions des Etats, ... Mais nous atteignons là encore les limites du cadre de la petite hydraulique rurale pour entrer dans des considérations générales sur le développement.

V - DES TECHNIQUES DE MAITRISE DE L'EVAPORATION PEU CONNUES DANS LES REGIONS SOUDANO-SAHELIENNES.

Les données très clairsemées concernant les techniques de limitation de l'évaporation et de condensation artificielle ont été récoltées dans des ouvrages généraux sur la maîtrise de l'eau. Les auteurs, G. Neuvy et A. Gioda notamment, évoquent les procédés, assurent que les exemples sahéliens sont en nombres très limités mais que les méthodes méritent d'être présentées car elles leur semblent adaptables à certaines régions sahéliennes.

Nous ne pouvons ici que constater l'extrême rareté des publications consacrées à ce type d'aménagement au Sahel. Aucune approche de leurs caractéristiques vis à vis de leur utilisation dans les conditions particulières aux zones arides et semi-arides n'est envisageable. Ce vide d'information appelle quelques questions.

Pourquoi ces méthodes ne sont-elles que très peu employées par les populations sahéliennes ? Cela trouve-t-il son origine dans une tradition peu orientée vers la maîtrise de l'eau ? Le contexte naturel, climatique et pédologique, ne serait-il pas favorable au développement de telles pratiques ? Des recherches ont-elles été entreprises à ce sujet par les organisations de développement ? Si oui, quels ont-été les résultats ?

Très peu de spécialistes des questions d'hydraulique de l'ORSTOM et du CIRAD, organismes de recherche et de développement dans les régions tropicales, s'intéressent de près à ces techniques et en conséquence la documentation à ce propos reste très pauvre.

L'objectif de ce mémoire étant d'analyser les aménagements effectivement employés dans les régions sahéliennes occidentales, nous ne pouvons nous permettre de disperser nos recherches sur le sujet. Nous signalons simplement l'absence de référence à ces méthodes et l'intérêt d'une étude à ce propos, ne serait-ce que pour répondre aux questions soulevées plus haut.

* * * * *

Globalement cette troisième partie ne remet en cause aucun grand principe : rien n'est ni parfait ni complètement imparfait, chaque type d'aménagement présente des qualités qui lui sont propres, et des défauts qui le sont tout autant. D'aucuns pourraient nous reprocher d'avoir traité un sujet tellement vaste et varié qu'au bout du compte seule cette conclusion s'impose : à chaque cas particulier ses caractéristiques, ses problèmes et ses solutions particulières, non généralisables et donc non solvables globalement.

A cela nous répondons que bien au contraire les résultats obtenus grâce à ce type d'approche offrent un double intérêt. D'une part, nous percevons effectivement l'extrême variété des problèmes propres à chaque situation et auxquels seules des réponses locales peuvent apporter des solutions fiables, mais que d'autre part un certain nombre de difficultés se retrouvent fréquemment, dans diverses situations, et toujours identiques.

A notre sens ces problèmes sont d'autant plus importants qu'ils touchent tous les projets, sont issus de fautes partout répétées, et devraient donc être rapidement identifiés et résolus. Paradoxalement ils continuent d'empêcher la bonne marche de quantités d'opérations depuis plusieurs décennies. D'où vient leur force et pourquoi ne s'est-on pas encore donné les moyens de les combattre efficacement ?

Nous concluons notre travail sur ces quelques éléments de réflexion, mais avant nous proposons de rassembler, dans le tableau 17 ci-dessous, les problèmes persistants de chaque type d'aménagement de petite hydraulique rurale.

tableau 17 : Récapitulatif des caractéristiques propres à chaque type d'aménagement.

Types d'ouvrage	thèmes	points positifs	problèmes persistants
Récupération des eaux de pluie	Mise en place	construction simple coût accessible entretien simple	Incertitude de l'apparition de la ressource dégradation rapide de la qualité très rare
	Mise en valeur	potabilité de l'eau de pluie	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	aucun	
aménagements traditionnels de lutte contre le ruissellement diffus	Mise en place	construction simple coût très accessible	nécessité d'entretiens fréquents valorisation uniquement agricole Intégration difficile car compréhension incomplète des caractéristiques du système plus rare sur des études de cas
	Mise en valeur	augmentation des rendements agricoles	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	rétention de l'eau et des sols importante pour des généralités	
barrages de surface et mares aménagées	Mise en place	construction assez simple coût accessible	Intégration difficile car compréhension incomplète des caractéristiques du système rôle supposé dans le développement des maladies plus rare sur des études de cas
	Mise en valeur	utilisation agricole, pastorale, piscicole, et boisson si puits associé	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	rétention de l'eau et des sols importante pour des généralités	
barrages de sable et souterrains	Mise en place	construction plus complexe qu'en surface coût plus élevé que les barrages de surface	Intégration difficile car compréhension incomplète des caractéristiques du système rôle supposé dans le développement des maladies plus rare sur des études de cas
	Mise en valeur	utilisation pour tous usages : agricole, pastoral, piscicole, boisson	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	importante pour des généralités	
puits	Mise en place	construction simple coût accessible	Intégration difficile car compréhension incomplète des caractéristiques du système rôle supposé dans le développement des maladies conflits d'usage
	Mise en valeur	ressource non dépendante des pluies, potabilité de la plupart des eaux d'aquifères	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	aucun si débit faible très importante	
forages	Mise en place	construction inaccessible aux ruraux seuls coût accessible	Intégration difficile car compréhension incomplète des caractéristiques du système rôle supposé dans le développement des maladies conflits d'usage, pannes des systèmes d'exhaure surexploitation des nappes / désertification
	Mise en valeur	ressource non dépendante des pluies, potabilité de la plupart des eaux d'aquifères	
	Impact sur le milieu naturel Documentation	très importante	
limitation de l'évaporation et condensation artificielle	Mise en place		très peu d'études
	Mise en valeur		
	Impact sur le milieu naturel Documentation		

CONCLUSION

REFLEXIONS SUR LES ACTIONS DE DEVELOPPEMENT LIEES AUX PETITS AMENAGEMENTS D'HYDRAULIQUE RURALE

LE CONCEPT "D'AMENAGEMENT" A MODIFIER.	108
LE CONCEPT DE "DEVELOPPEMENT" A REVOIR.	110
UN PREALABLE AUX ACTIONS FUTURES : LE COMPLEMENT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE FOND.	110

Cette étape finale de bilan des informations récoltées va nous permettre d'ouvrir la porte à des réflexions personnelles sur des thèmes plus vastes.

Nous avons voulu par cette étude appréhender un exemple de relation nature-homme où toute action de ce dernier sur son milieu de vie se justifie avec force par un besoin impérieux, et non par la recherche d'amélioration d'un confort déjà établi. Le choix de la zone géographique, les régions arides et semi-arides d'Afrique de l'ouest et principalement le soudano-sahéliennes, et du thème, les petits aménagements d'hydraulique rurale, est délibéré, car dans ces conditions tout aménagement remplit son rôle le plus simple et à la fois le plus fondamental : il est souvent vital.

Dans un premier temps nous avons déterminé et caractérisé les différents éléments qui justifient la construction d'aménagements hydrauliques. Les composantes naturelles -climat, réseau hydrologique, géologie- constituent la part de l'offre tandis que la demande se résume dans notre cas aux différents usages que fait l'homme de l'eau : boisson, agriculture, élevage, utilisation domestique. L'évolution des deux termes de ce bilan tend à rendre de plus en plus difficile la satisfaction des besoins :

- la rareté habituelle de la ressource en eau en ces zones arides et semi-arides -courte saison des pluies, forte évaporation, irrégularité spatiale de la pluviométrie- s'accroît suite à une sécheresse qui dure depuis vingt cinq ans,
- la population de l'ensemble des pays sahéliens s'accroît fortement et régulièrement depuis le début du siècle, et le processus semble devoir se poursuivre.

Cette double évolution a conduit depuis plusieurs années à une dégradation du milieu, dont la plus marquante manifestation est la désertification. La nécessité d'une action s'impose donc comme une évidence, mais les modalités doivent être définies sur la base des caractéristiques du milieu existant.

Nombreuses sont les techniques qui ont été, ou sont encore, mises en oeuvre pour maîtriser l'eau et tenter de diminuer la dépendance de l'homme à son égard. A chaque stade du cycle de l'eau des méthodes diverses ont été développées, à tel point qu'il est possible aujourd'hui de trouver dans le passé une réponse à toute situation présente (figure 33). L'ensemble des procédés évoqués donne des résultats techniques expérimentaux très satisfaisants.

L'examen de situations in-situ a conduit à mitiger ce constat : tous les projets n'ont pas eu sur le terrain les dénouements escomptés. Bien que les causes soient très nombreuses et variées, en liaison avec les particularités locales, certaines difficultés se répètent, partout identiques, et nous autorisent à quelques remarques sur des concepts généraux.

LE CONCEPT "D'AMENAGEMENT" A MODIFIER.

Les opérations de maîtrise de la ressource en eau ne sont jamais menées ni de façon intégrée, ni de façon intensive. Nous pensons que les actions en cours peuvent être localement améliorées par deux moyens :

- l'analyse systématique sur chaque site des solutions concevables -barrages, puits, réservoirs d'eau de pluie, etc- pour augmenter les chances de disposer d'une ressource en eau satisfaisante,
- l'exploitation la plus intensive possible des ressources mises ainsi à disposition.

Concernant la première remarque, nous remettons en cause l'action locale des organismes de développement et les réactions des villageois. Vu de l'extérieur nous avons l'impression qu'un peu d'imagination et de volonté permettraient de franchir bien des barrières, ne serait-ce qu'en accommodant des procédés traditionnels connus à des situations locales. D'où vient alors cette lourdeur générale et cette faible motivation des habitants à chercher des solutions à leurs problèmes ? L'approche uniquement bibliographique n'a pas fourni assez d'éléments de réponse pour que nous osions ici une hypothèse.

La seconde remarque est principalement motivée par le fait que les volumes disponibles ne sont pas valorisés au maximum, quel que soit le type d'aménagement. Cette idée peut s'illustrer par un exemple unique, d'actualité et parlant à la fois : l'aquaculture dans les retenues d'eau de surface. Les recherches dans le domaine de l'aquaculture sont en pleine expansion à l'heure actuelle et il est de notre devoir d'en parler ici. La porte doit rester ouverte à toutes les innovations dont la vocation est l'amélioration des conditions de vie locale par la création d'un éventuel nouveau domaine d'activité.

L'aquaculture englobe l'ensemble des pratiques d'exploitation de l'eau par l'élevage ou la culture des différents organismes qui y vivent : algues, poissons, crustacés, mollusques pour les plus courants, mais aussi batraciens, serpents, crocodiles, etc. Les systèmes d'exploitation aquacoles, et piscicoles en particulier, utilisés actuellement s'étendent sur toute la gamme de l'intensification, du plus simple, où le poisson se nourrit des espèces naturelles, au plus complexe, où l'eau n'est qu'un support d'élevage et où l'alimentation est entièrement artificielle, apportée par l'homme. L'intérêt principal de la pisciculture réside dans le fait que les animaux prospèrent dans un volume d'eau, et non sur une surface. Grâce à cela les rendements de production sont bien plus importants que pour tous les élevages terrestres, quels qu'ils soient. De plus, certaines races de poissons ne demandent pas plus de six mois pour arriver à maturité, dans des volumes d'eau très réduits. Ces caractéristiques rendent leur élevage possible dans toutes les réserves où l'eau reste présente ne serait-ce que la moitié de l'année.

Comme pour la construction des aménagements eux-mêmes, les méthodes les plus traditionnelles, qui se rapprochent de la pêche, semblent être les plus appréciées, les mieux valorisées et donner les meilleurs résultats. La mise en place de ces techniques dans les pays sahéliens demeure pour l'instant à l'état d'essai. Aucun programme de grande envergure n'a encore été lancé sur un pays ; serait-ce d'ailleurs la bonne solution ?

Les quelques tentatives ponctuelles ont donné de bons résultats, l'objectif étant de tirer le maximum de profit de réserves destinées initialement à d'autres buts. De cette façon les villages satisfont d'une part leurs besoins quotidiens en eau pour les cultures, les animaux, et obtiennent d'autre part une nouvelle source d'alimentation, consommée sur place ou vendue.

Nous insistons sur le fait que la pisciculture ne peut être envisagée qu'à condition que la ressource ne fasse pas défaut pour d'autres besoins plus impérieux. Il faut de plus qu'au préalable les villageois aient été formés à l'élevage du poisson et qu'ils sachent le mettre en pratique pour obtenir les meilleurs rendements. La mise en place de telles pratiques ne s'improvise pas, mais si elle est correctement menée, elle peut aboutir à des résultats intéressants.

Cela suppose que le principe de "développement" soit clairement défini en faveur des populations locales

LE CONCEPT DE "DEVELOPPEMENT" A REVOIR.

L'acceptation difficile, ou inexistante, des ouvrages par les villageois, soldée d'un entretien lui-même inexistant ou inefficace, les problèmes de salubrité témoignent du dysfonctionnement des systèmes d'intervention en place :

- les villageois ne sont pas considérés comme des interlocuteurs à part entière, leurs réactions en témoignent,
- les infrastructures publiques actuelles sont manifestement trop lourdes, mal adaptées, pour assurer le maintien en état de marche des aménagements.

Nous proposons donc une révision du concept même de "développement". Villageois et aménageurs doivent d'abord être reconnus comme deux interlocuteurs à part entière, où le villageois est décideur tandis que l'aménageur est à la fois éducateur et conseiller.

Nous sommes conscients de la simplicité de cette vision. La réalité n'est certainement pas aussi simple mais nous manquons d'éléments pour en juger. Les échecs actuels ne traduisent-ils cependant pas des erreurs de choix de politique d'intervention ? Ne faut-il pas chercher des solutions sur d'autres voies que celles d'aujourd'hui ? Nous proposons donc ces considérations, sachant que l'écart entre la technologie des pays industrialisés et le mode de vie fondamentalement naturel de bon nombre de villages ruraux sahéliens ne peut se combler par une campagne d'enseignement. Nous sommes cependant persuadés que le savoir de base et la connaissance des faits permettent seuls leur acceptation.

Pourquoi alors ne pas transformer le "développeur" en enseignant, en conseiller, en artisan et laisser au villageois -"développé" ? - le rôle de décideur ? Cette solution risque-t-elle de se solder par des échecs plus cuisants que les actuels ? Cherche-t-on à bâtir le plus de barrages, creuser le plus de puits et de forages ou à garantir de façon ferme et définitive, à des populations qui vivent dans un contexte naturel déjà rude, les moyens de s'en sortir ? Cet objectif atteint, faudrait-il encore qu'ils aient l'assurance de pouvoir maintenir en état de marche leurs nouvelles installations.

Par ailleurs rien ne peut fonctionner efficacement si les infrastructures étatiques, à l'aval des chantiers, n'assurent pas des services d'entretien, de réparation et de conseil suffisants. Les premières actions menées dans ce sens sont encourageantes mais encore trop ponctuelles pour être déterminantes.

Nous gardons pour la fin ce qui nous semble le plus aberrant : l'entêtement des aménageurs à vouloir installer des systèmes modernes visiblement inadéquats.

Des techniques que nous pourrions qualifier "d'intermédiaires" existent partout à travers le monde. Nous avons décrit celles d'entre elles envisageables dans les régions sahéliennes en insistant sur le désintérêt des chercheurs et techniciens à leur encontre. Proposer des techniques de maîtrise des ressources en eau, parfois des technologies de spécialistes, à des civilisations qui n'ont aucune tradition hydraulique est un défi d'envergure qui méritait peut être d'être tenté. Par contre, persister dans cette voie depuis près d'un quart de siècle relève de l'acharnement borné. Pourquoi ne pas tenter de proposer aux villageois, au moins dans un premier temps, des procédés plus proches de leurs connaissances ? Cette solution nous paraît avantageuse à bien des égards :

- les études d'avant-projet sont moins complexes, moins chères,
- la construction est directement à la portée des futurs usagers,
- les mécanismes sont simples, leur entretien de même.

Finalement il nous semble que ce type d'opération aboutirait à des coûts bien moindres que toutes celles développées actuellement, que ce soit en terme de temps, d'énergie, de connaissances, d'hommes et d'argent.

Nous prôtons une transition douce entre l'état novice des populations sahéniennes, en matière d'hydraulique, et les techniques sophistiquées de nos pays par le recours à des méthodes traditionnelles de civilisations depuis toujours spécialistes de la maîtrise de l'eau.

Quoi qu'il en soit, tous les acteurs du développement auraient dû se pencher sur leur passé, et ce depuis longtemps, pour essayer d'analyser les raisons de leurs échecs, ce qui ne semble pas avoir été fait, ou alors inefficacement.

UN PREALABLE AUX ACTIONS FUTURES : LE COMPLEMENT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE FOND.

L'état actuel des données de base.

Nous l'avons vu tout au long de ce travail, la petite hydraulique rurale fait l'objet d'une littérature foisonnante, variée tant sur le fond que sur la forme. Du manuel technique à l'ouvrage traitant de l'impact social des aménagements sur les comportements de l'individu dans la société, en passant par des articles généraux de magazines destinés au grand public, tous traitent, dans leur langage propre, des problèmes de l'aménagement hydraulique.

Un constat nous a cependant conduits à inclure cette réflexion dans le mémoire. Tous les auteurs auxquels nous faisons référence traitent soit d'une partie précise de la maîtrise de l'eau, soit d'un autre sujet et consacrent alors une fraction de leur texte aux questions liées à la fois à leur thème principal et à l'hydraulique. Pour illustrer la première remarque nous pouvons donner en exemple les articles qui soulèvent uniquement la question sanitaire, ou bien qui insistent sur les techniques de construction de certains ouvrages, ou sur la mauvaise intégration des aménagements dans les sociétés rurales. Ici l'aménagement n'est pas considéré dans son ensemble mais de façon décousue. Les autres ouvrages s'attaquent à des problèmes beaucoup plus généraux et l'aménagement hydraulique intervient alors comme simple élément d'un vaste sujet. C'est le cas des documents qui évoquent la sécheresse climatique, la désertification, les caractéristiques de l'érosion en zones arides, ou bien d'autres thèmes encore ayant tous un lien plus ou moins direct avec l'aménagement hydraulique. Signalons toutefois que certains auteurs se sont consacrés uniquement à l'étude de l'eau, tels G. Neuvy. Dans ces cas-là la diversité des idées évoquées est telle que l'hydraulique rurale n'est abordée que très rapidement, avec une vision d'ensemble, sans que les problèmes particuliers soient clairement définis.

Finalement l'hydraulique villageoise n'est considérée par personne comme une discipline à part entière, mais comme un simple point parmi tant d'autres à l'intérieur de questions beaucoup plus vastes. Le résultat est double :

- certaines idées sont présentées maintes fois par des auteurs différents,
- bon nombre d'aspects de la question sont totalement laissés de côté.

La première conséquence a l'avantage de donner une vision diversifiée d'un même sujet, mais aussi l'inconvénient de voir se répéter plusieurs fois les mêmes idées sans apporter de renseignements complémentaires. La seconde est d'autant plus grave qu'il s'agit souvent d'un manque de données chiffrées dans tous les domaines. Cette absence de

support défend tout bilan rationnel des causes d'échec ou de réussite des réalisations du passé.

La nécessité de chiffrer toutes les réalisations passées.

Aucun bilan chiffré n'autorise à ce jour une approche rigoureuse des atouts et des défauts de chaque catégorie d'ouvrages. Notre jugement ne porte donc que sur des résultats ponctuels et des impressions générales dites "plutôt positives" ou "plutôt négatives". Dans ces conditions, il est impossible de cerner précisément les défaillances des différents systèmes et leur importance relative. Par extension, les causes sont difficilement définissables, portant ainsi préjudice à la recherche de remèdes conformes aux imperfections les plus sensiblement ressenties. Il nous semble primordial, qu'à tous les niveaux de l'aménagement, soient régulièrement mesurées les différentes caractéristiques majeures, du point de vue technique et humain, de chaque réalisation pour assurer une cohérence d'ensemble et rectifier les manoeuvres malchanceuses. V. Robert plaide cette cause dans le domaine de la santé en écrivant que "(...) *l'étude des répercussions [sanitaires] des aménagements déjà existants constitue une étape indispensable pour autoriser des prévisions sur de futures réalisations.*" (Robert, 1989, p. 543).

Cette démarche doit démarrer à la base pour être efficace. Les organisations qui interviennent pour la construction des ouvrages peuvent facilement chiffrer les coûts et la réussite de chaque implantation et répertorier ce premier ensemble d'informations. Un suivi régulier et rigoureux de tous les villages bénéficiaires d'ouvrages suffit ensuite à estimer le degré de réussite du projet, les paramètres favorables et les problèmes qui persistent. Sur le plan technique une simple vérification des installations permet de connaître leur état de fonctionnement. Sur le plan social et économique l'approche reste plus délicate. Une enquête auprès des villageois apportera d'autant plus de renseignements que l'action d'implantation a été bien perçue et que les intervenants extérieurs ont été bien acceptés au sein de la société.

Il est fort probable que bon nombre d'organisations, notamment les ONG, agissent déjà de la sorte. Dans ce cas l'obtention des données en vue d'un recensement à plus grande échelle ne pose pas trop de difficultés. Par contre, quand il s'agit de vastes campagnes menées par les Etats, sur l'ensemble d'un territoire, la gestion des informations est moins soutenue et leur obtention plus aléatoire. Le coût des opérations figure certainement dans les fichiers des services concernés par le paiement des entreprises responsables des travaux. Par contre il semble que le suivi technique des opérations ne soit assuré que très sporadiquement, ce qui laisse supposer à posteriori une absence totale d'observations sur le plan socio-économique.

Ainsi dès le départ le manque d'assiduité et de rigueur prohibe tout recensement exhaustif des actions entreprises. Il reste malgré cela la possibilité de récupérer un ensemble non négligeable de données permettant d'assurer une première base à une réflexion d'ensemble.

La seconde étape du travail consisterait en un regroupement de la masse de toutes les informations récoltées auprès des organismes concernés par les aménagements d'hydraulique rurale. La constitution d'une banque de données serait alors envisageable et utilisable de deux façons.

Une analyse des résultats peut permettre avant tout de faire un premier bilan critique fondé sur une base solide, bien qu'incomplète, et réorienter ainsi certains axes de recherche et actions actuels ou bien les compléter par de nouveaux.

Une telle banque de données permet ensuite une mise à disposition auprès de tous les services, organisations et associations concernés, de l'ensemble des renseignements

qu'elle contient. Chaque équipe peut ainsi comparer son projet à des opérations semblables dont les résultats sont connus, et modifier en conséquence les caractéristiques de son programme qui risque de le conduire à des déconvenues.

Ces idées restent très générales et leur confrontation à la réalité nous mènerait sans doute à abandonner certaines d'entre elles, ou du moins à les réviser. Le manque sévère de recensement des données du passé, de suivis rigoureux et réguliers des installations actuelles, demeure une rude réalité. Des mesures doivent être prises et nous avons tenu à faire apparaître les quelques réflexions qu'ont suscitées les observations que nous avons pu faire au cours de ce travail.

L'absence d'une vision d'ensemble des problèmes, par des études chiffrées, régulières et scrupuleuses, ne s'adresse pas qu'aux questions relatives aux opérations passées. Il semble que ce souci ne soit pas plus marqué pour déterminer précisément la demande, ce que désirent et ce dont ont besoin les sociétés rurales agricoles ou pastorales.

La nécessaire connaissance des besoins réels des populations.

Le choix des zones d'intervention de la grande majorité des campagnes d'aménagement lancées par les différents Etats sahéliens est orienté sur la base de critères d'urgence définis par des études théoriques. Les facteurs naturels tels que l'aridité, la fréquence et l'abondance des pluies sont d'abord étudiés. Ensuite, densité de population, secteurs d'activité, proximité des villages sont pris en compte. Cette logique d'appréhension des besoins est mue principalement par un souci de simplification et de rapidité de l'action, tout en cherchant à parer au plus pressant. Les villages ainsi retenus ne répondent cependant pas toujours par un engouement général, loin s'en faut.

Certaines organisations sont durement critiquées pour avoir rendu leurs services uniquement aux villages les plus motivés d'une région et laissé de côté les autres, ces opérations ayant été très réussies. Le but des opérations de développement n'est-il plus alors d'aboutir à des réussites ? Certains villages peuvent être plus nécessiteux que d'autres et avoir moins conscience des avantages de la maîtrise de l'eau. Il va de soi qu'il ne s'agit pas de les laisser choir pour autant mais les façons d'agir sont multiples. L'exemple de résultats positifs n'a-t-il pas des chances d'entraîner des villages réticents au départ ? Nous croyons en l'efficacité des modèles et par conséquent en la nécessité d'agir là où les risques d'échec sont les moindres. Nous partageons le point de vue de B. Martinelli quand il propose "*(...) d'étudier de près les types d'initiatives techniques attendues des intéressés (...), de prendre en considération la perception du groupe récepteur et tenir compte de l'évaluation que le groupe fait de la situation d'assistance.*" (Martinelli & Serpantié, 1988, p. 47).

Le schéma d'action qui nous semble utile de mettre en oeuvre se calque sur celui évoqué pour le recensement des données relatives aux opérations passées : la centralisation d'un maximum d'informations concernant les désirs et les besoins des populations. L'obtention des renseignements s'expose à des difficultés importantes car dans ce domaine tout reste à faire, aucun organisme ne s'est penché sur la question de façon globale.

La première étape se situe sur le terrain, auprès des intéressés et consiste en un recensement minutieux de toutes les interrogations relatives aux aménagements hydrauliques villageois. Deux questions se posent à ce niveau. Qui interroger ? Comment interroger ?

A la première question nous répondons que toutes les personnes ayant été ou étant susceptibles d'être amenées à s'intéresser à l'implantation d'un ouvrage hydraulique doivent être questionnées. Trois catégories d'individus se distinguent :

- les villageois qui bénéficient d'un aménagement,
- les villageois motivés par l'implantation d'un ouvrage dans leur zone d'activité,
- tout le personnel d'encadrement et de suivi des aménagements.

Quiconque s'étant déjà trouvé confronté à des ouvrages hydrauliques -villageois ou technicien- peut, en plus de sa requête, apporter sa contribution à la définition des avantages et des inconvénients du type d'ouvrage qu'il connaît.

Les questions soulevées par chaque classe dépendront de conceptions variées du problème. Cette diversité donne les chances de cerner au mieux les faits. La plus grande difficulté réside dans la méthode à employer pour obtenir ces renseignements, la façon d'agir utilisée jusqu'alors en témoigne.

Il va de soi qu'une enquête dans tous les villages où des aménagements hydrauliques sont envisagés n'est pas justifiable économiquement parlant. Par contre cette démarche peut très bien se concevoir auprès des populations où un ouvrage existe déjà, ou existait, et auprès de toutes les organisations qui ont participé à la mise en place et/ou au suivi de ces ouvrages. La logique voudrait en effet qu'un passage soit régulièrement effectué pour s'assurer du bon fonctionnement de ces installations. Dans ces conditions il ne reste plus qu'à demander aux villageois de communiquer leurs remarques et de proposer les solutions qui leur semblent les plus adaptées à leur situation. Pour les zones où l'aménagement n'en est qu'au stade de projet, il serait souhaitable avant tout que les villages concernés soient prévenus des opérations qui se préparent. Ensuite, le passage d'enquêteurs sur le secteur, avant même le commencement des études, permettrait de rencontrer les populations les plus intéressées, mais aussi de recenser les observations formulées par tous, intéressés ou non.

L'étape suivante du travail va être la collecte des informations. La tâche la plus ingrate et la plus aléatoire est sans doute la récolte des renseignements sur le terrain. La deuxième phase ne consiste plus qu'en un tri et en un classement des données centralisées. Les services rendus par cette banque de données sont du même ordre que ceux proposés pour le recensement des indications sur les réalisations passées :

- modification des méthodes d'approche des nouveaux projets en fonction des remarques soulevées,
- création ou réorientation de certains axes de recherche avec le souci de les adapter aux problèmes d'actualité. A ce titre l'actualisation des renseignements doit être possible en tout temps et effectuée régulièrement et rapidement.

Suite à cette dernière remarque nous voudrions consacrer un court chapitre spécifique à la recherche de base, scientifique et technique. Son importance est en effet capitale car elle sert de support au développement des actions de terrain et se trouve donc en partie responsable des réussites et des échecs qui y font suite.

La nécessité d'adapter perpétuellement la recherche scientifique en fonction des besoins locaux.

Nous avons insisté sur le fait que l'aménagement hydraulique villageois n'est pas considéré comme une discipline à part entière. Dans le domaine de la recherche cette

remarque est justifiée par la variété des secteurs concernés par la maîtrise de l'eau : climatologie, hydrologie, géologie, hydrogéologie, pédologie, pour ne citer que les sciences de la nature les plus connues. Pour être exact il faudrait ajouter la sociologie, l'économie, la géographie, l'écologie, et la liste n'est certainement pas encore exhaustive.

Le travail qui consisterait à cerner l'ensemble des axes de recherche de chaque matière en liaison avec l'aménagement hydraulique représenterait à lui seul des années de travail, sans doute inutiles car, comme l'indique le titre de cette section, ces travaux doivent être sans arrêt remis à l'ordre du jour. Notre désir n'est donc pas ici de résumer les études entreprises jusqu'alors par les chercheurs à propos de l'aménagement hydraulique, ni même de chercher à connaître celles envisagées. Cette opération est régulièrement renouvelée par les laboratoires concernés. A ce propos nous pouvons citer en exemple l'ouvrage de Guiraud et al., Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest (1990), à la fin duquel un ensemble d' "études et d'actions diverses" sont proposées.

Nous poursuivons ici l'idée de l'intérêt de bilans aussi complets que possible des expériences du passé et de la demande actuelle. Comment ces recensements de données et ces analyses peuvent-ils être exploités pour compléter la recherche fondamentale ?

Dans un premier temps l'utilisation de ces informations peut être envisagée secteur d'activité par secteur d'activité. Chaque branche de la recherche analyse, dans son domaine propre, d'une part les erreurs à corriger et d'autre part les actions qui s'avèrent les plus urgentes sur le terrain. Pour illustrer notre propos prenons l'exemple encore peu développé de la construction des barrages souterrains. S'il s'avère que la technique donne de bons résultats, que la mise en valeur de ces ouvrages se déroule sans difficultés majeures, alors il faudra chercher à développer cette pratique partout où cela est envisageable. Ceci suppose des études géologiques et hydrogéologiques approfondies qui devront être encouragées. Imaginons un autre exemple basé sur les ouvrages de récupération d'eau de pluie. Dans ce cas les climatologues seront les premiers intéressés, leur travail consistant à déterminer aussi précisément que possible les volumes tombés à tel ou tel endroit, ainsi que les intensités des pluies, leur répartition sur l'année, leur fréquence d'apparition et tous les paramètres qui contribuent à définir l'intérêt de la méthode envisagée. Nous nous sommes cantonnés là à des cas d'études techniques, mais il va de soi que les avis recueillis auprès des utilisateurs actuels, des agents de développement et des futurs bénéficiaires des aménagements doivent permettre de préciser ces axes de recherche. Ainsi les pistes qui à priori semblaient techniquement très intéressantes, mais dont l'intégration dans les sociétés rurales posent trop de problèmes, devront peut-être être abandonnées.

Le suivi de l'évolution des techniques et des besoins en matière d'aménagement hydraulique peut ainsi faciliter la tâche des laboratoires de recherche, dont l'activité est sensée servir le développement, dans la détermination de leurs objectifs en rapport avec les besoins réels de terrain.

Si par ailleurs les intérêts du développement des ouvrages hydrauliques sont mis en avant, il peut être intéressant de proposer la collaboration entre différentes équipes de chercheurs. Un suivi global de l'ensemble des programmes d'hydraulique peut préparer le terrain pour la création de ces équipes pluridisciplinaires, les travaux pouvant directement être dirigés sur les voies les plus favorables. Pour chaque type d'aménagement les spécialistes concernés peuvent être connus ainsi que le travail qui attend chacun d'eux. Reprenons l'exemple des barrages souterrains dont les conditions naturelles d'implantations sont très restrictives et font appel aux disciplines suivantes : climatologie, géologie, hydrologie et hydrogéologie pour l'étude du site, et éventuellement pédologie et agronomie si une mise en valeur agricole est prévue par la suite. La connaissance exacte des lacunes de la recherche dans tous ces domaines doit permettre aux uns et aux autres de coordonner leurs travaux tout en évitant le doublement d'actions, comme par exemple la multiplication de déplacements sur le terrain, et d'augmenter ainsi l'efficacité des recherches.

Confrontons maintenant ce qui a déjà été entrepris dans ce domaine, que l'on peut qualifier de collaboration entre les différents acteurs du développement et de coordination des actions, aux idées que nous venons de proposer.

Analysé secteur par secteur, le tableau n'est pas encourageant. D'un côté on dénonce "(...) *le nombrilisme de certains scientifiques, leur confort professionnel, leur souci de notoriété plus que leur volonté d'apporter leur pierre à la solution de problèmes qu'ils côtoient dans l'exercice de leur profession.*" (Courade, 1989, p. 352). D'un autre on accuse les agents du développement de mettre de la mauvaise volonté à partager leurs expériences : "*Depuis longtemps on a reconnu la nécessité de coopération intersectorielle entre les ONG et les ING (...) Toutefois l'ignorance du problème, le scepticisme face au besoin d'introduire des modifications de projets et la peur des coûts supplémentaires sont quelques raisons qui expliquent à ce jour la piètre collaboration intersectorielle.*" (Morin, 1990, p. 35).

Force est de constater la timidité générale face à la nécessité de partager les expériences, de collaborer et de coordonner les travaux de tous. Cette maigre ferveur se double d'une incohérence entre les discours et les actes. Ainsi tous reconnaissent, comme l'exprime C. Reij, qu'"*il y a un besoin évident de renforcement de la coordination et de l'échange d'informations entre projets pour que chacun puisse tirer des conclusions de l'expérience des autres, et éviter de "réinventer sans cesse la roue"*" (Reij, 1989, p. 35), ou bien encore que "*les décideurs doivent s'entourer de spécialistes de toutes les disciplines concernées pour envisager au mieux la prévention des risques avant qu'ils n'apparaissent et pour intervenir au cas où ils se concrétiseraient.*" (Robert, 1989, p. 543). A cela tous promettent, avec une bonne foi apparente, de faire un effort, à l'image des ONG qui comme l'annonce le CRID "*s'engagent à augmenter leur capacité opérationnelle en multipliant les lieux de concertation avec les scientifiques, les professionnels, les collectivités locales, etc., coordonner les actions de terrain et les actions d'éducation au développement (...) étudier la possibilité de mettre en place une agence opérationnelle des ONG, de façon à rendre leur travail plus professionnel, tant sur les actions de terrain que sur les actions de communication.*" (CRID, 1992, p. 86).

Tout ceci semble logique tant que le discours est lu dans l'ordre dans lequel nous venons de le présenter. Il s'avère que rares sont ceux qui sont passés de la parole aux actes. Quelques contacts plus directs avec les milieux concernés, par des discussions et non par l'intermédiaire de publications, révèlent que souvent les déclarations d'intention en restent au stade primitif de déclarations. Chacun pense-t-il détenir la réponse au problème et pouvoir se passer des connaissances des autres ? Nous en doutons, au vu des résultats accumulés depuis 30 ans, qui localement sont tantôt des réussites encourageantes, tantôt des échecs cuisants, mais qui, dans l'ensemble, ne donnent pas entière satisfaction.

Cette incohérence générale, que nous avons volontairement relatée par des citations pour qu'elle garde tout son poids originel, renforce notre proposition selon laquelle il est urgent de créer un organe indépendant de coordination des actions, d'échanges d'informations entre les différents acteurs, si l'on veut espérer donner la priorité à la satisfaction des besoins locaux, et non à la promotion des uns ou des autres par des opérations isolées.

A l'opposé, cette même incohérence des affirmations et des actes confirme que toute action dans ce sens risque de se confronter aux intérêts de beaucoup, de n'être encouragée que très rarement, et soutenue par personne. Nous arrivons là à un point sensible où toute évolution, reconnue nécessaire par tous, n'est envisageable qu'au prix de mutations importantes des principes et des comportements, que personne ne souhaite initier.

Quel avenir attend les pays sahéliens ? Les difficultés soulevées dans notre travail ne concernent qu'une seule des nombreuses activités liées à l'eau. La salinisation des sols résultant des fortes valeurs d'évaporation, l'irrigation des cultures, la gestion des eaux urbaines, eau potable et eaux usées, constituent quelques uns des nombreux autres problèmes d'hydraulique que les Etats du Sahel doivent encore résoudre. L'inhospitalité du milieu naturel, aggravée d'une sécheresse d'un quart de siècle, et la croissance démographique régulière et pesante nous semblent être des défis suffisants pour ces pays, sans que des interventions extérieures insuffisamment réfléchies et mal gérées ne compliquent encore la situation par des effets pervers.

* * * * *

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE CLASSEE	119
TABLEAU DES CONFERENCES SUIVIES	129
LISTE DES ILLUSTRATIONS	130
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	132

BIBLIOGRAPHIE CLASSEE PAR PARTIES PUIS PAR THEMES.

PREMIERE PARTIE : LE MILIEU SAHELIEU.**Généralités.**

- ANONYME. (1990). Atlas statistique mondial. Encyclopédia Universalis.
- ARRIGNON J. (1987). Agro-écologie des zones arides et sub-humides. Technologies agricoles et productions tropicales ; 300 p., ill.
- CAHIERS FRANCAIS (1983). La faim dans le Tiers-Monde. Les Cahiers Français ; 80 p., ill.
- C.I.I.D. (1967). Dictionnaire technique multilingue des irrigations et du drainage. CIID ; 805 p.
- TOUPET Ch. (1992). Le Sahel. Nathan Université, Géographie ; 175 p., ill.
- U.N.E.S.C.O. (1979). Le Sahel : bases écologiques de l'aménagement. Notes techniques du M.A.B. ; 99 p.
- LE FLOC'H E. et al. (1992) L'aridité: une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. ORSTOM, Collection didactiques ; 597 p.
- SALL M. (1992). Transformation de l'agriculture et crise de l'environnement dans le Saloum méridional (Sénégal). Espace Géographique n° 4 ; p. 343 à 346, ill.
- NEBIE O. (1988). Organisation du monde rural au Sahel : l'exemple du Burkina Faso. In Les cahiers d'Outre-Mer, n° 162 ; p. 27 à 40.

Climatologie.

- GRIFFITHS J.F. (1972). Climates of Africa. In World survey of Clomatology, vol. 10, Elsevier publ. comp. ; 604 p.
- LEROUX M. (1975). Alizé ou mousson ? Extrait de Travaux et Documents Géologiques Tropicaux, n° 19, six études, CNRS ; p. 70 à 85, ill.
- LEROUX M. (1983). Facteurs aérologiques et domaines climatiques. In Le climat de l'Afrique tropicale, éd. Champion ; planche 244.
- LEROUX M. (1988). La variabilité des précipitations en Afrique occidentale : les composantes aérologiques du problème. ORSTOM, Veille climatique satellitaire, Centre Météorologique Spatial, Lannion, n° 22 ; 23 p., ill.
- LEROUX M. (1992). Interprétation météorologique des changements climatiques observés en Afrique depuis 18 000 ans. Académie Royale des Sciences, Géo. Eco. Trop., Bruxelles ; 24 p., ill.
- LEROUX M. (1992). L'Equateur Météorologique en Afrique tropicale. Du Front Intertropical (F.I.T.) à l'Equateur Météorologique (E.M.I. et E.M.V.). Evolution d'un concept. Assemblée Internationale de Climatologie, vol. 5 ; 6 p.

NDONG J.B. (1991). Etudes des saisons pluvieuses 1985-1986 et 1987 au Sénégal. Université Cheikh Anta Diop, Fac. des lettres et sciences humaines, Dép. de Géographie, Mémoire de maîtrise ; 149 p.

O.M.M. (1983). La situation climatique et la sécheresse en Afrique. OMM, Programme mondial des applications climatologiques ; 35 p.

Hydrologie.

DIONE O. (1992). Sécheresse climatique dans le bassin versant de la Falémé. Université Cheikh Anta Diop, Fac. des lettres et sciences humaines, Dép. de Géographie, Mémoire de D.E.A. ; 33 p.

O.M.M. (1985). Water resources and climatic changes - Sensitivity of water-resource systems to climate change and variability. OMM, T.D. n° 247, in Séminaire sur la lutte contre la désertification, Sénégal ; 50 p.

SIRCOULON J. (1989). Impact des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides, comportement des cours d'eau tropicaux, des rivières et des lacs en zone sahélienne. OMM, n° 380 ; 90 p., ill.

SIRCOULON J. (1992). Evolution des climats et des ressources en eau dans l'Afrique contemporaine : l'environnement en Afrique. Documentation Française, n° 161 (spécial) ; p 57 à 77.

Hydrogéologie.

GUIRAUD R. et al. (1990). L'hydrogéologie de l'Afrique de l'ouest : synthèse des connaissances sur le socle cristallin et cristallophylien et sédimentaire ancien. Ministère de la Coopération, Coll. Maîtrise de l'eau ; 147 p., ill.

Pédologie.

BOIVIN & LEBRUSQ (1985). Désertification et salinisation des terres au Sénégal. Problèmes et remèdes. In séminaire sur la lutte contre la désertification, Sénégal ; 5 p.

BRABAN P. (1992). La dégradation des terres en Afrique. Documentation Française, n° 161 (spécial) ; p. 90 à 108.

LE HOUEROU H.N. (1979). Ecologie et désertification en Afrique. In travaux de l'Institut de Géographie de Reims, n° 33 ; p. 5 à 26, ill.

KENNETH HARE F. (1983). Climate and desertification. OMM, Analyse révisée ; 150 p., ill.

U.N.E.S.C.O. (1983). Etudes de cas sur la désertification : région d'Eghazer et Azawah. NIGER - UNESCO ; p 119 à 151, ill.

DEUXIEME PARTIE : LES TECHNIQUES.

La lutte anti-érosive.

ALBERGEL J. et al. (1993). Mise en valeur des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. ORSTOM/CIRAD ; 335 p., ill.

CHLEQ J.L. & DUPRIEZ H. (1984). Eau et terre en fuite. Métiers de l'eau au Sahel, Ed. l'Harmattan ; 125 p., ill.

DANCETTE & LOYER (1985). Conservation des eaux et du sol. In séminaire sur la lutte contre la désertification, Sénégal ; 5 p., ill.

DUGUE P. (1986). L'utilisation des ressources en eau à l'échelle d'un village. Perspectives de développement de petits périmètres irrigués de saison des pluies et de saison sèche au Yatenga. Contraintes techniques et socio-économiques. CIRAD, Dép. Syst. Agraires, in Aménagements hydro-agricoles et systèmes de production ; 14 p., ill.

HEUSCH B. (1986). Cinquantes ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du nord : un bilan. In Cahiers ORSTOM, sér. péd., vol. 22, n° 2 ; p. 153 à 162.

MARCHAL J.Y. (1986). Vingt ans de lutte anti-érosive au Burkina Faso. In Cahiers ORSTOM, sér. péd., vol. 22, n° 2 ; p. 173 à 180.

MIETTON M. (1986). Méthodes et Efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique. In Cahiers ORSTOM, sér. péd., vol. 22, n° 2 ; p. 181 à 196, ill.

ROOSE E. (1983). Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture, en Afrique occidentale. In Cahiers ORSTOM, pédologie, n° 4 ; p. 327 à 329, ill.

ROOSE E. (1986). Terrasses de diversion ou micro-barrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. In Cahiers ORSTOM, sér. pédologie, vol. 22, n° 2 ; p. 197 à 208, ill.

ROOSE E. (1989). Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique occidentale soudano-sahélienne. Définitions, fonctionnements, limites et améliorations possibles. In Bulletin Réseau Erosion n° 10 ; p. 98 à 107, ill.

SERPANTIE G. (1988a). Aménagements de conditionnement du ruissellement pour les pentes cultivées soudano-sahéliennes. ORSTOM, in Programme de recherche : dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne. Bidi, Yatenga, Burkina-Faso. Résultats d'étape ; 13 p., ill.

SERPANTIE G. (1988b). Aménagements de petits bas-fonds soudano-sahéliens. Eléments pour des choix de priorités et de techniques. Exemple de la digue filtrante partiellement colmatée de Bidi Gourga. ORSTOM, in Programme de recherche : dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne. Bidi, Yatenga, Burkina-Faso. Résultats d'étape ; 12 p., ill.

Les retenues d'eau.

ADAMS & CARTER (1987). Small scale irrigation in sub-saharian Africa. In Progress in Physical Géographie, n° 1 ; p. 1 à 27.

ANDREINI & BOURGUET (1984). Les barrages souterrains : mise en oeuvre au Cap-Vert. Conditions d'application au Sahel. BRGM, Hydrologie, n° 4 ; p. 393 à 399, ill.

ANONYME (1986). Etude critique des retenues collinaires de l'Ader-Doutchi-Maggia : cas des barrages de Ibohamane et Magagi. République du Niger ; 17 p.

BERTON S. (1988). La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et micro-barrages en Afrique de l'ouest. Ministère de la Coopération, GRET, AFVP, dossier n° 12, "le point sur" ; 474 p., ill.

BONVALLOT J. (1986). Tabias et jessour du Sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. In Cahiers ORSTOM, sér. pédologie, vol. 22, n° 2 ; p. 163 à 171.

CHOVELON P. (1989). Cinq petits périmètres irrigués au Niger. BRGM, Hydrologie, n° 4 ; p. 265 à 270

COMITE POUR LERE (1990). Projet de remise en eau des lacs Tanda et Kabara. République du Mali, rapport au 31 décembre 1989 ; 21 p., ill.

D'AT DE SAINT FOULC et al (1985). Petits barrages en terre au Burkina Faso. Bilan et analyse critique. CIEH ; 134 p., ill.

GADELLE F. (1989). Hydraulique pastorale et rurale. Le surcreusement des mares. Ministère de la Coopération, série Maîtrise de l'eau ; 122 p., ill.

GUIRAUD R. (1990). Petits barrages et barrages de sub-surface en pays aride et semi-aride : l'exemple de l'Afrique saharienne et sahélienne. In Paepe et al., Vol. 325, série C ; p. 513 à 522, ill.

WEDEL P. & STEVENS R. (1990). Ground water recharge and storage by damming a ephemeral stream. In Paepe et al., volume 325, série C ; p. 541 à 551, ill.

Les captages d'eau souterraine.

BARRY M. (1990). Evaluation de trente hydropompes Vergnet dans la province du Yatenga (Burkina Faso). In Bulletin de liaison du CIEH, n° 79 ; p. 29 à 33, ill.

COLLIN J.J. (1986). Stratégie du développement du recours aux eaux souterraines pour l'irrigation en Afrique sub-saharienne. De la cartographie décisionnelle aux schémas d'aménagement, puis à la mise en place des moyens de gestion des ressources en eau souterraine. BRGM, note technique ; 24 p.

COLLIN J.J. (1989). Eau souterraine et irrigation en Afrique sahélienne. BRGM, Hydrologie, n° 4 ; p. 247 à 248.

DILUCA C. & DE REYNIES E. (1983). Forage d'eau : matériel et techniques mises en oeuvre en Afrique centrale et de l'ouest. CIEH & BURGEAP, Coll. Techniques rurales en Afrique ; 273 p., ill.

DILUCA C. (1987). Les pompes à main en hydraulique villageoise. CIEH, Ministère de la Coopération, Dossier Technologies et Développement ; 70 p., ill.

DUCHAMP R. & PRAMIL B. (1991). La motopompe solaire thermodynamique. ENSAM ; 15 p., ill.

LEGER et al. (1989). Petits périmètres irrigués par eau souterraine en terrains cristallins et cristallophyliens au Burkina Faso. In BRGM, Hydrologie, n° 4 ; p. 249 à 264

LEMOINE J. (1980). La construction des puits en Afrique tropicale. Ministère de la Coopération, BURGEAP, "Techniques rurales en Afrique", Etude et mise en valeur des eaux souterraines ; 200 p., ill.

MARTIN et al. (1984). Elaboration d'un dossier type d'hydraulique villageoise. CIEH, rapport provisoire ; 83 p.

MARY C. (1984). Mode de captage de l'eau par puits réalisés dans les terrains instables. In Bulletin du CIEH ; p. 39 à 43, ill.

REBOULET M.N. (1989). Les éoliennes de pompage. Théories, matériels et réalisations. CTA, GRET, Collection "le point sur les technologies" ; 1721 p., ill.

SOGREAH (1978). Les pompes et les petites stations de pompage. Ministère de la Coopération, Coll. Techniques rurales en Afrique ; 217 p., ill.

VETTORI C. (1985). Un exemple d'entreprise artisanale de forages manuels dans le Yatenga Comoé au Burkina Faso. Bulletin du CIEH ; p. 34 à 37

ZONGO & SYFIA (1990). Une pompe villageoise anti-panne. In Sécheresse, n° 2 ; p. 155.

La maîtrise de l'eau à l'état de vapeur.

GIODA A. et al. (1992). L'arbre fontaine. In La Recherche, vol. 23 ; p. 1400 à 1408.

TROISIEME PARTIE : ADAPTATION DES TECHNIQUES AUX BESOINS DES POPULATIONS RURALES.

Généralités.

CAIRNCROSS S. (1980). Evaluation for village water supply planning. John Wiley and Sons, International References Center for Community ; 176 p.

ENGELHARD Ph. et al. (1986). Enjeux de l'après-barrage, vallée du Sénégal. Ministère de la Coopération ; 632 p., ill.

GILGUY C. (1989). Dossier hydraulique. In Afrique agriculture, vol. 14, n° 162 ; p. 10 à 29, ill.

GUENGANT P.P. (1984). L'eau en Haute Volta, l'eau dans le développement rural. ESA, Mémoire de fin d'étude ; 135 p., ill.

MICHEL P. (1990). La vallée du Sénégal : milieu naturel, mise en valeur et aménagements. In *Espaces Tropicaux*, n° 2, CNRS ; p. 169 à 185.

NEUVY G. (1991). L'homme et l'eau dans le domaine tropical. Masson ; 230 p., ill.

Questions techniques.

A.C.C.T. (1991). Planification de l'aquaculture et développement. ACCT, synthèse de la session d'échanges de Caraquet ; 185 p.

BARROT P. (1990). Quand la pompe précède l'eau. In *Sécheresse*, n° 1 ; p. 79

BERNUS E. (1989). L'eau du désert. Usages, techniques et maîtrise de l'espace aux confins du Sahara. In *Etudes Rurales*, n° 115-116 ; p. 93 à 104, ill.

B.I.R.D. (1985). L'eau et la lutte contre la désertification. Séminaire sur la lutte contre la désertification, Sénégal ; 29 p., ill.

BORTOLLI & SOURNIA (1991). Les mirages de l'irrigation et le sous-développement : cas de l'Afrique sèche de l'ouest. CEGET - CNRS, in *Espaces tropicaux*, n° 3 ; p. 3 à 15.

BOUDET G. (1990). Peut-on améliorer la gestion des parcours sahéliens ? CIRAD, in *Sécheresse*, n° 1 ; p. 55 à 60.

CHAROY J. (1990). L'hydraulique au service des aménagements hydroagricoles. CIRAD, journées de la DRN ; p. 375 à 398, ill.

GOUBIER (1990). Remise en eau des lacs Daounas, évaluation des potentialités piscicoles. IRRA, Comité pour Léré, rapport pêche ; 15 p.

GRAVIER M. (1992). Boudeïd : culture de décrue et sédentarisation aux confins du Sahara et du Sahel. In *Sécheresse*, n°1 ; p. 37 à 44

LAZARD J. (1986). Une voie pour le développement de la pisciculture en Afrique : son intégration aux systèmes de production agricole. In *Aquarevue*, n° 7 ; p. 31 à 35.

LEGOUPIL J.C., LELANDAIS F. & SABATIER J.L. (1987). Une opportunité de développement rural à partir de la petite hydraulique agricole en zone de socle. CIRAD, In *Bulletin analytique trilingue de la littérature agricole en français* ; p. 85 à 94, ill.

LE MOIGNE M. (1986). Mécanisation dans les pays ouest africains. Quelques éléments de discussion. ORSTOM, in *Colloques et Séminaires, l'exercice du développement* ; p. 57 à 67.

MONIER Th. (1989). Elaboration d'un projet de développement dans le désert du Ferlo (Sénégal). Fac. des lettres et sciences humaines, Avignon ; 102 p., ill.

PIQUEMAL D. (1991). Inventaire et bilan des retenues d'eau au Burkina Faso. In *Cahiers d'Outre-Mer*, Vol. 44, n° 175 ; p. 259 à 280, ill.

REIJ C. (1989). L'état actuel de la conservation des eaux et du sol dans le Sahel. OCDE, Club du Sahel ; 41 p., ill.

PEYRE DE FABREGUES M. (1987). Aspects pastoraux du développement de l'élevage en zone sahélienne dans le contexte de la période de sécheresse. Le cas du Niger. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Le développement rural, comprendre pour agir ; p. 309 à 339.

REYNIERS & FOREST (1990). La pluie n'est pas le seul remède en Afrique. IRAT/CIRAD, in Sécheresse, n° 1 ; p. 36 à 39.

ROGNON P. (1991). Un projet japonais de lutte contre la sécheresse au Sahel. In Sécheresse, n° 2 ; p. 135 à 138, ill.

ROOSE E. (1987). Problèmes posés par l'aménagement des terroirs en zone soudano-sahélienne d'Afrique occidentale. CIRAD, documents Systèmes Agraires, n° 6 ; p. 55 à 65.

ROOSE E. (1989). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique occidentale. ICRISAT, in International workshop, 7-11 janvier 1987 ; p. 55 à 72, ill.

ROOSE E., DUGUE P. & RODRIGUEZ L. (1992). La G.C.E.S. : une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. In Bois et Forêt des Tropiques, n° 233 ; p.49 à 63, ill.

SENE W. (1985). Mise en valeur des ressources en eaux pluviales, élément d'une stratégie intégrée de maîtrise de l'eau face à la désertification au Sénégal. Séminaire sur la lutte contre la désertification, Sénégal ; 12 p.

THEBAUD B. (1990). Politique d'hydraulique pastorale et gestion de l'espace au Sahel. ORSTOM, in Cahiers des Sciences Humaines, vol. 26, n° 1-2 ; p. 13 à 31.

U.N.E.S.C.O. (1977). Développement des régions arides et semi-arides : obstacles et perspectives. Notes techniques du M.A.B. ; 45 p.

ZOLTY A. (1990). Dossier hydraulique. Premier bilan de la DIEPA 1981-1990. In Afrique agriculture, vol. 15, n° 170 ; p. 10 à 31, ill.

Questions sanitaires.

ATIVON K.I. (1984). A propos des obstacles à l'équipement sanitaire en milieu rural. In Bulletin du CIEH ; p. 44 à 50.

C.I.E.H. (1985). Evaluation de l'impact d'un programme d'éducation sanitaire sur le fonctionnement, l'entretien, et l'aménagement d'ouvrages hydrauliques villageois en Côte d'Ivoire. CIEH ; p. 17 à 29.

DODIN A. (1992). L'eau et le choléra. In Sécheresse, n° 4 ; p. 251 à 259.

DOROZYNSKI A. & LANTIERI M.F. (1993). Malaria, la reine des maladies parasitaires / L'arlésienne du vaccin antipaludéen / Bilharziose : le mal venu de l'eau / Vecteurs à abattre. In Sciences et vie, n° 906, dossier : la résurgence des maladies parasitaires ; p. 30 à 41.

DOUMENGE J.P. (1988). Les schistosomiasis humaines dans le monde. In Les Cahiers d'Outre-Mer, n° 162 ; p. 139 à 158.

GIODA A. (1992). Les mêmes causes ne produisent pas les mêmes effets : travaux hydrauliques, santé, développement. ORSTOM, In Sécheresse, n° 4 ; p. 227 à 234.

HANDSCHUMACHER (1992). Des aménagements hydroagricoles dans la vallée du fleuve Sénégal, ou le risque de maladies hydriques en milieu sahélien. ORSTOM, in Sécheresse, n° 4 ; p. 219 à 226

MORIN D. (1990). Contribution à l'amélioration de l'intervention en aménagement hydroagricole. Cadre de référence en santé communautaire. Centre Sahel, Mémoires et Thèses n° 3 ; 43 p., ill.

NEUVY G. (1989). L'onchocercose, une endémie en voie de disparition au Burkina Faso. In Les cahiers d'Outre-Mer, n° 168 ; p. 377 à 393.

NOZAIS & CHIEZE (1990). Le coût sanitaire de l'eau. In Sécheresse, n° 2 ; p 118 à 123.

PROST A. (1991). Les faits de santé au cours et décours des sécheresses. OMS, in Sécheresse, n° 2 ; p. 40 à 47.

ROBERT V., GAZIN P. & CARNEVALE P. (1989). De la difficulté de prévoir les répercussions sanitaires des aménagements hydro-agricoles. Le cas du paludisme dans la rizière de la vallée du Kou au Burkina Faso. ORSTOM, in le risque en agriculture, à travers champs ; p. 541 à 543.

ROY (1985). Impact sanitaire des aménagements hydrauliques. CEFIGRE, IVème session du CSI ; 4 fascicules

Questions sociales.

BERNUS E. (1984). Attitude des populations face à la sécheresse. In Bulletin de la SLG, n° 3-4 ; p. 180 à 184.

CABOT J. (1984). Tactiques et stratégies face à la sécheresse au Sahel. Bulletin de la SLG, n° 3-4 ; p. 221 à 226.

CORREZE A. (1987). Le rôle des femmes. Femmes paysannes d'Afrique : une rencontre... ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Le développement rural, comprendre pour agir ; p. 97 à 103.

DESJEUX D. (1985). L'eau : quels enjeux pour les sociétés rurales ? L'Harmattan ; 219 p., ill.

DUGUE P. (1990). Les stratégies des paysans du Yatenga (Burkina Faso) face aux propositions d'aménagement des terroirs villageois. CIRAD, in les cahiers de la Recherche Développement n° 26 ; 15 p., ill.

GALAIS J. (1976). Options prises ou ignorées dans les aménagements hydro-agricoles en Afrique sahélienne. Cahiers Géographiques de Rouen, n° 6 ; p. 77 à 95.

JOUBE Ph. (1991). Sécheresse et stratégies paysannes au Sahel. CNEARC/CIRAD, in Sécheresse, n° 2 ; p. 61 à 69.

KASSIBO B. (1988). Les pêcheurs du delta central : accès aux moyens de production par le biais du système d'encadrement. ORSTOM, in Etudes Halieutiques du Delta Central du Niger. Enquête statistique auprès des pêcheurs : premiers résultats ; 20 p., ill.

LEGENDE B. (1986). D'un village du Sénégal, une autre vision du développement. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, l'exercice du développement ; p. 177 à 184.

LEMOINE J. (1985). De l'eau potable pour tous les villages d'Afrique. In Bulletin du CIEH ; p. 30 à 33.

MARCHAL J.Y. (1983). Yatenga. Le dynamisme d'un espace rural soudano-sahélien. ORSTOM ; 847 p.

MERSADIE G. (1990). De l'eau pour les hommes ou le bétail ?. In Chroniques, n° 50-51 ; p. 8 à 12, ill.

MILLER D. (1980). Etude sur le développement rural. Centre de développement de l'OCDE ; 2 vol., 460 p.

MONOD Th. (1991). L'avenir du nomadisme saharien. In Sécheresse, n° 1 ; p. 6 à 7

O.C.D.E. (1977). L'évolution de la pensée sur le développement. Bulletin de liaison n° 1 ; 167 p.

REYNIERS F.N. (1992). Sécheresse et politique en régions semi-arides. In Sécheresse, n° 3 ; p. 59.

SERPANTIE G. et al. (1988c). La dynamique des rapports agriculture-élevage en zone soudano-sahélienne du Burkina-Faso : diminution des ressources, organisation collective et stratégies d'éleveurs paysans au nord du Yatenga. ORSTOM, in Programme de recherche : dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne. Bidi, Yatenga, Burkina-Faso. Résultats d'étape ; 17 p., ill.

SHAIKH A. (1989). Possibilités de développement durable. Exemples de gestion réussie des ressources naturelles au Sahel. Résumé. Club du Sahel, Rencontre régionale de Ségou/Mali : la gestion des terroirs villageois au Sahel ; 15 p., ill.

TAILLON R. (1989). Gargouna - Mali : témoignage d'un ex-coopérant-volontaire. Centre Sahel, Notes et travaux n° 6 ; 28 p., ill.

U.I.C.N. (1989). Sahel : le vrai et le faux. In UICN, n° 7-9 ; p. 16 à 29.

CONCLUSION.

BORDAGE J. M. (1991). De la terre, de l'eau et des hommes. Colons et techniciens de l'Office du Niger 1932-1985. Université François Rabelais, Tours, Thèse ; 2 vol., 980 p., ill.

BOURGEOT A. (1987). Chercheurs et citoyens : perspectives. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Terrains et perspectives ; p. 387 à 400.

CHAMARD Ph. C. (1993). Environnement et développement. Références particulières aux Etats sahéliens membres du CILSS. In Sécheresse, n° 1 ; p. 17 à 23.

CONDAMINE Ch. (1987). Eléments pour une typologie des ONG. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Terrains et perspectives ; p. 253 à 270.

COURADE G. (1987). Demandes sociales, démarches scientifiques et réponses aux problèmes de développement. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Terrains et perspectives ; p. 351 à 359.

C.R.I.D. (1992). Livre blanc des ONG françaises. Pour l'environnement et le développement, construire la démocratie internationale. CRID & CLOSI ; 62 p.

DIDIERLAURENT M. (1986). La solidarité n'est plus ce qu'elle était. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, l'exercice du développement ; p. 153 à 161.

GASCON A., PILLOT D. & WIBAUX H. (1987). Paysans et cadres du développement. en Ethiopie. Réflexions sur une expérience de formation d'agronomes. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Le développement rural, comprendre pour agir ; p. 153 à 170.

GENTIL D. (1986). Du développement à la recherche. A propos d'un itinéraire personnel. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, l'exercice du développement ; p. 339 à 350.

GREGOIRE E. (1987). Le discours à l'épreuve du terrain ou l'intervention d'une ONG en milieu rural africain. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Terrains et perspectives ; p. 271 à 284.

MARTINELLI B. & SERPANTIE G. (1988). Deux points de vue sur la confrontation des paysans aux aménageurs dans le Yatenga. ORSTOM, in Programme de recherche : dynamique des systèmes agro-pastoraux en zone soudano-sahélienne. Bidi, Yatenga, Burkina-Faso. Résultats d'étape ; 51 p., ill.

O.R.S.T.O.M. & C.N.E.A.R.C. (1992). La gestion sociale de l'eau. ORSTOM, action incitative, coopération inter-organismes de recherche et d'enseignement, bulletin n° 1 ; 118 p.

RUF F. (1987). La fonction de la Recherche-Développement dans un projet agricole. L'exemple du riz pluvial dans le Centre-Ouest ivoirien. ORSTOM, in Colloques et Séminaires, Le développement rural, comprendre pour agir ; p. 107 à 131.

VINTER J. P. (1993). L'informatisation des ressources en eau. Office International de l'Eau, séminaire Ouagadougou, synthèse et orientations ; 50 p.

ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES.

PETER & PRUDHOMME (1988). Hydraulique villageoise et ressources en eau souterraine. Ministère de la Coopération, Documentation Française, Ibiscus, Coll. Analyses, An. bib. ; 330 p., ill.

DIVERSES MANIFESTATIONS SUIVIES

Dates et lieux	Type de manifestation	Titre	Participants
10/03/93 CIEDEL ⁽¹⁾ , Lyon	Conférence	<i>L'aquaculture : une chance pour des tiers mondes ?</i>	J. et M. Goubier, responsables IRRA ⁽²⁾
18/04/93 ISARA ⁽³⁾ , Lyon	Conférence	<i>L'eau de demain commence aujourd'hui.</i>	Thome O., directeur technique de Vétérinaires Sans Frontières. Goubier J. et M., responsables IRRA. Voron H., ingénieur du Génie rural des eaux et forêts. Bos Y., étudiant "maîtrise aménagement du territoire".
05/05/93 CIEDEL, Lyon	Conseil scientifique	<i>Comité de lecture de l'encyclopédie "Sahel" du CIEPAC⁽⁴⁾</i>	CIEPAC, CIEDEL, GRET ⁽⁵⁾ .

(1) CIEDEL : Centre International d'Etudes pour le Développement Local.

(2) IRRA : Institut Régional de Recherches appliquées en Aquaculture (Lyon).

(3) ISARA : institut Supérieur d'Agronomie de la région Rhône-Alpes.

(4) CIEPAC : Centre International pour l'Education Permanente et l'Aménagement Concerté.

(5) GRET : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

	pages
Figures.	
figure 1 : Structure verticale schématique de la troposphère tropicale.	5
figure 2 : La circulation intertropicale : alizé et mousson.	5
figure 3 : Coupes schématiques mensuelles dans les basses couches au voisinage du méridien 0°.	7
figure 4 : Evolution de la pluviométrie depuis le début du siècle au sud du Sahara d'Afrique occidentale.	14
figure 5 : Comparaison des variations d'apports annuels entre deux cours d'eau sahéliens et le Niger. à Koulikoro.	19
figure 6 : Cuvette lacustre du fleuve Niger.	20
figure 7 : Différents aspects du lac Tchad suivant l'époque de l'année.	21
figure 8 : Variations interannuelles du niveau du lac Tchad de 1900 à 1978.	22
figure 9 : Le lac Tchad, situation au début des années 1960, situation des années 1985 en fin de saison sèche.	23
figure 10 : Coupe schématique des formations aquifères en région granitique.	24
figure 11 : Le processus d'infiltration de l'eau vers l'aquifère.	27
figure 12 : Influence de la puissance du réservoir capacitif sur le débit et le débit spécifique de l'aquifère.	29
figure 13 : Coupe schématique des modelés des sols et des formations végétales de la vallée du Sénégal.	39
figure 14 : Schéma du cycle de l'eau.	43
figure 15 : Principe de la citerne de captage d'eau de pluie.	44
figure 16 : Principe des diguettes anti-érosives semi-perméables.	46
figure 17 : Principe du micro-barrage semi-perméable.	47
figure 18 : Principe d'action des diguettes de diversion.	48
figure 19 : Les différents types de barrages de retenue d'eau.	52
figure 20 : Principe des tabias du sud tunisien.	55
figure 21 : Principe du barrage de sable.	56
figure 22 : Principe du barrage souterrain.	57
figure 23 : Schéma de principe du bouli, mare améliorée.	59
figure 24 : Schéma d'évolution d'un puits en terrain friable au fur et à mesure de la baisse du niveau de l'eau.	61
figure 25 : Schéma des différents modes de soutènement des parois d'un puits.	62
figure 26 : Les différents éléments constitutifs des puits modernes.	63
figure 27 : Repérage de l'axe de fouille d'un puits.	65
figure 28 : Etapes de creusement d'un puits.	65
figure 29 : Schémas d'exécution du cuvelage d'un puits à la descente ou en remontant.	67
figure 30 : Les cuvelages métalliques, l'exemple du cuvelage ARMCO.	68
figure 31 : Buse de fond pour captage.	69
figure 32 : Quelques procédés traditionnels d'exhaure.	75
figure 33 : Principe de fonctionnement des pompes manuelles. Exemple d'une pompe à tringle et piston.	77
figure 34 : Schéma de principe des actions de limitation de l'évaporation et de condensation artificielle.	82
figure 35 : Récapitulatif des aménagements de petite hydraulique villageoise envisageables aux différents stades du cycle de l'eau.	83

Tableaux.

tableau 1 : Quelques valeurs mensuelles d'évaporation des régions sud-sahariennes d'Afrique de l'ouest (en mm).	8
tableau 2 : Zonation climatique de l'Afrique de l'ouest, occupation du sol par les végétaux et l'homme.	11
tableau 3 : Température, pluviométrie et humidité relative de quelques stations d'Afrique de l'ouest.	12
tableau 4 : Illustration de la variation spatiale de la pluviométrie.	12
tableau 5 : Nombres de jours de pluie en 1987 à Nouakchott, Kaédi et Kédougou.	13
tableau 6 : Aspects du réseau hydrographique et épaisseurs d'altération correspondantes.	28
tableau 7 : Données démographiques du Mali, de la Mauritanie, du Tchad et du Niger.	32
tableau 8 : Répartition de la population des principaux pays sahéliers suivant les ethnies	34
tableau 9 : Les différentes maladies liées à l'eau.	37
tableau 10 : Humidité comparée entre zones aménagées en diguettes parallèles aux courbes de niveau (A, B, C) et une parcelle témoin non aménagée,	48
tableau 11 : Erosion comparée avec et sans association de culture.	49
tableau 12 : Choix des procédés de construction des puits en fonction de la nature du terrain.	64
tableau 13 : Différentes caractéristiques possibles des pompes manuelles.	76
tableau 14 : Avantages et inconvénients des différents types de pompes.	76
tableau 15 : Dégâts constatés sur diguettes anti-érosives de type "courbe de niveau".	89
tableau 16 : Nombre de références bibliographiques éditées par le CIID relatives aux études de l'impact sanitaire des aménagements hydrauliques.	96
tableau 17 : Récapitulatif des caractéristiques propres à chaque type d'aménagement.	106

Cartes.

carte 1 : Les principaux traits climatiques de l'Afrique de l'ouest.	9
carte 2 : Précipitations moyennes annuelles sur l'Afrique de l'ouest.	10
carte 3 : Durée des saisons en Afrique de l'ouest.	15
carte 4 : Le réseau hydrographique de l'Afrique de l'ouest.	18
carte 5 : Représentation schématique des grands ensembles géologiques de l'Afrique occidentale et centrale.	25
carte 6 : La croissance urbaine en Mauritanie de 1962 à 1973.	33

Photos.

photo 1 : Paillage d'une parcelle de culture.	50
photo 2 : Emplacement choisi pour un futur barrage anti-érosif.	51
photo 3 : Le gabion : cage de grillage rempli de blocs rocheux.	54
photo 4 : Tranchée assurant l'assise du barrage en gabions.	54
photo 5 : Digue d'un barrage en gabions après la première campagne.	54
photo 6 : Augmentation du volume du barrage par ajout de gabions.	54
photo 7 : Forage manuel à la tarière par deux personnes.	72
photo 8 : Quelques éoliennes utilisées en Afrique de l'ouest.	79
photo 9 : Limitation de l'évaporation et condensation artificielle, couverture du sol par des pierres.	82

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

SIGLES

- ACCT : Agence de Coopération Culturelle et Technique.
 AFVP : Association Française des Volontaires du Progrès.
- BIRD : Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement.
 BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
 BURGEAP : BUreau de Recherche en GEologie APpliquée.
- CEFIGRE : Centre de Formation Internationale à la Gestion des Ressources en Eau.
 CEGET : Centre d'Etudes de GEographie Tropicale.
 CEMAGREF : Centre national d'Expérimentation du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
 CIEDEL : Centre International d'Etudes pour le DEveloppement Local.
 CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques.
 CIEPAC : Centre International pour l'Education Permanente et l'Aménagement Concerté.
 CIID : Commission Internationale du Drainage et des Irrigations.
 CILSS : Comité permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel.
 CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
 CLOSI : Collectif de Liaison des Organisations de Solidarité Internationale.
 CNEARC : Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes.
 CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.
 CRDI : Centre de Recherche pour le Développement International.
 CTA : Centre Technique de coopération Agricole et rurale.
- DIEPA : Décennie Internationale de l'approvisionnement en Eau Potable et de l'Assainissement (1981-1990).
- ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
 ENSAM : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
 ESA : Ecole Supérieure d'Agronomie.
- GRET : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques.
- ICRISAT : International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
 INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.
 IRAT : Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (département Cultures Vivrières du CIRAD).
 IRRA : Institut Régional de Recherches appliquées en Aquaculture (Lyon).
 ISARA : Institut Supérieur d'Agronomie de la région Rhône-Alpes.
- MAB : Man And Biosphere program.
- OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques.
 OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie.
 OMS : Organisation Mondiale de la Santé.
 ORSTOM : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.

SLG : Société Languedocienne de Géographie.
SOGREAH : SOciété GRenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques.
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature et de ses
Ressources.
UNESCO : Unated Nations for Education, Science and Culture
Organisation.

ABREVIATIONS

B.P. : Before Present.
C.E.S. : Conservation des Eaux du Sol.
D.E.A. : Diplôme d'Etudes Approfondies.
D.R.S. : Défense et Restauration des Sols.
E.M.I. : Equateur Météorologique Incliné.
E.M.V. : Equateur Météorologique Vertical.
F.I.T. : Front Inter Tropical.
G.C.E.S. : Gestion et Conservation des Eaux et du Sol.
I.N.G : Institut Non Gouvernemental.
M.F.T. : Marteau Fond de Trou.
O.N.G : Organisation Non Gouvernementale.
P.N.L.S. : Programme National de Lutte contre les Schistosomiasés.
P.R.V. : Polyéthylène Renforcé de Verre.
P.V.C. : PolyVinyle de Chlorure.
Q : Débit.
Qs : Débit spécifique.
V.S.N. : Volontaire du Service National.
Z.I.C. : Zone Intertropicale de Convergence.