

**UNIVERSITE PARIS 1 PANTHEON - SORBONNE
U.F.R DE GEOGRAPHIE ET AMENAGEMENT**

THESE pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 1
en Géographie**

présentée et soutenue publiquement
par
MAMADOU DIOP

Novembre 2009

**LES BILANS HYDRIQUES DANS LA
MOYENNE VALLEE DU SENEGAL –
CONTRIBUTION A L'ETUDE DES BESOINS
EN EAU DE LA VEGETATION**

Sous la direction de
Madame le Professeur Martine TABEAUD

Le Jury est composé de :

Aminata Ndiaye, Maître de Conférences à l' Université Cheikh Anta Diop – Dakar

Hugo Pilkington, Maître de Conférences à l'Université Paris VIII

Stanislas Wicherek, Directeur de Recherche au CNRS UMR ENEC

Martine Tabeaud, Professeur à Paris 1, Institut de Géographie, rue Saint-Jacques 75005 Paris

Pierre Pech, Professeur à Paris 1, Institut de Géographie, rue Saint-Jacques 75005 - Paris

**LES BILANS HYDRIQUES DES SOLS
DANS LA MOYENNE VALLEE DU SENEGAL**
**Contribution à l'étude
des besoins en eau de la végétation**

Avant-propos

Le thème de la recherche porte sur les bilans hydriques des sols dans la moyenne vallée du Sénégal (Dagana-Podor). Il s'agit d'étudier les disponibilités en eau dans la région voire de mettre en évidence certaines tendances évolutives liées au climat, à l'artificialisation de la crue du fleuve et à l'accroissement des activités humaines.

Un des volets de l'analyse étudie les variations de la réserve en eau qui agissent sur les sols pour un meilleur développement de la couverture végétale et des plantes cultivées dans le secteur. Les variations de la teneur en eau des sols permettent de caractériser leur régime hydrique dans la vallée en fonction de la saison et de la situation climatique, car l'état hydrique d'un sol est déterminant sur l'évolution des processus qui interviennent à sa surface.

Pour réaliser cette opération, nous avons bénéficié du soutien de nombreuses personnes. D'abord, notre reconnaissance va aux membres du jury pour avoir accepté de lire, critiquer cette recherche afin de faire avancer les travaux de recherche au Sénégal sur ce sujet.

Nos remerciements s'adressent :

- au Professeur de géographie, Martine Tabeaud, de l'Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne, qui a accepté de nous encadrer dès que la proposition lui en a été faite,
 - aux membres du jury qui ont voulu consacrer du temps à la lecture et à l'évaluation de cette thèse,
 - aux Professeurs, Maîtres de conférences et Maîtres assistants du département de géographie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar et de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis dont - Mme Aminata Ndiaye, Messieurs (feu) Jean Le Borgne, Salif Diop, Paul Ndiaye, Oumar Diop, Serigne Modou Fall et Adrien Coly qui ont conseillé nos efforts et donné une bonne orientation à ce travail,
 - aux chercheurs de l'ISRA-Saint-Louis : Messieurs Jean Pierre Ndiaye et Moustapha Dièye, tous deux pédologues, à Claude Dancette, du département de Bioclimatologie,
 - à M. Mohamed A. Diallo, au laboratoire de la SAED- Ross- Béthio qui a effectué les analyses des échantillons que nous lui avons présentés,
 - à M. Alioune Diagne, au service hydraulique de Saint-Louis,
 - aux agents de l'IRASL, et du centre de documentation de l'OMVS Saint-Louis,
 - à A. Fily Bousso et Amadou Niang, cartographes à la SAED,
 - aux collègues professeurs, au Lycée Omar Foutiou Tall ex- Lycée Faidherbe de Saint-Louis,
 - à mes parents, à mon épouse et à mes enfants,
 - à Mme Aïda Diop, M. Abdoulaye Bouna Fall et à mon oncle Saliou Rama Kâ
 - à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.
- A tous nous exprimons notre gratitude.

INTRODUCTION GENERALE

La région d'étude se situe au nord du Sénégal, pays côtier d'Afrique de l'Ouest. Elle s'étend sur un degré de longitude entre 14°30 et 15°30 W (carte 1, p.8). Sur les cartes topographiques et géomorphologiques (1/200 000) réalisées respectivement par le Service Géographique et par P. Michel (1973), la zone couvre les feuilles Dagana- Podor. Cette carte Michel bien qu'étant vieille est la seule référence dans la vallée ; les thèses réalisées et celles à faire dans cette région ne peuvent s'en passer.

Un long séjour dans cette région a permis de mesurer l'inconfort climatique et en même temps le potentiel en terres et en eau. Des visites effectuées en saison sèche et en saison des pluies ont permis d'appréhender les changements d'état du milieu sous les effets combinés de la sécheresse et des activités humaines. Nous avons ainsi constaté que la dégradation du milieu est très manifeste dans la région de Dagana comme à Podor et Ndoum. Notre but, dans un premier temps, a été de caractériser les différentes unités naturelles du point de vue de leur dynamique actuelle en étudiant les changements d'état de surface du sol et les variations des réserves en eau dans les différents types de sol, en particulier de la vallée alluviale.

C'est seulement après de nombreuses visites que le choix s'est porté sur le site de Ndierba, village situé à 10 km de Dagana (carte 1) pour abriter les actions de recherche et surtout pour effectuer des prélèvements systématiques de terre afin de mesurer le stock hydrique contenu dans le sol. La connaissance de cette variable est utile pour l'établissement d'un bilan de l'eau disponible pour la végétation dans la moyenne vallée du Sénégal. Nous avons concentré ces travaux de recherche sur la rive gauche du fleuve Sénégal. Les relations sénégal-mauritaniennes s'étant détériorées suite aux événements de mai 1989, un climat d'insécurité couvrait sur toute la vallée, interdisant tout déplacement sur l'autre rive.

Le village de Ndierba est situé entre les latitudes 16°30 et 16°35 N et entre les longitudes 15°17 et 15°20 W. Il est peu éloigné de Saint-Louis, où nous enseignons, ce qui a facilité les nombreux déplacements nécessaires pour les analyses. Sur le plan administratif, il dépend du département de Podor qui en cette période d'Après-Barrage, est en profonde mutation économique et paysagère.

Le département de Podor dispose de potentialités énormes, l'une des plus importantes de la vallée tout entière. La représentation des unités géomorphologiques est variée (A.F.Bouso, 1991) avec parmi les types de formes les plus remarquables, les systèmes de levées et les cuvettes. 92% des terres ont une aptitude à l'irrigation, contre 84% à Matam, 79% à Dagana et seulement 45% à Saint-Louis (SEDAGRI, 1973).

Le plus grand obstacle au développement de cette région du nord du Sénégal est dû à l'eau à cause des faibles quantités enregistrées lors de la saison des pluies et la non maîtrise des eaux du fleuve.

CARTE 1 SITUATION DE LA ZONE

En effet, le premier élément qui conditionne la disponibilité en eau est la pluviométrie. Les données statistiques utilisées ici proviennent de plusieurs sources dont les différents services de la météorologie nationale installés à Dakar, Saint-Louis, Podor..., l'Inspection Agricole Régionale de Saint-Louis et d'ouvrages dont le plus exploité est celui de J.L. Borgne (1988).

La tranche d'eau qui tombe dans la région du fleuve a constamment varié. Elle était comprise entre 300 et 500 mm à la normale 1931-1960, puis entre 200 et 300 mm en 1961-1990. De 1990 en 2004, les quantités sont faibles, elles sont comprises entre 150 et 300 mm.

De façon générale, les saisons de précipitations se sont écourtées. Elles sont moins abondantes et ne présentent aucune régularité. Cela affecte profondément les cultures dont le développement est lié à l'existence d'eau dans le sol. Déjà, en 1923, P. Bancal soulignait que : « *le manque d'eau dans cette région du Sénégal constitue une négation au progrès économique et social* ».

Le déficit hydrique causé par la péjoration du climat ne date pas d'aujourd'hui. Dès le premier quart du 20^{ème} siècle, le même P. Bancal attirait l'attention des autorités coloniales sur l'insuffisance des pluies et du débordement des eaux du fleuve. Cette carence s'est aggravée par la suite et a pris une grande ampleur.

-Les fondements du problème de l'eau

Pour l'agriculture, les usages domestiques, etc....le premier impératif au Sénégal nord est de disposer d'eau. On peut estimer à plus d'une dizaine de litres par jour les besoins en eau d'un individu dans la vallée.

Cette quantité est un minimum qui a été largement dépassé dès que l'eau a jailli des concessions ; puisque, comme partout, les usages augmentant avec les disponibilités.

Dans la vie professionnelle, l'eau occupe une place prépondérante. Et donc, la pluie conditionne l'alimentation humaine et animale une bonne partie de l'année jusqu'au prochain hivernage. L'homme de la vallée n'a pas (assez) essayé de s'affranchir de cette servitude. L'eau dans les bas-fonds, celle du fleuve n'a longtemps été utilisée qu'après le retrait de la crue.

Récemment des actions multiples ont été menées pour une meilleure utilisation de l'eau disponible.

L'élevage en dehors de la saison des pluies pose problème au point de vue de l'eau. En effet, les possibilités d'abreuvoir et de pâturage pour le bétail peuvent ne pas coïncider avec la demande. L'eau peut manquer dans le fleuve ; il faut se déplacer ou creuser la terre pour la puiser. Ce travail est pénible pour un berger avec un troupeau de plusieurs dizaines de têtes.

De plus les ressources hydriques tarissent par suite du manque de renouvellement et de l'épuisement corollaires de la sécheresse des années soixante.

- Une sécheresse intense et persistante

Des conditions climatiques sévères (absence de pluies) ont provoqué une inondation en surface très limitée sur les terres du walo. De ce fait, les défluent et marigots n'étaient pas remplis et le lac de Guiers qui gardait l'eau toute l'année restait à peine alimenté ; cela a accentué le déficit en eau potable des populations de certaines grandes villes (comme Dakar, Saint-Louis) dont les besoins restaient supérieurs à la ressource.

L'écoulement devenant faible, l'eau de mer ou la langue salée remontait loin à l'intérieur des terres et des eaux jusqu'à Podor, avant l'édification du barrage de Diama. Les puits se sont approfondis, le fond des mares creusé. L'eau est donc devenue une valeur marchande.

Ainsi, le bétail a subi un amaigrissement progressif. La production laitière déjà faible, a complètement cessé. Le pâturage s'est réduit au feuillage des arbres (*acacias*). Un malaise certain a donc gagné les paysans conduisant à l'écroulement de l'économie traditionnelle.

Tel est le scénario de la sécheresse qui a sévi au Sahel. Dans la vallée, elle est précisément caractérisée par sa durée. C'est la plus longue qu'aient connue les populations. Elle s'est annoncée en 1968 avec un déficit généralisé. Les taux dépassent 50% au nord du pays.

L'isohyète 300 mm qui passait à proximité de la ligne Saint-Louis, Podor a glissé pour se situer aux alentours de Matam, station qui recevait en moyenne 500 mm (J. L. Borgne, 1988).

Au cours de la décennie 80, la sécheresse persiste ; son intensité varie mais la tendance est à l'aggravation. 1983 est l'année la plus sèche ; le déficit est plus sévère – 80 % à Podor et Dagana - en plus des faibles totaux (jamais) enregistrés 13.6 mm à Richard-toll – 18.6 à Fanaye (dans le département de Podor).

Cette baisse se généralise et s'étend sur tout le bassin du fleuve jusqu'en milieu guinéen. Le fleuve ne déborde plus. La situation est aggravée par un puissant facteur limitant : l'évaporation qui s'accroît d'autant plus que les précipitations diminuent, puisque l'eau tombée entretient une humidité dans l'air qui limite l'évaporation.

Elle peut absorber une hauteur annuelle de près de 3 mètres d'eau (3 000 mm). L'eau disponible, là où elle existe, est celle, que le sol a prise en réserve.

L'évaporation est de mieux en mieux connue et les moyens pour la mesurer ou la calculer se sont perfectionnés. Elle est fonction de la surface d'eau, et comme de sa profondeur. L'évaporation dépend également des facteurs climatiques la chaleur, l'humidité, le vent. Elle agit sur le sol imbibé, par capillarité, l'eau profonde remonte à la surface pour être absorbée par l'atmosphère.

Ainsi, les faibles quantités précipitées, annuellement sont presque totalement perdues pour le sol et le couvert végétal.

Un bilan hydrique déficitaire est constaté depuis plusieurs décennies dans la vallée. La principale cause est l'insuffisance des disponibilités en eau par rapport aux besoins. Un tel bilan a freiné la croissance économique et engendré des crises alimentaires graves et a été source de conflit ou de tension extrême entre Mauritaniens et Sénégalais.

La pauvreté s'est étendue dans toute une région. Elle a conduit au dépeuplement et de jour en jour elle tend à devenir « *l'antichambre du plus grand désert du monde* »¹. Quels sont les remèdes ?

- Des remèdes ont-ils existé ?

Afin d'éliminer ces facteurs limitants, un vaste programme de développement est élaboré par l'OMVS. Deux barrages sont construits : Diama et Manantali et il est prévu également l'aménagement de 375 000 ha de terres agricoles dont 240 000 sur la rive gauche (²).

Le barrage de Diama était destiné à :

- empêcher l'intrusion de l'eau de mer en amont de l'ouvrage pendant la saison sèche,
- fournir l'eau nécessaire à la recharge du lac de Guiers (Sénégal) et lac Rhiz (Mauritanie),
- assurer en permanence l'alimentation en eau douce des périmètres irrigués des municipalités, et des industries du delta.

Le barrage de Manantali a pour fonction de permettre :

- l'irrigation en longueur d'année des terres agricoles situées le long du bassin,
- un débit constant de 400 m³/sec en permanence pour la navigation,
- la production annuelle de 800 giga watt d'énergie électrique pour l'usine hydroélectrique à construire au pied du barrage.

Ces mesures actuelles ont redonné de l'espoir dans la moyenne vallée. L'eau donne à la vallée toute sa spécificité ; elle permet l'agriculture, l'élevage et la pêche, les activités fondamentales des riverains. « *L'eau est le support de la civilisation* » (A. Lam, 1990).

¹ « La colonie du Sénégal telle que présentée par certains administrateurs coloniaux au 19e siècle » (C Brasseur 1955)

² Le projet OMVS comprend également la construction de digues sur les 2 rives du fleuve entre Diama et Rosso, la construction d'un port en eau profonde à Saint-Louis pour permettre la navigation fluviale jusqu'à Kayes au Mali

Avec plus ou moins le retour des pluies et les débordements lors des crues, les maîtres de la terre recouvrent leur autorité perdue lors de la sécheresse. De nos jours encore, la terre est la première richesse dans la vallée. Ainsi, tout retard des eaux fluviales est cause de profondes inquiétudes au sein des populations qui ne tardent pas elles aussi, à recourir aux solutions héritées de la tradition. Par exemple, un culte est rendu aux génies du fleuve dès le moindre retard du cours de l'eau sur son régime annuel.

Cette dépendance vis-à-vis de l'eau se marque par des cérémonies afin de faire venir la crue. A Saint-Louis comme ailleurs dans le walo, à Dagana et Matam, les gardiens des eaux font chaque année l'offrande rituelle à la déesse *Mame Coumba Bang*¹. On verse du lait, on récite des prières à son intention, on fait des sacrifices pour que le fleuve sorte de son lit et envahisse toutes les dépressions.

Jadis, le «colonisateur» conscient du problème de l'eau a tenté de le solutionner. Il a ainsi pensé :

- à l'augmentation des possibilités de ravitaillement en eau dans toutes les stations situées le long du chemin de fer Dakar-Saint-Louis,
- à la recherche méthodique des points d'eau.

Entre 1905 et 1913, plus de 940 puits sont creusés au Sénégal et en 1925, la question de l'eau est reconnue par l'administration coloniale comme le problème capital pour l'avenir de la colonie – et l'on pense «*substituer la monoculture de l'arachide, là où les conditions hydrologiques le permettraient, des cultures par irrigation*».

Les premières expériences d'irrigation ont débuté en 1917. Mais elles ont échoué à cause des imperfections techniques et surtout de la monoculture arachidière en plein essor au sud de Saint-Louis qui a donné de bons résultats et d'importantes ressources financières aux cultivateurs (B. Barry, 1980).

La Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) en 1938 fit aménager à Guédé (Vallée) des terrasses entourées de digues dont la fonction est de retenir l'eau sur les terrasses hautes et retarder l'inondation en contrebas. «*C'est à partir de 1959, que se développa la submersion contrôlée d'abord dans le delta puis dans la moyenne vallée*» (P. Bonnefond, 1984).

L'OAD, puis l'OAV en remplaçant la MAS eurent pour mission de poursuivre les expérimentations, d'encadrer les paysans et de les familiariser avec l'agriculture irriguée afin de réduire à long terme les importations de riz qui déséquilibrent la balance des paiements du pays.

¹ Génie du fleuve à Saint-Louis

Dans le delta 30 900 ha de terres sont protégées par des digues en 1964, 12% seulement (3 600) se trouvent inondés et 4% (1 250 ha) sont mis en culture. A Podor et Matam les premiers aménagements hydro-agricoles avec encadrement de la SAED datent de 1974-1975.

Les surfaces aménagées atteignent en 1990, 10.000 ha à Podor et 7.000 à Matam. La surface totale irriguée dans la moyenne vallée est de 64 000 ha. Actuellement 125 000 ha sont exploités dans la vallée (Bader et Lamagat, 2004).

Ces particularités géographiques et agricoles de la zone étudiée sont liées aux dures conditions climatiques et surtout aux caractères des pluies.

Ainsi, les principaux objectifs de l'opération de recherche sont les suivants :

- faire une étude exhaustive du climat de la vallée à partir d'une analyse de la pluie, de son évolution, des crises climatiques, de ses causes, de ses fréquences mais également à partir du bilan de l'eau et plus particulièrement d'un de ces éléments indispensables, l'évapotranspiration potentielle ou ETP qui est la synthèse climatique de plusieurs paramètres,
- établir le bilan hydrique à partir des mesures directes du stock en eau contenu dans le sol,
- analyser les paramètres qui ont des incidences certaines sur l'évolution du bilan hydrique et du climat,
- montrer l'importance de ces paramètres dans l'économie régionale.

Il est de plus en plus reconnu qu'une bonne connaissance des climats, de leurs relations avec le milieu sont indispensables à toute politique de développement.

C'est pour cette raison que les questions relatives à l'Après-Barrage au Sénégal occupent une bonne place dans ce travail. Avec l'avènement des barrages, la vallée est entrée dans une nouvelle phase marquée par une disponibilité permanente de l'eau. La puissance publique a défini une stratégie de mise en valeur de la rive gauche du fleuve afin d'y créer un lieu de production sécuritaire grâce à la culture irriguée.

L'option en faveur de l'irrigation a sous-tendu un plan de développement de la rive gauche (PDRV) confié au Commissariat à l'Après - Barrage (CAB). Ce programme tarde à être appliqué ; le rythme des aménagements est lent. Aujourd'hui, 29% seulement du potentiel destiné au Sénégal, sont aménagés, alors que suivant la programmation établie par l'OMVS depuis 1977, on devrait se situer à 45% du total des terres mis en culture sur la rive gauche.

L'irrigation ou arrosage artificiel des sols est une activité « nouvelle » dans la vallée. Les études qui lui sont consacrées ont pour la plupart porté sur les aspects techniques, fonciers et économiques. L'irrigation est capitale dans cette région sujette aux sécheresses. Car elle permet d'apporter les compléments d'eau nécessaires et sans gaspillage, en principe. Elle a également pour avantage d'accroître la production alimentaire, d'augmenter les revenus des agriculteurs et de contribuer à la lutte contre la sécheresse.

Or, la réussite de toute politique d'irrigation passe avant tout par l'évaluation des besoins en eau (ETP) de la couverture végétale. Elle repose aussi sur la connaissance des comportements hydrodynamiques (humectation, infiltration), de leur réserve etc.... Tous ces facteurs sont en effet indispensables pour l'établissement du bilan de l'eau.

L'objectif que nous nous sommes fixé est de parfaire les connaissances acquises en matière de disponibilité en eau dans la moyenne vallée du Sénégal.

Pour cerner ce thème concernant les bilans hydriques des sols dans la moyenne vallée, le plan adopté est le suivant :

- une première partie met d'abord l'accent sur les particularités géographiques du milieu, sa morphologie, sur le réseau hydrographique, les changements climatiques intervenus dans la région et le peuplement de la vallée,
- dans une deuxième partie, sont analysées les disponibilités en eau dans la vallée du Sénégal, les eaux de pluie, celles du fleuve et des nappes,
- une troisième partie est consacrée à l'évapotranspiration et les autres facteurs climatiques de pertes en eau, c'est-à-dire, à l'étude des besoins en eau de la végétation,
- en dernier lieu, dans la quatrième partie, est analysé le bilan de l'eau à l'échelle de la vallée au vu des tendances actuelles du climat et les impacts du climat sur la moyenne vallée.

PREMIERE PARTIE

LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Les caractères physiques de la vallée

Chapitre 2 : changements climatiques et vulnérabilité

Chapitre 3 : Population et activités

CHAPITRE 1 : LES CARACTERES **PHYSIQUES DE LA VALLEE**

INTRODUCTION :

La vallée du Sénégal traverse des régions soumises à la sécheresse sahélienne persistante qui porte atteinte gravement aux ressources agro-halio-pastorales fondées sur l'exploitation du milieu naturel. La morphologie de la vallée, la disposition du relief offrent des conditions favorables à l'agriculture et font de la région du fleuve, une zone de convergence et de rassemblement de la population.

La vallée du Sénégal, comme l'ensemble du pays (Le Sénégal) appartient au grand bassin sédimentaire sénégal-mauritanien où se sont accumulés des dépôts du secondaire, du tertiaire et du quaternaire. Le socle précambrien affleure au sud-est. La disposition des grands domaines phytogéographiques est commandée par la hauteur des pluies et par la crue du fleuve dont les disponibilités augmentent du nord au sud.

Les paysages et les ressources naturelles sont assez diversifiés, exploités par une population appartenant au groupe ethnique «sahélo-soudanien» composé surtout par des Hal Pular, des Wolofs et des Maures¹.

La présente partie permet de dégager les caractères physiques du bassin et de la vallée, puis les changements et la vulnérabilité du climat du nord du Sénégal et le chapitre 3 analyse la population et ses différentes activités dans la vallée du Sénégal.

I. RELIEF, RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET PROFIL

Long de 1800 km, le Sénégal prend sa naissance dans le Nord de la Guinée, traverse la partie occidentale du Mali, puis constitue, sur tout le reste de son parcours, la ligne frontière entre les territoires de la République du Sénégal et de celle de la Mauritanie.

Le bassin du fleuve est composé du haut bassin ou bassin supérieur et du bassin inférieur. Aussi les paysages que traverse le fleuve varient du nord au sud à travers les différentes formes du relief, la morphologie du bassin et la géologie. La zone de notre étude étant située dans le bassin inférieur (voir carte 1, p.8), sur certains thèmes nous insisterons davantage sur cette région.

¹ 1 : peuples de la vallée du Sénégal

1. Le relief

Situé en amont de Bakel, le bassin du Sénégal supérieur est la région tourmentée et montagneuse, constituée des bassins de la Falémé, du Bafing, du Bakoye et du Baoulé. Il a la forme ovoïde avec un grand axe orienté SW-NE. Le bassin s'étend de la latitude 10°20 N à la latitude 17°00 N environ et est compris entre les méridiens 7° W et 12°20 W.

L'extrémité méridionale du bassin est la plus montagneuse. Elle est bordée sur le territoire de Guinée par le massif du Fouta Djallon qui culmine à 1 425 m et sur le territoire Malien par le plateau mandingue qui occupe la région située à l'ouest de Bamako. Le point le plus élevé du bassin est à une altitude de 1 330 m environ et l'altitude moyenne de sa partie la plus méridionale est sensiblement voisine de 1 000 m (voir tableau 1). De là descendent le Bafing et le Tene, affluents du Sénégal.

Tableau 1 : Caractères physiques du bassin supérieur

Affluents du fleuve	Altitude maximale (m)	Altitude minimale (m)	Dénivelée (m)
Bakoye	873	108	725
Bafing	1330	89	1251
Falémé	906	19	887

Source : Rochette et Toucheboeuf (1964)

L'ensemble du massif du Fouta Djallon se délimite au nord par une ligne de falaises plus ou moins verticales (aux environs de 12° de latitude) dominant une région beaucoup plus basse (environ 200 m moyenne), et où les seuls reliefs notables sont créés par les sills doléritiques (région est de Bafoulabé ou ouest de Kédougou). On peut encore signaler le plateau Tamboura entre les vallées du Bafing-Sénégal et de la Falémé, et le plateau de l'Assaba entre les vallées du Karakoro et du Gorgol (voir carte, p.92). Les indices de pente décroissent rapidement de l'amont vers l'aval notamment sur la Falémé.

Le bassin du Sénégal inférieur en aval de Bakel se présente comme une vaste étendue peu accidentée, ne présentant çà et là que quelques reliefs plus marqués correspondant à des buttes témoins de grès infracambriens (région voisine de Bakel), ou des quartzites (tels les monts Oua-Oua dans le bassin du Gorgol). Il faut signaler le massif de l'Assaba d'où descendent les oueds Niorde, Gorfa et les deux Gorgols Blanc et Noir. Hormis quelques points hauts, l'altitude est comprise entre 0 m (région du delta) et une cinquantaine de mètres maximum (tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques du bassin inférieur

Fleuve ou affluents	Longueur en km	Altitude maximale (m)	Altitude minimale (m)	Dénivelée (m)	Pente (%)
Sénégal depuis sa source	1790	800	0	800	0,45
Sénégal entre Bakel et Saint-Louis	784	12	0	12	0,015
Ghorfa	193	318	8	310	1,60
Gorgol blanc	345	340	4	336	0,97
Gorgol noir	194	110	15	95	0,49

Source : Rochette et Toucheboeuf, 1964

2. Le réseau hydrographique

Les travaux de Rochette C, Michel, Sall et Kane sont les principales références pour la rédaction de ce sous partie.

a) Le haut bassin

Le Sénégal en amont de Bakel est formé par la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé.

- Le Bafing est la branche mère du fleuve Sénégal ; il prend sa source dans le massif du Fouta Djallon, à quelques 800 m d'altitude. Son premier affluent rive droite est le Bale ; puis il traverse une zone coupée par quelques rapides dus à des seuils (seuil de Talari) ou par des chutes (chutes de Gouina et du Félou). A Bafoulabé, il reçoit les apports du Bakoye et ses principaux affluents sont le Kolimbiné (près de Kayes) et le Karakoro à 70 km de Bakel.

- Le Bakoye prend sa source à 760 m d'altitude environ dans la région des monts Ménien au nord-ouest de Siguiri. Il traverse une région plate, décrit de nombreux méandres et reçoit côté rive droite le Baoulé.

- Le Baoulé affluent principal du Bakoye prend sa source à 750 m d'altitude dans la région sud-est de Bamako, traverse le plateau mandingue avant de rejoindre le Bakoye.

- La Falémé affluent du Sénégal à 50 km de Bakel prend sa source à 800 m d'altitude dans une région de plateaux doléritiques située à la latitude 11°52 N et le méridien 10°52 W. Elle coule dans une direction SE-NW jusqu'à Kidira et sa confluence avec le Sénégal. La Falémé est caractérisée par une série impressionnante de méandres ; elle traverse une suite de rapides dus à des seuils rocheux constitués de bancs de grès durs et de roches vertes ou de microgranites.

- La Kolimbiné est formée dans son cours supérieur par la rivière Ouadou qui prend sa naissance dans la région sud-est de Nioro du Sahel à une altitude située à 300 m. Dans son cours inférieur, elle traverse une suite de dépressions marécageuses dont la plus remarquable est celle de Magui. Les apports de la Kolimbiné sont peu abondants par suite de l'aridité croissante du climat.

- Le Karakoro prend sa source dans la région située au nord-est de Kiffa et se jette dans le Sénégal en aval d'Ambidedi.

En somme, le haut bassin s'étend de l'extrémité du bassin versant jusqu'à Bakel. Sa partie alluviale est réduite et alimentée par un réseau dense de cours d'eau issus de zones relativement élevées avec dans la partie sénégalaise des massifs de roches éruptives.

Le haut bassin fournit la quasi-totalité du volume d'eau écoulé car il est bien arrosé. L'hivernage y est plus longue ; en Guinée, la saison des pluies dure de février à novembre et la quantité de pluie enregistrée provient pour la plupart des perturbations migratoires de type lignes de grains. A partir du mois de juin, c'est l'hivernage sur l'ensemble du territoire guinéen. Le mois le plus pluvieux au Fouta est celui d'août. La pluviométrie moyenne annuelle entre Labé et Mamou (région où le Bafing prend sa source) est de 1600 à 2000 mm (voir carte 8, p.79).

Ce château d'eau devait pouvoir pérenniser l'eau qu'il pourvoit à l'aval. Comme l'avait suggéré la MAS, le haut bassin a fait l'objet d'un aménagement. C'est la grande retenue à grande capacité de Manantali au Mali (voir carte, p.94).

b) Le cours inférieur

Le Sénégal entre Bakel et Saint-Louis a une longueur de 784 km, et circule dans une vallée plate, plus ou large où il décrit de nombreux méandres. De Bakel à Kaédi, le fleuve suit une direction sud-est puis prend une orientation est-ouest jusqu'à la côte et longe ensuite celle-ci pendant une vingtaine de kilomètres avant de se jeter dans l'océan Atlantique.

A la hauteur de Kaédi, et jusqu'à une cinquantaine de kilomètres en amont de Dagana, le Sénégal a un bras secondaire important : le Doué. Le Doué est un bras qui longe le bord sud de la vallée, il rejoint le cours principal quelques kilomètres en aval de Podor. De là, la vallée est sillonnée par des marigots, des défluent comme le Ngalenka de direction nord-ouest / sud-est dont le fonctionnement est semblable à des marigots de vidange des eaux de crue qui permettent au fleuve d'inonder le lit majeur (cf. J. Y. Loyer, 1978).

Entre Bakel et son embouchure, le fleuve reçoit quelques affluents côté rive droite : ce sont les oueds Ghorfa et Niorde (formés de la jonction du Gorgol Blanc et du Gorgol Noir). Ces affluents prennent leurs sources dans le massif gréseux de l'Assaba et coulent suivant une direction est-ouest. Les apports de ces affluents n'ont rien de comparable avec ceux de la Falémé et du Bakoye dans le haut bassin en raison des faibles précipitations enregistrées (100 à 500 mm) dans la région.

Dans le delta, les principaux défluent sont le Gorom et Lampsar. A partir de Bakel, le Sénégal coule dans une vaste plaine alluviale dont la largeur peut atteindre près de 25 km. La vallée constitue la zone d'inondation du fleuve. Cependant la largeur se modifie tout au long du parcours. « *Entre Demba Kane et Matam, la largeur est de 150-200 m puis augmente à nouveau vers l'aval pour atteindre par endroits 700 m dans la région de Dagana ainsi que près du delta* » (P. Michel, 1973).

La pente de la vallée est excessivement faible entre Bakel et Matam, elle est voisine de 3 cm/km. Elle diminue vers l'aval jusqu'à Boghé. Cette décroissance se produit puis s'accroît jusqu'à atteindre une valeur voisine de 1 cm/km ($1^0/00$) à Podor, Dagana ainsi que près du delta (P. Michel, 1973)

En période de hautes eaux, la pente augmente sensiblement. Elle s'approche alors de 4,5 cm/km entre Bakel et Matam, puis 3 cm/km entre Kaédi et Boghé puis décroît lentement jusqu'à Richard -Toll.

C'est alors que le fleuve sort de son lit, inonde la plaine alluviale et s'étend amplement. L'inondation offre au bassin inférieur des « possibilités » énormes : agriculture, pêche, utilisation énergétique et industrielle future. Cette région recèle près de 86% des terres irrigables de tout le bassin. L'inondation de la plaine alluviale est tributaire de la hauteur de la crue qui avant la régulation des cours suivait rigoureusement le rythme de la pluviométrie.

Etant donné la pluviométrie de cette région, l'apport de ces affluents au fleuve n'a rien de comparable avec ceux de la Falémé ou du Bakoye. Ils traversent des zones basses, marécageuses, où ils décrivent de nombreux méandres.

3. Le profil

En général, les profils en long des cours supérieurs du Sénégal–Bafing et de ses principaux affluents sont très accidentés et coupés de nombreux rapides (Rochette, 1974). En amont de Bakel, « *le Bafing a une longueur de 1006 km pour une dénivelée totale de 789 m soit une pente moyenne de 0,78‰. Sur le haut Bafing, la pente varie de 5,5 à 0, 50 ‰* » (Rochette, 1974).

A Kayes, qui est situé à quelque 900 km de la mer, l'altitude du plan d'eau en étiage n'est plus que de 20 m. La navigation en hautes eaux n'est entravée par aucune chute ni rapide. La pente moyenne devient très faible et ne dépasse pas 0,07 ‰ entre Kayes et Bakel.

Le Bakoye a une pente de 1,19 ‰, soit une pente légèrement supérieure à celle du Bafing. Dans son cours supérieur le Bakoye a une pente assez forte 2,60 ‰. Son affluent principal, le Baoulé a une pente équivalente à celle du Bakoye sur les premiers 60 kilomètres de son cours (2,7 ‰) mais celle-ci s'établit rapidement à 0,3 ‰ jusqu'au confluent avec le Bakoye.

La Falémé, qui constitue le dernier affluent important du Sénégal en amont de Bakel, a une pente moyenne de 1,24 ‰, correspondant à une longueur de 625 km pour une dénivelée de 777 m.

A Bakel, le Sénégal quitte ce que l'on peut appeler le « Haut bassin » et entre dans son cours inférieur que l'on désigne par la « Vallée », car il est bordé d'une vaste plaine alluviale de 10 à 20 kilomètres de large, qui est en grande partie inondée pendant la crue annuelle (avant la construction des barrages).

La pente du Sénégal dans la vallée devient très faible et d'ailleurs assez variable en valeur relative, suivant le débit écoulé. En étiage, le profil en long présente de nombreuses petites irrégularités locales dues à la présence de seuils sableux et surtout de quelques affleurements rocheux. Les principaux bancs rocheux qui créent une accélération locale du courant sont ceux de Koundel, Kerr, Mbagne, et Dioulde-Diabé.

En aval de Dioulde-Diabé qui marque la limite extrême de l'influence de la marée (avant l'édification de Diama), la pente devient infime à l'étiage, surtout après le seuil de Mafou, qui constitue le dernier banc de sable émergé. Le chenal navigable s'approfondit en aval de Boghé et, à partir de Podor, les profondeurs inférieures à 4 mètres y deviennent exceptionnelles en étiage.

En moyennes eaux, tous les seuils rocheux ou sableux sont noyés et les irrégularités du profil en long s'estompent. La pente est voisine de 3 cm/km (0,03 ‰) entre Bakel et Matam. Elle diminue très légèrement vers l'aval jusqu'à Boghé, puis sa décroissance s'accroît jusqu'à une valeur voisine de 1 cm/km dans le secteur de Podor-Dagana-Richard-Toll. Dans le delta, elle est de l'ordre de 0,6 cm/km.

En très hautes eaux, la pente augmente sensiblement entre Bakel et Matam, où elle approche de 4,5 cm/km. Entre Kaédi et Boghé, elle reste voisine de 3 cm/km, puis ne décroît que très lentement jusqu'à Richard-Toll. Dans le delta, elle est approximativement de 1 cm/km.

Le profil en long des affluents du fleuve en aval de Bakel a les caractères suivants :

- l'oued Ghorfa, se jetant à quelques 40 km en aval de Waoundé, sa pente moyenne est de 1,60 ‰
- le Gorgol formé par la jonction du Gorgol blanc et du Gorgol Noir a une pente moyenne à ces différents endroits respectifs de l'ordre de 0,49 ‰ et 0,97.

En résumé, à l'exception du sud-est, correspondant au bassin supérieur, le bassin inférieur est situé dans une région plate, peu accidentée, mais vaste, très étendue. Il s'agit de la vallée alluviale. D'autre part, le réseau hydrographique est dense au sud du bassin, les affluents sont nombreux et fournissent l'essentiel des volumes d'eau écoulés par le fleuve dont la vitesse diminue du sud vers le nord, en relation avec une pente en régression dans la même direction.

(figure du pro profil en long amont et aval de Bakel à saintlouis)

II. GEOLOGIE ET MORPHOLOGIE DE LA VALLEE

On distinguera dans la présentation géologique de la vallée, les formations du bassin supérieur et celles du bassin inférieur. Les formations les plus anciennes sont celles localisées dans le haut bassin.

1. Les formations géologiques (voir carte 2, p.26)

a) Formations du bassin supérieur

Les formations suivantes sont retrouvées : le socle ancien, le Paléozoïque et le Tertiaire. Les dominantes sont les deux premières.

- Le socle ancien est composé en général de roches ayant subi un léger métamorphisme et appartenant à la zone des micaschistes supérieurs, plus rarement à celle des micaschistes inférieurs. On y distingue : des cipolins, des schistes ou micaschistes, des quartzites et des anciennes roches basiques transformées en roches vertes.

Ces formations sont largement représentées dans le bassin de la Falémé. Dans tout cet ensemble se sont mis en place des granites. En raison de leur composition chimique et de leur faible intensité de métamorphose, ces formations ont été rattachées au système birrimien.

- Le paléozoïque est constitué de formations subhorizontales de l'Infra-Cambrien composées des grès, des quartzites, des pélites (roches siliceuses et argilo-siliceuses correspondant aux shales des anglo-saxons) et des calcaires. Ces différentes roches couvrent le rebord septentrional du Fouta Djallon, le plateau de la Tambaoura et le plateau Mandingue.

Le paléozoïque est aussi formé par les formations du Primaire qui sont subdivisées en trois groupes qui sont le Cambrien inférieur, le Cambrien supérieur et l'Ordovicien. La plupart des roches du Cambrien inférieur sont issues de terrains d'origine sédimentaire présentant la succession suivante : Tillite, calcaires, jaspes, grès.

Le Cambrien supérieur est constitué de grès argileux rouges en concordance aux pélites inférieures et affleure au sud-est de Bakel et dans la région du massif de l'Assaba. Les grès blancs saccharoïdes sont attribués à l'Ordovicien. Leur cohésion permet de les observer dans de bonnes conditions. Ils forment des synclinaux et reposent en discordance sur les grès rouges du Cambrien supérieur.

- Le Tertiaire est représenté sur le bassin supérieur par un affleurement du Continental Terminal, à l'est de Nioro. Le Continental Terminal est fortement représenté dans le bassin inférieur.

b) Formations du bassin inférieur

Les formations récentes sont les plus représentées ; cependant apparaissent çà et là précisément vers Bakel et sur le pourtour de l'Assaba quelques formations anciennes datées du Cambrien inférieur, du Cambrien supérieur et de l'Ordovicien. Les formations récentes sont formées par les formations tertiaires et celles du quaternaire.

Le Tertiaire est représenté par l'Eocène moyen et le Continental Terminal. L'Eocène moyen est subaffleurant ou même affleurant dans une partie importante de la vallée du Sénégal en aval de Bakel (région de Matam). Son épaisseur est de l'ordre de 200 m environ. L'Eocène moyen a été divisé en Lutétien inférieur et Lutétien supérieur. Seul le Lutétien supérieur intéresse la vallée du Sénégal. Il est constitué principalement par des calcaires, des dolomies, et des argiles ; il renferme des niveaux de phosphate de calcium et d'alumine.

Le Continental Terminal affleure à Bakel, à Dagana, de part et d'autre de la vallée. Il repose sur l'Eocène moyen, son épaisseur est variable et peut atteindre 150 m environ. Les faciès les plus courants sont des sables argileux aux couleurs variées : roses, beiges, jaunes, blancs, violacés, bariolés dans lesquels s'intercalent des niveaux argileux ou gréseux.

Le Quaternaire est marqué par des phénomènes de transgression marine, le dépôt des alluvions fluviales et la mise en place des dunes actuelles (Michel, 1973).

Dans la vallée, la mer s'est avancée en un golfe dans la région de Boghé. Les sables marins constituent une terrasse étendue dans le sud du delta, dont le niveau se situe entre les cotes +4 et +6 m.

Les alluvions fluviales sont de nature et d'âge divers. En amont de Bakel, le Sénégal et la Falémé ont abandonné des sables plus ou moins argileux qui recouvrent les graviers sous berges. Le dépôt est contemporain de la mise en place des dunes rouges. Depuis lors, les rivières et le fleuve ont construit des levées alluviales formées de sable fin et de limon.

En aval de Bakel, la vallée s'élargit considérablement dans les formations tertiaires. Des alluvions récentes coupent le lit majeur. Il faut distinguer parmi elles, les levées à matériel finement sableux (sable fin, limon) jaunâtre et les dépôts argileux bruns des cuvettes.

Ces formations se rencontrent dans la vallée du Sénégal en aval de Bakel et dans celle du Gorgol en amont de Kaédi.

Les dunes actuelles sont représentées dans la région ouest et nord de Kiffa. Ce sont des dunes de sable au modelé confus et pouvant être ravinées par les pluies. Ces formations sont plus importantes dans le bassin inférieur ; elles sont relativement épaisses et très variées ; on rencontre des dépôts de sables, invasions de dunes, des cordons littoraux...

CARTE GEOLOGIQUE VALLEE

2. La morphologie de la vallée

Au point de vue morphologique, le haut bassin peut se diviser en deux grands ensembles :

- une succession de reliefs sub-tabulaires constitués par des formations doléritiques et granitiques, recouverts de formations latéritiques discontinues (cuirasse et carapace latéritique), dont l'altitude décroît vers le nord où les plateaux n'atteignent plus que 300 à 400 m, alors que dans le haut Bafing et la Falémé supérieure, ils sont fréquemment voisins ou supérieurs à 1 000 m
- une région au relief moins accentué ressemblant à une plaine et qui s'étend au nord de 12° de latitude et n'est marquée par aucun relief important à l'exception des massifs doléritiques situés au nord-est de Kayes.

Cette plaine morcelée par le réseau hydrographique est constituée en fait d'une succession de plateaux latéritiques de dimensions variables. Une autre caractéristique du paysage est la présence de nombreuses petites vallées, en forme de couloir, ou de dépressions étroites et allongées, à fond plat. Elles sont organisées en un réseau hiérarchisé qui aboutit aux vallées des principaux cours d'eau.

Du point de vue morphologique, le bas Sénégal en aval de Bakel constitue un fleuve typiquement alluvionnaire, coulant au milieu d'un lit majeur plus ou moins large qu'il a remblayé de ses propres transports solides : sables et limons. La vallée entre Bakel et Saint-Louis présente quelques différences notables. On peut la diviser en deux ensembles :

- la partie comprise entre Bakel et Kaédi
- la partie située en aval de Kaédi jusqu'à Saint-Louis.

De Kaédi au haut Bassin, les influences eustatiques diminuent au profit, des apports typiquement climatiques du Sénégal et de l'influence relative des affluents. Par ailleurs de l'aval de Kaédi la nature des formations explique la présence d'une vallée très large dans l'Eocène calcaire.

En rive droite, le lit majeur est constitué d'une série de méandres de faible et moyenne importance, isolant des systèmes hydrauliques simples qui répondent aux schémas suivants :

- une série de levées subactuelles en croissants emboîtés isolant du fleuve une ou plusieurs cuvettes,
- un schéma plus complexe composé d'un glacis sablo-argileux rouge antérieur aux alluvions du lit majeur et recoupé par celui-ci. Ce glacis peut constituer une banquette alluviale, correspondant à la terrasse ouljiennne (nouakchottienne ?).

De Matam à Waoundé, c'est la région des grands walos, soumis à l'influence directe des oueds Ghorfa et Niorde. La section située entre Waoundé et Bakel, la vallée est plus resserrée entre les chaînons quartzitiques qui sont tantôt parallèles, tantôt perpendiculaires au fleuve.

Le lit majeur présente en rive droite non plus un walo mais une série d'alignements de mares plus ou moins isolées du fleuve. Les levées subactuelles sont très rares alors que les recoupements des méandres avec des bancs sableux sont de plus en plus fréquents.

La vallée alluviale, en rive gauche, présente un modelé complexe. Des réseaux de hautes levées accompagnent le fleuve ; elles sont formées de particules fines dominées par des limons. Entre les levées fluviales ou fluvio-deltaïques s'étendent d'innombrables cuvettes de formes et superficies très variables, au sol argileux (P. Michel, 1990).

La vallée alluviale correspond ainsi à la zone d'inondation du fleuve longue de 430 km et large de 10 à 25 km. Elle forme un arc de cercle de Bakel à Richard-Toll (Michel, 1990). Cette plaine alluviale est encadrée par des régions sèches. Ce sont les plus sèches du pays, notamment sur la rive gauche.

La vallée est découpée en trois grands secteurs géographiques. On distingue d'est en ouest (voir carte 3, p.29) :

- la haute vallée qui s'étend de Bakel à Boghé,
- la moyenne vallée de Boghé à Dagana, subdivisée en deux sous-secteurs : la moyenne vallée amont et la moyenne vallée aval (voir carte 3),
- la basse vallée de Dagana à Richard-Toll,
- à Richard-Toll, commence le delta.

La vallée est aussi appelée walo (terme ouolof) par opposition au diéri, qui lui correspond aux milieux sableux monotones secs, dénudés qui surplombent la plaine. « *Cette opposition fait que les paysages de la moyenne vallée sont très contrastés ; ils surprennent par leur diversité* » (A. Diagne et J. F. Richard, 1992, p.1).

La coupe topographique du diéri au fleuve présente le profil irrégulier de la plaine (voir fig. 2, p.33). Divers dépôts forment des méso-reliefs dont la disposition et la hauteur interviennent directement dans la répartition des surfaces inondées.

Par ailleurs, la topographie joue un rôle important dans la pédogenèse. Elle gouverne l'importance et la durée de l'inondation ainsi que la granulométrie des dépôts alluviaux anciens ou actuels.

La vallée alluviale présente un modelé complexe formé de plusieurs unités paysagères à dynamique différenciée. « *Avant la sécheresse, le relief est façonné par les hautes eaux annuelles du fleuve, maintenant la morphodynamique éolienne prédomine partout* » (P. Michel, 1990).

Carte des secteurs géographiques

Plusieurs milieux se distinguent en relation avec la topographie, l'ampleur de la crue, le sol et la végétation. Ils sont assez représentatifs et expriment les grands types de formes dans la moyenne vallée. D'ouest en est de la coupe topographique (fig.2, p.33) on retrouve :

- des levées subactuelles,
- de hautes levées fluvio-deltaïques,
- des cuvettes,
- une terrasse sableuse ou une transition sableuse (diéri-walo).

Un réseau de levées longe le fleuve. Au pied de ce système de levées, s'étendent des dépressions argileuses dont la forme, la largeur varient considérablement.

Les types de formes les plus représentatifs dans la moyenne vallée et plus particulièrement entre Podor et Dagana sont :

- la transition sableuse (diéri-walo),
- les cuvettes,
- les levées fluvio-deltaïque haut,
- les levées fluvio-deltaïque bas,
- la haute levée,
- et la levée subactuelle.

a) La transition diéri-walo

La transition diéri-walo est une surface de raccordement entre le système dunaire qui abrite le village de Ndierba et la grande cuvette. La pente du talus est irrégulière. Elle faiblit lentement et progressivement vers le bas. Son matériel est sableux, brun-ocre en surface devenant plus clair en profondeur. A sa surface un sable très grossier provenant de la dune le recouvre, transporté probablement par le vent d'est et l'eau de ruissellement pendant la saison des pluies.

Cette surface est, par endroits, dans sa partie supérieure en particulier, fortement incisée. L'intervention des sociétés humaines se limite à des prélèvements de sables utilisés comme matériel de construction.

Les informations recueillies auprès des villageois montrent que cette unité ne porte plus de cultures depuis une vingtaine d'années en raison de la baisse du niveau de la crue. La faiblesse de la crue a porté atteinte à l'humidité du sol et au couvert végétal et a rendu impossible toute agriculture.

Le sol est sableux, très sec dans sa partie superficielle ; la végétation est pauvre. Elle est représentée par des arbustes à épineuses comme *les Acacias*, *les Balanites*. Cette station abrite des puits dont la profondeur a considérablement augmenté au cours des années de sécheresse. Les agriculteurs de ce secteur y puisent l'eau pour irriguer les champs, faire boire les animaux et pour les usages domestiques (voir photo 1, p.42).

La limite de la transition sableuse est marquée par la présence de quelques souches de gonakié.

b) les cuvettes

Elles sont localisées entre les levées fluvio-deltaïques et la transition sableuse et, les levées fluvio-deltaïques et la levée subactuelle. Leur importance dans la vallée du Sénégal s'accroît d'amont en aval avec élargissement du lit majeur. Dans ce secteur comme partout dans la vallée alluviale les formes et les dimensions des unités sont variables.

La dépressivité de la grande cuvette est plus prononcée. Elle se vidange plus lentement que celles où la profondeur maximale est de un mètre.

Dans la grande cuvette, se distinguent nettement deux parties : la partie haute et la partie basse.

La partie haute est annexée à la transition sableuse ; elle se distingue aussi par l'irrégularité topographique du bas fond. Elle est large. Sa largeur peut atteindre par endroits en moyenne 800 mètres contre 100 environ dans la partie basse. Les cuvettes sont inondées par les eaux de crue. Le niveau des eaux est monté de 70 cm en 1990-1991 dans la cuvette de Ndierba ; celui-ci dépasse 1 m en 1994-1995. L'hydromorphie dans les dépressions est de plus en plus prononcée ces dernières années.

Les sols sont argileux, ils se gonflent au moment de l'inondation. Au contraire, en saison sèche l'argile se rétracte sous l'effet de la dessiccation et de nombreuses fentes de retrait larges de 2 à 11 cm et profondes de 30 à 40 cm lézardent les cuvettes et leur confèrent un paysage typique de saison sèche. A la surface, un micro-relief à gilgai s'est formé. Les eaux de pluie inondent ces fentes et humectent les couches en profondeur.

Le couvert végétal est dominé par des herbacées parmi lesquelles :

Dactyloctenium aegyptiaca, *Echinochloa colona*, *Sesuvium portulacastrum*...

Les parties cultivées portent du riz, du maïs la tomate etc.... (photo 1, p.42)
Quelques arbres, en particulier des *Acacias*, subsistent çà et là.

c) Les levées fluvio-deltaïque

Sur la séquence, elle occupe une position centrale et une largeur de 1 100 m environ. Elle est encadrée du nord au sud par deux cuvettes généralement sous inondation. Sa surface est glacée, plate mais aussi craquée par des irrégularités qui permettent de dégager deux segments : une levée fluvio-deltaïque haute et une levée fluvio-deltaïque basse.

- *Le fluvio deltaïque haut* a une altitude moyenne de 4.5 m. Sa surface est recouverte par des nodules plus ou moins calcaires (légère effervescence après attaque avec HCL). Son matériau est plus clair, plus blanc. Dans la classification Toucouleur, ce segment porte le nom de « fondé ranéré ». Le sol est sec, massif. Les soixante premiers centimètres sont difficilement atteints par de sondages à la tarière. Il n'a pas été inondé depuis une trentaine d'années. Par conséquent, il ne porte pas de cultures.
- *Le fluvio deltaïque bas* a une altitude de 3 m. Le sol est plus lourd, plus argileux et a un aspect vaseux.

La surface présente des fentes de retrait et des marques de plages d'eau ; des traces de sel sont bien apparentes en surface et en profondeur. Les versants sont ravinés. Sur quelques périmètres aménagés, des cultures de tomate sont effectuées.

d) Hautes levées et levée subactuelle

Le fleuve a édifié de hautes levées et en bordure du lit mineur un faisceau de petites levées plus récentes. La largeur de ce système de levées est de 950 m.

- *La haute levée* longe le fleuve, elle est légèrement décalée à l'intérieur du lit majeur. Sa surface comme celle des levées fluvio-deltaïque est glacée et puis monotone. Son matériau est sablo-limoneux. L'hydromorphie se manifeste à plusieurs endroits. La végétation et les cultures sont absentes.
- *La levée subactuelle* longe le fleuve sur sa rive convexe. Sa surface présente plus d'irrégularités. Sa texture est moins grossière. Après dessiccation à la surface apparaissent des tâches de sel. Celles-ci n'ont pas empêché la population environnante de multiplier les aménagements. Des centaines d'hectares ont été récemment irrigués par des groupements d'intérêt économique et des rapatriés de la Mauritanie.

Les arbres sont plus nombreux et variés (voir photo 1, p.42), en particulier le long des chemins qui desservent des parcelles cultivées de part et d'autre.

En somme, si le fleuve Sénégal a entaillé son lit sur les formations anciennes du socle précambrien et sur celles du paléozoïque, au niveau du bassin inférieur, il traverse des dépôts plus récents dominés par des alluvions fluviales et des dunes du quaternaire, sur lesquels le fleuve a édifié un système de levées. Ces édifices sont situés sur le lit majeur inondé par la crue du Sénégal.

COUPE TOPOGRAPHIQUE DE LA VALLEE (fig. 2)

III- SOLS ET VEGETATION : LEURS USAGES

Dans la vallée, l'évolution géomorphologique et le façonnement du relief ont orienté la pédogenèse et guidé la répartition actuelle des sols. Comme le révèlent les paragraphes précédents, la mise de la couverture quaternaire a été commandée par les variations paléoclimatiques et les oscillations glacio-eustatiques du niveau marin. Ainsi les sols de la vallée sont dérivés d'alluvions plus ou moins récentes et se sont mis en place dans des milieux sédimentaires différents.

Les populations, riches d'une longue expérience, ont une très bonne appréciation de l'écologie du milieu et distinguent plusieurs types de sols. Leur distinction est judicieuse ; parce que tenant compte de différents facteurs : position topographique, rôle de la crue, la couleur, la consistance, etc. Cette bonne appréciation explique que leur classification a souvent guidé les études pédologiques qu'empruntent les vocables de la toponymie locale (voir tableau, p.41).

1. Sols et végétation du lit majeur (walo)¹

Dans le lit majeur, les différents types de sols correspondent aux unités morphologiques du microrelief. Ce sont des sols hydromorphes, c'est-à-dire des sols dont l'évolution est dominée par la présence dans le profil d'un excès d'eau plus ou moins temporaire (G. Aubert, 1949).

L'hydromorphie est liée soit à un engagement momentané ou durable de tout ou partie du profil – inondation par la crue, soit par la présence d'une nappe phréatique plus ou moins fluctuante. Ces sols hydromorphes se répartissent en trois groupes : les sols à tâches et concrétions encore appelés « *sols peu évolués d'apport* », les vertisols topomorphes non grumosoliques, et les sols à gleys (J. Maynard, 1960) Ils seront étudiés dans leur répartition suivant les principales unités morphologiques (voir tableau, p.41).

a. Les cuvettes argileuses de décantation

Dans ces cuvettes, se développent en général des vertisols topomorphes non grumosoliques (Hollaldé)². Ils se développent sur des matériaux fluviaux de décantation. Ce sont des argiles lourdes et compactes dans les parties basses (Hollaldé balléré), des argiles sableuses (Hollaldé ranéré) ou sablo-ferrugineuses (Hollaldé ouaka) vers le rebord des cuvettes au contact des levées.

¹ Termes pulaar

² Dénomination en pulaar des noms de sols argileux

Les vertisols présentent un profil plus ou moins homogénéisé par suite des mouvements internes, s'exprimant souvent par un microrelief gilgai et un faciès d'effondrement. Leur teneur en argile est en moyenne de 55% avec une variation de plus ou moins 9%. Ces sols ont un pH voisin de la neutralité et légèrement acide, et leur teneur en matière organique en moyenne faible 0,63% décroît avec la profondeur, passant de 0,72% du premier horizon à 0,57 au troisième.

Ces terres argileuses, gonflantes et à faible porosité, sont recouvertes par les eaux de la crue annuelle. En saison sèche, après le retrait des eaux, un réseau de fentes de rétraction, souvent très profondes, les découpe en d'innombrables polygones (P. Michel, A. Naegele, C. Toupet, 1979).

Ces sols portent des forêts d'*Acacia nilotica* (gaoudi ou gonakié en wolof) qui constituaient autrefois le peuplement principal d'un boisement très dense ; la forêt, bien que première victime des défricheurs est encore répandue. Après la décrue, les cuvettes sont envahies par des espèces herbeuses très tenaces et à fort enracinement, telles que *Helocchlo schoenoides* (wbiddi), *Oryza barthii* (maré), *Zizyphus* (diabé).

Lorsqu'elle est défrichée, ce qui est très fréquent, la forêt d'*Acacia nilotica* est relayée par une mosaïque de groupements végétaux dont le principal est la vétiveraie formée d'une succession de grandes touffes de *Vetiveria nigriflora* (sembane), et les cuvettes ainsi dénudées deviennent des champs de walo (kolangal) cultivés en sorgho (gros mil) après la décrue ou d'autres spéculations comme l'oignon, la tomate ou le riz (voir photo 1, p.42).

Le fond des cuvettes, un peu déprimé et drainé tardivement (il n'est pas cultivé pour cette raison), ainsi que les bordures des mares temporaires (vendu) sont occupés par des sols à gley. Ils sont fortement marqués et altérés par la persistance de l'eau. Leur durée de submersion dépasse 150 jours alors qu'elle varie de 30 à 120 jours pour les précédents sols.

Dans ces conditions, le fer a été réduit à l'état ferreux et donne au profil des couleurs gris-bleuté ou gris-verdâtre (Maynard, 1960). La matière organique n'y est guère abondante, mais sa teneur moyenne (1,1%) est plus forte que dans le cas des autres sols, et le pH, tout en restant en moyenne acide (5,9), peut être très acide (4,5) et très rarement basique avec une valeur maximum de 8.

Ces terres portent souvent une végétation arbustive d'*Acacia nilotica* et d'*Acacia scorpioides*, accompagnée de *Myrtaginia inermis*. Sous cette végétation les plantes herbacées se développent mal, mais le plus souvent *Cyperus iria* s'y rencontre à l'état pur ou mélangé à d'autres plantes *Cynodon dactylon*, *Vetiveria nigriflora* ou *Mimosa pigra*.

Faisant l'objet d'un moindre défrichement (sauf pour la coupe de bois) en raison de leur submersion permanente ou du retrait très tardif des eaux, ces terres sont néanmoins soumises à une action insistante des animaux, phacochères, gros et petit bétail (trous, piétinement, pâturage aérien) qui en font leur abreuvoir en saison sèche.

b. Les sols et végétation des levées fluviales et fluvio-deltaïques ou fondé

Ce sont des sols à taches et concrétions, qu'on appelle aujourd'hui « sols peu évolués d'apport hydromorphes ». Ils sont caractérisés par des taches irrégulières, les unes blanchâtres ou grisâtres, les autres jaunâtres ou brunâtres, par de petites concrétions ferromagnésiques, plus rarement calcaires (Maynard, 1960) ; d'une durée de submersion variable de 0 à 40 jours, ils se développent surtout sur les matériaux fluviaux de débordement.

Les parties hautes, généralement insubmersibles aujourd'hui, sont constituées de sables fins et limons de couleur claire (Fondé ranéré).

Les parties basses, recouvertes par les crues fortes ou moyennes, sont caractérisées par des processus de réoxydation après réduction. Le limon y est plus argileux et donne aux sols sablo-argileux une teinte plus foncée (Fondé balléré).

Les levées fluvio-deltaïques, qui se développent en aval de Boghé, présentent des matériaux et une disposition identique. Mais du fait de leur formation en milieu lagunaire, les sols sont imprégnés de sels résiduels.

Les sels ont été très certainement lessivés par les eaux douces, mais les sols faiblement salés se rencontrent encore (J.H. Durand, 1983). La salinité tout en restant faible, croît d'amont en aval. Elle est environ 220 microhoms et n'atteint jamais 500 microhoms (méthode ORSTOM évaluée à 1/5) dans l'horizon de surface.

Les sols du fluvio-deltaïque sont faiblement acides et le sont le plus dans l'horizon superficiel (pH de 5,6 en moyenne) que dans les horizons inférieurs (pH d'environ 6,5). Toutefois, dans certains cas, en relation avec la salinité, ils peuvent être très acides (4,2) ou franchement acides. Ce dernier cas se rencontre dans les secteurs aval, surtout dans certaines parties du deuxième remblai et des petites levées qui ont un pH supérieur à 8, pouvant atteindre 9,9 dans les sols à texture moyenne (SEDAGRI, 1973).

Le taux de matière organique est plus élevé que dans les sols peu évolués hydromorphes avec, pour les horizons supérieurs, 1,05% dans les hautes levées fluvio-deltaïques et 0,98% pour les levées fluvio-deltaïques.

Les terres de Fondé contrastent très visiblement avec celles des cuvettes par leur nudité. Leur végétation participe d'une façon plus ou moins importante des deux types précédents, en liaison étroite avec la crue.

Lorsque le sol est inondé, il porte une savane arborée à *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Zizyphus mauritania*, *Bauhinia rufescens* et diverses graminées. Sur les parties inférieures du fondé, parties plus inondées, apparaît une pseudo-steppe de *Borreria verticillata* et d'*Acacia nilotica*, ce dernier remplaçant toutes les espèces dans les parties les plus basses, en compagnie de *Phragmites communis*.

Le tapis herbacé très réduit, dominé par des touffes de *Bergia suffruticosa* fixe les particules sableuses en de nombreux petits monticules qui flanquent la surface des fondés et rendent les parcours très cahoteux. Faiblesse du tapis herbacé et végétation arbustive clairsemée favorisent l'action éolienne et ravinement des berges.

Sur les bords du lit mineur, qui correspondent aux levées subactuelles (voir photo 3, p.43) et actuelles, se développent des sols sablo-argileux à sableux. Dans les levées subactuelles à l'intérieur des méandres se rencontrent des sols peu évolués d'apport en alternance avec des sols hydromorphes à pseudogley dans les bas-fonds allongés qu'ils enserrant (diacré). Les levées actuelles correspondent aux berges (falo) et offrent des sols peu évolués d'apport fluviaux qui passent dans le lit mineur aux sols bruts d'apport fluviaux à texture correspondant aux bancs de sables.

2. Sols et végétation des bordures de la vallée

a) Sols et végétation de la zone de transition ou Jejogol

Le passage des terres du lit majeur (walo) à celles jamais inondées (jeeri) se fait par une transition plus ou moins marquée appelée Jejogol en Pulaar. Les sols y relèvent à la fois des caractéristiques des sols de la vallée et de celles des bordures avec souvent une influence notable du substrat géologique.

Les terres du jejogol sont rarement inondées et le sont suivant les régions que par des crues moyennes fortes à très fortes ; le dernier exemple bien connu des populations riveraines (avant l'édification des barrages) remonte à la crue de 1950. Dans tous les cas, la submersion reste de courte durée, 0 à trois semaines.

Les sols du jejogol sont généralement des sols bruts d'apport éolien, des sols peu évolués modaux ou hydromorphes, des sols à taches et concrétions et des sols brun-rouge subarides. Sauf sur les terrasses marines où ils sont plus fins, ces sols ont toute une texture sableuse et légèrement gravillonnaire par endroits.

Les sols à taches et concrétions (pseudo-gley) s'observent sur le liseré de terrasse sableuse qui borde le plateau gréseux à cuirasse au sud de la vallée en aval de Aéré Lao ainsi que les avancées des dunes du Trarza sur la rive droite.

En amont de Kaédi, sur la rive droite, se rencontrent des sols peu évolués et hydromorphes à pseudogley sur les dépôts sableux partiellement inondés (sols de remblaiement) situés en contrebas des glacis d'épandage. Sur la rive gauche, dans la région de Matam où apparaissent les calcaires éocènes, se développent des sols calcimorphes proches des rendzines.

Aux extrémités nord et sud de la moyenne vallée, le jejogol comporte des sols bruns et bruns-rouges très pauvres en matières organiques. Ils se localisent au sud sur les épandages de grès et quartzites dans la région des inselbergs, sur la rive droite en aval de Bakel et dans la région de Kaédi. On les rencontre au nord sur les deux rives au pied des avancées dunaires à la hauteur de Ndioum.

La végétation du jejogol est surtout ligneuse avec un boisement dense. C'est une forêt mixte marginale comportant plusieurs strates (P. Michel, M. Naegelé et C. Toupet, 1979) :

- une strate arborée constituée par des arbres dont les couronnes se touchent à 8 -10 m du sol avec des espèces *Zygophyllacées*, *Ulmacées* ou *Mimosacées*, *Balanites aegyptiaca*, *Celtis integrifolia* et *Acacia albida*, *Acacia raddiana*, *Acacia seyal*...
- une strate arbustive plus basse environ 4 m, composée principalement de *Celastracées*, *Maytenus senegalensis*, de *Caesalpinaceus*, *Bauhinia rufescens*. Enfin une strate herbacée, floristiquement très variée, avec un niveau supérieur à base de graminées vivaces, et un niveau inférieur constitué en majorité de plantes annuelles diverses, d'espèces herbacées, borraginacées et composées.

Les terres du jejogol qui ne sont jamais cultivées font l'objet d'une très forte occupation humaine car elles constituent avec le fondé, le site favori des villages. Ce là probablement pour des raisons partielles de sécurité vis-à-vis de l'inondation, mais aussi en raison de leur position intermédiaire qui permet un contrôle territorial et un accès facile aux terres basses du walo et aux terres plus hautes du jeeri (voir photo 2, p.42).

b) Sols et végétation des terres bordières ou diéri

Au de-là du jejogol s'étendent les terres toujours exondées ou diéri, sur lesquelles les paysans font des cultures sous pluie de petit mil en association avec *Citrus vulgaris* (béref). Les sols du diéri se répartissent en de grandes unités selon une zonation où interfèrent conditions climatiques et caractéristiques géologiques.

Dans la partie septentrionale, du lac de Guiers à la région de Thilogne, le diéri est occupé par les sols brun-rouge (sols zonaux subarides tropicaux). Ils sont très étendus dans la région et développent sur diverses roches ayant en commun une texture légère : sables dunaires au nord-ouest, grès du continental terminal vers l'est.

Ces sols présentent une grande épaisseur du profil (plus de 2 m) avec un horizon humifère couleur brune de 50 cm en moyenne. Ils sont très pauvres en éléments fins, moins de 5% d'argiles (R. Fauck, 1961), et une teneur en matières organiques très faible 0,3% à 0,6% qui disparaît dans les horizons inférieurs (couleur rouge).

Une texture légère leur assure une bonne aération, et rend leur travail facile – ce qui explique leur mise en culture générale- et en font des terres désignées pour l'aspersion sous réserve d'un enrichissement chimique et organique non négligeable. Dans les régions dunaires, ces sols occupent les parties hautes et les pentes bien drainées ; en dessous viennent les sols bruns suivis des sols argileux hydromorphes dans les bas-fonds.

Au sud entre Thilogne et Doumga, se rencontrent des sols bruns couramment appelés sols dior qui appartiennent à la même famille que les précédents. Ils s'en différencient par une évolution moindre, une épaisseur du profil faible (1 à 1,5 m), une coloration plus foncée et une teneur en matière organique bien répartie dans les horizons et légèrement supérieure à 1% (R. Maignen, 1959). Ils se développent dans cette région sur les calcaires éocènes et dans les zones à drainage déficient.

En amont de Doumga jusqu'à Bakel, s'étend une vaste zone de sols d'érosion constituée de sols peu évolués gravillonnaires sur cuirasse ferrugineuse. Ils sont caractérisés par la faiblesse et parfois l'absence de leurs constituants en matériaux fins altérés, qui ont été plus ou moins déblayés par les processus d'érosion, et s'apparentent aux sols lithiques. Le profil très peu épais dépasse rarement 50 cm et sa saturation pendant la saison des pluies provoque des actions d'hydromorphie temporaire.

En amont de Bakel, sur les marges de la Falémé, dominant des vertisols lithomorphes et cuirasses ferrugineuses sur grès et schistes gréseux qui sont déjà des formations typiques du haut-bassin. En dépit de leur richesse chimique importante (vertisols sur schistes et roches basiques par exemple), la mise en valeur de ces terres des bordures méridionales est très difficile en raison de leur texture grossière et de leur pauvreté en éléments sableux et fins. Ils constituent généralement, pour ces raisons, des terrains de parcours.

La végétation que portent ces différentes unités pédologiques que recouvre le terme générique de diéri est évidemment fort variée. Elle se modifie globalement du sud au nord avec une forêt qui s'éclaircit et passe à des peuplements aux espèces ligneuses parsemées et de petite taille, type savane eu steppe arbustive. La végétation se répartit en grandes zones à l'intérieur desquelles des facteurs locaux édaphiques, hydriques, ou topographiques...déterminent la composition floristique et la densité du tapis.

Dans les régions septentrionales, les dunes sont recouvertes d'une steppe à *Acacia*. Les arbres rabougris et espacés sur les dunes sont en peuplement plus denses dans les interdunes. L'espèce la plus caractéristique est l'*Acacia raddiana*, singulier par son port en parasol. Il voisine avec d'autres épineux tel que le gommier *Acacia senegal* qui devient plus commun lorsque la végétation s'éclaircit, le *Balanites aegyptiaca* ainsi que d'autres espèces sahéliennes comme les *Combretacées*.

Une végétation buissonnante importante à base d'*Aristida stipoides* et *longilora* se développe également sur ces sols en compagnie de nombreuses herbes, favorisée par les friches, comme le *Cenchrus biflorus* ou cram-cram célèbre pour ses piquants nombreux et tenaces.

Sur les terrasses et les plateaux du Ferlo, se rencontre une steppe sahélienne aux formations herbeuses ouvertes mêlées de plantes ligneuses. Les arbres dominants sont des *Papillonacées* du groupe à *Pterocarpus lucens* avec comme arbre caractéristique *Dalbergia melanoxylon* ou Ebène du Sénégal.

Ils sont accompagnés d'autres arbres du groupe des *Combretum* et *Micranthum* ou de la famille des *Apocynacées*, tels que *Adenium obesum* appelé petit baobab du chacal dont les fleurs d'un rose vif donnent en pleine saison sèche une certaine note aux paysages du diéri. La strate herbacée comprend surtout des graminées avec un étage à *Andropogon gayanus*.

Les sols de la région du delta sont du type halomorphe, c'est-à-dire, des sols dont l'évolution est dominée par la présence de sels solubles dont la teneur élevée limite leur productivité et provoque une modification importante de la végétation (Aubert, 1949). Ces terres fortement salées s'arrêtent vers Richard-Toll. De cette limite jusqu'à Podor s'étend une zone de transition où alternent des sols hydromorphes (73%) et des crypto-solontchaks.

Ces sols halomorphes se rencontrent beaucoup plus en amont de cette transition notamment dans les régions de Boghé (Maymard, 1960 et également Durand, 1983).

Tous ces sols sont mis en valeur depuis longtemps. L'empreinte de l'homme est partout visible ; la végétation naturelle est remplacée par les champs de riz, de sorgho et d'autres cultures dont les rendements dépendent en grande partie du climat de la région.

Tableau 3¹ : Les types de sols dans la vallée – (synthèse et explication) (Ndiaye, 1987 et Diagne, 1989)

N° Stations	Unités géomorphologiques	Nom Vernaculaires
D1	Transition sableuse en surface de raccordement	Jejogol
ND2	Cuvette	Hollaldé atypique
ND3	Petite cuvette avant le fluvio-deltaïque haut	Hollaldé atypique
ND4	Fluvio-deltaïque haut	Fondé ranéré
ND5	Petite cuvette avant la haute levée	Hollaldé atypique
ND6	Levée subactuelle	Fondé ouaka

N.B. : Les termes utilisés pour désigner les terrains sont d'origine peul et sont les suivants :

- Les Fondé : terres exceptionnellement inondées ; elles sont fluides lorsqu'elles sont humides, durcis quand ils sont secs, pulvérulents s'ils sont travaillés. Plusieurs types de fondé se distinguent (J.P.Ndiaye, 1987),
 - fondé ranéré plus léger et plus clair,
 - fondé ouaka, plus argileux et plus lourd
- Les Hollaldé, ce sont des terres plus basses, plus régulièrement inondés ; ils se fissurent profondément et se divisent en agrégats très nets. Selon la teneur en argile, il existe plusieurs hollaldé (faux hollaldé ou hollaldé atypique sols de 30 à 50% d'argile) (hollaldé typique : sols des cuvettes de plus de 50% d'argile)

¹ Ce tableau présente les types de sols de la région étudiée et de la séquence étudiée (ND1 à ND6)



**Photo 1 : un paysage de la cuvette cultivée du village de Ndierba
(Cultures d'oignon, maïs, tomate...) (Diop, avril 2001)**



Photo 2 : paysage de la transition sableuse – Ndierba (Diop, avril 2001)



Photo 3 : un paysage typique de la levée subactuelle - Ndierba (Diop, avril 2001)

CHAPITRE 2 : CHANGEMENTS ET VULNERABILITE DU CLIMAT DE LA VALLEE

Les conditions de vie des peuples sahéliens et notamment ceux de la vallée du fleuve Sénégal sont conditionnés par le climat. Exposant son point de vue sur le rapport final de la Commission pour l'Etude des Sécheresses, T. Monod (1992) résume ainsi ses sentiments sur les immenses contrées semi arides de ce continent : « *de Dakar à Bloomfontein, l'Afrique continentale est un pays en perpétuel et instable équilibre prêt à basculer dans la disette, voire la famine, pour quelques averses de moins dans l'année* ».

Dans l'espace sénégalais, on dispose aujourd'hui des estimations relativement fiables sur l'évolution climatique depuis le début du XX^{ème} siècle. Des relevés pluviométriques effectués à partir de plusieurs stations dont celles dans la vallée permettent une observation sur une longue période de comportement climatique par conséquent des années de sécheresse.

La vie dans cette région du Sénégal a toujours été rude mais les sécheresses des années 1970, 1980 et 1990 ont certainement marqué d'une pierre noire la mémoire des populations de la vallée. Leur ampleur et les désastres qui ont irréversiblement modifié la vie de milliers de gens en décimant leur cheptel, en ruinant les récoltes, en dégradant leur environnement végétal et en poussant certains d'entre eux, les plus jeunes, les plus valides aux migrations.

Après avoir dégagé les principales caractéristiques de ce climat, les points suivants sont étudiés : l'évolution de la pluviométrie puis, les changements qui affectent le climat de la vallée et ses incidences sur la crue du fleuve.

1- CARACTERISTIQUES DU CLIMAT

1. CARACTERES GENERAUX

D'après les estimations faites par la Commission Nationale sur la Désertification (Sénégal), sur une surface de 196 000 km², 186 500 km² sont considérés comme concernés directement par l'aridité (M M Ndiaye, 2000). La vallée du fleuve Sénégal est située dans l'espace sahélien, c'est-à-dire la partie du pays la plus affectée par les problèmes de sécheresse et de désertification, où le climat se distingue par une saison des pluies unique et courte et une pluviométrie annuelle de 100 à 300 mm.

C'est le milieu le moins doté par la nature. Ces caractéristiques géologiques, morphologiques, climatiques en font un espace naturellement fragile. C'est pourquoi malgré les nuances qui n'en donnent pas un tableau suffisamment homogène, sa comparaison avec les autres zones du pays fait largement apparaître un milieu spécifique avec quelques caractères permanents comme le déficit hydrique chronique par exemple.

La pluie est l'un des paramètres du climat les plus importants, sinon le plus, en zone tropicale. « *Elle est une propriété distinctive dans l'organisation socio-économique en milieu rural du Sahel sénégalais* » (MM Ndiaye, 2000). Quand arrive la saison des pluies, les membres d'une famille, parfois des villages entiers qui étaient disséminés un peu partout dans le pays, se retrouvent pour la campagne agricole.

C'est ainsi la période où le milieu naturel stocke au maximum les réserves qui lui seront nécessaires durant la longue période dite de saison sèche. Quand on sait que la saison des pluies dure 2 mois (août-septembre) au Sahel, on mesure l'importance vitale à la fois pour l'homme et pour les ressources naturelles à disposer annuellement d'un niveau de précipitations satisfaisantes, le constat d'un déficit climatique, depuis plus de 20 à 30 ans, laisse augurer d'un contexte particulièrement difficile.

Depuis la fin des années 1960, c'est bien la réalité que vivent régulièrement les populations de la moyenne vallée, les années de répit étant très éphémères. Aussi au Sahel et notamment dans la zone nord du Sénégal, « *la pluie y est devenue un véritable régulateur pour toute la biocénose* ». Elle constitue un facteur d'incertitude élevé ; les précipitations y sont soit inférieures, soit mal réparties dans l'année (surtout pour les exploitants agricoles).

Dancette C. (1976) estime que le comportement pluviométrique explique pour plus de 50% les variations dans la production agricole mettant ainsi en évidence la notion de « *pluie utile* ». Pour Marchal J.Y. (1982) « *c'est la part des pluies dites utiles, c'est-à-dire des pluies permettant une rétention en eau des sols suffisante pour rendre possible le développement des plantes, sans hiatus jusqu'à la maturité, qu'il faut prendre en compte pour cerner la notion de sécheresse* » ; en compagnie avec les inondations, la sécheresse est un des traits caractéristiques du climat de la vallée du Sénégal et vu son importance, une sous partie du chapitre lui est réservée.

L'une des caractéristiques du climat de la vallée est la forte chaleur liée à l'insolation et aux températures. La nébulosité est faible, le nombre de jours sans aucun nuage peut-être élevée. La moyenne annuelle des durées journalières d'insolation varie de 8h à Podor à 10h à Matam.

Les températures moyennes annuelles sont assez élevées ; elles sont plus de 20°C partout dans la vallée du fleuve Sénégal. Les maxima absolus peuvent et dépasser 45°C à Podor surtout ; cette forte chaleur explique que les quelques zones d'ombre les hommes se les partagent avec les animaux : oiseaux, le bétail, scorpions ... Les minima absolus sont enregistrés en janvier, les températures chutent drastiquement pour atteindre des valeurs de 12°C. Les écarts thermiques sont importants ; ils sont de l'ordre de 25° dans la moyenne vallée.

En relation avec la faible nébulosité, l'humidité est faible surtout en saison sèche avec des moyennes souvent inférieures à 20%, et naturellement l'évaporation est très forte pouvant atteindre 10mm par la mesure au bac.

La région de la vallée est un milieu où le vent se manifeste sans contrainte du fait de l'absence de couvert végétal. Les valeurs de sa vitesse ne sont pas élevées mais les effets du vent sont partout sensibles : transport et accumulation de sables, façonnement de dunes, corrosion, contraintes mécaniques sur les plantes...

Tous ces caractères de l'environnement climatique de la vallée favorisent « *son assèchement qui, aujourd'hui, est une réalité* » (Chamard, 1993).

2. LA SECHERESSE : PROBLEMES ET DEFINITIONS

La sécheresse qui frappe le Sahel et le domaine tropical, en général, a fait l'objet de très nombreuses études. Une définition unique a toujours posé un problème ; il suffit de voir les nombreux débats dans les colloques ou revues (ex « Sécheresse ») qui continuent d'avoir lieu sur le sujet.

Ce terme de sécheresse est évoqué dans la première légende historique connue ; l'épopée de Gilgamesh roi sumérien, il y a 3 000 ans. En Chine, des mentions écrites sur la sécheresse remontent au moins à l'an 206 avant J.C. La tradition orale et les chroniques du Moyen âge africain ont décrit les méfaits des graves sécheresses de la région du Niger. Dans les récits, les conséquences du phénomène sont plus facilement compréhensibles.

La question « *qu'est ce que la sécheresse ?* » demeure encore sans réponses car celles qui ont été apportées ne sont pas unanimement satisfaisantes. Il y a autant de définitions de sécheresse que d'utilisation de l'eau. En effet, la sécheresse se manifeste de plusieurs façons selon Bergaoui M, et Alouini A, (2001). Il y a la sécheresse météorologique, la sécheresse hydrologique, la sécheresse agronomique et la sécheresse édaphique.

Ces auteurs définissent la sécheresse météorologique comme étant : la réduction naturelle de la pluviométrie sur une région donnée pendant une ou plusieurs années successives. Une enquête socio-économique effectuée en 1973 par l'OMVS définit la sécheresse comme : la caractéristique d'une année ou série d'années marquées par un important déficit pluviométrique.

La sécheresse hydrologique est la réduction de l'écoulement superficiel dans les cours d'eau et par conséquent, elle conduit à une diminution des volumes stockés dans les ouvrages hydrauliques et à une baisse naturelle du niveau d'eau dans les nappes souterraines.

L'autre aspect de la sécheresse, c'est que les pluies exceptionnelles se raréfient. Les séries de déficit se traduisent dans les paysages et se répercutent sur les activités et la vie des populations.

La diversité d'appréhension de la « *sécheresse* » a conduit certains à retenir le déficit hydrique comme critère d'analyse. Beaucoup de chercheurs en particulier les anglo-saxons estiment que la pluviométrie est le meilleur indicateur de la sécheresse. Ce paramètre et tous les autres facteurs pouvant influencer sur la quantité, le nombre de jour de pluie par exemple ont servi dans de multiples études faites au Sahel.

Cependant, la plupart des tentatives de définition de la sécheresse ne prennent pas en considération l'ambiance atmosphérique.

L'on sait pourtant que le taux d'évaporation dépend des conditions de l'atmosphère. Les indices doivent porter sur les valeurs autres que « *les seules hauteurs de pluie* », (Le Borgne, 1990), sur des paramètres qui décrivent une situation plus globale, l'état de l'atmosphère, mais aussi l'état du sol.

Il est de plus en plus reconnu que la pluie n'est pas un indicateur suffisant de la sécheresse. Son association à d'autres composantes météorologiques (vitesse du vent, insolation, humidité de l'air, température) et du sol (humidité du sol) permettent d'évaluer plus exactement l'ampleur et l'intensité de ce phénomène, en particulier dans une perspective agronomique. Ainsi, peut-on définir différents types de sécheresse.

Localement dans la vallée (entre Dagana et Podor) et dans le delta, la salinité des terrains est incontestable. Elle est à l'origine d'une sécheresse dite sécheresse physiologique.

Dans la moyenne vallée, un indice basé sur des valeurs bien sélectionnées : humidité du sol, précipitations, apports fluviaux et évapotranspiration, va permettre d'analyser le phénomène de manière plus satisfaisante.

II- L'EVOLUTION DU CLIMAT DE LA VALLEE

Une remontée dans le passé pas très lointain permet de constater des moyennes et des extrêmes qui se traduisent par des déficits ou des excès de pluie. Ces extrêmes paraissent être la conséquence de phénomènes complexes d'alternance périodique dont la cause fondamentale est ignorée, la fréquence de répétition et la période de retour (OMVS, 1977).

Pour l'Afrique Sahélienne, la chronologie de faits climatologiques importants est observée pendant la période historique. En effet, l'examen des relevés de certaines stations sur la pluviométrie comme celles Saint-Louis pour le fleuve Sénégal et la partie nord du pays, Banjul et Dakar pour la partie centrale (Jean Leborgne, 1988), permet de relever plus d'une dizaine de périodes climatiques de 1890 à nos jours. L'observation dans les stations la vallée (ex de Podor) a débuté à partir de 1920, précisément en 1923.

1. Les crises climatiques du début du siècle

Avant 1920, six périodes se distinguent selon Leborgne (1988). Elles sont les suivantes :

- en 1888 et 1889, Saint- Louis a enregistré un déficit de 28%¹, soit une pluviométrie de 250 mm.
- de 1890 en 1899, la station est dans une phase excédentaire avec plus 450 mm en 1898 et plus de 500 en 1893.
- une courte phase sèche se ressent entre 1902 et 1904 et plus précisément en 1903 où Saint-louis enregistre un total pluviométrique de l'ordre de 220 mm.
- cette petite phase déficitaire est suivie d'une période excédentaire située entre 1905 à 1909 ; la meilleure année pour Saint-Louis est 1906 avec près de 600 mm soit un excédent de plus de 70%.
- une cinquième période de faible pluviométrie est de retour pour cinq ans de 1910 à 1914 ; un déficit de plus de 50% est enregistré à Saint-Louis en 1913 et 1914 ; il ne sera dépassé qu'en 1977.
- entre 1915 et 1918, la zone nord du Sénégal connaît des excédents de 42 à 90% plusieurs années de suite.

Ces années de faibles et de fortes pluviométries dans la vallée du Sénégal sont synchrones d'une fluctuation du niveau des eaux du fleuve à la même période. L'excédent de 1905 -1909 a entraîné un débit moyen du Sénégal, à Bakel, de 1233 m³/s qui est un des plus forts modules de la période 1903-1986 selon Olivry J.C (1982). Le débit moyen du fleuve tomba à Bakel au cours de l' année hydrologique 1913 -1914 à 270 m³/s en relation avec la série déficitaire de 1910-1914, correspondant avec le plus bas mesuré jusqu'en 1972.

¹ Déficits et excédents sont calculés à partir des normales pluviométriques de la période 1931-1960

D'autre part, cette variation de la pluviométrie est ressentie presque partout entre « *le Sahara et l'équateur* » (Leborgne 1988). La sécheresse de 1900 s'est traduite sur le fleuve Nil en Egypte par une crue « *anormalement basse* » et une forte baisse du niveau du Lac Rodolphe. Celle de 1910-1914 est zonale ; les quelques relevés montrent des déficits de l'ordre de 20 à 30% en Ethiopie et au Soudan, 54% au Burkina Faso, 61% au Niger, entre 30 et 45 % au Togo, en Côte d'Ivoire ; cet épisode sec s'est traduit au Nigéria par une descente des isohyètes de 200 à 350 km en moyenne vers le sud. Pour les Touaregs du Niger, 1913 demeura « *l'année des famines* ».

A partir des années 1920, l'analyse du climat de la vallée devient plus complète du fait de l'installation d'un nombre plus important de stations comme celles de Podor et Matam en 1922. Après cette date, d'autres séquences climatiques se distinguent à travers l'étude faite par Leborgne en 1988 (voir fig. 3 et 4, p.51).

- La première apparaît de 1922 et 1938, correspondant à une situation excédentaire particulièrement dans la seconde moitié de la série. Trois années sont surtout pluvieuses :

- 1927, au cours de laquelle l'isohyète 500 mm remonte jusqu'en Mauritanie et l'isohyète 2000 jusqu'en Basse Casamance au sud du Sénégal.
- 1933, où pratiquement toutes les stations sont excédentaires, notamment celles du nord avec un taux de 88% à Podor. L'isohyète 500 franchit une nouvelle fois la vallée du Sénégal
- 1936 reçoit des pluies très abondantes avec un excédent de 107% à Matam qui atteint son total record de 1111 mm.

- La période 1939–1949 est moins satisfaisante ; aux effets de la seconde guerre mondiale s'ajoute une succession d'années à pluviométrie insuffisante, notamment l'année 1941 avec un déficit de 60 à 70% dans la vallée du fleuve (50 à Saint-Louis et 71% à Podor). Zonale, elle aussi, elle est fortement ressentie dans toute l'Afrique soudano-sahélienne, du Mali au Lac Tchad.

- En 1950, la série de vaches maigres s'estompent pour céder la place à neuf années de « *vaches grasses* ». En 1955, l'isohyète s'établit au-delà de la frontière mauritanienne, passant au nord de Podor (793 mm), de Dagana (630 mm) et Aleg en Mauritanie (544 mm). Trois années plus tard, en 1958, des excédents considérables sont enregistrés dans le sud et même au nord, à Podor et dans la plupart des stations mauritaniennes et également pour celles des autres pays de la zone (cf. fig. 4)

- De 1959 à 1963, on voit apparaître une courte période déficitaire mais avec des déficits très creusés de l'ordre de 63% à Podor en 1962. Puis dès 1964, les excédents l'emportent et se traduisent sur le fleuve, dans la moyenne vallée, à Bakel, par des débits comparables à ceux des années fastes : 1048m³/s en 1965 et 1037 en 1967.

2. Le climat de 1968 à nos jours

Dès 1968, on assiste dans le Sahel et plus particulièrement dans la vallée à une lente et régulière détérioration du climat. Une longue phase de dessèchement avec des pointes d'intensification en 1972, 1973, 1977, 1979, 1983, 1984, 1990

L'année 1968 est pour l'ensemble de la vallée une année de grands déficits dont les taux dépassent 60 et 70% à Dagana et Saint-Louis. L'isohyète 500 est décalée à 200 km vers le sud.

La sécheresse qui sévit depuis cette année est «*exceptionnelle par sa persistance et par son intensité*». Toutes les stations sans exception ont été déficitaires avec des taux atteignant fréquemment 60 à 80%. La série des trente années (1968-2000) peut-être divisée en plusieurs parties, avec des séquences très sèches entrecoupées de périodes à pluviométrie moins déficiente voire normale.

La première partie, de 1968-1973, atteint son paroxysme en 1972. Les isohyètes 500 et 100 «*descendirent jusqu'en Gambie pour l'une, et le Ferlo, pour l'autre* ». La vallée est dans une situation similaire au désert du Sahara «*qui dans son ensemble reçoit moins de 100 mm de pluie par an* » (Monod, T. 1992).

La seconde est longue, elle s'étend de 1977 à 1984, et elle est également de grande intensité. Au cours de cette partie deux ou trois années ont été très déficitaires : 1977, 1983 et 1984.

En 1977, la sécheresse affecte toutes les stations du nord avec des déficits allant de 40 à 70% respectivement de Podor à Saint-Louis.

1983, est l'année des plus forts déficits ; les plus élevés atteignent 77% à Podor, 95 à Nouakchott, ce qui correspond, pour cette dernière, à un total annuel de 7 mm de pluie. La moitié du Sénégal et la quasi-totalité de la Mauritanie ne reçoivent pas 50% de leur normale. L'isohyète 100 descend plus profondément vers le sud de 400 à 450 km et passe en deçà de Saint-Louis, Dagana et Podor.

La sécheresse de 1972 et celle de 1983 sont considérées comme «*des anomalies climatiques* » (Ag Litny, 1997). Pour ce dernier, cette analyse est renforcée par les différentes données météorologiques depuis le début du siècle. Les crises climatiques de 1972-73 et de 1983 se distinguent non seulement par leur grande étendue (car couvrant le monde entier) mais surtout par des séquences plus sèches.

En effet, «*l'échauffement des eaux de l'océan atlantique dans les deux hémisphères de plus en plus élevé en est la principale cause de cette anomalie climatique* » (Rual et Servain, 1985).

L'année 1984 est aussi déficitaire dans l'ensemble de la vallée, 81% à Podor, 96% à Nouakchott, ce qui maintient l'isohyète 100 au sud du fleuve et plus précisément dans le Ferlo. Le phénomène est perçu partout du Sahara à l'équateur ; «*au Cameroun, au Congo en République Centrafricaine...nombreuses stations ont été déficitaires* » (Leborgne, 1988).

Depuis 1985, la situation climatique devient de plus en plus favorable pour les paysans ; la vallée renoue avec la pluie et une phase excédentaire semble s'installer. Mais il est relevé entre 1990 et 1992 une petite séquence sèche plus déficitaire au nord ouest qu'à l'est vers Matam ; toutefois l'inverse survient à la fin de la série.

En 1993, l'isohyète 200 couvre la vallée même à ses stations les plus septentrionales cela presque jusqu'en 1999. Depuis, on constate que les années se suivent et ne se ressemblent pas ; la sécheresse alterne avec une année à pluie normale ou excédentaire (près de 390 mm à Podor) en entraînant à certains endroits de la vallée du fleuve un fort relèvement du niveau des eaux et des inondations comme ce fut le cas en 2001.

COURBES d'EVOLUTION PLUIE SAINT LOUIS - PODOR

3. Sécheresses et crues

Les termes de crue et de sécheresse sont apparemment antinomiques puisque s'il y a crue, c'est qu'il a plu et s'il a plu, ou s'il pleut encore, il n'y a pas de sécheresse ! Mais il est facile de constater cependant que dans la vie courante comme pour les spécialistes, crue et sécheresse sont souvent associées. L'expérience immédiate, surtout sous les climats secs, montre qu'une période de sécheresse de quelque ampleur que ce soit, se termine souvent par des précipitations violentes génératrices de crues et parfois d'inondations.

C'est ce qui fait dire à l'archiviste chercheur, Ba O. (1999) que « *les sécheresses sont toujours suivies d'inondations catastrophiques pour les populations* ».

L'on sait aussi que les travaux d'entretien ou de réparation des ouvrages hydrauliques doivent se faire pendant la saison sèche en prévision des crues futures. Mais également l'exploitation au mieux de la ressource en eau doit tenir compte des aléas climatiques, tels les sécheresses et les inondations, de l'amplitude de la pénurie d'eau, de la durée et des consignes de gestion appliquées pour rendre les ouvrages hydrauliques plus performants.

Il convient toutefois de différencier les phénomènes météorologiques observables qui déterminent la sécheresse ou la pluie et les effets et conséquences de ces phénomènes ; la crue étant la conséquence première et évidente de la pluie mais dont les caractères dépendent pourtant de nombreux paramètres indépendants.

La démonstration de la relation existante entre la pluie et la crue est entamée plus haut ; ces quelques lignes retraceront les variations interannuelles des précipitations et de l'hydraulicité depuis la longue période de sécheresse qui sévit dans la moyenne vallée du Sénégal.

Les analyses faites par certains hydrologues dont Albergel et Lamagat (1993) sur les effets de la variation des déficits et des excédents pluviométriques dans le bassin du fleuve Sénégal ont prouvé que « *la variabilité interannuelle est d'autant plus forte que la station est au nord de la vallée comme celle de Podor* ». En effet, selon les auteurs de cette citation, en exprimant cette variabilité par le rapport « écart type/moyenne » calculé sur la chronique des hauteurs de pluie, elle ne dépasse pas 0,1 dans la zone guinéenne (station de Mamou (au sud du bassin), elle reste faible encore dans le domaine soudanien (0,2) (station Bakel) et augmente dans le domaine sahélien (station de Podor) (CV compris entre 0,3 et 0,5).

Pour toutes ces stations et à partir de cette étude de référence, la période comprise entre 1951-1968 contient un grand nombre d'années excédentaires, mais celle de 1969-1991 est quasiment toujours déficitaire ; les déficits sont plus accusés dans le nord que dans le sud du bassin.

Les précipitations moyennes sur le bassin ont été calculées par zone climatique sur la période 1951-80 et sur la période 1969-1991 ; la figure (Lamagat et al. p.150) montre le déficit global de cette dernière période par zone climatique. On relève que les régions guinéennes sont les moins pénalisées avec un déficit de l'ordre de 12%, la partie soudanienne à peine plus fort 13 à 14%, tandis que le Sahel, correspondant à la moyenne et basse vallée accuse une différence de 35%.

L'évolution des débits caractéristiques du Sénégal de 1904 à 1992 montre la forte variabilité interannuelle du régime par un coefficient de variation (CV) de 0,45) sur les modules. A travers la figure (évolution des débits) trois périodes déficitaires apparaissent nettement : 1911 à 1915 ; 1940 à 1944 ; 1972 à 1992, coïncidant parfaitement avec les années de sécheresse ou de baisse drastique de la pluviométrie dans la vallée.

Cette dernière période remarquable par sa durée et par l'ampleur du déficit (module moyen de 379 m³/s contre 716 pour la période 1904-1992, soit un déficit de 47%), concentre 18 des 20 plus faibles modules annuels observés entre 1904 et 1992. L'année 1984, avec un module record de 212 m³/s (soit un volume écoulé de 6,70 milliards de m³) est la plus catastrophique. Le fleuve a atteint son niveau le plus bas et le débit maximum (917 m³/s) y est aussi le plus faible (Leborgne, 1988).

Quelle est la fréquence de ces changements du climat de la vallée du fleuve Sénégal?

III- QUELLES FREQUENCES POUR LES CRISES DU CLIMAT ?

La question des changements climatiques a fait l'objet de plusieurs études et de nombreux articles scientifiques y sont consacrés. Dans leur tâche, les chercheurs se sont heurtés à des problèmes multiples et variés : extrême diversité des situations d'une région à une autre, manque de recul par rapport aux phénomènes observés, interaction des phénomènes à l'échelle planétaire, etc.

Les différents travaux entrepris sur les changements climatiques laissent entrevoir que si les scientifiques savent de mieux en mieux décrire la nature des phénomènes, ils restent encore très prudents quand il s'agit d'en déterminer les causes exactes et, à fortiori, d'en prévoir la fréquence.

1. Oscillations climatiques et périodicités

Avec la sécheresse qui sévit au sahel et dans la partie nord du Sénégal, nombreux sont les climatologues voire même les décideurs politiques qui se sont intéressés à l'étude des cycles climatiques, à la périodicité des années à pluviométrie déficitaire et des années à pluviométrie excédentaire non pour les combattre mais pour s'y préparer. Au début des années 70, Le Président Senghor du Sénégal (premier président du Sénégal indépendant) chargea l'archiviste O. Ba d'effectuer des recherches sur l'existence de cycle de sécheresse au 19^{ème} siècle. On n'est pas en mesure de prévoir les crises climatiques avec précision. Toutefois il ne serait pas déraisonnable de déterminer les périodes à risque.

L'application des tests de KIVELIOVITCH et VIALAR (qui semblent-ils ont fait leurs preuves dans de nombreux domaines pour la recherche d'une organisation) par J. Leborgne à la série de Banjul, d'une durée d'un siècle n'a pas permis de « *déceler l'existence de cycles* ». Les recherches de Giraud et Rossignol (1973) sur les pluies annuelles de Dakar et sur la série 1901-1972, ont abouti à la même conclusion mais, soumise à l'analyse spectrale, elle fait apparaître « *des périodes fugaces, élastiques et locales qui sont à l'origine de l'impression de cycles* ».

La sécheresse est cyclique pour certains spécialistes ou chercheurs comme ce dernier, O. Ba (1999) et autres. Les textes religieux, bibliques et coraniques relèvent un cycle de 7 ans (de période de vaches maigres suivie d'une période de vaches grasses) qui s'est manifesté dans les séries 1906 (+) et 1913 (-) et 1965 (+) et 1972 (-).

Des durées plus courtes de 2 à 3 ans et de 5 ans sont aussi relevées dans les périodes de sécheresse comme celle située entre 1900-1904 ; 1910-1914 ; 1919 -1921...C'est également dans une périodicité de 3 ans (entre 2 et 7 ans) que se produit dans l'Océan Pacifique, le phénomène EL Nino qui signifie l'enfant Jésus parce qu'il est très marqué aux environs de Noël.

Par analyse spectrale des variations du débit sur une cinquantaine de fleuves parmi les plus grands du monde dont celui du Sénégal, Tardy (1992) a abouti à une superposition de fluctuations dont les périodicités sont comprises entre 2 et 4 ans (3 ans), entre 4 et 6 ans (5 ans), entre 10 et 20 ans (11 ans). Les périodicités des oscillations climatiques sont ainsi les mêmes que celles de l'activité solaire mesurées par le paramètre SUN.

D'autres résultats d'un grand intérêt sont publiés par ce dernier dans un de ses articles intitulé : « *crises régionales et évolution du climat global* ». Pour l'auteur,

- « *les sécheresses ou les années trop humides sont des crises climatiques ; les périodes froides ou les années trop chaudes sont aussi des crises climatiques.*
- *Ces phénomènes polycycliques montrent des périodicités semblables à celles de l'activité solaire. Il n'y a pas de relation directe de cause à effet entre sécheresses et cycles solaires, seul le rythme compte et une période d'intense activité solaire*

peut se marquer ici par une sécheresse et là par des pluies diluviennes » (Tardy, 1992 ; p.32).

- Une période de sécheresse sur un continent ne correspond pas nécessairement à une période de sécheresse sur un autre continent mais, peut au contraire valoir ailleurs à une période humide. Aussi, on ne peut pas dire qu'une année de forte activité solaire soit, par exemple, une année de sécheresse partout à la fois dans le monde. On peut seulement dire que partout dans le monde la fréquence des crises climatiques est la même que celle de l'activité solaire.
- Les crises climatiques, les épisodes secs et les épisodes humides sont téléconnectés, c'est-à-dire, interdépendants les uns des autres dans le temps et dans l'espace à l'échelle de la terre entière.

Cette analyse nous montre que les fluctuations du climat sont des phénomènes quasi périodiques, multi-périodiques et polycycliques. Ainsi les conclusions auxquelles Tardy et autres ont abouti montrent que les changements du climat sont généralisés dans le monde, mais les phénomènes ne sont pas ressentis de la même manière.

Entre 1970 et 1988 tandis que le débit des fleuves tend à augmenter en Europe les pluies diminuent fortement dans la vallée du Sénégal ; alors que le Sahel en général connaît une période d'aridité drastique, l'Europe est relativement arrosée. A la fin des années 80, alors qu'une humidité toute relative revient en Afrique, l'Europe et particulièrement la France, est victime d'une sécheresse.

Ce décalage entre les régions est clairement établi par analogie. Finalement, on pourrait croire que tout ce passe comme s'il s'agissait d'« *un effet de compensation pluviométrique* » : la masse d'eau à distribuer est constante mais se répartit inégalement selon les années sur chacune des régions considérées.

D'autres types de relations (entre température et humidité) se manifestent à l'échelle d'une période rendant plus complexe le jeu climatique. Les années 1972-75 furent entre autres pour le Sahel et la vallée du fleuve Sénégal une période de sécheresse sévère. En même temps, en Europe, les températures moyennes annuelles diminuent. Cette synchronisation des phénomènes entre ces régions est classée par certains spécialistes (Leroux et Tardy) dans le mode normal et le plus fréquent, où « *les périodes climatiques froides et sèches alternent avec des périodes chaudes et humides* » (Tardy, 1992 ; p.30).

Le mode anormal correspond à une montée du chaud quand un aride s'installe et à une baisse de température lorsqu'un humide survient. Les périodes de glaciation sont synchrones à des épisodes secs voire arides en Afrique sahélienne.

La sécheresse dans la moyenne vallée a également coïncidé avec un réchauffement de la planète ; dans les pays situés à l'extrémité ouest du Sahel, tout particulièrement en Mauritanie, au Sénégal et en Gambie, l'on a enregistré, en 2002 (année considérée par l'OMM comme la deuxième plus chaude depuis 1860) des déficits les plus élevés, certains endroits n'ayant reçu en fin septembre, que 25 à 50% des précipitations normales. Tout ceci rend davantage complexe les explications sur les changements actuels du climat.

2. Les causes

Les climats ont constamment varié au cours de l'histoire. Les régions arides n'ont pas toujours été arides notamment à l'ère quaternaire où elles ont connu des alternances de climat aride, semi-aride et même subhumide. L'étude des alternances est attestée par la géologie, la palynologie, la préhistoire, l'histoire. Les termes d'Ogolien, de Tchadien, de Taffolien correspondent à des périodes climatiques marquées par des phases de grande sécheresse ou d'abondance pluviométrique (Michel, 1969).

En prenant l'exemple de l'assèchement de la partie nord du Sénégal dont il sera beaucoup question dans les parties qui suivent, ce phénomène n'est pas récent puisqu'il s'est manifesté dès la fin de la dernière grande pluviale Holocène (11 000 à 3 500 BP), il y a près de deux millénaires. L'évolution pluviométrique a été très irrégulière : les périodes sèches et humides de durée et d'intensité variables ont ainsi marqué les temps historiques. Les causes de ces crises climatiques sont mal connues.

La diminution générale des pluies dans la moyenne vallée pourrait, selon les spécialistes, s'expliquer par un certain nombre de facteurs résumés ainsi par Chamard (1993) :

- l'évolution de la circulation générale de l'atmosphère et en particulier, le renforcement des anticyclones sub-tropicaux, l'anticyclone des Açores et l'anticyclone de Sainte-Hélène ;
- la modification des caractères des jet streams intertropicaux, le Jet d'Est Tropical et le Jet d'Est Africain (JEA). Il se pourrait que l'accélération ou le ralentissement de ces vents rapides d'altitude ait des effets sur les modalités d'advection de l'air atlantique ;
- la réduction de la vapeur d'eau précipitable originaire de l'océan Atlantique ;
- les modifications de la SST (Sea Surface Température) de l'Océan Atlantique central et austral ;
- l'augmentation de l'albédo du sol, pouvant être une cause naturelle (assèchement, dégradation du tapis végétal, dénudation des sols) ou une cause humaine (extension des terres agricoles au détriment des formations végétales naturelles).

En plus de ces facteurs, le réchauffement de la terre est également désigné comme responsable de la crise actuelle des climats de la terre. En effet, les activités humaines ont modifié la composition de l'atmosphère par l'augmentation des gaz à effet de serre entraînant un réchauffement global qui contribue aux changements climatiques.

Depuis plus d'un siècle, l'exploitation des combustibles fossiles, la déforestation, la conversion des terres de parcours naturel et d'autres formes d'utilisation des terres ont contribué à une forte augmentation dans l'air de divers gaz à effet de serre dont le dioxyde de carbone (CO₂).

Par changement climatique, la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) entend : « *les changements du climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables* ». Ce phénomène qui est marqué principalement par une augmentation de la température et des gaz contenus dans l'atmosphère, suscite aujourd'hui une vive inquiétude.

Ce problème environnemental mondial est d'autant plus préoccupant que les activités anthropiques qui en sont la cause prennent de plus en plus de l'ampleur. « *Par l'importance des gaz à effet de serre qu'elles génèrent, ces activités ont perturbé l'équilibre du système naturel qui contrôle les éléments des climats de la terre (température, précipitations, vents)* » (CSE, 2005).

Si les pays industrialisés sont les principaux responsables de cette situation, la contribution des pays comme le Sénégal à l'effet de serre n'est pas négligeable. D'ailleurs, le développement économique auquel ces pays aspirent s'accompagne inéluctablement d'une hausse de la pollution atmosphérique. Bien qu'il ne soit pas actuellement possible de prédire d'une façon précise l'ampleur des phénomènes climatiques, les impacts potentiels sont considérables.

L'Afrique, dont le Sénégal, pourrait être le continent le plus vulnérable à ces impacts. « *Très probablement il faut s'attendre à une variabilité des précipitations annuelles plus marquée, des événements climatiques plus sévères, y compris des inondations et des sécheresses plus accentuées, particulièrement dans des pays souffrant déjà d'un niveau avancé de la dégradation des terres* » (CSE, 2005).

CHAPITRE 3 : POPULATIONS ET **ACTIVITES**

La vallée du Sénégal malgré sa division naturelle en trois grandes régions géographiques (haut fleuve, moyenne vallée et basse vallée ou delta) a constitué à travers les siècles un des lieux privilégiés de convergence des populations de l'Afrique occidentale. L'examen de l'histoire de ce peuplement et des modes de production révèle des ressemblances mais aussi des différences au niveau des traditions fondamentales qui doivent être prises en considération dans le cadre de toute politique de mise en valeur de la vallée ; car de ces dissemblances découlent souvent des conflits intercommunautaires qui n'ont pas épargné les populations des deux rives du fleuve Sénégal en 1989, aggravés par le contexte de sécheresse qui sévit dans toute la zone sahélienne. Les résultats de l'analyse des tendances démographiques actuelles sont également pris en compte dans ce chapitre, tout aussi les principales activités.

I. LE PEUPLEMENT DU BASSIN DU FLEUVE **SENEGAL**

La moyenne vallée est caractérisée par l'importance de la plaine alluviale. Les cultures du walo y sont associées aux cultures du diéri qui deviennent de plus en plus aléatoires vers l'ouest en raison de la faible pluviométrie. Par contre dans le haut bassin, la vallée se resserre de plus en plus et n'offre aux populations d'autres possibilités que les cultures du diéri que favorise d'ailleurs la plus grande abondance des pluies d'hivernage.

La division géographique entre le haut bassin où dominent les cultures du diéri d'une part et la basse vallée où règne l'association cultures du walo et cultures du diéri d'autre part, « *a déterminé pour une large part le peuplement et surtout le mode de production dans l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal* » (B. Barry, 1980)

Le peuplement de la vallée est le résultat d'une histoire. Le haut bassin par sa position géographique entre la Ségambie et l'hinterland soudanais, a été peuplé successivement par les Soninkés, les Malinkés et les Khassonkés¹. Ce peuplement ancien est lié étroitement à l'histoire du Soudan Occidental, c'est-à-dire, aux structures politiques, sociales et économiques du Ghana à partir du VIII^{ème} siècle et du Mali au XII^{ème}. « *Les populations sont venues principalement de l'Est vers la vallée et aussi du Nord-Est, c'est-à-dire du Sahel, en ce qui concerne les minorités Maures et surtout les Peuls nomades* » (B. Barry, 1980).

¹ Peuples de l'Afrique de l'ouest appartenant à la culture mandingue

Par contre, le peuplement de la moyenne vallée et du delta, composé essentiellement de Peuls nomades, de Toucouleurs, de Wolofs et Maures appartiennent à l'aire historique Sénégalienne fortement influencée par le front saharien des Arabo-Berbères, et par l'Océan avec le commerce atlantique à partir du XV^{ème} siècle. *« C'est en définitive, ces deux influences qui expliquent l'occupation progressive de la rive droite par les Maures, tandis que les Wolofs, les Toucouleurs et les Peuls s'établissent plus fortement sur la rive gauche bien avant la conquête coloniale »* (B. Barry, 1980).

Malgré la diversité du peuplement, la vallée du Sénégal connaît une certaine unité dans l'organisation politique et sociale. Un lien étroit apparaît entre les deux. *« La première émerge en quelque sorte de la seconde dont elle reflète les différentes hiérarchies d'ordre et de caste. Ce sont des sociétés inégalitaires par excellence dans lesquelles chaque individu reçoit son statut social de la famille au sein de la société globale »* (P. Diagne, 1967). Dans son ensemble, l'organisation sociale repose sur la division de la société en trois catégories : les hommes libres, les hommes de castes, et les esclaves.

Dans le haut fleuve, les Soninkés, les Dioulas de l'ouest ont fait de cette région un important centre commercial ; puis les Malinkés agriculteurs s'établirent sur la rive gauche dans le sillage de l'empire du Mali jusqu'au XVI^{ème} siècle. Enfin les Khassonkés ou Fulas mandinguisés, associant l'élevage et l'agriculture peuplèrent les deux rives et réussirent à contrôler la région avant de subir l'invasion Bambara en 1800.

« L'histoire de la moyenne vallée est rythmée par la descente régulière des Arabo-Berbères vers la vallée du fleuve Sénégal qui vont progressivement peser sur le destin des deux rives du fleuve en raison de l'importance du commerce de la gomme, de l'attrait du commerce atlantique et des profits, de la traite négrière » (Barry, 1980).

Mais au fur et à mesure du progrès de la sécheresse dans le Sahel Mauritanien, les Maures vont s'implanter plus durablement sur la rive droite à la recherche de nouveaux pâturages et de terrains de cultures. Leur organisation politique repose moins sur l'assise territoriale, comme c'est le cas des aristocraties terriennes du Fouta Toro et du royaume du Walo, mais plutôt sur le contrôle des terrains de parcours en relation avec leur mode de vie nomade auquel s'ajoute l'activité commerciale très importante. Mais au lendemain des indépendances et plus précisément au cours des années 1970 et 1980 en relation avec ce grand fléau qu'est la sécheresse, la situation a profondément changé entraînant la sédentarisation des Maures et l'occupation des terres jusque là réservées à l'agriculture et cultivées par les populations, Toucouleurs surtout, de la rive gauche.

Les habitants de la vallée sont dans leur immense majorité des agriculteurs, à l'exception des nomades peuls et maures vivant de part et d'autre du fleuve et associant parfois l'élevage à l'agriculture. *« Il s'agit dans tous les cas d'une économie d'autosubsistance »* (C. Meillassoux, 1975), *« reposant sur la propriété collective de la terre et son exploitation individuelle »* (A.B. Diop, 1978).

L'histoire de la propriété foncière dans le delta et la vallée à plus forte densité de peuplement est le reflet de rivalités politiques du fait de l'existence des terres alluviales qui ont toujours suscité la convoitise des grandes familles aristocratiques entraînant chez les toucouleurs par exemple un morcellement très poussé du domaine foncier de chaque grande famille. Ainsi la terre reste un fondement des structures politiques et sociales dans la moyenne vallée où les basses classes de la société, les esclaves, les hommes de castes et même certains hommes libres sont exclus de la propriété.

Depuis le XVIII^{ème} siècle, dans cette région du Sénégal, l'aristocratie maraboutique s'est accaparée les terres du walo, assurant ainsi la pérennité jusqu'à nos jours de leur pouvoir politique religieux, et économique. L'adhésion des masses populaires à l'Islam devient une réalité, créant au-delà des frontières des royaumes, des chaînes de solidarité au sein des classes maraboutiques pour constituer un rempart à la conquête coloniale.

L'influence de l'Islam explique la prépondérance de la succession patrilinéaire et la place limitée de la femme dans la vie politique et économique. Ici, plus que partout ailleurs, le partage des terres a toujours été au centre de toutes les rivalités politiques qui ont secoué le Fouta où, malgré les divisions internes, « *la caste maraboutique a réussi à conserver ses privilèges* » (Barry, 1980).

Pour les exclus de la propriété, l'émigration est devenue la seule alternative à un moment où le cycle de sécheresse s'installe en accentuant la descente des maures vers la vallée et en réduisant les activités des Peuls nomades. Les problèmes d'accès à la terre et les dures conditions liées aux aléas du climat vont, en effet, beaucoup agir dans la dynamique de la population de la moyenne vallée.

II. CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION

La population de la région de Saint-Louis (comprenant les départements de Saint-Louis, Dagana et Podor) est évaluée à 695 720 habitants d'après le dernier recensement de 2002, soit 7% de la population du Sénégal, puis estimée à 788 006 en 2006 (MEF, 2006). Elle était de 441 609 en 1988. Le taux moyen de croissance est de 3,2 %.

Dans la nouvelle région de Matam le nombre d'habitant est de 423 041 en 2002 ; elle est estimée à presque 500 000 en 2006 (MEF, 2006).

Au total, les résultats du recensement de 2002 révèlent que 1 120 000 peuplent la vallée soit 11,2% ; en 2006, les estimations la situent à près de 1 300 000. L'accroissement de la population au niveau régional montre que les régions du nord et celles de la vallée du fleuve Sénégal enregistrent de nos jours une augmentation de leur taux d'accroissement intercensitaire de l'ordre de 6% à Tambacounda (haut bassin), 7 à Saint-Louis et 4 à Matam (MEF, 2006).

On pourrait imaginer que le retour tant attendu (par les autorités politiques) des émigrés d'Afrique, d'Europe et d'ailleurs est un des principaux facteurs de croissance. Les estimations de la population réalisées par la Direction de la Prévision et de la Statistique au niveau du Sénégal sur la période 2005-2015 et couvrant les différents départements de la vallée confirment cette tendance. Aussi « *tout semble indiquer que l'évolution de la population va s'accélérer du fait des ambitieux projets de l'Après-Barrage* » (Badiane, 2003).

La dynamique démographique est plus forte dans les départements du haut bassin que dans la moyenne vallée et précisément à Matam. En effet, les raisons évoquées plus haut dans le peuplement, liées aux difficultés de la majorité de la population d'accéder à la terre et les potentialités économiques de plus en plus intéressantes avec le développement de la culture du coton expliquent que « *la région de Tambacounda et plus précisément le département de Bakel et les villes situées le long du fleuve, attirent plus qu'elles n'émettent* » (MEF, 2006).

La concentration de la population est importante à l'ouest : 44 % à Saint-Louis, contre 34 % à Matam (voir carte 4, p.62). Elle est dominée par le sexe féminin (51 % à Dagana, 53 % à Podor et Matam). Les départements de Podor et de Matam¹ sont frappés par l'hémorragie migratoire.

Cela donne aux femmes une place prépondérante dans la vie active. Les jeunes (10 à 15 ans) représentent 44 % de la population totale. Les ruraux forment 52 % à Dagana, 95 % à Podor et 94 % à Matam.

La superficie cultivée sur le diéri est de 100.000 ha. La moyenne par personne est de 0,35 ha à Dagana et 0,45 ha à Matam et 0,69 ha à Podor.

Pour une superficie irrigable de 320.000 ha dans la moyenne vallée, la moyenne par individu est de 1,1 ha à Dagana, 1,45 à Matam et 2,2 à Podor. Ce potentiel fait de l'aménagement de la vallée un véritable enjeu économique.

¹ Matam est devenu au début de l'année 2002, la 11^{ème} région du Sénégal

CARTE 4 DENSITE DE POPULATION

III. LA VOCATION AGRICOLE DE LA VALLEE

Dans la région du fleuve, les populations s'adonnent à plusieurs activités dont la plus importante, celle qui dégage plus de ressources, est l'agriculture irriguée.

1. Le développement des cultures irriguées

L'économie essentiellement agricole de la vallée est tributaire de la pluie et de la crue du fleuve. Les années de sécheresse ont montré la précarité et la vulnérabilité des systèmes traditionnels de production dominés par la culture pluviale et la culture de décrue. L'accroissement de la population nécessite donc une agriculture plus productive en permanence. Le développement de l'économie de la région passe par l'agriculture irriguée.

Pendant les années peu arrosées, les cultures pluviales sont effectuées sur les sols sableux exondés du diéri et aussi sur les levées. Leur succès dépend du total de la pluviométrie et de sa répartition au cours de la saison. L'apport nourricier des cultures pluviales à la population en 1990 était de 2.6 kg par tête à Podor 16 à Matam (source IARS)*.

Les cultures de décrue sont dépendantes des apports d'eau en général, du fleuve en particulier. Elles occupent une place de choix dans le système agricole traditionnel. En 1989-90, elles avaient fourni à la population 58 kg de grains par tête à Matam (source IARS).

Les superficies cultivées et la production varient considérablement en fonction du type de crue, des succès remportés par la culture pluviale, en somme, de l'importance des besoins en produits alimentaires. La superficie apte à la culture de décrue correspond approximativement à la surface nette irrigable des sols lourds. Elle serait de 220 000 ha en amont de Dagana. Cependant *«la superficie brute totale qui pourrait porter les cultures de décrue est de 290 000 ha»* (J. Chaumeny, 1974)

Les rendements du système sont à la mesure de la rigueur des conditions naturelles (crue, température, vent d'est chaud) lesquelles influencent la quantité d'humidité retenue dans le sol et la période active de la végétation. En effet, plus l'humidité dans le sol est élevée, plus l'infiltration est instantanée.

La pratique de l'irrigation est récente au Sénégal et particulièrement dans la vallée. En raison de la sécheresse, la demande en périmètres irrigués augmente de plus en plus ; la participation paysanne à la culture irriguée est en pleine croissance et l'importance de la sécurité alimentaire explique l'adhésion paysanne à ce système de culture par le biais de petits périmètres.

* IARS : Inspection Agricole de la Région de Saint-Louis

C'est à partir de 1960 que le gouvernement du Sénégal a poursuivi les opérations de mise en valeur de la vallée et du delta dans le but essentiel de réduire les importations massives de produits vivriers. Durant la période 1965-1980, les superficies aménagées n'ont évolué que faiblement : 6 500 ha en 1965, 17 500 en 1980. Cette phase est marquée par une évolution dans la conception des aménagements en deux temps.

Une première qui s'étend de 1965 en 1972 concerne le delta. Les cuvettes sont irriguées par submersion contrôlée. « *C'est la période du peuplement du delta et d'introduction de la riziculture irriguée* » (SAED, 2001). En cette première période, les productions restaient faibles, car le cycle cultural était tributaire des pluies pour l'installation de la plante et de l'intensité de la crue pour son développement.

La seconde va de 1972 en 1980 ; elle est caractérisée par la reconversion de la plupart des aménagements en submersion contrôlée du delta en périmètres avec maîtrise totale de l'eau et l'organisation des producteurs en groupements et le développement des périmètres irrigués villageois (PIV) dans la basse et moyenne vallée.

En effet, les périmètres irrigués villageois (PIV), conçus en milieu paysan, sont devenus l'un des éléments d'une planification rurale de la mise en valeur des ressources du bassin du fleuve. Ils sont introduits en 1974 pour faire face à la sécheresse avec comme objectif l'autosuffisance alimentaire. Ils sont aménagés (le coût de réalisation était faible entre 300 000 F/ha, ou 458 € à la fin des années 1970 à 1 million FCFA ou 1525 € à la fin des années 1980) près du fleuve ou du marigot sur les levées et non sur les sols des cuvettes argileux, ce qui permet aux paysans d'irriguer tout en pratiquant la culture de décrue.

Les producteurs restaient toutefois sous la dépendance de la SAED pour l'entretien et la réparation des groupes motopompes et l'approvisionnement en intrants. Les rendements moyens obtenus étaient assez élevés avec une moyenne de 4 à 5 t/ha (alors qu'aux premières expériences ils s'élevaient à 1,2 et 2,2 t/ha).

En outre, les familles paysannes cultivent aussi des céréales sous pluie. Mais la part des cultures irriguées dans l'approvisionnement en céréales des populations est importante. Des études dans la vallée et précisément à Matam ont montré que « *chez les ménages qui participent à un périmètre irrigué, la part de la culture du mil et sorgho est largement dépassé par celle de la culture irriguée* » (G. Diemer, 1987). *Les paysans des périmètres de Manaji (à Matam) produisent depuis 1981 plus que leurs besoins. La superficie de leurs parcelles est de 40 ares et leur périmètre est bien géré.* (G. Diemer, 1987).

A Nawlé, Alana et Abdalla, villages situés entre Podor et Matam, 70 à 80 % des besoins en céréales sont irrigués au cours des années 80.

En 1989-1990, les cultures irriguées ont fourni en moyenne à chaque habitant 379 kg de riz dont 305 dans le département de Dagana et 478 pour Podor (source : IARS) tandis que les adeptes de la culture pluviale n'ont presque pas récolté. Un habitant de Podor, à qui nous avons demandé pourquoi il n'avait pas récolté du mil (culture pluviale) en 1994-95 répondit: « *la récolte de mil ne remplit pas un panier* ».

Les cultures irriguées offrent plus de sécurité alimentaire et de possibilités financières. Par conséquent, l'intérêt porté aux cultures pluviales et de décrue tend de plus en plus à diminuer.

De ce fait, à partir de 1987-88, les surfaces aménagées pour le compte de l'agriculture irriguée augmentent à un rythme très rapide dans le delta de 4 500 ha par an (les effets du barrage de Diama sont les plus sensibles), par contre dans la vallée (essentiellement à Podor et Matam) la progression est faible avec environ 1 000 ha par an. A cette même période, les surfaces cultivées progressent rapidement. Elles vont presque doubler entre 1987-88 et 1993-94 passant respectivement de 22 700 ha à 41 500.

Cependant, l'environnement économique était très défavorable ; le Sénégal à l'instar de nombreux pays en développement est sous ajustement structurel et que sur le plan institutionnel, le gouvernement Sénégalais a élaboré de nouvelles politiques économiques comme la nouvelle politique agricole (NPA) marquée par le désengagement de l'état et la responsabilisation des producteurs. Les effets sur le plan agricole sont l'importante augmentation des prix des intrants et des prestations de services alors que le prix du paddy n'a pas progressé ou très faiblement.

De nos jours les surfaces aménagées sont passées à 70 000 ha en 1998 (SAED, 2001). Cela s'est fait grâce à une politique de création, de réhabilitation d'infrastructures et d'équipements hydro-agricoles (barrage de Manantali) et d'appuis efficaces (encadrement, appui-conseil, financement, crédit, recherche...) sous tendue par un Plan Directeur de la Rive Gauche (PDRG).

Ce plan adopté depuis 1994, traduit toute la volonté des autorités de faire de la vallée une zone attractive, de polarisation des investisseurs et surtout des populations. Il définit la logique de développement pour la vallée qui est un compromis entre le social (la priorité consiste à atteindre l'autosuffisance alimentaire), l'écologique (privilégier l'équilibre écologique de la vallée) et l'économique (privilégier les utilisations plus rémunératrices de l'eau comme la production hydroélectrique et maîtrise des filières notamment le riz). Le scénario de développement porte sur l'aménagement de maximum de terres irriguées (88 000 ha d'ici 2017), sans mettre en danger les autres usages de l'eau (cultures de décrue, hydroélectricité).

Les productions agricoles qui se sont développées sur les aménagements sont dominées par le riz qui « *occupe 79% des surfaces cultivées* » (SAED, 2001). En effet, la vallée du Sénégal présente toutes les caractéristiques d'une grande région de production agricole. Les conditions dans lesquelles celle-ci s'y développe sont éminemment favorables et ne présentent pas de contrainte rédhibitoire.

De plus, le riz correspond à une demande intérieure en constante progression (plus de 500 000 t), largement supérieure au niveau actuel de production (près de 200 000 t/an). Les autres spéculations vivrières irriguées, comme le maïs et le sorgho, cultivées essentiellement dans la moyenne vallée, sont en progression tant du point de vue des superficies qu'elles occupent que des rendements.

Le maïs pourrait devenir, après le riz, la seconde culture de la vallée. Il constitue dans la zone de Matam et de Bakel, une des principales sources d'alimentation des populations. L'utilisation des variétés traditionnelles fait que le rendement reste faible, au meilleur des cas il ne dépasse pas 2,5 t/ha alors que les nouvelles variétés homologuées (Early Thaï par exemple) permettent à grande échelle aux producteurs d'atteindre des rendements moyens de 5 t/ha.

La vallée a également une vocation agro-industrielle ; la plus importante des sociétés de production agricole dans les trois états (Mali, Mauritanie et Sénégal) est la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS).

Elle est installée à Richard-Toll dans la basse vallée. Les parcelles cultivées pour le sucre s'étendent sur 8000 ha en 2007/2008, d'où des besoins en eau très importants. La société consomme 600 000 m³ /j, ce qui fait d'elle, le principal consommateur d'eau pendant la contre saison.

D'autres sociétés comme la Société Nationale des Tomates Industrielles (SNTI), installées à Dagana, sont aussi concernées par la mise en exploitation de Diama et de Manantali. La tomate industrielle a amorcé une reprise très significative avec la mise en place d'un cadre de concertation de tous les acteurs y intervenant. Les superficies mises en valeur sont de l'ordre 1443 ha à la fin des années 1990 pour Podor et Dagana pour des prévisions de 30 000 t.

2. Les autres activités

a) Les cultures de décrue

L'agriculture de décrue est une agriculture traditionnelle très importante dans la vallée et le delta. Vers la fin de la saison des pluies (août-septembre) la crue du fleuve inonde les larges plaines alluviales et bas-fonds qui sont cultivés au fur et à mesure que les eaux se retirent.

Pour la période 1946-1971 (juste avant la création de l'OMVS), la moyenne des surfaces inondées a été estimée à 312 000 ha de part et d'autre du fleuve et celle des surfaces cultivées à 108 000 ha, dont 65 000 sur la rive sénégalaise (OMVS-IRD, 1999). Il faut vite signaler que ce type de production a vite atteint ses limites et a disparu durant les années de sécheresse (1970) puisqu'elle est fortement tributaire de la pluviométrie et/ou de la crue du fleuve.

C'est d'ailleurs pour faire revivre cette importante activité que l'OMVS simule la crue par des lâchers au niveau du barrage de Manantali permettant ainsi aux populations de s'adonner à nouveau aux cultures de décrue traditionnelles.

Une bonne connaissance des inondations des cuvettes de décantation lors de l'hivernage est un préalable pour le suivi de la culture de décrue en saison froide. Pendant la période de la crue, la vallée alluviale est envahie par les eaux à partir de défluent du fleuve et des marigots. Selon le type de crue (faible, moyenne ou forte) les surfaces inondées sont très variables.

Une classification en utilisant les quatre bandes spectrales des images SPOT XI a permis de mettre en évidence les surfaces inondées pendant l'hivernage 2000. « *Le résultat final de la classification donne 52 921 hectares inondés par les eaux de la crue dans le département de Podor en novembre 2000* » (Mané et Fraval, 2001). En comparaison aux deux hivernages précédentes, c'est-à-dire, 1998 et 1999, on peut noter une diminution de « *23 et 30% des surfaces inondées brutes* » (Mané et Fraval, 2001), soit respectivement des valeurs de l'ordre 84 750 et 96 749 hectares.

Mais sur le résultat final, il faut déduire les surfaces occupées par l'hydrologie permanente (fleuve Sénégal, les défluent, les mares) et les surfaces inondées portant la végétation aquatique et les forêts d'*Acacia nilotica* (gonakiés). En 2000, il restait, selon les auteurs, 37 635 hectares potentiellement exploitables pour les cultures de décrue en contre saison froide 2000-2001 dans le département de Podor.

Mais, les traitements numériques effectués sur les images de contre saison froide, en intégrant uniquement les zones qui avaient été inondées en hivernage ont permis de mettre en évidence les surfaces emblavées en culture de décrue. Sur l'ensemble du département de Podor, « *18 998 hectares sont cultivées en décrue durant la contre saison froide, soit 50% des surfaces inondées en 2000-2001* » (Mané et Fraval, 2001).

Par rapport aux années 1998 et 1999, les surfaces exploitées en culture de décrue ont baissé de 43 et 46% respectivement. Cette baisse est consécutive à la réduction de l'extension des surfaces inondées en hivernage 2000.

A la même année, l'estimation des superficies cultivées en décrue dans le département, à partir des traitements numériques d'images de télédétection indique que, « 6 746 hectares ont été emblavées en saison froide 2000-2001 » (Mané et Fraval). Par rapport à la situation de 1999-2000, le système de culture par décrue, a connu une régression d'environ 70% dans le département de Matam.

Une fois de plus, la faiblesse de la crue est incriminée par les populations, lesquelles soulignent que : non seulement elle a été faible pour toucher le maximum de cuvettes mais surtout la période d'inondation des terres a été trop courte pour permettre au sol d'emmagasiner l'humidité nécessaire à un développement satisfaisant des plantes cultivées par ce système de culture.

Du fait du caractère extensif de la culture de décrue et de l'utilisation des moyens rudimentaires, les rendements sont d'habitude peu élevés. Le rendement moyen estimé par télédétection en saison froide 2000/2001 à Matam est de 638 kg à l'hectare. Cependant, il semble que de plus en plus les pratiques culturales s'améliorent avec une relative maîtrise des conditions de crue, entraînant une timide hausse des rendements et de la production (SAED, 2001).

Cette culture de décrue est un élément important du système de production des populations, non seulement à cause de son emplacement à proximité des villages, ce qui permet la participation active des femmes, mais aussi et surtout à cause de la grande variété des espèces cultivées : sorgho, maïs, aubergine, haricots (niébé), tomate, hibiscus (bissap), pastèques et autres produits maraîchers locaux. Aussi les tiges du maïs et haricot forment une source précieuse d'aliments pour les petits ruminants (moutons et chèvres).

Mais devant la concurrence de l'agriculture irriguée et de l'artificialisation des eaux du fleuve, les surfaces cultivées sont en régression ; son amélioration est longtemps posée ; des essais agronomiques passés ont montré une bonne réponse aux engrais en faible quantité ; cependant, pour les paysans, le sorgho de décrue est avant une culture traditionnelle.

b) L'élevage et la pêche

Malgré les conditions mauvaises dues notamment au parasitisme et l'ouverture des forages dans le Ferlo, l'élevage conserve toujours une certaine importance dans l'économie de la vallée. Le Fleuve constitue une ligne d'abreuvement continue et les surfaces cultivées offrent après les récoltes, un appoint fourrager en période de soudure.

La vallée est également une région d'élevage. Dès lors, l'eau et les disponibilités fourragères constituent des facteurs déterminants dans la pratique pastorale. En 2003, on a recensé dans la région de Saint-Louis 352 500 têtes de bovins, 560 000 ovins et 523 000 caprins (source : SRES)*. 70% des bovins et 80% des petits ruminants sont localisés dans le département de Podor.

* SRES : Service Régional de l'Elevage de Saint-Louis

La vallée et le delta représentent respectivement pour les bovins, les petits ruminants et les camelins 25,21 et 41 % du cheptel national (source : SRES 1997). Si les ovins sont majoritaires à Matam, bovins, caprins et ovins sont sensiblement égaux à Podor. Les productions animales procurent : viande, lait, cuirs (bovins), peaux des petits ruminants.

Dans la vallée du fleuve, les animaux appartiennent soit, aux cultivateurs sédentaires (Toucouleurs, Ouolofs, Sarakolés) soit, des pasteurs : Peuls et Maures. En général, les cultivateurs confient les animaux à des Peuls. L'élevage dans cette partie s'apparente à une activité de cueillette. Signe de réussite sociale, les troupeaux confèrent un poids important dans les affaires locales. Il représente l'idéal du rural, du cultivateur, de l'éleveur, du commerçant et du fonctionnaire.

L'élevage des ruminants domestiques et des camelins est globalement de type extensif dans la zone étude. Dans les conditions climatiques sahéliennes, leur alimentation demeure une contrainte majeure. Elle est basée sur l'alternance et la complémentarité de deux éléments :

- l'utilisation de pâturages communautaires du diéri (pâturages d'hivernage) de bonne valeur alimentaire entre août et octobre ; d'où une certaine dépendance à la pluviométrie,
- l'utilisation en saison sèche de la végétation sur les basses terres du walo inondées par la crue du fleuve, il s'agit des parcours de décrue, des parcours post-culturels, des cultures fourragères, de la végétation arborée ; *«tous dépendants de l'ampleur de la crue et de l'articulation avec les autres activités du walo, comme les cultures de décrue et les périmètres irrigués »* (C. Corniaux, 1999).

Les parcours liés à la décrue du fleuve sont des bourgoutières, c'est-à-dire des formations graminéennes d'excellente valeur fourragère, inféodées aux terrains argileux peu ou salés, subissant l'alternance inondation/ exondation. Les espèces majeures sont : *Echinochloa stagnina* et *Vossia cuspidata*.

Ils fournissent aux troupeaux, de retour des pâturages du diéri, exploités en hivernage, une alimentation riche et abondante en saison sèche.

Cependant, la sécheresse, la construction des barrages, l'endiguement du fleuve et le développement des aménagements hydro-agricoles ont totalement bouleversé le traditionnel équilibre spatio-temporel. Les parcours sont sujets à des variations annuelles conséquentes de la crue en dépit de sa régularisation par les barrages.

La gestion des eaux du fleuve par les ouvrages (barrages, endiguement et périmètres) a essentiellement un impact sur l'extension des crues et donc de la biomasse végétale disponible pour l'élevage dans les zones du walo. Elle permettrait probablement de stabiliser les ressources fourragères de la décrue.

Les parcours post-cultureux de décrue concernent essentiellement l'utilisation des pailles sur pied de sorgho et de maïs après récolte des grains (février-mars). Ils sont pratiqués dans la vallée et plus spécifiquement à Podor et Matam.

Les ressources liées à l'irrigation concernent essentiellement la culture du riz. Elles sont souvent source de conflit entre éleveurs et agriculteurs. Ces derniers accusent le bétail de divagation, de destruction des diguettes et canaux. Le développement de la double culture sur certains périmètres joue également en défaveur des parcours post-cultureux.

Les sous produits agricoles et agro-Industriels (SPAI), liés aux productions agricoles sont particulièrement importants sur la rive gauche où des filières se sont organisées. Il s'agit des sous produits de riz (son de farine), de la canne à sucre (mélasse), de la tomate (drèches) et de fanes de culture (arachide, patate douce et niébé etc....).

Une partie de la population s'adonne à l'activité de la pêche et à la sylviculture. Les pêcheurs sont estimés à 10 000 dans la vallée et dans les trois états riverains du fleuve (Mali, Mauritanie et Sénégal).

«Les débarquements sont de plus de 26 000 t à 47 000 t par an ; ce qui représente 8 à 14% des pêches maritimes artisanales au Sénégal. La pêche contribue également à assurer un revenu de l'ordre de 8 à 14 milliards FCFA annuellement pour les pêcheurs et leurs manœuvres» (OMVS et ACDI, 2000). C'est aussi un important moyen de subsistance pour de nombreux détaillants de marchés et des mareyeurs.

Mais, par suite de l'écroulement de la crue et des endiguements, le champ inondé diminue ; ce qui se traduit par une réduction de l'habitat des poissons et de la zone de reproduction et de la productivité de la vallée. Les enquêtes (OMVS et ACDI, 2000) sur cette question ont démontré que l'amplitude et la durée de la crue ont une influence sur les rendements de la pêche et le succès sur la reproduction et la croissance des poissons.

Les ressources tirées de la végétation sont notamment le bois qui sert de combustible, de construction de haie de lieux d'habitation. Les fruits et écorces de gonakié sont destinés au tannage du crin. De nombreuses espèces du couvert végétal bien connues des populations sont aussi exploitées pour leurs feuilles et racines pour l'alimentation et pour leurs vertus curatives.

Les aménagements hydro-agricoles sur les berges et les cuvettes ont réduit les superficies des gonakié. De Dagana à Thillé Boubacar et plus loin à Donaye dans l'île à Morfil, les cultures de riz et tomate ont pris la place de l'arbre.

Ces activités offrent plus de moyens de subsistance à la population, plus de ressources financières et plus de sécurité sur le plan alimentaire. Toutefois ces changements concourent vers une demande en eau qui s'accroît (ce qui oblige à mieux définir la ressource locale).

DEUXIEME PARTIE :
LES DISPONIBILITES EN EAU

Chapitre 1 : La Pluie
Chapitre 2 : Le Fleuve
Chapitre 3 : Les Nappes

Dans cette deuxième partie, il sera question de faire l'état des ressources en eau (eaux de surface et eaux souterraines) ; mais cela suppose une bonne connaissance de celles-ci en termes de potentialités et de contraintes.

La présence de ressources hydriques suffisantes peut assurer le développement économique et social des pays. L'accès à l'eau constitue un déterminant majeur de la santé et du bien-être des populations. Mais la distribution spatio-temporelle peut être un frein au développement là où les demandes ne sont pas satisfaites, notamment dans les grands centres urbains ou pour rendre l'irrigation efficace et plus économe en zone sèche voire aride.

Au Sénégal, l'on dispose d'un réseau de stations pluviométriques, piézométriques et hydrologiques, auxquelles s'ajoutent des missions ponctuelles qui renseignent sur l'état des ressources en eau. Les trois chapitres de cette partie sont respectivement consacrés à l'analyse de la pluie, puis des eaux du fleuve et des eaux souterraines.

CHAPITRE 1 : LA PLUIE

La pluie est l'élément principal du bilan de l'eau. Elle constitue le facteur le plus important du climat dans les régions où les cultures ne sont pas gênées saisonnièrement par un « hiver » thermique, puisqu'elles définissent la saison « végétative ».

Dans cette étude, les pluies sont analysées grâce aux relevés pluviométriques de plusieurs stations : Saint-Louis, Dagana, Fanaye (30 km à l'Est de Dagana), Podor, Matam et Bakel (carte 5, page 73).

Dans ce chapitre, les thèmes suivants sont développés : les mécanismes et manifestations de la pluie, la variable pluviométrie, son corollaire dans cette région sahélienne, la sécheresse.

L'objectif est de fournir des niveaux de probabilité d'occurrence de la pluie, ses variations à divers endroits de la région.

I – MECANISMES ET MANIFESTATIONS DE LA PLUIE

Les grands traits du climat de la moyenne vallée sont conjointement le fruit de facteurs géographiques et aérologiques. L'extension en latitude et la position en longitude de la vallée lui confèrent des caractères tropicaux : une bonne partie de l'année est marquée par la circulation de l'alizé continental, l'autre par l'hivernage.

La circulation atmosphérique dans toute l'Afrique de l'ouest est commandée par la ceinture des hautes pressions d'origine dynamique, elle même découpée en cellules ou noyaux anticycloniques, comme ceux des Açores et de Libye au nord et celui de Sainte-Hélène au sud. Entre les cellules, s'étendent des couloirs ou talwegs, lieux d'échange thermique principalement entre les moyennes latitudes et la zone intertropicale.

Selon la radiation reçue dans chaque hémisphère, ces noyaux sont l'objet de déplacements saisonniers nord-sud et d'une oscillation est-ouest. Ils agissent suivant un cycle d'évolution qui s'intègre dans la circulation générale en relation étroite avec les conditions astronomiques.

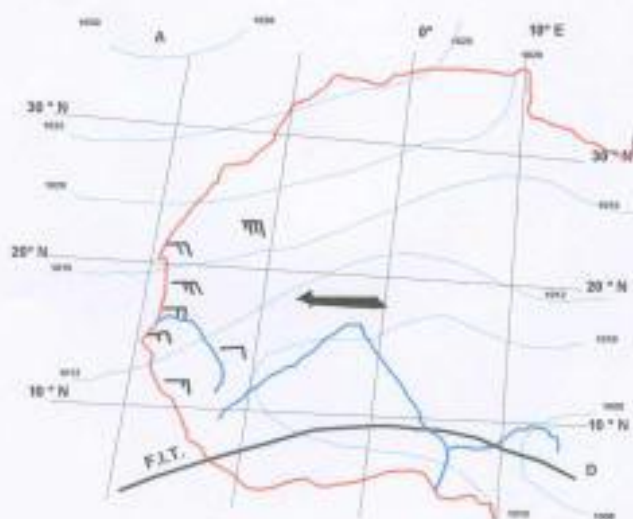
En hiver boréal, à leur maximum de puissance, les hautes pressions peuvent atteindre 1040 hPa. Elles sont alors plus proches de l'équateur. En été boréal leur intensité faiblit, elles migrent vers les pôles et sont remplacées sur le continent par des dépressions d'origine thermique. Les positions extrêmes des centres d'action en janvier-février et en juillet-août rendent bien compte de l'évolution du champ de pression sur l'Afrique de l'ouest et par conséquent permettent de comprendre les processus climatiques, générateurs de précipitations.

CARTE 5 : DES STATIONS PLUVIO DE LA VALLEE

carte n° SITUATION D'ALIZE MARITIME



carte n° SITUATION D'HARMATTAN



Carte 6 circulation alizés

1. Les pluies hivernales

En hiver, le Sénégal est sous le régime des alizés : alizé maritime continentalisé et harmattan (cf. carte 6, p.74)

L'anticyclone des Açores centré le long des côtes marocaines donne naissance à un flux d'alizé maritime stable de secteur nord-ouest sur le littoral. Ce flux est humide et offre aux régions qu'il traverse un climat caractérisé par une forte hygrométrie génératrice de rosées nocturnes qui contribuent fortement à la baisse de l'ETP. Elles pourraient d'ailleurs faire l'objet d'une utilisation agricole, comme c'est le cas dans d'autres pays de façade ouest de continent (le Chili par exemple).

Lorsque l'anticyclone des Açores et la cellule libyenne se rejoignent, un troisième flux peut balayer l'Afrique de l'Ouest. Ce flux à dominante est, sur la façade équatoriale de l'anticyclone est chaud et desséchant car très sec. Communément appelé harmattan, il surmonte en altitude les deux précédents alizés le reste de l'année. Le caractère le plus original de ces alizés, en particulier de l'alizé maritime est son « *inversion* » (M. Leroux, 1970) appelée aussi « *inversion de température liée à la subsidence de l'air supérieur* » (Le Borgne, 1988). Elle fait des alizés un flux inapte à déverser des quantités de pluies importantes, car sa structure verticale s'oppose à la formation des nuages.

On peut retenir par conséquent que « *les alizés ne gonflent pas les totaux pluviométriques des régions intertropicales* » (Le Borgne, 1988).

Toutefois, malgré l'appellation de saison sèche, la dite période n'est pas absolument sèche. Des pluies de « heug » peuvent se produire dans la moyenne vallée associée à des invasions épisodiques d'air issu des moyennes latitudes.

Très faibles et très irrégulières (à l'exemple de Podor entre 1990 et 2002) (voir tableau 4) elles n'interviennent pas dans le calendrier agricole car elles ne sont pas suivies de pluies qui permettent au cycle végétatif des plantes de se poursuivre. Elles ont une incidence généralement nulle sur la recharge en eau des sols en raison des pertes très élevées en cette saison de chaleur importante après des types de temps plus frais et arrosés.

Cependant, les pluies de « heug » peuvent aussi se manifester violemment entre novembre et avril, comme celles observées en janvier 2002 avec des hauteurs de 115 mm enregistrées en deux jours à Podor (voir tableau 4) (la moyenne pluviométrique de cette station est de 214 mm). En effet, cet évènement qualifié de « hors commun » a causé de nombreux effets négatifs sur le cheptel, les cultures, les récoltes et le tapis herbacé et a même entraîné des pertes en vie humaine.

Ces pluies ont touché principalement les départements de Dagana et de Podor, dans la région Saint-Louis d'une part et les départements de Louga et de Linguère d'autre part. Au niveau de Saint-Louis, la zone du delta (entre la ville de Richard-Toll dans le département de Dagana et l'embouchure du fleuve) a été touchée sur environ 170 km alors que la vallée du fleuve entre la ville de Saldé (département de Podor) et Richard-Toll, a été concernée sur environ 300 km. Le département de Matam, qui est devenu par la suite une région, a également été affecté, mais moins gravement. Ce phénomène, rare par son intensité et son étendue, a eu des incidences positives sur la recharge des nappes. En général, les pluies de « heug » entraînent une baisse notable des températures et de l'évaporation. Sur les sables du diéri et sur les sols alluviaux du walo, elles limitent l'influence éolienne.

Tableau 4 : lame d'eau issue des pluies de heug ou de saison sèche à Podor

PODOR	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai
1990	3,4	-	-	0,7	-
1991	3,4	-	0,2	-	2,9
1992	0,2	29,3	0,2	-	-
1993	1,8	0,1	-	-	-
2002	115	-	-	-	-

Source : Asecna-Podor

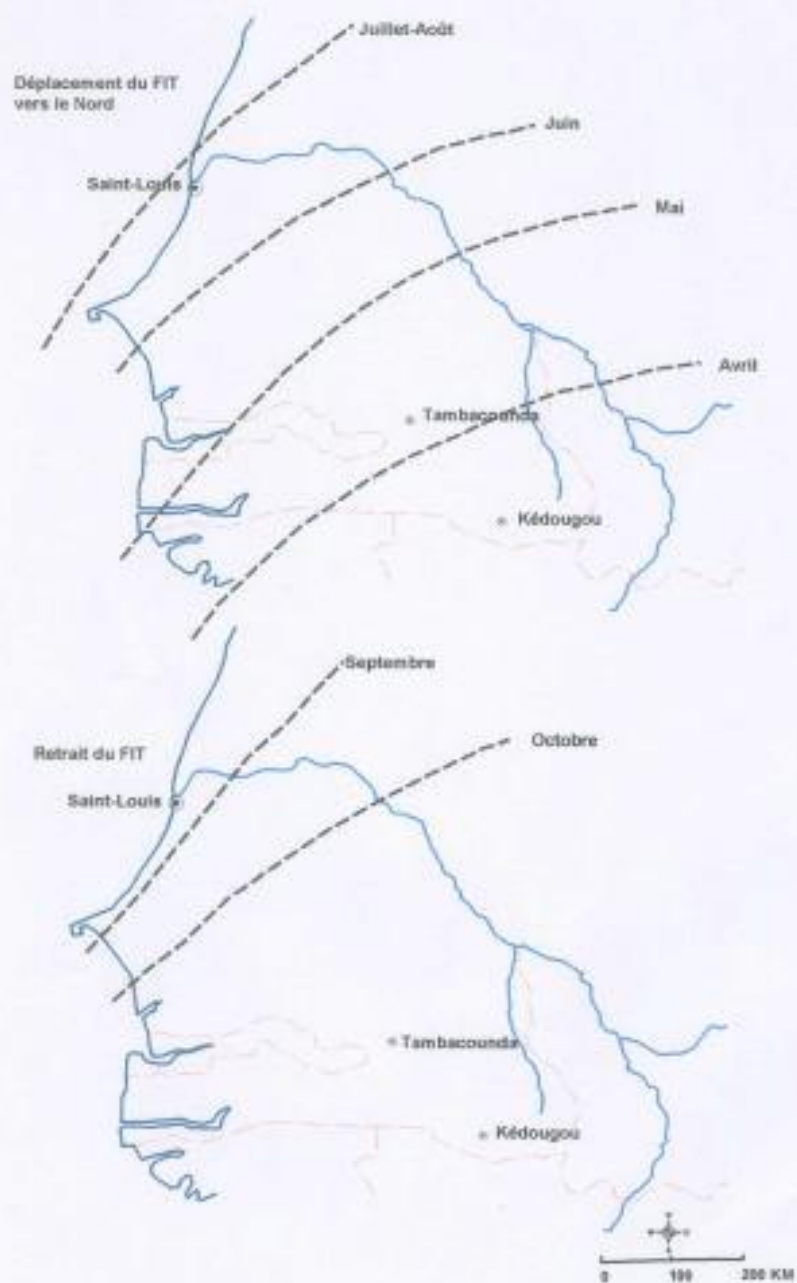
2. Les pluies estivales

Pendant la saison des pluies, l'hémisphère sud est en hiver ce qui entraîne le renforcement de l'anticyclone de Sainte-Hélène. L'anticyclone des Açores est rejeté vers le 40° parallèle. L'équateur météorologique remonte vers le nord jalonné par les basses pressions intertropicales. L'alizé austral issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène progresse lui aussi vers le nord attiré par la zone des basses pressions sahariennes. Cet alizé austral fortement humidifié par son parcours océanique « *acquiert les caractères dynamiques d'une véritable mousson attirée par les dépressions thermiques soudanaises et sahariennes* » (Leroux, 1970). Son arrivée coïncide avec la saison pluvieuse au Sénégal dont les chutes sont plus ou moins importantes et régulières selon l'épaisseur du flux.

La mousson s'assèche progressivement au cours de son parcours continental. Sa poussée entraîne également une migration du FIT (voir carte 7, p.77) au mois de mai, celui-ci atteint Matam et Podor entre juillet et août. Son reflux est plus rapide (voir carte 7). En septembre, il se situe à Dagana et octobre à Matam. Ce mois là, la station de Bakel est encore sous l'influence de la mousson. Dès novembre, le FIT reprend sa position de mars au sud du Sénégal. La saison des pluies s'annonce dans le nord du Sénégal dès avril-mai alors que dans la moyenne vallée, les premières pluies sont le plus souvent enregistrées en juin-juillet. Elles sont liées aux lignes de grain. Leur intensité est assez forte (Mbodj A, Ndécky A, 1991). En quantité, les pluies de cette saison sont importantes.

Donc, les pluies associées au FIT se produisent dans la vallée « en gros » de début juillet au 15 septembre soit durant trois mois au maximum.

carte n° : MIGRATION DU FIT



Elles peuvent contribuer à la recharge de la nappe. Elles sont donc très bénéfiques pour les cultures.

A travers les mécanismes pluviogènes, il apparaît que les apports en eau sont fonction de la plus grande pénétration de la mousson, elle-même dépendante de la puissance de l'anticyclone de Sainte-Hélène.

II - LA PLUVIOMETRIE DANS LA MOYENNE VALLEE

La pluviométrie de la moyenne vallée présente deux caractéristiques principales : les pluies diminuent du sud au nord en quantité et en durée, et elles varient plus ou moins d'une année à l'autre. Depuis 1968, les stations de la vallée sont toutes déficitaires et la saison des pluies est de plus en plus tardive.

1. Une diminution du sud au nord

Tableau 5 : Précipitations moyennes annuelles en mm (1972-2001) (Asecna Yoff)

Station	Podor	St-Louis	Matam	Bakel
Lat nord	16°38	16°03	15°38	14°54
P (mm)	205,6	231,7	338,9	499,3

La décroissance de la lame d'eau précipitée peut être mesurée à partir du total enregistré dans les stations et exprimé en pourcentage. Ainsi, le total de Podor représente en moyenne environ 60% de celui de Matam et celui de Saint-Louis 65% de ce dernier.

En découpant le bassin du fleuve Sénégal en domaines climatiques, la diminution des modules pluviométriques est plus explicite encore (voir carte 8, p.79). Selon P. Sagna (2000) :

- le domaine sahélien est la partie la plus aride du pays. Il s'inscrit entre les isohyètes 100 et 500 mm.
- le domaine nord soudanien enregistre des précipitations comprises entre 500 et 1000 mm.
- le domaine sud soudanien possède une tonalité plus humide grâce aux précipitations supérieures à 1000 mm par an.

La pluie moyenne annuelle du domaine sud soudanien représente 74,3 % de celle du domaine guinéen. La pluviométrie du domaine sahélien ne représente que 46% du total du domaine nord-soudanien.

La décroissance moyenne de la pluie « *depuis la région guinéenne (latitude 10° N) jusqu'au domaine sahélien (16° N) se chiffre à environ 25% de chaque domaine climatique* » (A. Sow, 1984).

CARTE DES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES 61-90

Ce gradient zonal se manifeste également dans la répartition des pluies au cours de l'année.

2. Des pluies concentrées

La quasi-totalité des pluies se concentre en une période plus ou moins courte d'une durée de quatre mois à Matam-Bakel, elles sont de trois mois plus au nord. Dans le domaine soudano-guinéen, elle est de cinq à six mois. L'hivernage débute tôt au sud : en mai à Kédougou, début juin à Bakel, fin juin à Matam, juillet-août à Dagana-Podor et Saint-Louis. La saison s'achève fin septembre à Dagana et Bakel, octobre à Kédougou.

L'observation du tableau (6) montre que dans la moyenne vallée en amont de Bakel-Matam, 60% des pluies tombent entre juillet et août ; tandis qu'au nord, à Dagana-Podor, les mois d'août et septembre qui sont les plus pluvieux enregistrent près de 70% du total.

Tableau 6 : Pourcentage mensuel de la lame d'eau précipitée en un an en % (moyenne 1961-1990)

	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE
Bakel	9	27	34	22	6
Matam	7	26	34	24	6
Dagana	3	18	36	33	8
Podor	3	19	35	32	7

Ainsi la saison des pluies commence plus tard et se termine plus tôt dans les stations septentrionales. Cette concentration des pluies est souvent considérée comme un facteur limitant. Aucun rattrapage n'est possible en cas de retard de la saison pluvieuse. Une saison pluviométrique réduite correspond à un nombre de jour de pluie également très limité.

Comme il ne pleut pas tous les jours en saison des pluies, le nombre de jour de pluies est inférieur à 20 à Dagana, Podor et Saint-Louis ; il est de 30 à Matam. Dans les secteurs où l'hivernage est étalé dans le temps, les quantités d'eau précipitées et les jours de pluie augmentent.

Si les totaux de la pluviométrie ont fortement régressé, la diminution des jours de pluie est peu sensible à travers les moyennes. La comparaison de la pluviosité de la normale (1931-1960) à la période 1961-1990 montre que ce paramètre est resté constant : 19 jours à Podor. Mais, la diminution est importante à Matam : 33 contre 28 jours. Le rapport est de 85 % contre 67 par la pluviométrie.

L'analyse fréquentielle du nombre de jours de pluie lors des décennies 1971-1980 et 1981-1990 montre qu'il est souvent inférieur à 10 dans les départements de Podor et de Dagana soit la moitié de la normale. En 1983, Richard-Toll a effectivement enregistré trois jours de pluie, contre cinq à Saint-Louis, six à Dagana et sept à Podor. Cette diminution est tributaire de la sécheresse et de l'irrégularité interannuelle de la pluviométrie.

3. Des pluies irrégulières

L'irrégularité des pluies est une des caractéristiques et non des moindres des régions de climat « sec ». Elle affecte toutes les composantes précédemment analysées : la quantité, la durée et le calendrier des pluies.

Afin de cerner l'ampleur des variations inter annuelles, l'intervalle de variation et le coefficient de variation des précipitations sont calculés pour deux stations : Dagana et Podor. L'intervalle de variation est la différence entre le maximum et le minimum de la série pluviométrique (moyenne 1961-1990)

Le coefficient de variation (CV) donne une mesure de la variabilité dans les données exprimées en pourcentage de la valeur moyenne. En général, il est inversement proportionnel à la hauteur des pluies.

Les résultats sont représentés sur le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Variation interannuelle de la lame d'eau précipitée

	X (mm) (espérance ou moyenne)	Maximum (mm)	Minimum (mm)	Intervalle de variation (mm)	Coeff. de Variation (CV) (%)
<u>Dagana</u>	232,8	403 (en 1966)	65,5 (en 1984)	337,5	35
<u>Podor</u>	219,8	431,4 (1969)	61,1 (1983)	370,3	46

Les variations de l'intervalle (amplitude) soulignent que les précipitations sont très irrégulières d'une année à l'autre dans la vallée. L'irrégularité de la pluviométrie est manifeste au cours des dernières décennies. Les stations n'ont pas enregistré un total pluviométrique égal à la valeur de l'amplitude.

Le coefficient de variation est de 40% en moyenne pour les deux stations, c'est à dire, un ordre de grandeur pour une moyenne des précipitations annuelles de 200 mm (Jones, 1981). A partir du cumul annuel (voir tableau en annexe 3) le rapport entre le maximum et le minimum de la décennie d'observation (1980-1990) est de 1 à 4 à Saint-Louis-Dagana, 1 à 6 à Podor, 1 à 3 à Matam. Il atteint des valeurs record à Richard-Toll 1 à 18.

Le classement selon la latitude montre que les stations en aval connaissent et enregistrent les variations les plus importantes. L'irrégularité croît très sensiblement vers le nord tandis que les régions méridionales montrent une plus grande régularité. Cela souligne la vulnérabilité en rapport avec la faible durée de l'hivernage.

Les fluctuations se manifestent de façons diverses à l'échelle de la vallée et du bassin. Les séries statistiques montrent pour chaque période une succession d'années déficitaires sans périodicité très nette et sans possibilité de prévision, à première vue. Cependant, les études fréquentielles de A.A. Sow (1984) révèlent que : « *les durées de retour dans le bassin d'une série ou d'une séquence varient d'une station à l'autre. Les années sèches reviennent plus rapidement que les années humides* ».

Au cours de la décennie 1980-1990, Podor a atteint la normale en 1989 avec un total de 334,6 mm (normale de 1931-1960 : 333 mm). Entre 1991 et 2004, cette normale y est enregistrée une seule fois en 2003 avec 364 mm. Cependant l'année suivante en 2004, la station de Podor et celles de la basse vallée à l'exemple de Saint-Louis renouent avec des pluies faibles : 145,5 mm à Podor et 130,5 mm à Saint-Louis

Par ailleurs, la comparaison de la pluviométrie des différentes régions révèle que celle-ci peut revêtir des aspects variables d'une station à l'autre au cours de la même année. Si 1989 est une année normale pour Podor, elle est légèrement excédentaire à Semmé et Bakel (593,7 mm), en revanche déficitaire à Matam 355,1 mm contre 573 (normale 1931-1960). La succession des années pluvieuses et des années sèches s'effectue sans apparente corrélation entre les stations.

4. Probabilité d'occurrence d'une pluie

Le total des précipitations n'est pas un critère suffisant pour déterminer une bonne ou une mauvaise saison des pluies. Il faut en plus connaître leur répartition au cours de l'hivernage. Les données utilisées sont celles de la station de Fanaye. La décennie 1981-1990 n'est pas entièrement couverte. Les valeurs sont incomplètes pour les années 1987 et 1989.

Tableau 8 : Probabilité (%) d'occurrence d'une hauteur de pluie à Fanaye (période 1981-1990) (source ISRA- St-Louis)

	JUILLET			AOUT			SEPTEMBRE		
Hauteur	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Faible 2-10 mm	2,5	12,5	12,5	2,5	12,5	12,5	12,5	12,5	0
Moyenne 10-15 mm	0	12,5	50	12,5	37,5	50	25	25	25
Forte plus de 20 mm	0	12,5	25	37,5	12,5	37,5	37,5	12,5	12,5

1 = décade 1 ; 2 = décade 2 ; 3 = décade 3

On lit sur le tableau (8) une diversité des hauteurs de pluies d'un mois à l'autre et pour chaque décade. Les précipitations sont relativement élevées de fin juillet à la dernière décade d'août, et la première de septembre.

La probabilité d'une hauteur de 20 mm et plus est de 40% environ la première et la troisième décade d'août et la première de septembre. Elle est de 30% dans le delta (D. Raes et B. Sy, 1992).

Avec la forte variation des pluies et la courte durée de la période d'observation, ces résultats (et ceux ci-dessous), ne peuvent être que des approximations.

L'étude fréquentielle portant sur 7 ans permet de cerner la distribution des pluies et leur variation d'une année à l'autre.

Les résultats du tableau 9 situent la saison des pluies entre fin juillet et début septembre plus précisément entre la troisième décade de juillet et la première de septembre.

Tableau 9 : Fréquence d'une pluie par décade (station Fanaye)

MOIS	JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			OCTOBRE		
DECADE	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nbre de pluies enregistrées	2	3	5	3	5	7	5	4	3	1	0	0

Les années d'observations sont les suivantes : 1981-1982-1983-1984-1985-1990.
2 sur le tableau signifie : 2 pluies effectivement enregistrées en 7 ans

NB : pluies décadaires non enregistrées en 1987-1988-1989

La pluviométrie est plus importante en août notamment lors de la troisième décade. Une grande sécurité de production y est offerte aux cultures.

En effet, dans ce milieu, un autre problème doit être aussi abordé en plus du caractère aléatoire de l'abondance des pluies. Il s'agit du calendrier des pluies.

Il est difficile de le dresser avec précision. La difficulté s'accroît encore si l'on absorbe la question en partant de la notion de la « pluie agricole utile » pour déterminer au mieux le début de la saison culturale en minimisant les risques d'une germination qui par exemple ne serait pas suivie d'un développement normal de la plante faute d'eau.

Nous définissons une pluie utile comme une pluie décadaire de 15 mm¹ (considérant les besoins en eau des plantes et de l'évaporation dans la vallée du Sénégal). Cette définition, fondée sur l'intensité (15 mm) suppose donc un stock d'eau dans le sol qui permet d'attendre la pluie suivante.

Tableau 10 : Fréquence occurrentielle d'une pluie utile (station de Fanaye)

	1981			1982			1983			1984			1985			1986			1990			
Mois	J	A	S	J	A	S	J	A	S	J	A	S	J	A	S	J	A	S	J	A	S	
1 ^{ère} décade			X	X			X								X	X	X	X	X			
2 ^{ème} décade				X	X	X							X	X	X				X			
3 ^{ème} décade	X		X		X	X				X							X	X	X		X	

J : juillet

A : août

S : septembre

X : une pluie utile enregistrée au cours d'une décade.

On s'aperçoit sur le tableau 10 que :

- En juillet, la région de Podor enregistre en moyenne une pluie utile tous les quatre ans,
- en août, la pluie utile est obtenue une année sur trois la première et deuxième décade, une année sur deux la troisième décade,
- en septembre, les premières décades sont généralement les plus pluvieuses : une pluie utile est enregistrée tous les deux ans et une sur quatre la troisième décade.

Ces résultats montrent que l'agriculture pluviale est très « risquée » dans le secteur de Podor (les risques augmentent d'année en année avec la sécheresse). Compte tenu de la croissance de la population et de la volonté d'élever le niveau de vie des populations, il apparaît nettement que l'apport en eau de pluie ne garantit pas une productivité élevée pour les cultures, chaque année.

5. Durée des périodes sèches

Sur le tableau ci-dessous est représentée la probabilité d'avoir au moins une pluie égale ou supérieure à 2 mm dans un espace de temps donné et pour chaque mois l'hivernage. La série des données est peu précise à Fanaye. Les valeurs des stations du delta (Saint-Louis) et de la porte de la vallée (Richard-Toll) sont représentées et analysées.

¹ La définition de la pluie utile varie d'un auteur à l'autre. Pour règle, la pluie utile est une pluie décadaire de 20 mm ; mais Rijks propose comme suffisante une pluie de 15 mm.

Tableau 11 : Probabilité d’avoir une pluie égale ou supérieure à 2 mm (période 1983-1991)-(source RAES et SY, 1992)

Espace de temps	Station	PROBABILITE (%)		
		JUILLET	AOÛT	SEPT
1 à 3 jours	Saint-Louis	33	53	42
	Richard- Toll	19	44	40
1 semaine	Saint-Louis	45	71	68
	Richard- Toll	38	59	67
2 semaines	Saint-Louis	72	86	98
	Richard- Toll	69	85	90

Ce tableau 11 fait ressortir que :

- il pleut moins régulièrement en début d’hivernage dans la vallée (Richard -Toll) tout comme dans le delta (Saint-Louis),
- les pluies régulières à intervalle de un à trois jours ont une probabilité d’occurrence de 40 à 50% surtout en août et en septembre,
- la probabilité d’avoir au moins une pluie par semaine est environ de 60% (un peu moins au début et un peu plus à la fin de l’hivernage),
- la fréquence d’une pluie dans un intervalle supérieur à deux semaines n’est pas négligeable (environ 30% en juillet, 15 en août et 10 en septembre).

Il ressort que les risques d’une péjoration climatique sont étroitement associés à la pluviométrie annuelle. Lorsque le volume augmente, les fréquences des courtes périodes sèches (5 jours) s’accroissent au détriment des longues périodes sèches (plus de deux semaines voire trois) qui elles diminuent, ce qui est logique puisque la saison des pluies n’est pas « extensible ».

En conclusion, l’on retient que la pluie constitue une des principales ressources en eau de la région. Mais, le climat est marqué par :

- la variabilité imprévisible des précipitations,
- l’insuffisance des quantités enregistrées, situées à moins de 300 mm/l’an,
- une pluviosité concentrée sur une courte période.

Ces caractères ne favorisent pas la satisfaction des besoins en eau de la végétation et des plantes cultivées. De ce point de vue, celles ci sont beaucoup plus fragiles que des formations végétales naturelles plurispécifiques et plus adaptées à ces contraintes fortes.

CHAPITRE 2 - LE FLEUVE

Le fleuve Sénégal, comme le Niger et le Nil, traverse dans son cours inférieur des régions où le principal facteur naturel limitant du développement est l'eau. Les anciens n'ont jamais manqué de révéler le rôle bénéfique des fleuves dont la bienfaisance disent-ils ne peut venir que du « *paradis terrestre* ». Hérodote n'avait-il pas dit que « *l'Egypte est un don du Nil* » et celui-ci ne venait-il pas du ciel ?

Pour les populations Toucouleurs, Maures et Sarakolés de la vallée, le Sénégal ne représente-t-il pas une chance ? Il offre une eau douce, source vitale, mais aussi la possibilité de pérenniser l'activité agricole dans une région à pluviométrie aléatoire.

Les apports fluviaux, tributaires de la pluie du haut-bassin, varient d'année en année. Grâce à la crue artificielle provoquée par des lâchers effectués à partir de la retenue de Manantali, la population, jadis itinérante pour la plupart, tend à se fixer et à s'adonner à l'agriculture irriguée.

I - LES MISSIONS LE LONG DU BASSIN

Le Sénégal est resté longtemps une énigme pour les géographes et les explorateurs. Il a fallu attendre le XIX^{ème} siècle pour lui donner sa carte d'identité, les années 1970 pour que les premiers bilans hydriques des sols soient établis à Richard-Toll ; et une décennie plus tard pour que soient opérationnels les barrages. Le Sénégal serait-il l'oublié de l'histoire ?

Les documents de l'antiquité sont rares. Ceux du géographe Ptolémée (II^e siècle après J.C.) nous « *procurent de biens vagues renseignements* » (Brigaud, 1961) ; il ne semble pas possible de reconnaître le Sénégal dans le Chérétès d'Hannon (VI^e siècle avant J.C.), le Bambotus de l'historien Polybe (II^e siècle avant J.C.).

Au Moyen Âge, les arabes confondent en un seul grand fleuve le Nil, le Niger et le Sénégal. El Békri au XI^e siècle après J.C. fait couler dans l'Atlantique le Nil du Tékrour vers le Ras-Ek-Ma à l'est. Au XV^e siècle, avec les européens, la confusion continue. Le vénitien Ca da Mosto fait du Sénégal et de la Gambie deux branches du Niger lequel n'est lui-même qu'un bras du Nil se dirigeant vers l'Atlantique. Au XVII^e siècle, le Nil et le Niger sont séparés. C'est au sieur La Courbe, inspecteur général de la compagnie du Sénégal qui a poussé la reconnaissance jusqu'aux chutes du Félou (1690) que nous devons la première affirmation que le Niger et le Sénégal bien qu'ayant la même source sont deux fleuves distincts. Cela apparaît sur la cartographie du XVIII^e siècle et est confirmé par les explorations de Mongo Park (1795-1805) de Mollien (1818) et René Caillé (1827-1828).

Les premières études techniques sérieuses datent du XX^e siècle : car alors les missions d'études commencent. Mazeran (1902) fait la levée du bras principal du fleuve de Saint-Louis à Kayes. Mathy (1905) étudie les seuils. Thibault (1906) a levé la vallée de l'amont du Félou à l'aval de Gouina.

A partir de 1920, apparaissent les grands organismes. L'union Hydro-Electrique Africaine (UHEA), créée en 1927 a connu le barrage de Gouina que des considérations financières de l'époque firent abandonner.

La Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) créée en 1938 et héritière de la Mission d'Etudes du Fleuve Sénégal (1935) a rassemblé une documentation très vaste sur le fleuve. Elle a essayé de dégager une doctrine pour l'aménagement de la vallée et une de ses plus importantes actions est le casier de Richard-Toll. La MAS a conservé l'idée d'une retenue à grande capacité sur le haut du Fleuve. En donnant la priorité aux aménagements du delta, elle avança l'idée du barrage de Dagana. La MAS a réalisé la carte de la vallée au 1/50 000^e.

A la fin des années cinquante, deux nouvelles sociétés interviennent : la société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH) et la Société Générale des Techniques Hydro-Agricoles (SOGETHA) qui ont travaillé sur l'aménagement hydraulique et agricole du Sénégal.

A cela s'ajoutent des travaux d'universitaires, des géomorphologues surtout, comme ceux de J. Tricart entre 1954 et 1959, de P. Michel de 1956 à 1969 et de M. Sall (1983) ont permis de caractériser la morphogenèse du haut bassin, de la vallée et du delta du fleuve Sénégal. En hydrologie, la monographie de Rochette (1974) est la meilleure estimation possible des écoulements du Sénégal aux deux stations principales : Bakel et Dagana depuis l'origine des observations communes 1903 jusqu'à 1965. La thèse de A. Sow (1984), les publications J. Y. Gag et A. Kane (1986) de J. Y. Loyer (1989), la thèse d'Etat de A. Kane (1997) et les travaux précités également font que le fleuve Sénégal est l'un des plus connus d'Afrique.

De très nombreuses études techniques sur la vallée, comme des thèses de chercheurs existent mais leur objectif premier n'est pas l'application. Ceci justifie donc un travail « de plus » sur cette vallée mais à finalité surtout agricole.

II. LE SENEGAL, UN COURS D'EAU INTERNATIONAL

1. Présentation

Fleuve de l'Afrique Occidentale, long de 1800 km, le Sénégal est tributaire de l'Océan Atlantique. Il prend naissance dans le Fouta-Djalon (massif montagneux de Guinée Conakry) à 750 m d'altitude.

Issu de l'union du Bafing et du Bakoye près de Bafoulabé, au Mali, à 1000 km de l'Atlantique puis grossi du Baoulé, il traverse la partie occidentale du Mali puis marque la frontière entre la Mauritanie (rive droite) et le Sénégal, contournant par une boucle le désert du Ferlo.

De Bakel à Richard-Toll, le dénivelé est très faible et le lit majeur du fleuve large de 10 à 25 km, est lacéré de nombreux faux bras et marigots. Passé Richard-Toll, le Sénégal entre dans le delta, labyrinthe d'îles et de marécages, paradis des oiseaux où seules survivent les plantes halophiles (plantes vivant dans un milieu salé) et gagne l'océan.

Le bassin du fleuve a une superficie totale de 340 000 km² environ. Il comprend trois régions principales : le haut bassin, la vallée et le delta. Leurs conditions topographiques, géologiques hydrologiques et climatologiques diffèrent fortement.

A son embouchure, à Saint-Louis, le débit annuel moyen est de 640 m³/s, soit un volume total de 22 milliards de m³. En réalité le débit du fleuve peut varier de 5000 m³/s par forte crue à 3 m³/s en période de grande sécheresse.

Par comparaison, la Seine a un débit moyen de 375 m³/s avec un maximum de 2500 m³/s et un minimum de 75 m³/s. Elle a une longueur de 776 km et son bassin fait 77 767 km².

Le régime naturel du fleuve Sénégal est un régime tropical : crue de juillet à octobre, ensuite le débit décroît très fortement pour devenir quasiment nul à l'étiage (niveau moyen le plus bas d'un cours d'eau) vers février-mars. Durant l'étiage on peut parfois traverser le fleuve à gué.

Cette faiblesse des eaux empêche la navigation (le fleuve est navigable sur 925 km en hautes eaux en aval de Kayes) et pénalise fortement l'agriculture traditionnelle dans les zones d'inondation ainsi que l'élevage dans les pâturages de décrue et de plus, favorise la remontée de l'eau salée dans le lit du fleuve à plus d'une centaine de km de l'embouchure. La sécheresse très sévère qu'a connue le Sénégal en 1970-1974, 1976, 1982-1984 et en début des années 1990 a amplifié ces effets négatifs et les conséquences ont été catastrophiques pour le développement de la vallée.

Ces sécheresses successives ont accéléré la restructuration du système de production agro-pastorale de nombreux pays sahéliens et la Mauritanie en particulier, où elles ont favorisé une émigration massive soit vers Nouakchott, soit à l'étranger. Grâce au fleuve Sénégal, les pays disposent d'un potentiel considérable de ressources hydrauliques mais, faute d'une mise en valeur appropriée, les campagnes se vident et la survie reste souvent subordonnée aux revenus de l'émigration.

L'aménagement du fleuve constitue donc un espoir afin d'atteindre l'autosuffisance alimentaire et générer des revenus pour les paysans. Mais, ces eaux de l'espoir sont à se partager entre les pays riverains du fleuve, en raison du statut particulier du fleuve.

2. L'OMVS

Dans le souci d'aider au développement de cette région, les pays riverains du fleuve se sont alliés pour tirer profit au mieux de cette formidable ressource hydraulique qu'est le fleuve Sénégal. Cette coopération ne date pas d'hier. Dès 1934, la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal, regroupait le Soudan (actuel Mali), le Sénégal et la Mauritanie. Elle a réalisé principalement des études hydrologiques et des travaux d'aménagements hydro-agricoles.

De 1963 à 1968, le Comité Inter-Etats pour le Développement du Bassin du Fleuve Sénégal a vu le démarrage des principales études de base qui ont permis d'établir le Programme Intégré de Mise en Valeur du fleuve Sénégal. Ce Comité a été remplacé par l'Organisation des Etats Riverains du fleuve Sénégal (OERS) de 1968 à 1972, regroupant les quatre états riverains du fleuve (Guinée, Mali, Mauritanie et Sénégal). Elle avait pour mission d'harmoniser les plans de développement des Etats membres.

En 1972, l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS), regroupant Mali, Mauritanie et Sénégal, a pris la relève de ces organismes. Sa mission est de contribuer au développement économique des pays membres par l'exploitation rationnelle des ressources du bassin du fleuve Sénégal.

L'OMVS doit sécuriser et accroître les revenus des habitants du bassin et des zones avoisinantes en rendant les économies des Etats membres moins vulnérables aux conditions climatiques et aux facteurs extérieurs tout en préservant le milieu naturel. L'Organisation est constituée par quatre conventions de bases qui définissent les dispositions régissant au plan institutionnel, organisationnel, financier, juridique et technique, la planification, l'étude, la construction, l'exploitation et le renouvellement des infrastructures communes de maîtrise et d'exploitation des eaux du fleuve Sénégal.

Des dispositions stipulent que le fleuve Sénégal y compris ses affluents est un fleuve international et les ouvrages réalisés par l'OMVS sont eux des « ouvrages communs » et constituent des propriétés communes et indivisibles. Ainsi, *« tout projet susceptible de modifier le système du fleuve doit faire l'objet d'une autorisation préalable. Les coûts d'investissement et charges d'exploitation ont répartis entre les copropriétaires sur la base des bénéfices que chacun en retire »* (source : convention portant création de l'OMVS en 1972).

Toujours selon les instruments juridiques de l'organisation, la Charte des eaux en particulier, la répartition des eaux entre les usages est fondée sur les principes généraux suivants :

- obligation de garantir la gestion équilibrée de la ressource en eau, l'utilisation équitable et raisonnable des eaux du fleuve,
- l'obligation de préserver l'environnement,
- l'obligation de négocier en cas de conflit et
- l'obligation pour chaque Etat d'informer les autres Etats riverains avant d'entreprendre toute action ou tout projet qui pourrait avoir un impact sur la disponibilité en eau et/ou la possibilité de mettre en œuvre des projets futurs.

Ainsi tout un arsenal est mis en place pour la prévention des conflits et un partage équitable, rationnel et durable de la ressource.

3. Mission et programme de l'OMVS

Après de nombreuses études, l'OMVS a opté pour un programme de développement simultané des trois secteurs principaux d'utilisation de l'eau :

- l'irrigation avec un potentiel d'irrigation de 375 000 ha et l'approvisionnement en eau des autres secteurs (eau industrielle, eau alimentaire)
- l'énergie avec une production en moyenne de 800 GWh d'énergie hydroélectrique par an
- la navigation pérenne entre Saint-Louis et Ambidédi.

Cette gestion doit satisfaire les besoins en eau de l'énergie, de l'agriculture, de la navigation et de l'approvisionnement en eau des populations, tout en réduisant les effets négatifs de la régulation du fleuve sur l'agriculture de décrue, les pâturages, la pêche, les forêts, les eaux souterraines, les maladies hydriques et les zones humides.

Afin de réaliser ces objectifs de gros aménagements ont été réalisés :

- construction dans le haut bassin d'un barrage régulateur et d'une centrale hydroélectrique (barrage et centrale de Manantali) sur le Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal.
- construction dans le delta d'un barrage anti-sel sur le Sénégal (barrage de Diama)
- aménagement du fleuve en voie navigable en permanence de Saint-Louis à Ambédédi, la construction d'un pont fluvio-maritime à Saint-Louis, la construction d'un pont terminal à Ambidédi, d'escaliers portuaires, le long du fleuve, la construction d'une route de Ambidédi à Kayes et d'un pont sur le fleuve Sénégal à Kayes.

Les trois milliards de francs qu'ont coûté les deux barrages ont été investis par des bailleurs de fonds allemands, français et des pays arabes. La dette a été répartie entre les états membres selon les bénéfices qu'ils tirent de ces aménagements, soit, Mali 35,3%, Mauritanie 22,6%, Sénégal 42,1%.

En effet, le Mali bénéficie de 11% de l'irrigation, 52% de l'énergie et 82% de la navigation, le Sénégal 42% de l'irrigation, 33% de l'énergie et 6% de la navigation et la Mauritanie respectivement de 31%, 15% et 12%. Les secteurs de l'électricité et de la navigation seront soumis à la tarification à l'entrée en service de la centrale hydroélectrique de Manantali d'une part, des ouvrages et équipements destinés à la navigation d'autre part. Cependant, cette contribution reste faible puisque qu'elle ne couvre que 25 à 30% des charges totales d'exploitation. La pêche et la crue artificielle sont exclues de la tarification.

La gestion des ces ouvrages nécessite des observations hydrologiques régulières et nombreuses ainsi que la connaissance en temps réel des débits du fleuve et de ses affluents amont. Cette connaissance est rendue possible par un réseau radio très dense et par transmission satellitaire des données. Ces outils de prévision permettent d'établir des scénarios en fonction des diverses demandes.

- *Le barrage de Manantali* est situé à environ 1 250 km de la mer sur le Bafing (Mali) (voir carte 9, p.92), affluent qui apporte 40 à 60% des ressources en eau du fleuve. La mise en eau de la retenue de Manantali a commencé en juillet 1987 et s'est poursuivie jusqu'en septembre 1991, date à laquelle le niveau de la retenue a atteint pour la première fois la cote 208,00 m IGN.

La retenue du barrage à la cote 208,00 au dessus du niveau de la mer s'étend sur 450 km² et atteint une longueur de 80 km. Elle a entraîné l'inondation de 375 km² de terres et le déplacement d'une vingtaine de villages vers l'aval.

C'est un barrage de type mixte, de 1500 mètres de longueur en crête, composé d'une partie centrale à contreforts en béton de 470 m de long et de deux digues en enrochement respectivement longues de 670 m et de 360 m reliant l'ouvrage en béton aux flancs de la vallée. La hauteur du barrage maximum est de 66 m sur fondation.

Sa capacité de 11,5 milliards de m³ a un rôle régulateur. Le barrage permet d'assurer un débit minimum de 200 m³/s de février à juin, nécessaire aux besoins de l'agriculture irriguée de contre-saison et peut éventuellement améliorer la crue naturelle des affluents non régularisés pendant l'hivernage suivant. La crue artificielle ainsi créée est indispensable pour préserver l'environnement dans la vallée et permettre les cultures de décrue, vitales pour les agriculteurs. Le soutien artificiel d'étiage permet quant à lui de garantir un débit minimal pour l'irrigation, la production hydroélectrique et la navigation.

Les données hydrologiques du bassin versant et des principaux affluents en aval sont recueillis auprès de sept stations pourvues chacune d'une échelle limnimétrique et d'un pluviomètre et contrôlées par des opérateurs communiquant quotidiennement par radio avec l'opérateur du barrage de Manantali. Il existe depuis 1904 des données sur le fleuve qui ont permis de réaliser des modèles mathématiques comme des simulations de scénario de demande d'eau.

L'objectif des hydrologues est de définir une crue qui permette d'assurer la recharge des nappes, la culture de décrue sur une zone de 50 000 ha, la préservation des écosystèmes tout en minimisant les pertes de production électrique. Cette crue devrait également être compatible avec l'objectif à long terme 255 000 ha aménagés pour l'irrigation, atteignant 375 000 ha en combinaison avec le barrage de Diama. Cette gestion de la demande eau doit prendre en compte des paramètres parfois antagonistes : pêche, navigation, irrigation, santé, pâturage, forêt, énergie. Manantali est en effet un barrage de régulation à but multiple. Il doit à la fois produire de l'électricité, améliorer la navigation et permettre l'irrigation. La future centrale hydroélectrique comprendra cinq turbines de 40 MW chacune et un débit nominal de 115 m³/s. Elle aura à terme une puissance de 200 MW et une production de huit millions de kWatts/année.

177 km de lignes haute tension alimenteront en électricité les principales villes des pays membres de l'OMVS soient : Dakar, Matam, Dagana, Sakal et Tobène (Sénégal), Rosso, Nouakchott, Kaédi et Boghé (Mauritanie), Bamako et sa région (Mali). La mise en service du premier groupe de la centrale de Manantali est prévue en août 2001 et elle du cinquième groupe en mai 2002. Le Mali bénéficiera alors de 52%, Sénégal 99% et Mauritanie 15% de la production.

- *Le barrage de Diama* est situé à 800 km en aval de Manantali, à proximité du delta, à 49 km de l'embouchure du fleuve (carte 9, p.94). Son rôle est d'empêcher le sel de remonter et de servir de retenue d'eau. Avant la construction du barrage en 1985, les eaux marines salées pouvaient pénétrer en saison sèche au cœur de la vallée, remontant quelquefois jusqu'à 450 km de l'embouchure (en comparaison, l'influence de la mer sur la Seine se ressent jusqu'à 22 km en amont de Rouen). Le barrage a été mis en exploitation en novembre 1985 avec le bouchage effectif du lit mineur du fleuve et les travaux de construction ont été achevés en août 1986. Le barrage anti-sel de Diama est couplé à un endiguement sur les deux rives au niveau du delta. Ces endiguements du fleuve de Diama à Rosso permettent la fermeture de la retenue de Diama et la protection contre les inondations. Les travaux de construction de l'endiguement rive droite et de réhabilitation de l'endiguement rive gauche sont achevés respectivement en avril 1992 et en décembre 1994.

Les endiguements permettent d'avoir de l'eau toute l'année et de l'eau de qualité pour le développement d'aménagements hydro-agricoles publics et privés. Ils ont permis la diversification des cultures dans les terres du lit mineur non irrigables auparavant. On y fait notamment de la culture industrielle de canne à sucre.

Conçus pour fonctionner en complémentarité, les barrages de Diama et de Manantali ont permis de réguler partiellement le débit du fleuve. Mais, l'aménagement du bassin du fleuve est un projet à très long terme qu ne fait que commencer. Il reste encore la réalisation du programme cible de navigation, l'achèvement des ouvrages annexes aux barrages (endiguements et routes d'accès), l'exploitation optimale du potentiel hydro-agricole et la mise œuvre du programme d'infrastructures de deuxième génération, à savoir : Félou, Gouina (sur le fleuve Sénégal), Goubassi sur la Falémé et les autres ouvrages de régulation et de relèvement de plan d'eau du fleuve Sénégal.

En effet, depuis l'adhésion de la Guinée à l'OMVS (mars 2006), il est prévu à moyen terme plusieurs ouvrages hydrauliques et hydroélectriques dont un certain nombre seront édifiés dans la partie guinéenne du bassin.

Koukoutamba et Boureya sont des aménagements à buts multiples sur le Bafing en territoire guinéen. Ils comportent chacun un barrage, un réservoir et une usine hydroélectrique et devraient produire à eux deux près de 520 Mégawatts. Il est prévu le même type d'aménagement sur le site de Badoumbé et de Ballassa, situés sur le bassin versant du Bakoye (affluent du Sénégal) entre les villes de Kita et de Bafoulabé en Guinée (Journal OMVS, juin 2006).

Sur la Falémé, l'ouvrage à construire est de projet de barrage réservoir de 210⁹ de m³ d'eau. Comme les aménagements, il aura un rôle multiple, de production d'électricité, d'amélioration de la régularisation du fleuve, de protection contre les inondations et de développement de l'irrigation. L'étude de faisabilité de Gourbassi est prévue pour 2006-2009. Avec la Guinée, les eaux du fleuve sont à partager avec quatre états et non plus trois.

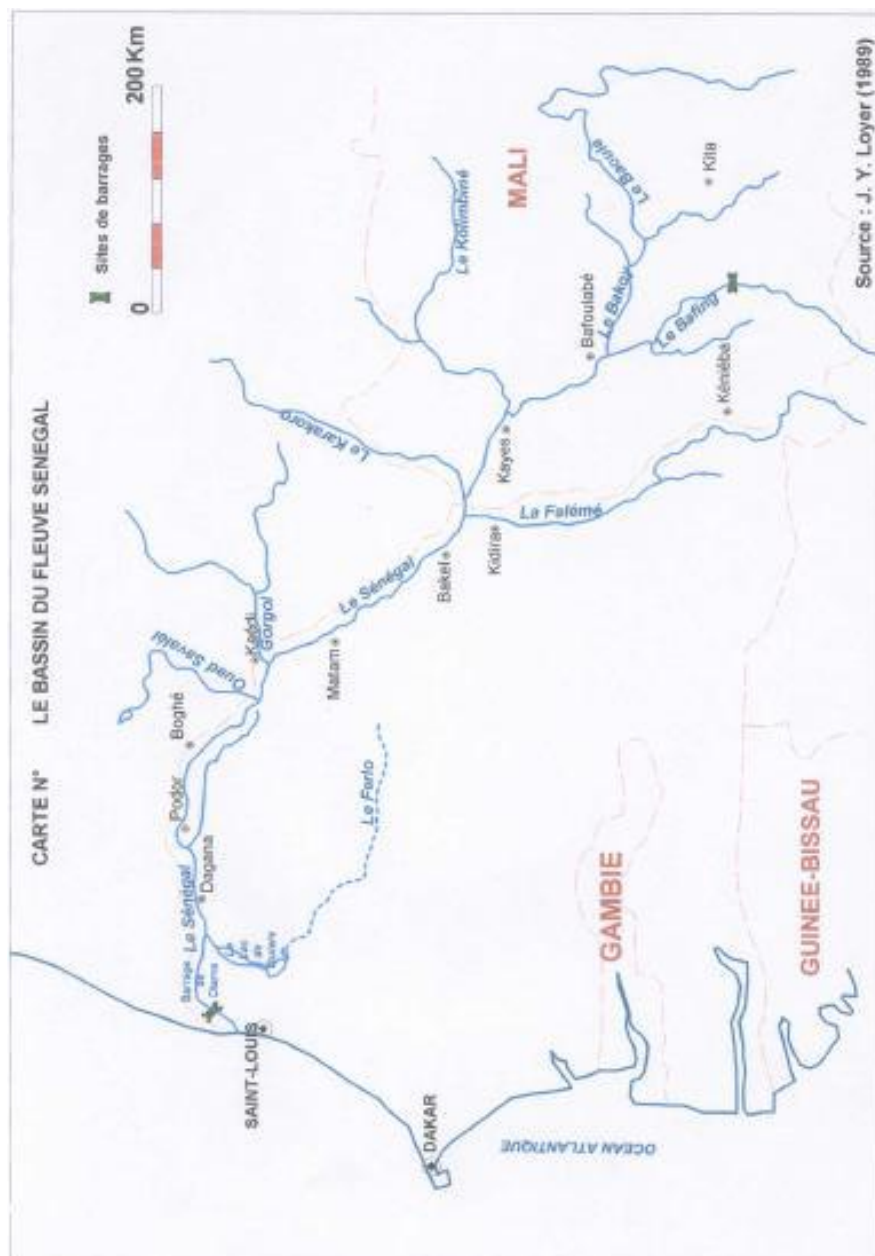
4. Le Sénégal, un fleuve aux eaux partagées (la CPE)

Les différents textes qui régissent le fleuve Sénégal en font un cours d'eau pas comme les autres ! Deuxième fleuve d'Afrique occidentale après le Niger, le Sénégal a été déclaré « fleuve international » y compris ses affluents (le Bafing, le Bakoye, et la Falémé) par les Etats riverains, à savoir, la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. C'est ce que stipule la « *convention relative à l'aménagement général du bassin du fleuve Sénégal* » signée par les Etats concernés le 26 juillet 1963.

L'instance créée pour un partage équitable de la ressource eau est la commission permanente des eaux (la CPE). C'est un organe consultatif du conseil des ministres de l'OMVS. Elle émet des avis et recommandations en ce qui concerne :

- les principes et les modalités de la répartition équitable des eaux du fleuve entre les états d'une part et d'autre part entre les secteurs d'utilisation de l'eau (énergie, irrigation, navigation, approvisionnement en eau potable),
- l'instruction de tout projet d'utilisation de l'eau ou d'aménagements susceptibles de modifier d'une manière sensible les caractéristiques du régime du fleuve, ses conditions de navigabilité, d'exploitation agricole ou industrielle, l'état sanitaire de ses eaux, les caractéristiques biologiques de sa faune et sa flore, son plan d'eau en particulier, les projets soumis au régime de l'autorisation préalable,
- la réglementation de l'utilisation équitable de l'eau du fleuve et
- la réglementation de la conservation quantitative de l'eau du fleuve.

Elle propose également au conseil des ministres un programme annuel et/ou saisonnier de gestion des barrages de Diama et Manantali arrêté lors des réunions. Un tel organe est indispensable pour garantir une étude affinée de la demande, un avis technique avec une large concertation et une équité dans l'arbitrage.



III - LES APPORTS DU FLEUVE

1. Avant la construction des barrages

a) Le régime naturel

Le régime du fleuve Sénégal est classé par les hydrologues dans les régimes fluviaux tropicaux humides, dont les eaux qui suivent le rythme saisonnier des pluies.

Il se caractérise par deux saisons bien différenciées : une période de hautes eaux de juin-juillet à octobre-novembre avec une pointe de crue se situant généralement dans la deuxième quinzaine de septembre ou dans les tous premiers jours d'octobre et une période de basses eaux de novembre-décembre à mai-juin avec une décroissance régulière des débits.

Du Fouta Djallon à l'embouchure, le fleuve traverse des domaines climatiques différents qui déterminent trois types de régime d'amont en aval d'après Gag et Kane (1986):

- un régime tropical humide de « transition » qui affecte une superficie de 28 000 km² où les pluies annuelles sont supérieures à 1 250 mm. Il concerne les hauts bassins des trois branches du fleuve : le Bafing, le Bakoy et la Falémé. Les écoulements y sont soumis à des variations très brutales. Les maxima et minima mensuels se présentent à des dates irrégulières. Les réserves en eau du sol et du sous-sol sont réduites. Les étiages sont très prononcés,

- un régime tropical humide « pur » règne sur une superficie de 108 000 km². Les pluies annuelles sont comprises entre 1 250 et 750 mm. Il s'étend sur les cours inférieurs des trois affluents et sur la totalité du bassin du Baoulé. Les hautes eaux durent trois à quatre mois (maximum en septembre-octobre) et sont suivies d'une très longue saison de basses eaux où perdure un faible écoulement fluvial,

- un régime sahélien englobe une zone d'une superficie de 134 000 km². Les apports sont négligeables, les écoulements deviennent de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le nord.

En aval de Bakel, le régime reflète les conditions hydrologiques de l'amont avec des modifications introduites par la présence de vastes plaines d'inondation de nombreux défluent et par le processus d'évapotranspiration.

Aujourd'hui, en relation avec la péjoration du climat, la plaine alluviale de Bakel à l'embouchure est encadrée par des zones semi-désertiques dont la pluviométrie est souvent inférieure à 300 mm par an.

Alimentée par les pluies qui tombent sur les montagnes du Fouta Djallon l'abondance fluviale varie d'amont en aval et d'une année sur l'autre.

b) Les écoulements irréguliers et une sécheresse sévère

L'irrégularité dans les écoulements constitue la principale caractéristique des fleuves sahéliens et le fleuve Sénégal n'échappe pas à cette règle.

Depuis 1903, les débits à Bakel ont varié dans un rapport de 1 à 6 et de 1 à 4 à Dagana.

Le module moyen inter-annuel est respectivement de $715 \text{ m}^3/\text{s}$ soit un écoulement de $22,06 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ et de $641 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à un écoulement moyen de $20,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$. Dans ces deux stations, les valeurs extrêmes sont observées au cours des mêmes cycles hydrologiques. Les écoulements maxima ont eu lieu en 1924-1925 ($39,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ à Bakel, $30,6 \cdot 10^9$ à Dagana) et les minima en 1983-1984 ($6,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ et $7,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$).

Au cours de la même période d'observation, le module à Bakel est passé de $1\,247 \text{ m}^3/\text{an}$ en 1924-1925 à $219,6$ en 1983-1984. A Dagana, il a été relevé aux mêmes moments 969 et $226 \text{ m}^3/\text{s}$. La même irrégularité est observée d'une année hydrologique à une autre et à travers les débits moyens mensuels.

A Bakel, le plus important débit moyen mensuel fut enregistré en septembre 1922 avec $6\,746 \text{ m}^3/\text{s}$: le plus faible au cours du même mois est celui de l'année 1987 avec $526 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les variations dans les écoulements mettent en évidence à l'amont comme en aval du bassin une succession de périodes humides (1919 à 1939 et de 1950 à 1967) et de périodes sèches (1911 à 1918 et de 1940 à 1949 et depuis 1968).

Les années 1983-1984, 1984-1985 et 1987-1988 sont les plus déficitaires avec à Bakel $226 \text{ m}^3/\text{s}$, $219 \text{ m}^3/\text{s}$ et $204,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces déficits se vérifient dans toutes les stations de la vallée du Sénégal. De 1968 à nos jours, les modules au cours de ce cycle hydrologique sont presque tous largement déficitaires. Le déficit dépasse généralement 40 %.

Le caractère exceptionnel de cette sécheresse apparaît lorsque l'on compare les mesures effectuées à l'échantillon des observateurs (J. Y. Gag et A. Kane, 1986). Ces dernières ont montré que les 8 années les plus déficitaires sont enregistrées au cours de ce long épisode aride qui débute en 1968.

La sévérité de la sécheresse est aussi perceptible au niveau des débits maxima de pointe de la crue qui ne s'élèvent plus aussi hauts.

A Bakel la moyenne des maxima annuels s'élève à 2 970 m³/s pour une valeur de 4 370 sur 81 ans d'observation (Gag et A Kane, 1986).

c) Des crues irrégulières et une décrue précoce

Parmi les éléments du régime, la crue est celui qui influe le plus sur la quantité d'eau absorbée par le sol. Par son ampleur, elle submerge des millions d'hectares, qui sont cultivés en culture de décrue.

Le profil de la crue annuelle est très irrégulier. Il présente un rythme en dent de scie (cf. fig.5, p.98). Le mécanisme des crues du fleuve résulte de l'intensité des averses et du relief. C'est ce dernier surtout (pente des versants et des vallées) qui règle les vitesses de propagation et les durées des hautes eaux (voir Michel, 1973, Sall, 1982, etc...)

A partir de Bakel la propagation de la crue du fleuve se ralentit considérablement à cause de la faible pente du profil en long et des eaux qui inondent une plaine alluviale très large. Le maximum de crue est atteint en début septembre à Bakel. La courbe de la crue se régularise à partir de Matam son amplitude diminue progressivement vers l'aval. Par suite de l'inondation du lit majeur, les crues subissent un laminage proportionnel à leur amplitude qui ralentit leur vitesse de propagation. Aussi et de ce fait, le maximum est atteint généralement dans la deuxième quinzaine de septembre à Matam, fin septembre, mi-octobre à Podor et dans la troisième décade du mois d'octobre à Dagana et Richard-Toll, en début novembre à Saint-Louis (P. Michel, 1973).

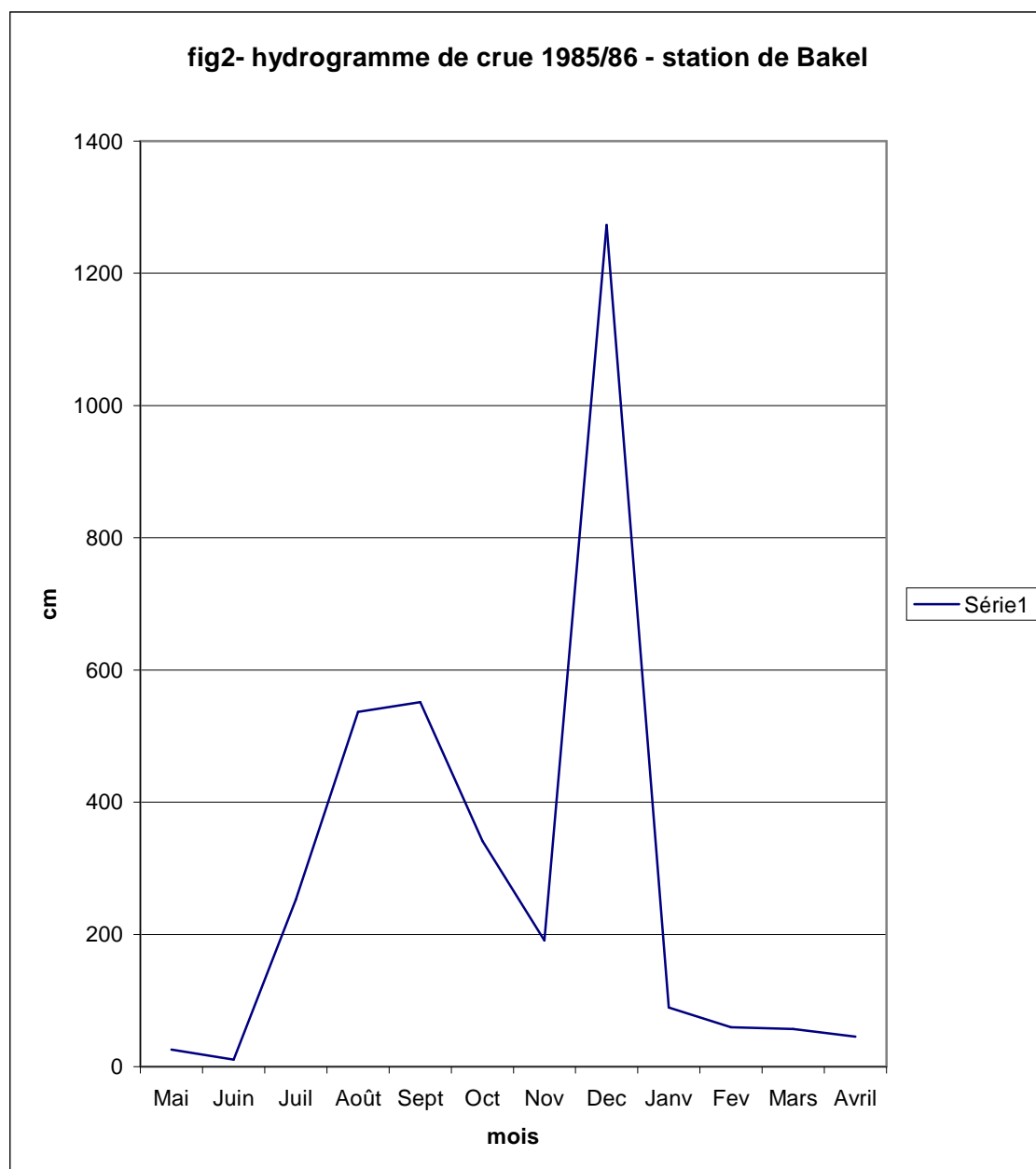
Mais, ce moment est très variable d'une crue à une autre ; *« il s'échelonne de 8 à 59 jours »*. A Bakel, la cote de 1922 était de 13,19 m, en 1984, elle se situait à 4,34 m. A Dagana elle atteint 4,94 m en 1936 et 1,34 m en 1984. Les oscillations de la hauteur des crues sont responsables de la variabilité des zones cultivées dans la plaine alluviale d'une année à l'autre.

Dans la région de Podor, *« les eaux commencent à pénétrer les cuvettes argileuses les plus basses lorsqu'elles atteignent la cote de 2,25 m. La submersion des levées se produit à partir de la cote 5 m. Or seules les fortes crues dépassent cette cote »* (P. Michel, 1973)

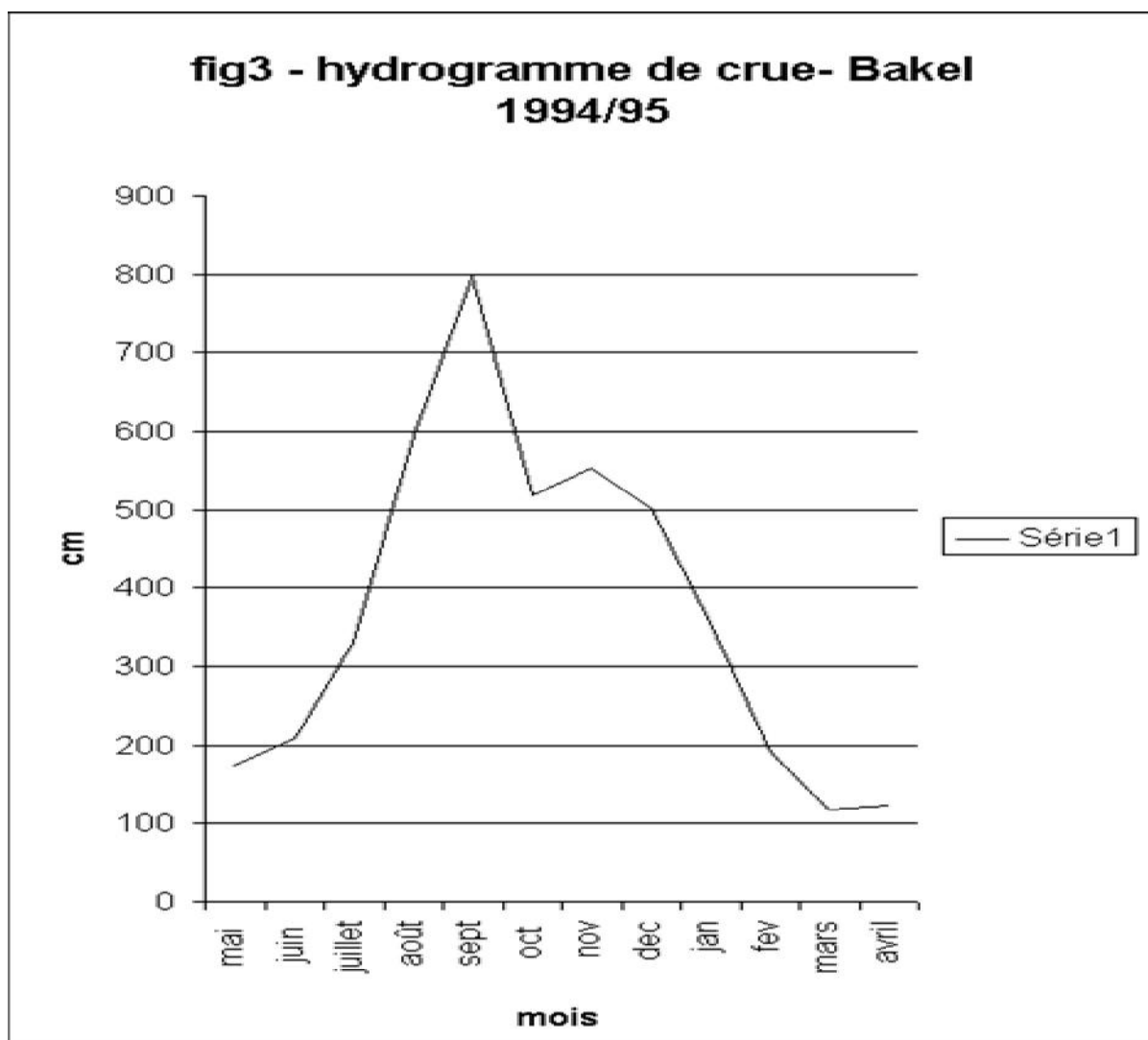
Station Bakel 85/86 hauteur d'eau - moyenne mensuelle (en cm)

Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril
25,7	10,7	252,9	536,5	551,4	341,4	190,9	1273	89,3	59,6	57	45,6

Source : Direction Hydraulique - St-Louis



station de Bakel - hauteur d'eau en cm -1994/95											
<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juillet</i>	<i>Août</i>	<i>sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dec</i>	<i>janv</i>	<i>fev</i>	<i>mars</i>	<i>Avril</i>
174	208,7	331,1	593,3	796,8	519,1	553	501,5	355,2	59,6	57	45,5



La décrue, en cette période de sécheresse, est généralement amorcée plus tôt en raison des apports pluviométriques de plus en plus faibles du haut bassin. Elle s'annonce dans ce secteur dès que les pluies diminuent d'intensité et de fréquence. A Bakel le niveau du fleuve baisse plus tôt. Au dernier épisode humide (1950-1967), le tarissement commençait fin septembre.

Dans le bief aval, la décrue s'annonce un mois plus tôt qu'auparavant. Elle débutait en novembre. Ce retrait rapide des eaux du fleuve occasionne une avancée précoce des eaux marines.

La durée de l'inondation est à cette occasion fortement réduite. Elle est de 10 jours à Bakel, 5 à Matam et Podor pendant les dernières années de la crue naturelle. Nous savons grâce à certaines études, qu'entre la pointe de crue et de décrue, la durée de la submersion doit être au maximum de deux (2) semaines pour permettre aux sols de stocker une quantité d'eau suffisante n'entraînant pas d'effets négatifs sensibles sur les rendements. La vitesse de la descente des crues pendant l'épisode sec a limité la capacité d'absorption des sols.

L'effet de cumul de cette succession sans répit d'années à faible écoulement et à faible ampleur, s'était traduit par une phase d'épuisement du fleuve très précoce dans l'ensemble de la vallée et également par une intrusion saline qui remontait jusqu'à Podor. Le caractère exceptionnel de la sécheresse (de 1983, 1984 et de 1985) était à l'origine, en attendant l'achèvement du barrage de Diama, de l'édification le 26 novembre 1983 du bouchon de Kheune, situé à 92 km de Saint-Louis afin de stopper la langue salée et d'assurer un meilleur remplissage du lac de Guiers, puis de Kheune II mis en place le 13 novembre 1984 et de Kheune III en 1985. Le cumul des années déficitaires a également provoqué l'assèchement de nombreux points d'eau, des marigots, et la disparition des forêts de Gonakiés due également à la hache des charbonniers.

2. Le régime artificiel de la crue

Les différentes interventions des autorités publiques depuis une cinquantaine d'années avaient pour but de régler ponctuellement les problèmes liés à l'eau et le programme de mise en valeur élaboré par l'OMVS qui concerne les trois pays membres et riverains du fleuve Sénégal a pour mission de remédier au manque d'eau agricole et de réguler le fonctionnement de la crue du fleuve.

a) Objectifs et fonctionnement de la crue

Le programme d'infrastructure de l'OMVS est conçu dans le but d'arriver au développement simultané de secteurs principaux d'utilisation de l'eau de débit régularisé. Pour atteindre ce but, le conseil des ministres des pays membres de l'OMVS a réaffirmé en juillet 1972, la première étape de développement intégré sur une régularisation du débit du fleuve à 300 m³/s au maximum.

L'ensemble de l'infrastructure comprend entre autres (voir plus haut):

- un barrage régulateur, le site choisi est Manantali au Mali
- un barrage anti-sel dont le site est Diama

Depuis quelques années, le barrage de Manantali sert également à soutenir la crue des tributaires non contrôlés pour favoriser la culture décrue dans la vallée du fleuve en aval de Bakel. Il soutient également les faibles crues pour le maintien de l'équilibre écologique. En outre, le barrage permet d'évacuer les crues naturelles en les laminant (cf. fig.6, p.98) de manière à ramener le débit millénal en débit centennal et le centennal en débit décennal. Il contrôle la moitié des écoulements du fleuve.

Le barrage de Diama est situé sur le fleuve Sénégal à 49 km de l'embouchure (voir carte 9, p.94) :

- il protège les prises d'eau d'irrigation et d'alimentation en eau urbaine à l'amont du barrage ;
- il améliore les conditions de remplissage des lacs des dépressions et défluent ;
- il fournit en exploitation combinée avec le barrage de Manantali, de l'eau pour l'irrigation de 120 000 ha supplémentaires ;
- il assure la protection des terres et des agglomérations (Saint-Louis par exemple) contre les inondations dans le delta grâce aux endiguements réalisés sur les deux (2) rives de la vallée.

L'action de deux ouvrages porte la superficie irrigable à 375 000 ha.

Depuis la mise en service opérationnel des barrages (novembre 1985 pour Diama, juillet 1987 pour Manantali) les objectifs essentiels sont d'une part d'assurer dans le fleuve une disponibilité en eau suffisante pour les besoins de prélèvement des usagers agricoles, industriels et urbains ; et d'autre part, de soutenir et d'améliorer la crue pour mieux l'adapter aux exigences de la culture de crue.

Au stade actuel, la gestion des eaux du fleuve se caractérise par deux étapes : la programmation et la mise en œuvre (OMVS, 1994).

- *Les programmes* de gestion des retenues de Diama et Manantali sont exprimés à partir des besoins prévisionnels des usagers communiqués au Haut Commissariat de l'OMVS. Ils sont établis pour l'hivernage et la saison sèche (besoins en irrigation-campagnes contre saison chaude et contre saison froide) par la commission permanente des eaux (CPE) et soumis au Conseil des Ministres des trois pays riverains chargé en dernier ressort de leur approbation. La CPE a adopté le programme, fixé la cote d'exploitation de la retenue, qui varie en fonction de la saison, des travaux de réparation entrepris pour remédier à la dégradation du coursier et du rip-rap (parement amont), aussi des travaux de construction de la digue rive droite. Elle se charge également de la date d'ouverture, tout comme de la fermeture des vannes et des volumes d'eau à déverser dans la vallée.

- *La mise en œuvre* consiste depuis Manantali, à procéder aux lâchers d'eau à partir de la retenue en fonction des apports provenant des affluents non contrôlés. Si les quantités d'eau charriées par les cours d'eau non régulés sont suffisantes pour répondre à l'exigence du débit d'au moins à 375 m³/s à Bakel, les lâchures de la retenue de Manantali sont pratiquement suspendues. Il en résulte ainsi, un rehaussement du niveau de la retenue.

La reprise des lâchers après la suspension provoque une crue artificielle qui survient le plus souvent entre mi-août et début septembre à Bakel.

Depuis 1992-1993, les lâchures sont modulées de façon à maintenir un débit minimum de 150 m³/s à Bakel jusqu'en fin juin et un débit minimum de 375 m³/s à partir de juillet pour permettre d'amorcer la campagne d'hivernage (OMVS, 1993). En 1994, ils ont provoqué une crue relativement importante : débits à Bakel de plus de 3 000 m³/s du 30 août au 15 septembre (OMVS, 1994)

Mais à travers les rapports publiés par le Haut Commissaire, les tâches effectuées apparaissent en dessous du niveau requis pour la régularisation du débit d'étiage fixé à 300 m³/s.

Les débits actuels par écrêtement de la crue sont moins importants et la période des basses-eaux à cause de la retenue de Manantali est moins creusée.

L'analyse des bulletins hydrologiques (1998-2002), publiés par l'OMVS, révèle que l'irrégularité des écoulements constitue encore de nos jours la principale caractéristique du fleuve Sénégal. Pendant l'hivernage, le niveau du plan d'eau du fleuve se relève pour être à la cote maximale 820 cm en début septembre 2002 à Bakel, 756 cm en 1998. Cette hauteur est atteinte grâce aux apports provenant des réserves de Manantali mais aussi des affluents non régulés.

Au début de la deuxième décennie de septembre, le plan d'eau entame une baisse régulière jusqu'à la mi-janvier. La hauteur est à 310 cm et le débit moyen passe de 210 m³/s en décembre à 90 m³/s en janvier.

A la deuxième décennie de janvier, le niveau se redresse ; les lâchers d'eau effectués depuis Manantali assurent à la station de Bakel des débits moyens de l'ordre de 150 m³/s en février, 250 en fin juin et 375 en juillet, début août.

Pendant la saison sèche, le régime du fleuve fonctionne artificiellement. Les lâchers sont effectués pour soutenir les cultures de décrue, les cultures de contre saison froide et de contre saison chaude.

Grâce à une bonne gestion des eaux par la Société de Gestion des Eaux de Manantali (SOGEM), les débits moyens en période de basses-eaux sont moins creusés que ceux du régime naturel, et surtout le Sénégal « *peut couler pendant la saison sèche* ».

Les fluctuations interannuelles sont aussi importantes. Les crues enregistrées pendant l'hivernage 2002 à Bakel, et dans toutes les stations du fleuve, sont plus faibles que celles enregistrées en 2001. Elles peuvent varier du simple au double d'une année à l'autre (3056 m³/s en 2001 à Bakel contre 1571 m³/s en 2002).

Le déficit d'écoulement entre ces deux dernières années est 1 milliard 4 millions de m³. Sur une période plus longue, 1990-1991 à 2001-2002, le niveau de variation de l'écoulement du fleuve en décembre à la station de Bakel, a varié de 150 millions de m³ en 2001 à 3 milliards de m³ en 1994.

Cette irrégularité et les déficits relevés qui s'ensuivent sont dus aux caractères de la pluviométrie. Les quantités de pluie enregistrées en 2001 sont plus abondantes qu'en 2002 (389 mm contre 124,6)¹. Elles l'ont été davantage en 1994.

En conséquence de cette crue artificielle et des variations de débits et du niveau du plan d'eau, les surfaces inondées sont réduites par comparaison à la crue naturelle. En 2001, sur les images *SPOT* (SAED), on peut évaluer à 52 921 ha les surfaces inondées par les eaux de la crue dans la région de Podor contre 85 105 ha en 1999 (sans le lit du fleuve et les marigots).

Le faible étalement des eaux dans le lit majeur, la diminution de la durée d'inondation ont pour conséquence de réduire considérablement l'infiltration et la reconstitution des réserves en eau des terres du walo.

Les surfaces réservées à la culture de décrue diminuent mais elles s'étendent lors d'une crue exceptionnelle comme en 1994 et 1999. A cette dernière, 35 135 ha sont effectivement cultivés en décrue dans le département de Podor (SAED).

Le soutien de crue destiné au maintien de l'équilibre écologique de la vallée et aux activités agricoles doit être envisagé comme un objectif de gestion à part entière malgré son influence négative sur les autres usages économiquement rentables. Ainsi à la demande de l'OMVS, *«l'IRD a déterminé un mode de soutien de crue optimisé permettant de dépenser le moins d'eau et de réaliser un objectif de cultures (irriguée et de décrue) en pénalisant le moins possible la production d'énergie de Manantali. En effet pour obtenir à l'entrée de la vallée (Bakel) une crue provoquant l'inondation souhaitée, il faut parfois lâcher à Manantali de forts débits qui ne peuvent être turbinés. Ces gros volumes évacués abaissent le stock disponible pour le soutien d'étiage destiné à l'irrigation ainsi que la chute exploitable pour la production d'énergie»* (Bader et Lamagat, 2004). Les résultats de l'IRD sont utilisés par l'OMVS depuis 2001 pour gérer le barrage de Manantali.

1 Source I R A S L

b) Les risques d'inondation

« Le programme de gestion des eaux pendant l'hivernage se fixe comme double objectif, d'une part de poursuivre le remplissage de la retenue de Manantali et d'autre part de soutenir les apports du Bakoy et de la Falémé afin de renforcer la crue du fleuve » (OMVS, mai 1990). Le cours supérieur du fleuve abrite le barrage de Manantali.

Le Bakoy naît à 750 m sur le plateau au Bouré. Le Baoulé prend sa source à mi-distance de Kita et de Bamako ; c'est un affluent du Bakoy. En aval de Bafoulabé, le Sénégal reçoit à droite, le Katiou-Ko, le Kolimbiné, à gauche la Falémé. Le Katiou-Ko s'enfle de façon démesurée en période de crue. Le Kolimbiné et le Karokoro s'assèchent en grande partie en dehors de la saison des pluies.

La Falémé quant à elle est le principal affluent du fleuve. Elle a sa source sur les marches nord-est du Fouta Djallon et se jette dans le Sénégal en amont de Bakel. C'est le dernier des affluents à gauche, mais également, c'est le plus important. La crue arrive à Bakel par la Falémé. Parmi ces cours d'eau, le Bafing est le seul affluent maîtrisé. C'est sur le bras de ce cours d'eau qu'est installé le barrage de Manantali (voir carte 9).

Les autres affluents : (Karakoro-Kolimbiné-Bakoy et surtout la Falémé) ne sont pas contrôlés. De ce fait, la crue naturelle n'est pas complètement éliminée. Elle arrive à Bakel par la Falémé et le fleuve en aval de cette station fonctionne naturellement pendant l'hivernage. Donc, les crues provenant des bassins autres que celui de Bafing fournissent l'essentiel des débits écoulés lors de la saison des pluies.

« La bonne pluviométrie enregistrée ces dernières années (1994-1996-1999) partout dans le Sahel a provoqué sur les affluents non régularisés des apports au moins trois fois plus importants qu'en 1993 pour la même période considérée et des inondations constatées dans la vallée et le delta du fleuve » (OMVS, déc. 1999).

En effet, durant l'hivernage (1994), notamment en août, la deuxième quinzaine de septembre et octobre, les volumes de la crue naturelle ont été beaucoup plus grands que ceux réellement observés. Les débits à Bakel en période de hautes eaux sont élevés malgré l'écêtement du fait :

- de la pluviométrie et des bassins intermédiaires,
- et des lâchers effectués de la fin août à la mi-septembre par la crue artificielle (OMVS, 1994).

La gestion du barrage de Diama a permis de maintenir le niveau aval à une cote qui aurait été plus élevée sans cet ouvrage. Il apparaît que sans Diama et Manantali *« les inondations seraient de plus grande ampleur »* (OMVS, 1994). En effet, malgré la maîtrise de l'eau, persistent les problèmes d'inondations en cas de fortes crues.

Depuis 1906, « *les crues du fleuve sont suivies dans la vallée* » Diagne, M. (2001). Les études hydrologiques ont révélé que la cote maximale où le débit de pointe est un indicateur remarquable pour les risques de la vallée. Les crues se manifestent par un débordement de fleuve dans son lit majeur entraînant très souvent des calamités.

Pendant ces dernières années, les problèmes liés aux inondations des villes et campagnes sont devenus préoccupants pour les pouvoirs publics, tant les désagréments qu'ils causent aux populations sont considérables. En 1999 et en 2001, selon Diagne M. (2001) et Seck C. (2001) les dégâts se résument à :

- une rupture de digue dans l'île à Morfil
- inondations des villages, des aménagements hydro-agricoles
- dégradation des routes et des ponts (Podor et Donaye)
- villages complètement engloutis à Dounde Baba Dièye à Saint-Louis sur la Langue de Barbarie
- route coupée de Gandiol
- maisons en banco imbibées s'écroulant laissant de nombreuses familles sans abri...

A Bakel, quand la cote dépasse 950 cm à l'échelle, le lit majeur intervient dans les conditions de propagation de la crue dans la vallée. « *De 1946 en 1985, les crues dont les cotes maximales dépassent 950 cm à Bakel sont au nombre de 27 soit 65,5% en valeur relative* » (Seck C, 2001).

Les dix huit années qui ont précédé l'avènement des barrages sont caractérisées par une sécheresse qui a entraîné des modifications profondes dans le régime hydrologique. « *Seules les crues des années 1969, 1970, 1971, 1974, 1975 ont des cotes maximales supérieures à 950 cm à Bakel* » (Seck, 2001).

La récurrence des fortes crues antérieures avait nécessité la réalisation des digues de protection au des centres urbains fluviaux comme Matam, Podor, Richard-toll et le rehaussement des quais de Saint-Louis. Mais des faits suivants sont constatés :

- l'occupation des berges sans plan d'aménagement
- la dégradation des anciennes protections des villes secondaires fluviales
- la dégradation du réseau hydrographique intérieur du lit majeur (défluent et dépressions)
- l'état initial de la vallée en hausse au moment du début de l'hivernage (le niveau des nappes est assez élevé par rapport à la situation avant barrages).

Il est évident que toute modification entraîne un dysfonctionnement du régime des crues faisant ainsi que les dernières crues (1999, 2003) et celle de 2007 à Matam, particulièrement, sont fortement ressenties dans la région. En effet, la volonté de mettre en valeur les potentialités hydrauliques sous-tend toute l'occupation humaine dont la vallée est le théâtre, comme voie de pénétration coloniale d'abord, et, ensuite, comme territoire de production de nos jours.

L'exploitation logique des ressources du bassin et la massification de l'implantation humaine favorisées par des grands aménagements hydrauliques, hydro-agricoles et hydroélectriques, conduits à la double échelle nationale et régionale, ont profondément modifié le fonctionnement de la vallée, et, in fine, le régime du fleuve. La crue 2007, à Bakel, a été caractérisée par un « *maximum journalier de 10,30 m le 04 septembre avec le même jour un débit de 3805 m³/s* » (Notes d'information de l'OMVS, le 10 septembre 2007) ; ainsi le débit de soutien de crue, pour 50 000 ha, qui est de 2144 m³/s est largement dépassé. La propagation de la crue en aval de Bakel a engendré un relèvement général du niveau du fleuve Sénégal, mesurable aux stations de Kaédi, Matam, et de Podor (Note info OMVS, septembre 2007, p 4).

L'analyse des données recueillies par les spécialistes à l'OMVS montre que les débits observés à Bakel, de 3805 m³/s, proviennent « *pour 35 à 64% de l'affluent le Bakoye, pour 8 à 15% de la Falémé et les apports intermédiaires 25 à 33%, ceux de Manantali ne représentent que 2 à 6%* » (Note info OMVS, 2007). Par voie de conséquence logique, « *les inondations de la crue de 2007 à Matam sont globalement liées aux apports non contrôlés de Bakoye dont les effets sont amplifiés, par endroit, par des collecteurs localisés des eaux pluviales* » (Note info OMVS, septembre 2007).

Il est donc urgent et nécessaire de mettre en œuvre des mesures de sauvegarde dont, la sécurisation des moyens de communication, afin de disposer des informations pour une bonne gestion des eaux et des mesures d'alerte. Depuis 2003, l'information sur le régime du fleuve, son évolution journalière, est transmise à tous les Etats membres. Il faut aussi choisir des mesures d'accompagnement nécessaires dans la phase actuelle de l'Après Barrage, comme la :

- réalisation d'infrastructures de protection des agglomérations urbaines et rurales, ainsi que des aménagements hydro-agricoles,
- réalisation d'infrastructures routières plus adaptées, en particulier des routes de désenclavement.

Enfin, une plus grande maîtrise des eaux du fleuve ne peut se faire qu'en engageant les mesures nécessaires pour la régulation de tous les affluents du bassin versant. « *55% des ressources du fleuve peuvent être considérés comme sauvages au sens scientifique du terme, c'est à dire, non contrôlés* » (source OMVS). Aussi, échappent-ils au pouvoir de contrôle et de maîtrise de l'OMVS et de ses Etats membres. La réalisation programmée de Gourbassi sur la Falémé et de Koukoutamba a, pour, entre autres finalités, l'accroissement du pouvoir de contrôle sur la ressource en eau par sa régularisation croissante grâce à la mise en place d'équipements hydrauliques appropriés. Les pré investissements pour ces deux aménagements sont aujourd'hui entre les mains de l'OMVS (Note info 2007).

Somme toute, pour les populations et pour le couvert végétal, le fleuve Sénégal représente la source principale d'alimentation en eau douce, en dehors des pluies ; c'est un élément très important du bilan hydrique ; mais l'artificialisation de la crue n'empêche pas des irrégularités dans son écoulement, largement tributaire de la pluviométrie tout au long du bassin.

CHAPITRE 3 : LES NAPPES

Dans la vallée du Sénégal, où les températures sont fortes, la pluviométrie insignifiante et où l'eau salée, jadis pénétrait à l'intérieur des terres jusqu'à 300-400 km de l'embouchure, le problème de l'approvisionnement en eau douce de la population revêt une particulière importance. Les habitants de la région du fleuve se sont toujours penchés sur le problème de l'eau. Ils ont acquis de solides connaissances empiriques sur les possibilités aquifères du milieu.

Les sondages effectués par le BRGM, le SASIF, entre 1961 et 1976 ont révélé que le gisement de l'eau dans le sous-sol est directement lié aux structures géologiques régionales. Une nappe alluviale superficielle est présente dans le lit majeur. Son niveau aquifère est formé par les sables Nouakchottiens situés sous les alluvions. Maintes fois étudiée, elle constitue une ressource en eau utilisée par les riverains

Ce présent résumé est la synthèse des actions menées dans la vallée par Elouard (1962), Degallier (1962), P.IIIy (1973) et BRGM (1976). Nous allons donc présenter dans ce chapitre : l'histoire géologique du bassin, les formations aquifères, les différentes nappes qui ceignent la vallée, les facteurs d'alimentation de la nappe, les échanges entre les nappes alluviales et le fleuve et les conséquences de la modification du régime du fleuve sur la nappe alluviale.

I - L'HISTOIRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIE DU BASSIN

L'histoire géologique du bassin du fleuve reflète celle du continent africain, pays de socle, de vieilles plates formes et de bassins sédimentaires. Le fleuve s'étend sur deux ensembles structuraux bien distincts (carte 2, p.26) renfermant des réserves aquifères dont les plus importantes sont dans le cours inférieur.

3. Les formations du cours supérieur

Le haut-bassin du Sénégal occupe la partie ouest de la cuvette structurale du Niger, un vaste ensemble à la topographie variée. Les unités intéressant le bassin supérieur sont : la boutonnière du Hodh, le plateau Mandingue, le massif de Kaarta. Ils appartiennent au socle précambrien et à la couverture sédimentaire infra-cambrienne et cambro-ordovicienne.

Les phases de remblaiement et de pédogenèse (cuirassement) correspondent dans le passé aux périodes « humides » accompagnées de transgression marine. Les périodes « sèches » sont celles de creusement intense, coïncidant avec des régressions marines et des soulèvements dans la région. Humides ou sèches ne sont pas là à prendre au sens météorologique du terme, c'est à dire relatif à la teneur en vapeur d'eau de l'air. Ils qualifient simplement des paléoenvironnements à pluviométrie abondante en biostasie dominante et peu importante, à rhexistasie dominante

Les formations géologiques qui composent ce secteur du fleuve sont imperméables (Rochette, 1974). Le fleuve coule sur un lit rocheux à pente assez forte. Pendant l'étiage, le mouvement de l'eau continue quoique les seuils qui les séparent soient à sec. Ce courant qui reste sensible, s'explique par les fissures qui dans le substratum rocheux, forme autant de dérivations souterraines. Le mouvement se traduisait en eau libre entre 1950 et 1960, par un débit constant de 5 à 6 m³/s.

Dans le haut-bassin, on ne trouve de l'eau que dans les zones de roche fissurée ou dans les altérations superficielles des roches notamment sous la cuirasse.

Ainsi, il ne manque pas de conditions favorables à la naissance d'un écoulement souterrain à faible profondeur. Cependant, les nappes phréatiques existantes sont très discontinues et temporaires.

Les travaux du groupement de Manantali ont recensé (USAID, 1990) :

- une nappe dans les versants situés au-dessus de la cote de la vallée du Bafing,
- une nappe artésienne localisée dans les pelites (pression hydrostatique 1 m au-dessus du fleuve),
- une nappe discontinue dans les alluvions du fleuve.

Le débit total des fractures serait de l'ordre de 70 à 140 l/sec. Ces quantités sont au total assez faibles.

2. Formations géologiques du cours inférieur

La géologie de la vallée a été décrite par P. Michel (1973). Au quaternaire s'est façonnée la morphologie de la vallée, son cours inférieur, sous l'influence des fluctuations climatiques qui ont affecté les débits continentaux et le milieu marin lui-même (Monteillet J., 1986).

a) Les formations tertiaires

Elles sont représentées par l'Eocène moyen et le Continental terminal (CT). L'Eocène moyen est retrouvé généralement immédiatement sous le Continental terminal. A partir de Dembakané, à une quinzaine de kilomètres en aval de Bakel, le Sénégal a creusé sa vallée dans les sédiments tertiaires qui constituent les seuils rocheux qui jalonnent le lit mineur et qui émergent parfois aux basses-eaux vers Boghé. L'Eocène moyen est divisé en lutétien inférieur et lutétien supérieur.

Seul, le Lutétien inférieur intéresse la vallée du Sénégal (Rochette, 1974). Il est formé principalement de calcaires, des dolomies et des argiles. Localement, il renferme des niveaux de phosphates, de calcium et d'alumine.

Le Continental terminal est largement présent dans le bassin inférieur. Il affleure à Bakel en amont d'une ligne Aéré-Lao-Boghé-Thillé-Boubakar-Dagana, sur les marges immédiates de la vallée. Son épaisseur est variable et peut atteindre 150 m environ.

Les faciès les plus courants sont des sables argileux aux couleurs variées roux-beige, jaune, blanc, violacé dans lesquels s'intercalent des niveaux argileux ou gréseux. Cette formation du Continental terminal est recouverte par une cuirasse ferrugineuse en grande partie démantelée par l'érosion lors du Quaternaire ancien (P. Michel, 1973). La cuirasse est affleurante à Thilé-Boubacar et à Dagana.

b) Les formations du quaternaire

Le Quaternaire de la vallée a un caractère alluvionnaire (P. Elouard, 1962). Après les phases de creusement du Quaternaire ancien et moyen au cours desquels s'est façonné un vaste golfe marin, c'est au quaternaire récent que la basse vallée prend son allure actuelle.

Pendant la phase aride de l'Ogolien (20 000 BP), les ergs anciens recouvrent le sud de la Mauritanie et le Sénégal septentrional. Ils sont modelés en cordons dunaires orientés NE-SW qui barrent la vallée du Sénégal à la hauteur de Kaédi soumettant la vallée à un régime endoréique.

A cette phase succède vers 10 000 BP une phase pluviale : le fleuve opère un nouveau creusement de son lit à travers les dunes jusqu'à l'océan. S'effectuent, aussi une rubéfaction des dunes et une pédogenèse conduisant aux sols bruns et des sols ferrugineux non lessivés.

Vers 5 500 BP une intrusion marine remonte loin en amont atteignant Boghé puis, par étalement des sables, se sont façonnés des niveaux de terrasses que l'on trouve aujourd'hui sur les bords de la vallée. Des formations de vase marine ont été décelées très loin en amont jusqu'à Boghé (P. Michel, 1973).

A partir de 4 000 BP, la dérive océanique favorise le façonnement de cordons littoraux sableux repris par le vent en un système de dunes jaunâtres qui barrent partiellement l'accès du fleuve à la mer, c'est à cette époque que la vallée prend sa morphologie définitive.

A cet effet, le fleuve édifie sous l'influence d'une abondance sédimentation post-nouakchotienne de grands bourrelets de berges.

Ces alluvions sont reprises lors d'une petite phase « sèche » pour former des systèmes de petites levées subactuelles, allongées et plus basses qui isolent des dépressions où les eaux du fleuve décantent progressivement leurs argiles. Ces alluvions récentes occupent tout le lit majeur.

Les conditions sont ainsi favorables à l'accumulation d'eau dans le sous-sol. Le cours inférieur comporte d'importants systèmes aquifères qui se structurent en nappes à plusieurs niveaux (cf. carte 10, p.112).

II - LES NAPPES DE LA VALLEE

1. Les formations aquifères

Les alluvions quaternaires de la vallée montrent une forte variabilité de composition latéralement et verticalement. Les couches argileuses sont rarement continues à travers tout le lit majeur. Il existe presque toujours des communications entre des horizons perméables étagés qui paraissent bien isolés les uns des autres par des couches d'argile. Aussi, la distinction entre nappe phréatique et nappe profonde ne peut être que locale.

On peut considérer que les eaux souterraines des alluvions constituent un système hydraulique unique du fait de la disposition lenticulaire des couches et de la drainance à travers les couches d'argiles et limons qui ne sont pas étendues. Les formations aquifères les plus perméables sont les sables moyens ou grossiers.

En général graveleux, de la partie inférieure du remplissage alluvial. Ils ont une épaisseur variable de quelque 23 m en moyenne (P.IIIy, 1973). Les sables des horizons supérieurs (sables ogoliens) sont généralement fins à très fins souvent avec une fraction silteuse notable.

Les limons plus ou moins argileux ont une dizaine de mètres d'épaisseur suivant leur teneur en argile, leur compacité, ils peuvent constituer soit des horizons aquifères à perméabilité relativement bonne, soit des couches semi-étendues. La puissance moyenne de l'aquifère, (doc. OMVS) est d'environ 25 m. L'horizon phréatique représente souvent quelques mètres.

La nappe phréatique n'est pas toujours à surface libre. L'eau est localement en charge sous des argiles limono-sableuses ou sans les argiles lourdes gonflantes des cuvettes. La profondeur piézométrique diminue progressivement en moyenne d'aval en amont.

2. Les nappes de la vallée

Elles sont toutes étudiées par différents auteurs, dont P. Elouard, J. Depagne et H. Moussu (1967), P. IIIy (1973). Les nappes sont au nombre de six pour le cours inférieur. Ce sont : la nappe Maestrichtienne, la nappe de Brachna, la nappe de l'Amechtil, du Trarza, la nappe du Continental terminal et la nappe alluviale.

a) La nappe Maestrichtienne

L'importante nappe dite des « sables du Maestrichtien » est exploitée par de nombreux forages dont les débits spécifiques varient entre 0,5 et 5 l/m/s. C'est la plus vaste du Sénégal.

Elle s'étend sur toute la zone de la vallée entre Bakel et Rosso. L'épaisseur moyenne de la nappe est de 400 m près de Bakel. Vers Dagana et au bombement du lac de Guiers, elle ne dépasse guère 100 m. Elle serait alimentée par les pluies et la nappe des alluvions.

b) La nappe du Brachna

Elle se trouve dans les sables et grès tendres de l'Eocène à faciès littoral, généralement à bonne perméabilité, qui s'étendent surtout sur la rive droite de la vallée jusqu'à 25 km en aval de Kaédi. Elle forme un système hydraulique unique avec la nappe du Maestrichtien qui se trouve dans les terrains sous-jacents. Une couche d'argile est à la base de l'Eocène. La puissance de l'aquifère est assez mal connue car les sondages à Kaédi ne sont pas profonds. Les débits spécifiques des forages mesurés sont de l'ordre de 2 à 6 l/m/s.

CARTE 10 NAPPES DE LA VALLEE

Les nappes de la vallée

c) La nappe de l'Amechtil

Les eaux circulent dans les horizons calcaires et de rares petits niveaux gréseux de l'Eocène, équivalents des sables du Brachna. Elle débute à l'ouest de Kaédi et se termine vers Boghé, mais elle se poursuit sous les terrains du continental terminal. La puissance cumulée des aquifères est, probablement, le plus souvent inférieur à 20 m. Les débits spécifiques se situent aux environs de 1,5 l/m/s.

d) La nappe de Trarza

Elle s'étend jusqu'à l'Aftout es Sahel près de la mer. Elle gît dans les sables et grès du Continental terminal et pour sa partie supérieure dans des sables avec des niveaux grossiers. La puissance est d'environ 40 m. Cependant, en bordure de la vallée la profondeur du système est généralement comprise entre 10 et 20 m sur le diéri, elle dépasse le plus souvent 30 m parfois 50 m.

Les nappes du Brachna, de l'Amechtil et du Trarza forment dans la région du sud ouest mauritanien, la nappe du Guebla mauritanien. Le Guebla circule dans les formations variées et pour chaque formation aquifère, la nappe a une appellation différente.

e) La nappe du Continental terminal

Elle est aussi appelée nappe du Ferlo. C'est le pendant de la nappe du Guebla mauritanien. Elle s'étend à l'ouest du substratum primaire. L'aquifère est représenté en crue par des niveaux argiles de sable et grès apparemment importants (26 m) à la base de l'Eocène et dont le sommet est surtout formé d'argiles et marnes sableuses.

Entre Thillé Boubacar et le lac de Guiers, les formations aquifères du Continental terminal sont des sables et grès fins plus ou moins argileux d'environ 20 m de puissance. En bordure de la basse vallée, la nappe est souvent en charge sous les niveaux argiles de l'Eocène. Elle est généralement à surface libre dans le Continental terminal mais elle peut être localement captive, comme au sondage piézométrique de Nianga. L'épaisseur de la nappe le long du fleuve est mesurée entre le niveau statique et les marnes du mur de la nappe entre 10 et 50 m. La moyenne est de 30 m (R. Degallier, 1962).

f) La nappe alluviale

En aval de Bakel, le fleuve Sénégal coule sur ses propres alluvions. Elles sont plus ou moins perméables car formées de matériaux finement sableux, de limons jaunâtres et de dépôts argileux. Il se forme « *un inféro-flux d'autant plus important qu'à la période des crues, le fleuve alimente un lit majeur large de plus de 15 km* » (P. Elouard, 1962). A la période des hautes-eaux, le fleuve Sénégal recharge ses alluvions qui forment un réservoir aquifère. Le pouvoir de rétention de ces alluvions peut dépasser 200 à 300 mm en moyenne pour un mètre d'épaisseur.

En période de basses- eaux, une partie des eaux alluviales est restituée au fleuve dont le niveau est alors inférieur au niveau de la nappe. Les réserves souterraines lors de la crue ont un pouvoir d'amortissement important. L'ordre de grandeur des minima observés pendant l'étiage dépend des disponibilités en eau contenues effectivement dans les alluvions.

Cette nappe est très étendue, elle se limite à la zone alluviale du fleuve et aux terrains situés à sa bordure. Les villageois s'installent donc le plus près possible de la nappe là où se trouvent leurs terrains de cultures et leurs puits. La nappe alluviale renferme une autre nappe superficielle qui est également présente dans tout le lit majeur. Son niveau aquifère est formé par les sables nouakchottiens, sa profondeur piézométrique diminue d'amont en aval (J.Y. Loyer, 1989). Dans le delta, elle est souvent inférieure à 2 m, son épaisseur moyenne dans la vallée est estimée à 5 m.

Dans le sens de la largeur, la profondeur des puits augmente en général du lit mineur au diéri.

III - L'ALIMENTATION DES NAPPES ALLUVIALES

Les nappes sont rechargées par la pluie, les eaux d'inondation, les échanges latéraux et l'infiltration des excès d'eau d'irrigation.

Dans cette sous partie on étudiera, l'alimentation par les eaux pluviales puis les transferts latéraux et l'infiltration par irrigation.

Toutes les données proviennent d'un rapport publié à l'OMVS par B. Dieng (1997). Ce document fait la synthèse des résultats de plusieurs années d'études (1985-1990) effectuées dans le delta et la vallée grâce à un financement de l'USAID.

1. Recharge par les eaux de pluie

L'équation qui a permis d'analyser les quantités d'eau de pluie infiltrées est la suivante :

$$P = ETR + Res + Lr + Li$$

où P = hauteur de pluie tombée (mm)
 ETR = Evapotranspiration réelle (mm)
 Res = Réserve en eau des sol (mm)
 Lr = lame ruisselée (mm)
 Li = lame infiltrée (mm)

A Podor, Matam, Bakel, les lames d'eau infiltrées à ces trois stations sont nulles. Ce qui permet d'affirmer que les nappes ne sont pas alimentées par les eaux de pluie.

A cela une seule exception, au sud-est de Bakel, selon l'importance de la pluviométrie, il peut se produire une infiltration vers les nappes souterraines. Seulement, comme la période 1980-1990 est relativement sèche, cette éventualité peut-être exclue. Ainsi les fluctuations positives du niveau de l'eau des nappes observées ne peuvent être dues qu'à l'effet de la présence à proximité des cours d'eau ou des apports d'eau d'irrigation.

2. Alimentation par transfert latéral

Les échanges latéraux sont en relation avec la variation des niveaux de la nappe déterminée par la crue et la décrue des eaux du fleuve. Il s'ensuit une recharge des alluvions et un drainage par le fleuve.

Selon les experts de l'OMVS, le calcul est fait en prenant une distance d'influence de l'impact des fluctuations, des niveaux des cours sur les nappes de 5 000 m de part et d'autre sur chaque berge.

Ainsi sur les deux berges dans la moyenne vallée, le volume total emmagasiné est de $330,10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Ce résultat est supérieur à celui obtenu par IIIy pour la période 1971-1972 : volume estimé à 250 millions m^3/an .

3. Alimentation par les eaux d'irrigation

L'approche la plus rigoureuse pour estimer ces apports aurait nécessité une évaluation précise des superficies des différents périmètres irrigués, de leur période de mise en eau, de l'épaisseur de la lame d'eau et de la caractérisation des sols.

Les volumes d'eau de percolation au droit de chaque périmètre peuvent être calculés en faisant par exemple un bilan hydrologique dans lequel les apports par la pluie sont majorés par ceux d'irrigation.

De telles informations ne figurent pas toutes dans la banque de données de l'OMVS. Ce qui rend impossible l'utilisation de cette approche.

On s'est contenté au sein de cet organisme d'une approche de calcul de la fluctuation du niveau piézométrique et de la lame d'infiltration en utilisant la procédure suivante :

- fluctuation totale H du niveau de la nappe à un point situé à distance X d'un cours d'eau et à l'intérieur d'un périmètre irrigué ;
- il sera retranché dans un premier temps, la hauteur d'eau (H_f) correspond à l'apport latéral par les cours d'eau ;
- du fait que l'alimentation par infiltration directe des eaux de pluie est considérée comme nulle, la différence ($H-H_f$) correspond à l'apport par les eaux d'irrigation (h_i).

Mais les apports aux eaux d'irrigation sont aussi fonction du type de périmètre.

Dans les grands périmètres (2 à 3 hectares), l'apport des eaux d'irrigation induit une augmentation du niveau de la nappe de l'ordre de 1 m tandis que dans les périmètres irrigués villageois (PIV) (40 à 50 ares), la fluctuation due à l'irrigation est de l'ordre de 0,3 m.

En adoptant un coefficient d'emmagasinement de 0,1 (1%) pour les nappes libres supérieures, on aboutit à une lame d'eau infiltrée de 100 mm par unité de section de nappe dans les grands périmètres et de 30 mm dans les PIV.

Ainsi avec l'objectif visé d'aménager 375 000 ha, avec la mise en eau des barrages, l'apport d'eau aux nappes en provenance des excédents d'irrigation peut approcher facilement celui des transferts latéraux par les cours d'eau déjà estimée à 330 millions m^3/an .

4. Les variations de la nappe

Dans la moyenne vallée, la succession d'années déficitaires a provoqué l'assèchement de nombreux points d'eau et l'établissement général du niveau des nappes souterraines.

Au cours des phases hydrologiques humides, l'eau dans la plaine alluviale est sub-affleurante après la décrue et passe à quelques mètres de profondeur en fin de saison sèche.

En 1957, la nappe se situait à 1,5 m à Ndierba station située entre Podor et Dagana (P. Elouard, 1962). En 1978, la profondeur des puits variait entre 1,5 et 3,90 (J. Y. Loyer, 1978). Les cycles hydrologiques 1950-1956 étaient considérés comme humides. En 1955-1956, la hauteur de la crue dépassait 6 m en octobre (P. Elouard, 1962) inondant les levées considérées jusqu'ici à Podor comme insubmersibles.

L'eau de puits avait une hauteur supérieure à 2,5 m après la saison des pluies. A l'étiage, les transferts d'eau de la nappe souterraine vers le fleuve soutenaient des débits d'étiage moyen (entre mars et mai) de 30 m³/s à Bakel.

La réduction des volumes au cours d'un épisode sec, constatée lors des acheminements des eaux dans la vallée est la conséquence directe des échanges à sens unique vers les nappes souterraines impuissantes à amortir les débits (débits à Bakel en mai sont de l'ordre de 0,70 m³/s). Leur faible alimentation annuelle traduit bien plus que le réseau de surface, « *l'insidieuse progression en profondeur de la désertification dans les régions tropicales* » (J. Y. Gag et A. Kane, 1986).

La profondeur des puits décroît d'année en année dans la plaine alluviale, le débit actuel des puits en saison des pluies est celui de la saison sèche des années cinquante, c'est à dire, quelques centimètres de hauteur, si bien qu'entre avril et juin certains tarissent.

Les marigots qui ourlaient le lit mineur et qui servaient d'abreuvoir au bétail et à de géants gonakiés (*Acacia nilotica*) sont à sec. Le peuplement naturel à gonakiés meurt souvent debout.

Les eaux de drainage qui contribuaient au lessivage des alluvions salées remplissent de moins en moins en période sèche la fonction qui leur est dévolue. Mais depuis 1990, à cause d'importants apports provenant de l'irrigation, le niveau de la nappe est semble t-il à la remontée. Mais l'abondance ne fait pas tout, aussi allons-nous traiter de la qualité des eaux.

IV - LA QUALITE DES EAUX

Dans le cours supérieur, l'analyse des échantillons prélevés révèle que :

- Le pH des eaux souterraines est moyen, il varie de 7,2 en saison sèche à 6,7 en saison des pluies. Le passage d'une eau légèrement basique à la fin de la saison sèche à une eau légèrement acide après l'hivernage suppose une recharge du réseau fracturé par les eaux de ruissellement acidifiées par les matières aquifères.
- Les eaux sont souvent douces et parfois saumâtres : leur aptitude à l'irrigation varie beaucoup ; elles sont classées de « médiocre à excellente » selon la minéralisation de l'eau. Les vingt (20) analyses chimiques des eaux souterraines effectuées par le projet OMVS/USAID (carte 11, p.119) montrent une grande diversité de faciès hydrogéochimiques tels :
 - bicarbonatés calciques et magnésiennes (10 échantillons sur 20),
 - chlorurés calciques et magnésiennes (8 échantillons sur 20),
 - sulfatés calciques et bicarbonatés (2 échantillons sur 20).

Dans le delta, les eaux sont de mauvaise qualité. Dans sa partie centrale, le taux de salinité est supérieur à 10 000 mg/l. A la périphérie, les eaux sont saumâtres puisque la salinité s'élève à 1 000 mg/l.

Par ailleurs, elles se caractérisent par de fortes valeurs de conductivité électrique. Ces eaux sont inaptes à l'irrigation, à l'alimentation de la population et au cheptel.

Les différentes actions menées dans la vallée, précisément à Nianga, Podor-Ndioum ont montré que les points d'eau ont une forte teneur en sel. La minéralisation des puits a pour origine la transgression marine du Nouakchottien pendant laquelle, la vallée a été comblée par des dépôts lagunaires ou marins salés.

A Ndierba (moyenne vallée aval), les eaux de puits ont une conductivité comprise entre 112 /umhos pour les valeurs faibles et 310 /umhos pour les valeurs fortes (25°C).

Trois points ont été analysés (cf. tableau 12) : P1 dans la cuvette, P2 sur la zone de transition diéri-cuvette et P3 sur dune (forage) suivant une direction nord-sud. Les prélèvements ont été faits par nous même.

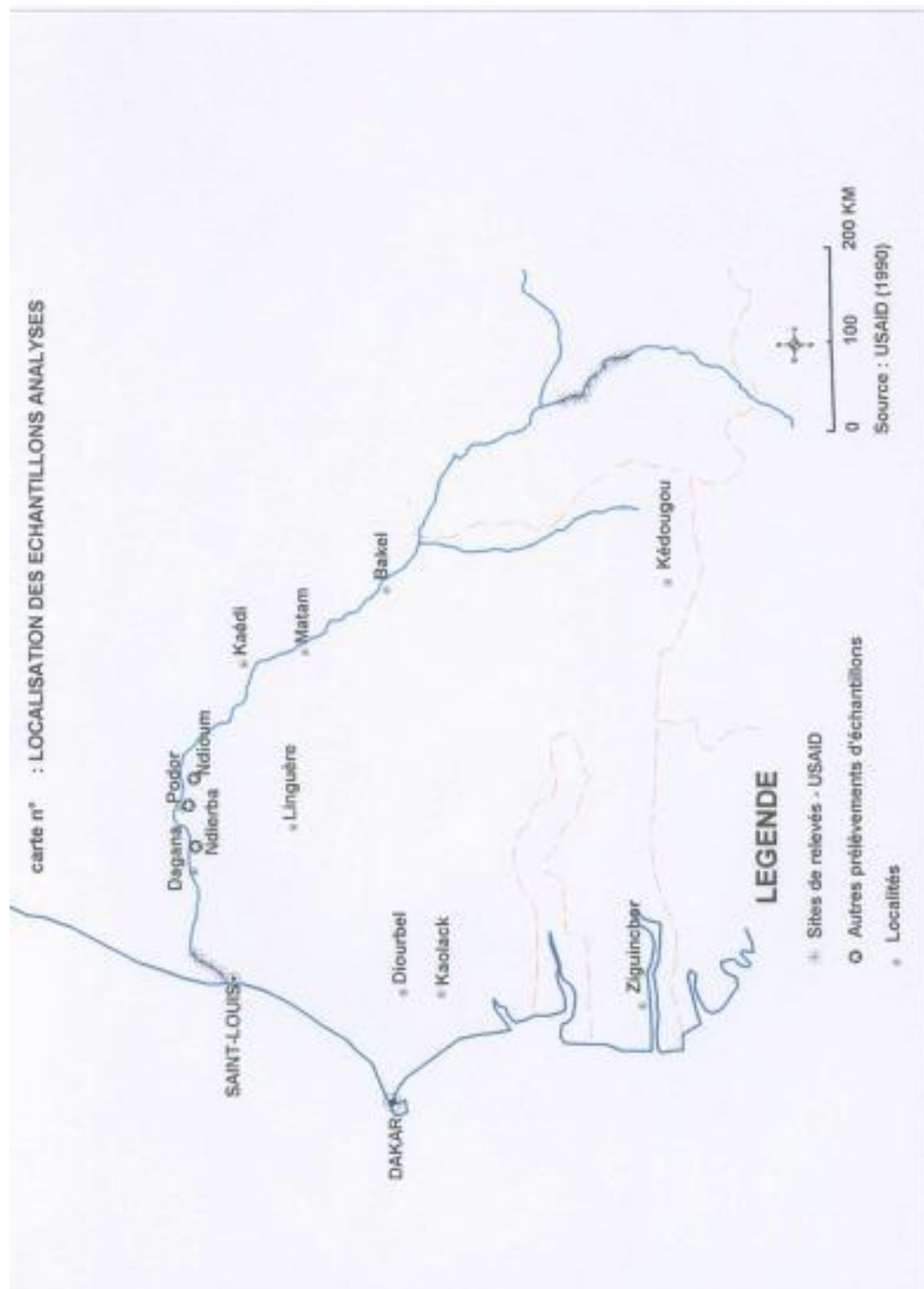
Tableau 12 : Analyse des eaux de puits

Site	P1					P2					P3				
	Cuvette					Zone transition					Dune				
Date de prélèvement	15 fev 90	22 avril 90	16 juillet 90	28 oct 90	27 janv 91	15 fev 90	22 avril 90	16 juillet 90	28 oct 90	27 janv 91	15 fev 90	22 avril 90	26 juillet 90	27 oct 90	27 janv 91
EC mm hos	300	310					130	112	115	115			114	179	145
PH									6,2	6,2				6,8	6,1

P1 dans la cuvette a une profondeur de 7 m localisé sur le profil Nd₂. La minéralisation des eaux est plus importante 310 /umhos. Les prélèvements ne se sont pas poursuivis à cause du tarissement au mois de mai-juin.

P2, sur la transition diéri-cuvette est situé à proximité du profil Nd₂ ; sa profondeur est de 13 m. La conductivité est faible 112 et 130 /%mhos. Ce puits alimente encore la population du village de Ndierba. Le pH des eaux est acide.

P3 est un forage sur dune, d'une profondeur de 30 m. Les eaux sont aussi faiblement minéralisées. Cependant, sa conductivité par rapport à P2 est plus élevée et son pH moins constant. Il peut évoluer d'un pH acide à un pH neutre, en fin d'hivernage.



A l'exception du P1, les quantités de sels dissous sont faibles. Le pH varie entre 6,1 et 6,8. L'analyse des eaux du fleuve entre Ndioum et Gam Yalla en passant par Podor, lors de la campagne au cours de l'hivernage a révélé des résultats similaires.

Depuis l'arrêt de la remontée des eaux marines par le barrage de Diama, on assiste à une remontée du niveau de base dans le fleuve à cause du barrage de Manantali. « *Ces deux effets occasionnent la présence d'une charge d'eau douce pendant un temps plus important dans la vallée* » (B. Dieng, 1997). La qualité des eaux dans cette portion de la vallée est fortement améliorée.

Les points qui se dégagent sont les suivants :

- l'alimentation verticale, comme latérale de la nappe alluviale résulte essentiellement des eaux sur fleuve ;
- l'accroissement des surfaces irriguées et l'augmentation du nombre de saisons agricoles au cours d'un cycle annuel vont induire des rehaussements par flux verticaux de la surface piézométrique ;
- du fait des barrages, la qualité des eaux s'est nettement améliorée dans la moyenne vallée.

CONCLUSION

De cette deuxième partie comprenant entre autre les éléments du bilan de l'eau nous retenons que :

- au Sénégal septentrional, les caractères de la pluie ne couvrent pas les besoins en eau de la végétation et les besoins en eau des plantes cultivées dans le diéri comme dans le walo, les quantités précipitées sont faibles et cette faiblesse peut s'étendre sur plusieurs années successives,
- le fleuve Sénégal est la principale source d'approvisionnement en eau des plantes et des populations ; son rôle est majeur dans le rehaussement du niveau de la nappe alluviale,
- un bilan de l'eau est établi (plus loin) en plus de graphiques, pour préciser les termes des gains caractérisés par la pluie et les apports fluviaux et, les pertes par évaporation physique et évapotranspiration.

TROISIEME PARTIE : L'EVAPOTRANSPIRATION ET LES AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES DE PERTES EN EAU

Chapitre 1 : Les facteurs climatiques de l'évapotranspiration

Chapitre 2 : Mesures et techniques de calcul de l'ETP

INTRODUCTION

L'évaluation des besoins en eau dans la moyenne vallée du Sénégal est indispensable pour assurer un meilleur développement de la végétation naturelle pour le bétail et des cultures irriguées. Elle permet de connaître avec plus de précision les volumes (ou hauteurs d'eau) suffisants à administrer au sol pour satisfaire la capacité de rétention¹ du sol sur toute la profondeur atteinte par les racines des plantes.

Les données jusque là mises à la portée des cultivateurs étaient justes indicatives ; les études sur l'évapotranspiration sont encore limitées, ponctuelles et certains des résultats discutables. L'évapotranspiration est un phénomène naturel de la plus haute importance en tant que composante du cycle de l'eau. Elle peut selon les possibilités d'alimentation et la fréquence de la recharge en eau utilisable dans le sol atteindre l'évapotranspiration réelle (ETR). L'ETR dépend des précipitations, de la réserve en eau du sol et des plantes qui assurent le pompage à une époque bien déterminée. Elle est étudiée dans la partie qui suit en même temps que les réserves hydriques.

Pour les bioclimatologistes, l'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la perte maximale d'eau par évaporation d'une nappe d'eau libre et la transpiration d'un couvert végétal abondant et uniforme de faible hauteur en pleine croissance, largement alimenté en eau sans qu'il y ait interruption de la régulation stomatique. Pour les climatologues, c'est le pouvoir absorbant de l'air.

L'ETP comprend la transpiration cuticulaire et stomatique du végétal et également l'évaporation du sol. Ce dernier phénomène est relativement peu important par rapport à la transpiration du végétal (M. Hallaire et S. Hénin., 1958). Les pertes sont en principe indépendantes du type de sol si « *celui-ci est à la capacité au champ aussi que les variétés végétales* » (R. Ettehad., P. Lorsaint., M. Rapp., 1973). Elles sont occasionnées par les utilisations domestiques et pour les besoins de l'irrigation.

L'ETP peut-être mesurée au champ ou à défaut, elle est calculée. De nombreux chercheurs ont élaboré des formules différentes car il n'y en a pas une qui puisse satisfaire à tous les climats. Le calcul de l'ETP à l'échelle du Sénégal pose de grands problèmes.

Les stations sont peu nombreuses, distantes les unes des autres et celles qui existent sont souvent mal équipées. Il est difficile d'avoir les renseignements nécessaires d'autant plus qu'au service de la météorologie à Dakar, les informations ne sont plus gratuites !

¹ notion mieux développée et expliquée à la 4^{ème} partie

Pour traiter de ces éléments de perte en eau dans le bilan nous avons découpé cette deuxième partie en deux chapitres :

- au chapitre 1 sont analysés les facteurs climatiques de l'évapotranspiration,
- le chapitre 2 porte sur les méthodes de calcul, les méthodes de mesure de l'ETP et sur l'application des formules de calcul de l'ETP et de l'équation recommandée.

Pour faire les calculs de l'ETP, nous nous sommes servis de paramètres climatiques dont la série ne présentait pas de lacune, et qui concernent la moyenne 1961-1990, pour les stations suivantes : Saint-Louis et Podor. Les données sont de la même période que celles de l'ETP mesuré au lysimètre à Richard-Toll qui vont nous servir de référence. S'agissant de la station de Matam les données de la série 1971-1986 sont utilisées pour comparaison avec les informations sur Podor et sur Saint-Louis.

Des moyennes plus courtes d'autres stations de recherche, comme elle de Fanaye, sont intégrées dans cette étude pour étayer, renforcer certaines analyses, certaines assertions. Des mesures assez rares étaient effectuées dans cette station à l'exemple de la température du thermomètre mouillé, la température du thermomètre sec, des moyennes décennales pour de nombreux paramètres. La station de Fanaye, installée dans la moyenne vallée par l'ISRA pour abriter ces opérations de recherche, n'est plus opérationnelle.

La série 1961-1990 est incomplète surtout à la station de Matam ; pour cette raison son application va se limiter particulièrement à Podor, principale station de la vallée, pour être testée sur la méthode recommandée pour le calcul de l'ETP. Nos démarches pour recueillir les paramètres de la série 1971-2001 n'ont pas totalement abouti pour cause d'informations incomplètes concernant l'insolation et la vitesse du vent.

Ces périodes sont bien courtes, compte tenu des variabilités pluridécennales et séculaires du climat qui ont affecté l'Holocène. Mais, il faut parfois « faire avec ce que l'on a ».

CHAPITRE 1 : LES FACTEURS **CLIMATIQUES DE** **L'EVAPOTRANSPIRATION**

I - L'INSOLATION

L'insolation est la quantité de rayonnement solaire direct incident par unité de surface horizontale. Plus le soleil chauffe directement le sol et plus l'évapotranspiration est élevée.

L'évaporation dépend également de l'insolation dont la durée moyenne journalière est largement supérieure à 8 h. Elle est de 8,3 h à Podor et 9,6 h à Matam (cf. tableau 13), soit une durée moyenne annuelle qui dépasse 3 000 h.

A la station de Fanaye, en 1983, 1987 et 1988 les totaux atteignent 2 600 à 2 900 h.

Le tableau 14 montre que l'insolation est importante toute l'année dans la moyenne vallée. Les maxima se situent en février, mars et avril, les minima en août, septembre et octobre à cause d'une nébulosité plus forte liée à la saison des pluies.

Tableau 13 : durée insolation moyenne en heure (1961-1990 à Saint-Louis et Podor) (1971-1986 à Matam) (source Asecna Saint-Louis)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	7.8	8.5	8.9	9.5	9.1	7.4	7.9	8.0	7.6	8.4	8.2	7.5
Podor	7.5	8.0	8.2	9.2	8.8	8.2	8.5	8.6	7.9	8.4	8.1	7.8
Matam	9.15	9.96	9.91	10.49	10.28	9.73	9.61	9.21	9.22	9.76	9.62	8.84

Tableau 14 : insolation à Fanaye

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1983	6.5	8.6	6.7	8.5	6.3	6.0	8.9	8.2	8.6	8.7	8.4	7.0
1987	8.4	8.4	8.6	5.8	3.8	7.2	7.6	7.7	6.5	7.1	8.3	8.2
1988	5.9	4.7	7.0	8.8	8.6	6.8	6.7	8.1	7.1	9.1	8.3	6.4

(Source Isra-Fanaye)

La courbe d'insolation de Podor est sensiblement identique à celle des températures (cf. page 254) et elle recoupe la courbe de l'évaporation avec un décalage d'un mois par rapport aux maxima de température. Pour résumer, plus il y a du soleil, plus il fait chaud, et plus l'ETP augmente.

II - LES FACTEURS THERMIQUES

Pour évaporer une lame d'eau d'1 mm d'épaisseur, il faut $2,45 \text{ M J/ m}^2$ (ou 590 kcal/m^2). L'énergie nécessaire vient du bilan radiatif. Le rayonnement et les températures sont donc très importants dans l'évaluation de l'ETP.

1. Considérations générales

Dans toutes les stations de la vallée du Sénégal, les moyennes annuelles des températures sont supérieures à 25°C . Dans le delta, elles s'élèvent à $25,9^\circ\text{C}$, $28,9^\circ\text{C}$ à Podor; elles atteignent $30,1^\circ\text{C}$ à Matam.

Les températures sont en permanence élevées étant donné la latitude tropicale du Sénégal. Leur distribution permet de distinguer la région du delta, de la moyenne vallée et du haut-bassin. Elles augmentent en fonction de la continentalité puisque les influences maritimes s'estompent à mesure que l'on progresse vers l'est (voir carte 12, p.126).

Les températures varient également avec les saisons. Les plus faibles sont relevées pendant la saison sèche (cf. tableau 15, p.127). Dans le delta, elles sont de $25,2^\circ\text{C}$ en saison sèche et de $28,1^\circ\text{C}$ en saison humide. A Podor, elles atteignent respectivement $28,3^\circ\text{C}$ et $30,8^\circ\text{C}$, et plus en amont à Matam $29,0^\circ\text{C}$ et $31,6^\circ\text{C}$.

Localement, la situation est plus complexe surtout pour les stations de la moyenne vallée où deux maxima et deux minima sont observés. Le premier maximum est enregistré entre mai et juin juste avant la saison des pluies et le second à la fin de celle-ci en octobre.

Les minima sont relevés en janvier et août, où ils sont dans ce cas en relation avec le couvert nuageux et la dépense d'énergie pour évaporer l'eau de pluie après les averses.

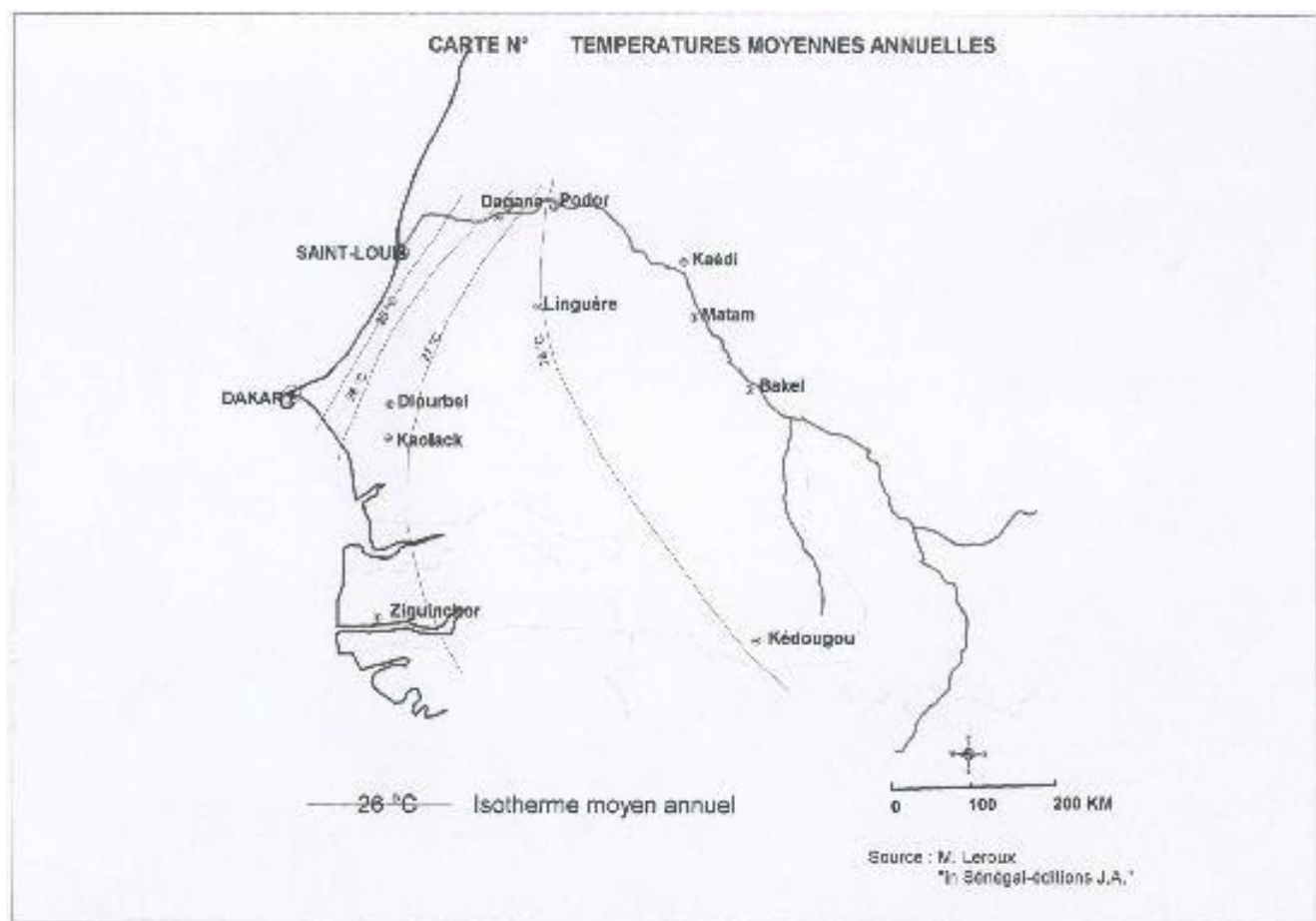


Tableau 15 : moyennes mensuelles des températures en °C (1961-1990)

Pour la station de Fanaye (moyenne 1981-1989) (source Isra-Fanaye)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
St-Louis	22.8	24.3	25.0	24.8	24.8	26.4	27.5	28.3	28.6	28.6	26.4	23.7	25.9
Podor	25.6	25.6	27.9	30.1	32.2	32.6	31.1	30.6	30.9	31.4	27.7	23.9	28.9
Matam	24.5	26.8	30.5	33.1	34.9	34.3	31.6	30.3	30.3	31.7	28.6	24.9	30.1
Fanaye	22.0	24.5	27.0	29.3	32.3	31.9	30.9	30.4	30.5	31.1	26.8	23.2	28.3

(Source Asecna-Saint-Louis)

L'analyse des températures moyennes met en évidence la saisonnalité. Pour une appréciation satisfaisante des écarts thermiques journaliers ou mensuels, il est nécessaire de travailler à partir des maxima et des minima moyens à Saint-Louis, Podor et Matam et des maxima absolus à Fanaye.

2. L'ampleur des écarts

Les maxima moyens dans la vallée dépassent 35,0°C entre mars et juillet puis d'octobre en novembre, ce qui est nettement plus qu'à Saint-Louis à cause de la continentalité.

Tableau 16 : maxima (Tx°C) et minima (Tm°C) moyens des températures dans la moyenne vallée (moyenne 1961-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	30.9	32.2	32.7	31.7	30.3	30.1	30.7	31.5	32.3	33.7	34.4	31.0
Tx	15.2	16.5	17.4	18.0	19.4	22.4	24.4	25.0	25.1	23.5	19.5	16.4
Tm												
Podor	30.6	34.4	36.7	39.2	41.0	40.7	37.4	36.3	36.7	38.1	35.0	31.5
Tx	15.3	17.1	19.1	21.0	23.4	24.5	24.7	24.8	25.1	24.2	20.4	16.4
Tm												
Matam	33.0	35.8	38.9	42.8	42.8	40.8	37.2	35.4	35.8	39.1	37.2	33.1
Tx	16.1	17.8	22.2	24.4	27.1	27.8	26.0	25.3	24.9	24.4	20.1	16.8
Tm												

A Podor, les maxima moyens atteignent 40 °C en avril, mai et juin. Les amplitudes thermiques au cours de ces mois varient entre 15 et 20 °C. Les maxima absolus moyens sont largement supérieurs à 40 °C dans la vallée. En mai et juin le thermomètre peut dépasser 45 °C alors que la moyenne des minima est de 20° (1971-2000). Les chutes de températures sont drastiques au cours de la saison fraîche, contrairement à Saint-Louis où l'influence de la mer agit en régulateur. La moyenne minimale de janvier est de 12°C à Podor. Des températures plus faibles ont été enregistrées (8°C en 1994).

Les écarts annuels entre les maxima absolus et les minima absolus peuvent dépasser 25°C.

Tableau 17 : moyenne mensuelle des températures maximales et des températures minimales absolues - Station de Podor (moyenne 1971-2000) (Asecna-Podor)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tx°C	36.1	39.5	41.8	43.3	45.2	45.0	42.6	41.3	41.5	42.3	40.2	37.3
Tm°C	12.0	14.8	18.8	17.2	19.2	21.0	20.7	22.1	21.8	20.6	17.0	12.8

Les températures sont donc élevées comme partout dans la zone intertropicale. Or plus l'air est chaud plus il peut emmagasiner d'eau sous forme de vapeur. La vallée du Sénégal connaît donc des conditions d'évapotranspiration élevées particulièrement de l'ETP.

3. Le rôle des températures supérieures à 35°C

Dans le cadre de la culture irriguée, en l'absence de la contrainte de l'eau, le régime des températures a une grande importance. Les recherches agronomiques ont relevé l'incidence directe des températures sur le développement végétatif des plantes et par conséquent sur leur productivité.

Des suivis écologiques à Nianga (département de Podor) en 1977 ont montré que certaines variétés de riz (N 22, Carrenon, P215-936..) présentent des taux d'avortement allant de 33 à 57 % lorsque la température atteint 35°C en 4 h ⁽¹⁾. D'autres études faites par l'OMVS ont révélé que les rendements du sorgho sont meilleurs lors de cultures précoces, avant que les températures ne dépassent 35 °C ⁽²⁾.

L'étude fréquentielle des maxima montre que les hautes températures (celles supérieures à 35 °C) sont enregistrées en toute saison et tous les mois.

¹ Lucido M., 1977

² OMVS., 1987

Si la fréquence est de 1/10 ⁽¹⁾ en février, elle est de 7/10 entre mars et novembre et 9/10 aux mois d'août et septembre puis tombe à 2/10 en décembre. On peut par conséquent considérer qu'entre décembre et février la moyenne fréquentielle est de 1/10. C'est aussi au cours de ce trimestre que les températures inférieures à 15 °C sont souvent relevées (9/10 en décembre, 10/10 pour janvier et 9/10 pour février).

Des températures supérieures à 40 °C sont très fréquentes en saison humide avec des maxima de 45 °C (en août 1981). Ces fortes chaleurs ne sont pas associées aux passages de grains orageux sur les stations de la moyenne vallée. Elles surviennent particulièrement lors des périodes d' « arrêt » des pluies. Le recoupement effectué à partir du moment des pluies par décade et des relevés des températures maxima et minima absolus par décade confirme cette affirmation.

L'augmentation des températures de l'air dans la vallée s'explique par la continentalité. Le gradient méridien impose sa marque à l'est. Aussi, il est fort probable que les maxima absolus sont plus élevés à Matam, la fréquence des fortes températures également. Les écarts entre maxima et minima s'accroissent considérablement.

En résumé, les régimes thermiques dans la moyenne vallée offrent des conditions d'évaporation très élevées d'autant plus que les tendances observées de 1961 à 1990 semblent montrer une augmentation de la chaleur ; tendances confirmées par les régressions linéaires dans trois stations (Podor, St-Louis et Matam) (voir fig. 6, p. 130)

La température a augmenté de l'ordre de 1°C à Podor entre 1961 et 1988 et de 2°C entre 1971 et 2000 (voir tableau 19).

Tableau 18 : évolution de la température moyenne annuelle station Podor
(source Asecna-Podor)

	Moyenne 1961-1970	Moyenne 1971-1980	Moyenne 1981-1988
Température (°C)	28.6	28.9	29.4

Ce phénomène n'est pas local, il n'est pas seulement limité à cette station. Son extension est régionale. L'augmentation de la température se vérifie en amont à Matam et dans le delta précisément à Saint-Louis.

1) l'observation est faite sur une période de 10 ans

REGRESSION LINEAIRE

FIG 6

Tableau 19 : évolution de la température moyenne annuelle (°C) (source Asecna-Yoff)

	Moyenne 1956-1965	Moyenne 1966-1975	Moyenne 1971-1986	Moyenne 1987-2000
St-Louis	24.4	25.9	26.1	-
Matam	28.5	29.3	30.3	-
Podor	-	-	28.7	31.1

Cette hausse entraîne une augmentation de la capacité d'évaporation de la végétation et des cultures irriguées. « *Les molécules animées d'une plus grande vitesse se détachent plus facilement ; ainsi l'évaporation augmente* » (H. Elhaï, 1968). Cette forte chaleur agit sur le sol, causant l'assèchement des terres, leur dessiccation.

III - L'HUMIDITE DE L'AIR

La teneur en eau de l'air dépend des advections d'air, puisque l'air en contact avec de l'eau évapore. Plus l'air a été en contact avec de l'eau, et plus donc il est chargé en vapeur d'eau.

On peut l'exprimer de différentes façons.

L'humidité spécifique, ou tension de vapeur qui peut être mesurée et qui décrit la quantité d'eau présente à un moment donné dans 1 m³ d'air, selon sa pression et sa température. L'humidité relative définit le rapport à l'humidité saturante (100 %) de l'humidité spécifique.

Donc, l'humidité relative moyenne exprime le pourcentage de saturation de l'air et s'il ne permet pas sans référence à la température et à la pression de calculer le potentiel d'eau susceptible d'être absorbé par l'air, il suffit à analyser la pérennité de la température, en admettant que celle-ci s'arrête chaque fois qu'elle est à 100 %.

1. Variation dans l'espace

De façon générale, l'humidité varie d'une région à l'autre. Dans la haute vallée, elle croît avec l'augmentation des précipitations dès le mois de mai et avec l'altitude qui abaisse les températures. Les maxima de l'humidité relative dépassent 90 % entre juillet et octobre. Les minima sont creux au cours de cette période. En saison sèche, ils oscillent entre 10 % et 20 % à cause de la continentalité et de l'influence desséchante de l'harmattan.

Dans le delta, l'humidité relative est plus élevée. Les maxima sont toujours supérieurs à 70 %. En mars, ils atteignent près de 82 % et plus de 85 % entre avril et mai, mois caractérisés par une forte chaleur dans la vallée. L'effet de l'alizé maritime est notoire pendant cette période. Les minima sont moins bas. Ils varient entre 25 et 50 % lors des passages des vents du nord-est.

En saison des pluies, août et septembre, les valeurs atteignent 93 et 94 %. Dans le delta, grâce à l'humidité atmosphérique élevée, se forment des brouillards, des brumes humides et de la rosée.

Les condensations sont des phénomènes nocturnes dus au refroidissement des surfaces par rayonnement. Si elles ne sont pas comptabilisées, leur rôle dans la naissance des plantes cultivées est important. Par exemple le nombre de jour de rosée est élevé à Saint-Louis.

On en observe presque tous les jours à la fraîche saison, en particulier entre janvier et avril-mai. La manifestation de la rosée est beaucoup plus fréquente sur le littoral entre Dakar et Saint-Louis ; la quantité d'eau fournie par la condensation est élevée. H. Masson (1950) a calculé pour Dakar, qui présente beaucoup de similitudes sur le plan climatique avec le delta, qu'en une nuit on obtient 20 000 m³ d'eau condensée.

L'humidité relative est peu élevée dans la moyenne vallée en comparaison du delta et du Haut bassin. Au cours de l'hivernage, les maxima moyens de l'humidité relative à Podor comme à Matam sont 60 et 65 %. Les maxima absolus oscillent entre 70 et 85 % et les minima entre 35 et 50 %.

Tableau 20 : moyenne mensuelle de l'humidité relative (%) (1961-1990) (Source Asecna- Podor et Yoff)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	46.1	51	56	63	67.6	76.2	78.4	80.3	79	68.4	57.3	49.2
Podor	30	29.6	31.0	32.6	33.4	43.6	56.8	62.6	61.1	44.7	34.0	31.5
Matam	30.5	28.4	25.6	24.0	27.6	40.0	54.3	64.8	64.9	47.9	34.7	33.0

En saison sèche, les minima sont plus faibles : 10 à 25 % de novembre aux mois de mai et juin et les maxima varient entre 30 et 50 %. La continentalité, la fréquence de l'alizé continental expliquent la sécheresse de l'air en cette période. Elles compliquent le cycle végétatif, car elles déshydratent la partie aérienne des plantes dont les besoins en eau sont très élevés.

En fin de saison pluvieuse, intervient un autre facteur, la crue « *qui fait décaler les courbes d'humidité relative par rapport à celle des précipitations* » (P. Michel, 1973).

Tableau 21 : maxima et minima moyens mensuels d'humidité relative (%) (1961-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis												
Maxi	67.4	75.4	81.8	86.7	87.0	92.1	91.0	93.0	93.9	91.2	84.4	73.5
Mini	24.9	26.6	30.2	39.4	48.2	60.4	65.8	67.7	64.2	45.7	30.2	25.1
Matam												
Maxi	39.9	39.2	36.1	33.4	37.1	56.1	72.8	84.3	85.8	70.1	50.0	45.2
Mini	13.7	12.9	12.2	11.7	14.6	23.7	36.1	48.4	45.3	25.7	16.6	15.4

(Source Asecna-Yoff)

L'évaporation est forte lorsque l'air ne contient que 20 à 30% d'humidité ; elle est plus faible lors du passage de la mousson. Mais, elle ne descend jamais à des niveaux très bas.

2. Variation interannuelle et tendances

Tableau 22: variabilité de l'humidité relative (HR %) à Matam de 1981 à 1990

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
HR Maxi	55.4	53.9	51.3	51.4	51.6	54.3	56.9	55.2	57.4	55.2
HR Mini	21.9	21.4	20.3	20.7	21.3	24.2	24.8	24.1	24.9	22.6
HR Moyenne	38.6	37.6	35.8	36.0	36.4	39.2	40.8	39.6	41.1	38.9

(Source Asecna)

A l'instar de la pluviométrie et des autres composantes du climat, l'humidité relative varie d'une année à l'autre. Au cours de la décennie 1981-1990, la moyenne de 39,6 % n'a été dépassée qu'en 1987 et 1989 soit une fréquence de deux années sur 10.

Cette variation apparaît aussi clairement si l'on compare les données mensuelles d'août (mois à forte humidité) et d'avril (mois à faible humidité), année par année et par rapport à la moyenne relevée ces deux mois là de 1981 à 1990 (cf. Tableaux 21, 22, 23).

Tableau 23 : comparaison de l'humidité moyenne (%) en saison des pluies et en saison sèche à Matam de 1981 à 1990

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Mois août	70.2	69.6	59.8	54	63.8	62.2	65.1	71.2	68.7	63.7
Mois avril	20.5	25.1	24.1	22.5	20.1	21.1	21.6	20.5	23.1	27.3

La moyenne en août au cours de la décennie 1981-1990 est de 64,8 %. La fréquence pour une humidité supérieure à cette moyenne est de 5/10 ; elle est de 4/10 pour une humidité supérieure à 85 %.

En avril, la moyenne maximale durant la décennie d'observations est de 24 %. La fréquence d'un taux supérieur est de 2/10. Au cours du mois, la fréquence d'un taux d'humidité inférieur à 10 est de 4. L'analyse de l'humidité à Matam et Podor entre 1951 et 1990 révèle que les taux ont une tendance à la baisse (cf. tableau 24).

Tableau 24 : évolution des taux d'humidité (%) 1951 à 1990

(1) (source P. Michel, 1973)

(2) (source Asecna)

	1951-1960 ⁽¹⁾	1971-1986 ⁽²⁾	1981-1990 ⁽²⁾
Podor	48	41	-
Matam	51	39.6	38.4

P. Michel (1973) a noté qu'à Podor « *les maxima varient entre 50 % et 60 en saison sèche de janvier en mai* ». Au cours des années 80 et 90, ils sont de l'ordre de 30 % à 40 %.

Cette variation et cette baisse continue de l'humidité ont des incidences graves sur l'évaporation. La sécheresse de l'air inflige à la végétation et aux plantes cultivées des stress hydriques plus durables et plus importants.

Elle accroît le tribut prélevé par évaporation surtout en avril et mai, mois où l'évaporation est largement supérieure à l'humidité atmosphérique.

IV - LE VENT

Le vent est un facteur écologique de premier ordre par les effets desséchants qu'il provoque sur les plantes puisqu'il substitue en permanence de l'air nouveau donc « sec » à l'air qui se sature en eau par contact avec le sol ou les plantes. Les vents chauds et secs constituent un danger permanent d'échaudage pour les cultures de contre saison mais également les cultures de décrue.

L'analyse anémométrique de certaines stations révèle, au cours d'une année d'observation deux saisons éoliennes distinctes, par les types de vents, leur vitesse, et leurs effets sur le pouvoir évaporant (voir fig.7, p.136 et tableau ci-dessous).

1. Le régime du vent

Il est étroitement lié aux différents flux commandés par la dynamique climatique.

En saison sèche (tableau 25) l'ensemble des régions du bassin est sous l'influence des flux du nord. Le régime des alizés domine avec des directions nord, nord-est et est.

Tableau 25 : direction dominante des vents à Podor (moyenne 1961-1990)

Source Asecna-Podor

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Direction	NE	NE	NE	NE	NE	W	W	W	WSW	NE	E	NE

Les alizés continentaux chauds et secs (nord-est surtout) règnent dans la moyenne vallée. Ils sont souvent remplacés par des vents d'est ou harmattan qui se renforcent dès la fin de la saison des pluies (O. Samb., 1980 et M. Diallo., 1990).

A la fin de la saison sèche et au début de l'hivernage, s'installe, du sud au nord de la vallée, une phase de transition caractérisée par l'apparition de grains orageux. La direction des flux est alors variable. Les vents d'ouest et du sud ouest se manifestent en mai dans la haute vallée à Bakel, en alternance avec les précédents.

La moyenne vallée et le delta, qui connaissent cette situation un mois plus tard, c'est à dire en juin, sont dominés par des vents du nord-est et du nord-ouest. Cette transition est surtout marquée par une rupture d'équilibre due aux courants ascendants créés par l'infiltration de la mousson sous l'air chaud et sec des alizés continentaux.

Au cours de l'hivernage, à partir de juillet, la mousson s'installe partout et gagne entièrement la vallée. A la fin de la saison pluvieuse, à Podor, s'observe en septembre une deuxième transition plus courte et aussi moins brutale en raison de la perte de vigueur de la mousson qui annonce le retour au régime de saison sèche.

**FIG 7 FREQUENCES DES DIRECTIONS DE VENT
AU SOL St LOUIS**

En somme, deux saisons se distinguent dans la vallée. La première période s'étend selon les régions géographiques, d'octobre à juin (Podor), de novembre à mai (Bakel, Kayes). Les vents dominants sont de direction nord-est et est.

La deuxième saison se manifeste dès juillet et prend fin en septembre et octobre. Les vents sont de secteur ouest et sud-ouest. Les alizés continentaux sont responsables de la sécheresse de l'air et des amplitudes thermiques très accusées observées dans toutes les stations. Leur passage est aussi accompagné de brumes sèches. De plus en plus, on constate qu'il n'y a pratiquement pas un jour sans que la poussière n'enveloppe l'atmosphère.

A ces vents synoptiques réguliers, s'ajoutent des vents convectifs locaux très caractéristiques. A l'est de Dagana, l'air surchauffé et très instable provoque en début d'après midi en général des tourbillons qui balaient la surface du sol entraînant sables, limons en une colonne ascendante que les Toucouleurs¹ pointent superstitieusement de l'auriculaire droit.

Dans ce secteur également, se manifestent en fin de saison sèche, des vents qui réduisent la visibilité et rendent l'atmosphère poussiéreuse et suffocante.

Les brises de mer dans le delta adoucissent les températures. Par contre les vents chauds et secs augmentent la température de l'air, modifient l'hygrométrie au voisinage des feuilles. L'arrivée de la mousson est bénéfique pour la plante. Elle est surtout marquée par une légère baisse des températures. Les écarts thermiques sont plus réduits et l'humidité atmosphérique plus importante.

Une analyse approfondie de l'évolution de la direction des vents en saison des pluies révèle « un blocage » des flux d'ouest. On relève sur le tableau 24 que :

- au mois de juillet, la mousson est le vent dominant à Podor tout au long de la série d'observation (1971-1980),
- en août et septembre, cependant la tendance est régressive, le taux de fréquence des vents d'ouest diminuant au profit des flux de direction très variable ; mais, l'option qui se dessine est de direction est et nord-est. Lors de la décennie (1971-1980) (cf. tableau 26) la fréquence des vents secs et desséchants en milieu de journée et en saison des pluies n'est nullement négligeable.

¹ une ethnie de la vallée du Sénégal

Tableau 26 : fréquence des vents (en %) d'est, sud-est, et nord-est en saison des pluies à Podor (Source M. Diallo, 1990)

	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
1951-1960	20	20	10	40	50
1961-1970	10	10	10	20	40
1971-1980	30	0	30	40	10

2. Une vitesse des vents généralement faible

a) Distribution saisonnière

La vitesse du vent (calculées sur moyennes journalières) est très variable. Dans le pays d'ouest en est, la tendance générale est à la décélération du vent par suite du frottement sur le substrat continental (cf. tableau 27).

Tableau 27 : vitesse des vents en m/s (moyenne 1961-1990) (source Asecna Saint-Louis et Podor)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
St-Louis	4.1	4.2	5.1	5.2	5.4	4.7	4.6	3.7	3.3	3.5	3.4	3.5	4.2
Podor	2.3	2.3	2.2	2.3	2.6	3.2	3.5	2.4	1.9	1.6	1.6	2.0	2.3
Matam	1.0	1.0	1.2	1.2	1.8	2.3	2.2	1.7	1.6	1.1	0.5	0.8	1.3

A l'ouest précisément à Saint-Louis et dans le delta, la moyenne annuelle de la vitesse du vent est de 4,3 m/s. Elle passe à 2,5 à Podor et 1,3 à Matam. Partout elle augmente en saison sèche, en relation avec les alizés maritimes dans le delta et l'alizé continental vers l'intérieur. On remarque aussi que les mois où la vitesse est élevée se situent entre avril, mai et juin avec des maxima de 5,6 m/s à Saint-Louis, 3,4 à Podor.

En saison des pluies, elle s'affaiblit et demeure constante (2,5 m/s en moyenne en août et septembre à Podor, 1,6 à Matam). En cette saison, le pourcentage de calme est relativement élevé : 29 % à Kayes contre 18 en saison sèche, 35 % à Podor contre 31.

Le vent a des incidences nocives sur les végétaux. Les mauvais résultats agronomiques obtenus lors d'une campagne rizicole (en 1976) dans la vallée, à Guédé, sont à mettre en relation avec des vitesses de l'ordre de 2,5 à 2,7 m/s (M. Lucido, 1977). L'étude fréquentielle nous révèle que la vitesse 2,5 m/s est souvent dépassée dans le secteur.

b) Variabilité fréquentielle

L'étude fréquentielle de la vitesse du vent à Fanaye sur la décennie 1981-1990 et par décade permet de dégager une rythmicité (tableau 28).

Tableau 28 : fréquence des vents supérieurs à 2,5 m/s par décade (en %)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Décade 1	37	43	22	22	33	33	45	50	50	40	20	20
Décade 2	26	-	33	45	22	33	33	30	40	50	50	30
Décade 3	37	57	45	33	45	33	22	20	10	10	30	50

On s'aperçoit qu'au cours de la saison sèche, les périodes de vent supérieur à 2,5 m/s surviennent lors de la deuxième et de la troisième décade, avec une dominance aux mois de décembre, mars, avril et mai. Pendant l'hivernage, la vitesse est plus forte en général les dix premiers jours du mois entre juillet et octobre.

Cette vitesse change continuellement au cours de la journée (cf. tableau 29). Les moments où les vitesses sont les plus fortes se situent entre 08 h et 18 h. Aux mois de mai et juin, le vent est puissant entre 12 h et 18 h. Les soirs, le calme règne. Alors, la force du vent diminue de 70 % environ.

Les vitesses supérieures à 2,5 m/s sont observables tous les mois, en particulier en saison sèche, précisément au cours des vingt derniers jours du mois entre 12 et 18 h.

En saison pluvieuse l'accélération du vent a pour corollaire des précipitations orageuses. Dans le delta et la basse vallée « *des vents supérieurs à 5 m/s surviennent entre 12 et 15 h* » (M. Sall, 1983).

Les moments de renforcement des vents dans la vallée en saison sèche coïncident avec l'installation des alizés continentaux. L'accélération de la vitesse des vents aggrave les pertes en eau. On a observé dans la moyenne vallée les effets du vent sur les pertes en eau.

Dans la région, une augmentation de la vitesse du vent de 34 % entraîne un accroissement de 26 % de l'évaporation (M. Lucido, 1977). En plus, les effets du vent dans le secteur de la vallée sont très désastreux si le sol est dépourvu d'eau et si l'humidité est au point de flétrissement.

Tableau 29 : vitesse du vent (m/s) ; moyenne horaire au cours de la journée (février 1990 à janvier 1991 Fanaye (Isra))

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
8-12h	2.8	3.0	2.3	3.3	3.4	3.7	2.6	3.3	2.4	2.3	2.9	2.8
12-18h	3.2	2.8	2.1	3.5	3.9	3.6	2.8	2.6	1.9	2.3	3.2	2.8
18-8h	2.8	2.7	1.7	2.5	3.0	2.7	2.5	2.5	1.6	1.7	2.2	2.1

N.B : Données difficiles à comparer en raison de la durée différente des tranches horaires et de la courte période d'observation (1 an) dans une seule station

Il ressort de l'étude des éléments des paramètres climatiques de l'évapotranspiration sur la période 1961- 1990 :

- une fréquence non négligeable de vents secs en période d'hivernage (août et septembre),
- une hausse des températures de 1°C (au minimum) qui se vérifie dans toutes les stations de la vallée, jusqu'en 1990,
- une humidité relative en baisse au cours de la période.

Ces tendances qui interviennent sur le climat ont de fortes incidences sur l'évapotranspiration, qui s'en trouve augmentée.

CHAPITRE 2 : MESURES ET METHODES DE CALCUL DE L'ETP

L'évapotranspiration potentielle est une donnée importante en bioclimatologie. Elle permet d'approcher la notion de déficit hydrique dont la connaissance, même théorique, peut constituer une approximation suffisante des besoins en eau de la végétation ou de la culture de référence.

L'évapotranspiration est évaluée par le biais de mesures souvent complexes exigeant parfois un appareillage compliqué. Les données ci-dessous sont ou bien mesurées avec le bac normalisé classe A, le bac enterré ou bien calculées selon des méthodes variées. Les mesures de l'ETP d'un gazon sont aussi effectuées suivant des techniques diverses brièvement évoquées.

I - LES TECHNIQUES DE MESURE

1. Les mesures par bacs de l'évaporation

La tranche d'eau évaporée par le bac normalisé classe A s'élève annuellement à près de 3 m entre Dagana et Matam. L'évaporation augmente rapidement dès le mois de février pour atteindre son maximum en mai, puis elle baisse pendant la saison des pluies. Dans le département de Podor, précisément à la station de Fanaye (ISRA), les pertes sont élevées, la moyenne journalière est de 10 mm (cf. tableau 30).

Tableau 30 : Evaporation journalière bac A (mm) - station de Fanaye – source ISRA

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Moyenne 1981-90	9.8	10.6	11.7	13.1	13.8	11.8	9.5	8.6	8.1	9.4	9.1	8.9	10

La haute vallée et le delta enregistrent des valeurs plus faibles (OMVS, 1990). A la station de Mahina, à Manantali, les pertes annuelles sont évaluées à 2 200 mm. Durant six mois consécutifs, de juin en décembre, la tranche d'eau évaporée est de 7 mm/j. Elle descend à 3 mm/j entre juillet et octobre.

Dans le delta, l'évaporation diminue progressivement en saison sèche de 8 mm/j en décembre à 5,1 mm/j au mois de mai et reste pratiquement constante en saison des pluies à 4 mm/j. La lame d'eau évaporée est légèrement supérieure à 2 m.

Partout dans le bassin, les pertes sont énormes et s'expliquent par la sévérité des conditions climatiques.

Les bacs d'évaporation (normalisé classe A ou Colorado enterré) sont installés dans plusieurs stations dans la vallée (à l'exception de Matam). Les données existent à Richard-Toll depuis 1970, à Saint-Louis, Podor, Bakel.

Ces instruments ne fournissent pas obligatoirement des indications exactes sur l'évaporation d'une grande étendue sous le climat de la vallée où l'effet d'oasis ou bien «*effet de bord* » (selon J. Le Borgne) peut être considéré comme important pendant plus de la moitié de l'année (D. Rijks, 1976).

Leur emplacement au-dessus du gazon ou d'un sol nu peut entraîner des différences dans les mesures de l'évaporation. La comparaison entre évaporation bac classe A et bac enterré (type ORSTOM ou IRD) montre les dissemblances dans les moyennes (décadaires) allant «*jusqu'à 1 mm/j* » (D. Rijks, 1976).

Un bac normalisé classe A (voir photo 4, p.143) installé sur sol nu évapore moins qu'un bac enterré pendant les périodes d'hivernage et post-hivernage. Les températures du sol élevées à cette époque de l'année semblent en être la cause principale.

Une corrélation peut-être calculée entre les deux instruments en fonction de la saison. Au Sénégal, l'évaporation bac enterré est égale à :

0,98 bac normalisé classe A en saison sèche et

1,05 en saison des pluies (C. Dancette, 1973)

ou bien, pour D. Rijks (1976),

l'évaporation bac normalisé est égale à 0,95 évaporation bac enterré ;

toutefois pendant le reste de l'année de novembre en mai (températures minimales plus basses) le coefficient devient égal à 1,02.

Quelles que soient les formules appliquées les corrections sont donc minimales.

Les stations météorologiques de la vallée sont aussi équipées d'un évaporomètre Piche (à l'exception de Richard-Toll). Il s'agit d'une mesure simple pratiquée depuis 1970.

L'appareil placé sous abri n'est pas sensible à l'insolation. Il n'est donc pas représentatif dans cette région où l'évaporation est due à la forte radiation.

Seulement en conditions bien contrôlées, des corrélations sont établies avec d'autres méthodes comme celle de Bouchet ; ce qui permet d'estimer la demande évaporative là où le Piche est la seule donnée disponible.



Photos 4 : un bac d'évaporation classe A- station Saint-Louis
Diop (juillet 2001)

2. Mesures de l'ETP gazon

Les mesures de l'évapotranspiration potentielle d'un gazon (la variété testée est *Cynodon dactylon*) ont commencé à Richard-Toll dans la basse vallée en 1965. Elles sont effectuées par l'Institut de Recherche en Agronomie tropicale (IRAT) qui a également poursuivi en septembre 1969 les mêmes opérations dans le cadre du projet canne à sucre et de mise en valeur du fleuve par l'OMVS. Elles sont arrêtées en octobre 1971 au moment du transfert des cuves lysimétriques à Guédé (D. Rijks, 1976).

En plus des lysimètres, d'autres appareils sont également utilisés : la règle graduée, l'humidimètre à neutrons, le tensiomètre...

Les lysimètres (photo 5, p 145) sont des cuves étanches à parois verticales. L'eau de drainage y est recueillie et mesurée. Un bilan par pesée de l'ensemble de la case est effectué. La station de Richard-Toll recouverte d'une pelouse dans sa partie sud avait trois cuves lysimétriques pour mesurer l'ETP. Au-dessus du gazon fréquemment arrosé, un ensemble d'appareils de mesure du rayonnement solaire (bilan énergétique) est installé.

A la station de Ndiaye dans le delta, les lysimètres sont de simples fûts à huile, en métal, d'environ 200 l de capacité. Le diamètre est de 0,56 et la hauteur 0,94 m. Pour ne pas créer des différences d'évapotranspiration on veille à ce qu'à l'intérieur du fût, la lame d'eau, la densité du semis, la dose de fumure et tout autre traitement de la végétation ou de la culture de référence soient semblables à ceux du champ (B. Sy et D. Raes, 1992).

Les lysimètres ont servi à mesurer l'ETP gazon au Sénégal. Ils sont aussi utilisés pour déterminer les besoins en eau de la canne à sucre. Ils sont employés dans les stations de recherche (ISRA) en Casamance (à Ziguinchor), au sud du Sénégal, pour mesurer l'ET maximale (ETM) du riz pluvial et à Bambey (centre du Sénégal) pour les cultures de l'arachide et du mil. Dans le delta, à Ndiaye, les lysimètres servent à déterminer les besoins en eau du riz (cf. tableau 31, p.146).

Photo 5 : exemple d'une cuve lysimétrique–SAED-Ross-Béthio (Diop, août 2002)

Tableau 31 : ETP gazon (mm) mesurée à l'aide de cuves lysimétriques à Richard-Toll

(1) Source Isra rapport d'activité, C. Dancette (1983)

(2) D. Rijks, 1976

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1965 (1)	mm j Valeur Totale	4.4 136	4.8 134	4.7 146	6.4 192	6.5 201	6.5 195	6.4 198	5.8 180	3.0 90	4.3 133	5.1 153	5.3 165	1923
1969- 71 (2)	mm j Valeur Totale	4.4 136	5.3 148	7.4 229	8.7 261	8.7 270	9.2 276	7.5 232	6.1 189	5.6 169	5.9 183	5.7 171	4.5 139	2402

Tableau 32 : ETP décadaires (1, 2, 3) mesurées au lysimètre en septembre, octobre et novembre 1991 (en mm) ; station de Ndiaye (hivernage 1991)

Source : D. Raes et B. Sy (1992)

	Septembre			Octobre			Novembre		
Décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ETP riz (mesurée)	6.0	6.8	8.2	8.1	8.8	9.7	8.9	8.1	6.0

N.B. : les valeurs lues sur la courbe ETP mesurée (riz) sont plus fortes que celles du gazon testé (variété testée *Cynadon dactylon* à Richard Toll, voir tableau 29) en fin de saison des pluies et début saison sèche.

L'humidimètre à neutrons est installé à Ndiol (également dans le delta) par l'ISRA. L'établissement du bilan hydrique « in situ » au moyen de cet appareil exige des conditions difficiles à retrouver dans la zone d'étude à savoir :

- sols sableux relativement homogènes, profonds, absences de cailloux,
- profils hydriques initiaux très secs,
- relief plat etc...

Le tensiomètre permet de s'assurer de la direction des flux et surtout de savoir, si à un niveau donné, il peut y avoir de la percolation que l'humidimètre seul n'aurait pas décelée. L'usage simultané de ces deux appareils est un bon moyen pour caractériser la dynamique de l'eau dans le sol (conductivité hydraulique par drainage interne) exemples à Guédé et Richard-Toll (Vachaud et al.1977).

La technique de la règle graduée est utilisée à Ndiaye et à Lampsar (zone du delta) pour évaluer dans les cuvettes la consommation en eau par évapotranspiration du riz et par percolation.

Les expériences se sont déroulées entre août et novembre, c'est à dire pendant la période de la culture du riz, soit l'hivernage.

Tableau 33 : ETP décadaires (1,2, 3) en mm mesurées à la station de Lampsar (delta) en 1991 ; Source : Raes et Sy (1992)

	Août			Septembre			Octobre			Novembre		
Décades	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ETP mesurée à la règle	-	8.3	8.2	-	9.6	9.6	8.1	-	9.1	9.5	9.2	-

Les appareils de mesure de l'évaporation sont de plus en plus nombreux et variés pour les besoins de la recherche agrométéorologique. Dans cette diversité d'instruments et de techniques, des agrométéorologistes (D.Rijks, 1976) ont réussi à établir d'autres corrélations. Le rapport entre ETP gazon mesuré au lysimètre et l'évaporation bac normalisé classe A varie de 0,8 pendant l'hivernage et 0,7 en saison sèche.

La demande évaporative mesurée par le bac A intègre les effets climatiques qui agissent directement sur la nappe libre. Les données du bac A et celles obtenues à l'aide de cuves lysimétriques vont servir de référence et de comparaison aux besoins en eau estimés à l'aide de plusieurs formules.

II - METHODES DE CALCUL DE L'ETP

Les formules élaborées par les chercheurs sont nombreuses. Il n'y en a pas une qui puisse satisfaire à tous les milieux bien trop divers à l'échelle fine (climat sol...). Parmi les diverses méthodes développées pour estimer l'ETP, une dizaine est sélectionnée et il est possible de les regrouper en deux grandes catégories : les méthodes purement empiriques et les méthodes analytiques ou mathématiques.

Un modèle est joint aux formules en particulier celles ne présentant pas un organigramme. Elles sont appliquées à la station de Podor en janvier (un mois de la saison sèche) et en août (période d'hivernage).

1. Les méthodes empiriques

Elles permettent d'obtenir des estimations de l'évaporation d'une nappe à l'aide de facteurs météorologiques facilement mesurables. Parmi les plus courantes on peut citer celles de : Turc, Thornthwaite, Bouchet, Prescott, Haude, Olivier et Makking.

a) La formule de Turc

La plus simple, la formule repose sur deux données : la température et la durée de l'insolation. Elle permet d'introduire l'humidité lorsqu'elle est supérieure à 50 %. La formule s'écrit de la façon suivante :

$$\text{ETP (mm)} = K \times [T^{\circ} / (T^{\circ} + 15)] \times (R_g + 50)$$

K = 0,013 x nombre de jours

T° = température moyenne annuelle en degré Celsius

R_g = la radiation solaire globale exprimée en calories/cm²/j. Elle est fonction de la durée moyenne d'insolation h et s'obtient par la formule :

$$R_g = I_g A (0,18 + 0,62) (h/H)$$

I_gA = radiation globale quotidienne moyenne en l'absence d'atmosphère ; elle est donnée par des tables (cf. annexe 4 ; table 1, à la page 341)

h = durée réelle moyenne d'insolation pendant la période considérée

H = durée moyenne d'insolation possible en heures pendant la période considérée. C'est la même valeur que h mais en l'absence de nuages. Elle est déterminée par la latitude et obtenue par des tables (cf. annexe 4 ; table 2, à la page 342)

Lorsque l'humidité relative est inférieure à 50 %, il est nécessaire de multiplier le résultat obtenu par le correctif suivant :

$$U \text{ (étant l'humidité relative)} = (120 - U / 70)$$

L'organigramme ci-dessous (tableau 34) établi par J. Le Borgne permet d'opérer facilement les calculs.

ORGANIGRAMME (tableau 34)

LIEU

LATITUDE

CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE : FORMULE DE TURC

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
U≥50 T° T°+15 h H													
0,18+ (0,62xh/H) x IgA = + 50 x [T°/(T°+15)] = x K ETP(mm) →													
U< 50 x (120 - U / 70) ETP (mm) →													

b) La formule de Thornthwaite

Elle n'exige pas qu'une seule donnée : la température. La formule est la suivante :

$$\text{ETP (mm)} = \text{ETP non corrigée} \times K$$

ETP non corrigée = $16 \times ((10 T^\circ) / I)$

T° = température moyenne de la période considérée.

I = indice thermique annuel obtenu en passant par I mensuel
(cf. - annexe 4 ; table 3, à la page 343).

a = fonction complexe de l'indice thermique I, il est égal à
 $0,92621 / (2,42325 - \log I)$

K = coefficient de correction pour tenir compte de la durée théorique de l'insolation de la station considérée laquelle est directement fonction de la latitude et du nombre de jours du mois (cf. annexe 4 ; table 4 page 344).

Un tableau en annexe fournit directement ce coefficient de correction.

L'organigramme ci-dessous (tableau 35) permet d'effectuer aisément les calculs.

ORGANIGRAMME- ETP THORNTHWAITE (tableau 35)

LIEU

LATITUDE

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE : FORMULE DE THORNTHWAITE

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Température Moyenne mens.													
Indice I													I = log I =
Log (T°)													0,92621 a = $\frac{0,92621}{2,42325 - \log I}$
Log (T°) - 1,42325													
x a													
+ 2,13033													
ETP non corrigé													
Coefficient de Correction													
ETP (mm)													

c) La formule de Bouchet

Elle est basée sur l'emploi de l'évaporomètre Piche.

$$\text{ETP (mm/J)} = \alpha \text{ Ep } \lambda(q)$$

α = 0,37 dans le cas où le Piche serait placé dans un abri anglais à 2 m du sol.

Ep = nombre de millimètres d'eau évaporée dans le Piche en 24 h

λ = coefficient fonction de la température q
(voir table 5 page 345; annexe 4).

q = température moyenne entre la température de l'air et la température du point de rosée.

La formule d'ETP dite du Piche corrigé est calculée à partir d'un évaporomètre installé en abri classique ou abri simplifié (AMPS) mis au point par les bioclimatologues de Versailles (France). Elle est testée au Sénégal, à l'IRAT de Bambey (P. G. Schoch, 1968).

Son application a nécessité une adaptation, une correction par un coefficient K relativement constant en saison sèche (voir tableau 36). L'utilisation de la formule en saison des pluies et surtout à la fin de l'hivernage est plus délicate.

Tableau 36 : coefficient de Bouchet du Piche corrigé à Richard-Toll- moyenne décadaire

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
K	0,13	0,10	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,16	0,14	0,3	0,17

(Source Isra-1968)

Exemple d'utilisation de la formule :

Station de Podor (janvier 1990)

Donnée source Asecna Dakar

$\alpha = 0,37$

$E_p = 7,9 \text{ mm/j}$

$K = 0,13$

$E_v \text{ Piche corrigée} = E_p \times K = 1,027$

$\lambda = 2,54$

Température de l'air = $22,3^\circ\text{C}$

Température de rosée (moyenne 1968-77) = 2°C

$Q = 22,3^\circ + 2^\circ / 2 = 12,15^\circ\text{C}$

$ETP (\text{mm/J}) = 0,37 \times (1,027) \times 2,54 \times (12,15) = 11,7 \text{ mm/j}$

d) Les formules de Prescott

Deux formules sont proposées par Prescott. L'une pour l'estimation de l'évaporation, l'autre pour l'évapotranspiration. Elles sont basées sur la température, l'humidité de l'air et la culture considérée.

1^{ère} Formule :

$E_w = k \times s_d$

s_d = déficit absolu de saturation en mm

k = 21,9 pour mois de 31 jours ;

21,2 pour mois de 30 jours ;

19,8 pour mois de 28 jours.

E_w = évaporation mensuelle en mm d'une surface d'eau libre

H_g = tension de vapeur saturante à la température moyenne du mois (table 6 page 345 en annexe 4) x déficit relatif

déficit relatif = $1 - \text{humidité relative mensuelle}$

La méthode de Prescott du calcul de l'évaporation (E_w) d'une surface d'eau libre est d'une grande simplicité. Elle nécessite la connaissance de deux paramètres : l'humidité atmosphérique et la température ; le déficit de saturation (s_d) est déterminé à partir de la tension de vapeur saturante (qui dépend de la température) et du déficit relatif. La tension de vapeur (H_g) est fournie par une table en annexe.

Exemple de calcul de la formule

Station de Podor août 1990

Température = 31°C

Tension de vapeur (H_g) = 33,596

Humidité relative = 88,9%

Déficit relatif = 1 - (88,9%=0,889) = 0,111

$E_w = 21,9 (33,596 \times 0,111) = 82\text{mm}$ soit 2,6mm/j

2^{ème} Formule (calculée à l'aide des logarithmes) :

$ET = k \cdot E_w^{0,75}$

ET = Evapotranspiration potentielle en cm par mois

E_w = Evaporation d'une nappe libre en cm/mois

K = coefficient variable suivant la végétation

3,1 pour une rizière de très fort rendement

2,4 pour une rizière de rendement normal

2,0 pour les plantes évaporant énormément

(cultures de céréales, pâturages intensifs, engrais vert)

1,5 pour les plantes d'évaporation moyenne

(prairie naturelle et les bassins de réception en général)

1,0 pour les vignobles, culture arbustive ou sol nu

0,5 limite de survie de la plupart des plantes, plantes grasses.

La formule d'ET de Prescott est calculée à l'aide des logarithmes. Pour l'utiliser, il faut abaisser la puissance en appliquant la formule suivante :

$$\text{Log } x^n = n \log x$$

Exemple de calcul avec la formule d'ET

$E_w = 82 \text{ mm} = 8,2 \text{ cm}$

K = 1 (coefficient d'un sol nu)

$ET = 1 \times (8,2)^{0,75}$

$\text{Log } ET = 0,75 \log (8,2) = 0,75 (0,9138138)$

$\text{Log } ET = 0,68536$

$ET = 4,9 \text{ cm} = 49 \text{ mm}$

e) Formule de Haude

Elle repose essentiellement sur l'humidité relative.

$$E_w = 11,5 \times (E - e)$$

E_w = Evaporation en mm/mois d'une nappe d'eau libre

$E - e$ = déficit de saturation en mm Hg mais à 14 h et à 2 m du sol

Evaporation par jour = $0,37 \times (E - e) = (0,37 \times 31) = 11,5$

Exemple de calcul de la formule de Haude

Station de Podor (janvier 1990)

Tension de vapeur (Hg) pour une température de $22,3^\circ\text{C} = 20,022$

Humidité relative % = 46,5

Déficit relatif = $1 - 0,465 = 0,535$

$E - e = 20,022 \times 0,535 = 10,7$

$E_w = 11,5 \times (10,7) = 123,2$ mm/mois

$E_w = 3,97$ mm/j

f) Les formules d'Olivier

Les formules se basent sur les thermomètres sec et mouillé. L'une est réservée à l'évaporation (M_p) et l'autre évalue la quantité de base à apporter à une culture (en mm/j).

1^{ère} Formule (F1) :

$$M_p = C / L\emptyset S$$

M_p = évaporation en mm/j d'une cuve standard à la latitude sud.

C = diminution en $^\circ\text{C}$ de la température d'un thermomètre humide par rapport au thermomètre sec (moyenne du mois). Les différences de température doivent être prises vers 9 h du matin.

$L\emptyset S$ = rapport (L / L_o) (rapport de radiation pour la latitude sud)

$L\emptyset S$ = est donné par les tables (en annexe 4 ; table 7 page 346)

2^{ème} formule (F2) :

$$\text{Cuf} = C \times (L_o / L_2) = C \times W\emptyset = M_p / L$$

Cuf = évapotranspiration ou quantité de base à apporter pour une culture en mm/j à la latitude d'un hémisphère (\emptyset)

C = moyenne mensuelle de la diminution en °C d'un thermomètre humide par rapport à un thermomètre sec

$W\emptyset = (L_o / L_2)$ facteur cyclique pour un mois particulier (radiation par rapport à la latitude). $W\emptyset$ est donné par les tables (en annexe 4 ; table 8 page 346)

L/L_o = variation mensuelle du rapport de la radiation totale L à la radiation verticale (R_v) pour une latitude déterminée.

L = R/R_v

L = valeur annuelle

L_o = valeur mensuelle de L

La méthode d'Olivier est testée dans l'hémisphère sud ; les paramètres doivent être corrigés et adaptés pour un usage aux latitudes nord. La correction est tout à fait simple. Il suffit d'inverser les saisons donc les mois.

Exemple, le mois de janvier en latitude sud correspond à la situation de juillet à la latitude nord ; février dans l'hémisphère sud est égal au mois d'août en latitude nord.

F1 : La formule d'évaporation d'une cuve en mm/ j est estimée à l'aide de la différence de la température d'un thermomètre humide et d'un thermomètre sec.

Exemple de calcul

Station de Fanaye (ISRA) où de telles mesures sont opérées

$M_p = C / L\emptyset S$

$C = 5,5^\circ$ en janvier 1988 (¹)

$L\emptyset S$ = rapport de la radiation est obtenu directement à l'aide d'une table en annexe (il faut à cette occasion inverser les saisons et les mois).

En janvier, $L\emptyset S = 1,12$

M_p ou $E_w = C / L\emptyset S = 5,5 / 1,12 = 4,9$ mm/j

F2 : Le calcul de l'ETP par la méthode d'Olivier est aussi simple. Le même paramètre est utilisé. La valeur de L_o/L_2 est donnée par des tables (en annexe 4; table 8). La précaution à prendre est de l'adapter à l'hémisphère nord.

Exemple de calcul

Station de Fanaye (août 1988) (source ISRA)

$\text{Cuf} = \text{ETP} = C \times (L_o/L_2)$

$C = 2,0$

$L_o/L_2 = 0,72$

$\text{ETP} = 2 \times (0,72) = 1,44$ mm/j

¹ les données de la température des thermomètres humide et sec sont portées en annexe 3

g) Formule de Makking

La formule repose sur la connaissance de la radiation solaire vraie. Elle est la suivante :

$$E_p = 0,61 R_m \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0,12$$

E_p = ETP en mm/ J

Δ = pente de la courbe température sur pression de vapeur saturante (cf. table 9 ; page 347, en annexe 4).

γ = constante psychométrique = 0, 49 mm Hg / °C.

R_m = radiation solaire mesurée en mm/j. On passe facilement des petites calories/cm²/j, aux mm d'eau en divisant par la chaleur de vaporisation de l'eau (voir annexe 4 ; table 1). A 24,4°C, 589,6 calories sont nécessaires pour vaporiser 1 g d'eau.

En général, on utilisera la formule : R en mm d'eau / j = R_m en petites calories / cm² / 58,9 ou 59. R_m est mesuré directement par un solarimètre Kipp ou Gun Bellani étalonné en cal/gr/cm².

La formule de Makking est facile à utiliser. La température et l'emploi des tables en annexe permettent d'estimer les besoins en eau de la végétation. La radiation solaire doit être exprimée en mm/j ; sur la table, les valeurs sont en calories / cm² ; il faudra aussi prendre soin de corriger les saisons suivant la latitude.

Δ est obtenu grâce à la température.

Exemple de calcul station de Podor (août 1990)

R_m (mm/j) = R_a (cal/cm²) / 59 = 895 / 59 = 15,2

Δ = 1,93 pour une température de 31,1°C

γ = 0,49

ET = 0,61 x (15,2) x 1,93 / 1,93 + 0,49 - 0,12 = 7,3 mm/j

2. Les méthodes analytiques ou mathématiques

Elles font appel au bilan énergétique. D'autres sont basées sur les théories de transfert turbulent. Certaines combinaisons des méthodes du bilan énergétique et du transfert turbulent ont conduit au développement de méthodes mixtes. La plus connue et la plus utilisée est celle de Penman.

a) Formule de Penman^{*}

La formule se compose de deux termes :

- l'un concerne l'évapotranspiration due au rayonnement net
- l'autre, E_a , est l'évapotranspiration due au pouvoir évaporant de l'air. Il est fonction des caractéristiques de la masse d'air, c'est à dire de la tension de vapeur et de la vitesse du vent.

a1)- R_n , ou rayonnement net se calcule d'après la formule de Brundt :

$$R_n = I_g A \times (1-a) \times (0,18+0,62(h/H)) \times \sigma T^4 \times (0,56+0,08V(e)) \times (0,10+0,90(h/H))$$

$I_g A$ = la radiation solaire en l'absence d'atmosphère. exprimée en cal/cm², elle est donnée par des tables (en annexe 4 ; table 1).

a = l'albédo de la surface évaporante :
0,05 environ pour une nappe d'eau ;
0,25 pour des étendues de savane ou de steppe ;
0,20 pour des cultures vertes ;
0,30 pour le sable clair ;
0,80 à 0,90 pour la neige fraîche.

h = la durée réelle d'insolation (en heures et dixièmes)

H = la durée maximale possible d'insolation ; elle est fournie par des tables en fonction de la latitude et du mois.

σT^4 = pouvoir émissif du corps noir selon la formule de Stepan. Chaque corps émet des rayons calorifiques. Ceux qui émettent la plus grande quantité d'énergie sont appelés corps noirs quelque soit du reste leur couleur. Le pouvoir émissif dépend de la température.

σ est une constante : $8,17 \times 10^{11}$

T est la température absolue comptée à partir de -273°C . Elle s'exprime en degrés Kelvin ($0^\circ\text{K} = 273^\circ\text{C}$)

σT^4 s'exprime en cal/ cm²/minute.

Des tables (voir 10 à 13) donnent directement le résultat par jour.

e = la tension de vapeur de l'air exprimée en hPa. On peut l'obtenir à partir du point de rosée, à l'aide d'une table. Le point de rosée, s'il n'est pas fourni, peut lui-même être obtenu à partir de l'humidité relative et de la température de l'air.

e_w = la tension maximale de la vapeur d'eau pour la température de l'air. Elle est exprimée à l'aide d'une table (table 14, p.351).

^{*} texte de la formule est de J.Le Borgne cours de DEA

L'évapotranspiration qui correspond à R_n se calcule de la façon suivante

$$\text{ETP (mm)} = R_n \times (1/59) \times (\Delta/\gamma/1 + \Delta/\gamma)$$

- 59 représente le nombre de calories par cm^2 nécessaire pour évaporer 1 mm d'eau.
- Δ est la variation de la tension de vapeur saturante par $^{\circ}\text{C}$ à la température actuelle de l'air et
- a est la constante psychométrique. La psychométrie est la détermination de l'état hygrométrique de l'air à l'aide du psychomètre. Elle se fait par comparaison des données du thermomètre sec et de celles du thermomètre mouillé qui est un thermomètre dont le réservoir est entouré d'une mousseline imbibée d'eau. a pour des pressions voisines de 1015 hPa est peu différent de 0,65.
- Δ/γ est donné par des tables. En altitude, il faut multiplier (Δ/γ) par le rapport (P_o/P_s) .
 P_o = pression au niveau de la mer.
 P_s = pression à l'altitude de la station.

a2)- E_a , le deuxième terme de la formule s'obtient de la façon suivante :

$$E_a = 0,26 \times (e_w - e) (1 + 0,4v) / (1 + \Delta/\gamma)$$

V = la vitesse du vent en m/s est mesurée à 10 m du sol ; si elle est relevée à 2 m il faut employer la formule $1 + 0,54 V$.

La formule de Penman qui repose, on le voit sur une évaluation rigoureuse du bilan énergétique de la surface évaporante rend compte de la réalité. Son emploi, cependant, est limité car elle exige la mesure de nombreux paramètres : température moyenne, durée d'insolation, humidité de l'air, vitesse moyenne du vent, qui ne sont pas partout disponibles.

Bien qu'apparemment difficile à utiliser à cause des fastidieux calculs qu'elle demande, cette formule, grâce à des tables est d'une utilisation très aisée. Six tables en effet fournissent immédiatement le résultat à partir de la latitude, de la température et de e , que l'on peut obtenir à partir de l'humidité relative.

$I_g A$ (annexe 4 ; table 1, page 341)

H (table 2, page 342)

σT_4 (table 10, page 348)

$0,56 - 0,08\sqrt{e}$ (table 11, voir page 357)

$\Delta/\gamma/1 + (\Delta/\gamma) \times 1/59$ (table 12, page 349)

$0,26/1 + (\Delta/\gamma)$ (table 13, page 350)

Un organigramme (tableau 37) permet de conduire les calculs avec une grande sûreté.

Organigramme penman photocopie – faire

ORGANIGRAMME METHODE CALCUL PENMAN

b) Formule de Walker

C'est une formule théorique faisant intervenir l'albédo des plantes, l'humidité de l'air, la température et l'insolation. C'est en plus une simplification de la formule de Penman.

$$ET = [(1 - \mu - r) R_1] (1 + \gamma/\Delta)^{-1}$$

Pour une cuve d'évaporation, en supposant 7 % de réflexion de la lumière (albédo) on obtient :

$$E_o = 0,93 R_1 (1 + \gamma/\Delta)^{-1}$$

Pour calculer l'ETP, en supposant 20 % de réflexion pour la végétation et 1 % pour la photosynthèse (μ) on obtient :

$$E_p = 0,83 E_o$$

$$\text{On adopte } R_1 = R_a (0,20 + 0,48 (n/N))$$

$$\text{d'où } E_o = 0,93 R_a (0,20 + 0,48 (n/N)) (1 + \gamma/\Delta)^{-1}$$

R_1 = radiation globale vraie

R_a = radiation globale théorique

E_o = évaporation en mm d'une cuve

$E_p = ET = ETP$ en mm

0,93 R_a est donnée par une table en équivalent mm d'eau
(voir annexe 4 ; table 15, page 352)

γ est une constante psychométrique # 0,49

Δ est la pente de la courbe de saturation de vapeur en fonction de la température

$(1 + \gamma/\Delta)^{-1}$ est donné par une table (table 16) en annexe en fonction de la température du mois (T). Il suffit de connaître n/N et T.

n = nombre d'heures d'insolation mesuré au solarigraphe Campbell

N = nombre d'heures théoriques suivant la latitude et l'époque de l'année.

La méthode proposée par Walker paraît complexe. ETP est estimée en connaissant l'évaporation d'une cuve E_o . Son multiplicateur 0,83 rappelle le coefficient de Rijks de l'évaporation bac A en saison des pluies.

La complexité se situe dans le calcul de E_o . La formule utilise plusieurs paramètres mais se réfère souvent aux tables présentées en annexe.

0,93 R_a est obtenu à l'aide de table en annexe. Ce coefficient de Penman selon Riquier (1963) exprime en réalité la variation de l'albédo entre l'eau 7 % (0,07) et l'herbe 20 à 30 %.

N = est la moyenne journalière de la durée de l'insolation astronomique possible ; elle est exprimée en heures et dixièmes suivant la latitude (cf. en annexe ; table 17, page 353)

$(1 + \gamma/\Delta)^{-1}$ valeur difficile à lire sur la table en annexe ; il faudra se référer à l'exemple présenté au bas de la table ; la valeur recherchée s'obtient en ajoutant l'unité de la dizaine sur 100.

Exemple de calcul station de Podor (janvier 1990)

0,93 Ra = 300 mm/ mois

n = 5,6 h/j (174 h pour 31 jours)

N = 11,2 h/j

n/N = 0,5

a + b = 0,68

$(1 + \gamma/\Delta)^{-1} = 0,72$

Eo = 300 (0,68 x 5,6 / 11,2) x (0,72) = 73,4 mm = 2,36 mm/j

ET = 0,83 Eo = 0,83 x 73,4 = 60,9 mm

c) Formule de Businger

La formule exige les données suivantes : l'insolation, le vent, la tension de vapeur. Elle introduit les coefficients relatifs à la plante cultivée (albédo et facteur de stomate).

$$ET = \frac{\Delta HT + \gamma Ea}{\Delta + \Sigma \gamma}$$

ET = Evapotranspiration potentielle

HT = radiation nette reçue à la surface de la culture

γ = constante psychométrique = 0,49 dans le système métrique

Ea = f(u) (ea-ed) (voir formule de Penman) = évaporation d'une cuve fonction de la vitesse du vent (u) et du déficit de saturation

Σ = 0,92 facteur empirique (1 / S.D)

(S facteur longueur du jour = 0,8 pour une région équatoriale)

La formule de Businger est très difficile. Elle s'est inspirée de celle proposée par Penman. La formule se compose de deux termes. L'un, concerne la radiation nette reçue (HT) ou bien comme plus haut, l'évapotranspiration due au rayonnement net (Rn). L'autre, Ea, est l'évaporation en fonction de la vitesse du vent et de la tension de vapeur.

Ainsi HT de Businger est égale à Rn de Penman. En effet HT ou radiation nette est l'écart entre la radiation reçue (Rc) et la radiation diffuse (Rb)

HT = Rc - Rb

Rc = RA (1-r) (a+b n/N) ou bien IgA (1-a) (0,18+0,62 h/H)

Rb = σT_4^4 a (0,56 - 0,09 \sqrt{ed}) (0,10+0,90 n/N) ou bien σT_4^4 (0,56 - 0,08 $\sqrt{}$) (0,10+0,90 h/H)

En résumé, la méthode de Businger est la formule de Penman plus les coefficients de la plante dont le facteur de stomate. Son utilisation est rendue moins complexe grâce aux tables qui fournissent la valeur de :

Δ (voir table 9, page 347)

N (table 17, page 353)

σT^4 (table 18, page 354)

0,56 - 0,09 \sqrt{ed} (table 19, page 355)

Δ = pente de la courbe de la tension de vapeur saturante en mm Hg/C°; elle est obtenue à l'aide de table (voir annexe ; table 9).

exemple : janvier 1990, station de Podor

la température est de 22,3 °C d'où $\Delta = 1,23$

HT = radiation solaire absorbée par la plante et le sol (exprimée en mm d'eau/j)
= $R_c - R_b$ (radiation reçue – radiation diffusée)

$R_c = rA (1-r) (a+b n/N)$

RA = radiation solaire sous atmosphère

r = albédo (0,05 pour l'eau ; 0,25 pour l'herbe (steppe - savane))

a = 0,29 cos Ψ (Ψ = nombre de degrés de latitude du lieu)

b = 0,52

n/N = insolation relative

Exemple de calcul de la formule :

station Podor latitude 16°34 N

(janvier 1990)

RA = 12,00

R = 0,25

Cos (16°34) = 0,967

a = 0,29(0,967) = 0,28

b = 0,52

n = 0,52

N = 11,2

n/N = 0,5

$R_c = 12 (1-0,25) (0,28+0,52) (0,5) = 3,6 \text{ mm/j}$

R_b = chaleur rayonnée par le sol

= $\sigma T^4 a (0,56-0,09\sqrt{ed}) (0,10+ 0,90 n/N)$

σT^4 à voir table 18 ; annexe 4 (en fonction de la température)

(0,56- 0,09 \sqrt{ed}) voir table 19 ; en annexe (calculé suivant la température du point de rosée (ed))

ed = humidité de l'air (%) x ea

ea est donné par la table 6, en annexe

ea = tension maxima de vapeur d'eau en fonction de la température

exemple de calcul Podor janvier 1990

$$\sigma T^4 a = 15,11$$

$$ea = 20,022$$

$$HR = 46,5 \%$$

$$ed = 9,3$$

$$(0,56 - 0,09 \sqrt{ed}) = 0,288$$

$$(0,10 + 0,90 n/N) = 0,709$$

$$Rb = 15,11(0,288)(0,709) = 3,03$$

$$HT = Rc - Rb = 3,6 - 3,03 = 0,52$$

3) $Ea = f(u)(ea - ed)$ pouvoir asséchant de l'air en mm/j

$$f(u) = 0,27U_2$$

U_2 = vitesse du vent à 2 m de hauteur en m/sec.

$(ea - ed)$ = déficit de saturation (sd de Prescott) en mm Hg, peut-être déduit de la température et de l'humidité relative.

$$Sd = Hg \times dr$$

Hg = ea = tension maxima de vapeur d'eau en fonction de la température

$$Hg = 21,144 \text{ au mois de janvier}$$

dr = déficit relatif = $1 - \text{humidité relative}$

$$HR = 46,5 \%$$

$$Dr = 1 - 0,465 = 0,535$$

$$Sd = 20,022 \times 0,535 = 10,751$$

$$U_2 = \text{vitesse du vent} = 3,6 \text{ m/s}$$

$$Ea = 0,27(3,6)(10,751) = 10,449$$

$$4) \gamma = 0,49$$

$$5) \Sigma = 0,92$$

$$\Delta HT + \gamma Ea = 1,23 (0,52) + 0,49 (10,449)$$

$$ET = \frac{\Delta HT + \gamma Ea}{\Delta + \Sigma \gamma} = \frac{1,23 + (0,92 \times 0,49)}{1,23 + (0,92 \times 0,49)} = 3,4 \text{ mm/j} = 105 \text{ mm}$$

En résumé, la méthode de Businger est également identique à la formule de Penman plus les coefficients de la plante dont le facteur stomate. Son utilisation est rendue moins complexe grâce aux tables qui fournissent la valeur de :

$$1) \Delta$$

$$2) N$$

$$3) \sigma T^4$$

$$4) 0,56 - 0,09 \sqrt{ed}$$

III - APPLICATIONS DES FORMULES

Après la présentation fastidieuse mais nécessaire des évaluations de l'ETP, cette partie est consacrée à :

- la présentation des paramètres utilisés pour estimer l'évaporation potentielle,

- la présentation des premiers résultats obtenus après application des formules d'ETP à travers 2 mois, un de la saison sèche (janvier), un en période d'hivernage (août) ; les tests se sont déroulés à Podor,
- puis, la critique et l'observation des résultats,
- enfin, au calcul de l'ETP sur toute l'année, dans les trois stations principales de la vallée : Saint-Louis, Podor et Matam, avec les méthodes les plus adaptées.

Les résultats sont confrontés aux valeurs mesurées sur le terrain.

1. Présentation des paramètres

a) données sur Podor (année 1990) (tableau 38) utilisées pour expliquer les formules d'ETP au sous-chapitre précédent

Tableau 38 : quelques données sur Podor- application des formules ETP

	Janvier	Août
Insolation (n) (durée totale heures)	174	249
Tension de vapeur (hPa)	8,05	25,75
Humidité relative (%)	46,5	88,9
Vitesse du vent (m/s)	3,6	2,7
Température (°C)	22,3	31,1
Evaporation Piche*	7,9	11,3

* Source Asecna-Yoff moyenne 1980-1987

Tableau 39 : écart température, du thermomètre mouillé et thermomètre sec

Fanaye - (année 1988) pour calculer ETP par la méthode d'Olivier (voir annexe 3, page 340)

	Janvier	Août
TM°C-TS°C	5,5	2,0

Source : Isra (1988)

TM = température du thermomètre mouillé

TS = température du thermomètre sec

N.B. : moyenne mensuelle des moyennes décadaires

Les paramètres ci-dessous de trois stations principales (Podor-Matam- Saint-Louis) et du poste agroclimatique de Fanaye ont permis d'estimer les besoins en eau sur toute l'année et de retenir les formules les plus représentatives pour la vallée du Sénégal.

Tableau 40 : moyenne mensuelle de la vitesse du vent (m/s), période 1961-1990 ;

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Saint-Louis	4.2	4.5	5.1	5.6	5.4	4.7	3.9	3.5	3.5	3.5	3.5	3.7
Podor	2.6	2.7	2.3	2.3	2.5	3.2	3.4	2.7	2.3	18	2.0	2.2
Matam	1.0	1.0	1.2	1.2	1.8	2.3	2.2	1.7	1.6	1.1	0.5	0.8
Fanaye*	2.4	2.0	2.2	2.2	2.4	2.4	2.5	1.9	1.7	1.4	1.4	1.9

Asecna-Yoff/ * source (Isra-St-Louis) moyenne mensuelle 1981-1985

Tableau 41 : températures moyennes mensuelles (°C) (*moyenne mensuelle 1981-1989)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	22.9	24.1	24.6	24.5	24.6	26.5	27.5	28.3	28.8	28.8	26.6	23.8
Podor	23.2	25.3	25.5	30.1	32.1	32.7	31.0	30.8	31.4	31.7	27.5	24.2
Matam	24.5	26.8	30.5	33.1	34.9	34.3	31.6	30.3	30.3	31.7	28.6	24.9
Fanaye*	22.0	24.5	27.0	29.3	32.3	31.9	30.9	30.4	30.5	31.1	26.8	23.2

Tableau 42 : moyenne mensuelle de l'insolation journalière en heures

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	7.61	8.58	8.54	9.23	9.00	7.08	7.66	8.10	7.62	8.54	9.88	7.08
Podor	7.95	9.48	8.38	9.68	9.49	8.94	9.04	9.01	8.16	8.61	9.36	7.83
Matam	9.15	9.96	9.91	10.49	10.28	9.73	9.61	9.21	9.22	9.76	9.62	8.88
Fanaye (*)	7.1	6.5	7.8	7.3	6.2	7.0	7.1	7.9	6.8	8.1	8.3	7.3

(*) Isra (St-Louis) moyenne 1987-1988

Tableau 43 : moyenne mensuelle de la tension de vapeur en hPa (série 1981-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
St-Louis	11.5	13.5	15.6	17.5	20.1	25.2	27.8	30.8	21.6	27.2	18.6	11.4
Matam	7.25	8.4	9.1	10.3	13.6	19.2	21.9	27.3	27.6	19.9	12.2	7.9
*Podor	7.5	7.4	8.2	9.4	11.2	19.1	24.5	27.2	27.2	19.7	13.9	9.0

Source (Asecna-Yoff)

*Moyenne mensuelle 1968-1977

2. Tableau (44) récapitulatif des valeurs de l'évaporation (ev) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées selon (avec) dix méthodes à Podor en saison sèche et en saison pluvieuse.

	saison sèche (janvier)		hivernage (août)	
	Evaporation	ETP	Evaporation	ETP
1 Haude	123		43	
2 Olivier	152	90	65	45
3 Prescott	234	106	82	49
4 Makking		152		226
5 Bouchet		363		1296
6 Thornthwaite		47		356
7 Turc		92		152
8 Businger		112		156
9 Walker	73	68	214	177
10 Penman		138		185
Ev bac A*	229		242	
ETP gazon		136		189

*Mesure par bac classe A, station Podor valeurs obtenues après bien sûr modification de l'albédo (l'albédo de la surface évaporante d'une nappe d'eau est de 0,05)

3. Critiques et observations sur les résultats

Les résultats présentés sur le tableau ci-dessus (44) sont comparés à l'évaporation de référence (bac classe A et /ou au gazon mesuré au lysimètre). Les observations ont porté sur les paramètres climatiques, sur le gradient ou bien le profil des besoins hydriques au fil des mois.

*** Formule de Turc**

En saison sèche, les valeurs d'ETP selon Turc sont insuffisantes. Elles s'élèvent à 68 % par rapport à ETP gazon. En saison des pluies, la formule donne des résultats très acceptables (80 %).

Le gradient d'évolution ou le profil d'ETP est identique à celui d'ETP de référence. Cette formule simple, facile à utiliser est cependant empirique ; elle ne tient pas assez compte de l'humidité et du vent.

*** La méthode Thornthwaithe**

La formule de Thornthwaithe donne des résultats très insatisfaisants que ce soit en saison sèche, que ce soit au cours de l'hivernage. A cette période les valeurs estimées sont deux fois plus importantes que les besoins réels du couvert végétal. La formule n'est pas jugée représentative pour la région ; elle n'emploie qu'un seul paramètre, donc, elle ne peut donc pas valablement exprimer le climat de la vallée du Sénégal.

*** La méthode de Bouchet**

Les valeurs obtenues avec la méthode Bouchet sont élevées. Elle utilise l'évaporomètre Piche qui a pour principal inconvénient d'être sensible à l'environnement : aération de l'abri, radiation réfléchi par le sol et aussi l'appareil est placé dans l'abri météorologique, c'est à dire dans un micro- climat. Ainsi selon Riquier (1963), la formule ne peut être employée en région pluvieuse et en saison sèche, elle surestime l'évapotranspiration par effet d'oasis.

*** La méthode de Prescott**

La formule proposée par Prescott pour estimer l'évaporation ou l'évapotranspiration potentielle est mauvaise, bien qu'elle tienne compte à la fois de la température, de l'humidité relative et de la plante considérée. Le rapport entre l'évaporation bac classe A et l'évaporation calculée est de 1,02 en saison sèche et 0,34 en saison des pluies ; des relations plus faibles sont obtenues entre ETP gazon et ETP calculée : 0,78 en janvier et 0,28 en août. Le gradient d'évolution est inversé ce qui donne à la méthode de Prescott des caractères de l'hémisphère sud. De surcroît, selon Riquier « *l'inconvénient de la formule est que le facteur 21 varie un peu selon l'aridité du climat ; il peut s'abaisser jusqu'à 15 dans les climats désertiques.* »

*** La méthode de Haude**

Le profil est identique à celui de Prescott. Par rapport à l'évaporation bac A les valeurs sont très faibles (54 % en saison sèche et 23 % en cours d'hivernage). L'utilisation d'un seul paramètre, l'humidité relative ne suffit pas pour bien estimer l'ETP.

*** La méthode d'Olivier**

Elle s'appuie sur une seule donnée climatique peu courante ou pas souvent obtenue dans les stations climatiques : la différence entre la température du thermomètre mouillé et celle du thermomètre sec. Le poste agroclimatique de Fanaye dispose seulement de relevés sur quelques années pour ces paramètres.

La formule est testée pour les latitudes sud. Bien que corrigée, elle ne s'adapte pas à l'hémisphère nord. Le gradient est inversé par rapport à l'ev bac A et l'ETP gazon.

Les résultats sont médiocres par sous estimation systématique : 66 % en saison sèche, 27 et 24 % en période pluvieuse.

*** La méthode de Makking**

Les valeurs sont un peu élevées en janvier 1,12 et en août 1,2. Cette formule est simple et repose sur la radiation solaire vraie. Elle est jugée acceptable surtout en saison sèche bien qu'elle surestime d'environ 10 – 20 % l'ETP.

*** La méthode de Walker**

La formule théorique de Walker est jugée bonne pendant l'hivernage ; les valeurs sont très acceptables par rapport à l'évaporation bac A et ETP mesuré sur gazon. Il est obtenu respectivement 0,88 et 0,94.

Cependant, l'utilisation de la méthode en saison sèche n'est pas recommandée. Les résultats sont très insuffisants 0,32 par rapport à l'ev bac A et 0,50 comparés aux cuves lysimétriques.

*** La méthode de Penman**

L'ETP calculée avec la méthode de Penman, comparée à l'ETP gazon mesurée donne des résultats très satisfaisants à Podor. Le rapport est de 1,01 en saison sèche et 0,98 en saison des pluies.

Cette formule est excellente. Elle est mathématique et utilise les paramètres qui ont une influence directe sur l'évapotranspiration mieux qui la définissent. « *On peut considérer les températures, la durée d'insolation, l'humidité de l'air, la vitesse du vent comme des éléments du climat synthétisés dans l'expression évapotranspiration* » (J. Le Borgne, 1988). Son inconvénient, c'est d'être longue à calculer.

* La méthode de Businger

La formule théorique proposée par Businger offre des résultats très acceptables (81 % en saison sèche et en saison des pluies). Elle repose sur l'insolation, mais en plus sur la température, la vitesse du vent et la tension de vapeur. Elle utilise les mêmes paramètres que la formule de Penman.

La compréhension et l'application de la méthode de Businger exigent que l'utilisateur se reporte très souvent à la méthode combinée de Penman. La démarche Businger est très longue et difficile, toutefois elle est jugée bonne par les utilisateurs (J. Riquier, 1962). Elle introduit l'albédo de la plante.

En résumé, les formules les plus représentatives sont celles de Penman, Walker, Turc, Makking et Businger. Elles ont toutes, la particularité d'introduire dans leur calcul le facteur énergétique température et radiation ou insolation.

4. Utilisations des formules représentatives

Après une première sélection, l'objet de ce sous – chapitre est de faire ressortir la ou les meilleure (s) formule (s), celle à conseiller aux utilisateurs pour évaluer la demande en eau des plantes à l'absence des mesures in situ. A l'exception des formules de Penman et de Turc qui sont appliquées dans différents endroits de la vallée, les autres sont traitées pour une station unique, Podor. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux.

* L'ETP selon la méthode de Penman

Saint-Louis- Les moyennes suivantes sont utilisées : température – vent- insolation (1961-1990), tension de vapeur (1981-1990)

Tableau 45 : ETP Penman – Saint-Louis (en mm)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148	2018

Station de Fanaye - Les données utilisées sont la période 1981-1989 pour les températures, 1987-88 l'insolation, 1968-77 la tension de vapeur

Tableau 46 : ETP Penman – Fanaye (en mm)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
131	149	182	174	214	210	194	169	174	167	140	136	2040

Station de Podor - Les moyennes suivantes sont utilisées : température- vent-insolation (1961-1990), tension de vapeur (1968-77)

Tableau 47 : ETP Penman – Podor (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
ETP Penman	131	146	170	192	212	217	199	185	165	166	136	126	2045
ETP Gazon	136	148	229	260	270	276	232	189	168	183	171	139	2402
Rapport	0.96	0.99	0.74	0.74	0.74	0.86	0.86	0.98	0.98	0.91	0.80	0.91	0.85

Station de Matam - Les données utilisées concernent la période 1961-1990 sauf la tension de vapeur qui est de la série 1981-1990.

Tableau 48 : ETP Penman – Matam (en mm)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103	1918

La station de Podor est la plus proche de Richard-Toll (station abritant les valeurs de référence d'ETP mesuré). La comparaison entre ETP estimées et celles mesurées y est donc bien indiquée.

Le gradient ETP calculé est presque identique à celui de l'ETP mesuré. Avec un rapport de 0,85, la formule de Penman donne des résultats globalement satisfaisants.

Une approche saisonnière montre que la méthode est satisfaisante pendant l'hivernage (0,93 entre juillet et octobre) plus particulièrement en août et septembre 0,98. En saison sèche, la formule de Penman fournit des valeurs acceptables par rapport à celles mesurées sur cuves lysimétriques. Le rapport est de 0,82 de novembre en juin. Les véritables insuffisances sont relevées aux mois de mars et avril avec 0,74.

*** L'ETP selon formule de Turc**

Station de Saint-Louis - Les données climatiques couvrent la période 1961-1990

Tableau 49 : ETP Turc – Saint-Louis (en mm)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
135	143	143	151	151	129	142	148	136	144	113	126	1661 mm

Station Fanaye - Les informations suivantes sont utilisées : température (période 1981-1989), insolation (1987-88), humidité relative (à partir des relevés de Podor) (1961-1990).

Tableau 50 : ETP Turc à Fanaye (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP calculé	129	148	172	180	164	146	147	147	139	150	151	130

Station de Podor - Les paramètres sont issus de la série 1961-1990

Tableau 51 : ETP Turc – Podor – (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
ETP calculé	146	159	182	209	213	175	164	163	147	158	153	141	2010
rapport avec ETP mesuré	1.07	1.07	0.79	0.80	0.78	0.60	0.75	0.86	0.87	0.86	0.89	1.01	0.83

Station de Matam - Les paramètres utilisés concernent la série 1961-1990

Tableau 52 : ETP Turc – Matam (en mm)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
165	191	229	247	247	197	171	164	157	167	169	153	2257

Le rapport ETP calculé selon Turc et ETP mesuré aux cuves lysimétriques est de 84 % en saison sèche et 82 % en saison des pluies. En moyenne, ces résultats sont acceptables. Le profil est aussi correct ; mais, la formule n'introduit pas l'humidité relative en saison sèche, car elle est inférieure à 50 %. Les valeurs de la formule ne sont pas convenables surtout aux mois de juin et juillet. On a relevé à la fin de la saison sèche des besoins en eau sous-estimés.

Autre remarque : à travers les résultats par station, il est noté une variation importante de l'ETP en fonction de la latitude et de la continentalité. Cette dernière semble être très déterminante dans l'augmentation de l'évaporation.

*** ETP selon la formule de Makking**

Station de Podor - Les températures s'étendent sur la période 1961-1990

Tableau 53 : ETP Podor – Makking (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
ETP Makking	152	159	198	216	232	225	229	223	207	195	162	149	2347
rapport avec ETP gazon	1.12	1.07	0.86	0.83	0.86	0.81	0.99	1.18	1.23	1.06	0.88	0.87	0.98

Dans l'ensemble, la formule paraît très satisfaisante. Mais ces résultats sont sur estimés en début de saison sèche et plus encore au cœur de l'hivernage, en août et septembre, où le surplus hydrique qui se dégage atteint 40 % par rapport à la demande réelle du sol et de la végétation. C'est beaucoup trop.

L'utilisation des résultats de cette formule dans les champs pourrait engendrer l'engorgement, l'asphyxie des plantes et de là des conséquences géomorphologiques dangereuses pour l'agriculture puisque l'engorgement aboutit à la salinisation et peut entraîner la transformation des cuvettes en sebkhas.

*** ETP selon la formule de Walker**

Station de Podor, l'insolation concerne la période 1961-1990

Tableau 54 : ETP Podor – Walker (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
ETP Walker	88	109	120	165	173	164	166	159	139	133	107	87	1610
rapport avec ETP gazon	0.64	0.74	0.52	0.63	0.64	0.59	0.71	0.84	0.83	0.73	0.62	0.62	0.67

Les valeurs sont très insuffisantes par rapport aux besoins véritables de la végétation. En saison sèche, le rapport est de 0,62 et 0,77 pendant l'hivernage.

*** ETP selon la formule de Businger**

Station de Podor, les paramètres climatiques (à savoir insolation, température, humidité relative et vitesse du vent) sont relatifs à la période 1961-1990.

Tableau 55: ETP Podor – Businger (en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
ETP Businger	146	174	184	206	217	231	224	203	177	161	149	136	2207
rapport avec ETP gazon	1.07	1.17	0.80	0.79	0.80	0.84	0.96	1.07	1.05	0.88	0.87	0.98	0.92

La moyenne annuelle est satisfaisante (0,92) ; elle est encore meilleure de juillet en octobre (0,98). Cependant, la formule combinée de Businger présente deux inconvénients majeurs :

- elle surestime les besoins pendant une période de l'année particulièrement en janvier et février, à l'instar de la méthode Turc, de près de 25 % de plus par rapport à la demande réelle des sols,
- et en outre sur son profil, un second maximum n'est pas observé contrairement à celui des valeurs de l'ETP mesuré (cuve lysimétrique).

*** ETP estimé à partir du bac A**

Tableau 56 : Evaporation bac A (en mm) – station Richard- Toll – (source R. Toll)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1	241	284	362	372	453	359	309	255	262	276	267	257	264
2	229	270	344	360	430	341	293	242	249	262	253	241	293
3	7.4	9.6	11.1	12.0	13.9	11.4	9.4	7.8	8.3	8.5	8.4	7.8	9.8
4	5.2	6.7	7.8	8.4	9.7	8.0	7.5	6.2	6.4	5.9	5.9	5.5	6.9
5	1.18	1.26	1.05	0.96	1.1	0.87	1.00	1.01	1.10	1.0	1.03	1.02	1.11

1-hauteur totale mm /mois

2- Ev-bac après modification albédo surface évaporante

3- Ev-bac mm /j

4- ETP = 0.7 ev bac en saison sèche ; 08 ev bac hivernage

5- Rapport ETP mesuré bac et ETP cuve lysimètre

La consommation globale en eau estimée à partir des mesures du bac classe A est très forte par rapport aux besoins en eau réels.

Après avoir passé en revue toutes les méthodes de calcul, les formules qui concentrent le moins de remarques négatives sont celles de Penman, de Makking et de la méthode de Turc :

- les valeurs annuelles par rapport à l'ETP mesuré sont très acceptables, voire très satisfaisantes,
- et les profils au cours de l'année sont très corrects.

La méthode de Penman est conseillée partout en Afrique tropicale (J. Riquier. 1962, C. Riou. 1977) pour quantifier les besoins en eau des sols. L'analyse ci-dessous donne plus d'éclaircissements à ce sujet. Cependant, les méthodes, de Makking et de Turc, donnent également de bons résultats en cours d'année ; leur simplicité, l'accessibilité aux indicateurs climatiques (températures et insolation) constituent des atouts importants.

Toutefois, la confiance n'exclut pas la vérification, et c'est pour cela que nous sommes passés par ces fastidieux calculs.

5. Les équations recommandées

a) la méthode Penman

Les bons résultats obtenus par la méthode de Penman n'ont pas échappé aux bioclimatologistes et surtout aux experts de la FAO. Ces derniers œuvrent inlassablement pour améliorer l'équation de Penman et la rendre plus conforme aux mesures directes ou mesures sur le terrain opérées pour des cultures de référence.

En l'état actuel de la recherche pour toute approche concernant l'ETP, il est de plus en plus exclu d'utiliser une méthode autre que celle de Penman en Afrique.

L'équation originale est modifiée à plusieurs reprises. Les réaménagements ont produit :

- l'équation modifiée de Penman,
- et la formule de Penman – Monteih.

Elles sont présentées toutes les deux en annexe 2 page 337.

Dans la formule Penman–Monteih, les paramètres sont inchangés. Cependant, à la place de la température moyenne, on utilise la température maximale et la température minimale. En outre, elles font appel à l'altitude de la station et à sa longitude.

L'expérimentation de l'équation modifiée de Penman et celle de Penman-Monteih à Podor ont donné les résultats ci-dessus.

Présentation des paramètres utilisés :

- *station de Podor*

altitude : 6 m

latitude : 16°38 N

longitude : 14°56 W

valeurs mensuelles des paramètres de la normale 1961-1990 (source Asecna Dakar-Yoff).

Tableau 57 : températures moyennes maximales (°C)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
30.9	34.1	36.7	39.2	41.0	40.7	37.4	36.3	36.7	38.1	35.0	31.5	36.5

Tableau 58 : températures moyennes minimales (°C)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
15.3	17.1	19.1	21.0	23.4	24.5	24.7	24.8	25.1	24.2	20.4	16.4	21.4

Tableau 59 : insolation totale (en heures et dixièmes)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
75.5	80.3	81.6	92.5	87.6	81.8	84.9	86.5	78.9	84.4	80.7	78.5	82.6
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
30	29.6	31	32.6	33.4	43.6	56.8	62.6	61.1	44.7	34	31.5	40.9

Tableau 60 : humidité relative (en %)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
30	29.6	31	32.6	33.4	43.6	56.8	62.6	61.1	44.7	34	31.5	40.9

Tableau 61 : vitesse du vent (m/s)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
2.3	2.3	2.2	2.3	2.6	3.2	3.5	2.4	1.9	1.6	1.6	2.0	2.3

L'équation modifiée de Penman par le logiciel IRSIS (version 4,1) surestime quelque peu les valeurs de l'ETP. La moyenne annuelle comparée à l'évaporation des cuves lysimétriques donne un rapport de 1,17.

Tableau 62 : ETP selon la méthode de Penman modifié (mm/ j)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
ETP mm/j	5.8	6.7	7.5	8.7	9.1	9.4	9.1	7.8	7.3	7.8	7.1	6.6	7.7

Mais cette équation est abandonnée en faveur d'une autre méthode combinée, celle Penman–Monteith. Avec cette dernière et par le logiciel Cropwat (FAO) (version 5,7) le rapport est meilleur ; il est de 0,96.

Tableau 63 : ETP selon la formule Penman - Monteith (en mm/ j)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	an
ETP mm/j	5.17	5.97	6.59	7.46	8.05	8.06	7.17	6.13	5.65	5.65	4.94	4.81	6.30

Le profil saisonnier est très correct, identique à celui de l'ETP mesuré et en plus les résultats sont très satisfaisants.

Ainsi la FAO recommande l'utilisation de l'approche Penman-Monteith. Les valeurs sont conformes à celles tirées des observations dans les champs et donnent de bonnes indications sur les niveaux d'ETP aux qu'elles on peut s'attendre dans la moyenne vallée. Pour toutes ces raisons, à la SAED (à travers la station de Ndiaye), les mesures directes sont abandonnées au profit de l'évapotranspiration calculée indirectement.

b) les formules de Makking et de Turc

Elles sont aussi recommandées pour l'évaluation saisonnière des besoins en eau des plantes et des cultures. La première formule est conseillée, en saison sèche, au courant des mois de mars, avril, mai et juin ; par contre, Turc livre des résultats très satisfaisants en saison des pluies, pendant l'hivernage, d'août à novembre.

Prenant en considération les facteurs thermiques dans sa formule, la méthode de Turc fait intervenir des éléments qui permettent de déterminer la situation climatique de la vallée du fleuve Sénégal. Ainsi, à défaut de Penman pendant l'hivernage, il est conseillé de remplacer cette méthode à la formule de Turc.

Pour couvrir de manière satisfaisante les besoins des plantes, le tableau ci-dessous recommande ces méthodes, selon les mois et les saisons de l'année.

En résumé,

- de nombreuses méthodes sont présentées dans ce chapitre pour déterminer les besoins en eau de la végétation et des différentes plantes cultivées dans la vallée. Les formules introduisant le facteur énergétique sont les plus représentatives, dont celles de Penman et de Turc
- l'ETP calculée avec l'aide de la méthode Penman-Monteith sur une période de 30 ans (1961-1990) est comparée avec d'une part, l'évaporation du bac classe A dont les relevés sont effectués à différents endroits de la vallée et d'autre part, avec ETP mesurée aux lysimètres ;
- les résultats de l'ETP Penman-Monteith présentés plus haut confirment les conseils de spécialistes de l'agriculture pour toute estimation des besoins en eau d'irrigation de la végétation, des plantes maraîchères et de la riziculture
- les périodes de pointe des pertes en eau sont relevées en mai-juin, correspondant à la fin de la saison sèche, aggravée par la position en latitude de la vallée et l'effet de la continentalité.
- Les formules de Penman et de Turc sont celles conseillées aux utilisateurs de la vallée du fleuve Sénégal.

CONCLUSION

L'analyse de la consommation globale en eau de la végétation a mis en évidence :

- la sévérité des conditions climatiques de la vallée qui se manifeste par l'air surchauffé, la fréquence des hautes températures et des écarts thermiques considérables,
- les besoins en eau élevés, avec une tendance à l'augmentation,
- les meilleures formules d'ETP ; ce sont celles qui introduisent les principaux éléments du climat et parmi elles, l'équation de Penman-Monteith est conseillée pour tout projet de gestion en eau.

Mais, l'emploi de cette formule peut poser problèmes. La méthode exige la mesure de nombreux paramètres qui ne sont pas toujours disponibles. Toutefois les résultats sont les plus fiables. Les équations de Makking et surtout de Turc sont recommandées en substitution.

QUATRIEME	PARTIE :
BILANS	HYDRIQUES
TENDANCES	ACTUELLES
DANS LA MOYENNE VALLEE	DU CLIMAT

Chapitre 1 : Evaluation du bilan hydrique d'une parcelle

Chapitre 2 : Le bilan climatique de la vallée

Chapitre 3 : Les impacts du bilan climatique

CHAPITRE 1 : EVALUATION DU BILAN

HYDRIQUE D'UNE PARCELLE

Quand elle arrive au sol, l'eau de pluie se répartit grossièrement en trois fractions : l'une s'évapore sans pénétrer dans le sol, la seconde ruisselle et la troisième s'infiltré.

Le bilan hydrique représente la ventilation de l'eau qui a pénétré dans le sol entre les diverses destinations possibles : eau de drainage, eau retenue dans le sol, eau évaporée. Comme on le sait, il n'y a pas de démarcations strictes entre ces différentes sortes d'eau - et le bilan a un caractère évolutif. L'eau retenue fait normalement les frais des pertes dues à l'évaporation et pourvoie à leur remplacement.

Les intérêts portés au bilan hydrique diffèrent selon que l'on est préoccupé par des questions pédologiques, hydrologiques, agronomiques ou climatologiques. On l'établit différemment en fonction de ce que l'on recherche.

L'eau infiltrée retient l'attention du pédologue. La quantité d'eau drainée lui permet d'apprécier le degré de lessivage du sol. Cette eau allant alimenter les nappes intéresse l'hydrogéologue. « *Les bilans hydriques comparés des horizons d'un même profil permettent de rendre compte de la localisation dans le sol, des phénomènes d'hydromorphisme, de gleyification, de concrétionnement...* » (G. Gaucher, 1968)

En bioclimatologie, comme en agronomie, le bilan de l'eau présente un grand intérêt ; cette notion est tout d'abord la résultante de toutes les composantes du milieu climatique. Elle indique la quantité d'eau mise à la disposition de la végétation ou d'un couvert végétal quelconque au cours de ses différentes périodes végétatives. Au cours de son cycle, les besoins en eau d'une végétation sont égaux aux valeurs de l'ETP conditionnées par la température, l'insolation, le vent et l'humidité relative.

La différence entre la pluviométrie et l'évaporation potentielle souvent appelée « bilan hydrique potentiel » constitue le déficit ou l'excédent en eau. Le déficit est compensé par les réserves en eau du sol ; l'excédent peut-être corrigé par le drainage.

En plus de ces éléments, le bilan de l'eau fournit également des résultats sur l'ETR aussi sur le « quotient évapotranspiratoire ».

En somme, « *le bilan de l'eau est un outil privilégié pour décrire les caractères du climat d'un milieu, également pour le définir avec plus de rigueur et la précision du nombre* ».

I - LE STOCK HYDRIQUE DANS LE SOL

La teneur en eau du sol dépend de plusieurs facteurs, de la quantité d'eau déversée par la pluie, de l'humectation, du sol, de ses caractères (texture, structure par exemple), etc...

La connaissance des disponibilités dans le sol est d'une grande utilité pour l'établissement d'un bilan de l'eau. Mais avant tout, il s'avère important d'expliquer la méthode permettant de mesurer l'humidité du sol.

1. Méthode et technique

La mise au point de la méthode peut poser toute une série de problèmes. On peut citer : la définition d'une méthode de mesure de l'humidité ou bien d'un mode opératoire par détermination de l'humidité, la réalisation pratique des mesures d'humidité dans le sol et l'interprétation des graphiques des profils hydriques.

a) Le matériel

L'équipement de base est rudimentaire ; il comprend une série de boîtes de Nescafé (50 g) à tare numérotées. Du scotch est mis sur le couvercle afin de diminuer les pertes d'humidité. Ces boîtes sont rangées dans des caisses en carton mises dans de petits sacs bien fermés. Une tarière complète l'équipement de terrain.

Les échantillons prélevés sont transportés aussitôt après les prélèvements ou au plus tard le lendemain matin au laboratoire SAED à Rosso-Bethio.

b) La mesure

L'humidité est mesurée par la méthode classique celle dite par « *perte de poids* ». La méthode consiste à effectuer des prélèvements de sol tous les 20 cm avec la tarière jusqu'à 60 cm de profondeur, dans les différentes stations choisies. Dans le cadre du projet Campus (voir A. Diagne (1989) et Diagne et Richard (1992) et du projet d'aménagement de la vallée de Ndierba initié par la SAED (1996-97), des mesures d'humidité des sols ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur les unités géomorphologiques portant nos stations d'observation.

Avec le Projet Campus, les actions de prélèvement sont répétées tous les mois entre le 15 et le 29 ; ce qui a été réalisé de février 1990 en janvier 1991 (12 mois) ; avec la SAED, nous avons retenu que les données sur l'hivernage (de juillet en septembre) 1995 et 1996 afin de comparer les différences de comportement hydrodynamique des sols de la vallée.

L'échantillon prélevé «humide » est pesé sur une balance de précision puis porté à l'étuve à 105° C jusqu'à l'obtention d'un poids constant qui traduit l'absence totale d'eau. La quantité d'eau perdue est donnée par la différence entre le poids de terre humide avant séchage (P1) et le poids des boîtes à tare (P2) s'il est connu, il est possible par conséquent d'exprimer les valeurs d'humidité en pourcentage (%) de poids sec ou % de terre sèche.

c) Réalisation pratique

Les pourcentages (%) d'eau rencontrés à chaque profondeur et pour un mois donné sont portés sur un graphique. Les profondeurs sont portées en ordonnées, les humidités en abscisses. La courbe obtenue, représentant les degrés d'humidité du sol, est appelée profil hydrique.

Le profil hydrique permet de suivre le comportement d'un sol vis à vis de l'eau et de comparer à ce sujet plusieurs sols entre-eux. Il s'agit d'une représentation parlante permettant de suivre la variation de l'humidité dans le temps et à une profondeur donnée.

Les relevés sont effectués mensuellement au cours de la première année ; puis ils se sont poursuivis mais ils ont été limités à la saison des pluies (juillet en septembre). Le graphique ainsi obtenu représente l'état moyen du sol, car dans l'intervalle d'un mois, des variations importantes se produisent et elles ne pourront pas être enregistrées.

Des relevés plus fréquents (toutes les semaines ou tous les quinze jours) auraient pour effet de réduire les incertitudes.

Le graphique permet de suivre l'humectation du profil pédologique en fonction de la pluie et des eaux d'inondation dans le sens sommet-base ou dans le sens base-sommet. Les mouvements descendants dépendent de la perméabilité du sol « *exprimée par la vitesse de filtration de l'eau de gravité* » (M. Bouat, 1959).

Elle est d'autant plus élevée que la macroporosité est plus forte. Les sols perméables sont donc des sols à texture grossière (sols sableux). Dans les sols à texture fine, l'eau de gravité s'écoule toujours plus lentement.

Les nappes des sites étudiés sont profondes du fait de la baisse des quantités d'eau précipitées et de celle du niveau de la crue du fleuve. Par leur profondeur elles ne peuvent pas influencer le profit des sols. Sur les stations proches du lit mineur, le flux du fleuve assure une certaine humidité pouvant compenser les pertes. Par remontée capillaire, des courants ascendants sont susceptibles de réhumecter au moins partiellement les horizons superficiels.

« *Pour un niveau de la nappe supérieure à 35 cm dans le cas du sable grossier, 70 cm dans le cas du sable fin et 90 cm pour du limon argileux, la remontée de l'eau est négligeable* » (M. Bouat, 1959). Le niveau du fleuve à une période de l'année est supérieur à 90 cm. Il est proche de 2 mètres à la fin de la saison des pluies (octobre).

L'influence de la nappe phréatique est ainsi considérée comme nulle. Elle n'intervient pas dans le calcul du bilan hydrique.

L'évapotranspiration agit sur le sol. « *Elle réduit l'humidité en surface et épuise plus rapidement les réserves dans la terre sableuse que dans les terres limoneuses ou argileuses* » (G. Lemée, 1960)

• **Interprétation**

Pour interpréter la variation de l'humidité, nous avons fait appel aux éléments suivants (capacité de rétention, point de flétrissement, eau utile) et aussi à des données physiques du sol après analyse des échantillons au laboratoire de la SAED à Rosso-Béthio. Le sol est un pourvoyeur d'eau pour la plante.

Pour connaître la fraction de l'eau disponible (eau capillaire absorbable) il est nécessaire de définir la valeur de l'humidité du sol aux constantes essentielles caractérisant les rapports eau-sol, à savoir la capacité de rétention et le point de flétrissement permanent. Ces normes hydriques se situent à des taux d'humidité différents d'un sol à un autre.

La capacité de rétention (C.R) est aussi appelée capacité au champ et humidité équivalente. C'est la quantité d'eau ou la proportion en poids de l'eau que le sol peut retenir après avoir été saturé d'eau et ressuyé ; ou mieux, c'est aussi la quantité maximum d'eau capillaire retenue dans le sol.

Au laboratoire, on mesure l'humidité équivalente pour centrifugation de 1 000g ; on peut aussi la déterminer directement sur le terrain par la méthode de Kopecky (évoqué dans S. Henin, 1976).

La capacité de rétention est d'autant plus élevée que le sol est riche en colloïdes.

Le point de fléchissement permanent (P.F.) de la plante est indépendant du végétal et caractérise le type de sol. C'est la limite inférieure de l'eau capillaire absorbable, lorsqu'elle est atteinte, la plante se fane; les mesures étant effectuées au dessiccateur ou par des méthodes biologiques.

Le point de fléchissement est une valeur constante correspondant à un P.F. 4,2, c'est-à-dire, une pression de 16 atmosphères. Par contre, la capacité de rétention est une valeur variable. Elle se place généralement entre P.F 2.5 et P.F 3. Elle est d'autant plus élevée que la texture est fine. Nous l'avons fixée au P.F.3. pour les sols argileux. Pour un sol sableux, le P.F serait plutôt de 2 ou 2,5.

La différence entre la capacité de rétention et le point de fléchissement permet d'évaluer la quantité d'eau utile ou la Réserve Facilement Utilisable (RFU). Elle est faible dans les sols sableux et élevée dans les sols fins à dominante argilo-limoneux. Pour que la plante soit dans des conditions optimales vis à vis de l'eau du sol il faut que l'humidité du sol se trouve dans le domaine de l'eau utile.

L'alimentation des plantes est assurée tant que les apports restent supérieurs à l'E.T.P. et pendant la période sèche la plante puise dans les réserves du sol. De ce fait, dans la zone visitée par les racines, les ressources en eau sont vite épuisées. Les trois notions : capacité de rétention, point de fléchissement et eau utile permettent de dresser le bilan hydrique réel du sol.

Deux situations existent dans le milieu naturel :

- l'humidité se situe entre le C.R. et P.F : la végétation est bien alimentée ;
- L'humidité du sol est inférieure au point de fléchissement : les plantes flétrissent.

Les valeurs de l'humidité exprimées en % de poids sec peuvent être transformées en valeur chiffres de hauteurs d'eau de la façon suivante :

soit $x : y$ l'épaisseur en centimètres de la couche de sol intéressé ;

d' = la densité apparente du sol ;

Z = l'humidité de la couche.

La valeur de X , la hauteur d'eau en millimètres dans l'horizon sera donnée par la formule :

$$X = z.d'. (y/10)$$

d' = densité apparente est mesurée au labo ; la densité apparente moyenne de la couche considérée des sols sur la séquence est la mesure privilégiée.

La densité apparente sèche moyenne des sols selon C. Dancette est fixée à 1,5.

A Podor, elle varie entre 1,7 et 1,8 dans le lit majeur (information orale de M. Faye, laborantin à IRD-Pédologie).

D'autres indicateurs sont transformés en hauteur d'eau, comme la réserve en eau du sol qui est mise en contribution par l'alimentation des végétaux, si les apports sont inférieurs à l'E.T.P.

Les réserves en eau du sol doivent combler le déficit s'ils sont insuffisants.

La réserve (R) ou teneur en eau maximale est calculée par la formule proposée par M. Hallaire (1961)

$$R = H.d'. (C-f) + 30$$

C = capacité de rétention

F = point de flétrissement

H = profondeur de l'enracinement en décimètre

d' = densité apparente du sol.

Les 30 mm additionnels correspondent pour M. Hallaire (1961) à l'ascension capillaire en dessous de l'enracinement.

2. Les facteurs intervenant dans la dynamique du sol et dans le bilan de l'eau

Ces facteurs sont : l'humectation, l'infiltration et la dessiccation.

a) L'humectation

De façon générale, la pénétration des eaux dans le sol est sous la dépendance de l'humectation. Cette action est conditionnée par de nombreux facteurs :

- la quantité et l'intensité de l'apport d'abord,
- l'humidité préexistante dans le sol ensuite,
- l'intensité de l'évaporation (à partir du sol et de la transpiration par les végétaux enfin).

Il faut aussi ajouter les propriétés physiques du sol (teneur en colloïdes, mouillabilité et importance du recouvrement par la litière).

Dans le contexte de la vallée du Sénégal, la quantité d'eau apportée par le fleuve est importante et les apports pluviaux sont trop faibles. On peut admettre que les eaux d'inondation jouent le rôle essentiel dans l'humectation du sol au moment où l'atmosphère est plus humide et l'évaporation plus faible.

b) L'infiltration

« *La rapidité de l'humectation dépend en partie de celle avec laquelle l'eau mouille le sol* » (G. Gaucher, 1968). Cette vitesse est liée à la perméabilité du sol.

La perméabilité est d'abord une propriété intrinsèque du sol dépendant de sa texture et de sa structure, mais aussi de son état de saturation, du potentiel capillaire et de la variation d'état du milieu liée au changement de structure du sol sous l'effet de la dessiccation et de l'humectation.

La pénétration de l'eau dans le sol est facilitée lorsqu'il contient beaucoup d'éléments grossiers, favorisant la percolation. Les sols alluviaux du Sénégal Nord sont de texture fine à dominante d'argiles et de limons. La proportion est généralement suffisante pour limiter la pénétration des eaux dans le sol.

Mais sur un substrat argileux, des particules s'assemblent en agrégats laissant entre eux des espaces lacunaires à travers lesquels l'eau peut s'infiltrer d'abord et s'écouler ensuite.

On admet dans la majorité des sols que la perméabilité dépend en grande partie de la structure dont l'influence est évidente avec la fissuration d'un sol. Sur un sol sec parcouru de fissures ou de crevasses comme les terres du walo, on dit qu'il est perméable en grand ou doté d'une perméabilité indirecte. En effet, l'eau pénètre le sol mais n'imprègne pas toute la masse.

Les résultats obtenus par une équipe de l'ORSTOM (J.Y. Loyer et A. Mtimet, 1978) montrent que la perméabilité des terres varie en moyenne, entre 4,1 cm/h et 0,2 cm/h pour toutes les stations de la séquence à Ndierba. Elle est plus forte sur la transition sableuse.

Dans l'échelle de Muntz ⁽¹⁾, elle se situe entre les sols moyennement perméables et les sols peu perméables. Sur le terrain et dans certaines cuvettes, on a pu constater que l'infiltration s'effectue de façon régulière depuis le début de la submersion jusqu'à la fin de celle-ci. Les fentes de dessiccation de 30 à 50 cm de profondeur formées à la suite de l'assèchement des sols en divers endroits augmentent la rapidité de la pénétration des eaux.

La vitesse de l'infiltration est aussi proportionnelle au gradient hydraulique ou charge. Elle est donc fonction de la hauteur de l'eau d'inondation. L'observation est donc en fonction de la hauteur de l'eau d'inondation. L'observation directe et les traitements d'échantillon au cours du cycle hydrologique 1990/1991 ont révélé une nette différence avec la crue de 1989/1990.

La teneur en eau et l'épaisseur imprégnée par la submersion sont plus importantes en 1989. La vitesse moyenne d'infiltration des sols de la vallée en 1990-1991 dans le secteur de Ndierba est de 0,76 mm/j. Dans les conditions à peu près similaires, P. Illy (1973) estime que l'infiltration « *est de 0,5 mm/j pendant la submersion dans les cuvettes de décantation* » en 1972 de Bakel à Dagana.

c) La dessiccation

La vitesse du dessèchement du sol (en condition de sol nu) dépend essentiellement de facteurs climatiques (température, vent, degré hygrométrique) auxquels s'ajoutent des facteurs tels que les états textural et structural.

Pour étudier la durée du dessèchement des sols, nous sommes partis des profils hydriques exprimés en pourcentage transcrits en millimètre d'eau (cf. ce chapitre 1, 3^e partie bilan hydrique à l'échelle d'une séquence).

3. La variation saisonnière de l'humidité : les états de l'eau dans le sol

L'eau se présente selon les pédologues dont P. Duchaufour (1970) en quatre états particuliers : l'eau hygroscopique, l'eau capillaire non absorbable, l'eau capillaire absorbable et l'eau de gravité.

- *L'eau hygroscopique*

C'est de l'eau absorbée par le sol aux dépens de l'humidité atmosphérique. Elle forme une pellicule autour des particules du sol. Elle est retenue énergiquement et ne peut être utilisée par les végétaux.

¹ Pour la méthode de Muntz, l'échelle de perméabilité ou d'infiltrabilité à l'heure dans les sols est la suivante : sol perméable : 1 cm ; sol moyennement perméable 2 à 10 cm ; sol très perméable 30 à 50 cm (G. Gaucher, 1968)

- *L'eau capillaire non absorbable*

Elle occupe les espaces capillaires les plus fins du sol. Cette eau ne circule que difficilement dans le sol. Elle est encore retenue et ne peut être utilisée par les organismes ou les végétaux.

- *L'eau capillaire absorbable*

C'est l'eau retenue par le sol qui remplit les pores de taille intermédiaire. La quantité maximale d'eau capillaire que peut retenir le sol correspond sensiblement à la porosité capillaire ou microporosité. Cette eau absorbable par les racines constitue la source essentielle d'eau des plantes en dehors des périodes de précipitations.

- *L'eau de gravité*

Elle occupe de façon temporaire les pores les plus grands du sol. Cette eau s'écoule sous l'effet de la pesanteur sauf lorsque le drainage est impossible. L'analyse des taux d'humidité (humidité pondérale (hp)) à partir des profils hydriques révèle deux types de régimes hydriques des sols :

- un régime où le sol est sec : la teneur en humidité est alors inférieure à 14 % (hp) presque toute l'année en raison d'une pluviométrie faible tout au long du bassin du fleuve.
- un second où le sol est humide au moins pendant 2 mois (août - septembre) grâce à une alimentation pluviale du sol quantitativement plus importante et un taux d'humidité du sol supérieur à 14 % (hp) soit une humidité volumique (hv) de 166 mm.

L'humectation des sols de la vallée par les eaux du fleuve débute en août- septembre (respectivement de Bakel à Dagana). La pénétration des eaux se termine fin octobre- début novembre dans la région de Podor-Dagana. Au cours de cette phase, on a estimé que les eaux s'infiltrèrent à une vitesse de 0,76 mm/j.

Nous savons que les terres du walo reçoivent par inondation un apport de 250 mm environ (cf. D. Rijks, 1972). Le déficit pluvial en 1990-91 s'est avéré important, l'écoulement fluvial fut aussi très faible, le champ d'inondation réduit ; ce qui n'empêche pas un relèvement du taux d'humidité des terres de la vallée et de les installer (pendant un mois après l'hivernage) à un régime (plus) favorable à la végétation.

L'écoulement est plus important avec une pluie « utile ». Le champ d'inondation est plus vaste. Les cultures de décrue occupent un grand espace. Le régime à sol humide est plus long de 2 autres mois (octobre et novembre). Sur le diéri, le déficit hydrique des sols couvre l'année entière. A la fin de l'humectation, les sols se dessèchent à une vitesse moyenne 0,44 mm/j.

Au total, au cours d'une saison à pluviométrie faible, le déficit hydrique des sols du walo est de 11 mois sur 12 ; en revanche lorsque, l'hivernage avoisine la normale, les besoins en eau sont couverts au moins 3 mois.

II - LE BILAN HYDRIQUE THEORIQUE DE LA MOYENNE VALLEE

Le bilan (hors culture) est établi à partir de l'équation suivante :

$$P = \Delta S + D + E + R$$

P = Apports pluviaux et fluviaux

ΔS = Variation du stock

D = Drainage

E = Evapotranspiration

R = Ruissellement

Après une présentation des composantes du bilan, les résultats sont ensuite exposés dans un tableau, puis analysés et comparés au bilan hydrique observé. Des graphiques sur le bilan de l'eau sont réalisés pour certaines années où les apports fluviaux sont disponibles.

1. Les composantes du bilan

a) Les apports (P)

Ils sont constitués par les eaux de pluie et du fleuve.

La pluviométrie à la station de Podor (prise comme exemple) se répartit comme suit en 1990, 1995, 1996 et 2004 (voir tableau 64). Le choix de ces années n'est pas le fait du hasard ; les trois premières années correspondent à des moments où nous avons effectué d'abord, en compagnie d'étudiants de l'Université de Dakar dans le cadre du projet Campus, puis seul, un suivi et des prélèvements d'échantillons de sols sur le site de Ndierba ; de plus, cette diversité des périodes repose sur la nécessité de faire une comparaison des profils hydriques des sols entre année pluvieuse et année peu pluvieuse. Les profils hydriques des années 1990, 1995 et 1996 sont représentés dans les pages qui suivent (voir à partir de p. 215).

1990, 1995 et 2004 sont considérées comme des années particulièrement sèches. Les déficits de la pluviométrie sont de l'ordre de 60 et 53% par rapport à la normale 1931-1960. La saison des pluies a démarré tardivement en 1990 tout comme en 1995 ; de plus, la pluviométrie enregistrée est très mal répartie : 60% des totaux en 1990, 85% en 1995 et 2004 sont enregistrés en août et septembre alors que le calendrier des cultures débute en fin juin, début juillet.

Ces importants déficits de la pluviométrie transparaissent dans les écoulements fluviaux. Mais, il faut noter la particularité actuelle des étiages qui sont soutenus par des crues artificielles provenant des lâchers du barrage de Manantali.

Tableau 64 : Pluviométrie (en mm) à Podor

	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total
1990	-	28.3	51.5	28.4	24.4	128.1
1995		16.1	60.3	60.1	6.0	142,5
1996	11.8	121.3	53.2	81.3	-	267.6
2004	4	16.1	39.3	86.2	-	145.6

(Source ASECNA et IRASL)

En 1996, les précipitations sont plus abondantes. L'écart entre 1995 et 1996 est de – 125 mm et – 139,5 par rapport à 1990, soit un déficit de 50 %. L'activité agricole a démarré en juillet. Les 120 mm enregistrés au cours du mois sont suffisants pour faire germer, lever les plantes et constituer une réserve de sécurité.

Concernant les apports fluviaux, les quantités d'eau écoulées par le fleuve entre Podor et Dagana sont calculées à partir des débits mensuels de Bakel. Les hauteurs d'eau à la station hydrologique de Dagana subissent, à cause du barrage de Diama « *un effet bouchon* » rehaussant le niveau du fleuve. Donc, l'estimation des débits à partir des hauteurs d'eau ne donnerait pas des résultats corrects.

La distance entre les stations de Podor et Dagana est de 200 km en suivant le trajet du fleuve. Comme les courbes de tarage n'ont jamais été faites à Podor, il n'est donc pas possible d'estimer les débits écoulés par le fleuve Sénégal à cet endroit à partir de la hauteur des eaux du fleuve (informations orales : service hydraulique Saint-Louis).

Nous avons pu recueillir à partir des bulletins d'information de l'OMVS les volumes d'eau écoulés par le fleuve à partir de Bakel (pour 1990 et 2004) qui vont servir pour estimer la hauteur d'eau dans la moyenne vallée du Sénégal. Aussi le bilan hydrique théorique de ces deux années est établi. La station test choisie est celle de Podor.

1990 et 2004 sont deux années à pluviométrie quantitativement faible mais caractérisées cependant par deux situations hydrologiques différentes sur le fleuve Sénégal. 1990, correspond au début de la mise en service opérationnel des barrages de Diama et Manantali et l'objectif principal en cette période était d'assurer le remplissage du réservoir de Manantali. En 2004, les apports fluviaux sont plus importants en raison des besoins croissants dans la vallée des populations et des usagers agricoles (tableau 65).

Selon A. A. SOW (1984) « *la quantité d'eau du Sénégal diminue du sud au nord de 25 % en moyenne, d'un domaine climatique à un autre* ». De sa source à son embouchure, le fleuve traverse deux (02) zones bioclimatiques - en se référant à la carte des régions bioclimatiques établie par J.L. Borgne (1990, p. 29).

Les données du tableau (65) représentent les apports fluviaux mensuels de l'année hydrologique 1990 - 91 et 2004– 05 estimés effectivement écoulés à Podor-Dagana.

Ils sont calculés (avec une double réduction de 25%) à partir des relevés de Bakel. Ces apports ajoutés à ceux de la pluie à Podor donnent le total mentionné sur le tableau (66).

Tableau 65 : Apports fluviaux (mm) estimés (Podor) à partir des volumes écoulés à Bakel

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1990	34	31,4	41,4	35,4	20,1	32,6	216	396,6	390,3	327,7	124	27,7
2004	160.6	160.6	160.6	160.6	160.6	247.6	501.8	2008.1	3346.8	2008.1	267.5	133.8

Tableau 66 : Apports totaux pluie et fleuve (mm) en 1990 et 2004 à Podor

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
34	31,4	41,4	35,4	20,1	32,6	239,8	448,1	418,7	352,1	124	27,7
160.6	160.6	160.6	160.6	160.6	247.6	517.9	2047.4	3432.2	2008.1	267.5	133.8

Ces résultats montrent que les eaux du fleuve représentent plus de 90 % des apports totaux.

NB : Apports fluviaux de l'année hydrologique 96-97 ne sont pas fournis (insuffisance d'informations)

b) Le drainage

On appelle drainage la quantité d'eau qui percole au-delà d'une cote donnée par exemple, (au-delà du front des racines). Il représente une perte hydrique pour le sol et les plantes.

Le drainage vertical englobe tous les déplacements « *par descendum* » à l'intérieur d'un volume d'eau dans des conditions variables de régime ; un régime saturé pouvant intéresser l'ensemble du profil.

Le drainage vertical immédiat se déclenche grâce à l'existence d'une macro porosité importante qui peut être structurale (fentes de retrait). L'existence des fentes de retrait favorise l'infiltration si elles sont profondes. Le drainage est fonction de l'humidité, des réserves hydriques du sol, il se déclenche lorsque le flux d'eau libre est important et supérieur à la demande réelle de la plante.

Des formules permettent d'estimer la quantité d'eau perdue par le drainage

1) $D = R - P$

où D = drainage
R = réserves
P = apports

2) $D = P - ETR$

où ETR = évapotranspiration réelle.

Le terme de ce bilan est calculé à partir de cette dernière relation. Cependant il est nécessaire d'évoquer les réserves en eau utile des sols de la vallée du Sénégal avant le sous- chapitre consacré à l'ETR.

c) Les réserves en eau utile

La réserve utile est considérée comme une caractéristique du sol compte tenu du fait qu'elle doit être présentée à la fois, sous un angle statique et dynamique. L'intervention des réserves est importante d'autant plus que les apports, dans la vallée et en particulier la moyenne vallée aval, sont inférieurs à l'ETP, puisque pendant la saison sèche et à la décrue, c'est aux dépens de la réserve en eau du sol que s'effectue l'alimentation des végétaux.

La réserve utile tient compte à la fois des caractéristiques hydriques et de la profondeur de l'enracinement, c'est-à-dire, de la somme des quantités d'eau disponibles à chaque niveau du profil exploité par les racines. La détermination de la réserve implique la connaissance de deux limites :

- une limite maximale, c'est le taux d'humidité à la capacité de rétention (valeur P.F 3),
- et une autre minimale correspondant au point de flétrissement permanent (P.F 4,2).

Ces termes limitent la disponibilité en eau pour les plantes. Ils aboutissent à la connaissance des réserves utilisables, à l'eau capillaire absorbable qu'il est intéressant de transcrire en millimètres d'eau.

La réserve utile moyenne des sols dans la région étudiée est de 95,7 mm d'eau. La différence entre la capacité de rétention et le point de flétrissement permet d'obtenir la réserve en eau utile du sol.

d) L'évapotranspiration réelle (ETR)

L' ETR correspond à la somme de l'évaporation du sol et des transpirations cuticulaire et stomatique d'un peuplement végétal s'alimentant avec la réserve hydrique du sol constituée à partir des précipitations ou d'autres apports (H. Elhaï, 1968).

Pratiquement si l'apport d'eau (atmosphérique) est suffisant pour maintenir le profil à la capacité de rétention (C.R), c'est l'ETP qui représente le phénomène actif ; dans le cas d'un déficit en eau, au contraire, l'ETR prend le relais représente l'évapotranspiration. Son total est inférieur à la somme de l'ET.

M. Hallaire (1962) explique la réduction de l'ETP à partir du sol en avançant l'hypothèse que « *l'évaporation à partir du sol est freinée (en saison sèche) à cause de la constitution d'un horizon supérieur (superficiel) sec qui fait écran au passage de l'eau provenant des niveaux plus profonds. Quant à la transpiration à partir de la végétation, elle est réduite par suite de la fermeture des stomates* ».

On a constaté à travers les résultats obtenus et présentés dans les pages qui suivent, que si la quantité d'eau présente dans la terre s'approche de la capacité de rétention, l'ETR est de l'ordre de grandeur de l'ETP : 5 à 6 mm/j. La vitesse d'évaporation s'abaisse ensuite rapidement à mesure que le sol se dessèche pour atteindre des valeurs de 1 à 1,5 mm/j.

Plusieurs méthodes sont présentées par les chercheurs pour évaluer l'ETR d'un sol nu. Trois ont retenu notre attention.

1- Méthode 1 de L. Cissé : (source thèse L. Cissé, 1986)

$$\text{ETR} = P - (D + \Delta s) \quad 27$$

P = Apports

D = le drainage

Δs = Variation du stock d'eau à une cote donnée ;

2. Formule de Turc : (source Etchad- Lorsaint-Rapp) (1973)

a) **ETR = 0,9 ETP**

b) **ETR = P + R - Δs**

P = Apport - (Pluie)

R = La réserve utile sur 40cm. (0-40 cm)

ΔS = Déficit du stock en eau évaporable du début de mois.

D'après Turc, on peut déterminer, mois par mois, l'E.T.R. à partir de l'ETP précédemment calculé (a) ; avec la formule (b) on prend selon l'auteur pour chaque mois comme représentant l'ETP, la plus petite des deux valeurs obtenues à partir de la formule (a) et de la formule (b).

Le coefficient 0,9 est élevé, il est accepté dans la région humide (information orale C. Dancette, 1999).

3- Méthode de Riquier : (voir J. Riquier, 1962)

$$\text{ETR} = \text{ETP} \times \text{teneur réelle} / \text{teneur en eau maximale}.$$

L'hypothèse proposée est la suivante : ETR est proportionnelle à l'ETP, aux réserves hydriques actuelles du sol rapportées aux réserves à l'état de saturation.

Les valeurs mensuelles de l'humidité du sol (%) transcrites en millimètres ont donné le stock d'eau réel. Concernant la rétention d'un sol, les chiffres varient :

- pour un sol sableux et argileux, la réserve est respectivement de 50 et 150 mm (J. Richier, 1962) ;
- la réserve hydrique correspond à une lame de 130 mm pour un sol sableux, de 160 à 200 mm pour un sol argileux (G. Rioux, 1990) ;
- à l'ombrage, on admet que les sols argileux retiennent jusqu'à 400 mm d'eau.

La capacité de rétention des sols de la vallée peuvent retenir plus de 250 mm voire 275 mm d'eau en moins d'un mètre d'épaisseur. Si on ajoute les 30 mm additionnels correspondant à l'ascension capillaire en dessous de l'enracinement, la teneur maximale est à environ 300 mm dans la vallée du fleuve Sénégal.

La réserve du sol peut-être mesurée par carottage ; ce qui permet de vérifier les résultats calculés d'après les formules.

Au départ, elles sont toutes prises en considération ; c'est avec la formule proposée par Turc que les résultats de saison sèche sont déterminés. Il a été retenu comme ETR définitive la plus petite valeur entre les apports de la période sèche et l'ETR calculée, car en février et en mai, les chiffres obtenus sont légèrement supérieurs aux apports totaux de ces deux mois.

En saison humide (août-novembre), ETR est égale à l'ETP, les besoins en eau sont largement couverts. Les conditions du ruissellement deviennent alors favorables.

e) Le ruissellement

« *Les structures des micro-horizons superficiels du sol contrôlent la conductivité hydraulique et par conséquent le rapport infiltration/ ruissellement* » (G. Rioux, 1990) déversé par décade et par la fréquence des pluies utiles par décade (voir 1^{ère} partie, chap. 1).

Dans les régions les plus sèches, les microstructures soumises à une dessiccation très poussée résistent à l'imbibition et constituent de véritables barrages à la progression du front d'infiltration ; elles sont alors à l'origine très directement du coefficient de ruissellement très élevé et des formes d'érosion dangereuses qui s'en suivent.

Le ruissellement dépend de la pluie, mais en particulier de la pluie utile, ou la pluie excédentaire ou pluie nette (Vn ou Pn).

Cette pluie est égale à :

$$Vn = P - (\text{Lame d'eau infiltrée} + \text{évaporée} + \text{interceptée})$$

Le volume du ruissellement est aussi égal au volume de la pluie nette. Les coefficients sont (cf. G. Rioux, 1990) :

$$K_r = \text{ruissellement global} = \frac{P_x \text{ ou } V_n}{P} = \frac{LR}{P} \quad (LR = \text{lame ruisselée})$$

(P = pluie)

$$K_e = \text{coefficient d'écoulement} = \frac{Le}{P} \quad (Le = \text{Lame écoulée})$$

$$De = \text{Déficit d'écoulement} = P - Le \quad (Le = LR + \text{écoulement de base})$$

Le ruissellement survient ainsi après une pluie utile. La topographie du lit majeur est favorable au phénomène, mais le ruissellement est négligeable dans la moyenne vallée dans sa partie aval, en raison de la faible quantité de pluie enregistrée par décade et de la fréquence insuffisante des pluies utiles (voir 2^{ème} partie de la thèse, chapitre 1, où la notion de pluie utile est clairement exprimée).

Ainsi, dans l'équation posée au départ, la formule du bilan hydrique se résume comme suit :

$$P = \Delta S + D + E$$

4. Les résultats

Le bilan hydrique des années 1990–91 et 2004 sont présentés sous forme de tableaux ; celui de l'année 1995-96 n'est pas représenté sous forme de tableau pour insuffisance d'information concernant les apports fluviaux, mais son interprétation est faite à travers des profils hydriques dressés et représentés à la page

En effet, lorsque les apports sont supérieurs aux pertes par évapotranspiration en période humide, la réserve se maintient presque intacte et il y a écoulement d'eau vers le bas par drainage.

Lorsqu'ils diminuent et deviennent inférieurs aux besoins des plantes, les sols cèdent progressivement leurs réserves qui s'épuisent (voir fig.8 et 9).

Dès décembre-janvier, l'évapotranspiration n'est pas suffisamment alimentée. Le déficit en eau s'étend jusqu'en juin- juillet selon ces années à cause du démarrage précoce ou tardif de l'hivernage dans le bassin. Les débits écoulés par le fleuve sont faibles en saison sèche. Le stock hydrique est reconstitué à 20 %. Dès juillet, les apports augmentent considérablement ou moins 5 fois plus que ceux du mois de juin et ils arrivent en début de reconstitution des réserves hydriques en conservant 15% de l'apport total du mois soit 35,8 mm (voir tableau 67, p.194). En année hydrologique plus sèche (comme c'était le cas en 1984), la réserve est nulle. Les pluies comme les apports fluviaux sont si faibles qu'ils ne peuvent redresser le niveau de la réserve du sol.

La submersion de l'année 90-91 a débuté à la dernière décade du mois d'août; les eaux s'infiltrèrent, humectant toute la couche (0-60cm). La réserve s'est reconstituée pour laisser échapper à une profondeur importante un volume d'eau par drainage. Cette quantité est plus conséquente qu'aux pertes enregistrées en année plus sèche.

Les pertes sont énormes, et représentent près de 60% des apports d'août en octobre.

En 1996-97, la cote du niveau du fleuve s'est fortement redressée (à Bakel) dans la moyenne vallée, occasionnant une submersion étalée dans le lit majeur. La hauteur des eaux fut plus élevée que le niveau de l'année 90-91. La pluviométrie était également plus importante ; on peut aussi imaginer en tenant compte des résultats ci-dessus que les quantités d'eau infiltrées furent plus volumineuses. La réserve s'étant reconstituée, les pertes par drainage deviennent plus considérables.

En 2004, la pluviométrie est quantitativement faible ; de juillet à octobre, la station de Podor a enregistré 145 mm, c'est-à-dire 7% seulement des besoins exprimés par les plantes. Les lâchers d'eau effectués par la CPE depuis Manantali sont plus volumineux ; aussi les quantités infiltrées sont plus considérables. La réserve est reconstituée et les pertes par drainage sont plus énormes et cela pendant toute la période de l'hivernage et bien après en début de la saison sèche, décembre-janvier.

En saison des pluies et plus précisément en août et septembre, l'eau du fleuve est lâchée pour un soutien de crue pour la submersion de 50 000 ha dans la vallée à partir de Bakel. Ainsi les débits sont modulés à 2 500 m³/s puis maintenus jusqu'en septembre pour redescendre à la mi octobre à 375 m³/s. Cela explique des hauteurs d'eau si élevées estimées et mises en disponibilité dans la moyenne vallée depuis Bakel et les quantités extraordinaires qui percolent vers les profondeurs, imbibent très fortement les sols de la vallée et permettent à des plantes comme le riz de trouver en cette période des conditions de développement très favorables. De décembre en juin, les volumes mis à la disponibilité de la vallée sont aussi importants pour couvrir actuellement au moins 90 % des besoins en eau des végétaux. A certains moments de cette saison, les apports du fleuve peuvent même redresser le niveau de la réserve du sol.

Au total, théoriquement, malgré la sécheresse climatique et l'insuffisance de la quantité de pluies enregistrées dans les différentes stations (de la vallée), les sols de la vallée ont un régime favorable pendant presque toute l'année, grâce à l'eau écoulée par le fleuve, qui offre ainsi des conditions « optimales » d'alimentation à la végétation naturelle et aux cultures. Sur le graphique (fig. 9, p.196) le mois de mai est seulement déficitaire.

Quelle est donc la situation réelle sur le terrain ?

Tableau 67: Bilan hydrique théorique des sols de la vallée (Podor- année 1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
Apports fluviaux (mm)	34	31,1	41,4	35,4	20,1	32,6	216	396,6	390,3	327,7	124	27,7	1677,2
Précipitations (mm)		3,4		0,7			23,8	51,5	28,4	24,4			132,2
Pluies utiles (mm)		0		0			23,8	51,5	28,4	24,4	-	-	128,1
Apports totaux (mm)	34	31,4	41,4	35,4	20,1	32,6	239,8	448,1	418,7	352,1	124	27,7	1805,3
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
Variation de la réserve							35,8						
Réserve utile						35,8	95,7	95,7	95,7	84,7			
E T R (mm)	34	31,4	41,4	35,4	20,1	32,6	204	175	165	170	135	112,4	1156,3
Variation du stock	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	-59,9	0	0	0	-11	
Drainage-													
Apports totaux- ETR								273,1	253,7	182,1			

Tableau 68 : bilan hydrique théorique des sols de la vallée (Podor – année 2004) en mm

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	total
Apports fluviaux(mm)	160,6	160,6	160,6	160,6	160,6	247,6	501,8	2008,1	3346,8	2008,1	267,5	133,8	9316,7
Précipitations (mm)						4	16,1	39,3	86,2				145,6
Pluies utiles (mm)						-	16,1	39,3	86,2				141,6
Apports totaux (mm)	160,6	160,6	160,6	160,6	160,6	247,6	517,9	2047,4	3432,2	2008,1	267,5	133,8	9452,3
E T P (mm)	135	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
Variation de la réserve	30,6					35,6	-		-				
Réserve utile							95,7	95,7	95,7	95,7	95,7	95,7	
E T R (mm)	130	141	160,6	160,6	160,6	212	204	175	165	170	135	121	
Variation du Stock	-95,7	-65,1	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	-95,7	0	0	0	0	0	
Drainage.							218,2	1872,4	3181,8	1838,1	92,5	12,8	

photocopie
Graphique bilan de l'eau 1990 fig. 8

photocopie
Graphique bilan de l'eau 2004 fig. 9

III - BILAN REEL DES TERRES DU WALO OU VARIATION DU STOCK LE LONG DE LA VALLEE

Le bilan hydrique ne peut être bouclé correctement en raison du décalage de la hauteur d'eau maximale de la moyenne vallée amont à la moyenne vallée aval et des difficultés, voire de l'impossibilité actuelle, pour calculer ou estimer les débits à Podor par exemple.

A partir des stocks hydriques retenus dans les sols de la zone d'opération, un bilan hydrique réel peut être établi. Cinq stations d'échelle fine sont choisies par nous même pour l'établissement des bilans sur la séquence établie par A. Diagne (1989) sur le site de Ndierba à 10 km à l'Est de Dagana (voir carte 1). Le suivi et les prélèvements ont démarré en 1995 et sont effectués tout au long de l'année sans interruption, puis ils sont poursuivis en 1996, pendant l'hivernage seulement. Chaque station correspond à une unité topographique située sur la séquence.

En fonction de la topographie et la pédologie, nous avons choisi les stations suivantes (voir fig. 10, p.198) :

- la transition sableuse,
- la cuvette,
- le fluvio-deltaïque bas,
- le fluvio-deltaïque haut,
- et, la levée subactuelle.

1. Bilan sur la transition sableuse

Le sol de la transition diéri-walo (voir photo 6, p.199), appelé djedjogol par les Toucouleurs, est, chroniquement neutre par son pH (tableau 69). Le phosphore est présent en petite quantité. La proportion de matière organique est très faible (0,33 en moyenne). La capacité d'échange chimique est très faible.

a) Caractéristiques physiques

La texture est grossière : les fractions dominantes sont les sables fins et grossiers. La proportion d'argile diminue vers le bas du profil.

La densité moyenne est de 1,7 ; ce qui correspond à une porosité de 30 à 40 %. Du fait de sa texture, la macroporosité l'emporte sur la microporosité. La perméabilité est ainsi bonne. Elle varie de 4 à 32 cm/h de 0 à 60 cm de profondeur (J.Y.Loyer et A. Mtimet, 1978)

Fig. 10 séquence topographique- situation des différentes stations



Photo 6: Transition sableuse, sol sec et compact en surface - Ndierba
(Diop, avril 2001)

Tableau 69 : résultats analytiques, station ND₁

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
pH.eau 1/25	6,4	6,4	6,5
CE 25° C (1/5) micromhs	47	30	19
Analyse mécanique (%)			
Argile	24,1	16,1	1,0
Limon fin	4,0	3,9	4,0
Limon grossier	8,8	10,8	6,0
Sable fin	35,3	34,3	36,1
Sable grossier	25,6	33,8	53,2
Matière organique totale	0,4	0,4	0,2
Humidité actuelle	1,8	0,9	0,8
Fertilité (‰)			
Carbone total	2,46	2,46	1,23
Azote total	0,22	2,46	1,23
C/N	11,2	11,2	10,3
P205 (assi)	0,028	0,026	0,031
Bases échangeables (mé/100)			
Calcium	5,29	4,03	1,81
Magnésium	4,03	2,81	0,93
Potassium	0,30	0,23	0,12
Sodium	0,05	0,03	0,02
Somme des bases (S)	9,67	7,10	2,88
Capacité d'échange (T)	11,3	8,3	2,8
Taux de saturation (S/T)	85,6	85,5	SAT
Caractéristiques physiques			
PF 3	13,5	11,0	8,3
PF 4,2	7,1	4,9	2,2
Eau utile	6,4	6,1	6,1
Densité apparente	-	-	0-60cm 1,70

La capacité de rétention déterminée en laboratoire au PF3 varie entre 13,5 % à 8,5 % (h.p) de la surface à la base de la cote considérée (60 cm), correspondant à un stock d'eau moyen de 111 mm. Le point de fléchissement permanent (P.F.4,2) est faible : 2,2 % (h.p) de 40 à 60 cm de profondeur. Le stock d'eau correspondant (0-60 cm) est de 48 mm. La réserve utile est de 63 mm.

b) Variation de la teneur en eau

Le stock hydrique le plus important relevé en années à pluviométrie déficitaire est faible. Il est de 51 mm en octobre 1990. Par contre, le mois le plus sec est juillet avec 22 mm (fig.11, profil juillet 1990, p.216). La vitesse de dessèchement est de 5,6 mm/ mois soit 0,19 mm/j environ. La capacité de rétention (C.R) n'est pas atteinte ni en 1990 ni en 1995. La pluie est quantitativement insignifiante, respectivement 108,8 mm et 142,5 mm. Le débordement du fleuve n'a pas atteint la station.

En août, malgré des apports de 60 mm de pluie (66,7 ou 1990 et 60,3 en 1995) le stock s'est redressé faiblement de 2 à 3 mm seulement à la cote 40 à 60 cm. La station est sous le point de flétrissement et l'eau à l'état hygroscopique.

Le stock en septembre - octobre - novembre est évalué respectivement à 22,8 - 32,0 et 18,4 mm dans le sol à la cote 0-60 cm.

De septembre à octobre, entre 40 et 60 cm de profondeur, la quantité d'eau dans le sol a augmenté de 11,5 mm, la pluviométrie enregistrée en octobre 1990 est de 15,5 mm.

La « mauvaise » répartition des pluies, l'intensité des pertes par évaporation relativement importantes expliqueraient sans doute le redressement faible dans la courbe des profils hydriques en hivernage déficitaire.

Par contre en 1996, année à pluviométrie plus importante, l'eau contenue dans le sol se redresse régulièrement et devient supérieure au point de flétrissement.

En juillet 1996, avec un apport de 121,3 mm réparti sur 6 jours, le stock d'eau est dans la capacité utile de 20 à 60 cm de profondeur (cf. fig.13, p.219).

D'une année à une autre, l'eau dans le sol varie du simple au triple pour un même mois (22 mm en juillet 1990, 63 mm en juillet 1996).

Tableau 70 : bilan hydrique théorique transition sableuse- (année 1990) station ND₁

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Apports Mm (1)	0	0	0	0	0	3,8	11	66,7	11,8	15,5		
ETPmm	119	130	170	162	202	198	190	166	171	164	129	124
Variation de la réserve	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Réserve utile	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETRmm	0	0	0	0	0	3,8	11	66,7	11,8	15,5	0	0
Variation stock d'eau	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63	-63
Drainage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(1)-apports : alimentation pluviale seulement

c) Bilan hydrique

Lors d'une année à pluviométrie déficitaire (comme en 1990) le bilan hydrique théorique de la station (Nd₁) (cf. tableau 70) est déficitaire ; le déficit couvre toute l'année.

Les apports verticaux étant limités à la pluie, les totaux de juin à octobre sont inférieurs à l'ETP d'un mois.

La réserve utile du sol est de 63 mm. Le régime du sol n'a pratiquement pas varié, ni même au cours de la saison des pluies, il est au point de flétrissement en permanence.

Mais en considérant le stock réel du sol (51 mm) en octobre à 40-60 cm de profondeur, l'humidité est au-dessus du P.F 4,2. Ce mois peut donc être considéré comme humide, le sol en profondeur est à l'état de l'eau capillaire.

La capacité de rétention n'est pas toujours atteinte mais le sol est correctement alimenté pour mettre à la disposition de la végétation une quantité d'eau suffisante.

En profondeur à la cote 20 - 60 cm, le stock a augmenté de près de 30 mm de juillet en septembre ; par contre en surface, le régime du sol est au point de flétrissement permanent sans doute encore en raison d'une évaporation intense.

2. Bilan d'une cuvette

La station Nd₂ sur séquence est située au nord de la transition sableuse. Le sol de la cuvette est de type faux hollaldé (hollaldé atypique) dans la classification des Toucouleurs.

Son pH est neutre ; sa teneur en matière organique est de 0,66 en moyenne ; la potasse varie entre 0,44 et 0,46 ; le complexe absorbant est peu équilibré ; la capacité d'échange cationique est élevée (tableau 71).

a) Caractéristiques physiques

La texture est dominée par l'argile de type montmorillonite à 48 % en moyenne. Dans la partie ouest du Sénégal, de Kaédi à Dagana, « *le montmorillonite domine nettement* » (SEDAGRI, 1973) ; la densité moyenne est de 1,9 (cote 0-60 cm) (cf. tableau 69). La structure est polyédrique, elle est associée à une perméabilité faible.

La cinétique d'infiltration sur un sol nu (non cultivé) est de 0,45 l/h contre 0,38 l/h après une campagne rizicole (Zante, 1984).

La vitesse du front d'humectation est de 0,067 cm/h à 50 cm de profondeur ; elle est plus rapide en surface (0-40 cm) à cause des fentes de retrait.

Le stock hydrique du sol est important. L'humidité à la capacité de rétention (CR) est de 268 mm et le point de flétrissement permanent à la profondeur considérée est de 153 mm. La réserve utile est de 115 mm⁽⁸⁾.

b) Variation de la teneur en eau

La teneur en eau maximale du sol est enregistrée au mois de novembre en 1990 et 1995, elle est de 130 mm environ. La plus faible quantité d'eau retenue est de 4,2 mm relevée en juillet. En tenant compte de l'humidité moyenne (0-60 cm) ramenée en millimètre, le rythme du dessèchement (cf. fig.11 et 12, p.215 et 218) est rapide, entre février et avril 1990, il est de 9,5 mm/mois soit 0,32 mm/h. Il correspond à peu près aux pertes mensuelles par évaporation.

La submersion de la cuvette débute fin août. En 1990, la crue étant déficitaire en octobre, l'humidité moyenne de la tranche de sol, considérée était de 8,5% (h.p) correspondant à un stock hydrique réel de 97 mm à 40-60 cm de profondeur.

Le sol en ce mois est encore « sous alimenté », il est loin de la capacité utile. L'eau à retenir dans le sol doit être supérieure à 153 mm. Cette limite qui correspond au point de flétrissement permanent est dépassée au mois de novembre à la tranche de sol comprise entre 40-60 cm de profondeur.

Ainsi, le déficit hydrique s'étend sur 11 mois de l'année 1990 comme en 1995 (pluviométrie faible). Le bilan hydrique réel en novembre est considéré comme humide à la cote intéressant le front racinaire.

En 1996, les apports pluviométriques étant plus importants, l'eau contenue dans le sol a considérablement augmenté de juillet 1995 en juillet 1996 de 42 à 141 mm à la cote 40-60 cm 60 % de la pluie de ce mois s'est infiltré, facilité sans aucun doute par les fentes de retrait.

En août et septembre, le volume d'eau du sol s'accroît davantage et installe la station à la capacité utile (cf. fig.14, page 220).

La crue s'amplifie en septembre, la cuvette est presque entièrement inondée. Au retrait des eaux en novembre-décembre les populations ont semé le sorgho. Contrairement à l'année précédente. Le bilan hydrique réel établi à partir de la capacité de rétention et du point de flétrissement « considère » les mois d'août en novembre comme humides. Le régime du sol est dans la capacité utile par apport vertical provenant de la pluie (août-septembre) et du fleuve (octobre-novembre).

(1) : ND³ présente les mêmes caractéristiques que la station ND2 ; les caractéristiques de ND³ voir page 202

Tableau 71 : résultats analytiques, station Nd²

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
p.H eau 1/25	6,4	6,4	6,3
CE 25° C (1/5) microhoms	90	150	340

Analyse mécanique (%)

Argile	48,1	48,2	47,2
Limon fin	16,1	16,0	16,1
Limon grossier	10,0	10,5	9,6
Sable fin	21,1	20,1	20,7
Sable grossier	0,8	0,9	0,8
Matière organique totale	0,5	0,1	1,4
Humidité actuelle	3,7	4,3	4,4

Fertilité (‰)

Carbone total	3,10	0,61	7,99
Azote total	0,27	0,60	0,70
C/N	11,5	10,2	11,4
P205 (assi)	0,029	0,026	0,043

Bases échangeables (me/100)

Calcium	9,99	9,84	8,99
Magnésium	11,39	12,47	13,11
Potassium	0,44	0,45	0,46
Sodium	0,80	0,70	0,85
Somme des bases (S)	22,62	23,46	23,41
Capacité d'échange (T)	19,0	20,0	19,7
Taux de saturation (S/T)	SAT	SAT	SAT

Caractéristiques physiques

PF 3	23,5	23,5	23,5
PF 4,2	15,1	15,1	14,9
Eau utile	8,4	8,4	8,6
Densité apparente	-	-	0-60 1,9

Tableau 72 : résultats analytiques, station ND₃

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
Ph eau 1/2,5	6,1	6,0	6,0
CE 25° (1/5) microhoms	105	80	85

Analyse mécanique (%)

Argile	44,2	48,1	48,2
Limon fin	20,1	16,1	16,6
Limon grossier	12,4	11,9	12,5
Sable fin	17,8	18,4	19,3
Sable grossier	1,2	1,6	1,2
Matière organique totale	1,3	0,9	0,1
Humidité actuelle	4,1	3,6	2,5

Fertilité (‰)

Carbone total	7,38	5,54	0,95
Azote total	0,72	0,52	0,08
C/N	10,3	10,7	11,9
P205 (assi)	0,045	0,026	0,035

Bases échangeables (me/100)

Calcium	9,62	9,54	9,25
Magnésium	9,55	9, 63	9,80
Potassium	0,45	0,46	0,50
Sodium	0,30	0,25	0,20
Sommes des bases (S)	19,92	19,88	20,04
Capacité d'échange (T)	18,40	19,80	20,0
Taux de saturation (S/T)	SAT	SAT	SAT

Caractéristiques physiques

PF 3	22,2	23,5	23,5
PF 4,2	14,7	15,2	15,7
Eau utile	8,2	8,3	7,8
Densité apparente	-	-	0-60 1,9

3. Bilan hydrique sur levée fluvio-deltaïque haut

Cette levée est exceptionnellement inondée. Le fluvio-deltaïque haut a un sol de type fondé dans la classification locale (voir photo 7, p.207). La salure est forte. Dans l'échelle de salure de Guy Aubert déterminée à l'extrait aqueux 1/5, elle se situe entre 2,4 et 6 microhoms (tableau 73).

Le pH du sol tend vers la neutralité en profondeur. La teneur en matière organique est de 1 (un) en moyenne. Les réserves de bases échangeables sont moyennes, le taux de saturation varie entre 57 et 96 %. Le sel apparaît très bien dans les solutions.

a) Propriétés physiques

Les teneurs en argiles et en limons sont équilibrées, respectivement 38 et 34 %. Le sol est moins structuré que le précédent. En surface, apparaît un sol sec et dur, une structure « écaillée » par desquamation à certains endroits sous forme de tâches, indices de l'imbibition parés par la pluie. « *Le débit d'infiltration mesuré est de 4,0 l/h avant la mise en culture après deux campagnes rizicoles, la cinétique d'infiltration est de 0,3 l/h ; la vitesse du front d'humectation (à phase lente) est de 0,07 cm/h* » (P. Zante, 1984).

La densité moyenne est de 1,88. La porosité est de 30 % (J.Y. Loyer, 1978). Le stock d'eau à la capacité de rétention est de 257 mm sur une profondeur de 60 cm. Le point de flétrissement permanent se situe à une teneur égale à 167 mm à la même cote. La réserve utile est de 90 mm.

b) Variation de la teneur en eau

L'analyse des relevés mensuels d'humidité par tranche de 20 cm montre que le taux d'humidité au point de flétrissement n'est pas égal en 1990- et 1995.

L'humidité moyenne maximale relevée est de 9,4 % en ces deux années. Au niveau du front racinaire, le stock d'eau retenu dans le sol (20-60 cm de profondeur) au cours du mois de septembre, est de 128 mm soit une humidité de 11,5 % (h.p) (fig.11 et 12).



Photo 7 : sol de la levée fluvio - deltaïque haut - Ndierba
(Diop, avril 2001)

Tableau 73 : résultats analytiques, station ND4

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
pH eau 1/ 2,5	5,3	5,8	6,1
CE 25° C (1/5)	5440	4200	3600

Analyse mécanique (%)

Argile	36,1	40,2	36,1
Limon fin	36,2	32,1	36,2
Limon grossier	10,1	11,1	7,8
Sable fin	13,3	12,1	16,3
Sable grossier	0,3	0,3	0,2
Matière organique totale	1,8	0,5	0,7
Humidité actuelle	3,7	4,2	3,3

Fertilité (‰)

Carbone total	1,45	3,05	4,3
Azote total	0,11	0,27	0,42
C/N	13,2	11,4	10,2
P205 (assi)	0,035	0,026	0,032

Bases échangeables (me/100)

Calcium	5,56	6,28	5,08
Magnésium	2,66	9,74	6,86
Potassium	0,15	0,17	0,22
Sodium	0,15	0,25	1,10
Somme des bases (S)	8,32	16,44	12,26
Capacité d'échange (T)	15,6	17,1	15,60
Taux de saturation (S/T)	57,2	96,1	78,6

Sels solubles Extrait 1/5

Ca	8,06	3,41	2,21
Mg	18,34	7,54	3,98
K	0,10	0,08	0,10
Na	8,25	10,25	9,15
Somme cations	34,75	21,28	15,44
Cl	32,96	16,07	6,24
HCO ₃ ⁻	0,25	0,25	0,13
SO ₄	2,36	5,88	10,07
Somme anions	35,57	22,2	16,44

Caractéristiques physiques

PF3	22,8	23,6	22,2
PF 4,2	14,6	15,2	14,6
Eau utile	8,2	8,4	7,6
Densité apparente	-	-	0-60 1,88

L'eau dans le sol est à l'état hygroscopique non absorbable par le couvert végétal. Les seuls apports verticaux sont liés à la pluie en 90-95.

Les profils se redressent d'août en octobre ; la teneur en eau, en surface, passe de 3 à 7,39 % (h.p), c'est à dire de 11,2 à 27,8 mm. En profondeur (40-60 cm) l'humidité évolue de 3,9 % (h.p) à 11,4 soit une différence en quantité de plus de 84 mm.

On peut considérer qu'entre 0-40 cm l'apport principal est d'origine pluviale. Cette eau s'infiltré lentement mais imbibe la tranche comprise entre 20-40 cm. Plus en profondeur, les pertes par évaporation en surface diminuent le volume hydrique précipité.

Les apports d'août et septembre 1995 ont causé un redressement peu important des profils. Des transports latéraux par les cuvettes inondées pourraient expliquer cette relative humectation du front racinaire et situeraient le maximum en octobre soit à la fin de la saison des pluies. Les échanges latéraux sont effectués par le drainage interne d'un « surplus ». Les mouvements ascendants et/ou diffusion capillaire ont ainsi remonté de l'eau qui a imprégné une partie de la tranche de sol considéré.

Toutefois, les transports latéraux ne réduisent pas l'ampleur du déficit hydrique qui couvre toute l'année. Néanmoins au cours d'un hivernage à pluviométrie normale voire excédentaire, ils pourraient humecter suffisamment les sols et relever plus considérablement les profils.

L'observation de la station lors de la saison des pluies de l'an 1996 a confirmé cette hypothèse. L'humidité a dépassé le P.F.4, 2 en septembre 96 à la cote 40-60 cm (cf. fig.14).

La pluviométrie est plus abondante que l'année précédente. Le stock d'eau dans le sol a augmenté, progression qui s'est maintenue du fait de la forte crue enregistrée. Elle a inondé toute la moyenne vallée en amont comme en aval transformant l'île à Morfil en une vaste mare.

4. Bilan hydrique d'une levée fluvio-deltaïque bas

L'unité est une levée fluvio-deltaïque basse, localisée au nord de la séquence.

Le sol est de type faux hollaldé ou hollaldé atypique, il est très légèrement salé. La salure augmente en profondeur. Le pH tend vers la neutralité. La matière organique est assez bien répartie et quantitativement elle est importante sur cette station (1,6 en moyenne par rapport aux sols précédents) avec une domination du Mg et du Ca. Le taux de saturation varie entre 84,9 et 90 % en profondeur (20 à 60 cm) (cf. tableau 74).

a) Propriétés physiques

Le taux d'argile du sol est de 41 %, le limon en représente 23 %. La structure est grossière, la perméabilité est faible. La densité moyenne est de 1,88.

Après deux années de rizicultures, les débits d'infiltration sont de l'ordre de 0,31 l/h et 0,35 l/h. Le front d'humectation avance à raison de 0,06 cm/h après un remplissage rapide jusqu'à 60 cm (Zante, 1984).

Le stock d'eau à la capacité de rétention est de 252,6 mm (0,60 cm), le point de flétrissement permanent est fixé à 161,3 mm à la même cote. La réserve utile est de 91,3 mm.

b) Variation de la teneur en eau

En 1990, première année d'observation, entre le mois le plus humide (novembre) et le plus sec (juillet), le sol a perdu 101 mm en 8 mois. La vitesse journalière moyenne du dessèchement est de 0,42 mm.

La réserve se reconstitue à partir de septembre, cette année là, en relation avec le redressement du niveau du fleuve par drainage latéral.

En août, le stock d'eau moyen de la tranche de sol (0-60 cm) est de 61,3 mm ; puis 69,2 en septembre - 101,7 en octobre - 108 en novembre.

Cependant à la cote 40-60 cm, le volume hydrique est de 111,3 mm, en août, 132 en septembre, environ 198 en octobre, 188 en novembre et 137 en décembre.

Tableau 74 : résultats analytiques, station ND⁵

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
Ph eau 1/ 2,5	5,7	6,2	6,7
CE 25° C (1/5) microhoms	560	570	620

Analyse mécanique (%)

Argile	32,1	44,2	48,2
Limon fin	28,1	20,1	20,1
Limon grossier	12,6	14,9	12,6
Sable fin	23,0	17,7	15,5
Sable grossier	0,4	0,5	1,1
Matière organique totale	2,0	1,3	1,7
Humidité actuelle	3,4	2,4	2,1

Fertilité (‰)

Carbone total	11,68	7,38	9,84
Azote total	0,98	0,72	0,95
C/N	12	10,3	10,4
P205 (assi)	0,038	0,026	0,42

Bases échangeables (me/100)

Calcium	6,10	6,47	6,73
Magnésium	7,43	9,36	9,32
Potassium	0,30	0,14	0,22
Sodium	0,70	0,70	0,70
Somme des bases (S)	14,53	16,67	16,97
Capacité d'échange (T)	14,2	18,5	20,2
Taux de saturation (S/T)	SAT	90	84,9

Sels solubles Extrait 1/5

Ca	0,26	0,11	0,15
Mg	0,42	0,27	0,45
K	0,08	0,18	0,13
Na	1,00	2,30	1,65
Somme cations	1,68	4,54	2,38
Cl	2,45	1,96	2,10
HCO ₃ ⁻	0,25	0,25	0,38
SO ₄	1,35	2,36	2,41
Somme anions	4,05	4,57	4,89

Caractéristiques physiques

PF 3	20,2	22,9	24,2
PF 4,2	12,5	14,7	15,7
Eau utile	7,7	8,2	8,5
Densité apparente	-	-	1,88

A cette cote, le stock du sol se trouve dans la capacité utile en octobre et novembre. Les teneurs en eau sont supérieures au point de flétrissement permanent.

L'alimentation verticale est presque nulle en raison de la pluviométrie insignifiante et d'une absence d'inondation en 1990. Le drainage latéral du fleuve expliquerait l'augmentation de la réserve en octobre - novembre. La station se situe à 923 m du fleuve. « *Le drainage naturel des nappes alluviales par le fleuve est sensible sur moins de un km* » (P. Illy, 1973).

En période de pluviométrie normale (1996 par exemple), l'humidité en profondeur 40-60 cm est au-dessus du point de flétrissement. La pluie étant plus abondante, le sol se recharge progressivement en fonction des quantités d'eau déversées : 140,7 mm en juillet, 171,1 en août 1996 et 197,2 en septembre 1996. Au cours de ces 2 derniers mois, le sol est dans la capacité utile. La recharge du sol se poursuit par alimentation latérale venant du fleuve. Le volume devenant important la station pourrait atteindre la capacité de rétention en octobre et novembre si l'on se réfère à la progression constatée en septembre-octobre 1990.

Une végétation plus abondante sur cette station provoque une humidité plus forte, supérieure au point de flétrissement, aux premiers centimètres du sol. Ce couvert jouant un rôle d'écran diminue l'intensité de la chaleur et par conséquent la baisse des quantités d'eau évaporées.

5. Bilan hydrique de la levée subactuelle.

La levée subactuelle surplombe le lit mineur. Le sol est de type fondé ouaka. Il est également très salé. Le sol peut être classé parmi les types de sols halomorphes acides par son pH.

La matière organique est élevée (1,8) (cf. tableau 75), le couvert végétal est plus dense. L'alimentation verticale est pluviale. La capacité d'échange est peu élevée par rapport aux hollaldé ; cependant, elle est plus importante que celle du fondé ranéré.

Le sodium apparaît important dans les bases échangeables en profondeur (35%). La station est située à 160 mètres du lit mineur.

Tableau 75 : résultats analytiques, station ND₆

Profondeur (cm)	0-20	20-40	40-60
pH eau 1/ 2,5	4,8	5,4	5,7
CE 25° C (1/5) microhoms	3750	2700	1960

Analyse mécanique (%)

Argile	40,2	36,1	44,2
Limon fin	28,1	36,2	28,1
Limon grossier	19,4	16,7	19,2
Sable fin	8,10	6,1	4,6
Sable grossier	0,1	0,1	0,2
Matière organique totale	1,8	2,0	1,6
Humidité actuelle	3,8	4,4	3,3

Fertilité (‰)

Carbone total	10,45	11,68	9,22
Azote total	0,97	0,84	0,70
C/N	10,8	13,9	13,2
P205 (assi)	0,038	0,025	0,031

Bases échangeables (me/100)

Calcium	5,82	7,23	6,36
Magnésium	6,94	8,45	4,68
Potassium	0,21	0,25	0,35
Sodium	0,55	1,50	3,50
Sommes des bases (S)	13,52	17,43	14,89
Capacité d'échange (T)	17,1	15,60	18,50
Taux de saturation (S/T)	77,2	SAT	80,5

Sels solubles Extrait 1/5

Ca	4,61	1,43	0,23
Mg	9,97	1,80	4,27
K	0,14	0,07	0,03
Na	6,30	6,65	4,50
Somme cations	21,02	9,95	9,03
Cl	20,36	7,48	6,64
HCO ₃ ⁻	0,13	0,13	0,13
SO ₄	0,64	2,36	2,36
Somme anions	21,13	9,97	9,13

Caractéristiques physiques

PF 3	22,9	22,2	24,2
PF 4,2	16,7	14,1	15,7
Eau utile	6,2	8,1	8,5
Densité apparente	-	-	1,8

a) Propriétés physiques

Le taux d'argile sur ce fondé est relativement important en moyenne. Les limons forment 31 % environ. La densité structurale est de 1,8. La porosité selon Loyer et Mtmet varie entre 36 et 20 %.

Le stock d'eau nécessaire à la capacité de rétention du sol est de 262 mm et pour le point de flétrissement permanent à une humidité de 175 mm. La réduction du stock à ce seuil présente le végétal dans la phase critique. La réserve utile est de 87 mm.

b) La variation de la teneur en eau

Le sol enregistre en juillet le stock d'eau le plus faible de l'année. Le maximum est relevé en octobre.

En 1990, à la cote 20-60 cm, l'humidité atteint en octobre 18,6 % (h.p) soit 201 mm; en novembre, le stock diminue, il est à 184 mm, 150 en décembre.

L'eau disponible pour la végétation est à l'état d'eau capillaire absorbable grâce au fleuve dont le niveau décroît après octobre.

En 1996, la recharge est entamée dès juillet. Mais aux mois d'août et septembre, le sol est à la capacité utile (cf. fig. 13). La teneur en eau est forte expliquée par la nature argilo-limoneuse. Plus de 200 mm sont stockés à 40-60 cm ce qui correspond à une humidité pondérale de 19 % (h.p).

En résumé, il ressort de cette analyse :

- que le régime hydrique des sols dans le walo varie d'une année (pluviométrie et hydrologique) à l'autre,
- que le déficit des apports, limite la « saison favorable » (pour le développement de la végétation) au plus aux mois d'octobre- novembre, alors qu'une pluviométrie normale, et une crue moyenne allongent la durée de présence d'eau dans les sols au moins à quatre mois (août en novembre),
- que l'étude des bilans hydriques nous révèle une opposition diéri-walo,
- un régime hydrique sec s'étend sur toute l'année sur des sols sableux du diéri en hivernage déficitaire (voir fig. 15, p.221),
- par contre, avec une pluviométrie normale, ils sont dans un régime à la capacité utile en août et septembre (voir fig. 16, p.222),
- enfin, en fonction des conditions hydriques du milieu, *«l'éthologie du couvert végétal se modifie du fait du cycle saisonnier de l'eau : saison sèche - saison humide»*, mais aussi d'un cycle annuel marqué par l'opposition année déficitaire / année normale ou excédentaire.

FIG 11

Profils hydriques sols de la moyenne vallée année 1990 de janvier au mois d'avril

Profils hydriques 1990 de mai en août

Profils hydriques année 1990 de septembre en décembre

FIG 12

Profils hydriques hivernage 1995

1
Profils hydriques hivernage 1996

fig. 14- profil variation stock hydrique à 40-60 cm de profondeur
Sol d'une cuvette (ND₂)

fig. 15 régime hydrique année déficitaire

fig. 16 régime hydrique année normale ou excédentaire

6. Les bilans hydriques des principales cultures de la vallée

Le maïs, le riz et le sorgho sont les principales cultures de céréales de la vallée du Sénégal. La vallée a produit 195 000 t de riz en 2007/08, 20 000 t de sorgho, 100 000 t de tomate industrielle, 76 000 t d'oignon et plus de 1 000 000 t de canne à sucre (source D.R.D.R).

L'activité maraîchère est représentée par le gombo (*Hibiscus esculentus*), l'oignon et la tomate surtout. La canne à sucre est produite dans la basse vallée à Richard-Toll sur des terres exploitées par la C.S.S.. L'arachide est peu pratiquée mais les expériences faites sur cette plante par l'I.S.R.A.- Saint-Louis sont très concluantes.

En raison des caractères de la pluviométrie de la zone nord du Sénégal, les populations ont plus en plus recours à l'agriculture irriguée. Les bilans de l'eau pour l'irrigation évoqués ci dessous concernent les cultures comme le maïs, le riz, le sorgho et la tomate. Leur consommation élevée par la population explique que la S.A.E.D. et l'I.S.R.A., deux institutions chargées de l'encadrement et de la recherche, aient effectué de nombreux travaux sur ces plantes.

Les résultats de ces actions sont résumés dans les travaux de C. Dancette (1977), le Mémento de l'agronomie (1984) et la publication réalisée par D. Raes et B. Sy (1992). Le calcul du bilan de l'eau pour les cultures est effectué tenant compte des gains (apports en eau) et des pertes.

Les apports sont constitués par la pluie utile, les eaux du fleuve, mais aussi les réserves du sol. En effet, « *pour savoir si une période de sécheresse ou de faible pluviométrie est critique pour la culture, il faut considérer les réserves, la pluie et les besoins en eau de la culture* » (C. Dancette, 1977).

Les pertes sont constituées par l'évapotranspiration de la culture (ET culture) qui est obtenue en multipliant ET référence (ETP Penman-Monteith) de la station de Podor avec le coefficient cultural (kc).

$$\textbf{ET culture = ETP x kc}$$

Les coefficients culturaux sont choisis selon les recommandations de la FAO (J. P. Fretaud, 1964) (tableau 76).

Tableau (76) : coefficient cultural (kc) de quelques cultures de la vallée et durée du cycle (Source Fretaud)

	Riz 135 j	maïs 100 j	Sorgho 90 j	Arachide 90 j
Kc	1,2	0,67	0,70	0,69

Les besoins en eau sont proportionnels à la longueur du cycle de la plante et ils varient d'une plante à une autre (voir fig.17, p.226).

Les périodes de pointe prises en compte pour établir le bilan hydrique des cultures sont aussi différentes selon les cultures.

On observe dans la pratique que si les besoins en eau sont satisfaits à 80 %, la production ne s'en ressent pas. Exemple : le sorgho en plein développement a un besoin maximal de 5 mm/j ; la tolérance à 80 % est donc de 4 mm/j sans préjudice de productivité.

La période la plus critique se situe à des moments différents selon la culture. L'ETM (évapotranspiration maximale) de l'arachide (5 mm/j) correspond à la période de la floraison et de la fructification, c'est à dire, entre le trentième et soixantième jour pour un cycle de quatre vingt dix jours. La dernière partie du cycle doit être sèche.

Quant aux besoins en eau du sorgho, ils sont très élevés à la fin du tallage, et au début de la floraison. Tout déficit en eau à cette époque entraîne une baisse du rendement.

La demande est forte pour le maïs (6 mm/j) du soixantième au quatre vingt dixième jour et il lui faut 4 mm/j au cours du troisième mois à la récolte.

L'ETM du riz cultivé en hivernage est de 11 mm/j (14 en contre saison) ; elle est plus élevée lors de la phase de développement de la plante (trentième et quatre vingt dixième jour).

Pour la tomate, 5 mm/j sont nécessaires pour la floraison ; ensuite, l'ETM de la plante double jusqu'à la récolte. D'autre part, la chaleur est un frein au développement de la tomate dont les conditions optimales sont situées à 20-25 °C le jour ; alors que de juillet en octobre, les températures dépassent largement 30-35 °C dans la vallée.

Aussi, considérant les besoins nets en irrigation des plantes en période de pointe et l'ET de chaque culture (voir fig.17 et 18, p.226 et 227) on se rend compte que lors d'un hivernage normal et excédentaire dans la moyenne vallée, les stocks hydriques contenus dans les sols du walo couvrent largement certaines demandes comme celles exprimées par l'arachide, le maïs et le sorgho (besoins couverts en profondeur, à 40-60 cm de la surface). Les quantités d'eau disponibles sur la levée subactuelle et les cuvettes atteignent 160 mm en 1 mois, c'est à dire, 5,3 mm/j ; plus de 200 mm sont effectivement stockés en août, soit une moyenne journalière de 6,5 mm (fig.12).

En fonction de la pluviométrie et des disponibilités en eau de chaque station, sur la levée subactuelle et la cuvette, peuvent se pratiquer les cultures de maïs, de l'arachide et du sorgho.

Ces unités morphologiques bien pourvues en eau abritent des pâturages naturels dont les espèces dominantes sont : *Echinochloa stagnina* et *Vossia cuspidata*. La vallée est une zone privilégiée pour l'élevage ; elle offre une alimentation abondante en saison sèche au moment où l'herbe a presque totalement disparu sur le diéri.

Toutefois les apports sont en dessous des besoins en eau d'irrigation du riz, des cultures maraîchères pendant leur période de pointe comme au cours de leur phase d'entretien, de leur développement et aux moments de forte consommation à la saison des pluies et en contre saison chaude.

Ainsi, en année pluviométrique normale, le maïs le sorgho et l'arachide se font en culture sous pluie ; la riziculture, le maraîchage exigent le recours à l'irrigation en complément des eaux de pluie et des réserves dans le sol.

En fin de compte cette pratique n'est pas toujours nécessaire dans la vallée, si les conditions agro-pluviométriques sont favorables et les chances de réussite des cultures pluviales sont meilleures pour l'agriculture vivrière, qui est le souci majeur des populations de la vallée du Sénégal. Pour cela il faudra éliminer un obstacle : le déficit hydrique des sols en surface (0-20 cm) par l'irrigation. « *L'association de la culture irriguée et culture pluviale est aussi un moyen pour accéder à l'autosuffisance alimentaire et aussi pour limiter l'exode rural* » (Ph. Chamard, 1993).

Ce chapitre du bilan montre que :

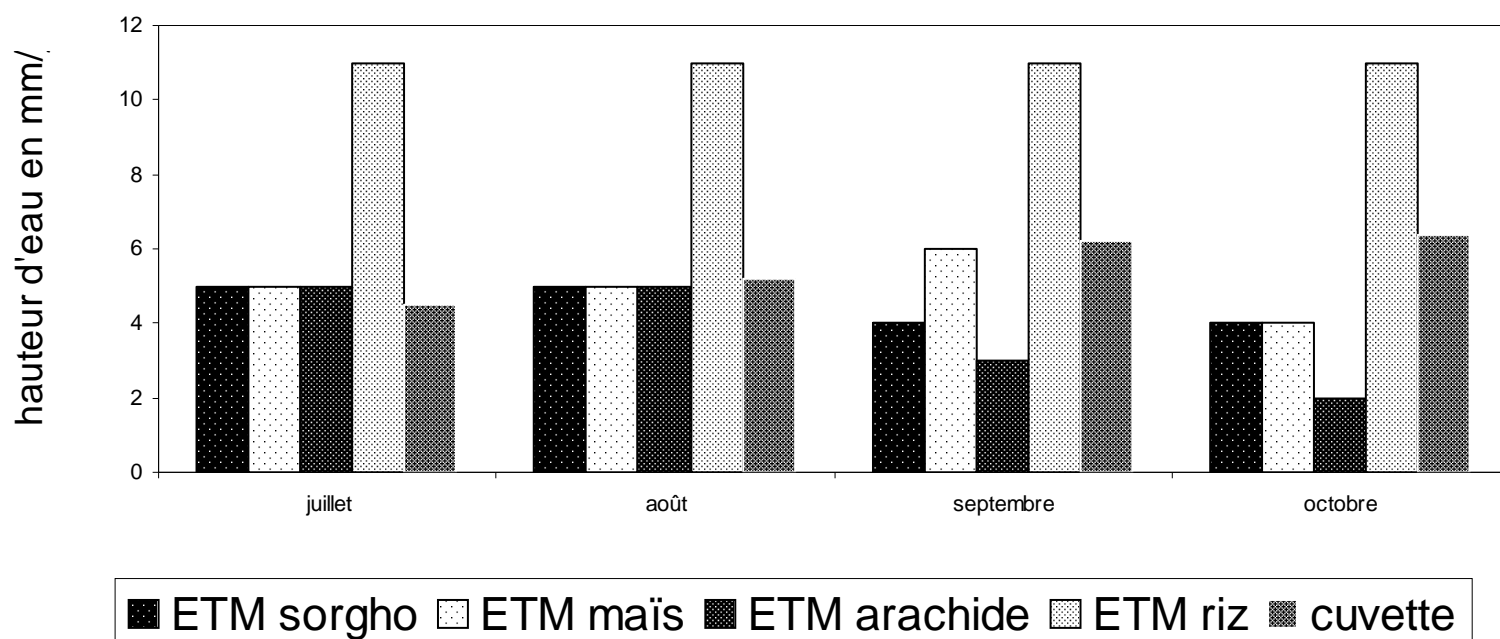
- Le fleuve est le principal pourvoyeur en eau dans la vallée. Il intervient pour plus de 90% dans les apports. Avec l'artificialisation de la crue, cette part tend même à s'accroître et à rendre davantage insignifiante la pluviométrie.
- L'opposition saison sèche - saison humide si forte lors du régime naturel du fleuve s'amenuise ; la gestion des eaux par le CPE maintient un écoulement régulier et plus abondant des eaux fluviales et limite ainsi la saison sèche à deux mois au plus (avril et mai).
- La vallée du Sénégal abrite plusieurs types de spéculation. Le riz occupe une place importante parmi les cultures de céréales ; aussi sa pratique trouve de plus en plus des conditions hydrologiques de plus en plus satisfaisantes dans la région. Ainsi le développement de l'économie régionale passe obligatoirement par l'agriculture irriguée dont la source principale est le fleuve.

ETM cultures comparée aux disponibilités en eau dans la cuvette - profondeur
(40-60 cm)

ETM en mm/j -année 1996 - source
thèse M.Diop

	Juillet	Août	Septembre	Octobre
ETM sorgho	5	5	4	4
ETM maïs	5	5	6	4
ETM arachide	5	5	3	2
ETM riz	11	11	11	11
Cuvette	4,5	5,2	6,2	6,4

fig (17) : bilan de l'eau des cultures dans les cuvettes

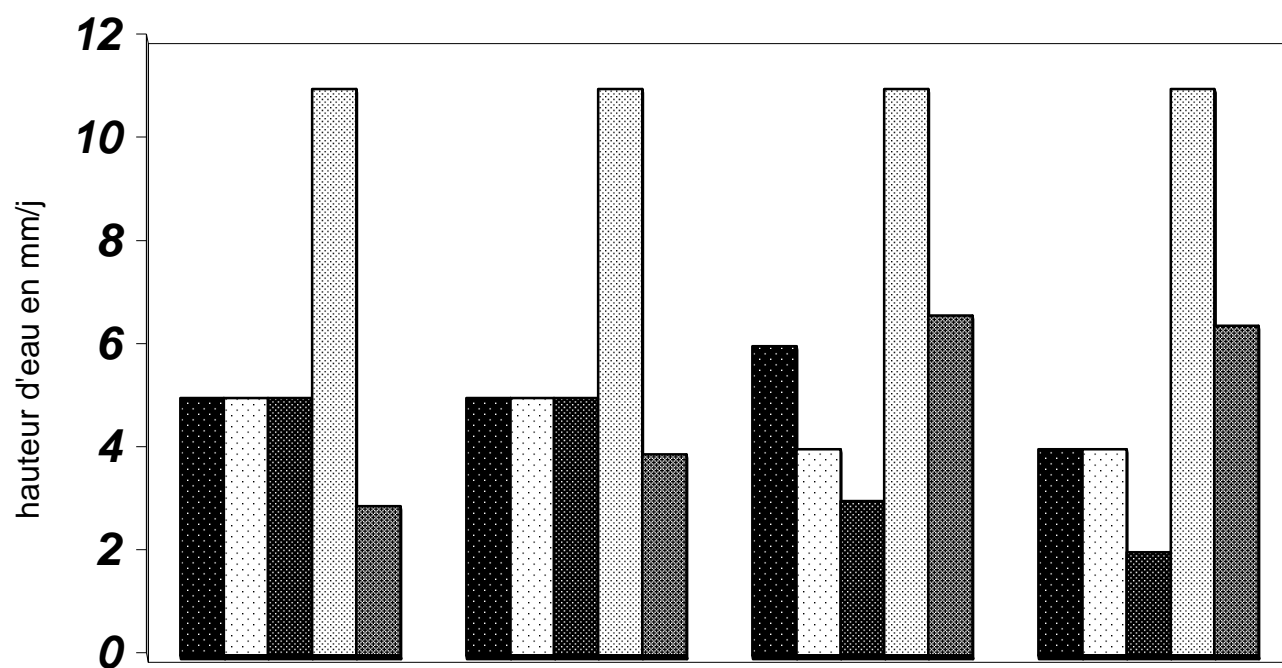


ETM cultures comparée aux disponibilités en eau des sols de la levée subactuelle à 40-60 cm

ETM en mm/j année 1996- source thèse
M. Diop

	juillet	août	Septembre	Octobre
ETM maïs	5	5	6	4
ETM sorgho	5	5	4	4
ETM arachide	5	5	3	2
ETM riz	11	11	11	11
Levée subact	2,9	3,9	6,6	6,4

fig (18) : bilan des cultures sur levée subactuelle



CHAPITRE 2 : POUR UN BILAN ACTUEL **DU CLIMAT DE LA VALLEE**

Dans le cadre d'une bonne gestion de l'eau, il est nécessaire de connaître tous les paramètres intervenant dans le bilan de l'eau. Certains sont déterminés par le type de sol, la végétation, d'autres, par contre sont dictés par le climat. Il s'agit des précipitations et de la consommation de l'eau par l'évapotranspiration.

A partir de l'ETP, des apports en eau et de la réserve utile, un bilan peut-être établi. Par delà, toutes les informations nécessaires à la détermination du climat de la station sont connues.

Parmi ces paramètres, retenons : les valeurs de l'ETR, le déficit d'alimentation, l'excédent d'alimentation et le taux de couverture des besoins ou mieux « *l'indice bioclimatique* » selon J. Le Borgne.

Ce chapitre aborde d'abord, les méthodes de détermination du climat puis, discute de l'ampleur de la sécheresse.

I – METHODES DE DEFINITION DU CLIMAT **APPLIQUEES A LA BIOGEOGRAPHIE ET** **L'AGRICULTURE**

Une bonne maîtrise des climats, de leurs relations avec le milieu sont indispensables comme base à toutes opérations d'aménagement et à toute politique de développement. Les informations nécessaires pour les définir avec précision ne sont pas toujours prises en compte. Dans la région qui nous intéresse du fait de la fermeture de postes météorologiques ou centres agrométéorologiques (à Guédé, Fanaye, Ndiol) par l'ISRA, fautes de moyens, la vallée retourne à la situation « *de pénurie de données d'observation météorologique* » (E. A. Bernard, 1967).

A Matam, l'évapotranspiration est toujours mesurée au Piche. Cela démontre tout l'intérêt, toute l'importance des calculs théoriques de l'évaporation dans cette localité. D'autant plus l'ETP est introduite comme valeur principale dans de nombreuses formules de détermination du climat, comme l'indice d'aridité, l'indice de Thornthwaite, l'indice d'humidité de Hiernaux et l'indice bioclimatique.

1. L'indice d'aridité

Les premiers indices d'aridité sont de E. Martonne. Ce dernier a reconnu l'imperfection de la formule qu'il propose ; il n'a tenu compte que de deux phénomènes bien étudiés : la température et la pluviométrie.

Les mêmes paramètres sont employés par H. Gaussen ⁽¹⁾ pour déterminer les mois secs.

Le facteur essentiel de mesure de l'aridité doit être : l'évaporation (C.R. Hiernaux, 1955)

L'indice d'aridité est obtenu par la formule P/ETP

P étant les précipitations

ETP, l'évapotranspiration potentielle

L'indice d'aridité est utilisé par les chercheurs de l'IRAT puis de l'ISRA pour caractériser le régime climatique de certaines stations au Sénégal (Bambey, Richard-Toll, Séfa).

L'humidité s'installe dès que le résultat obtenu est égal ou supérieur à 1 (multiplié par 100 pour avoir des nombres entiers). Cet indice, nous l'avons employé pour les stations de Podor et de celle de Matam pendant la saison des pluies entre juillet et octobre (car en dehors de ces mois, la pluie est insignifiante) pour les périodes 1931-1960, 1961-1990 et 1991-2000.

L'évaporation est estimée à partir de la formule Penman.

Tableau 77 : indice d'aridité P/ETP - station de Podor- (P en mm) (source J. L. Borgne, 1988 et I.R.A.S.L. de 1991 à 2000)

	juillet	Août	septembre	Octobre
P (mm) 1931-60	67.7	131.8	83.8	23.1
1961-90	41.8	75.6	69.5	16.1
1991-2000	37,2	81	72,8	9,2
ETP (mm)	199	185	165	166
P/ETP 1931-60		0.71	0.51	
1961- 90		0.41	0.42	
P/ETP 1991-2000		0.44	0.44	

¹ formule de Gaussen : $P = 2 T$

Tableau 78: indice d'aridité P/ETP- station de Matam (P en mm) (source Le Borgne, 1988 et I.R.A.S.L. de 1986 à 1990)

	Juillet	Août	septembre	Octobre
P (mm) 1930-60	130,5	202,3	121,7	22,3
1961- 90	93,2	125,7	88,2	22,2
1991-2000	88,5	141,9	92,7	19,6
ETP (mm)	194	164	162	162
P/ETP 1931-60		1,2	0,75	
1961- 90		0,77	0,54	
1991-2000		0.86	0.57	

Les deux tableaux (77 et 78) montrent que les besoins en eau de la végétation sont largement supérieurs aux apports pluviométriques. Dans son ensemble, la pluie dans la vallée, de Dagana à Matam, représente 10 à 20 % de la consommation totale du couvert végétal. Les mois les mieux arrosés août et septembre couvrent une moyenne de 40 % de l'ETP à Podor, 77 et 54 % à Matam. Ainsi même si la saison pluvieuse est déficitaire.

En analysant les relevés moyens mensuels et inter-annuels de la pluviométrie à Matam, entre 1961 et 1990, le rapport P/ETP est favorable c'est à dire supérieur ou égal à 100, une fois tous les cinq ans en août, une fois sur 15, en septembre et 1 fois sur 25 en juillet.

Par contre la fréquence était plus grande au cours de la période 1931-1960 ; elle était de deux années sur trois (2/3) en août et une sur cinq (1/5) en septembre. Le rapport était respectivement de 1.2 et 0.75 (cf. tableau 77).

Par rapport à la normale 1931- 1960, les sécheresses sont de nos jours plus fréquentes à la fin du XX^e siècle et les écarts importants, particulièrement à Podor où les quantités enregistrées sont faibles. La dernière décennie est moins déficitaire que celles des années précédentes et particulièrement de 1980-1990.

2. L'indice de Thornthwaithe

L'application de la méthode de Thornthwaithe exige la connaissance des indices suivants :

$$\text{- indice d'humidité (IH)} = \frac{100 \times \text{Excédent (EX)}}{\text{ETP}}$$

$$\text{- indice d'aridité (IA)} = \frac{100 \times \text{Déficit (D)}}{\text{ETP}}$$

- La concentration estivale de l'efficacité thermique qui est le rapport entre l'évaporation des mois les plus chauds et l'évaporation annuelle

$$= \frac{100 \times \text{ETP mois les plus chauds}}{\text{ETP annuelle}}$$

- la variation saisonnière de l'humidité effective à partir IA ou IH et l'indice d'efficacité thermique selon la valeur d'ETP.

La classification des climats selon Thornthwaite fait appel à ces paramètres : la température, la pluviométrie et l'ETP calculée à partir de sa propre formule. Les données utilisées portent sur la période de 1961-1990.

La classification appliquée à Podor et Matam a donné les résultats suivants.

Tableau 79 (a) : total annuel des pluies et ETP Thornthwaite à Podor et Matam

	P (mm)	ETP (mm)
PODOR	166, 1	1773
MATAM	293, 6	1833

Le tableau (77a) révèle que le déficit (D) est énorme ($D = \text{ETP} - P$).

L'indice d'humidité (IH) de ces deux décennies est de -92 à Podor et -84 à Matam. Ces deux stations sont dans un climat de type aride (l'aridité selon Thornthwaite se manifeste lorsque IH est égal à -40).

Le régime du climat était également aride au cours de la période 1931-1960 à Podor (-84) et à Matam (-70).

L'ETP est supérieur à 1700 mm (cf. tableau 79a et 79b), le rapport entre évaporation des mois les plus chauds et évaporation annuelle est inférieure à 48 (27.3 à Podor et 31.5 Matam) – dans ce cas, selon Thornthwaite, cela indique une faible variation de la température au cours de l'année.

Tableau 79(b) : ETP Thornthwaite dans la vallée (moyenne mensuelle en mm)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Podor	120	119	137	154	173	172	170	163	157	156	131	123	1773
Matam	125	123	154	166	186	178	172	161	152	155	136	125	1833

Globalement ces résultats situent la vallée dans un climat de type aride sans excédent en toute saison, à l'indice d'efficacité thermique 4^{ème} mégathermal et à faible variation de la température en cours d'année ; la formule climatique est :

$$E, d, A'3, a'$$

E = climat aride

d = peu ou pas d'excédent en quelque saison que ce soit

A'3 = indice d'efficacité 4^{ème} mégathermal

a' = faible variation de la température dans l'année

En plus du régime hydrique, la méthode de Thornthwaite permet de caractériser le régime thermique des sols de la région étudiée. Cela nécessite, cependant, la connaissance d'un autre paramètre, celui de la température de la section de contrôle du sol (0 à 50 cm).

L'application de la méthode situe les sols de la vallée dans un contexte pédoclimatique et les classe d'après les normes de la classification américaine (Soil Taxonomy, 1973) dans le régime thermique ci-dessous :

- le régime hyper thermique où la température moyenne du sol est supérieure ou égale à 22°C et la différence de température d'été (juin, juillet, août) et d'hiver (décembre, janvier, février) est supérieure à 5°C à une profondeur de 50 cm de la surface.

La caractérisation du régime thermique est faite à partir des relevés de l'année 1983 (année à pluviométrie exceptionnellement déficitaire) à la station de Fanaye (ISRA).

- La température moyenne annuelle est de 32.9 °C,
- en été, elle est de 35.9 °C,
- en hiver, la température à 50 cm de profondeur est de 28,4 °C,
- l'écart été - hiver est de 7.6 °C

Tableau 80 : température °C moyenne mensuelle du sol à 50 cm de profondeur (station Fanaye (ISRA) année 1983)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
26.4	28.3	31.9	33.7	36.2	35.6	35.8	35.8	36.4	36.1	31.9	27.2	32.9

En résumé, à partir de ce système de classification la vallée du Sénégal est caractérisée par un régime hydrique aridique et un régime hyper thermique. Ces résultats confirment ceux de T. C. Boyadgiev (1976). Les travaux de ce dernier situent les stations de Saint-Louis à Kaédi dans un régime hydrique de sol aridique, c'est à dire dans un milieu à forte chaleur, où les pertes sont très élevées et les besoins en eau considérables pour la végétation naturelle et les plantes cultivées. Les années 1970 et 1980 sont marquées par une installation progressive de l'aridité dans cette région nord du Sénégal.

3. L'indice d'humidité de Hiernaux

L'indice climatique d'humidité s'appuie sur un certain nombre de paramètres très courants comme :

la température moyenne (T) °C, la température maximale (TX) °C, la température minimale (Tn) °C et la pluviométrie totale annuelle (P mm).

Il s'y ajoute, le nombre de mois de la grande saison sèche (N) où P est inférieur à 50 mm et le nombre de la saison humide ou petite saison sèche (n) où P est supérieur à 50 mm.

La nouvelle formule s'écrit :

$$\text{I.H.} = 100 \frac{P}{T (TX - Tn) (N + n/2)}$$

Cette formule comme l'indique l'auteur, permet de cerner les problèmes de l'érosion et des formes de terrain en Afrique et surtout de situer la zone climatique correspondante à la station étudiée. Une carte de l'Afrique occidentale est établie à partir de cet indice climatique (voir carte 13, p.235).

IH < 1 la station est dans la zone désertique.

IH compris entre 1 et 10, c'est le Sahel, caractérisé selon l'auteur par :

des pluies irrégulières, une érosion éolienne et une désagrégation mécanique concourant à donner à cette zone un aspect pré-désertique.

IH compris entre 10 et 30, zone de transition, l'érosion éolienne est encore notable.

Dés que IH est > 30 les précipitations sont supérieures à 1 000 mm.

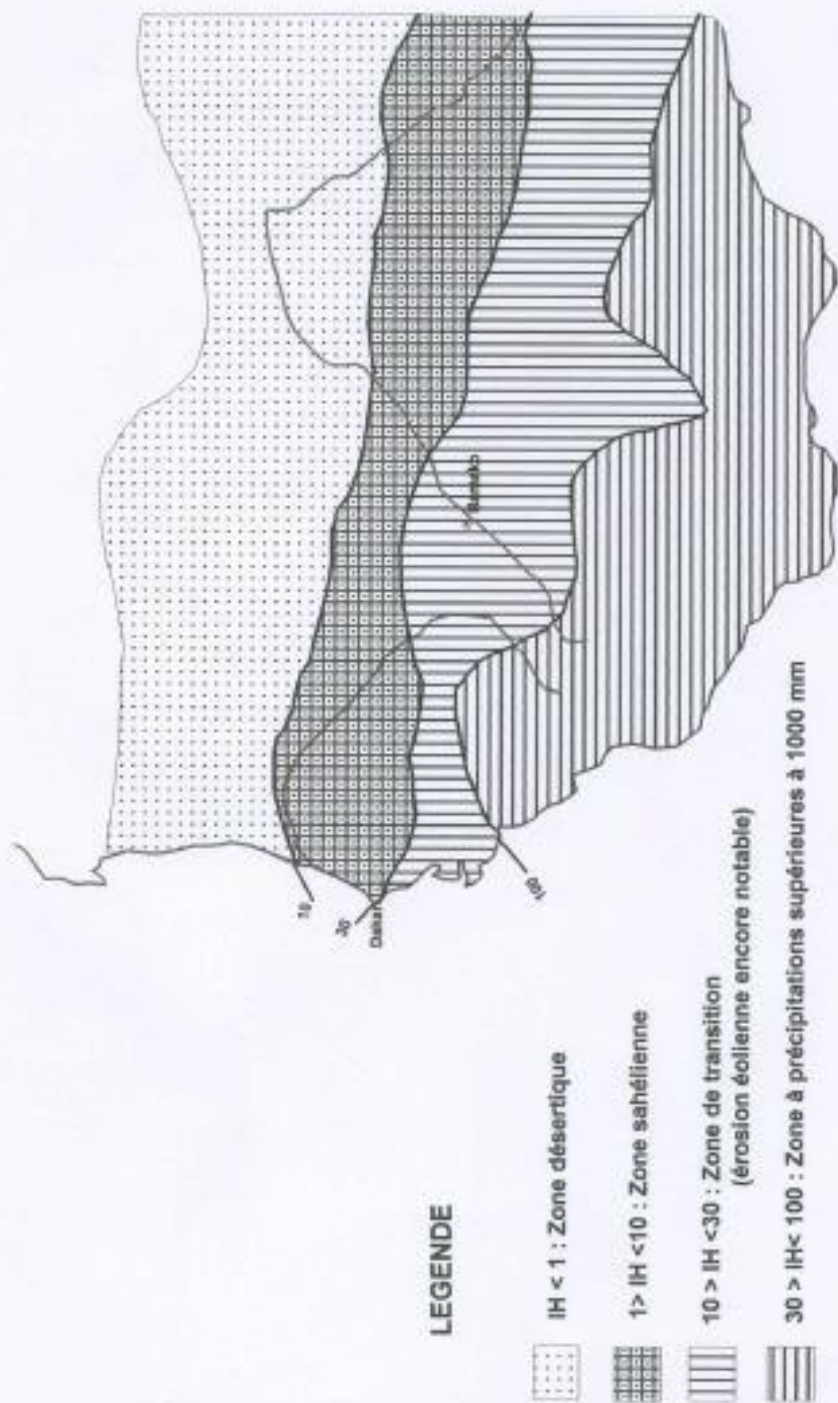
En appliquant la formule de Hiernaux sur deux années à Podor (1984 et 1990), les valeurs de l'indice sont faibles. On a obtenu respectivement $IH = 2$ et $IH = 8$.

Valeurs qui ont permis d'appliquer la formule de Hiernaux :

- année 1984 : $T_x = 34,2$; $T_n = 22,8$; $T = 29,3$ - nombre de mois de grande saison sèche (9) ; nombre de mois de la petite saison humide zéro (0)
- année 1990 : $T_x = 33,0$; $T_n = 22,3$; $T = 29,8$ - nombre de mois de la grande saison sèche neuf (9) ; nombre de mois de la saison humide 1.

Ces résultats comparés à ceux obtenus par l'auteur de la carte (carte 12) montrent qu'il y a péjoration apparente du climat au Sénégal et en particulier sa partie nord.

carte n° INDICE D'HUMIDITE DE HIERNAUX



4. L'indice bioclimatique (I. B.)

Dans un de ces rapports, C. Dancette (1976) a mentionné (sans l'appliquer) ce système de détermination du régime du climat. L'indice est obtenu par la formule :

$$I.B = \frac{ETR \times 100}{ETP}$$

Le rapport ou quotient évapotranspiratoire est défini comme un véritable « *indice bioclimatique* » (J. L. Borgne, 1990).

En climat humide, il est proche de 100 ; par contre il est voisin ou égal à zéro en climat aride. Au cours de ces trente dernières années (1961-1990), l'indice moyen à Podor est de 11. Pendant l'hivernage, en août et septembre, il varie entre 40 et 50. Par conséquent, le nombre de mois où les besoins hydriques sont satisfaits est nul.

A la période 1931-1960, l'indice moyen était aussi faible (égal à 16) (voir page 239). Même en saison des pluies le taux de couverture, bien que supérieur à la situation actuelle, était déficitaire : 75 en août, 63 en août et septembre. Dans la délimitation des zones climatiques faite par J. Le Borgne (tableau 81), la région de Dagana et Podor appartient à la zone semi-aride à tendance de plus en plus sèche. Les apports pluviométriques sont insignifiants par rapport à la demande exprimée par la végétation.

Tableau 81 : Limites des zones bioclimatiques

	INDICE	Nombre de mois où les besoins sont satisfaits
ARIDE	< 5	0
SEMI-ARIDE	5 à 20	0
SEC à SUBHUMIDE	20 à 40	1 à 4
SUBHUMIDE à HUMIDE	40 à 60	4 à 6
HUMIDE	60 à 80	6 à 8
HYPER HUMIDE	80 à 100	9 à 12

Source J. Le Borgne (1990)

A la station de Matam, la quantité d'eau précipitée est en nette régression. L'indice moyen passe de 30 à 20 entre 1931-1960 et 1961-1990. Une tendance sèche ou semi- aride s'affirme donc.

Ce climat s'est annoncé manifestement en 1972 et 1984, c'est à dire des années considérées au stade actuel comme le paroxysme de la sécheresse, par des valeurs respectives de 9 et de 11 contre 2 et 5 à Podor.

Si à Matam, le climat passe d'un régime subhumide à un régime aride, à Podor la tendance aride s'installe. La même régression est aussi relevée à Saint-Louis dans le delta (tableaux 91 et 92).

A l'instar des autres régions du monde tropical, on assiste dans la vallée du Sénégal à une dégradation sensible du climat. Les indices bioclimatiques des périodes 1931-1960 et 1961-1990 permettent de mesurer l'intensité de la sécheresse et l'altération du climat.

Tous les chercheurs sont convaincus de la présence d'un véritable changement du climat marqué par une translation des zones aride – semi-aride vers le sud (J. L Borgne, 1990). Des cartes spatialisent cette péjoration au Sénégal (cf. cartes 14 et 15 pages suivantes).

II - L'AMPLEUR DE LA SECHERESSE

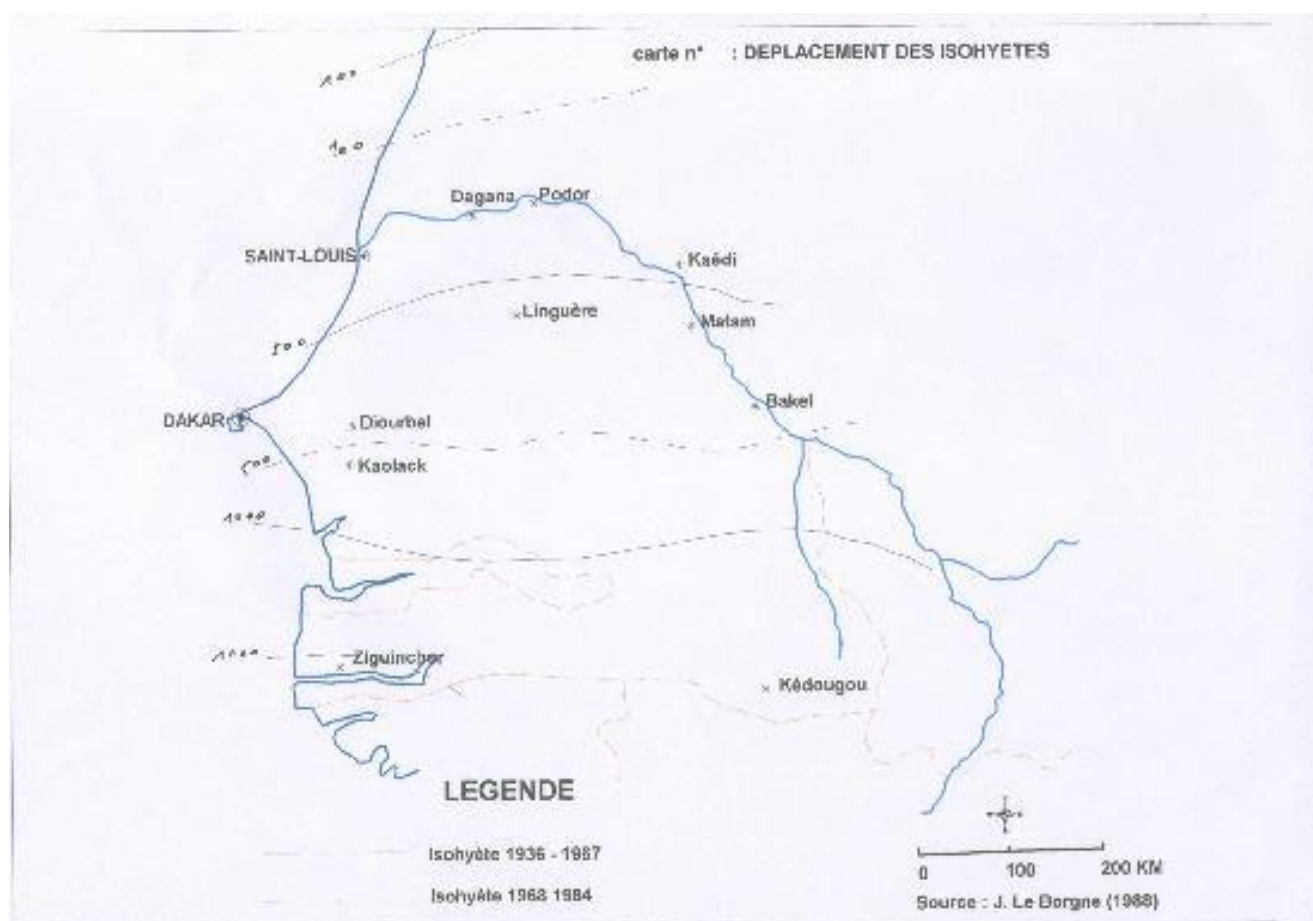
La sécheresse dans la région est d'origine météorologique puisqu'elle est liée à un déficit presque permanent de quantité d'eau précipitée annuellement. Elle a aussi pour cause des besoins en eau importants. Les moyennes journalières sont fortes en saison sèche, elles connaissent une légère baisse en saison des pluies. La variation saisonnière est en grande partie déterminée par les paramètres du climat.

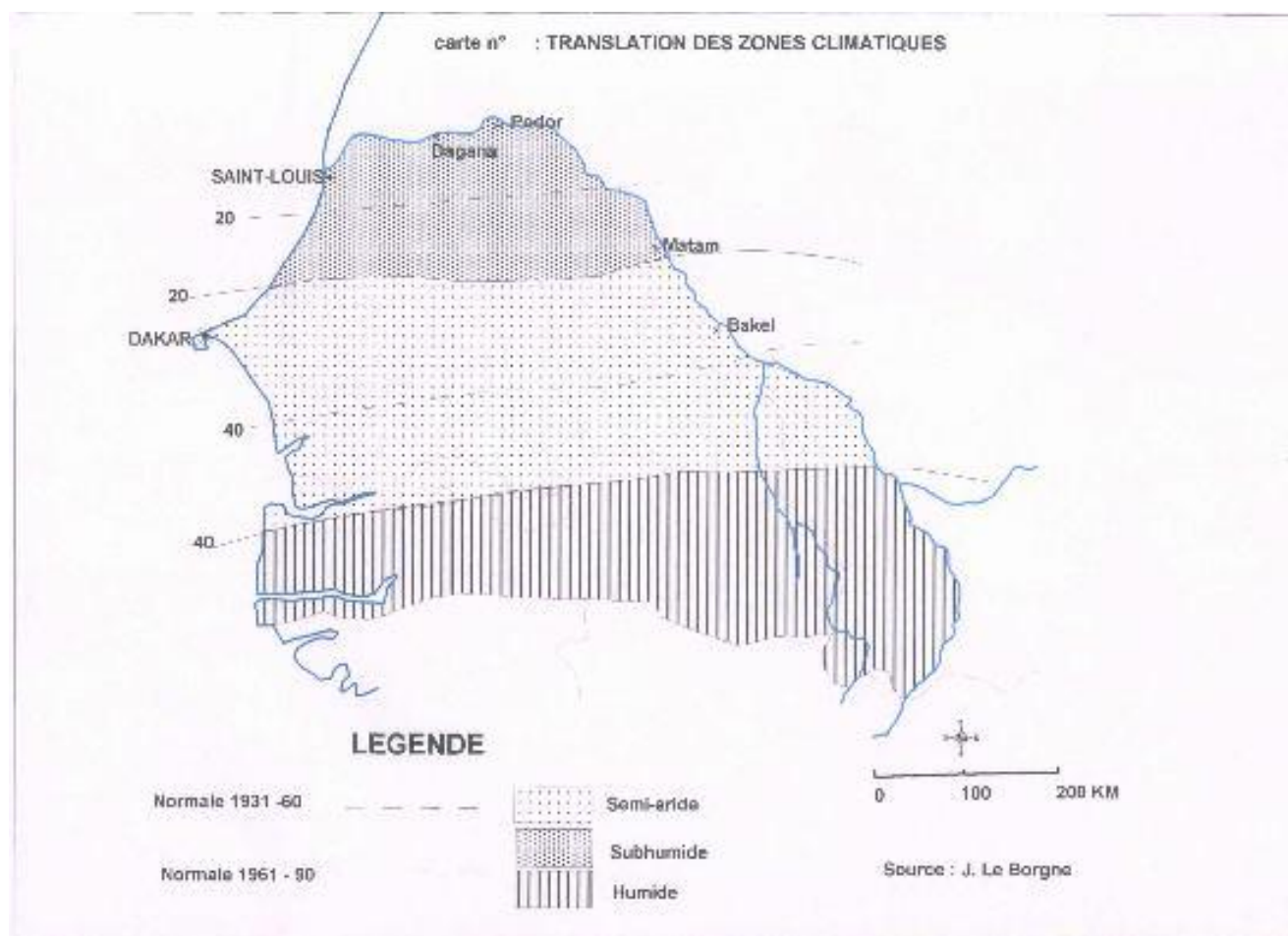
L'étude de la relation entre l'ETP et les éléments du climat va permettre de préciser l'influence de ces derniers dans la définition du climat, par delà le simple fait d'expliquer l'importance des besoins en eau et l'ampleur de la sécheresse. D'abord analysons ce caractère à travers les bilans de l'eau.

1. Les bilans de l'eau

Ils sont établis pour les périodes suivantes :

- 1931-1960
- 1961-1990
- les années 1972, 1984, 1990 (caractérisées par une pluviométrie très faible).
- et la période 1991-2000, afin d'établir un bilan plus proche de la réalité actuelle.





La réserve en eau du sol est estimée à 60 mm en raison d'une texture grossière, sable du diéri (celle de la transition diéri-walo (jejogol en Toucouleur) est de 63).

L'analyse des résultats par comparaison permet d'estimer si pour le couvert végétal, il y a oui ou non sécheresse, et si oui, de déterminer la durée et d'apprécier l'altération du climat.

L'examen des résultats révèle que (voir tableaux 82 - 83 et 87- 88) :

- le déficit de la pluie correspond à l'ETR, il est de l'ordre de 32 et 33 % respectivement à Podor et Matam. En comparant les normales 1931-1960 et 1961- 1990, l'indice bioclimatique a enregistré une baisse de 5 points à Podor (11 contre 16) de 8 à Matam (19 contre 27) ; ce qui est considérable et la preuve aussi d'une dégradation climatique ;
- la situation actuelle de Podor, c'est à dire, un taux de couverture insuffisant ne date pas des trente dernières années.

Au cours de la période 1931-1960, le climat était sec, ETR était aussi identique à la pluviométrie.

Également, à Matam le déficit hydrique s'étend sur toute l'année 12 mois sur 12 contre 10 sur 12 entre 1931-1960.

Autrement dit la région est dans une phase de déficit sévère et prononcé. Une situation qui confirme les résultats de Thornthwaite et qui s'est manifestée en 1972 – 1984 et en cette période actuelle (1991-2000). L'indice est respectivement à 4- 2 - et 7.5 (tableaux 84 à 86).

La vallée est comprise dans la partie la plus sèche du bassin du fleuve, où les besoins en eau ne sont jamais entièrement satisfaits (T. C. Boyadgiev, 1976). Cette région se confond en plus d'année en année *“avec le sud de la Mauritanie, c'est à dire avec les limites du Sahel et de celles du désert qui ont dérivé vers le sud de 80 à 100 km”* (J. Le Borgne, 1988).

Ainsi le sol ne disposant d'aucune réserve, la végétation est presque inexistante dans le diéri, la nappe devient plus profonde, les phénomènes de mobilisation, de remblaiement et de destruction redoublent d'intensité.

a) Bilans de l'eau – Podor

Tableau 82 : Bilans de l'eau et indice bioclimatique à Podor (données de la période 1931-1960)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	0.6	1.6	0.9	0.1	3.2	15.8	67.7	131.8	83.8	23.2	2.8	2.0	333.5
Pluies utiles (mm)						15.8	67.7	131.8	83.8	23.2			322.3
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
variation de la réserve													
Réserve utile	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
ETR (mm)						15.8	67.7	131.8	83.8	23.2			322.3
Variation stock eau													
Drainage													

$$\text{indice bioclimatique} = \frac{\text{ETR} \times 100}{\text{ETP}} = 16$$

Tableau 83 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Podor (données de la période 1961- 1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	0.9	1.5	0.3	0.1	0.1	6.4	50.1	74.2	78.3	15.7	0.4	0.7	228.7
Pluies utiles (mm)							50.1	74.2	78.3	15.7			218.3
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
ETR (mm)							50.1	74.2	78.3	15.7			218.3

$$\text{indice bioclimatique} = 11$$

Tableau 84 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Podor (données de l'année 1972)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Précipitations (mm)	3.2					3.9	10.2	58.4	7.6	24.8			108.1
pluies utiles (mm)								58.4		24.8			83.2
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
ETR (mm)								58.4		24.8			83.2

indice bioclimatique = 4

Tableau 85 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Podor (année 1984)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Précipitations (mm)						6.5	7.1	17.8	24	7.7	2.5		65.6
pluies utiles (mm)								17.8	24				41.8
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
ETR (mm)								17.8	24				41.8

indice bioclimatique = 2

Tableau 86 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Podor (année 1991-2000)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)						7.4	37.2	81	72.8	9.2			207.6
pluies utiles (mm)							37.2	81	72.8				191
ETP (mm)	130	141	171	193	217	212	204	175	165	170	135	121	2034
ETR (mm)							37.2	81	72.8				191

indice bioclimatique = 7.5

b) Bilans de l'eau – Matam

Tableau 87 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Matam (données période 1931-1960)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	0.9	0.7	0.3	0.1	4	50.4	130.5	202.3	121.7	22.3	2.3	2.2	534.7
pluies utiles (mm)						50.4	130.5	202.3	121.7	22.3			527.2
ETP (mm)	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103	1918
variation de la réserve								33.7					
réserve utile													
ETR (mm)						50.4	130.5	164	154.7	22.3			521.9
variation stock d'eau													
Drainage													

indice bioclimatique = 27

Tableau 88 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Matam (période 1961-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	0.3	1.4	0.1	1.6	1.2	26	93.2	125.7	88.2	22.2			363.9
pluies utiles (mm)						26	93.2	125.7	88.2	22.2			355.3
ETP (mm)	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103	1918
ETR (mm)						26	93.2	125.7	88.2	22.2			355.3

indice bioclimatique = 19

Tableau 89 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Matam (année 1984)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)				0.7	1.1	28.3	49.2	30.8	38.1	44.6	14.8		207.6
pluies utiles (mm)						28.3	49.2	30.8	38.1	44.6	14.8		205.8
ETP (mm)	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103	1918
ETR (mm)						28.3	49.2	30.8	38.1	44.6	14.8		205.8

indice bioclimatique = 11

Tableau 90 : bilan de l'eau et indice bioclimatique Matam (année 1991-2000)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)						18.4	88.5	141.9	92.7	19.6			361.1
pluies utiles (mm)						18.4	88.5	141.9	92.7	19.6			361.1
ETP (mm)	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103	1918
ETR (mm)						18.4	88.5	141.9	92.7	19.6			361.1

indice bioclimatique = 19

c) Bilans de l'eau – Saint-Louis

Tableau 91 : bilan de l'eau et indice bioclimatique St-Louis (période 1931-1960)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	0.8	1.3	0.1	0.2	1.2	7.2	44.2	155.8	96.7	28.5	2.4	2.3	341.7
pluies utiles (mm)							44.2	155.8	96.7	28.5			325.2
ETP (mm)	157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148	2018
ETR (mm)							44.2	155.8	96.7	28.5			325.2

indice bioclimatique = 16.1

Tableau 92 : bilan de l'eau et indice bioclimatique St-Louis (période 1961-1990)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)	1.7	1.3	0.2			5.4	42.4	96.2	88.1	26.6	0.3	0.7	262.9
pluies utiles (mm)							42.4	96.2	88.1	26.1			252.8
ETP (mm)	157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148	2018
ETR (mm)													

indice bioclimatique = 12.5

Tableau 93 : bilan de l'eau et indice bioclimatique St-Louis (période 1991-2000)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
précipitations (mm)						4.7	34.8	109.4	76.9	18.8			244.6
pluies utiles (mm)							34.8	109.4	76.9	18/8			239.9
ETP (mm)	157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148	2018
ETP (mm)							34.8	109.4	76.9	18.8			239.9

Indice bioclimatique = 1

2. Les facteurs déterminants

Le bassin aval du Sénégal apparaît assez uniforme. L'analyse du climat situe cette région dans la zone bioclimatique semi-aride balayée par des vents souvent violents entraînant en suspension dans l'air, des sables fins, des limons des anciennes levées où la végétation a presque disparu. L'uniformité ne justifie pas une comparaison exhaustive. Mais dans la mesure où l'on considère l'évaporation, un élément synthétique du climat, comme étant « *une réponse de la surface à une demande énergétique externe* », ce sont les facteurs de cette demande qu'il faut examiner.

L'idée est de chercher les relations de chaque élément du climat avec l'évaporation.

-Le rôle important du vent et de la température

La corrélation statistique est établie à Saint-Louis, Podor et Matam entre les valeurs d'ETP Penman estimée avec les paramètres climatiques de la période 1961-1990. La corrélation est bonne (cf. fig.19 à 20, p.248-250). A l'ouest du bassin, la relation est forte avec le vent. Cet élément est aussi un facteur de la sécheresse dans la moyenne vallée, précisément dans la région de Matam. La corrélation vent – ETP y est de l'ordre de 0,84.

Les besoins en eau augmentent au fur et à mesure que s'accroît la vitesse du vent. Le maximum de l'évaporation dans le delta précisément à Saint-Louis correspond à celui du vent, de même que le minimum. L'allure des courbes est identique ; elle est légèrement décalée d'un mois avant ou après à Matam, mais le profil est correct (voir fig. 21, p. 252).

Tableau 94 : Paramètres climatiques et corrélations avec ETP – station de Saint-Louis

Paramètre (Mois)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm)	157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148
ETP (/10)	15,7	16,8	20,2	20	19,9	16,6	16,6	16,4	14,6	16,5	13,7	14,8
Vent (m/s)	4,2	4,5	5,1	5,6	5,4	4,7	3,9	3,5	3,5	3,5	3,5	3,7
Température (°C)	22,9	24,1	24,6	24,5	24,6	26,5	27,5	28,3	28,8	28,8	26,6	23,8
Insolation (h/j)	7,61	8,58	8,54	9,23	9	7,08	7,66	8,1	7,62	8,54	9,88	7,08
TV (hpo)	11,568	13,51	15,601	17,513	20,088	25,184	27,875	30,78	21,625	27,016	18,633	11,384
Corrélations												
ETP & Vent	88%	<div>Régression linéaire: Vent en fonction de ETP</div> <div>Pente Ord. Origine Détermination</div> <div>0,032 -1,1 77%</div>										
ETP & T°	-33%											
ETP & Insolation	30%											
ETP & TV	-3%											
ETP	157	168	202	200	199	166	166	164	146	165	137	148
Vent mesuré	4,2	4,5	5,1	5,6	5,4	4,7	3,9	3,5	3,5	3,5	3,5	3,7
Vent calculé	3,9	4,3	5,3	5,3	5,2	4,2	4,2	4,1	3,6	4,2	3,3	3,6

Fig 19 : Corrélation ETP / Vent à Saint-Louis

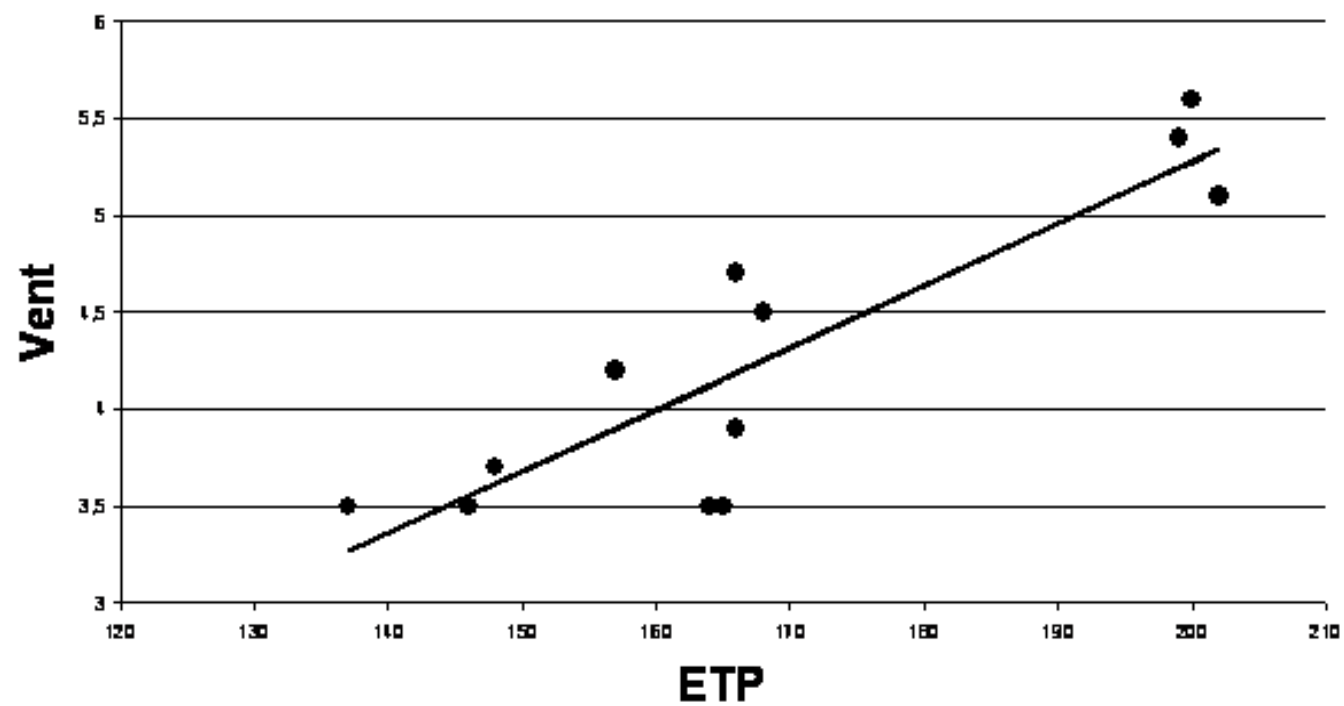


Tableau 95 : Paramètres climatiques et corrélations avec ETP- station de Podor

Paramètre (Mois)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm)	131	146	170	192	212	217	199	185	165	166	136	126
ETP (/10)	13,1	14,6	17	19,2	21,2	21,7	19,9	18,5	16,5	16,6	13,6	12,6
Vent (m/s)	2,6	2,7	2,3	2,3	2,5	3,2	3,4	2,7	2,3	1,8	2	2,2
Température (°C)	23,2	25,3	25,5	30,1	32,1	32,7	31	30,8	31,4	31,7	27,5	24,2
Insolation (h/j)	7,95	9,48	8,38	9,68	9,49	8,94	9,04	9,01	8,16	8,61	9,36	7,83
TV (hpo)	7,538	7,467	8,24	9,41	11,242	19,112	24,56	27,255	27,275	19,76	13,98	9,02
Corrélations												
ETP & Vent	52%	<div> Régression linéaire: Température en fonction de ETP Pente Ord. Origine Détermination 0,090 13,4 68% </div>										
ETP & T°	82%											
ETP & Insolation	50%											
ETP & TV	40%											
ETP	131	146	170	192	212	217	199	185	165	166	136	126
T° mesurée	23,2	25,3	25,5	30,1	32,1	32,7	31	30,8	31,4	31,7	27,5	24,2
T° calculée	25,2	26,6	28,8	30,7	32,5	33,0	31,4	30,1	28,3	28,4	25,7	24,8

Fig 20 : Corrélation ETP / T° à Podor

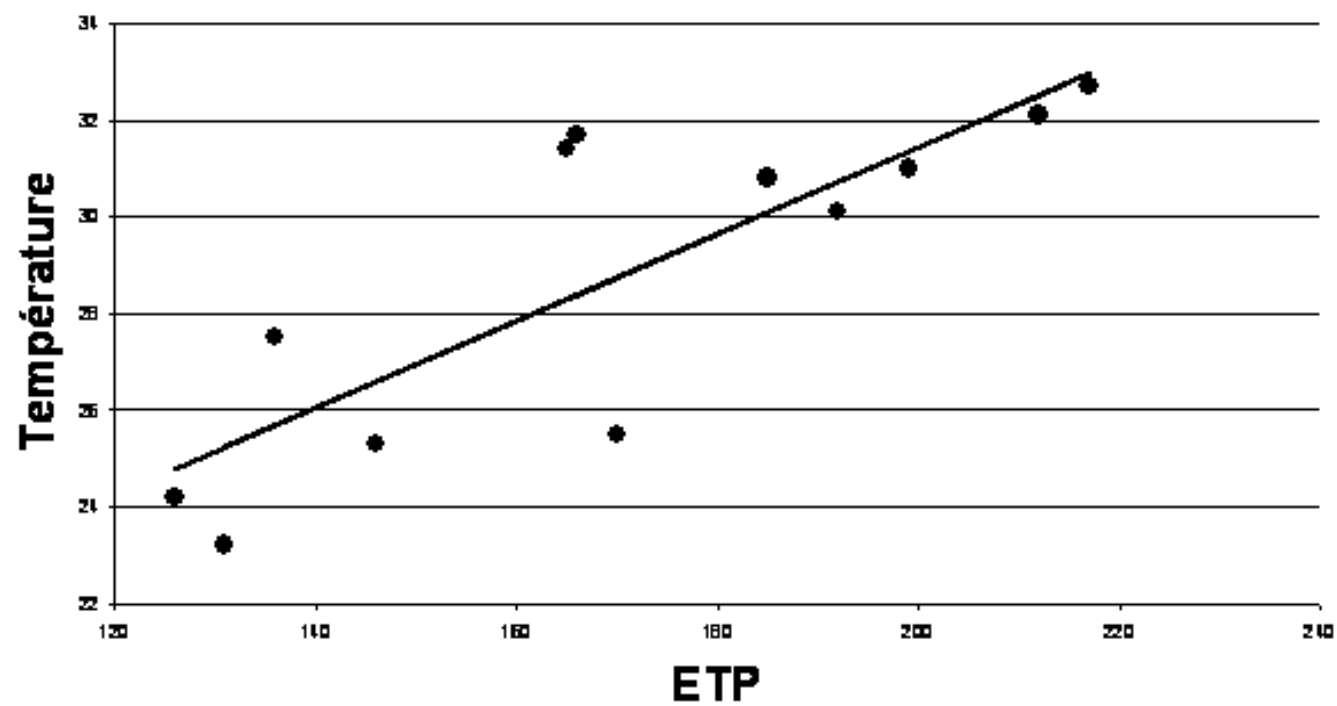
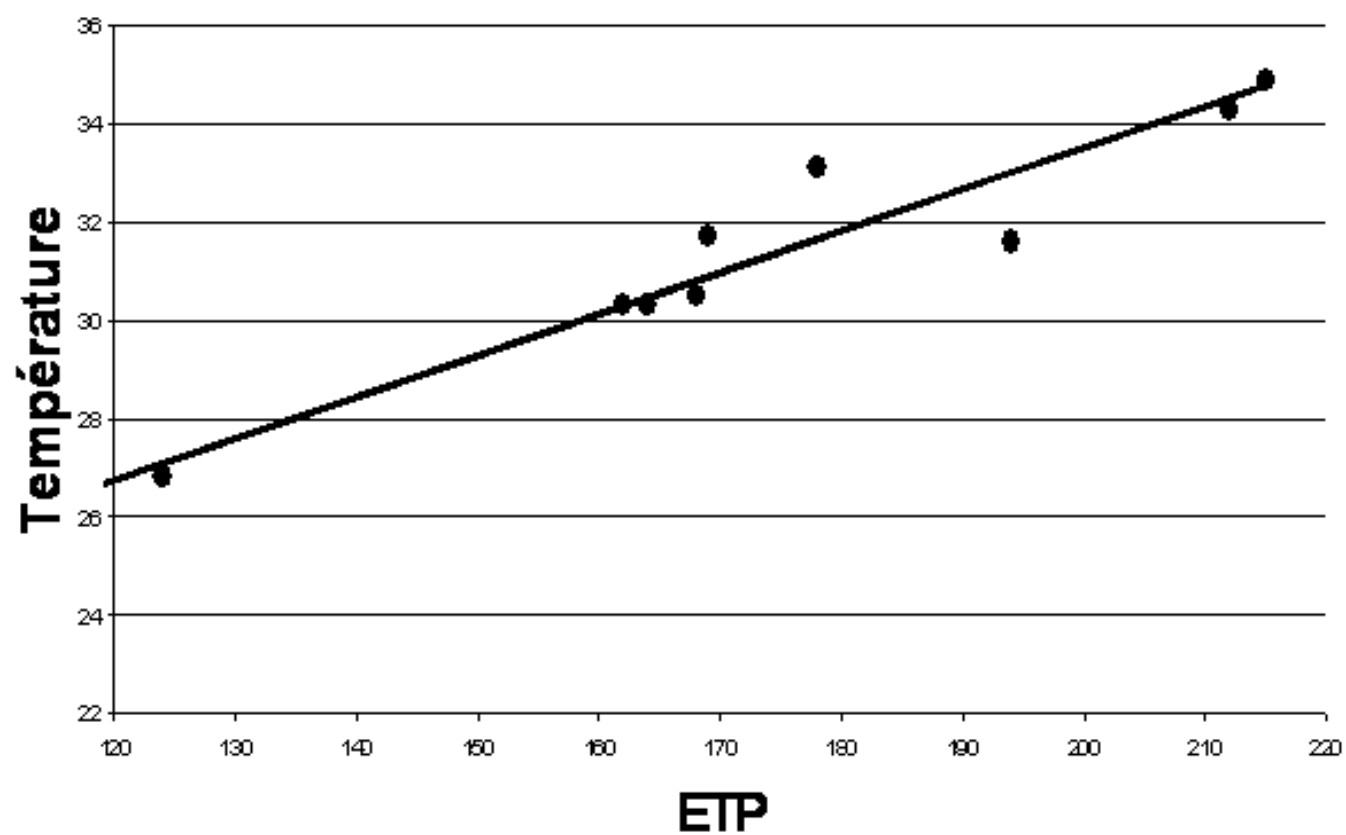


Tableau 96 : Paramètres climatiques et corrélations avec ETP - station de Matam

Paramètre (Mois)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETP (mm)	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103
ETP (/10)	11,2	12,4	16,8	17,8	21,5	21,2	19,4	16,4	16,2	16,9	11,8	10,3
Vent (m/s)	1	1	1,2	1,2	1,8	2,3	2,2	1,7	1,6	1,1	0,5	0,8
Température (°C)	24,5	26,8	30,5	33,1	34,9	34,3	31,6	30,3	30,3	31,7	28,6	24,9
Insolation (h/j)	9,15	9,96	9,91	10,49	10,28	9,73	9,61	9,21	9,22	9,76	9,62	8,88
TV (hpo)	7,247	8,435	9,096	10,345	13,646	19,19	21,997	27,382	27,59	19,902	12,21	7,987
Corrélations												
ETP & Vent	84%	<div> Régression linéaire: Température en fonction de ETP Pente Ord. Origine Détermination 0,085 16,6 91% </div>										
ETP & T°	95%											
ETP & Insolation	55%											
ETP & TV	48%											
ETP	112	124	168	178	215	212	194	164	162	169	118	103
T° mesurée	24,5	26,8	30,5	33,1	34,9	34,3	31,6	30,3	30,3	31,7	28,6	24,9
T° calculée	26,1	27,1	30,8	31,7	34,8	34,5	33,0	30,5	30,3	30,9	26,6	25,3

Fig 21 : Corrélation ETP / T° à Matam



La corrélation est mauvaise avec la tension de vapeur. Son profil est opposé à celui de l'ETP de la station de Saint-Louis. Les plus faibles humidités sont relevées aux mois où les facteurs advectifs (les vents) redoublent d'intensité balayant tout sur leur passage. En saison sèche, l'ouest du bassin est comparable au Sahara.

Dans la vallée, une bonne relation est obtenue entre l'évaporation, la température et l'insolation, c'est à dire le facteur énergétique ; r est respectivement à 0.95 et 0.81. La bonne relation est confirmée par l'analyse des courbes d'évolution (cf. fig.22-24, voir pages 254-255). Le gradient est correct. Les minima et les maxima correspondent.

Par rapport à la tension de vapeur, plus l'humidité est forte moins l'évaporation est importante. Le second maximum de l'ETP est atténué par une tension encore élevée en raison des vents assez faibles.

L'examen des résultats décrits plus haut révèle que :

- la variabilité du climat dans le bassin du Sénégal est d'une part due à l'effet des apports advectifs et d'autre part à la température et à l'insolation. Le responsable de la sécheresse dans le delta est le vent. La demande en eau s'accroît davantage à l'arrivée des alizés continentaux et de l'harmattan,
- dans la vallée, le rôle du facteur énergétique et celui du vent sont très forts, très déterminants pour rendre plus fiable les explications sur la forte évapotranspiration et le climat actuel de la vallée.

Le climat en Afrique au sud du Sahara et dans la vallée du Sénégal précisément s'est dégradé au cours des trente dernières années du XX^e siècle. Les isohyètes ont migré vers le sud, entraînant une persistance de la sécheresse qui n'est plus uniquement saisonnière mais qui couvre l'année entière. Un déficit hydrique s'installe et la végétation est en voie d'appauvrissement voire de disparition.

Les recherches et les rencontres scientifiques qui se sont multipliées après 1972 et 1973 confirment cette assertion. Le résumé de certains travaux ou études sur le problème climatique présenté ci-dessous montre la place particulière des mouvements de l'atmosphère et du facteur énergétique dans l'origine de la sécheresse de ces dernières années.

Saint-Louis

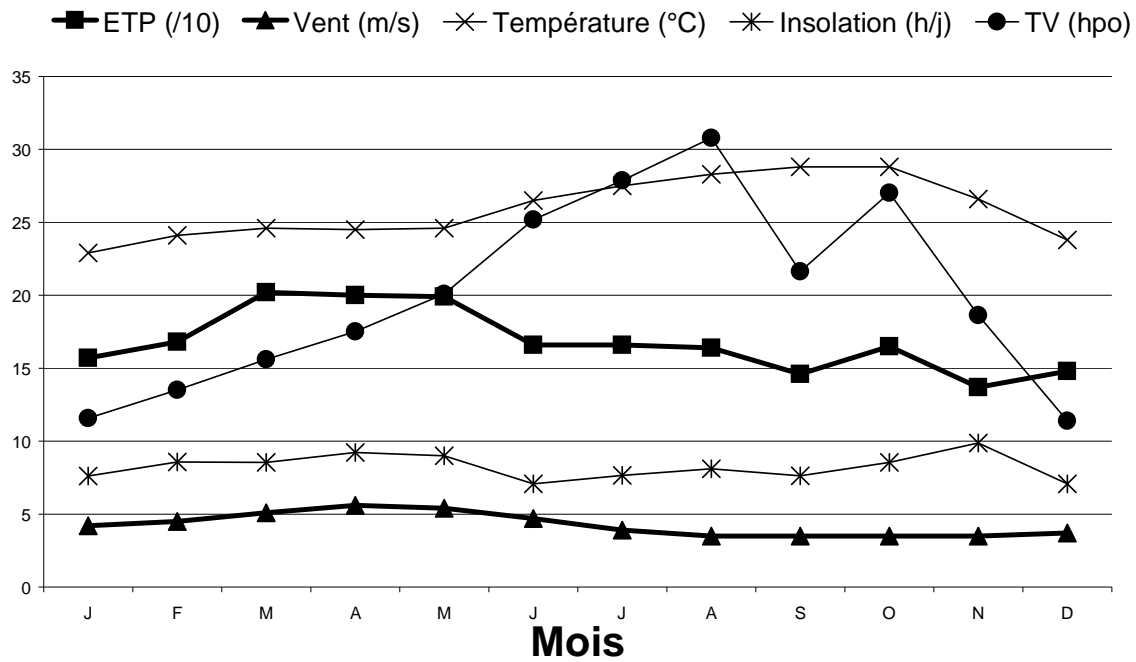


fig. 22 : courbes d'évolution ETP et éléments du climat à St-Louis

Podor

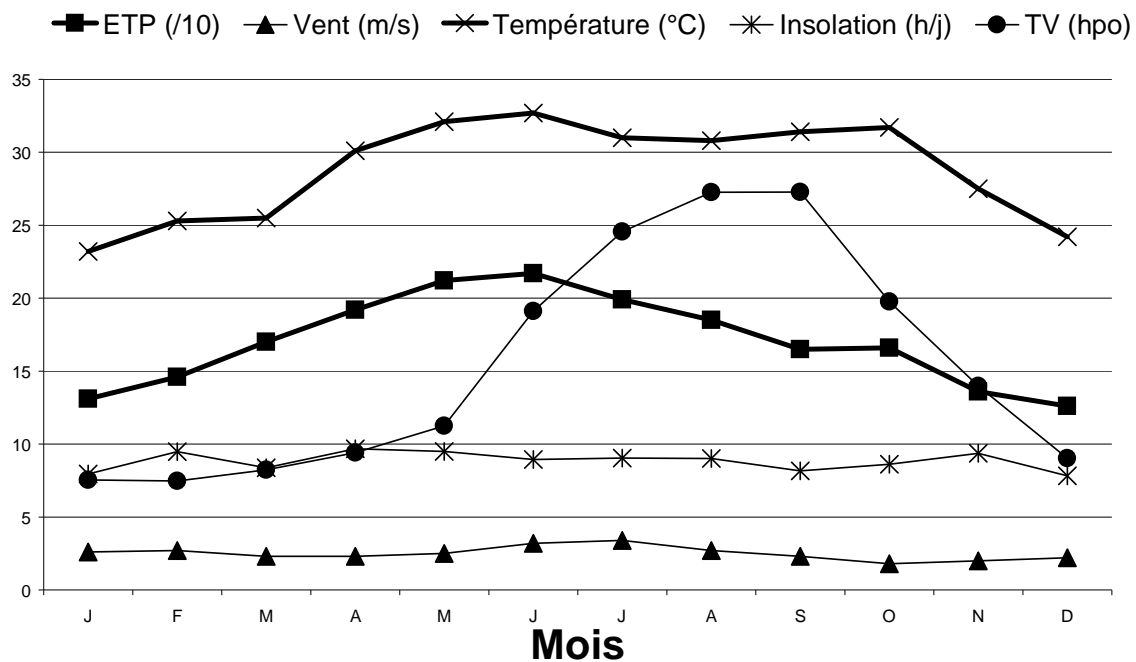


fig. 23 : courbe d'évolution ETP et éléments du climat à Podor

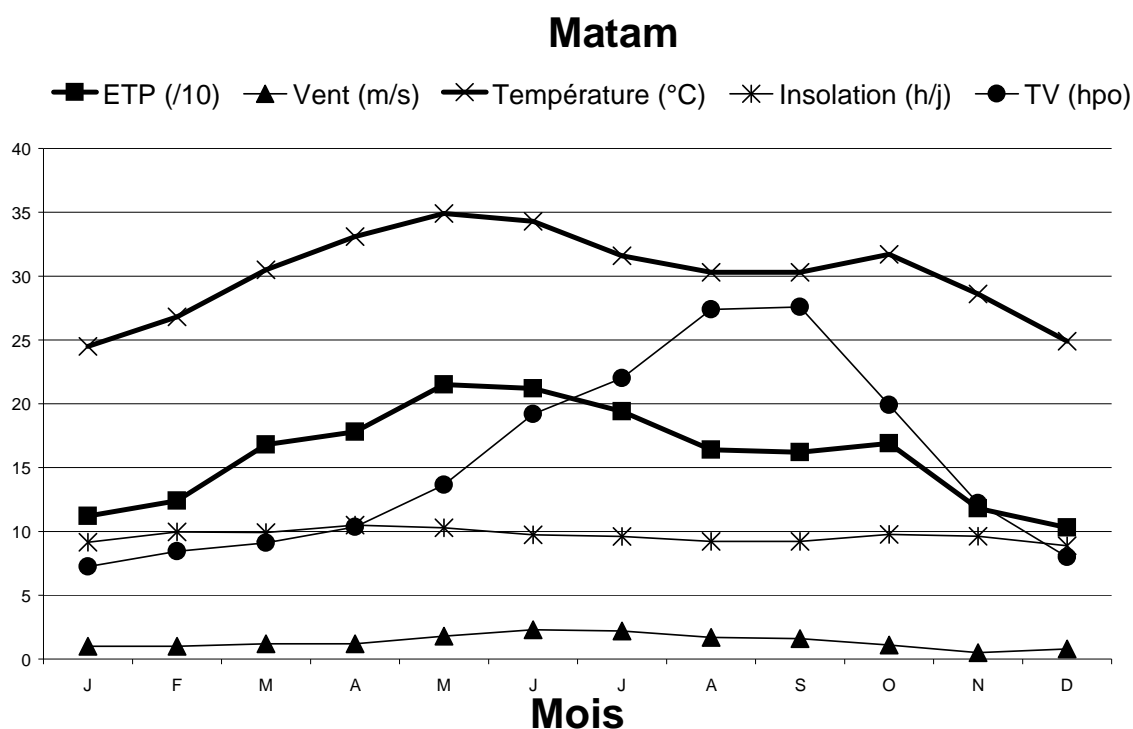


fig. 24 : courbe d'évolution ETP et éléments du climat à Matam

3. Quelques interprétations des causes de la sécheresse

a) Hausse de la température

Le système planétaire passe par des phases d'équilibre « chaud » et « froid ». La variabilité actuellement observée ne dépasse pas la fourchette « normale » ; il semble que cette variation ait des causes naturelles. Parmi elles, il existerait une relation entre les variations des tâches solaires et les températures. La réduction du nombre des tâches ou son augmentation serait la cause de modification d'insolation et donc de changements climatiques. L'on aurait reconnu en Amérique du nord et en Europe, l'existence de cycles de 11 ans dans l'évolution de leur nombre, mais aussi, des cycles pluri-décennaux.

S'il faut croire les stations météorologiques du monde, particulièrement celles situées entre les tropiques et le long du bassin du Sénégal, la situation est préoccupante. Les années 1980 ont connu six des sept étés les plus chauds depuis les premiers relevés météorologiques, il y a 150 ans.

Les températures sont à la hausse dans toutes les régions. En zone intertropicale on a relevé une plus grande fréquence des fortes températures au cours de ces deux dernières décennies.

Au Brésil, les météorologues s'accordent sur le fait que cette période est la plus chaude de ce siècle ⁽¹⁾.

1) - réponse du Président de la République du Brésil au sommet de Rio

Dans les moyennes latitudes, à Paris, la température moyenne de l'air s'est élevée de 1° depuis 100 ans. D'ici l'an 2050, elle pourrait s'élever encore de 2 à 3 °C ⁽²⁾.

Des scientifiques du centre de recherche Byrd Polar ont révélé (en 1992) que les glaciers de montagne de moyenne et basse altitude fondent et reculent, certains relativement vite, et que les marqueurs placés montrent que les cinquante dernières années sont les plus chaudes de tous les cinquantenaires pour lesquels on dispose de données ⁽³⁾.

La régularité des fortes chaleurs est relevée dans la vallée du Sénégal. Les températures moyennes mensuelles sont supérieures à 35 °C, 9 années sur 10 aux mois d'août et septembre. Elles peuvent atteindre voire dépasser 40 °C en août. Les moyennes maximales sont de l'ordre de 44 à 45 °C dans la moyenne vallée (station de Fanaye).

La poussée du thermomètre est vérifiée de Saint-Louis à Matam en passant par Podor. Partout, la chaleur est en hausse de 1 à 1.5 °C. Le taux d'avortement élevé de certaines variétés de riz en expérimentation dans la région est dû aux fortes températures.

En plus des continents, les masses océaniques connaissent un réchauffement. Des recherches très actuelles apportent les témoignages de la mer, de l'océan au lendemain de la grande sécheresse de 1983-1984 en Afrique tropicale et la vallée du Sénégal. P. Rual et Servain (1985) ont montré « *qu'au cours de l'été austral dans l'océan atlantique, la température a dépassé 1 à 2 °C* ». Aussi pour eux « *ce réchauffement n'est pas un phénomène isolé* ». La température de saison chaude dans les deux hémisphères est de plus en plus élevée.

P Hisard (1985) en étudiant la variabilité de la température dans le golfe de Guinée (vers Cotonou) aboutit au même résultat, c'est à dire, des eaux marines plus chaudes de l'ordre de 1 à 2 °C.

L'augmentation de la température de l'océan pacifique est confirmée par les données satellites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Aux abords de Tahiti, des îles en Nouvelle Guinée, les scientifiques relèvent des températures océaniques supérieures à la normale de 1 à 1.5 °C (B. Salvat, 1991), des résultats similaires sont obtenus par M. Tabeaud et F. Bessat (1998) sur la Polynésie.

La pollution de l'atmosphère terrestre par le CO₂ et d'autres gaz en effet de serre (H₂O, CH₄, CFC, HCFC, O₃, N₂O) devrait entraîner un réchauffement progressif du climat dans les prochaines années (W.W. Kellog, 1981).

2 Météo France 1998

3 idem

Une vingtaine de scénarios, fondés sur les simulations de la circulation globale de l'atmosphère, aboutissent à une augmentation possible de la température de l'air de 3°C ($\pm 1,5^\circ\text{C}$) dans la basse atmosphère vers le milieu du XXI^e siècle.

« Tous les modèles s'accordent sur une hausse de la température proportionnelle à la latitude 2 à 6°C dans les moyennes latitudes, 1 à 2°C en zone intertropicale » (H.N. Le Houérou, 1993), donc c'est en zone intertropicale que cette hausse sera plus faible. Mais à Podor, le thermomètre s'est relevé de 2°C entre 1971 et 2000 (voir page 127).

Si l'on pense que la température va encore augmenter de 3°C (uniformément répartie tout au long de l'année) sans qu'il ait de changement significatif de la pluviosité en quantité et en saisonnalité, selon Houérou (1993), on pourrait s'attendre au Sahel à des conséquences suivantes :

- une augmentation de l'ETP annuelle de l'ordre de 70 mm pour chaque 1°C annuel
- une diminution de quotient P/ETP de l'ordre de 10 à 20 % dont la conséquence est :
- un déplacement des zones écoclimatiques en altitude comme en latitude avec une translation de la zone aride vers la zone semi- aride et cette dernière vers la zone subhumide.

Nous nous sommes rendus compte que dans la vallée, l'indice bioclimatique ou quotient P/ETP, a baissé de l'ordre de 30 % (31 % pour Podor et 29 à Matam) entre 1931- 60 et 1961- 90. Les stations ont glissé respectivement vers l'aridité et vers un climat semi- aride.

En d'autres termes, les paysages désertiques se sont étendus et pourraient encore s'étendre jusqu'au milieu du siècle, aggravés par une pression humaine et animale de plus en plus importante. Dans la région étudiée, l'impact des sociétés humaines est lié au développement de l'irrigation, à la culture de décrue et à un niveau moindre, aux cultures pluviales. La population va croître à un rythme rapide à cause de l'accroissement naturel et de l'arrivée massive de nouveaux colons, de nouveaux ouvriers agricoles attirés par la vallée.

Si tous les scientifiques constatent la hausse de température, ils ne s'accordent pas sur la part de responsabilité des sociétés humaines. Pour certains, la cause de la sécheresse est anthropique. L'action des sociétés humaines est marquée, en zone intertropicale, par la destruction de la végétation pérenne provoquée par différents processus comme le surpâturage, les défrichements intempestifs, une gestion désastreuse des écosystèmes...

Dans les Etats sahéliens membres du CILSS, « *le bois et le charbon de bois couvrent entre 60 % (Sénégal) des besoins énergétiques. Des grandes métropoles ouest africaines comme Dakar, St- Louis, Nouakchott... sont en partie alimentées en bois et en charbon de bois à partir de la vallée du fleuve* » (Ph. Chamard et M. F. Courel, 1999).

Ainsi, l'action anthropique est aussi citée dans le lot des principaux acteurs de la sécheresse. Les avancées technologiques permettent de nos jours aux scientifiques de mieux saisir la réalité des variations pluviométriques dans le Sahel en général, en fonction de la variabilité interannuelle de la mousson et de son interaction avec la température. Par ailleurs on peut augurer des progrès substantiels à travers l'utilisation des images par satellite.

Il semble de plus en plus évident que l'activité humaine a un impact sur les variations climatiques.

« Le forçage anthropique », c'est-à-dire, l'augmentation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre résultant de l'activité humaine serait la cause la plus probable du réchauffement de la terre observé depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle et du changement climatique. Le réchauffement climatique est un phénomène d'augmentation à l'échelle mondiale et sur plusieurs années de la température moyenne des océans et de l'atmosphère.

Il se pourrait aussi que l'assèchement de la zone sahélienne soit lié, directement ou indirectement, à la déforestation des régions très humides ou aux changements intervenus dans la composition de l'atmosphère depuis le début de ce siècle : augmentation du CO₂, du CH₄, des CFC (chlorofluorocarbones), des aérosols minéraux dont les déserts sont les principaux pourvoyeurs.

b) La variation du vent

L'agitation atmosphérique ou le déplacement des vents est imputable aux variations de la température et du champ de pression. En effet, les flux qui se succèdent au-dessus de l'Afrique, alizés et moussons ont des caractères thermiques et hygrométriques très particuliers.

Le littoral est constamment intéressé par l'alizé maritime frais et humide. L'intérieur est marqué par les alizés continentaux chauds et secs atténués par la mousson.

L'aire recouverte par ces flux varie. Elle est déterminée par la remontée du FIT, lui-même dépendant des conditions climatiques (conditions thermiques du moment). En période très froide (exemple période glaciaire Würm 3) les centres d'action du nord sont très puissants pendant l'hiver. Les pulsations pénètrent profondément en direction des tropiques (voir carte 16, p. 262). Les pluies d'origine tempérée se sont enfoncées à l'intérieur du Sahara. En été, les coulées polaires remontent vers le nord mais de faible amplitude. L'Europe est encore recouverte de glace.

Sur l'Afrique tropicale, en hiver, l'équateur météorologique est rejeté dans l'océan (voir carte 16) au sud du golfe de Guinée. La mousson est retenue au sud. Donc dans l'hémisphère nord, l'alizé est roi. En été, la remontée de l'équateur météorologique est de faible amplitude en raison de la présence fort remarquable des calottes glaciaires au nord, le flux de mousson est puissant mais la zone de balancement du FIT est réduite. En conséquence, on est à la latitude de la présentation des influences polaires et tropicales entre les latitudes 15°N/S. Ce qui entraîne un déficit pluviométrique élevé en Afrique tropicale, une forte activité éolienne et de mobilisation du sable.

En période chaude (comme lors de l'optimum post-glaciaire 7500-4000 BP) les jets ont une position plus septentrionale ; l'influence des masses continentales est accrue en raison d'une dépression creusée.

La remontée du FIT est importante, la liberté de manœuvre de la mousson est grande. Le domaine tropical en cette situation est considérablement élargi. Il s'étend au maximum limité par les tropiques. En cette période, les quantités d'eau déversées augmentent ; la mousson a une plus grande épaisseur ; la durée de la saison est allongée. Le ravinement prend le dessus sur les phénomènes subaériens.

En effet, le climat en Afrique suit la position du FIT (Front Intertropical) ou ITZC (Intertropical Convergence Zone). D'après Leroux (1983), on peut distinguer deux scénarios :

1. Lorsque le FIT est maintenu en position méridionale, soit parce que les anticyclones polaires mobiles, originaires du Pôle sud sont moins actifs que de coutume, soit parce que leurs homologues septentrionaux venus du Pôle nord sont au contraire plus longtemps et plus fortement actifs, le déficit pluviométrique est généralisé sur le Sahel et plus précisément sur la vallée du fleuve Sénégal. C'est le cas des années 1942, 1944, 48, 70, 71, 72, 73.... Cette situation se lit très bien sur la courbe des fluctuations de débit du fleuve Sénégal. Les périodes 1942-1950 et 1970-1984 apparaissent nettement comme sèches (figure fluctuations débit du fleuve).
2. Lorsque le FIT remonte haut vers le nord sous la forte poussée des anticyclones mobiles originaires du Pôle sud, on enregistre un excédent pluviométrique sur l'Afrique Sahélienne de l'Ouest et notamment au nord du

Sénégal. Les années à forte pluviosité (à titre d'exemple) pour le bassin du Sénégal sont comprises entre 1951 et 1957.

Ainsi avec les mouvements du FIT qui sont sous l'influence de la montée vers le Nord des masses d'air polaire venant du Pôle Sud ou de la descente vers le Sud des masses d'air venant du Pôle Nord, on saisit aisément la relation qui peut exister entre les fluctuations de température et celles de la pluviométrie. En résumé pour Leroux, une période froide pour l'Europe correspond à une période sèche au Sahel, une période chaude en Europe à un pluvial au Sahel.

Ainsi, à travers l'optimum post-glaciaire et dans les simulations actuelles, le réchauffement global s'est accompagné d'une augmentation de l'évaporation et des précipitations. De nos jours, le relèvement de la température a entraîné un accroissement des précipitations « *limité ou concentré malheureusement autour de l'équateur à 10° latitude et au-delà de 50° latitude dans les deux hémisphères* »⁽¹⁾.

Cette analyse correspond au mode climatique normal comme cela a été évoqué plus haut dans la première partie. Au Sahel, et plus précisément dans la vallée du Sénégal le mode anormal est le plus manifeste ; la hausse des températures a installé un climat sec plutôt qu'une série à régime climatique humide. En effet, un bilan hydrique déficitaire des sols est celui observé en milieu tropical, concernant la zone bioclimatique semi-aride et aride.

Les travaux de P. Rual et P. Servan (colloque de 1985- ORSTOM), ont relevé des anomalies sur la température des surfaces de la mer dans l'océan tropical.

Aux aberrations, serait associé un déséquilibre du système des anticyclones atlantiques qui, en 1984 serait la cause d'une remontée tardive et faible du FIT et de la sécheresse du Sahel. Martin et al. (lors du colloque de 1985-ORSTOM) en étudiant des caractéristiques morphoscopiques des grains de sable ont reconstruit les phases de fortes et de faibles énergies à l'embouchure d'un cours d'eau sur la partie sud du littoral brésilien et aussi explique une possible liaison entre les inversions du sens du transport littoral avec la modification de la circulation atmosphérique.

En effet, il existe sur cette côte deux directions principales de la houle, une première du SSE, la seconde de provenance du NE. La houle du SSE beaucoup plus forte joue un rôle prépondérant dans le littoral. Entre 5100 et 3900 B.P et à partir de 3600 B.P, tout semble s'être passé comme si, pendant la première période, la remontée de la houle du SSE avait été bloquée. Ce qui permet à la houle du NE de devenir dominante.

1 J. F. Royer et J. F. Mahlout (1985)

« Or, l'année 1983 est caractérisée par un blocage de ce type. Les inversions pourraient s'expliquer par une modification de régime de la houle dominante » (Martin, 1985).

Ce chapitre fait apparaître que :

- la vallée du Sénégal est située dans un régime hydrique sec ou semi-aride aggravé par une forte chaleur,
- le total pluviométrique enregistré est faible et est concentré en août et septembre qui reçoivent des quantités dépassant à peine 100 mm par mois,
- le déficit en eau s'est considérablement accentué au cours de la décennie 1970-1980,
- la tendance actuelle (1990-2000) est marquée par un léger relèvement de l'indice bioclimatique et une reprise timide des activités pluvio-orageuses fortement dépendante des facteurs aérologiques,
- en somme, il faut inscrire la dégradation du climat au Sahel et la vallée du Sénégal, particulièrement, dans un cadre plus général, planétaire. Les travaux concordent et attribuent la modification de la turbulence atmosphérique, à l'augmentation de la température, la variabilité des précipitations et le bilan hydrique déficitaire pour les stations en marge de la zone bioclimatique humide et hyperhumide du domaine tropical ;
- dans ces dernières, le vent et le soleil sont les principaux facteurs de la sécheresse, de l'inconfort du climat et les agents les plus actifs de la morphogénèse.

CARTE 16 OSCILLATIONS CLIMATIQUES EN AFRIQUE

CHAPITRE 3 : IMPACTS DU BILAN CLIMATIQUE SUR LA VALLEE DU SENEGAL

A partir des années 70, les écosystèmes se sont modifiés considérablement à cause de la dégradation des conditions climatiques (sécheresses), qui ont de fortes incidences sur le milieu naturel (notamment sur le couvert végétal). A cela est venu s'ajouter la réalisation des travaux d'aménagement de la vallée du fleuve dont la construction des deux barrages, Diama dans le bas delta et Manantali au Mali. Les digues qui ont été mises en place pour compléter les ouvrages et créer la zone de retenue d'eau de Diama ont complètement coupé l'ancienne zone d'inondation du fleuve de l'apport saisonnier en eau d'eau douce qu'elle recevait de la part du fleuve en période de crue. Ceci a rapidement occasionné d'importants dysfonctionnements écologiques au sein de ces espaces riches en faune et en flore. Les populations qui vivent essentiellement de l'exploitation des ressources naturelles se sont retrouvées en situation de conflit dans la vallée. La crise climatique en relation avec les difficultés économiques a engendré une suite d'effets sur l'écologie, la santé, l'élevage, la pêche, les cultures, le social et la politique.

I- LES IMPACTS SUR LA SANTE

Dans cet environnement marqué par la sécheresse, toute la population se tourne à un moment ou un autre de l'année vers le fleuve. Avec l'avènement des grands barrages on comprend donc que, aussi paradoxal que cela puisse paraître, le risque sanitaire majeur soit lié aux maladies à transmission hydrique. L'édification des barrages de Diama et Manantali a provoqué des changements écologiques profonds qui ont fait exploser le taux de prévalence des maladies hydriques dans la zone du bassin du fleuve Sénégal.

1. Recrudescence des maladies hydriques

La situation sanitaire dans le bassin a été décrite dans l'étude de l'impact de l'OMVS réalisée dans les années 1977/79 et les travaux publiés en 1990 par Medical Care Developpement International (MCDI) (USA) pour un plan directeur de santé du bassin du Sénégal. Ces données disponibles pour le Sénégal révèlent que les maladies les plus diagnostiquées sont : le paludisme (41%), les problèmes respiratoires (6%), les maladies diarrhéiques (4%), la rougeole (3%), le rhume (3%), les problèmes ophtalmologiques (2,5%), les vomissements (2,5%)...(MCDI, 1990).

Les résultats montrent que hormis le paludisme, les grandes endémies sont peu représentées dans la vallée du fleuve Sénégal. Mais certaines maladies pourraient connaître une forte recrudescence avec la réalisation des édifices hydrauliques et la multiplication des périmètres irrigués, d'autres vont apparaître (comme les bilharzioses) et d'autres vont diminuer du fait d'un meilleur accès à l'eau par la population (le choléra). Parmi les maladies qui vont se développer très fortement, est cité en premier lieu le paludisme.

En effet le paludisme, maladie cyclique, transmise surtout en saison des pluies, pose un grave problème de santé. *« 1,5 milliard de personnes dans le monde y sont exposées et 110 millions de cas sont relevés chaque année ; c'est la maladie qui touche le plus de monde dans les pays en développement et c'est aussi la maladie liée à l'eau la plus représentative »* (A.Gioda, 1992). *« Le paludisme est devenu la première cause de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans de la vallée »* (OMVS, journal n°1, juin 2006).

Son taux de morbidité est directement fonction de la durée et de la hauteur des pluies. Plus faible dans le delta et la basse vallée, son endémicité augmente vers l'amont du fleuve, et atteint son maximum dans le haut bassin où les pluies sont plus abondantes. Les enfants de six mois à cinq ans sont les plus atteints.

Avant la construction des barrages et l'établissement de périmètres irrigués le paludisme n'était pas endémique dans la région de la basse vallée. En 1974, Moulinier et Diop distinguent pour le paludisme, un gradient qui va de l'holoendémie dans le delta à l'hyperendémie dans le cours supérieur de la vallée.

Selon l'enquête réalisée par Medical Care, il n'était observable qu'à partir de 300 km en amont et à partir de là, sa prévalence augmentait rapidement jusqu'à Manantali pour atteindre des taux holoendémiques (76 +). Les eaux nouvellement captées du barrage de Diama sont susceptibles de faire croître dans de larges proportions les populations des moustiques. Ce qui va entraîner une progression du paludisme et d'autres maladies associées à l'arbovirus.

Pendant longtemps, les scientifiques *« ont établi une relation directe entre le nombre d'anophèles potentiellement vecteurs du paludisme et la gravité de la maladie »* (Q. Gioda, 1992). Or, barrages et irrigation augmentent la production de vecteurs. Une augmentation du paludisme, voire son introduction dans de nouvelles localités est depuis lors constatée.

Dans la moyenne vallée, les populations des moustiques et la prévalence du paludisme en résultant ont augmenté avec le démarrage des activités de périmètres irrigués et l'installation des communautés à proximité de ces endroits et des eaux du fleuve. *« La stabilisation du niveau du fleuve et de ses défluent, la création de canaux d'irrigation et d'inondation des périmètres sont autant de facteurs favorables à la prolifération des moustiques vecteurs du paludisme et aussi à la multiplication des foyers de bilharziose »* (OMVS, journal n°1 juin 2006).

Les bilharzioses sont devenues le souci majeur des services de santé de la vallée. Les études antérieures à la mise en eau de Diama mettent en évidence la grande hétérogénéité spatiale qui affecte la répartition de cette maladie par rapport aux autres grandes endémies citées. Un foyer de bilharziose urinaire est anciennement connu dans le delta du fleuve Sénégal dans le marigot de Lampsar (Vercruysse, 1985) ; une enquête effectuée par Diaw et al. quelques années plus tard, en 1990, montre que « *non seulement la population de bulins, hôtes intermédiaires de la bilharziose urinaire est en extension, mais que les hôtes de la bilharziose intestinale apparaissent* ».

En effet, la bilharziose intestinale qui était inconnue dans le bassin avant 1989 a fait son apparition et se développe rapidement. Le foyer nouveau de schistosomiase intestinale est la ville de Richard-Toll qui « *depuis 1988 connaît une très forte épidémie (60% de prévalence moyenne)* » (Handschumacher et al., 1992).

Avec ce taux, le *Schistosoma mansoni* apparaît de très loin comme étant la parasite le plus fréquemment rencontré dans l'étude faite par A.T. Seck (1991) à Richard-Toll. Les conditions bioclimatiques et l'accroissement démographique sont propices à la transmission des parasitoses, il s'y ajoute dans cette ville, le rôle joué par le manque d'hygiène et surtout le contact permanent de la population avec l'eau du fleuve ou les canalisations pour toutes les activités domestiques et professionnelles. D'où l'appellation par la population « *Feberu canal-bi* »¹, c'est-à-dire, la maladie du canal, faisant la relation avec l'eau des canaux d'irrigation.

La bilharziose urinaire est endémique à travers tout le bassin avec un taux plus faible dans le delta et dans la basse vallée que dans le haut bassin. Mais les foyers se multiplient, avec une prévalence qui atteint 90% à certains endroits. Avec cette fréquence, cette forme urinaire était très attendue à Richard-Toll, à cause de sa proximité « *avec des foyers traditionnels à Lampsar et Mbodiène, des localités du delta et même dans le département de Matam* » A.T. Seck (1991).

Etant donné qu'il y a davantage de gens dans la vallée, de parasites et de vecteurs, la possibilité d'une incidence accrue de la bilharziose urinaire est élevée, de même qu'une forte extension de la schistosomiase intestinale ; Richard-Toll est une zone agro-industrielle à grosse main-d'œuvre venant de toutes les régions et parfois des pays voisins ; ces travailleurs (saisonniers la plupart) sont un facteur évident de dissémination de la bilharziose qui pourrait poser de graves problèmes de santé aux populations, assaillies par d'autres maladies aussi dangereuses comme l'onchocercose.

L'onchocercose est une maladie grave qui sévit à l'état meso et hyperendémique parmi les communautés riveraines du haut bassin. Historiquement observée dans le bassin supérieur, la maladie atteint des taux hypoendémiques dans la moyenne et basse vallée du fleuve Sénégal. La construction du barrage de Diama ne devrait pas modifier la prévalence dans la partie inférieure du bassin.

¹ Appellation de la maladie en Wolof

Toutefois on peut penser que la réalisation de Manantali va stimuler le développement des mouches dans les eaux les turbulentes de la moyenne vallée supérieure.

Les trypanosomiasés sont relativement rares, tandis que la maladie du sommeil que l'on rencontre parfois dans le haut bassin n'y constitue pas un grave problème. Des cas isolés de leishmaniose cutanée ont été signalés. La dracunculose (ver de Guinée) a été trouvée dans la haute vallée et dans la région de Sélibaby où il existe des foyers gravement infestés qui entraînent des arrêts de travail pendant certaines périodes.

La rougeole, la coqueluche et la tuberculose, maladies transmises par l'air constituent les plus graves maladies des voies respiratoires et posent des problèmes importants de santé, surtout pour les enfants.

Les infections intestinales, la poliomyélite, le tétanos, les vers intestinaux et les maladies transmises par l'eau et les matières fécales sont les principales causes de maladies infantiles.

La lèpre qui existe à l'état endémique dans tout le bassin, avec une prévalence plus forte au Mali, pose un grave problème de santé. La syphilis endémique non vénérienne autrefois rencontrée partout dans le bassin a pratiquement été éliminée à la suite des campagnes de soins menés sous l'égide de l'OMS.

Les maladies épidémiques classiques (fièvre jaune, choléra et méningite due au méningocoque) n'ont pas connu de recrudescence grave ; les maladies fécales ou liées à un manque d'assainissement ont même connu une forte diminution en général, tout aussi la malnutrition qui a reculé grâce à la création de nouvelles terres agricoles. La peste n'existe pratiquement plus dans la sous-région.

2. Effets sur la qualité des eaux

Le développement des infrastructures hydrauliques et les activités ont aussi induit des changements écologiques ayant des répercussions importantes sur l'apport de nutriments, la stabilité et de la réduction de la salinité, lesquels ont accentué la prolifération des végétaux aquatiques.

En effet « *la vallée est envahie par différentes espèces aquatiques qui se sont développées de manière excessive en particulier les roseaux (Typha) depuis les années 1950, les phragmites en 1980, la laitue d'eau (début 1990), la fougère d'eau depuis 1999 et Salvinia molesta à partir de 2000-2001. La surface envahie par les végétaux était estimée en 2001 à 100 245 ha soit 24% de la surface totale du Delta et de la basse vallée* » (OMVS, 2006).

Ces plantes aquatiques se sont répandues à une grande vitesse dans le delta et la basse vallée et la croissance annuelle en hectares est impressionnante. L'OMVS a relevé « *une progression du Typha estimée à 10% dans le delta* » (OMVS, 2006).

C'est à partir de 1989, au lendemain de la construction des deux ouvrages, et surtout de 1992, qu'une progression fulgurante du *Typha australis* et du *Pista stratiotes* sont constatées à cause des nouvelles conditions écologiques de la vallée. Le phénomène est lié à la diminution des variations annuelles de la salinité ainsi qu'à l'élévation et la stabilisation du niveau des eaux douces induites par les aménagements. L'invasion est localisée au niveau des lacs de Guiers et de Rhiz, dans le delta et la moyenne vallée jusqu'à Podor.

Ces plantes affectent la qualité des eaux, en plus elles causent d'autres problèmes de santé car ce sont des abris pour les vecteurs de maladies telles que le paludisme et la bilharziose. Elles sont également nuisibles à la croissance des poissons et constituent une entrave aux activités économiques telles que la navigation fluviale, l'agriculture irriguée, la pêche etc. « *Elles perturbent aussi la biodiversité aquatique en contribuant à l'eutrophisation des plans d'eau menaçant ainsi la survie des écosystèmes* »¹.

La mise en service des aménagements hydrauliques a entraîné des bouleversements ayant effets sur la qualité des eaux. La campagne de terrain menée par les chercheurs de l'IRD (France et Sénégal) et leurs partenaires (du nord comme du sud) dans le bas delta du fleuve Sénégal en 2002 a montré une dégradation de la qualité des eaux malgré la forte dilution liée à l'hydrodynamisme. L'absence d'épuration des eaux usées et les rejets organiques liés à la très forte activité de pêche dans la zone se traduisent par une détérioration considérable de la qualité des eaux dans l'estuaire et en bordure du littoral.

L'échantillonnage a montré « *une contamination bactérienne autour de Saint-Louis, dans l'estuaire comme dans l'océan* » (2). « *En effet la présence de cyanobactéries potentiellement toxiques a été détectée dans les sites proches. Ces indices montrent que la qualité des eaux se dégrade dans l'estuaire du fleuve Sénégal* »².

Exploités pour leurs ressources et leur attrait touristique, ces milieux sont soumis à une forte pression anthropique. Or les attentes liées à l'aquaculture, au tourisme et à la conservation de la biodiversité sont difficilement conciliables avec les rejets d'eaux usées de la ville de Saint-Louis, qui compte environ 180 000 habitants.

L'eau est alcalinisante (son PH est élevé) ce qui empêche de bons rendements. Les intrants divers (engrais, pesticides...) sont aussi une source de pollution.

¹ Nouvelles du bassin, Bulletin d'information du projet de gestion des ressources en eau et de l'environnement, n°2-juillet 2006

² Voir Science Sud, journal de l'IRD n°17 – nov/dec 2002

Les barrages ont permis l'introduction de nouvelles cultures dont le riz et la tomate, consommées par toute la population. La culture du riz peut poser des problèmes de santé. La culture de cette graminée nécessite l'emploi d'engrais et de produits chimiques dont l'utilisation peut causer des maladies si l'eau des terres drainées est employée à des fins domestiques.

Les problèmes liés à l'eau se résument aussi à la pollution des nappes, au drainage et aux maladies récurrentes. Les quantités importantes de produits chimiques utilisés dans l'agro-business et dans les exploitations individuelles entraînent la pollution des nappes d'eau superficielles et souterraines par voie d'infiltration.

Dans la basse vallée, certains paysans utilisent près de 250 kg/ha d'engrais pour améliorer les rendements et pour restaurer les sols (engrais à base de phosphate pour la plupart). L'importance des écoulements superficiels de ce milieu favorise la sédimentation superficielle par le biais des particules solides qui vont se déverser vers les dépressions. Des phénomènes de colmatage sont ainsi constatés dans certaines cuvettes.

Le drainage y pose un véritable problème avec le déversement des eaux usées et polluées, notamment avec les écoulements d'eau provenant des industries agro-alimentaires. Or, les réservoirs d'eau douce (cuvettes ou dépressions) sont utilisés par les populations locales pour la consommation, la baignade, le linge et l'abreuvement du bétail. Ce qui aggrave les problèmes d'hygiène et de santé dans la vallée du fleuve Sénégal de plus en plus peuplée.

II. L'IMPACT SOCIAL

La population des trois états est estimée à 25 millions d'habitants (Badiane, 2003), (Atlas éco, 2006) et le taux de croissance annuelle est de 3% dans le bassin. Ce taux élevé entraîne une croissance rapide de la population et une concentration, notamment dans la vallée. La rive gauche renferme 11,5% de la population du Sénégal, tandis que sur la rive droite côté mauritanien y habite 36,5% de la population totale (Badiane, 2003). L'installation de cette population est antérieure à la mise en place des infrastructures hydrauliques et aux aménagements.

L'examen des données démographiques (réalisé par M. Badiane, 2003) prouve un doublement voire un triplement des effectifs dans les différents escales de la vallée entre 1961 et 1976. L'évolution la plus spectaculaire est la ville de Richard –Toll (côté sénégalais) qui a vu sa population multipliée par 6 à la même période. Cette formidable croissance s'explique par les mouvements de population relatifs à la sécheresse des années 1972-1973 mais aussi par les premières tentatives d'une mise en valeur des ressources de la vallée. Entre 1976 et 1988, la croissance s'est poursuivie mais à un degré moindre. Ce ralentissement est le fruit d'une émigration.

En effet l'émigration persiste ; la principale destination des candidats est l'Europe notamment la France, quoique les conditions de séjour y soient devenues si difficiles et les risques de chômage permanents. Aussi on assiste à un phénomène de redéploiement de l'effectif des émigrants vers l'Afrique Centrale et l'Afrique Australe.

La période 1988 et 2001 confirme cette tendance marquée par une diminution de la croissance et également par la promotion de nouvelles communes de plus de 5 000 habitants. Aujourd'hui on assiste à « *l'amorce d'un courant inverse car tout semble indiquer que l'évolution de la population va s'accélérer du fait des ambitieux projets de l'Après Barrage* ».

Cependant des enquêtes préliminaires sur les possibilités d'insertion des émigrés dans l'économie de la vallée ont révélé que « *les candidats au retour ne sont pas nombreux ; la faible proportion d'émigrés revenus définitivement est formé de retraités, des personnes du troisième âge* » (A. Bâ, 1985). Les résultats du dernier recensement général de la population du Sénégal de 2002 n'ont pas signalé une forte augmentation de la population due aux migrations. Dans la vallée du Sénégal et précisément dans le secteur de Bakel – Tambacounda où sont originaires un grand nombre des émigrés, une croissance de 2 500 habitants est relevée.

De l'autre côté du fleuve, la rive droite constitue la partie utile de la Mauritanie. La péjoration du climat a rendu répulsives certaines zones notamment le milieu rural. Cette crise s'est traduite par une hémorragie massive des populations rurales vers les centres urbains des régions du sud plus arrosées et les terres inondées par les eaux du fleuve. L'accroissement rapide de la population de cette partie de la Mauritanie qui bénéficie des avantages du fleuve confirme la poursuite de la sédentarisation des nomades et un exode massif vers les villes.

Pays à majorité nomade à l'indépendance, la Mauritanie a connu un intense mouvement de sédentarisation en raison de la sécheresse qui sévit dans le Sahel. « *La proportion des nomades dans la population totale du pays est passée de 73,3 % en 1965 à 12,1 % en 1998. Aujourd'hui elle est encore réduite à une portion incongrue de 4,8 %* » (Badiane, 2003).

En effet, la sédentarisation est une des manifestations de l'impact social ; s'y ajoute « *le développement de nouvelles structures comme les conseils ruraux lié à la responsabilisation des paysans dans le système d'acquisition des terres et la persistance de l'émigration qui peut toucher 50% de la population masculine de certains villages car permettant la diversification des revenus* » (C. Monget, 1997)

III. LES IMPACTS SUR L'ECONOMIE

La construction des deux barrages a coûté 200 milliards de francs CFA. Le coût de l'Après- Barrage est estimé à un montant environ quatre fois supérieur. En dépit de cela, il faut reconnaître des effets positifs des aménagements sur l'économie de la région. Les activités de commerce et d'échanges entre le Mali, la Mauritanie et le Sénégal ont crû et l'aménagement de nouvelles voies d'accès (routes goudronnées, digues, ponts...) a aidé au désenclavement de la zone.

En matière d'intégration sous-régionale, l'OMVS s'est avérée un outil précieux. La centrale hydroélectrique et les lignes de transport d'énergie depuis Manantali ont permis l'interconnexion de systèmes électriques des trois Etats. Cependant, la distribution de l'électricité, qui s'est achevée en 2002, n'est pas encore parfaite ; elle profite aux grandes villes plutôt qu'aux habitants de la vallée. « *Seul 1% des ruraux maliens reçoit l'électricité* » (C. Vandermotten, 2004). Mais les effets les plus importants sont relevés dans les activités primaires à forte incidence sur les populations à l'exemple de l'élevage.

1. L'impact sur l'élevage

L'élevage occupe une place essentielle dans la vallée pour toutes les ethnies. Il constitue une bonne source de revenus. Le bassin du fleuve Sénégal a toujours été une importante zone d'élevage pour le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. Par exemple entre 1955 et 1971-72, le cheptel est passé de 240 000 à 700 000 têtes. Les informations actuelles recueillies auprès des services vétérinaires des pays, la concentration du cheptel pourrait être estimée actuellement sur l'espace OMVS du bassin du fleuve à plus de 2,7 millions de bovins et 4,8 millions d'ovins-caprins soit 25% des bovins et 20% des ovins-caprins de toute la vallée.

Les raisons de cet important accroissement résident dans les états appuyés par leurs partenaires au développement ont fait des efforts significatifs en matière de sélection des espèces, de solution des problèmes de santé et d'abreuvement. Cet élevage qui est pour l'essentiel extensif a naturellement été positivement influencé par la maîtrise de l'eau (les barrages) et les aménagements hydro-agricoles qui ont grandement augmenté le disponible fourrager.

Il existe actuellement dans le bassin du fleuve deux formes traditionnelles d'élevage bovin :

- l'élevage transhumant exercé par les nomades ; cet élevage est tributaire de la pluviométrie. En temps normal, les effectifs du troupeau sont limités par la capacité de production des pâturages pendant la période la plus sèche de l'année. A l'hivernage, les animaux paissent sur le diéri, ils se rapprochent du fleuve en saison sèche. En outre, le troupeau est périodiquement décimé par la famine lorsque plusieurs années très sèches se succèdent comme ce fut le cas presque depuis une trentaine d'années.

- l'élevage sédentaire contrôlé par les paysans le plus souvent et qui est assez mal différencié du troupeau transhumant avec lequel il a des relations importantes concernant les flux d'animaux.

Le troupeau dispose de plusieurs types d'aliments pour se nourrir en plus des prairies naturelles. Les aménagements survenus après l'édification des ouvrages fournissent des fourrages verts issus des périmètres irrigués villageois formés de sorgho, du niébé et du maïs. La nourriture du bétail est également issue de la paille de riz, des produits de la canne à sucre, de la tomate, du gombo et de toutes les autres spéculations cultivées par les populations paysannes. Le troupeau sédentaire est le principal bénéficiaire de cette alimentation régulière.

L'élevage transhumant est perturbé par deux facteurs :

- l'accès à l'eau (et aux produits des cultures irriguées) est rendu difficile par la présence des périmètres irrigués le long du fleuve, que les animaux saccagent quand ils les traversent entraînant ainsi des conflits entre pasteurs et paysans
- pendant l'hivernage, les animaux sont mal alimentés car les cuvettes des pâturages autrefois inondées se sont restreintes depuis la régulation du fleuve.

2. L'impact sur la pêche

Dans le bassin du fleuve Sénégal, la pêche est traditionnellement une activité économique importante notamment dans la vallée et le delta. Elle est pratiquée dans le cours principal, au niveau des affluents que dans les cuvettes inondées. Le niveau de la production varie « *entre 27 000 et 40 000 tonnes par an* » (C. Monget, 1997) et également selon l'étude sur « *les impacts potentiels de la gestion des ouvrages et des eaux de surface du fleuve sur les ressources halieutiques* » (OMVS, La Roche).

Par ailleurs les eaux du fleuve avant les barrages étaient bien connues des populations car elles étaient très poissonneuses et polarisaient d'importantes communautés de pêcheurs venues de toutes les zones de la sous région. Dans le delta, les Guet-ndariens s'activaient à la fois en mer qu'au niveau du fleuve ; dans la vallée, les Thiouballo forment la communauté spécialisée dans ce secteur de la pêche fluviale.

Dans le cadre du programme intégré de développement du bassin du Sénégal, l'enquête menée par le PNUD et l'OMVS avait révélé que « *10 000 pêcheurs sont concernés par cette activité répartie entre le réservoir de Manantali en amont, la moyenne vallée et en aval le barrage de Diama* » (Albaret J, 1994).

Avec la construction des barrages, « *le secteur compris entre les deux ouvrages, Diama et Manantali, est devenu un immense lac artificiel dulçaquicole permanent* » (OMVS, 2006).

Le changement de régime du fleuve dans la moyenne vallée n'a pas autant d'influence sur le lit majeur que sur le lit mineur où le plancton, selon les résultats obtenus par le PNUD et l'OMVS, « *sera peu dense dans un débit d'étiage sensiblement plus grand que d'habitude* ». De plus, « *le courant qui sera plus fort pendant les longs mois de crue du fait de la régularisation est également un élément défavorable à l'emploi des filets* ».

La conclusion de cette étude est que « *la moyenne vallée perd annuellement 50% de sa production soit près de 8 000 t de poissons d'eau douce* ».

En aval de l'ouvrage de Diama, l'eau est saumâtre en période des basses eaux avec un taux de salinité élevé. La migration de la faune aquatique avec le mouvement de la langue salée ne se fait plus à cause du barrage. Ce qui va provoquer une baisse de rendement évalué à 50% par le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT).

La faune ischtologique adaptée aux eaux salées ne peut plus remonter en amont du barrage de Diama, des espèces vont ainsi disparaître (seul le peuplement estuarien à large spectre de tolérance en salinité se rencontre encore). Parallèlement des espèces sont apparues ; elles profitent de l'inondation des plaines et des cuvettes pour s'y reproduire. Des dépressions se remplissent comme l'Aftout es Sahel, le lac de Guiers et celui du lac Rhiz et permettent d'obtenir une production de plus de 10 000 t. Ce phénomène s'étend à l'ensemble du fleuve mais il est surtout visible au niveau du delta.

De plus la construction de l'ouvrage a séparé des bancs de poissons, empêchant une partie de leur population de retourner en mer et les condamnant à une mort certaine. Cet édifice a beaucoup affecté les espèces maritimes. D'autre part, Diama a causé la prolifération des roseaux, ce qui réduit considérablement la surface du fleuve et par conséquent les sites de pêche et la rentabilité dans ce secteur.

L'avenir de cette activité est très préoccupant ; en effet l'écèlement des crues a diminué les cuvettes inondées et la disparition d'espèces qui venaient s'y reproduire. Globalement on assiste avec les barrages à une limitation des ressources halieutiques du fleuve et à une perte de vitesse ou d'importance de ce secteur. De nombreux pêcheurs de la vallée vont se trouver sans emploi et doivent se déplacer vers de nouvelles zones de pêche et/ou envisager l'émigration. Le développement de l'agriculture irriguée en est aussi pour quelque chose ; elle a complètement modifié ce secteur.

3. L'impact sur les cultures

A l'heure actuelle, le barrage de Manantali est géré de telle sorte qu'il laisse toujours s'écouler une crue artificielle permettant la pratique de plusieurs systèmes de cultures. Les cultures de décrue sont encore appliquées malgré la forte concurrence de l'agriculture irriguée.

- La zone de décrue du fleuve Sénégal s'étend du département de Dagana à celui de Bakel sur une longueur de 700 km. L'installation des principales cultures (sorgho, patate, niébé et maïs) coïncident avec le retrait des eaux de décrue en novembre, décembre pour s'achever en mai, correspondant à la période des récoltes.

Ces dernières années, il a été observé chez les producteurs de décrue un engouement particulier à cette ancienne pratique culturale. Ce phénomène s'explique par :

- la faible performance des cultures sous-pluie
- le coût élevé de l'eau et des aménagements en système irrigué
- le coût très faible des investissements (pas d'engrais, pas de labour, pas de coût d'irrigation) en décrue.

Mais les cultures de décrue ont longtemps été marginalisées dans le cadre des enquêtes statistiques agricoles compte tenu de leur particularité.

Avant les années 1986, les superficies et productions étaient estimées sur la base de l'importance de la crue. Cependant, ce système est influencé de nos jours par divers facteurs :

- les surfaces cultivées sur le walo sont réduites par la stabilisation relative du niveau du fleuve
- les barrages et les digues de protection ont diminué la durée de remplissage des cuvettes, ce qui n'y assure pas des conditions optimales de rendement
- par ailleurs, certaines années sèches comme en 2004, les lâchers ont été insuffisants, alors qu'en années pluvieuses, comme en 2003, « *des lâchers très abondants, pour éviter des problèmes en amont, peuvent entraîner des dégâts aux villages d'aval* » (M.R. Ba, 2003).

Ainsi, les surfaces réservées aux cultures de décrue varient du simple au double d'une année à l'autre (85 000 ha en 1999 contre 52 900 en 2001) (Mané, 2001). Les emblavures en décrue varient considérablement. « *La moyenne des surfaces cultivées de 1980 à 1982 est 28 870 ha, en 1986/87, 76 942 ha et en 1996/97, 36 748 ha* » (M.A, 1997).

Mais avec la crue artificielle, les possibilités d'inondation des cuvettes sont fortement réduites du fait d'une part de la baisse de l'hydraulicité du fleuve et d'autre part la nécessité d'optimiser la gestion du réservoir de Manantali. Il ressort de l'étude d'optimisation menée par l'OMVS et d'une enquête de la FAO (2003), « *environ 50 000 ha pourraient être envisagées en décrue, dont 34 000 ha au Sénégal et 16 000 à la Mauritanie* ».

Les spéculations sont dominées par la culture du sorgho qui couvre près de 70% des surfaces cultivées et plus de 20% de la production totale en décrue, formée par le maïs, la patate, le niébé et le sorgho.

La principale zone de production est le département de Matam suivi de celui de Dagana. A travers l'enquête du Ministère de l'Agriculture (1997), les cultures de décrue ne sont pas une priorité dans le département de Podor. Et les quantités produites sont très faibles, elles ne permettent pas de subvenir aux besoins des populations. Il faudrait les conjuguer avec les cultures irriguées modernes.

- Les cultures irriguées se sont fortement développées depuis la création des barrages ; ainsi, « *les dotations en eaux de surfaces mobilisables aux fins d'irrigation sont les plus significatives dans la vallée du Sénégal* » (FAO, 2003). L'importance que revêt cette zone pour le développement de l'irrigation, a été traduite par la formulation d'un cadre stratégique d'intervention pour le développement de l'agriculture irriguée. C'est le Plan Directeur de Développement Intégré de la Rive Gauche (PDRG).

Ce plan à long terme qui demeure le cadre de référence pour les interventions dans le bassin, a projeté le développement « après-barrages » de la vallée à travers un scénario permettant l'irrigation de 88 000 ha sans mettre en danger les autres usages de l'eau. Ce scénario garantit la délivrance d'un soutien de crue artificielle de 33 000 ha de cultures de décrue et 63 000 ha de pâturages et boisements.

Pour atteindre les objectifs prioritaires d'autosuffisance alimentaire et d'emploi fixés, une performance d'intensité culturale de 1.6 était retenue. La programmation des interventions s'établit sur trois phases :

- la phase allant de 1992 à 1995 portant sur la réalisation d'études préalables aux aménagements structurants et la mise en œuvre des premières mesures d'accompagnement.
- la phase de construction allant 1996 à 2002 où les aménagements structurants seront prioritairement réalisés en portant les superficies aménagées à 53 000 ha et la double culture introduite avec une intensité culturale de 1,5
- la phase de consolidation de 2002 à 2017 pendant laquelle les surfaces irriguées atteindront 88 000 ha et où les plantations forestières entreront en production

Les surfaces aménagées du domaine irrigué, « *sont aujourd'hui estimées au niveau national à quelque 123 500 ha, dont 94 320 dans la vallée du fleuve Sénégal* » (FAO,2003). Le taux moyen d'exploitation « *est cependant faible : 60%* » (FAO, 2003).

La structure de production du secteur de l'agriculture irriguée est dominée par le riz (80% des surfaces) suivi des productions maraîchères et fruitières. La production rizicole de 1992 à 2002 a été de l'ordre de 162 000 tonnes, pour la même période, les productions maraîchères et fruitières sont respectivement passées de 152 000 à 180 000 tonnes et de 100 000 à 120 000 tonnes.

Cependant, les importations de céréales notamment de riz ont eu tendance à s'accroître : elles sont passées durant la même période de 695 200 t à 878 375 t avec une prépondérance du riz qui constituait en 2002 près de 70% du volume importé. Pour les cultures maraîchères, les importations ont concerné principalement l'oignon et la pomme de terre pour un volume global d'environ 17 000 t et 19 000 pour les fruits.

Au plan national, la production agricole intérieure ne couvre que 51% des besoins alimentaires. Ceux-ci sont principalement tirés par une forte demande urbaine de riz (environ 600 000 t/an) satisfaite à environ 20% seulement par la production locale (de la vallée) en 2002/2003 ; mais ces dernières années et plus précisément en 2007/ 2008, elle a atteint près de 40% des besoins, soit un doublement de la production en cinq ans.

Des analyses de la FAO (1999) révèlent « *que les conditions actuelles de rendement et d'intensité culturale, la rentabilité économique de l'agriculture irriguée n'est pas assurée (du fait surtout des caractéristiques de l'environnement socio-économique) même si des perspectives prometteuses de rentabilisation des aménagements existent dans la domaine du maraîchage* »

Au total, en l'état actuel, « *l'agriculture irriguée du Sénégal ne contribue pas significativement à l'autosuffisance alimentaire nationale ni à la génération de revenus permettant une amélioration des conditions de vie rurale* » (FAO, 2003).

Ce rapport de la FAO a dressé un bilan critique des irrigations dans la vallée et remet en cause la superficie totale aménageable. Avant la mise en service des barrages de Diama et Manantali les chiffres de potentiels avaient abouti à une superficie totale de 375 000 ha de sols destinés à l'irrigation dont 240 000 ha au Sénégal, 130 000 pour la Mauritanie et 5 000 pour le Mali. Ces données ont été définies compte tenu des hypothèses de régularisation des eaux du fleuve par les ouvrages, la sélection des zones facilement et/ou prioritairement aménageables, de l'option de généralisation de la riziculture avec une irrigation gravitaire et compte tenu des engagements politiques des trois Etats à travers une clé de répartition.

Aujourd'hui avec les barrages, les hypothèses de base doivent être revues. Les études récemment menées par l'OMVS montrent qu'en raison de la sécheresse, *« les ressources sont beaucoup moins importantes qu'estimées jusqu'ici et il a été proposé l'irrigation de 250 000 ha de terres aménageables et le maintien de la crue artificielle pour répondre aux besoins de la culture de décrue (50 000 ha dont 34 000 pour le Sénégal), de la pêche, de l'élevage et de l'environnement »* (FAO, 2003)

La disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation dépendra d'une part de la gestion du barrage de Manantali en terme de partage des eaux et d'autre part d'une meilleure connaissance des affluents non régularisés du fleuve.

L'eau n'est en principe plus une contrainte majeure surtout en période hivernale (juillet-octobre) étant donné la contribution des autres affluents non régularisés du fleuve Sénégal. Le problème se pose pour les cultures de contre-saison (novembre- juin) où, les superficies seront limitées à 100 000 ha pour toute vallée du fait de la réduction des ressources due au soutien de crue.

La disponibilité de l'eau constitue un des facteurs militant en faveur du développement de l'irrigation. Au nombre des autres, on peut retenir :

- la volonté politique du gouvernement à promouvoir l'irrigation du fait de la tendance actuelle de la sécheresse
- la forte demande de la population pour l'irrigation
- l'organisation interprofessionnelle des producteurs avec une prédisposition de réelle participation à l'investissement et à la gestion
- et, l'amélioration de l'environnement institutionnel par la libéralisation économique sur le plan national, ainsi que par l'harmonisation des politiques économiques et monétaires au sein de l'UEMOA sur le plan sous-régional.

Face au rush vers les terres irrigables qui a suivi la mise en eau des barrages, les conseils ruraux (structure étatique) ont affecté des terres de la communauté rurale de façon désordonnée et pas toujours transparente et sans souci des programmes d'aménagement prévus et d'un développement durable du territoire. *« En 10 ans, le conseil rural de Roos-Béthio (dans le Delta) a attribué quelques 30 000 ha »* (d'Aquino et Seck, 1999).

Egalement, le développement de l'agriculture irriguée s'est fait dans un contexte de sécheresse qui a rendu possible et facilité les changements sociaux importants dans la vallée. En effet, en règle générale, les chefs traditionnels, qui tiennent de l'appropriation des terres de leur pouvoir et de leur revenu, se sont trouvés impuissants devant l'aspiration des populations à s'initier à la culture irriguée pour pallier au moins à l'effondrement des productions vivrières conséquence de l'absence de pluie et de crue. *« Les pratiques de la nouvelle technologie agricole tendent à transgresser l'ordre foncier ancien et les leaders traditionnels n'ont pu généralement s'y opposer »* (J. L. Boutillier, 1989).

Ces terres sont pour la plupart aménagées en périmètres irrigués privés (PIP). En 2001, les PIP occupaient pour l'ensemble de la rive gauche, une superficie estimée à 48 000 ha soit plus de 50% du total. En plus, ils sont aménagés de façon sommaire et sans drainage à des coûts inférieurs à 300 000 FCFA. « *Aujourd'hui, 45% des PIP sont jugés inexploitable*s » (d'Aquino et Seck, 1999).

Aujourd'hui, le bassin du fleuve traverse une phase transitoire difficile. Le développement de l'agriculture irriguée qui s'était réalisé avec un rythme assez rapide semble marqué le pas, parce que confronté à des multiples problèmes dont le foncier, mais aussi le coût de plus en plus élevé des aménagements et leur maintenance, l'insuffisance dans la gestion des périmètres (accès aux intrants, au crédit...), la forte proportion de terres aménagées sans une mise en culture. Toutes ces difficultés contribuent à une mauvaise irrigation et à la forte dégradation des terres de la vallée dans la partie sénégalaise.

IV. LES IMPACTS ECOLOGIQUES

Les dures sécheresses successives, le réchauffement des terres de la vallée ont perturbé la préservation, le renouvellement des ressources naturelles de la région (forêt, pâturages, sols). La présentation des unités du paysage (voire la première partie) est suivie dans ce sous- chapitre d'une analyse sommaire des changements intervenus dans le paysage à travers trois milieux sélectionnés par leur représentativité dont les causes naturelles sont aggravées par des facteurs anthropiques. Le premier site est situé sur le diéri, le second abrite une forêt classée et le troisième est sur la vallée alluviale. Nous entamons cette étude des impacts écologiques par montrer la raréfaction du bois dans la moyenne vallée.

1. Le bois de chauffe, une source d'énergie en disparition

Les forêts de gonakié qui bordaient les berges du fleuve ont complètement disparu. Elles sont apparues longtemps comme réserve de bois. Le bois est le combustible domestique le plus utilisé par les populations et particulièrement celles de la vallée du fleuve Sénégal.

Quand le bois se fait rare les familles souffrent de différentes façons. Là où l'on doit acheter le bois ou le charbon de bois, les prix ont fortement augmenté au cours des dix dernières années ce qui alourdit considérablement les dépenses des familles pour se procurer l'énergie essentielle à la cuisson des aliments.

En effet dans ce milieu fortement rural, le bois ne fait pas généralement pas l'objet d'un commerce ; il est ramassé de façon gratuite dans le milieu environnant des villages. Ce sont surtout les femmes et les enfants qui ramassent le bois. Avec la raréfaction du combustible, ils passent de plus en plus de temps, au prix d'une marche souvent harassante, pour ne réunir qu'un petit fagot de bois.

Il leur est fréquent de parcourir plusieurs kilomètres pour trouver le bois nécessaire. Lorsque le bois devient rare comme c'est le cas actuellement, ils ramassent des combustibles de plus mauvaise qualité, tels que les tiges de céréales, les bouses de vache, qui brûlent mal et produisent beaucoup de fumée. La pénibilité de la collecte du bois de chauffe peut être considérée comme l'un des meilleurs indicateurs du niveau de la crise écologique que la vallée du fleuve connaît ces dernières années.

2. L'évolution récente des milieux

a) Evolution du paysage dunaire

La vallée est surplombée par un système dunaire disposé selon une orientation dominante NE-SW et qui s'étend de Dagana à Ndioum (et au-delà) en passant par Gam yalla, Ndierba, Fanaye, Thillé Boubacar, Taredji... ⁽¹⁾. La dune est associée aux sols bruns isohumiques et se caractérise par un couvert arbustif épineux, très ouvert et par un tapis herbacé discontinu, totalement absent par endroits ne pouvant garantir aucune protection contre l'agressivité du vent.

L'activité pluvio-orageuse limitée dans le temps (1 mois 10 jours, moyenne des trois dernières décennies), réduite quantitativement, assure de moins en moins le rôle de stabilisation, de fixation des formations dunaires. L'humidité après infiltration des eaux de pluies est faible ⁽²⁾.

En effet, malgré une bonne perméabilité des sols, le stock hydrique emmagasiné dans le sable à une profondeur de 60 cm est peu important. Il ne peut permettre un cycle végétatif de longue durée.

Le couvert ne vit qu'un mois environ dans l'année. Les effets de la saison des pluies sont concentrés en août. Le ruissellement observé sur les versants l'est à ce mois. La végétation essentiellement composée d'herbacées a une vie éphémère. Elle se dessèche très rapidement sous l'effet de la chaleur et d'une évaporation intense.

Les horizons superficiels perdant rapidement leur cohérence et la persistance de la sécheresse favorise « *la déstabilisation de la surface du sol et la déflation* » (A. Diagne et J. F. Richard, 1992). Les particules de sable deviennent sensibles à l'action du vent.

L'importance du vent est difficilement quantifiable sur le terrain quoique diverses manifestations permettent de ne pas la négliger. L'action éolienne emporte les éléments fins et laisse sur place, sables grossiers et gravillons ferrugineux constituant des pavages en surface.

¹ villages situés sur la route Saint-Louis- Podor

² cf profil hydrique sur la transition sableuse

La persistance de l'action du vent, la facilité à soulever et transporter des particules fines, installent une atmosphère poussiéreuse et suffocante dans la moyenne vallée en longueur de journée, en toute saison, particulièrement en saison sèche. La remobilisation des sables par le vent entraîne l'avancée de la dune dans le walo, comme c'est le cas à Taredji et vers la basse vallée.

Sur la bordure méridionale du lit majeur, à Ndiayène (village) la déflation éolienne a édifié « *un bel alignement dunaire dont la partie supérieure est formée par un ensemble de barkhanes et de crêtes sigmoïdes, enchevêtrées et très instables* » (P. Michel, 1990).

Selon le même auteur, la vitesse du vent était déjà forte sur les terres dénudées avant la sécheresse de ces trente dernières années. Elle s'est accentuée par la destruction des arbres et la disparition de la steppe au début de la période des déficits pluviométriques. Cela ne devrait pas s'améliorer si la tendance sèche continue de persister, ce qui maintiendrait le diéri sous l'épreuve des processus subaériens.

Les poussières éoliennes apparaissent parmi les composantes les mieux étudiées de l'environnement désertique et péri-désertique. Les tempêtes ne se contentent pas de mobiliser le sable et de poussières, elles constituent aussi un risque pour la santé de l'homme et des animaux.

b) Evolution morphologique des forêts classées

Ce milieu était caractérisé par un couvert végétal ligneux important. La persistance de la végétation tient du fait que les forêts classées étaient des milieux protégés, mis en défens, avec des barbelés tout autour.

Dans l'île à Morfil, elles sont aménagées dans le walo, sur des levées sablo-limoneuses. L'espèce ligneuse dominante est *Acacia nilotica* qui forme 85 % de la strate arborescente. Se dressent également sur ces milieux abrités quelques *Acacia seyal*, *Acacia albida*, *Acacia pennata*, *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *Salvadora persica*, *Borassus aethiopium*.

La strate inférieure est une prairie herbacée diffuse à *Echinochloa colona*, *Portulaca oleracea*...

Sur les sols de ce paysage s'accumulent des éléments minéraux organiques. La matière organique y est plus élevée que dans les autres parties de la vallée alluviale. Ainsi, ce paysage est convoité par les populations à la recherche de terres destinées à l'exploitation agricole.

La localité de Ndiawara, Donaye ... sont des villages en pleine croissance démographique et économique.

« A ces endroits, les surfaces classées s'étendaient à 600 ha environ ; l'aire occupée par la forêt est passée de 12 250 ha en 1954 à 1 270 ha en 1986 » (Betlem, 1988).

A partir des photos aériennes (disponibles à l'OMVS), il apparaît que le taux de couverture de la forêt s'est réduit de plus de 80 % entre 1954 et 1986, provoquant une dénudation et une diminution importante des réserves hydriques en particulier dans les vingt premiers centimètres sous l'effet de l'insolation, de la chaleur et de l'évaporation.

Ainsi, les sols de ces milieux sont de moins en moins ou mal protégés contre les variations de température, le ruissellement et l'action du vent.

Aujourd'hui les surfaces boisées se réduisent à la même vitesse que celles des aires non classées. Sur le terrain, il ne reste pratiquement plus rien des forêts « mises à l'abri » à Ndiawara et Donaye.

Des études menées (par I. Fall, 1999) à Bokhol (village près de Dagana) ont montré la nette dégradation des formations végétales de la forêt classée d'une superficie de 290 ha :

- «- la forêt de gonakié est en régression à cause de la divagation du bétail, de la pression foncière avec une augmentation des surfaces cultivées (voir photo 8, p.281);*
- la savane arbustive à Prosopis est sous pression de la coupe pour le bois de chauffe ;*
- les reliques de forêt galeries sont également en nette régression ; la rôneraie s'est dégradée ... »*



Photo 8 : *Acacia nilotica* en individu isolé - Ndierba (Diop, avril 2001)

La sécheresse et l'abattage des arbres ont dégarni le couvert et fait périr les surfaces classées. « *La forêt de Niauli, à l'intérieur de la grande boucle du fleuve, en aval de Podor, a complètement disparu. Il ne subsiste plus que des arbres isolés* » (P. Michel, 1990).

Utilisé comme bois de chauffe par les boulangeries traditionnelles entre Podor et Saint-Louis, l'arbre, particulièrement *Acacia nilotica* sert aussi, à la clôture, à la construction des maisons. Il est utilisé comme ustensiles aratoires, comme moyen de protection des tombes contre les chacals, les chiens errants et enfin comme arbre fourrager.

Au début des années 90, la vallée a accueilli 60 000 négro-mauritaniens chassés de leur pays. Devant les besoins vitaux d'alimentation, de logement, on s'est peu soucié de la capacité de charge des villages d'accueil. Des terres leur ont été octroyées pour les activités agricoles après destruction d'une partie du couvert végétal. Les surfaces boisées non loin des sites d'hébergement de Dagana à Ndium en ont été très fortement endommagées.



Photo 9 : désertification des paysages de la forêt classée de Donaye (Podor)
(Diagne, 1990)

Les premières averses de juillet, en général, arrivent sur un sol nu entraînant « *une véritable crise morphologique* » (Avenard, 1990).

En effet, les phénomènes spécifiques à la pluie interviennent causant battance et ablation. On relève un autre processus dans le walo, c'est l'érosion éolienne ; le vent est très efficace surtout entre 13h et 15h, c'est à dire aux moments de fortes chaleurs. Le sable fin mobilisé est accumulé, puis déposé aux pieds des arbres isolés ou « *piégé* » dans les fentes de retrait (J. F. Richard, 1990).

En somme dans les forêts classées, le couvert s'est réduit à une grande vitesse. Les sols sont mis à nu (voir photo 9) ; les processus liés à l'érosion hydrique et à l'érosion éolienne connaissent une recrudescence de leur action mettant ainsi en place un processus de désertification de ces paysages.

c) Evolution morphologique de la vallée alluviale

La vallée alluviale est profondément bouleversée. La morphogenèse actuelle dépend des conditions bioclimatiques de la région et du développement des cultures irriguées.

Les changements qui surviennent dans la plaine alluviale sont liés à l'artificialisation de la crue et à la culture irriguée.

La vallée alluviale est un milieu composé de levées et de cuvettes. Ce relief est façonné surtout par les hautes eaux annuelles du fleuve Sénégal. Elles submergent la plaine alluviale selon l'ampleur de la crue qui, avec le relief de détail détermine l'étendue des surfaces inondées.

Le walo couvre environ 10 000 km². « *En année de crue moyenne, 1/10 de cette surface soit, 100 000 ha est recouverte par les eaux* » (A. Lericollais, 1980). Vingt trois ans après, 85 000 ha de terres sont inondées en une année moyenne. Les éléments en suspension se sédimentent dans les cuvettes.

La sécheresse de ces trente dernières années s'est traduite sur le réseau hydrographique par une réduction des écoulements. Les modules du fleuve ont enregistré des déficits de 60 à 70 %. De nombreuses cuvettes et points d'eau du lit majeur s'assèchent. La submersion est peu étendue. Les surfaces inondées se réduisent à 10 000 ou 15 000 ha maximum dans la moyenne vallée, entre Dagana et Matam.

L'artificialisation de la crue a réduit davantage l'inondation de la vallée. Pendant l'hivernage, l'ampleur et la durée de la submersion sont écourtées (passant de 4-5 mois à 2 au plus). Les terres du walo sont sous alimentées ; les débits d'hivernage enregistrés à Bakel sont en moyenne de : 500 m³/s en juillet 1993 ; 2 590 à la première décade de septembre ; 1 750 au cours de la deuxième décade (source OMVS).

L'insuffisance dans l'approvisionnement en eau des sols se traduit sur les profils hydriques qui se redressent à peine (cf. fig. 11 à 12). Les sols sont loin de leur capacité utile ; les humidités, sauf en bordure des versants qui encadrant le lit mineur, sont proches du point de flétrissement.

Le faible débordement du fleuve a une conséquence importante sur le plan morphologique. Les cuvettes éloignées du lit sont mieux enrichies par une sédimentation fine transportée lors de la crue. A certains endroits, le colmatage est en voie de disparition.

En octobre débute la décrue. Ce phénomène s'observe depuis la mise en service de Diama et Manantali. C'est à partir de cette dernière station que sont effectuées les lâchures modulées de manière à obtenir à Bakel un débit moyen de 375 à 500 m³/s entre octobre et juillet.

En saison sèche, les sols du lit majeur s'assèchent. Le stock hydrique emmagasiné au cours de l'hivernage s'épuise rapidement. Il s'agit d'un épuisement précoce comparé à la période avant la mise en service des barrages et à la gestion des eaux du fleuve par la cellule de gestion prévisionnelle des eaux.

L'assèchement est brutal, il est fort rapide en surface et en profondeur entre février et avril, mai. Les pertes hydriques correspondent plus ou moins aux valeurs de l'évaporation moyenne mensuelle des stations de la moyenne vallée.

Le mois le plus sec est juillet, c'est à dire quand les valeurs de l'humidité du sol sont les plus faibles et quand les structures ou les matériaux sont moins résistants à l'érosion. L'insuffisance dans l'écoulement des eaux fluviales diminue (l'intensité) des processus liés à l'eau dans la plaine d'inondation. « *L'érosion est liée à l'augmentation rapide et continue des débits* » (J. Y. Gag et A. Kane 1986).

L'alluvionnement souffre aussi de la baisse des écoulements. Alors que les processus subaériens trouvent des conditions favorables à leur recrudescence et installent leurs marques, aidés en cela par les actions humaines.

Le développement de l'irrigation est une priorité majeure pour l'Etat sénégalais et une pièce maîtresse de sa politique d'autosuffisance alimentaire.

Devant l'incertitude des cultures pluviales, l'économie rurale de la vallée porte espoir sur les cultures irriguées. En 1994, les surfaces aménagées et destinées à l'irrigation atteignent 67 788 ha (SAED). Elles sont estimées à 125 000 ha de nos jours (Bader et Lamagat, 2004)

L'aménagement des périmètres irrigués a modifié totalement le paysage du walo. Partout dans l'île à Morfil, Ndiawara, Podor et vers Dagana, sur des dizaines et centaines d'hectares, l'arbre a disparu et l'on ne distingue plus les levées fluviales des cuvettes. Le modelé façonné depuis le quaternaire récent est arasé. La plaine est nivelée. Les limons mélangés aux argiles, les sols salés des sols non salés, ce qui ne manquent pas d'entraîner d'autres incidences sur l'érodibilité des terrains et sur la baisse de leur rendement.

Lorsqu'elles sont cultivées, les terres alluviales sont colonisées par le riz ou le maïs, le sorgho, la tomate etc. Au bout de 3 à 5 ans, les rendements diminuant avec les sols dénudés, elles sont délaissées. L'exploitant s'en va à la recherche d'autres terres de culture pour refaire la même opération. Ainsi, la culture itinérante est en train de causer de grands dommages à l'environnement de la vallée.

Les besoins en terre poussent les populations à défricher de manière inconsidérée dans le but, d'accroître la production agricole faute de pouvoir disposer suffisamment de fertilisants afin d'améliorer vers l'intensif les rendements des exploitations.

3. Le sol dans la vallée, un patrimoine en péril

a) L'action du vent.

La morphogénèse actuelle dépend des conditions bioclimatiques du milieu semi-aride caractérisé par un déficit en eau couvrant toute l'année, une forte chaleur, un besoin en eau élevé. Ces conditions sont idéales pour le vent.

L'action éolienne prend une ampleur considérable dans la vallée et tend à prédominer partout (M. Sall, 1983 et P. Michel, 1990). Le vent agit sur le milieu tout au long de l'année pendant une période supérieure à 10 mois, même en saison d'hivernage. La violence de la remobilisation a permis « *la formation en série de nebkas et de petits barkhanes de sables fins dans le lit majeur du fleuve* » (P. Michel, 1985).

M. Gavaud (1990) a également remarqué dans la plaine alluviale la présence « *de sables éoliens diversement accumulés* ». Des amoncellements sablo-argileux s'édifient dans les cuvettes de la basse vallée.

b) Le rôle de la pluie.

En milieu semi-aride, les caractéristiques de la pluviosité se répercutent sur les modalités des activités morphogénétiques. L'érosion pluviale y est appréciable en raison de la grosseur, de la rapidité des gouttes d'averses. Les pluies sont majoritairement brèves mais de très forte intensité. Elles exercent d'abord de violentes actions de battance et sont plus incisives en fin de saison sèche, en juin et juillet, alors que le sol est peu protégé.

Une chute de 20 à 25 mm en quelques minutes est dangereuse ; si elle ne s'atténue pas dans les minutes suivantes, elle devient désastreuse. La fréquence d'une hauteur de 20 mm et plus est de l'ordre de 40 % en août dans le secteur de Podor. Les lames d'eau de 10 à 15 mm sont plus probables à recueillir. Et selon les agronomes américains, elles ont aussi une forte potentialité érosive (A. Ndecky 1991). C'est ainsi que dans l'île à Morfil dans les cuvettes de Ndiawara et de Guia « *rides, ravins, ravines béates ornent les surfaces libres des terrains non aménagés* » (A. Ndecky, 1991) (voir photo 10, p.286)

La diminution des événements pluvieux les plus forts n'a pas pour autant réduit l'agressivité des pluies. Au contraire on a constaté à divers endroits à Podor et entre Thillé Boubacar et Dagana une augmentation des surfaces érodées imputables à la fois à la pluie, au vent et aux activités humaines.

Le retour progressif d'une pluviométrie normale (en 1994, 1996, 1998, 1999, 2001, 2003, 2006 et 2008), a été marqué par l'apparition et l'intensification des phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique. Les sols à Donaye et dans les anciennes forêts mis à l'abri sont fortement affectés par l'érosion aréolaire et le ravinement. Toutes les formes d'érosion, de décapage aréolaire y sont observées.



Photo 10 : ravin sur un versant de levée - avec présence de sel
Village de Ndierba - (Diop, avril 2001)

c) L'influence du sel.

Les périmètres non cultivés laissés en jachère, ou délaissés tout bonnement sont aussi très sensibles au processus de réorganisation superficielle par le vent et le ruissellement grâce au sel.

En effet en aval de Podor, les traces de sel sont apparentes dans la plaine d'inondation après le drainage mal assuré des eaux des cuvettes aménagées et l'évaporation de la nappe libre. Avant le nivellement du relief par des engins mécaniques, les parties salées sont localisées à certains endroits dans certaines cuvettes et les levées subactuelles longeant le fleuve. Ce taux de salinité est variable, mais l'intensité de la salure atteint entre Dagana et Fanaye plus de 3 mhos, c'est - à - dire que les sols sont classés très salés (I. Y. Loyer, 1979).

Le pH est supérieur à 7- l'alcalinité élevée est signe d'une mauvaise structure du sol ; la tendance est à la dispersion.

Lors de l'arasement des reliefs de détail, les labours profonds effectués avec de gros engins n'ont pas fait de distinction entre parties salées et non salées. Des secteurs entiers sont pollués, affectés par le sel et il est connu que le sel est un puissant auxiliaire des processus d'accélération de l'érosion.

Il rend très sensible les argiles et les sols limoneux à la dégradation, à l'érosion éolienne et à l'érosion par ruissellement, c'est à dire, aux phénomènes d'appauvrissement des terres et d'encroûtement de la surface des sols.

Concernant ce dernier phénomène, un certain nombre de conditions le favorisent en milieu semi-aride : il s'agit de l'agressivité des pluies, de l'impact des gouttes de pluies, de la pauvreté de la couverture végétale, de la variation humectation - dessiccation et induration et de la faible teneur en matière organique.

Le processus de formation est expliqué de façon détaillée par A. Casenave et C. Valentin (1989).

Les milieux à saisons bien différenciées comme c'est le cas dans les régions semi-aride sont très favorables à la formation des croûtes c'est à dire à des surfaces qui « *imperméabilisent les sols et facilitent le ruissellement* » (A. Casenave et C. Valentin, 1989)

En résumé, les facteurs qui favorisent une aptitude croissante aux processus d'érosion hydrique et subaérienne sont très présents dans la vallée. Dans ce milieu, sont intervenus des changements importants et radicaux. Les terres du walo sont soumises aux activités humaines dont le développement a entraîné la transformation des micro-modelés vers la planité. De ce fait, « *hautes levées et levées récentes ne se distinguent plus guère* » (A. Diagne et J. F. Richard, 1992).

L'arbre se raréfie dans le paysage. Le walo ressemble à un immense champ ouvert aux phénomènes hydriques et éoliens mais avec une tendance actuelle nettement marquée par la prédominance de la morphodynamique éolienne. Les empreintes de cette dynamique sont nettement perceptibles dans le paysage.

Cependant, depuis 1994, les phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique se manifestent davantage au Sahel, dans la vallée plus précisément, en raison d'une pluviométrie quantitativement importante et des crues de grande ampleur qui inondent la plaine et les lieux d'habitation jalonnant le fleuve Sénégal.

De ce sous chapitre, les principales contraintes de la moyenne vallée sont les suivantes : la forte activité éolienne, la mobilité du sable dunaire, la disparition de la végétation spontanée et des forêts classées, la dégradation des sols, la pression de plus en plus forte des populations sur le milieu. Elles agissent toutes sur les potentialités du milieu physique : potentiel en terres, ressources en eau et ressources végétales.

4. La préservation de ces milieux : l'approche agroforestière

L'instabilité et les variations spatio-temporelles du climat, la dégradation de la fertilité des sols, la poussée démographique, le déboisement intensif des forêts, l'exploitation irrationnelle des terres ont des incidences négatives sur les milieux. Des interventions sont à suggérer pour atténuer les impacts négatifs. Les suggestions sont multiples.

Mais le plus souvent elles sont proposées pour lutter contre un seul obstacle. Aussi les approches les plus courantes sont :

- la mise en place d'un programme de reboisement,
- la diversification des activités de production,
- l'établissement de possibilités de protection des cultures contre les prédateurs,
- la création, l'entretien et le développement de bois villageois,
- l'aménagement d'exploitations assez grandes pour assurer des revenus incitatifs...

Cependant, ces approches peuvent se résumer dans une seule stratégie de gestion des terres ; il s'agit de la composante agro-sylvo-pastorale dont les conséquences sont :

- la couverture du sol et le maintien de l'humidité pendant la saison sèche,
- l'installation de micro-climats
- l'entretien du bétail,
- l'appoint en bois et en alimentation aux populations,
- etc...

Ces raisons justifient notre choix pour l'approche agroforestière.

a) Qu'est ce que l'approche agroforestière ?

La multiplication des casiers irrigués, le surpâturage, le déboisement, l'érosion sont en train de changer négativement la physionomie de la vallée du Sénégal. Or, la vallée est à préserver.

Située dans une région semi-aride, elle ressemble à une oasis pour celui qui arrive du Ferlo. La diversité de son paysage en fait « *un écosystème riche et rare sous cette latitude* » (B. Crousu, R. Mathieu et S. Seck, 1991).

La vallée donne la vie à toute la région de Saint-Louis et au-delà ; elle offre à la population des ressources considérables. Les plantes cultivées sur la rive gauche sont les suivantes : riz, sorgho, maïs, coton, canne à sucre, oignon, tomate, gombo, pastèques et autres plantes fruitières.

C'est l'âme de ce Sénégal septentrional. Dans le cadre de l'Après- Barrage, le schéma de développement ou la stratégie des autorités du pays est la mise en valeur de la rive gauche afin de faire de cette zone un lieu de production sécuritaire à travers la culture irriguée. « *L'option de la culture irriguée est encore réaffirmée* » (Le Soleil, 28/04/1998).

Ce système assure une production alimentaire quantitativement suffisante et sécurise les populations riveraines jadis régulièrement en proie à la famine pour cause de pluviométrie déficitaire. Ce système favorise également l'augmentation des revenus de la paysannerie.

L'irrigation contribue aussi à la lutte contre l'extension des déserts ou de l'aridité des terres.

Mais tous les systèmes d'irrigation n'offrent pas de tels avantages. L'irrigation mal conçue et mal gérée entraîne la salinisation et/ou l'engorgement des sols. Ce qui peut aggraver la situation. Le choix des modèles de développement ou de production agricole doit être bien pensé. Leur rentabilité dépend pour une large part de la maîtrise des facteurs de production : terre, eau, lutte contre l'érosion, bonne gestion de ce milieu dans l'intérêt de toute la population. L'intégration de l'arbre dans les aménagements hydro-agricoles est une des clefs de solution aux problèmes de la vallée.

« L'agroforesterie est une approche qui repose sur la valorisation des interactions biologiques et économiques entre les végétaux ligneux et les productions animales et végétales » (I. Fall, 1999).

Ce concept est donc un terme collectif pour désigner des systèmes d'aménagement des terres où les ligneux pérennes (arbres, arbustes, arbrisseaux) sont cultivés délibérément dans les systèmes agricoles paysans.

L'agroforesterie recherche à stabiliser - viabiliser - rendre compatible le milieu avec les pratiques sociales et culturelles de la population. Elle permet une bonne utilisation des surfaces disponibles (mise en valeur des terres marginales délaissées et création de zones mixtes de protection entre les zones agricoles et forestières) et des ressources disponibles (eau- énergie lumineuse- éléments minéraux- matière organique- variétés végétales) (Mémento de l'agronomie, 1984).

Le potentiel ligneux procure nourriture, fourrage, bois, protège les sols contre l'érosion, maintient l'humidité des sols et améliore leur fertilité. La première finalité du système est que la plante prioritaire produise autant qu'en monoculture. L'autre est de rentabiliser les ligneux pérennes, qu'ils créent de l'ombrage, qu'ils jouent un rôle d'écran afin de limiter les effets destructeurs de la pluie, du vent et de la chaleur.

Selon les informations recueillies à la Direction des Eaux et Forêts de Saint-Louis, ce modèle de gestion des terres agricoles associant la culture irriguée à la foresterie est proposé aux paysans de la vallée à travers le projet « *Ceinture Verte* » que veulent réaliser les autorités gouvernementales du Sénégal.

b) Le Projet de Ceinture Verte

Le projet a pour vocation le reboisement de la région de Saint-Louis. Elle couvre une longueur de 600 km et une largeur de 5 km. Le projet traverse la région de Saint-Louis, à travers le département de Podor et la nouvelle région de Matam. Son itinéraire doit en tant que barrière servant à arrêter l'avancée du désert au front nord du pays s'implanter à 20 km environ à partir de la limite du grand lit du fleuve, c'est à dire la rive gauche qui constitue la zone d'aménagement hydro-agricoles (voir doc. MEPN) (Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature).

Ce projet est intégré dans un vaste programme continental celui de l'édification de la « grande muraille verte » (GMV), une barrière de 7000 km d'arbres, du Sénégal à Djibouti (avec le Burkina Faso, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nigéria, le Tchad, le Soudan, l'Ethiopie, l'Erythrée) soit 11 pays engagés dans le combat contre la dégradation du milieu rural naturel et vaincre la sécheresse. Dans la portion qui lui impartie dans la GMV, le Sénégal est en phase de la réalisation du projet ceinture verte qui consiste non seulement à planter des arbres mais aussi à créer des pôles à vocation agricole et pastorale le long de la vallée.

Le projet s'articule autour de quatre volets dont :

- un volet principal comprenant :

- la gestion des ressources naturelles composée du reboisement sur toute la longueur de la région jusqu'à Bakel,
- l'adoption de techniques de conservation et de restauration des sols et d'intégration agriculture-élevage c'est à dire des activités génératrices de revenus comme le maraîchage, les cultures vivrières, l'arboriculture fruitière, embouche et aviculture au profit des groupements bénéficiaires.

Ainsi chaque organisation paysanne aura 8 ha destinés aux activités précitées et 3 ha supplémentaires pour la construction des bois de village.

- trois volets secondaires contenant :

- la formation des bénéficiaires (la constitution de pépinière, la construction de brise vent, de plantation d'alignement, haies vives fenaison...),
- la réalisation d'activités et d'infrastructures sportives et culturelles,
- un réseau d'échanges d'expériences.

Le projet dans son volet principal intègre la plantation d'arbres, la culture irriguée et l'élevage.

Cette situation est déjà une presque réalité dans la moyenne vallée exactement dans le développement de Podor à travers plusieurs actions ou opérations ⁽¹⁾ de reboisement et conservation du milieu. Il s'agit notamment de :

(1) quelques opérations dans le département de Podor :

- la construction à Niauli (village situé à 3 km de la ville de Podor) entre 1994 et 1996 de rideaux d'eucalyptus de trois à quatre rangées distantes de 2 à 300 m pour servir de brise vent ou rideau de protection aux périmètres mis en valeur par les populations paysannes,
- la réalisation en fonction de la disponibilité de l'eau à Aéré Lao et Ndioum (deux localités situées dans la vallée) de plantation de gonakié le long des colatures pour abriter les cuvettes aménagées par la SAED contre le vent surtout.

A Dagana aussi les techniciens du Pro-Walo ⁽²⁾, en relation avec les populations de certains villages comme celui de Bokhol, ont effectué un zonage qui fait état d'une division de la forêt classée en trois secteurs un secteur agro forestier- un secteur sylvo-pastoral et un secteur forestier.

Sur information orale obtenue à l'inspection des eaux et forêts de Saint-Louis, la ceinture verte reprend l'ensemble des projets de reboisement de plantation d'arbres, de conservation des terres en cours dans la région.

Dans la moyenne vallée, les premières actions démarrent à Ross-Béthio de part et d'autre de la route nationale ; les terres à mettre en valeur sont celles considérées comme salées et marginales non occupées par la SAED.

La promotion de ces techniques agro forestières positives devrait rencontrer l'adhésion des organisations paysannes et des privées. Ce qui n'est toujours le cas. Très souvent, les actions de sensibilisation ne convainquent pas les paysans qui ne s'associent pas à l'exécution du projet et pour qui, l'arbre planté le long des colatures, constitue un abri ou un refuge à oiseaux. Son système racinaire est considéré comme facteur gênant à la bonne croissance des plantes, donc comme facteur de diminution et de pertes énormes en grains.

Les techniques agro forestières les plus adoptées sont les brises vent et les haies vives (I. Fall, 1999). Deux techniques qui se justifient amplement compte tenu des problèmes rencontrés par les paysans dans la gestion des aménagements hydro-agricoles à cause du vent, des températures, des effets du ruissellement et de ravinement. Les systèmes de préservation ou de protection des milieux sont très nombreux. Mais à travers la recherche bibliographique et en tenant en compte de la situation actuelle de la vallée et de son évolution prochaine, nous avons retenu trois modèles d'exploitation des terres qui sont exposés au point ci- dessous.

Projet Gonakié de restauration des forêts gonakiés financé par les Pays Bas

Premina : projet de restauration du milieu naturel- financement dans le cadre du 7è FED

- Progrena : projet de gestion des ressources naturelles suite du Premina- financement 8è FED

(2) Pro_Walo : Ce Projet basé à Saint-Louis (achevé en fin d'année 1999) a mis en œuvre une politique d'intégration de l'arbre dans les aménagements hydro agricoles pour la vulgarisation des techniques agro forestières

c) Les systèmes de protection du milieu

Les trois modèles d'aménagement agro forestiers présentés sont également trois systèmes de protection qui tiennent compte des combinaisons possibles entre les cultures, l'élevage, et les arbres. A travers les cas proposés, la crue est maintenue aussi longtemps que possible dans la plaine alluviale et elle autorise ou permet une exploitation intensive des casiers aménagés. Les trois systèmes sont :

- les techniques forestières et agroforestières,
- le système foresterie et l'exploitation agricole,
- les systèmes agro-sylvo pastoraux.

c 1 Les techniques forestières et agroforestières

Les expériences de techniques forestières et agroforestières sont nombreuses et variées. Elles ont donné des résultats satisfaisants partout où elles sont appliquées. Elles sont adaptées à des zones sujettes à une grave érosion éolienne ainsi qu'à des crues saisonnières et à des sapements latéraux intenses. Les activités de reboisement donnent lieu à l'installation de zones de plantation abri laquelle est constituée de plusieurs éléments. Le couvert est composé :

- d'arbres de grand jet comme les *eucalyptus* avec tronc sans branche sur une longueur de 3 à 4 m et d'une cime appelée houppier,
- de ligneux conduits en cépée,
- et d'arbres buissonnants utiles pour garnir la base des plantations.

Les arbres de grand jet et en cépée assurent la protection haute et intermédiaire contre le vent et produisent bois de chauffage et bois d'œuvre. La plantation abri doit être formée de ligneux pour la production de bois (exemple du gonakié ou *Acacia nilotica*), d'arbres fruitiers (manguiers, baobab...) et aussi d'arbres à fourrage pour le bétail (*Acacia sp.*).

L'objectif de la plantation est de permettre de reconstituer un milieu géographiquement stable, reconstruire le paysage de gonakié en consolidant les opérations entamées par des projets, de permettre la réinstallation des pâturages et de diminuer l'érosion. Le brise-vent ainsi formé va se présenter comme un obstacle à l'entraînement des éléments les plus riches du sol notamment les argiles, les limons, et la matière organique. Il protège aussi contre les effets mécaniques du vent, effets mécaniques sur les feuilles des cultures telles que, la verse des céréales, la lacération des feuilles...

La plantation abri joue outre un rôle d'écran contre la chaleur et crée de l'ombrage. La plupart des habitants des régions tropicales, en particulier celles du Sénégal septentrional, connaissent parfaitement le bien-être procuré par l'ombre dans la vie quotidienne. Ils ne méconnaissent peut-être pas les avantages potentiels de ce système de production agricole dans l'économie de l'eau, par la baisse de l'évapotranspiration, « *la conservation de la fertilité du sol, la durabilité des rendements culturels par le biais d'apports d'émondes foliaires vertes provenant des arbres* » (Agrof. Vol. 5, n°2).

Une bonne maîtrise de l'ombre peut aussi avoir des répercussions bénéfiques pour l'enherbement et la production culturale. L'enherbement va constituer un obstacle à l'érosion par ruissellement. L'augmentation de la biomasse totale (poids sec) dénote « *une meilleure efficacité photosynthétique* » (Agrof. Vol. 5, n°2) due en grande partie par la constitution de réserves en eau du sol plus importante. Ces avantages mettent en évidence les effets relativement salutaires des brises vent sur l'augmentation de la capacité de rétention, la conservation des sols, c'est-à-dire, du maintien des équilibres naturels et donc de leur « durabilité ».

c 2) Système foresterie et exploitation agricole

Ce système propose l'exploitation associée de l'agroforêt et de la riziculture. Dans l'espace de la vallée, il convient de séparer nettement les rizières qui vont occuper le fond des cuvettes, les plantations forestières implantées sur les levées, les sables dunaires ou les terres salées.

Pour une production supplémentaire de céréales, il doit être possible d'aménager d'autres casiers irrigués sur les terrains non inondés et non salés exondés, entourés d'arbres à dominante espèces locales afin de préserver le micro-modelé dans la plaine alluviale et de maintenir le système de levées là où il n'est pas arasé. Ces terres non inondées sont impropres aux cultures irriguées.

Le mouvement des eaux de crue est fait à partir des vannes. Ce qui permettrait lors de la rentrée d'emmagasiner suffisamment d'eau dans les cuvettes et de pratiquer « *la double irrigation des casiers toute l'année- mais aussi d'étendre progressivement les surfaces irriguées - de recharger les nappes phréatiques, de laisser se reproduire les poissons – d'améliorer la forêt par la faune sauvage* » (B. Crousu, R. Mathieu et S. Seck, 1991).

D'après ces auteurs, l'ambition est d'assurer un maximum de produits vivriers pour satisfaire les besoins alimentaires de la population locale, de fournir aux agriculteurs des revenus monétaires importants grâce à la production multiples en riz. Ce modèle doit « *approvisionner la population, du bois de feu, bois d'œuvre pour matériaux divers et de fournir des plantes médicinales* » (B. Crousu et al. 1991).

Un autre intérêt, c'est la réduction des risques économiques par la diversification des productions et débouchés (marché rural et marché urbain).

Egalement et surtout, l'introduction de l'agroforêt dans l'exploitation agricole protège les sols fragiles contre l'érosion, lutte contre les vents forts qui sont la cause de pertes considérables en grains, favorise une économie de l'eau. Ce système a l'avantage de ne pas perturber le micro-modelé de la plaine alluviale. Enfin ce type d'aménagement de la vallée proposé « *allie préservation d'un écosystème rare en milieu sahélien et souci de diffuser un modèle agricole performant* » (B. Crousu et al. 1991).

Le système agro-sylvicole est pratiqué dans plusieurs régions du Sénégal. Là où il est appliqué, l'agrosylviculture met en association des cultures annuelles et des ligneux pérennes. Plusieurs exemples peuvent être cités.

Dans le Ferlo, au nord du Sénégal, une zone d'élevage, l'*Acacia senegal* est associé au niébé, *Borassus aethiopium* au sorgho à Thiès au centre du pays, *Acacia albida* à l'arachide dans le bassin arachidier, *Casuarina equisetifolia* au maraîchage dans les Niayes sur le littoral de la grande côte.

Au début des années quatre vingt, l'évaluation faite par l'I.S.R.A. sur les actions de la foresterie rurale a dévoilé que « *les essais de plantations, sans irrigation dans le Sahel sénégalais ont donné des taux de survie insuffisants et variables* » (F. B. Armitage, 1986). Pour confirmer cela, les opérations de reboisement initiées par le M.E.P.N. depuis l'an 2000, dans le cadre des « vacances citoyennes » n'ont pas connu la réussite. La sylviculture non irriguée n'est possible que le long des canaux et dans les milieux où les réserves en eau des sols sont suffisantes pour permettre aux racines de s'alimenter directement.

La vallée remplit ses conditions et de plus, permet la pratique de l'irrigation par rigoles, méthode qui convient aux conditions locales, car elle est simple à mettre en place et facile à exploiter.

c 3) Les systèmes agro sylvo-pastoraux

Il s'agit dans ce modèle d'aménagement d'intégrer l'arbre dans un espace assigné aux cultures. La vallée est également une région où les activités pastorales occupent une place privilégiée auprès des populations. Elle abrite plus de 300 000 bovins, près de 1 000 000 ovins, caprins, plus de 70 000 asins et 40 000 équins.

Les cultures vont alterner avec le bétail au cours de l'année dans un espace implanté d'arbres utiles. Les animaux sont rassemblés sur les périmètres après la récolte (riz ou gros mil). La paille est destinée au bétail (voir photo 11, p.295).

Les arbres sont composés d'espaces locales utiles pour le fourrage à l'exemple de : *Acacia albida*, *Acacia nilotica* et autres comme fourrage et haie vive exemple de *Leucaena leucocephala*.



Photo 11 : un périmètre sous pâture à Dagana - (Pro-Walo, 1998)

Acacia albida (ou kad en Wolof) est une légumineuse fourragère de zone sèche qui présente de nombreux intérêts dévoilés par les botanistes et agronomes. Il possède un rythme phénologique inversé dans l'hémisphère nord, sous un climat à longue saison sèche. Il perd ses feuilles en saison des pluies, émet de jeunes pousses et fructifie en saison sèche. Cette espèce absorbe l'azote atmosphérique. C'est donc un fertilisant naturel du sol.

Acacia albida enrichit le sol en azote et en carbone par suite de la décomposition des feuilles, de l'écorce terrestre et d'une partie des fruits. « Cette augmentation du taux d'azote et de carbone peut atteindre 40 à 100% » (mémento de l'agriculture 1984).

L'activité biologique est améliorée 2 à 5 fois plus. Le kad « favorise (également) une amélioration des sols pauvres » (cf. travaux en agronomie à ISRA Bambey). Son rythme phénologique permet de diminuer l'érosion éolienne. C'est en saison sèche que la vitesse du vent double d'intensité partout dans la vallée et plus gravement dans sa partie aval.

Les feuilles et les gousses fournissent un fourrage abondant de très haute valeur nutritive. « *Un Acacia albida adulte prend en moyenne 125 kg de gousses d'une valeur fourragère 2 fois supérieure à celle d'un bon foin ou de fanes sèches d'arachides ou de riz* » (mémento, 1984).

Les feuilles et rameaux de l'espèce *Acacia nilotica* (ou gonakié en Toucouleur) sont affouragées aux chèvres, moutons et en moindre mesure aux bovins. Là où le kad est absent, le gonakié peut constituer le principal arbre fourrager. « *Il produit 80 kg de gousses* » (Maydell, 1983).

Le système agro-sylvo-pastoral est en application au Sénégal par association des cultures annuelles à l'élevage et aux ligneux pérennes. L'introduction de la traction bovine dans l'agriculture au début des années soixante dix par les autorités sénégalaises répondait à ce schéma.

La charrue attelée par les bœufs fut vulgarisée afin de révolutionner l'agriculture sénégalaise en redynamisant la culture arachidière, luttant contre la dégradation des terres causée par la monoculture de l'arachide et les effets de la sécheresse.

La persistance de cette crise climatique a fait disparaître cette réalisation dans toute la partie centrale du Sénégal ; maintenant, à la place des bœufs, on retrouve des ânes et des chevaux.

L'intérêt de ce système est que :

- il développe les cultures vivrières, riz, maïs ou sorgho suivant le choix de l'agriculteur,
- il offre un fourrage au bétail par les cultures et par l'intermédiaire des arbres,
- il protège et fertilise naturellement les sols dégradés, donc conserve et régénère la terre éprouvée du walo.

Sans subvention les paysans ne peuvent s'offrir d'engrais minéral. Pour contourner cette difficulté, les systèmes agroforestiers offrent quelques solutions. L'intégration de l'élevage dans l'espace cultivé avec rotation simple temporairement donne des résultats satisfaisants, car les excréments du bétail fertilisent les sols.

En somme, les systèmes présentés dans cette sous partie prennent en compte les préoccupations définies dans cette thèse. Les modèles exposés précédemment seraient un bon compromis permettant :

- la réhabilitation des milieux dégradés,
- la lutte contre l'érosion éolienne et hydrique,
- la prévention contre l'érosion, mais et surtout,
- l'augmentation de la capacité de rétention des sols,
- et, la diminution de l'évapotranspiration.

Tous ces points sont des obstacles importants suffisants à l'atteinte d'une auto suffisance dans la moyenne vallée. Y remédier, c'est améliorer les conditions de vie des populations paysannes de plus en plus nombreuses.

Des projets de reboisement, où l'on préconise de planter des arbres au bord des périmètres irrigués, sont à l'étude. Cependant, les agriculteurs qui craignent la nidification des oiseaux, n'y sont pas très favorables. Dès lors, on peut s'interroger sur l'efficacité de la gestion et de la mise en valeur actuelles des terres de la vallée, dont les modalités peuvent constituer un facteur d'aggravation du processus de désertification.

V. IMPACTS POLITIQUES

1. la sécheresse, un des facteurs de la crise sénégal-mauritanienne

En 1989 de graves incidents frontaliers ont éclaté entre le Sénégal et la Mauritanie. Un conflit inter ethnique pour de nombreux observateurs opposant populations négro africaines de la vallée du fleuve Sénégal aux arabo-berbères, originaires du nord de la Mauritanie. Mais l'analyse plus profonde des différents détonateurs qui ont embrasé ou attisé le conflit montre que *« le conflit est issu d'une série de facteurs structurels comme la mise en valeur du fleuve et de facteurs conjoncturels comme une suite d'années de sécheresse. »* (C. Vandermotten, 2004).

En effet, la rentabilisation des terres de la vallée grâce à la construction des barrages, donc à une meilleure maîtrise de l'eau a aiguisé les enjeux dont elle fait l'objet. L'application des nouvelles lois foncières en Mauritanie va provoquer une rupture dans les relations interethniques pourtant liées par l'histoire, la géographie mais aussi par le sang

Le régime foncier était coutumier dans les deux pays. Après les indépendances, des réformes sont entreprises dans le cadre d'une politique de planification et de développement du pays.

Au Sénégal, l'Etat a adopté en juin 1964 une loi sur le domaine national selon laquelle il devient propriétaire de plein droit de toutes les terres non classées et qui n'auraient pas été dûment immatriculées à la date d'entrée en vigueur de cette loi. Il s'agit essentiellement des zones urbaines, zones non classées à vocation forestière, zones de terroir régulièrement exploitées et des zones pionnières.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, cette loi est adoptée à partir des années 80, précisément en 1987 à la suite de l'entrée en vigueur de la décentralisation administrative des communautés rurales auxquelles l'Etat a légué ses prérogatives à travers le conseil rural. Ainsi cette nouvelle loi peut-être considérée comme « *une politique de gestion locale et de fermeture relative de la vallée sur la terre des ancêtres.* » (J. Schmitz, 1994). En effet le décret de 1987 va permettre de fermer l'accès à la terre aménageable de la rive sénégalaise aux non ressortissants de la communauté rurale, dans la mesure où il vaut mieux être autochtone pour investir dans l'agriculture de la vallée en zone haalpular.

En Mauritanie, la loi du 5 juin 1983 relative à la réforme foncière a confié à l'Etat la prérogative d'attribuer les terres de culture dans la rive droite de la vallée. Cette loi permet ainsi à l'administration d'approprier certaines terres longtemps détenues par les propriétaires coutumiers notamment les négro-mauritaniens pour les affecter aux nouveaux arrivants. Cette décision sera automatiquement contestée et sera une des causes de l'instabilité sociale qui s'est soldée par les événements tragiques de 1989.

Ainsi, avec cette nouvelle disposition, un changement complet va s'opérer dans la vallée. On passe d'une gestion traditionnelle collective et familiale à une gestion privée, individualisée. La terre appartient à la Nation et à l'Etat de les distribuer. A travers cette réforme, « *le principal souci du gouvernement Mauritanien est de rentabiliser une économie agricole terriblement déficitaire, mais également de désengorger les villes où s'entassent les Maures, poussés par la sécheresse et de donner des terres aux haratins* » (B. Armaillé, 1992).

Ainsi les germes du conflit se situent bien dans les appétits économiques éveillés par le projet d'irrigation de plusieurs centaines de milliers d'hectare dans la vallée et par les conséquences d'une grave crise climatique.

2. La crise sénégal-mauritanienne

Alors que le fleuve et ses aménagements auraient dû améliorer la vie quotidienne des riverains, ils sont de nos jours l'objet de confrontation entre population noire (négro-africaine) et beydanes et entre cultivateurs sénégalais et mauritaniens traditionnellement implantés.

Cette situation a provoqué les événements sanglants d'avril 1989 qui font suite à un incident frontalier entre éleveur mauritanien et agriculteur sénégalais. *« Les relations entre les deux pays se sont brusquement refroidies et les populations se sont lancées pendant plusieurs semaines, dans d'affreuses violences, provoquant la mort de 50 à 100 mauritaniens au Sénégal, 150 à 200 sénégalais en Mauritanie et des centaines de blessés. Environ 160 000 mauritaniens furent rapatriés du Sénégal et 70 000 sénégalais quittèrent la Mauritanie. Cet incident diplomatique provoqua ainsi l'expulsion de 60 000 mauritaniens négro-africains vers la rive gauche du fleuve. Le 21 avril les relations diplomatiques entre les deux pays sont rompues. Ces semaines marquent un des plus grands traumatismes de l'histoire post-coloniale des deux pays »* (M. Badiane, 2003).

Quelques années après les incidents de 1989, les populations de la vallée ont du faire face à une nouvelle crise en juin 2000, en relation avec le projet sénégalais de revitalisation des vallées fossiles. En effet, il s'agissait de l'utilisation des eaux du fleuve Sénégal pour irriguer les affluents de rive gauche, dans le Ferlo (voir carte), taris par la sécheresse.

Les terres de cette région au centre nord du Sénégal, jadis arrosées sont maintenant condamnées à la stérilité et il suffirait d'y faire revenir l'eau pour restituer l'hydrographie ancienne du Ferlo. Mais cela nécessiterait le détournement des eaux du fleuve Sénégal qui se perdent dans la mer. La réalisation du projet devrait assurer à la population : l'irrigation des cultures, la régénération de la faune et de la flore, le développement de l'arboriculture.

Mais pour les autorités de Nouackchott, ce projet était de nature à *« hypothéquer les programmes de l'OMVS »*¹ et qu'il était *« contraire aux conventions de base et aux autres et aux autres textes régissant l'organisation et qui fait obligation à tout Etat membre de consulter les autres pays contractants à savoir le Mali et la Mauritanie au sujet de toute initiative susceptible de modifier d'une manière sensible le régime du fleuve »*.

Selon l'Agence Mauritanienne d'Information (AMI) *« la Mauritanie déclarait craindre que la réalisation de ce projet ne compromette le développement agricole de son territoire par assèchement des cultures sur la rive droite »*.

A la frontière, les tensions entre les Etats se sont transformées en vent de panique. Un ultimatum de quinze jours est donné aux ressortissants sénégalais de quitter la Mauritanie. Le Sénégal abandonna son projet ; la Mauritanie leva la mesure d'expulsion des sénégalais.

¹ Selon Agence Muritanienne d'Information (AMI)

En somme « *l'environnement géopolitique de la vallée fut très agité* » (M. Badiane, 2003) illustré en cela par les événements de 1989 et la question des vallées fossiles mais aussi par d'autres différents non moins importants dûs à des contentieux concernant le tracé de la frontière qui se sont multipliés depuis lors et opposant éleveurs et agriculteurs mais également pêcheurs Guet-ndariens (2) et gardes frontières mauritaniens.

3. Elaboration de la charte des eaux

Toutefois le contexte de péjoration du climat ou de dégradation du climat a été déterminant dans la géopolitique de la vallée marquée par de vives tensions entre le Sénégal et la Mauritanie à propos d'enjeux économiques accompagnant la mise en valeur du fleuve. En effet, si les germes du conflit se situent bien dans appétits économiques éveillés par le projet d'irrigation de près de 400 000 ha, ils sont exacerbés par les conséquences d'une grave crise climatique qui a affecté les populations des deux rives en réduisant fortement les ressources naturelles d'une région écologiquement fragile, les revenus financiers des habitants et en aggravant la pauvreté et le dénuement.

Les travaux effectués par l'UICN sur les conflits et la coopération dans les bassins fluviaux ont montré que « *la multiplication des projets de grands barrages, le haut degré d'interdépendance des pays en matière d'eau, la pression de plus en plus accentuée sur les ressources en eau du fait de l'accroissement de la demande et, de la réduction de la disponibilité de la ressource, suite à la variabilité et au changement climatique, ont augmenté de façon notable les risques de conflits internationaux autour de l'eau en Afrique de l'Ouest* » (M. Niasse, 2004).

Depuis juin 2000, la tension s'est apaisée dans la vallée. Des mesures appropriées semblent être prises par les Etats qui sont de plus en plus soucieux de ramener la paix en coopérant dans la bonne foi et dans l'esprit de bon voisinage.

Ainsi en 2002, « *les chefs d'Etat de l'OMVS sont convenus d'une charte des eaux du fleuve* » (OMVS, mai 2002). Ce document est adopté le 28 mai 2002. Il est défini comme un instrument juridique de haute portée en devenant le pivot de la politique de l'organisation en matière de gouvernance de l'eau.

« *La charte des eaux du fleuve vise à garantir la gestion efficace et rentable des infrastructures, la satisfaction durable des usages, la détermination des règles et des compromis nécessaires à une gestion équitable de la ressource et la création d'un espace de redéploiement, d'expression et de cohérence des efforts nationaux. Elle fixe les principes et des modalités de la répartition des eaux du fleuve entre les différents secteurs d'utilisation, définit les modalités d'examen et d'approbation des nouveaux projets utilisateurs d'eau ou affectant la qualité de l'eau, détermine les règles relatives à la préservation et à la protection de l'environnement* » (journal de l'OMVS du 02 janvier 2007).

Elle se réfère aux textes internationaux sur les eaux partagées en vigueur et en particulier à la Convention des Nations Unies de 1997 sur l'utilisation des cours d'eau partagés à des fins autres que la navigation. Ce texte énonce les grands principes tels que ceux sur « *l'utilisation équitable et raisonnable des cours d'eau, l'obligation de ne pas causer des dommages significatifs à des pays tiers, la concertation entre états riverains* » (M. Niasse, 2004).

Enfin de compte, à travers ce document juridique qu'est la charte, l'OMVS a fait preuve d'un grand dynamisme comme instrument de gestion des conflits mais également comme outil de développement.

CONCLUSION

A travers cette analyse des bilans hydriques dans la moyenne vallée, on retiendra que :

- Le régime hydrique des sols varie d'une saison à une autre et d'une année à une autre ; un régime hydrique sec s'étend sur une grande partie de l'année entraînant une « saison favorable » très limitée pour le développement de la végétation naturelle et des cultures.

- La variabilité du climat est due à l'effet des facteurs énergétiques et du vent, principaux responsables du déficit hydrique donc de l'état actuel du climat ; ces conditions favorisent les processus d'érosion subaérienne et d'érosion hydrique et mettent donc en péril l'usage des terres.

- La vallée est un écosystème riche, il est à protéger contre les prédateurs de toutes sortes au profit des populations riveraines et de l'économie régionale ; la construction des barrages a eu des effets multiples dans la vallée.

- Des impacts négatifs sont relevés sur les activités traditionnelles en particulier les cultures de décrue et la pêche, fortement menacées ; s'y ajoute la recrudescence des conflits liés à la terre, les problèmes de santé, avec des populations exposées aux maladies hydriques et à une forte dégradation des sols.

- Cependant, les cultures irriguées sont en pleine expansion ; elles représentent aujourd'hui l'espoir de toute la région du fleuve et les actions des autorités se multiplient pour gagner le pari de l'autosuffisance alimentaire et de faire de la vallée un pôle de développement économique.

- L'agroforesterie est probablement à intégrer dans le processus de mise en valeur et de développement de la vallée du fleuve Sénégal. Cette approche est de plus en plus adoptée par des riverains soucieux de la préservation de cet écosystème et de la lutte contre tous les fléaux qui peuvent constituer un frein à la réalisation des objectifs.

CONCLUSION GENERALE

La vallée ou le walo (en wolof) est la plaine alluviale inondée par les eaux du fleuve, située entre Richard-Toll et Bakel. Elle s'oppose au diéri, c'est-à-dire, aux terres sèches, dénudées et monotones qui la surplombent.

La vallée présente un modelé assez complexe formé de plusieurs unités à dynamique différenciée suivant un cycle, fonction de la saison et du régime climatique du moment, et se distingue selon la topographie, l'ampleur de la crue, le sol et la végétation. La vallée appartient à la zone tropicale et au domaine climatique sahélien marqué par des températures élevées, une pluviométrie irrégulière aussi bien dans le temps et dans l'espace, au maximum pluviométrique qui se situe entre août et septembre (deux mois).

Le climat est soumis à des influences à la fois géographiques (la continentalité) et atmosphériques par l'intermédiaire de l'harmattan et de la mousson. Ces flux qui déterminent deux types de saison bien différenciée.

Les températures généralement élevées toute l'année suivent et se confondent avec le rythme des saisons. Leur distribution résulte de la conjonction de facteurs cosmiques, météorologiques et géographiques. Les températures maximales montent jusqu'à plus de 40°C entre Podor et Matam ; les moyennes annuelles sont largement supérieures à 25°C ; elles sont proches de 30 ° à Matam.

Comme partout ailleurs, les stations de la vallée subissent les contrecoups des changements climatiques qui se matérialisent par la hausse des températures. Au cours des trente dernières années à Podor comme à Matam et plus à l'ouest dans le delta, les températures ont augmenté de l'ordre de 1 à 2°C.

Dans le domaine sahélien, la pluie est un élément majeur du climat. Toutefois dans la moyenne vallée, bien que importante au niveau des ressources en eau, son influence est de moins en moins ressentie auprès des populations.

A sa variabilité spatiale, s'ajoute une très grande variabilité interannuelle associée à la diminution du nombre de jour de pluie et de celle de la quantité des précipitations. Le dernier épisode sec, celui des années 1960-1990 est caractérisé dans la vallée par sa sévérité en raison de sa persistance et de l'ampleur des déficits pluviométriques.

Au cours de cette période, les isohyètes se sont déplacés plus au sud montrant ainsi la vulnérabilité climatique du Sénégal septentrional et surtout de la vallée. L'occurrence de la période de sécheresse avec une tendance à la baisse de la pluie constitue aussi un fait marquant de la vallée. Comme d'autres l'ont constaté « *la pluviométrie est peu abondante, sporadique, et extrêmement capricieuse, la sécheresse est également une menace permanente et les années sèches sont plus fréquentes que les années humides* » (Nicholson S.E, 1981).

Les résultats recueillis et rassemblés dans ce travail de recherche livrent des informations utiles pour l'Après-Barrage dans la moyenne vallée. Cette analyse est effectuée dans un contexte de sécheresse, phénomène dont la dernière en date dans la sous-région, perdure depuis trois décennies et plus. Mais, les stations renouent avec des précipitations normales voire très favorables depuis 1994. Rien ne dit, et l'étude des fluctuations passées nous pousse à le croire, qu d'autres périodes sèches ne reviendront pas. Les résultats obtenus ont montré que le fleuve Sénégal est le « *Souffle de la vie* » dans cette région. Le premier constat qui est fait au terme de cette étude est l'étroite dépendance des ressources régionales (sol – eaux souterraines – végétaux) et des eaux du fleuve. Si au sud du pays, les effets de la sécheresse se font peu sentir (J. L. Borgne, 1988) en raison d'une pluviométrie encore suffisante, au Sénégal nord et dans la vallée en particulier, la principale source de vie est le fleuve. Ses variations dans l'écoulement, surtout en période où il se tord de douleur sur une terre assoiffée et pleine de rides, pèsent gravement sur les êtres vivants. Les humidités maximales des sols coïncident avec le maximum du niveau des eaux du fleuve. La recharge des nappes souterraines source d'approvisionnement d'eau de la population est due à l'infiltration des eaux de submersion. Les activités traditionnelles susceptibles de remplir les greniers débutent avec la décrue. Les aliments protéiniques sont fournis par la pêche et l'élevage, entretenus par le fleuve. En résumé, la crue du fleuve maintient vie et santé des populations riveraines.

Les bilans par la méthode classique « dite du bilan climatique » et par la méthode du bilan réel ou édaphique ont montré l'ampleur du déficit hydrique dans la vallée et dans la zone du delta. Les pluies enregistrées et les volumes d'eau du fleuve avant régularisation sont incapables de satisfaire correctement les besoins en eau des plantes ou bien de couvrir le déficit de l'ETP. Les chapitres réservés à cette dernière ont prouvé que la méthode Penman-Monteith fournit les meilleurs résultats, ceux qui sont plus proches de la réalité. L'ETP est une mesure, mais de plus en plus, c'est une estimation et les résultats sont jugés très satisfaisants. C'est une valeur numérique qui synthétise tous les éléments du climat en leur donnant une orientation. Elle permet également une connaissance plus exacte du potentiel climatique.

Les calculs sont opérés pour diverses stations. Les valeurs inégales traduisent les spécificités de chaque secteur du bassin du fleuve Sénégal. Elles sont en étroite relation avec des conditions climatiques particulières, la vitesse du vent en ce qui concerne le delta, le facteur énergétique dans la vallée. Mais dans la moyenne vallée amont (ce qui correspond à la région de Matam), ces deux contraintes agissent concomitamment pour accentuer la sécheresse et augmenter le déficit en eau de la station. La sévérité des conditions climatiques de toute la vallée du Sénégal, les fortes chaleurs dont les modèles s'accordent à leur hausse, s'opposent à des quantités de pluie suffisantes, entraînant ainsi une extension des paysages désertiques dans la région nord du Sénégal. Le vent, la température et l'insolation sont des facteurs limitant la disponibilité en eau. Les eaux de surface ont une forte sensibilité à toute modification du climat où ces deux paramètres ont une grande influence. En plus de l'ETP, nous avons essayé de déterminer correctement la capacité utile d'eau des sols. La teneur maximale, la vitesse d'infiltration des eaux et celle du dessèchement sont dégagées, de même que le drainage.

La réussite de la politique d'irrigation ne se limite pas exclusivement à ces facteurs intervenant dans la productivité. Elle exige, de surcroît, de mieux cerner les contraintes qui sont nombreuses et de trouver les solutions les plus adéquates. Les facteurs de blocage sont : la salure, la pauvreté naturelle des sols, l'évaporation. La salure est observée de part et d'autre du lit majeur et sur les levées dominant le lit mineur du fleuve. La pauvreté naturelle pourrait avoir une relation avec l'aridité des terres. Nous avons pu constater à travers les analyses des sols que sur les terres humides, la teneur en matière organique est plus élevée. Cette relation n'est pas gratuite (peut-être). Mais, il est sûr que le pouvoir nutritif d'un sol est proportionnel à l'importance de ses réserves. L'intensification du déboisement à des fins agricoles, énergétiques et autres, met à nu les terres du walo qui s'exposent ainsi à des contraintes naturelles et aux facteurs limitant les ressources hydriques. Le renforcement des actions du vent et de la pluie favorise l'assèchement du milieu.

Pour faire face au phénomène de la dégradation du couvert et surtout des forêts, l'approche agroforestière accompagnée d'une campagne de sensibilisation auprès des organisations paysannes est une solution. La campagne doit communiquer un savoir et viser à l'intégration des masses paysannes comme partenaires dans l'aménagement et la protection du milieu. Une logique productrice et sécuritaire les incite le plus souvent à ne pas adhérer aux projets d'implantation d'arbres dans les espaces qui leur sont réservés à la culture irriguée. Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte les stratégies locales de subsistance et le point de vue local pour tout projet.

Le principe qui a guidé toute cette étude est celui de la disponibilité en eau dans la vallée, vu sous l'angle de ses irrégularités dans le temps. Tous les travaux actuellement entrepris et tous les projets semblent postuler une bonne ressource en eau. Toutefois en récapitulant, il est constaté que l'évolution du régime hydrique est liée d'une part, aux conditions naturelles et d'autre part à la nouvelle situation artificielle qui s'est mise en place avec la construction d'importants ouvrages hydrauliques le long du bassin du fleuve. Dans cette partie du Sénégal, on ne doit pas s'étonner des situations qui changent d'une année à l'autre. Cela tient aux caractéristiques de la zone sahélienne. La régression des pluies longtemps observée a transformé les paysages, entraînant également la diminution des crues du fleuve et la sécheresse des vallées et faisant parfois croire à certains que le réseau hydrographique devrait cesser d'être en eau, voire que le grand fleuve allait disparaître prochainement. Le niveau de la nappe souterraine s'approfondit, les puits s'assèchent, des manifestations analogues sont constatées sur la végétation. Mais une année exceptionnelle suffit pour que les vallées mortes se retrouvent inondées et se transforment en une véritable rivière. Le caractère irrégulier et aléatoire des pluies a des influences sur la durée de la saison des pluies, donc sur l'ampleur du déficit. Il s'étend régulièrement sur 10 et 12 mois. La relation entre les populations et les ressources en eau a été souvent rompue. Cette rupture a eu des conséquences néfastes qui continuent de se faire sentir dans la vallée.

Les lâchers effectués depuis Manantali permettent de maintenir un débit d'écoulement dans les cuvettes qui composent le lit du fleuve. Les volumes d'eau ne sont pas seulement destinés aux cultivateurs de la vallée. Les centres urbains, les usines situés de part et d'autre des deux rives du fleuve reçoivent leur part des volumes d'eau écoulés par le fleuve sous la surveillance de la commission permanente chargée de la gestion des eaux. Les volumes lâchés dépendent de la retenue de Manantali, de son niveau de remplissage. Ils dépendent également des quantités d'eau allouées par l'OMVS à chaque pays membre, mais aussi des caractéristiques hydrologiques propres à chaque année. Somme toute, l'eau douce coule dans le walo, inonde les marigots et défluent sans qu'il y ait rupture. Cette nouvelle situation artificiellement créée fait de la zone traversée par les eaux fluviales un pôle de convergence, de réalisation d'opérations économiquement rentables grâce à l'agriculture irriguée et à l'élevage.

La disponibilité permanente des eaux est facteur de nouvelles répartitions de la richesse ; elle est source de pouvoir politique pour les familles qui la contrôlent. Dans l'ancien royaume du walo, un des grands dignitaires très proche du Brack (roi) portait le titre de « *Maître des eaux* » ou « *Ndiawdine* ». En Mauritanie, « *les hommes s'affrontent pour la possession d'un point d'eau* » (J. Arnaud). Sur la rive droite « *les paysans noirs, Toucouleurs, bambaras, Sarakollés cultivant le mil, le sorgho, le riz, l'indigo ainsi que le coton sont les plus puissants du pays* » (O. de Puigaudeau, 1992). La mise en service des barrages nourrit chez certains des ambitions. Les communautés négro-mauritaniennes sont dépossédées lentement par les maures de « *leurs terres coutumières et ancestrales* » (B. Crousse, 1988).

L'avenir des eaux de la vallée suscite de nombreuses inquiétudes surtout de la part des Etats membres de l'OMVS. Situés entre le Sahel et le désert, ils ont tous fait de la bataille pour l'eau leur credo. De part et d'autre des efforts particuliers des projets sont réalisés pour mettre à la disposition des populations, à chaque personne un minimum journalier de 20 litres (rappelons que dans les pays riches, la consommation dépasse les 100 litres par jour) et gagner le pari de l'autosuffisance alimentaire par le biais de l'agriculture irriguée. Les relations entre le Sénégal et la Mauritanie se sont détériorées dès la mise en fonction des barrages. Les intérêts politiques et économiques prennent le dessus sur les liens culturels traditionnels profonds tissés par l'histoire et la géographie des deux pays. Le destin politique et économique du Sénégal est lié à celui des nations voisines ; ils se partageront les contraintes et tous les risques nés de l'aménagement du fleuve. Si la sécheresse, et ses conséquences, a modifié l'état de santé des populations en majorant le problème de la malnutrition, la mise en place des barrages et les périmètres irrigués a favorisé le développement d'une pathologie spécifique dont les maladies les plus importantes sont : le paludisme et la bilharziose dans la moyenne vallée, la trypanosomiase et l'onchocercose dans la haute vallée. Or, ces épidémies touchent tous les habitants, quelque soit leur nationalité, leur ethnie.

En outre, si l'on ne prend garde, la vallée peut ne pas « *être une oasis de verdure, mais une zone désertique* » (Enda, 1986). En effet, chaque année disparaît du globe 500 000 ha de terres arables. Les raisons en sont les suivantes :

- les labours profonds desséchant très vite les terres,
- les mauvais planages favorisant une infiltration rapide de l'eau,
- les remontées salines entraînant une baisse des rendements,
- les terres s'épuisant rapidement.

L'extension de la sécheresse dans la partie méridionale peut avoir pour principale conséquence des précipitations insuffisantes au Fouta Djallon et dans la haute vallée et provoquer un assèchement de la plaine alluviale. Il existe un débit critique du fleuve en deçà duquel aucune utilisation des barrages ne deviendrait plus possible. Heureusement, en ce début du 3^{ème} millénaire, le Sahel renoue progressivement avec les pluies excédentaires. De 1994 à nos jours, des pluies exceptionnelles de plus de 100 mm sont enregistrées régulièrement notamment en septembre et octobre. La crue naturelle atteint des niveaux plus élevés que ceux réellement observés au cours des années étudiées dans cette thèse.

Pour les spécialistes de l'OMVS « *sans les barrages, les inondations dans l'île à Morfil, Podor et le delta seraient de plus grande ampleur* » ⁽¹⁾. La construction de Diama et des endiguements amont en rives droite et gauche l'implantation de nombreux aménagements hydro-agricoles et de digues de protection le long du fleuve, des affluents et des marigots, ont contribué à modifier sensiblement les conditions d'écoulement dans le fleuve et les axes hydrauliques, il en a résulté un rehaussement plus marqué de la ligne d'eau qui en régime naturel a pour corollaire des risques d'inondation plus élevés. Des périmètres sont entièrement inondés ; des crédits de plusieurs millions de francs ont ainsi été sollicités auprès de la CNCAS ⁽²⁾. Les pertes sont considérables.

Il importe de souligner que ces perturbations pourraient se reproduire voire s'accroître pour des années d'hydraulicité similaire et aggraver la dégradation du paysage avec des processus hydriques plus intenses. Une bonne connaissance des fluctuations du climat pourra seule permettre la maîtrise totale des eaux du fleuve. C'est un pari à gagner. Les ambitions politiques doivent être freinées, pour faire du fleuve ce trait d'union entre les peuples.

¹ OMVS (1994)

² voir annexe

BIBLIOGRAPHIE

1. **ACDI**, 2000 : Etude des ressources ichtyologiques du fleuve Sénégal- aspects hydrologiques et hydrauliques- rapport final - 25 p- annexes
2. **ACDI et OMVS.**, (2000) : Etudes des ressources ichtyologiques du fleuve Sénégal- rapport final ACDI, OMVS, juin, 294 p
3. **ADAMS A.**, (1985) : « *La terre et les gens du fleuves*, Paris, Harmattan
4. **ADAMS A.**, (2000) : Fleuve Sénégal, gestion de la crue et avenir de la vallée, 28 p www.iiied.org
5. **ADRAO.**, (1985) : Recherche sur la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués villageois de la vallée du fleuve Sénégal- rapport de synthèse – la Haye- DGIS- Wagenürigen- mars
6. **AG LITNY I.**, 1997: Les implications du changement climatique : la sécheresse au Sahel, in *Le Courrier*, n°163, mai-juin, pp 61-62
7. **AGSE et USE.**, (1987) : Séminaire sur la problématique de l'émigration sénégalaise – tenue à Dakar du 11 au 14 nov, rapport de synthèse, 116 p
8. **ALBARET J.J.**, 1994 : Peuplement de poissons –ressources halieutiques – pisciculture dans le delta du fleuve Sénégal- impacts des modifications de l'environnement – Dakar –ORSTOM –CRODT , avril, 47 p
9. **ALVAREZ J.**, 1956 : Rapport sur l'utilisation du lac de Guiers comme réserve pour l'irrigation du delta du Sénégal- Saint-Louis, MAS, mars, 24 p carte, tab
10. **AMNESTY INTERNATIONAL.**, (1990) : Violation des droits de l'Homme dans la vallée du fleuve Sénégal, Londres, Secrétariat international
11. **ANNEROSE D ; CORNAIRE B.**, 1991 : Approche physiologique de l'adaptation sur la sécheresse des espèces cultivées pour l'amélioration de la production en zones sèches- Paris- ISRA, 415 p
12. **ARD.**, 2000 : Plan régional de développement intégré (PDRI) 2000-2007, tome 2 : perspectives et stratégies de développement Saint-Louis, Agence Régionale de Développement, déc, 84 p
13. **ARMITAGE F.B.**, 1986 : Foresterie irriguée en pays arides et semi- arides ; une synthèse- CRDI, 192 p

14. **AUBEL J.**, 1994 : La Mauritanie : la rive gauche l'évolution dans les facteurs économiques environnementaux et socio culturels lié à l'installation des barrages qui ont une influence sur l'état de la santé de la population – Dakar, OMVS, juin, pp 13-19
15. **AUDIBERT M.**, 1966 : Etude hydrologique de la nappe profonde du Sénégal : nappe maestrichtienne, paris, BRGM, 99 p, tab, cartes
16. **AUSCHNETZ T.**, 1998 : Collecter l'eau et conserver l'humidité du sol- éd-agromisa, 96 p
17. **AVENARD J.M.**, 1971: La répartition des formations végétales en relation avec l'eau du sol dans la région de Man-Touba, ORS TOM, 159 p
18. **BA A.**, 1977 : Aménagement hydro-agricole et études socio-économiques de la cuvette de Dagana -TER Dkr Sénégal université fac lettres –209 p- tabl
19. **BA A.**, 1985 : Enquêtes préliminaires sur les possibilités d'insertion des émigrés définitivement revenus dans l'économie de la vallée du fleuve Sénégal- OMVS CEPC, sept, 18 p
20. **BA A.**, 2002 : Appui aux pêcheurs- diversification des activités pour limiter la pression sur la ressource et s'orienter vers une pêche durable, UICN, PND Nouakchott, 3 p
21. **BA C.**, 1983 : Les Peuls du Sénégal- Etude géographique- thèse doctorat d'état- université Paris VII- 517 p
22. **BA O.**, 1999 : Le Sénégal à travers les changements climatiques : conquêtes coloniales, sécheresses et inondations, in Wal Fadjri, n°2294, 5 nov, p 6
23. **BADER J. C. et LAMAGAT J. P.**, 2004 : Optimisation de gestion de barrage : le barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal- lettre pigh-pmrc n° 17- pp 37-41
24. **BADIANE M. L.**, 2003 : La dynamique urbaine dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal – mémoire de DEA – université de Provence – 105 p
25. **BA M R.**, 2003 : Quatre pays, un fleuve des hydropolitiques contraires ? Sud Société, 19 sept, [www. sudonline.sn](http://www.sudonline.sn)
26. **BANCAL P.**, 1923 : Le problème de l'eau au Sénégal. III. Sa solution. Rapport d'Archives, Dakar, 47 p., 5 fig, 1 carte.
27. **BARAILLER L.**, 1959 : Aménagement de l'embouchure du Sénégal, Grenoble, SOGREAH, juin, 20 p, graph, photos

28. **BARBEY, C.**, 1982 : Les ergs du Sud ouest de la Mauritanie et du Nord du Sénégal. Thèse d'Etat lettres, Univ, Paris VII, 2 tomes ; 454 p., 68 fig, 14 tab, ph, ann.
29. **BARKALOV I.**, 1971 : Recherches géologiques dans la vallée du fleuve Sénégal, Nouakchott, janv, 8 p
30. **BARMER M.**, 1987 : *Agroforesterie et désertification* – ICRAI- Karthala- CTA- 260 p
31. **BARRO S.**, 2002 : Les racines coloniales des conflits communautaires dans la vallée du fleuve Sénégal : 1854-1933 : séparation des colonies, frontière, discours colonial et local, sept, 118 p, cartes
32. **BARRY B.**, 1980 : Les peuples du bassin du fleuve Sénégal : traditions fondamentales et évolution- essai de synthèse, Partie A, OMVS, SONADER, 7 p
33. **BASSET D.**, 2003 : Lutte contre la bilharziose urinaire dans la région de Djembering (Basse Casamance- Sénégal). Compte rendu des missions 2001 et 2002- Action Médicale , 21 p, tabl, graph, ann
34. **BASSEREAU D.**, 1964 : Evapotranspiration besoins en eau contrôle de l'irrigation de la canne à sucre-IRAT- NOGENT-mars
35. **BELIRES J.F. ; TOURE ELH A.**, 1999 : impacts de l'ajustement structurel sur l'agriculture irriguée du delta du Sénégal, thèse Ecole Nationale d'Agronomie de Montpellier, CIRAD, déc
36. **BELVAUDE C.**, 1989 : *La Mauritanie* - Karthala – 204 p
37. **BERGAOUI M.**, et **ALOUINI A.**, 2001 : caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique cas du bassin versant de Siliana en Tunisie- in sécheresse n°4, vol 12, dec.
38. **BERNARD E.A.**, 1964 : Principes, instructions et conseils pour l'installation et l'équipement des stations de climatologie ou de météorologie agricole (service de la météorologie nationale du Maroc- Mission OMM 1963-1964, ronéo- 30 p)
39. **BERNARD E.A.**, 1965 : Théorie et mesure de l'évapotranspiration méthodologie de l'écophysologie végétale- Actes du colloque de Montpellier- UNESCO- pp. 431-442
40. **BERNARD E.A.**, 1967 : Détermination des pertes en eau par ETP dans les projets d'aménagements intégré du bassin du Sénégal- avril- 38 p

41. **BESSIS S.**, 1989 : Deux régimes affaiblis face à face. Le Sénégal, la Mauritanie et leurs bords émissaires, Paris, Monde Diplomatique, juillet, p.14
42. **BETLEM J.**, 1988 : Le changement de la couverture arborée des forêts de gonakié sur l'île à Morphil entre 1954 et 1986-MPN-notes techniques – n°4, 23 p + ann.
43. **BLANC PAMARD C. et CAMBREZY L.** 1995 : Terres, terroirs et territoires : les tensions foncières, Paris, ORSTOM, 472 p
44. **BRASSEUR M.**, 1991 : Cours d'agroforesterie n°39, CERDI-
45. **BREMAUD O.**, 1969 : Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal : problèmes de l'élevage dans les perspectives de la mise en valeur de la vallée du fleuve Sénégal, Saint-Louis, SAED
46. **BONNEFOND P.**, 1984 : Une forme d'intervention contre la sécheresse : l'irrigation – L'exemple de la rive gauche du fleuve Sénégal- ORSTOM-Bull de la société Languedoc de Géographie t.8-fasc 3-4-Montpellier-pp.207 à 218
47. **BOUAT M.**, 1959 : Irrigation et fertilisation – in circulation d'information et de documentation -services agronomiques de la société commerciale des potasses d'Alsace, dec, 56 p
48. **BOUDET R.J.**, 1964 : ETR, ETP et production agricole : l'eau et la production végétale INRA-Versailles – pp.151-232
49. **BOURGI A.**, 1989 : Frontières : après la coexistence, quel tracé ?, Jeune Afrique, n°1492, 9 août, p.42
50. **BOUTILLIER J. L.**, 1989 : Irrigation et problématique foncière dans la vallée du Sénégal, Cah. Sc. Hum. 25 (4) : pp 469-488
51. **BOYADGIEV T.C.**, 1976 : Etude agro-pédologique de la vallée et du delta du fleuve Sénégal- PNUD- OMVS-St-Louis-93 p + bibliog + cartes h.t.
52. **BUGNICOURT J. ; DIENG B. ; BLONCE J. ; FRIOT M.**, 1976 : Paysages déchirés, environnements menacés dans le delta et la vallée du Sénégal, Dakar IDEP, environnement , août, 66 p, tab, cartes
53. **CASENAVE A. et VALENTIN C.**, 1989 : Les états de surface de la zone sahélienne- influence sur l'infiltration- Ed. ORSTOM-Paris - 229 p

54. **CAPONERA A.**, 1998 : Les eaux partagées et le droit international, Kaslik, Association internationale du droit de l'eau, juin, 4 p
55. **CHAMARD P.**, 1988 : Contribution à l'étude du Sahara méridional pendant l'Holocène, climats et climatologie. Publ Univ Bourgogne Dijon, pp 79-85
56. **CHAMARD P.**, 1989 : L'arbre et la forêt dans les pays sahéliens. Pauvreté et développement dans les pays tropicaux. Bordeaux : CEGET/CNRS-CRET, pp 45-54
57. **CHAMARD P.**, 1993 : Environnement et développement au Sahel, in Sécheresse, mars, n°1, vol 4, pp 17 à 23
58. **CHAMARD P. et COUREL M.**, 1999 : La forêt sahélienne menacée- in sécheresse, vol 10, n° 1, mars, pp. 11 à 19
59. **CHAMARD P. et al.**, 2000 : Spot et radar, deux outils complémentaires d'analyses des milieux arides l'exemple de Nouakchott (Mauritanie), publication ALC, Aix en Provence, vol 12, pp 228-236
60. **CHAMARD P.**, 2002 : Pour un programme international d'étude des paléoclimats quaternaires dans les régions arides. Actes du colloque international, La sécheresse au Maroc, Fès, pp 300-315
61. **CHARREAU C.**, 1963 : dynamique de l'eau de deux sols du Sénégal-in agronomie tropicale, - vol 19 n°11, 57 p
62. **CHARREAU C. et NICOU R.**, 1970 : l'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo- argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques- tome IV, Dakar, MDR, IRAT, août , 339 p, tab, annexes
63. **CHAUMENY J.**, 1971 : Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal - OMVS- rapport synthèse des études et travaux - FAO – OMVS – 319 p, graph.
64. **CHOISNEL E.**, 1989 : Variabilité du climat ; sa prise en compte pour l'aménagement de l'espace rural-CRAC-Agr de France, 75, 9, pp. 45-57.
65. **CHOISNEL E.**, 1985 : Un modèle agroclimatologique opérationnel de bilan hydrique utilisant les données climatiques – conf CIID, les besoins en eau des cultures INRA- pp.115-132.
66. **CISSE S.**, 2001 : Compte Rendu de réunion du comité de gestion et de prévention des inondations – Saint-Louis, CRGPI, sept, 9 p

67. **CISSE L.**, 1986 : Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques- thèse doctorat- institut national polytechnique de Lorraine-nov – 184 p
68. **CLASSENS J.**, 1970 : les cultures maraîchères et fruitières dans le bassin du fleuve Sénégal, St-Louis Sénégal, OERS/FAO, projet rech-agro, fev-mars, 86 p, tabl.
69. **COLY A.**, 2002 : Gestion intégrée du littoral des bassins fluviaux –Dakar, Ministère des mines de l'énergie et de l'hydraulique, SGPRE, fév, 23 p
70. **COLY A.**, 2002 : Situation hydrologique dans les zones humides du delta du fleuve Sénégal, PTGI, UICN. Rapport final année 2, version provisoire, 26 p + annexes
71. **COQUE R.**, 1977 : *La géomorphologie* – A.Colin – coll u, 429 p.
72. **CORNIAUX C.**, 1999 : Etude d'optimisation de la gestion des réservoirs du fleuve Sénégal - impacts potentiels de la gestion des réservoirs du fleuve sur l'élevage de la vallée et du delta- mai –PSI-CORAF- ISRA-Sénégal, 38 p.
73. **CORNIAUX C.**, 1999 : Etude d'optimisation du fleuve Sénégal : situation actuelle de l'agriculture irriguée en relation avec la gestion des ouvrages du fleuve Sénégal, rapport de synthèse, version provisoire , Dkr , IRD, mai, 28 p, tab, fig, annexes
74. **CORRESE C., MASSALI F. et DI VECCHIA A.**, 1991 : Séminaire international sur le bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale : vers une gestion des flux hydriques par le système de culture, Paris, 415 p
75. **COUCHAT P.**, 1977 : Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols- annales agron-
76. **COULIBALY G.**, 1997 : Evaluation de l'impact des variations au niveau des barrages de Manantali sur les mollusques hôtes intermédiaires de la bilharziose- OMVS, SOGEM- 1997, 15 p, ann.
77. **COULIBALY S.**, 1986 : Contribution à l'étude des quatre plans gouvernementaux face aux conséquences humaines de la sécheresse en Mauritanie, Faculté lettres sc. Humaines université de Nouakchott, dépt de géog, 108 p, graph, photos
78. **CROUSSE B.**, 1988 : La Mauritanie, le foncier et l'Après-Barrage-in Politique Africaine n°30- éd-Karthala juin – pp. 83 à 88.

79. **CROUSU B, MATHIEU R et SECK S.**, 1991 : *La vallée du fleuve Sénégal : évaluation et perspectives d'une décennie d'aménagement* – Karthala-Paris-380 p-bibliog.
80. **DACHRAOUI A.**, 1978 : Les périmètres de la vallée du fleuve Sénégal, dimension optimale et mode d'exploitation, fasc. 1 et 2, Dkr- OMVS, 51 p
81. **DAJET J.**, 1960 : Contribution à la connaissance de la faune du fleuve Sénégal : poissons du Baoulé et du Bakoye , bull du musée National de l'histoire naturelle, deuxième série, T32, N°6, PP 506-512
82. **DAJOZ R.**, 1975 : *Précis d'écologie* – coll. Bordas- Paris – 549 p.
83. **DANCETTE C.**, 1971 : L'évapotranspiration et l'évolution des profils hydriques par rapport aux principales caractéristiques hydriques d'un sol- DEA Agronomie, ENSA Montpellier- IRAT, mars, 17 p + bibl.
84. **DANCETTE C.**, 1973 : Principales études de l'IRAT au Sénégal portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et leurs aptitudes à l'irrigation-IRAT- agr trop n°9-sept –pp.881-886.
85. **DANCETTE C.**, 1976 : Besoins hydriques des cultures et l'économie agricole de l'eau dans les zones centre et nord du Sénégal- (notre d'information- ISRA- CNRA- Bambey).
86. **DANCETTE C.**, 1970 : Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation d'un sol sableux du Sénégal – intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide – CRA de Bambey (IRAT- Sénégal) in agron trop n°3 mars – pp. 225 à 240.
87. **DANCETTE C.**, 1976 : Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal – orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures – in agro trop – IRAT- n°4 oct-dec – pp.321 à 338 + bibliog.
88. **D'AQUINO P., SECK S.M. et CAMARA S.**, 2002 : Un SIG conçu par les acteurs : l'opération POAS au Sénégal. L'espace géographique t 31, n°1, pp 23-37, Paris- éd Belin- Reclus
89. **DEGALLIER R.**, 1966 : Note sur la suralimentation des nappes s souterraines, Paris, CIEH, mars, 12 p, 13 ref
90. **D.E.H** : Synthèse des études hydrauliques : état des ressources en eau en 1983- MHDEHV- 52 p + cartes.

91. **DEMANGEOT J.**, 2000 : *les milieux naturels du globe*- 4e ed- Masson- 190 p.
92. **DEMASQUEZ J.**, 1966 : ETP, ETR et rendements des cultures en zone aride- méditerranéenne- communication en symposium de reading sur les méthodes agroclimatiques - UNESCO 1966.
93. **DEME ELH B.**, 1997 : Note sur l'intrusion d'eau de mer dans la retenue du barrage de Diama : problèmes et contraintes, Dkr, OMVS, jan, 12 p
94. **DERRUAU M.**, 1956 : *Précis de géomorphologie*- ed Masson – Paris – 393 p.
95. **DESPOIS J et RAYNAL R.**, 1967 : *Géographie de l'Afrique du nord-ouest*, fig – cartes – Payot – Paris, 570 p.
96. **DIA A et BOUSSO A F.**, 2000 : projet de lutte contre la prolifération du *Salvinia* dans le fleuve Sénégal, Saint-Louis, SAED, 4 p, légendes
97. **DIA B A.**, 1981 : Conditions de mise en valeur régionale de certains minerais dans l'OMVS : phosphate, fer, bauxite, mémoire de maîtrise Sciences éco, 85 p, tab, graph
98. **DIAGANA C H.**, 1997 : Premières observations sur l'écologie des peuplements ichtyologiques du parc national du Diabelli et de sa zone périphérique, in Colas, éd. Scient. Environnement et littoral Mauritanien ; actes du colloque 12-13 juin 1995, Nouakchott, Mauritanie, CIRAD, Montpellier, pp 47-52
99. **DIAGNE A.**, 1989 : Contribution à l'étude de la répartition spatiale des éléments géographiques. étude cartographique- TER- DEA Géog - UCAD- 30 p.
100. **DIAGNE A et RICHARD J. F.**, 1992 : Ethologie du paysage dans la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal – Projet Campus – Dkr – juin - 62 p
101. **DIAGNE M.**, 1980 : Recherches sur la physionomie des pluies des forêts ouest -africains et guyanais- étude comparée- thèse 3ème cycle- Dijon, 287 p.
102. **DIAGNE P.**, 1967 : Pouvoir politique traditionnel en Afrique Occidentale, in présence africaine,
103. **DIAGNE M.**, 2001 : Etat des lieux des inondations à Saint-Louis, déc, MUAT, 14 p

104. **DIALLO M.**, 1990 : Etude et cartographie des milieux biophysiques, la végétation du fleuve-secteur de Podor, TER-Ucad-Dkr-dpt géog, - 107 p + carte.
105. **DIALLO M.A., DIEME I et BOCOUM.**, 1985 : Bilan global de l'effet des aménagements tertiaires sur l'évolution des sols salés du delta et le mouvement de la nappe alluviale – SAED - St-Louis Sénégal.
106. **DIARRA B et KONARE R.**, 1991 : Réduction de l'impact du climat sur le calendrier agricole au Sahel, Paris, 415 p
107. **DIEMER G et VANDERLAAN E.**, 1987 : *L'eau au Sahel*- Karthala - 226 p.
108. **DIENG B.**, 1997 : Synthèse et analyse de données hydrogéologiques de la moyenne vallée du fleuve- rapport de synthèse – OMVS - janv – 42 p + annexes.
109. **DIENG Y. F.**, 1987 : Initiatives de réinsertion des émigrés sénégalais : les contraintes- OMVS-Dkr, juillet, 27
110. **DIOP A. B.**, 1965 : Société Toucouleur et migration – IFAN – Dkr – 232 p.
111. **DIOP M et DIEYE A.**, 1972 : Etude socio-économique de quelques villages de la rive droite pour la formation de futurs pôles de développement, fev, 41, tab, graph,
112. **DIOP M.**, 1986 : Contribution à la connaissance de la dynamique des paysages de la Basse vallée du Sénégal – mémoire de DEA environnement – ISE – fac Sciences – 50 p + annexe.
113. **DIOUF P S.**, 1996 : Les peuplements de poisson des milieux estuariens de l'Afrique de l'Ouest : exemple de l'estuaire hyper halin du Sine Saloum, thèse de doctorat de l'université de Montpellier, n° 156, 3 microfiches, ORS TOM éd., 177 p
114. **DIOUF T.**, 1996 : Synthèse des recherches sur la double culture du riz dans le fleuve - PSI-CORAF - Travaux et Etudes n°2/ISRA/ fleuve - St-Louis – nov - 12 p.
115. **DUCHAUFOR P.**, 1970 : *Précis de Pédologie*- Masson et Cie - 438 p.
116. **DURAND J. H. et THIRION.**, 1969 : Classement des terres de la vallée et du delta du fleuve Sénégal d'après les aptitudes à l'irrigation - St-Louis – Sénégal OERS/FAO - oct –15 p- 1 schéma.

117. **DURAND J H.**, 1978 : La vallée alluviale du Sénégal / Afrique de l'ouest-relation : géomorphologie, sols, aptitudes culturales et leur cartographie au 1:50 000 - in catena vol 5, n°2 – sept – pp.213-225-cartes, graph – bibliog.
118. **DURAND J H.**, 1983 : Les sols irrigables : étude pédologique, Paris, ACCT, PUF, 339 p
119. **DURAND J R. et LEVEQUE C.**, 1981 : Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne, ed. ORS TOM, coll initiation, doc tech, n°45, T2, PP 687-769
120. **ELHAÏ H.**, 1968 : *La biogéographie* - Armand Colin, coll U, 404 p.
121. **ELOUARD P.**, 1962 : Etude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du guébla mauritanien, BRGM - mémoires n°7, - 271 p.
122. **ENDA.**, 1986 : *Enjeux de l'Après barrage – Vallée du Sénégal* - enda, Ministère coopération Française - 632 p.
123. **FALL B.**, 1986 : Rapport du groupe de travail sur le rôle des ONG dans le processus de développement de la vallée, avril, MP coopération, CNPSAB, 17 p, tab
124. **FALL E.**, 1989 : Les enjeux de l'Après-Barrage, Jeune Afrique, n°1491, 2 août, pp 39-44
125. **FALL I.**, 1999 : Problématique du développement de l'agroforesterie dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal - cas du site Pro-walo de Dagana-mémoire de fin d'études ENCR - 54 p.
126. **FAO .**, 1995 : L'irrigation en Afrique en chiffres – Rome-pp.1 020 à 1 203.
127. **FAO.**, 1999 : Stratégie de développement de la petite irrigation et plan d'actions – vol 1 (texte principal)- II (annexes)
128. **FAO.**, 2003 : Bilan- diagnostic de développement de l'agriculture irriguée dans le bassin sénégalais du fleuve Sénégal- FAO, OMVS, oct, 80 p, ann, bibliog.
129. **FAUCK R.**, 1961 : les sols des régions semi-arides au sud du Sahara et leurs propriétés physiques - réserves d'eau du sol- écoulement et érosion – pp. 61-67+ bibl.
130. **FAYE A.**, 1991 : Les écoulements du fleuve Sénégal à la station de diama en cours de l'année hydrologique 1990 - TER DEA géog – UCAD – dépt géog- 63 p.

131. **FRETEAUD J P.**, 1984 : Détermination des coefficients cultureux en zone soudano-sahélienne- proposition d'une méthode générale et pratique, IRAT DEVE (Division Economie et Valorisation de l'Eau) juillet, 19 p + annexes.
132. **GAG J Y et KANE A.**, 1986 : Le fleuve Sénégal : bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure – sci. géol. bull 39, pp. 99 à 130 - Strasbourg 1986.
133. **GAG J Y ; CARN M et ORANGE D.**, 1991 : L'étude de l'impact de la sécheresse actuelle sur le bilan hydrologique du fleuve à Bakel, ORS TOM, oct, 31 p
134. **GALLAIS J.**, 1984 : *Hommes du Sahel* - Flammarion, coll géographes, 289 p.
135. **GAVAUD M.**, 1990 : Nature et localisation de la dégradation des sols au Sénégal – in Dégradation des Paysages – UCAD-dpt géog-1990 – pp 95 à 111.
136. **GAUCHER G.**, 1968 : *Traité de Pédologie agricole : le sol et ses caractéristiques agronomiques* – Paris – 578 p.
137. **GIRARDEL.**, 1999 : Enquête sur les ressources en eau et les besoins des différents usages dans le delta du fleuve Sénégal, rapport final, Action 4 : les enjeux du partage de l'eau dans le delta à l'horizon 2010, GIRARDEL, St-Louis, 50 p + annexes
138. **GIRI J.**, 1983 : *Le Sahel demain - catastrophe ou renaissance* - Karthala, 323 p.
139. **GLEIZES C.**, 1964 : Les formules d'évapotranspiration in techniques rurales en Afrique – évaluation des quantités d'eau nécessaires à l'irrigation,
140. **GODARD A et TABEAUD M.**, 1992 : *Les mécanismes du climat*- A. Colin, coll. cursus, 192 p.
141. **GRABET P.**, 1965 : Mesure ETP- note interne - INRA- Versailles-
142. **GUYOT G.**, 1997 : *Climatologie de l'environnement*, Masson - 505 p .
143. **HALLAIRE M.**, 1953 : Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'eau en profondeur, sous sols nus et cultivés, ann-agron- Paris, vol 4 - n° 2, pp.143- 244.
144. **HALLAIRE M.**, 1964 : Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement- l'eau et la production végétale, vol INRA, pp. 27- 62.

145. **HAMEL O.**, 1985 : Production ligneuse en irrigué dans les périmètres aménagés du Sahel nigérien et sénégalais - CTFT, France, ISRA, 51
146. **HENIN S.**, 1976 : Cours physique du sol- vol1 et vol 2- vol1 : texture, structure et aération, ORSTOM-Paris – 189 p - vol2 : l'eau et le sol – les propriétés mécaniques – chaleur et le sol – ORSTOM Paris 1976, 222 p.
147. **HILLEL D.**, 1988 : L'eau et le sol –principes et processus physiques- coll. Pédosup – Académia Louvain-la- Neuve-, 28 p.
148. **HIERNAUX C. R.**, 1955 : Sur un nouvel indice climatique d'humidité proposé pour l'Afrique de l'ouest-doc bull IFAN, TXVII, série A, n°1- pp. 1 à 6.
149. **HUBERT H.**, 1917 : Le dessèchement dans les régions sénégalaises- Bull. MAS, St-Louis, Sénégal- 77 p.
150. **HUBERT H.**, 1920 : Le dessèchement progressif en Afrique Occidentale- Bull. com. Et. Hist. En sc. de l'AOF, pp 399-467.
151. **IFAN.**, 1998 : Espaces ruraux : le Sénégal est-il sous la menace d'une grande sécheresse ? série B, IFAN, tome 48, n°1-2, 208 p
152. **ILLY P.**, 1973 : Etude hydrogéologique de la vallée du Sénégal, projet hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal, 159 p.
153. **IRAT.**, 1971 : Inventaire des essais techniques culturels sur le sorgho de décrue dans le oualo du Gorgol - Kaédi, 1960-1970, St- Louis Sénégal, IRAT, projet rech agro, mai, 106 p.
154. **IRAT.**, 1971 : Rapport d'activité 1970, étude et amélioration du milieu- division de bioclimatologie- chap. 1 ; études bioclimatologiques - Bambey- IRAT/CRA Bambey, mars, 20 p, 13 graph.
155. **JUTON M.**, 1979 : Relation entre superficies cultivées en décrue et certaines caractéristiques des crues Etudes socio économiques – OMVS- août
156. **KA M M.**, 2004 : Morbidité de la bilharziose intestinale à schistomosa mansoni- PLCB- 3 p, photo
157. **KANE A.**, 1980 : Les sécheresses et les étiages dans les régions tropicales humides et sahéliennes- L'exemple du Sénégal- Mémoire DEA- lab. Géog. Phys.- Univ Nancy II.

158. **KANE A.**, 1997 : Modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques- conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles – Thèse d'Etat - UCAD
159. **KEBE M.**, 1994 : La pêche côtière au Sénégal, Dkr, CRODT, ISRA, août, 19 p
160. **KELLOG W W et SCHWARE R.**, 1981 : Climate change and society. Consequences of increasing carbon dioxide. Westview press, boulder, Co, 178 p.
161. **KELLY H W.**, 1983 : Garder la terre en vie, l'érosion des sols -causes et ses remèdes – bull pédologique - FAO n°50/ Rome – 90 p.
162. **LABONNE M.**, 1980 : *Problèmes des régions arides*, Paris ACCT, 52 p
163. **LAKE L. A.**, 1982 : Analyses cartographiques de la désertification dans le nord du Sénégal- IFAN, Dakar, 236 p
164. **LE BORGNE J.**, 1988 : *La pluviométrie au Sénégal et en Gambie*- Université CAD - Dpt géographie - labo de climatologie - avril – 94 p.
165. **LE BORGNE J.**, 1990 : La dégradation actuelle du climat entre le Sahara et l'équateur – in dégradation des paysages - UCAD, département de Géog – ORSTOM – pp. 17 à 36
166. **LEBRUSQ J Y.**, 1984 : Etude pédologique des cuvettes de la vallée de Lampsar- ORSTOM Dkr.
167. **LE HOUEROU H. N.**, 1976 : Peut-on lutter contre la désertisation ? in désertification au sud du Sahara - colloque Nouakchott 17 au 19 dec 1973- NEA - pp.158 à 163.
168. **LE HOUEROU H. N.**, 1993 : Changements climatiques et désertisation – in revue Sécheresse, juin, n°2, vol 4, pp. 95 à 111.
169. **LERICOLLAIS A.**, 1980 : Peuplement et cultures de saison sèche dans la vallée du Sénégal- notice explicative n°81 ORSTOM- OMVS - Paris – 7c
170. **LERICOLLAIS A.**, 1975 : Peuplement et migrations dans la vallée du Sénégal, ORSTOM, cahiers des sciences humaines, 12 (2), pp 123- 135
171. **LEROUX M.**, 1980 : Le climat de l'Afrique Tropicale – doctorat d'Etat- 3t- Dkr, 1427 p, 353 fig.

172. **LOYER J Y et MTIMET A.**, 1979 : Etude pédologique de la cuvette de Ndierba (région du fleuve Sénégal) ORS TOM- janv – 22 p + bibl - annexes.
173. **LOYER J, ZANTE P et MOUGENOT B.**, 1986 : Changements récents induits par l'intervention humaine sur les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal - Symposium Inqua Dkr - avril.
174. **LOYER J.**, 1989 : Les sols salés de la basse vallée du Sénégal- caractérisation, distribution et évolution sous cultures – ORSTOM Paris – 137 p, bibliog.
175. **LUCIDO M.**, 1977 : Analyses agroclimatologiques effectuées à partir des stations et sous-stations météorologiques - étude comparative inter-station, OMVS - FAO, oct, 29 p.
176. **LY B.**, 1958 : Le drame de la vallée du fleuve Sénégal- IRAT-26 p
177. **LY B.**, 1982 : Catalogue des poissons d'eau douce de Mauritanie, CNROP, déc, 51 p, fig
178. **MAIGNIEN R.**, 1959 : les sols subarides au Sénégal, Agronomie Tropicale, n°5
179. **MANE L et FRAVAL P.**, 2001 : Suivi de télédétection des cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal en saison froide, Saint-Louis, SAED, ADRAO, sept, 29 p
180. **MANE L ; NDIAYE O et KANE M.**, : 2000 : Etude des cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal durant la contre saison froide 1999-2000 : approche par télédétection satellitaire, Saint-Louis, SAED, DPDR, DES, juillet, 36 p
181. **MANE L., RICHARD J F. et DEFOURNY P.**, 2001 : Diagnostic des unités morpho-pédologiques de la vallée du fleuve Sénégal sur le terrain et à partir des données satellitaires, in sécheresse n°1, vol 12, mars, pp 7-14
182. **MARCESSE J.**, 1967 : Détermination in situ de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutrons- communication au colloque d'Istanbul- AIEA- pp.137-146.
183. **MARTIN M.**, 1957 : Bilan des réalisations du casier rizicole da Richard-Toll, Saint-Louis, MAS, mars, 7 p

184. **MARTIN L., FLEXOR J. M. et SUGUIO K.,** 1985 : Auscultation des cordons littoraux fossiles dans un but de reconstitution paléoclimatique-exemples brésiliens- in climat et développement, colloques et séminaires- ORSTOM – oct – pp 30-33.
185. **M.A.,** 1997 : Résultats de l'enquête sur les cultures de décrue à la campagne agricole 1996/97- DSA- juil, 12 p, ann.
186. **MAS.,** 1960 : Les hommes du walo : historique, Saint-Louis, MAS, juillet, 22 p, carte
187. **MATHIEU P.,** 1987 : Agriculture irriguée, réforme foncière et stratégies paysannes dans la vallée du fleuve Sénégal 1960-1985 : une analyse des effets de la modernisation agricole sur les transformations des espaces ruraux, Luxembourg-Arlon, 411 p, tab, cartes, graph
188. **MAYMARD J.,** 1960 : rapport sur les études pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal- MAS - St-Louis, bull 122, ronéo
189. **MEF.,** 2006 : Résultats du troisième recensement général de la population et de l'habitat (2002), MEF, ANSD, déc, 123 p
190. **MEF.,** 2006 : Situation économique et sociale du Sénégal, Agence nationale de la statistique et de la démographie (ANSD), MEF, éd. 2005, 235 p
191. **MENDRAS H.,** 1958 : Les paysans et la modernisation de l'agriculture- C.R. d'une enquête pilote, Paris, CNRS, 141 p, cartes
192. **MERZOUG M S.,** 2005 : *L'eau, l'Afrique, la solidarité : une nouvelle espérance- l'OMVS, un cas de développement solidaire*, Présence Africaine- juin, 189 p
193. **MICHEL P.,** 1969 : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie – Etude géomorphologique –doctorat d'Etat, 3 t, 753 p, 170 fig.- cartes h.t.- photos.
194. **MICHEL P et SALL M.M.,** 1984 : Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal- Mém. ORSTOM, pp 89-109
195. **MICHEL P.,** 1985 : Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le delta du Sénégal- Revue de géomorphologie dynamique - Strasbourg xxx1, v n° 4 - pp. 113-130.
196. **MONOD TH.,** 1992 : Du désert, in sécheresse n°1, vol 3, pp 7-24

197. **MONNIER Y., :** « *La poussière et la cendre, paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique* » - HCCT- 2° éd., 1990- 254 p
198. **MONTEILLET J.,** 1988 : Environnement sédimentaire et paléoécologie du delta du Sénégal au quaternaire- évolution d'un écosystème fluvio-marin tropical au cours des derniers 100 000 ans- thèse de doctorat d'Etat - Université Perpignan, 267 p.
199. **NDECKY A.,** 1991 : Intensité des pluies, ruissellement et érosion dans l'île à Morfil – TER - Dépt géog UCAD - 75 p + annexes.
200. **NDIAYE A.,** 1994 : Les paramètres de l'environnement et la pluviogénèse à travers un système d'information géographique – application à l'hivernage 1990 au Sénégal- Thèse de doctorat- Univ Paris 1- 324 p, fig, cartes et photos.
201. **NDIAYE A. et NDIAYE P.,** 2000 : Perspectives environnementales au Sénégal- Atlas du Sénégal- éd. J.A., Paris – pp 32-33.
202. **NDIAYE M M.,** 1992 : Coûts de la désertification au Sénégal, Paris, 674 p, thèse Université Paris 1
203. **NDIAYE J. P.,** 1987 : Fertilité et fertilisation des sols des rizières dans la vallée du Sénégal, ISRA - St-Louis - 47 p.
204. **NIANG A,** 1992 : Les blocages de la foresterie - Centre du Sahel, Univ de Laval - 38 p
205. **NIANG A et COLY A.,** 2002 : Modification du paysage au niveau de la langue de Barbarie de l'estuaire et de l'embouchure du fleuve Sénégal de 1972 à 2002, 9 p, tabl, carte
206. **NIASSE M.,** 2004 : Prévenir les conflits et promouvoir une coopération dans la gestion des fleuves frontaliers en Afrique de l'Ouest – UICN-BRAO –revue science environnement, vol 5 ; n°1, mai, 13 p
207. **NICHOLSON S.E.,** 1981 : Rainfull and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in west Africa. Mon. Wea. Rev; 109, 2191-2208
208. **NONGONIERMA A, MOKADEM AI et DAUTREBANDE S.,** 1994 : Apports de la télédétection pour la caractérisation des bas-fonds et de leur bassin versant au Sahel, Paris, 415 p

209. **OMVS.**, 1980 : Etude socio-économique du bassin du fleuve Sénégal- Présentation générale du bassin du fleuve, Partie A, St-Louis, SAED, SONADER, USAID, avril
210. **OMVS.**, 1980 : Etude socio-économique : le milieu rural traditionnel, Partie B, St-Louis, SONADER, USAID, Avril
211. **OMVS.**, 1984 : Colloque sur les orientations du développement de l'Après-Barrage, Dkr, OMVS, nov, 75 p, annexes
212. **OMVS.**, 1993 : Expertise technique sur le rip-rap du barrage de Manantali, IWASI, juillet, OMVS
213. **OMVS.**, 1998 : Le bassin du fleuve Sénégal au-delà de 2000 : initiative régionale pour la gestion intégrée participative et durable de l'environnement et des ressources en eau, Dkr, OMVS, BM, PNUD, PNUE, UICN, déc, 4 p
214. **OMVS.**, 2002 : Atelier de réflexion sur la problématique des inondations à St Louis : rapport final, OMVS, août, 8 p
215. **OMVS, 1994** : Directives de qualité pour l'eau de boisson, 2^e édition – vol 1- recommandations - Genève 202 p
216. **OMVS.**, 1986 : La pluviométrie de la vallée du Sénégal de 1920 à 1984- OMVS, 100 p.
217. **OMVS.**, 1986 : Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS- rapport phase 1 vol 1D-actualisation de l'étude hydrologique, fève
218. **OMVS.**, 1986 : Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS- rapport phase 1- vol 1c- analyse de la situation actuelle – OMVS – fève
219. **OMVS.**, 1987 : Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS- rapport phase 1- vol 1B-optimisation de la crue artificielle- juin
220. **OMVS.**, 1987 : Etude de la gestion des ouvrages communs de l'omis rapport phase2- vol 2A-scénarios d'utilisation de l'eau, rapport définitif juin
221. **OMVS.**, 1990 : Un tournant décisif, in OMVS magazine revue trimestrielle n°1 mai.
222. **OMVS.**, 1994 : Note sur la gestion des eaux du fleuve Sénégal pendant l'hivernage 1994 (juillet en novembre 1994) - OMVS - Haut-Commissariat-Dakar- dec - 16 p.

223. **OMVS.**, 1993 : Bulletin d'information sur la gestion des eaux régularisées du fleuve Sénégal- n°3 /93-5 p, période couverte 1^{er} fév au 31 juil 1993-OMVS Haut-Commissariat – Dakar – août.
224. **OMVS.**, 1993 : Rapport d'activités 1993 du Haut Commissariat et des structures provisoires d'exploitation des barrages -Haut Commissariat Dakar dec – 55 p.
225. **OMVS.**, 2002 : La charte des eaux du fleuve Sénégal – OMVS – mai, 19 p
226. **OMVS.**, 2003 : Etude pour la phase initiale de mise en place de l'observatoire de l'environnement- rapport technique- nov – 256 p.
227. **OMVS.**, 2006 : Observatoire de l'environnement – rapport annuel sur l'état de l'environnement et des ressources naturelles du bassin du fleuve Sénégal-OMVS, Dakar, dec, 50 p
228. **OMVS.**, 2006 : Programme de gestion intégrée des ressources en eau et de développement des usages à buts multiples dans le bassin du fleuve Sénégal. Stratégie régionale et programme d'actions contre les bilharzioses et le paludisme – OMVS, Association Espoir pour la santé- St Louis, 186 p, tabl, carte, sch, diagr.
229. **OWUSU D Y .**, 1993 : L'agroforesterie par et pour l'agriculture - pp 8-9- vol 5 n°1- janv- mars.
230. **PARDE M.**, 1968 : *Fleuves et rivières*- Armand colin - 5è éd – 1968 -243 p.
231. **PENMAN.**, 1948 : Naturel evaporation from open water, bare soil and grass- proceeding Royal society London, série A, vol 193, pp.120-145.
232. **PIERI C.**, 1975 : Minéralogie et propriété de surface de deux sols sableux du Sénégal -Rapport ISRA agron. trop.
233. **PNUD.**, 1966 : Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal, St-Louis, Comité Inter-Etats Pour l'Aménagement du fleuve Sénégal, août, 23 p, annexes
234. **POUQUET J.**, 1951 : *L'érosion* – QSJ ? PUF- Paris – 126 p.
235. **PUIGAUDEAU O.**, 1992 : *Pieds nus à travers la Mauritanie* 1933-1934- Phebus - 261 p.

236. **RAES D et DECKERS J.**, 1993 : Les sols du delta du fleuve Sénégal : propriétés physiques et chimiques, St Louis, SAED, Centre de Ndiaye, juillet, 84 p, tabl, fig
237. **RAES D. et SY B.**, 1995 : Analyse de la pluviométrie et de l'évapotranspiration dans la zone du delta du fleuve Sénégal-bull n°5 – SAED-St-Louis – Sénégal – 67 p.
238. **RAHIM E, LORSAINT P et RAPP M.**, 1973 : Recherches sur la dynamique et le bilan de l'eau des sols de deux écosystèmes méditerranéens à chêne vert » in recherche coopérative sur programme de CNRS - n°40, pp.195 -288.
239. **RAMADE F.**, 1981 : *Ecologie des ressources naturelles*- Masson – 322 p.
240. **RIBSTEIN P.**, 1990 : Modèles de crues et de petits bassins versants au Sahel- éditions ORSTOM-coll Etudes et Thèses- Paris – 317 p + bibliog- fig et tab- annexes.
241. **RICHARD L.**, 1969 : La production de coton St-Louis – Sénégal OERS/FAO, projet rech-agron - oct, 39 p.
242. **RIJKS D.**, 1971 : Compte Rendu des travaux réalisés à Richard-Toll en 1970, St-Louis Sénégal, projet rech agro mai, 13 p, tab, graph.
243. **RIJKS D.**, 1972 : Projet pour le développement de la recherche agronomique et de ses applications dans le bassin du fleuve Sénégal - OMVS, FAO, juin, 5 p.
244. **RIOU C.**, 1972 : Bac d'eau libre et l'évaluation des consommations d'eau des couverts végétaux - communication séminaire sur les perspectives de l'irrigation en Afrique Occidentale, oct – Ibadan
245. **RIOU C.**, 1975 : La détermination pratique de l'évaporation - application à l'Afrique Centrale- mémoires ORSTOM n°80, 236 p.
246. **RIOU G.**, 1990 : L'eau et les sols dans les géosystèmes tropicaux - Masson- 221 p.
247. **RIQUIER J.**, 1962 : Formules d'évapotranspiration – cahiers ORSTOM de pédologie – Volume I – Fascicule 4.
248. **ROCHE M.**, 1963 : Mission des Nations-Unies pour l'étude du bassin du fleuve Sénégal, Dkr, MEBFS, 140 p, tab, carte

249. **ROCHE PA.**, 2001 : L'eau au XXI^e siècle : enjeu, conflits, marché-Ramsès, pp 79-94
250. **ROCHETTE C et TOUCHEBOEUF L P.**, 1964 : Aperçu hydrologique du fleuve Sénégal, synthèse provisoire des données hydrologiques élaborées par l'ORSTOM, MAS, ronéo
251. **ROCHETTE C.**, 1974 : Le bassin du fleuve Sénégal- monographie hydrologique- ORSTOM Paris - I ère partie- 325 p - graph.
252. **RUAL P et SERVAIN J.**, 1985 : Océan Atlantique tropical et fleuves du Sahel, in Climat et Développement, colloques et séminaires – ed. ORSTOM – oct 1985 – pp 75 à 81.
253. **SAED.**, 1996 : « *La SAED à 25 ans* » - SAED nov. 23 p.
254. **SAED.**, 2001 : L'agriculture irriguée en rive gauche de la vallée du fleuve Sénégal- bilan et perspectives, St-Louis, SAED, oct, 45 p
255. **SAED.**, 2001 : Riz irrigué dans la vallée du fleuve Sénégal : état des lieux et perspectives- document introductif au conseil présidentiel sur la filière riz local, juin, 25 p tab, graph
256. **SAGNA P.**, 1988 : Etude des lignes de grains en Afrique de l'Ouest, Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Dakar, 291 p.
257. **SAGNA P.**, 2000 : Le climat du Sénégal- in Atlas du Sénégal- éd., J.A., Paris- pp 16-19.
258. **SAGNA P.**, 2003 : Evolution climatique et impact dans les zones côtières – UCAD, Dépt.Géog, labo climat – 16 p.
259. **SALL M.**, 1982 : Dynamique et morphogénèse actuelle du Sénégal occidental – thèse lettres – Université Strasbourg 604 p.
260. **SALVAT B.**, 1991 : Le corail témoigne : la terre se réchauffe- in Science et Vie – n° 887- août – pp 30-33
261. **SANTOIR C.**, 1990 : Le conflit mauritano-sénégalais : la genèse. Le cas des Peuls de la haute vallée du Sénégal, ORSTOM, cahiers des sciences humaines, 12 (2), pp 553-576
262. **SAOS J L et ZANTE P.**, 1987 : Le bouchon barrage de Kheune, son influence sur les eaux de la nappe alluviale et du fleuve Sénégal - ORSTOM Dakar - 37 p.

263. **SCHOCH P.G.**, 1965 : Rapport de coopération technique militaire – bilan hydrique – ETP et techniques utilisées. Influences des arbres et leurs conséquences agronomiques, IRAT, 28 p.
264. **SCHMITZ J.**, 1990 : Le fleuve Sénégal, ligne de front ou voie de passage, Afrique contemporaine, n° 154 (2), pp 70-73
265. **SCHMITZ J.**, 1993 : Anthropologie des conflits et hydropolitique du fleuve Sénégal (1975-1991), ORSTOM, cahiers des sciences humaines, 29 (4), pp 591-623
266. **SECK A.**, 1962 : Le heug ou pluie de saison sèche au Sénégal - annales géo-fac lettres Dakar n°385, pp. 225-246 - 12 fig.
267. **SECK A T.**, 1991 : Les parasitoses intestinales à Richard-Toll : bilan de 4 années du Laboratoire de Parasitologie du Centre de Santé- Faculté de Médecine et de Pharmacie- UCAD, 149 p
268. **SECK M .**, 1970 : ETP- indice d'aridité - RFU- Etude des principaux agrométéorologiques au Sénégal - in agro trop n°3 mars pp. 241-276.
269. **SECK S.M.**, (1985) : Aspects fonciers et organisationnels de la culture irriguée dans le bassin du Sénégal- St-Louis, OMVS/CEPC ; avril, 147 p
270. **SECK S.M.**, (1999) : Gestion des terres et évaluation de ses implications sur le développement et l'aménagement de l'espace dans la vallée du fleuve Sénégal – rapport d'activités- études d'avancement ISRA/PSI- St Louis, fev, 7 p, ann.
271. **SEDAGRI** 1973 : Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal- OMVS- étude pédologique - SEDAGRI/FAO - Paris - 251 p.
272. **SENE M, SOUTHGATE V R, VERCROYSSSE J.**, 2004 : *Bulinus truncatus*, hôte intermédiaire de *Schistosoma haematobium* dans le bassin du fleuve Sénégal
273. **SEYRAL P.**, 1969 : Considérations sur les besoins en eau d'irrigation dans la vallée du fleuve Sénégal, St-Louis – Sénégal, OERS/FAO projet hydroagricole, oct, 40 p, tabl-graph.
274. **SHERIDAN D.**, 1985 : *L'irrigation, promesses et dangers - l'eau contre la faim*. Harmattan - Earthscan, 155 p.
275. **SIRCOULON J.**, 1976 : les données hydro-pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale- comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940- cah ORS TOM- série hydro- pp. 75-174 - 30 fig.

276. **SOGED.**, 2001 : Problématique de la gestion des eaux du fleuve Sénégal dans le contexte de développement de l'agriculture irriguée dans le bassin du Sénégal, Dkr, OMVS, St-Louis, SOGED, oct, 10 p
277. **SOKONA Y.**, 1981 : Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal : étude de la capacité de réservoir de Manantali, thèse, avril, 138 p ; graph, fig
278. **SOW A.A.**, 1984 : Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal - Thèse doctorat 3e cycle, Université Nancy II- oct – 442 p.
279. **SOW D.**, (2006) : Hydrologie des milieux aménagés du Delta et de la Moyenne vallée du fleuve Sénégal- le cas de la cuvette de Ndioum walo dans l'unité naturelle du Doué- Mémoire de maîtrise- Départ de Géog- UGB St-Louis- 120 p.
280. **SOW H.**, 1990 : Le bois- énergie du Sahel : environnement et développement, Paris, ACCT, CTA, Karthala, nov, 176 p
281. **SY B A.**, 1990 : Dynamique actuelle dans le delta du fleuve Sénégal : contribution à l'étude géomorphologique du Sénégal septentrional, thèse de 3^{ème} cycle, UCAD, 244 p
282. **TABEAUD M.**, 1980 : Quelques aspects des bilans hydriques au Mali, Annales de géog- n° 89, pp 37-55.
283. **TABEAUD M et SIMON L.**, 1995 : Forêts et Réchauffement global- colloque AGF, oct 1995, BAGF, n°4, pp. 313-323.
284. **TABEAUD M et BESSAT F.**, 1997 : Eléments de variabilité climatique en Polynésie française : exemple de l'archipel des Îles de la société de 1958 à 1994, publication de l'AIC, volume 9, pp. 420-429.
285. **TABEAUD M.**, 1998 : *La Climatologie*- A. Colin, coll. Synthèse, 92 p.
286. **TABEAUD M.**, 2000 : *La Climatologie*- A. Colin, coll. Ad Hoc, 176 p.
287. **TARDY Y.**, 1986 : *Le cycle de l'eau*- Masson, Paris, 266 p.
288. **TARDY Y et PROSBT J L.**, 1992 : Sécheresses, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis 100 ans, in sécheresse, n°1, vol 3, pp 25-36
289. **TASSIN J.**, 1990 : *Agroforesterie et conservation des sols dans les régions chaudes*, édité par Nature et Progrès.

290. **THORNTHWAITE C. W.**, 1948 : An approach towards a national classification of climate (geographical review, xxxvIII,1 pp.55-94)
291. **THRE L.**, 1961 : Evaluation des besoins en eau d'irrigation – ETP – annales agro, 12, 1,
292. **TISHUN T et QI L.**, 1993 : L'agroforesterie dans la plaine de Chine du nord – in agroforesterie aujourd'hui - vol 5 n°2- avril-juin
293. **TOUPET C.**, 1973 : L'évolution du climat de la Mauritanie du Moyen-Âge jusqu'à nos jours - colloque de Nouakchott - pp. 56-63.
295. **TOUPET C et MICHEL P.**, 1979 : Sécheresse et aridité, l'exemple de la Mauritanie et du Sénégal- in Géo éco trop, 138 p
296. **TRAPIT J. P.**, 1993 : Une constante des bilans de l'eau – l'évaluation problématique de la demande introduite par le climat - cahiers géo-phys-Lille, n°8, pp. 20-32.
297. **TURC L.**, 1961 : Evaluation des besoins en eau d'irrigation- ETP- Annales agronomiques, n°12, pp. 13-55.
298. **USA-MDCI.**, 1990 : Le bassin du fleuve Sénégal : étude d'un plan directeur de santé pour le bassin du fleuve Sénégal, proposition technique, Dkr, OMVS, mars, 330 p
299. **USAID**, 1990 : Projet eaux souterraines- rapport final vol 2, june 90- International Science and Technology Institute (ISTT) - OMVS - USAID
300. **USAID**, 1990 : Eaux souterraines répertoire et rapport de synthèse hydrogéologique environ barrage de Manantali - rapport final vol III june.
301. **VACHAUD G. et DAUDET F. A.**, 1977 : La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique - annales agron.
302. **VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO M. et THONY J L.**, 1977 : Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé- application à deux types de sol au Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique – IRAT- IMG - 14 p.
303. **VANDERMOTTEN C.** (2004) : *Géopolitique de la vallée du Sénégal – les flots de la discorde*- Harmattan, 165 p

- 304. VAN EDEN F. J., 1970 :** Irrigation requirements of South African crops-farming in South Africa (Pretoria) vol 46, n°2 pp. 29-31.
- 305. VON MAYDELL H. J., 1983:** Arbres et arbustes du Sahel – leurs caractéristiques et leurs utilisations – GTZ – 531 p.
- 306. WANE H., TRAORE S et PICHE V., 1998 :** Migration et environnement au Sahel- Bamako, CORPOD, INSAH, CILSS, oct, plans, cartes
- 307. WANE Y., 1966 :** Les toucouleurs du Fouta Toro (Sénégal)- stratification sociale et structure familiale, Dkr, IFAN, CNRS, nov, 369 p, tab, cartes
- 308. ZANTE P., 1984 :** caractérisation et évolution des propriétés hydriques des sols alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal- Périmètre irrigué du fleuve- ORSTOM - mai, 80 p.
- 309. ZANTE P. et LOYER J. Y., 1984 :** Influence des cycles d'irrigation par submersion permanente sur le comportement hydrique d'un sol de la vallée du Sénégal - Bull. GFHN - 10 p.

ANNEXES

ANNEXE 1 :

HUMIDITE DES SOLS (%) ANNEE 1990-1991

Stat ions	Hz (cm)	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J
S1	0-20	6.73	2.85	4.25	3.99	2.34	2.80	2.91	2.75	3.97	8.10	2.28	2.15
	20-40	7.93	3.04	6.90	4.12	3.32	2.65	3.42	4.73	4.66	3.94	3.22	1.80
	40-60	7.14	2.73	7.99	5.99	3.35	3.05	3.29	5.53	4.99	2.09	4.42	1.03
S2	0-20	11.23	8.92	5.70	7.14	6.09	5.25	7.06	6.79	7.17	8.15	5.38	4.88
	20-40	15.06	17.12	10.24	9.33	6.57	4.99	7.13	10.20	8.66	12.52	6.63	7.07
	40-60	13.14	15.28	9.03	8.59	6.82	6.31	7.29	11.26	9.69	13.49	11.78	10.15
S3	0-20	8.32	4.61	6.62	6.65	4.48	5.18	6.59	5.40	6.92	5.72	3.43	2.82
	20-40		12.18	13.37	12.71	5.92	7.21	8.58	6.48	8.14	8.20	7.17	3.29
	40-60	17.39	11.33	13.54	14.16	6.51	9.03	9.89	7.38	7.36	9.07	6.10	3.80
S4	0-20	4.09	4.73	4.98	5.49	5.44	4.58	5.46	6.72	7.25	6.30	4.45	2.58
	20-40	5.90	6.17	7.09	5.60	5.49	4.93	6.12	11.05	9.55	9.55	6.22	5.99
	40-60	3.22	7.10	7.59	6.31	5.92	5.74	6.20	9.39	11.40	9.73	7.78	6.03
S5	0-20	9.76	5.33	6.11	4.69	3.87	3.87	5.79	6.91	6.17	10.19	4.23	4.95
	20-40	13.92	9.00	12.96	12.26	6.41	4.55	10.08	9.55	11.23	12.95	6.78	7.44
	40-60	15.90	15.22	18.73	17.43	12.25	9.12	13.53	15.31	17.52	16.16	12.17	11.28
S6	0-20	6.66	1.99	7.65	7.22	6.69	5.58	6.81	6.66	8.54	9.84	6.31	4.09
	20-40	9.61	2.94	12.71	12.44	10.00	7.99	9.29	10.87	15.04	12.77	11.27	9.93
	40-60	10.11	2.52	15.76	14.41	12.99	9.86	12.52	13.18	18.60	17.04	13.91	11.03

HUMIDITE DES SOLS ANNEE 1995

Station	Hz (cm)	Juillet	Août	Septembre
S1	0-20	2.48	3.19	3.02
	20-40	2.31	6.02	8.51
	40-60	3.29	5.05	9.94
S2	0-20	6.33	7.82	7.95
	20-40	5.48	9.63	10.32
	40-60	5.11	10.41	12.18
S3	0-20	5.63	7.31	7.55
	20-40	7.92	9.48	9.66
	40-60	9.37	11.10	11.96
S4	0-20	5.03	5.51	7.39
	20-40	5.40	7.97	8.66
	40-60	6.30	8.10	10.63
S5	0-20	4.25	6.96	7.64
	20-40	5.00	10.38	11.63
	40-60	10.02	12.40	12.96
S6	0-20	6.13	7.41	7.92
	20-40	8.78	10.14	11.86
	40-60	10.83	12.68	13.79

HUMIDITE DES SOLS ANNEE 1996

	HORIZON (cm)	Juillet	Août	Septembre
S1	0-20	11.02	11.11	10.74
	20-40	8.31	10.54	11.15
	40-60	6.21	8.03	9.31
S2	0-20	11.39	12.42	12.71
	20-40	12.13	13.69	13.27
	40-60	12.33	15.67	17.24
S3	0-20	10.28	11.69	11.99
	20-40	10.60	12.88	13.31
	40-60	12.11	14.01	16.16
S4	0-20	7.31	8.45	10.19
	20-40	8.46	11.17	12.92
	40-60	9.79	13.42	15.09
S5	0-20	10.27	12.52	12.61
	20-40	11.99	13.53	15.28
	40-60	12.48	15.19	17.48
S6	0-20	10.45	12.35	13.86
	20-40	12.09	14.66	16.18
	40-60	12.87	16.35	19.03

ANNEXE 2 :
autres considérations pour le calcul de
l'évapotranspiration de la culture de référence selon
les méthodes de la température, du rayonnement et les
méthodes combinées de :
Penman modifié (FAO) et Penman Monteith (FAO)
(source SAED)

1. Méthodes avec formules empiriques

a) Méthode de la température

Elle est utilisée si on ne dispose seulement que de données sur la température. Avec l'utilisation de la formule suivante, basée sur l'équation de Blaney-Criddle :

$$E_{to} = C [P(0,46T+8)]$$

- E_{to} = évapotranspiration de référence (mm/j)
 T = température moyenne journalière du mois (°C)
 P = pourcentage journalier moyen du total des heures annuelles de lumière diurnes
 C = facteur d'ajustement qui dépend des estimations de l'humidité relative minimum, des heures d'insolation et du vent diurne

b) Méthode du rayonnement

Elle est recommandée quand les données climatiques comprennent :

- la température de l'air
- l'insolation
- la couverture nuageuse du ciel et la radiation

L'équation utilisée est la suivante :

$$E_{to} = C \times W \times R_1$$

- E_{to} = évapotranspiration de la culture de référence mm/j
 R_1 = rayonnement solaire en évaporation équivalente mm/j
 W = facteur de pondération qui dépend de la température et de l'altitude
 C = facteur d'ajustement qui dépend des conditions d'humidité moyenne et du vent diurne

IV. Méthodes combinées ou mathématiques

a) L'équation de Penman modifiée

Elle est utilisée par la FAO depuis les années 1970 surestime les calculs d'Eto. Ce problème découle des caractéristiques suivantes liées à la formule :

1. la fonction du vent est une donnée standard pour toutes les zones
2. la valeur approximative du facteur de correction
3. les déviations importantes observées pour des valeurs du vent élevées.

L'équation modifiée de Penman se présente :

$$Eto = C [W.Rn + (1-W).f(u).(ea-ed)]$$

Eto = évapotranspiration de la culture de référence

W = coefficient de pondération de la température

Rn = rayonnement net en évaporation équivalente (mm /j)

ea = tension moyenne de vapeur de saturation de l'air (hPa)

ed = tension moyenne de vapeur réelle de l'air (hPa)

c = coefficient d'ajustement pour compenser l'effet des conditions météorologiques diurnes et nocturnes (facteur de correction)

f(u) = fonction du vent

Cette formule utilisée par IRSIS (version 4.01) (une formule parmi tant d'autres) a été abandonnée en faveur de la formule de Penman- Monteith qui a besoin certes d'être testée sous différentes conditions climatiques.

b) La formule de Penman- Monteith

Elle est très convaincante pour les experts de FAO. Elle est actuellement recommandée. L'équation de la formule de Penman- Monteith (utilisée par CROPWAT version 5.7 octobre 1991) est :

$$Eto = \frac{\delta}{\delta + \gamma} \times (Rn - G) \times \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma} \times \frac{900}{(T + 273)} \times U2 \times (ea - ed)$$

Eto = évapotranspiration de la culture de référence (mm/j)

Rn = rayonnement à la surface de la culture (mj/m², jour)

G = flux de chaleur du sol (mj/m², jour)

T = température (°C)

U2 = vitesse du vent mesurée à une hauteur de 2 m (m/sec)

(ea-ed) = déficit de pression de vapeur

ea = tension de vapeur de saturation moyenne de l'air (hPa)

ed = tension de vapeur réelle moyenne de l'air (hPa)

$\delta =$ pente de la courbe de tension de vapeur (hPa/°C)
 $\gamma =$ constante psychométrique (hPa/°C)
 $\lambda =$ chaleur latente de vaporisation (MJ/kg)

ANNEXE 3 :

Données climatiques complémentaires pour

l'utilisation des méthodes de calcul de l'ETP

- Paramètres climatiques :

différence entre température du thermomètre mouillé (T_M °C) et température thermomètre sec (T_S °C)- station de Fanaye :

Les valeurs sont exprimées en mb (ou hPa) à la station, puis on est passé du mb donc de la tension de vapeur à la température en °C, avec l'aide de tableau de e (tension de vapeur, annexe 4, page 343).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TS-TM 1987	8,7	9,6	8,2	8,7	6,4	5,3	4,3	3,5	3,6	4,7	3,4	5,8
TS-TM 1988	7,6	6,3	5,5	7,4	7,9	6,5	4,4	3,2	3,1	5,7	5,9	7,7

- Cumul des précipitations (en mm)

Evolution de la pluviométrie dans la région de Saint-Louis de 1972 à 2008
(voir pages 358 et 359)

ANNEXE 4

Tableaux pour effectuer les calculs de l'ETP

Table 1
Valeurs moyennes mensuelles de la radiation globale (IgA)
en calories par cm² /Jour

Lat	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0°	858	888	890	865,5	816	790	804	833	875	880	860	842
1	348,5	881,5	888,5	865,5	823	798,5	811,5	848	875	875	851	831,5
2	889	875	887	809	830	807	819	843	875	870	842	821
3	829	868,5	885,5	872,5	837	815,5	826,5	848	874,5	865	833	810,5
4	819	862	884	876	844	824	834	853	874	860	824	800
5	809	855,5	882,5	879	851	832,5	841,5	857,5	874	855	814,5	798,5
6	799	849	881	882	858	841	849	862	874	850	805	779
7	789	842	879	885	865	849	856,5	866,5	873,5	845	795,5	768
8	779	835	877	888	872	857	864	871	873	840	786	757
9	769	828	875	891	878,5	865	871,5	875,5	872,5	835	776,5	746
10	759	821	873	894	885	873	879	880	872	830	767	735
11	747,5	812,5	869,5	895	889,5	879,5	884,5	882,5	869,5	882,5	756	722,5
12	736	804	866	896	894	886	890	885	867	815	745	710
13	724,5	795	862	897	898,5	892	895	887,5	864	807,5	734	697,5
14	713	786	858	898	903	898	900	890	861	800	723	685
15	701,5	777	854	899	907,5	904	905	892	858	792,5	712	672,5
16	690	768	850	900	912	910	910	894	855	785	701	660
17	678	759	846	900,5	916,5	916	915	896	852	777,5	690	647,5
18	666	750	842	901	921	922	920	898	849	770	679	635
19	654	741	838	901,5	925,5	928	925	900	846	762,5	667,5	622,5
20	612	732	834	902	930	934	930	902	843	755	656	610
21	629	721	827	900	932	938	932,5	901	837,5	745,5	643,5	595,5
22	615	711	820	898	934	942	935	900	832	736	631	581
23	602	700	813	895	936	915	938	899	827	726	618	568
24	588	689	806	893	938	950	940	898	821	716	605	554
25	575	678	799	891	940	953	943	897	816	707	592	540
26	562	667	792	889	942	957	945	895	810	697	579	525

Table 2
Durée mensuelle du Jour H (en heures) - Latitude Nord.

Lat	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0°	375	342	375	363	375	363	375	375	363	375	363	375
1	373,5	341,5	375	363,5	376,5	364,5	376,5	376	363	374,5	362	373,5
2	372	341	375	364	378	366	378	377	363	374	361	372
3	370,5	340	375	365	379,5	357,5	379,5	379	363,5	373,5	360	370,5
4	369	339	375	366	321	369	321	379	364	373	359	369
5	367,5	338	371,5	366,5	382,5	371	382,5	380	364	372,5	358	367
6	366	337	374	367	384	373	384	381	364	372	357	365
7	364,5	336	374	368	385,5	375	385,5	382	364,5	371	355,5	366
8	363	335	374	369	387	377	387	383	365	370	354	361
9	361,5	334	374	369,5	388,5	379	389	384,5	365	369,5	352,5	359
10	360	333	374	370	390	381	391	386	365	369	351	357
11	358,5	332	374	370,5	391,5	382,5	392,5	387	365,5	368,5	349,5	355,5
12	357	331	374	371	393	384	394	388	366	368	348	354
13	355,5	330,5	374	372	394,5	386	396	389	366	367,5	346,5	352
14	354	330	374	373	396	388	398	390	366	367	345	350
15	352,5	329	373,5	373,5	397,5	390	40	391	366,5	366,5	343,5	348
16	351	328	373	374	399	392	402	392	367	366	342	346
17	345,5	327,5	373	375	400,5	394	404	393	367	365	340,5	344
18	348	327	373	376	402	396	406	394	367	364	339	342
19	346	326	373	377	404	398	408	395,5	367,5	363,5	337,5	340
20	344	325	373	378	406	400	410	397	368	363	335	338
21	324	373	378,5	408	402	411,5	398	368	363	362	334,5	336
22	340	323	373	380	410	404	414	400	369	361	333	334
23	338	321	373	381	412	407	416	401	369	361	331	332
24	336	320	373	382	414	409	418	402	369	360	330	330
25	334	319	373	383	416	411	420	404	370	359	328	328
26	332	318	372	383	417	413	421	405	370	358	326	325

Table 3
Valeur d'indice i en fonction de la température
moyenne mensuelle (°C)

T°C	. 0	. 1	. 2	. 3	. 4	. 5	. 6	. 7	. 8	. 9
0			.01	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07
1	. 09	.10	.12	.13	.15	.16	.18	.20	.21	.23
2	. 25	.27	.29	.31	.33	.35	.37	.39	.42	.44
3	. 46	.48	.51	.53	.56	.58	.61	.63	.66	.69
4	. 71	.74	.77	.80	.82	.85	.88	.91	.94	.97
5	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	1.25	1.29
6	1.32	1.35	1.39	1.42	1.45	1.49	1.52	1.56	1.59	1.63
7	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.85	1.89	1.92	1.96	2.00
8	2.04	2.08	2.12	2.15	2.19	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
9	2.44	2.48	2.52	2.56	2.60	2.64	2.69	2.73	2.77	2.81
10	2.86	2.90	2.94	2.99	3.03	3.08	3.12	3.16	3.31	3.25
11	3.30	3.34	3.39	3.44	3.48	3.53	3.58	3.62	3.67	3.72
12	3.76	3.81	3.86	3.91	3.96	4.00	4.05	4.10	4.15	4.20
13	4.25	4.30	4.35	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60	4.65	4.70
14	4.75	4.81	4.86	4.91	4.96	5.01	5.07	5.12	5.17	5.22
15	5.28	5.33	5.38	5.44	5.49	5.55	5.60	5.65	5.71	5.76
16	5.82	5.87	5.93	5.98	6.04	6.10	6.15	6.21	6.26	6.32
17	6.38	6.44	6.49	6.55	6.61	6.66	6.72	6.78	6.84	6.90
18	6.95	7.01	7.07	7.13	7.19	7.25	7.31	7.37	7.43	7.49
19	7.55	7.60	7.67	7.73	7.79	7.85	7.91	7.97	8.03	8.10
20	8.16	8.22	8.28	8.34	8.41	8.47	8.53	8.59	8.66	8.72
21	8.78	8.85	8.91	8.97	9.04	9.10	9.17	9.23	9.29	9.36
22	9.42	9.49	9.55	9.62	9.68	9.75	9.82	9.88	9.95	10.01
23	10.08	10.15	10.21	10.28	10.35	10.41	10.48	10.55	10.62	10.68
24	10.75	10.82	10.89	10.95	11.02	11.09	11.16	11.23	11.30	11.37
25	11.44	11.50	11.57	11.64	11.71	11.78	11.85	11.92	11.99	12.06
26	12.13	12.21	12.28	12.35	12.42	12.49	12.56	12.63	12.70	12.78
27	12.85	12.92	12.99	13.07	13.14	13.21	13.28	13.36	13.43	13.50
28	13.58	13.65	13.72	13.80	13.87	13.94	14.02	14.09	14.17	14.24
29	14.32	14.39	14.47	14.54	14.62	14.69	14.77	14.84	14.92	14.99
30	15.07	15.15	15.22	15.30	15.38	15.45	15.53	15.61	15.68	15.76
31	15.84	15.92	15.99	16.07	16.15	16.23	16.30	16.38	16.46	16.54
32	16.62	16.70	16.78	16.85	16.93	17.01	17.09	17.17	17.25	17.33
33	17.41	17.49	17.57	17.65	17.73	17.81	17.89	17.97	18.05	18.13
34	18.22	18.30	18.38	18.46	18.54	18.62	18.70	18.79	18.87	18.95
35	19.03	19.11	19.20	19.28	19.36	19.45	19.53	19.61	19.69	19.78
36	19.86	19.95	20.03	20.11	20.20	20.28	20.36	20.45	20.53	20.62
37	20.70	20.79	20.87	20.96	21.04	21.13	21.21	21.30	21.38	21.47
38	21.56	21.64	21.73	21.81	21.90	21.99	22.07	22.16	22.25	22.33
39	22.42	22.51	22.59	22.68	22.77	22.86	22.95	23.03	23.12	23.21
40	23.30									

Table 4
Coefficient de correction en fonction de la latitude (k)

Lat. N	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.05	.92	.76	.70
Lat. S												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.191	1.29	1.41

Table 5**Valeur de λ en fonction de θ (0 à 30°)**

0	λ	0	λ	0	λ	0	λ	0	λ	0	λ
0, 0 °C	1, 82	5, 0	2, 08	10, 0	2, 36	15, 0	2, 84	20, 0	3, 49	25, 0	4, 32
0, 5	1, 85	5, 5	2, 10	10, 5	2, 40	15, 5	2, 90	20, 5	3, 57	25, 5	4, 41
1, 0	1, 87	6, 0	2, 12	11, 0	2, 44	16, 0	2, 96	21, 0	3, 64	26, 0	4, 50
1, 5	1, 89	6, 5	2, 15	11, 5	2, 49	16, 5	3, 02	21, 5	3, 72	26, 5	4, 59
2, 0	1, 91	7, 0	2, 18	12, 0	5, 54	17, 0	3, 08	22, 0	3, 82	27, 0	4, 68
2, 5	1, 93	7, 5	2, 21	12, 5	2, 59	17, 5	3, 14	22, 5	3, 89	27, 5	4, 77
3, 0	1, 96	8, 0	2, 24	13, 0	2, 64	18, 0	3, 20	23, 0	3, 98	28, 0	4, 85
3, 5	1, 99	8, 5	2, 27	13, 5	2, 69	18, 5	3, 27	23, 0	4, 06	28, 5	4, 94
4, 0	2, 02	9, 0	2, 30	14, 0	2, 74	19, 0	3, 34	24, 0	4, 15	29, 0	5, 04
4, 5	2, 04	9, 5	2, 33	14, 5	2, 79	19, 5	3, 42	24, 5	4, 24	29, 5	5, 12

Table 6**Tension maxima de vapeur d'eau en mm/Hg
en fonction de la température**

T °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	9,165	9,227	9,288	9,350	9,412	9,474	9,537	9,601	9,665	9,738
11	9,792	9,857	9,923	9,989	10,050	10,101	10,17	10,255	10,322	10,329
12	10,457	10,526	10,596	10,665	10,734	10,804	10,875	10,947	11,019	11,090
13	11,162	11,235	11,309	11,383	11,456	11,530	11,605	11,681	11,757	11,832
14	11,908	11,986	12,064	12,142	12,220	12,298	12,378	12,458	12,538	12,619
15	12,699	12,781	12,864	12,947	13,029	13,112	13,197	13,281	13,366	13,451
16	13,536	13,623	13,710	13,797	13,885	13,972	14,062	14,151	14,241	14,331
17	14,421	14,513	14,605	14,697	14,790	14,882	14,977	15,072	15,167	15,262
18	15,357	15,454	15,552	15,650	15,747	15,845	15,945	16,045	16,145	16,246
19	16,346	16,449	16,552	16,655	16,758	16,861	16,967	17,073	17,179	17,285
20	17,391	17,500	17,608	17,717	17,826	17,935	18,047	18,159	18,271	18,285
21	18,995	18,610	18,724	18,839	18,954	19,069	19,187	19,305	19,423	19,541
22	19,659	19,780	19,901	20,022	20,143	20,265	20,389	20,514	20,639	20,763
23	20,888	21,016	21,144	21,272	21,400	21,528	21,659	21,790	21,921	22,053
24	22,184	22,319	22,453	22,588	22,723	22,858	22,996	23,135	23,273	23,411
25	23,550	23,692	23,834	23,976	24,119	24,261	24,406	24,552	24,697	24,842
26	24,988	25,138	25,288	25,438	25,588	25,738	25,891	26,045	26,198	26,351
27	26,505	26,663	26,820	26,978	27,136	27,294	27,455	27,617	27,778	27,939
28	28,101	28,267	28,433	28,599	28,765	28,931	29,101	29,271	29,441	29,612
29	29,789	29,956	30,131	30,305	30,479	30,654	30,833	31,011	31,190	31,369
30	31,548	31,729	31,911	32,094	32,278	32,463	32,650	32,837	33,026	33,215
31	33,406	33,596	33,787	33,980	34,174	34,368	34,564	34,761	34,959	35,159
32	35,3059	35,559	35,760	35,962	26,165	36,370	36,576	36,783	36,991	37,200
33	37,410	37,621	37,832	38,045	38,258	38,475	38,689	38,906	39,124	39,344
34	39,565	39,786	40,007	40,230	40,445	40,680	40,907	41,135	41,364	41,595
35	41,827	42,059	42,296	42,527	42,763	43,000	43,238	43,477	43,717	43,959
36	44,202	44,445	44,690	44,936	45,183	45,431	45,681	45,932	46,184	46,437
37	46,691	46,947	47,203	47,462	47,721	47,961	48,243	48,506	48,770	49,035
38	49,302	49,570	49,839	50,110	50,382	50,655	50,929	51,205	51,481	51,759
39	52,039	52,320	52,602	52,885	53,170	53,456	53,743	54,032	54,322	54,613
40	55,006	55,200	55,496	55,793	56,091	56,391	56,692	56,994	57,298	57,683

Table 7
LØS = L / L0

Latitude	10° S	15° S	20° S	25° S
Janvier	0,97	0,94	0,91	0,87
Février	0,95	0,95	0,93	0,91
Mars	0,96	0,94	0,93	0,92
Avril	1,00	1,01	1,01	1,00
Mai	1,07	1,10	1,12	1,16
Juin	1,12	1,17	1,21	1,28
Juillet	1,09	1,11	1,15	1,20
Août	1,02	1,04	1,06	1,09
Septembre	0,97	0,96	0,96	0,96
Octobre	0,95	0,93	0,89	0,89
Novembre	0,95	0,94	0,87	0,87
Décembre	0,97	0,94	0,87	0,87

Table 8
WØS = Lo / L2

Latitude	10° S	15° S	20° S	25° S
Janvier	0,70	0,74	0,76	0,79
Février	0,72	0,72	0,73	0,72
Mars	0,74	0,73	0,72	0,70
Avril	0,66	0,64	0,62	0,60
Mai	0,58	0,54	0,50	0,45
Juin	0,53	0,47	0,43	0,37
Juillet	0,56	0,52	0,47	0,42
Août	0,64	0,60	0,56	0,50
Septembre	0,71	0,70	0,67	0,64
Octobre	0,74	0,75	0,75	0,75
Novembre	0,73	0,74	0,77	0,79
Décembre	0,70	0,74	0,76	0,79

Table 9
Valeur de Δ ou ψ en mm Hg / °C

T° de l'air en °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	1,64	1,64	1,64	1,65	1,65
11	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69	0,69
12	0,69	0,7	0,7	0,7	0,71	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73
13	0,73	0,74	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77
14	0,78	0,78	0,79	0,79	0,8	0,8	0,81	0,81	0,81	0,82
15	0,82	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,86
16	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89	0,9	0,9	0,9	0,91	0,92
17	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97
18	0,97	1,98	1,99	1,98	1	1	1,01	1,01	1,02	1,02
19	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08
20	1,09	1,09	1,1	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14
21	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,2	1,2
22	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27
23	1,28	1,28	1,29	1,3	1,3	1,31	1,32	1,33	1,33	1,34
24	1,34	1,35	1,36	1,37	1,37	1,38	1,39	1,4	1,4	1,41
25	1,42	1,42	1,43	1,44	1,45	1,45	1,46	1,47	1,48	1,48
26	1,49	1,5	1,51	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,55	1,55
27	1,57	1,58	1,59	1,59	1,6	1,61	1,62	1,63	1,64	1,64
28	1,65	1,66	1,67	1,68	1,69	1,69	1,7	1,71	1,72	1,73
29	1,75	1,75	1,76	1,76	1,77	1,78	1,79	1,8	1,81	1,82
30	1,83	1,84	1,85	1,86	1,86	1,87	1,88	1,89	1,9	1,91
31	1,92	1,93	1,94	1,95	1,96	1,97	1,98	1,99	2	2,01
32	2,02	2,03	2,04	2,05	2,06	2,07	2,08	2,09	2,1	2,11
33	2,12	2,13	2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,2	2,21
34	2,22	2,23	2,24	2,25	2,27	2,28	2,29	2,3	2,31	2,32
35	2,33	2,35	2,36	2,37	2,38	2,39	2,4	2,41	2,43	2,44

Table 10
Valeur de σT^4 pour les températures de 1 à 30 Degrés C
(cal / cm² / jour)

T	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
1	667	668	669	670	671	672	673	673	674	675
2	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685
3	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695
4	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705
5	706	707	708	709	710	712	713	714	715	716
6	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726
7	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736
8	737	738	739	741	742	743	744	745	746	747
9	748	749	750	751	752	753	754	755	756	758
10	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768
11	769	770	772	773	774	775	776	777	778	779
12	780	781	782	784	785	786	787	788	789	790
13	791	792	793	795	796	797	798	799	800	801
14	802	803	805	806	807	808	809	810	811	812
15	814	815	816	817	818	819	820	822	823	824
16	825	826	827	828	830	831	832	833	834	835
17	836	838	839	840	841	842	843	845	846	847
18	848	849	850	852	853	854	855	856	857	859
19	860	861	862	863	864	866	867	868	869	870
20	872	873	874	875	876	878	879	880	881	882
21	884	885	886	887	888	890	891	892	893	894
22	896	897	898	899	900	902	903	904	905	907
23	908	909	910	911	913	914	915	916	918	919
24	920	921	923	924	925	926	928	929	930	931
25	933	934	935	936	938	939	940	941	943	944
26	945	946	948	949	950	951	953	954	955	957
27	958	959	960	962	963	964	966	967	968	969
28	971	972	973	975	976	977	978	980	981	982
29	984	985	986	988	989	990	991	993	994	995
30	997	998	999	1001	1002	1003	1005	1006	1007	1009

Table 11 (voir fin des tables en annexe 4)

Table 12
Calcul de
 $\frac{\Delta/\gamma}{1/\gamma} \times \frac{1}{59}$

T°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
1	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
2	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
3	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
4	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
5	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
6	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
7	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
8	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
9	0.009	0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
10	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
11	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
12	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
13	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011
14	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
15	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
16	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
17	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
18	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
19	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
20	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
21	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
22	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
23	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
24	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
25	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
26	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
27	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
28	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
29	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
30	0.013	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
31	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
32	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
33	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
34	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
35	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
36	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
37	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
38	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015	0.015
39	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
40	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

Table 13
Calcul de $0,26 / (1 + \Delta/\gamma)$

T°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	0.154	0.154	0.154	0.153	0.153	0.152	0.152	0.152	0.151	0.151
1	0.150	0.150	0.150	0.149	0.149	0.148	0.148	0.148	0.147	0.147
2	0.146	0.146	0.146	0.145	0.145	0.144	0.144	0.144	0.143	0.143
3	0.142	0.142	0.142	0.141	0.141	0.140	0.140	0.140	0.139	0.139
4	0.138	0.138	0.138	0.137	0.137	0.136	0.136	0.136	0.135	0.135
5	0.134	0.134	0.134	0.133	0.133	0.132	0.132	0.132	0.131	0.131
6	0.130	0.130	0.130	0.129	0.129	0.129	0.128	0.128	0.127	0.127
7	0.126	0.126	0.126	0.125	0.125	0.125	0.124	0.124	0.123	0.123
8	0.122	0.122	0.122	0.121	0.121	0.121	0.120	0.120	0.119	0.119
9	0.119	0.118	0.118	0.118	0.117	0.117	0.116	0.116	0.115	0.115
10	0.115	0.114	0.114	0.114	0.113	0.113	0.113	0.112	0.112	0.112
11	0.111	0.111	0.110	0.110	0.109	0.109	0.109	0.108	0.108	0.108
12	0.107	0.107	0.107	0.106	0.106	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104
13	0.104	0.103	0.103	0.103	0.102	0.102	0.102	0.101	0.101	0.100
14	0.100	0.100	0.100	0.099	0.099	0.099	0.098	0.098	0.098	0.098
15	0.097	0.096	0.096	0.096	0.095	0.095	0.095	0.094	0.094	0.094
16	0.093	0.093	0.093	0.092	0.092	0.092	0.091	0.091	0.091	0.090
17	0.090	0.090	0.089	0.089	0.089	0.088	0.088	0.088	0.087	0.087
18	0.087	0.086	0.086	0.086	0.086	0.085	0.085	0.085	0.084	0.084
19	0.084	0.083	0.083	0.083	0.082	0.082	0.082	0.081	0.081	0.081
20	0.081	0.080	0.080	0.080	0.079	0.079	0.079	0.079	0.078	0.078
21	0.077	0.077	0.077	0.077	0.076	0.076	0.076	0.076	0.075	0.075
22	0.075	0.074	0.074	0.074	0.074	0.073	0.073	0.073	0.073	0.072
23	0.072	0.072	0.071	0.071	0.071	0.070	0.070	0.070	0.070	0.069
24	0.069	0.069	0.069	0.068	0.068	0.068	0.068	0.067	0.067	0.067
25	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.065	0.065	0.065	0.064	0.064
26	0.064	0.064	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.062	0.062	0.062
27	0.062	0.061	0.061	0.061	0.061	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
28	0.059	0.059	0.059	0.059	0.058	0.058	0.058	0.058	0.057	0.057
29	0.057	0.057	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.055	0.055	0.055
30	0.055	0.055	0.054	0.054	0.054	0.054	0.054	0.053	0.053	0.053
31	0.053	0.053	0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.051	0.051	0.051
32	0.051	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.049	0.049	0.049	0.049
33	0.049	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047
34	0.047	0.047	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.045	0.045
35	0.045	0.045	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.043	0.043
36	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
37	0.042	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.040	0.040	0.040
38	0.040	0.040	0.040	0.040	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.038
39	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.037	0.037	0.037	0.037
40	0.037	0.037	0.037	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036

Table 14
Table des tensions maximales de la vapeur d'eau

Température en °C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	6.1070	6.1515	6.1963	6.2414	6.2868	6.3324	6.3784	6.4247	6.4712	6.5181
1	6.5653	6.6127	6.6605	6.7086	6.7570	6.8047	6.8547	6.9040	6.9516	7.0035
2	7.0538	7.1044	7.1553	7.2065	7.2581	7.4099	7.3621	7.4147	7.4675	7.5207
3	7.5743	7.6281	7.6823	7.7369	7.7918	7.8470	7.9026	7.9585	8.0148	8.0714
4	8.1284	8.1852	8.2436	8.3015	8.3599	8.4187	8.4778	8.5374	8.5972	8.6575
5	8.7181	8.7791	8.8405	8.9023	8.9644	9.0269	9.0898	9.1531	9.2168	9.2808
6	9.3453	9.4102	9.4754	9.5411	9.6071	9.6746	9.7405	9.8077	9.8754	9.9433
7	10.012	10.081	10.150	10.220	10.290	10.361	10.432	10.503	10.574	10.648
8	10.720	10.794	10.867	10.941	11.016	11.091	11.166	11.242	11.319	11.313
9	11.473	11.550	11.622	11.707	11.786	11.866	11.946	12.026	12.107	12.189
10	12.271	12.353	12.436	12.520	12.604	12.688	12.771	12.858	12.944	13.031
11	13.118	12.205	13.293	13.382	13.471	13.560	13.650	13.741	13.832	13.923
12	14.016	14.108	14.202	14.295	14.390	14.483	14.580	14.676	14.772	14.870
13	14.967	15.065	15.164	15.263	15.363	15.464	15.565	15.662	15.769	15.872
14	15.974	16.079	16.184	16.289	16.396	16.401	16.408	16.716	16.824	16.933
15	17.042	17.152	17.263	17.374	17.486	17.699	17.712	17.826	17.940	18.055
16	18.171	18.288	18.405	18.522	18.641	18.760	18.880	19.000	19.121	19.243
17	19.365	19.488	19.612	19.767	19.862	19.988	20.114	20.242	20.370	20.498
18	20.628	20.752	20.889	21.020	21.153	21.286	21.419	21.554	21.689	21.823
19	21.962	22.099	22.238	22.376	22.516	22.657	22.798	22.940	23.083	23.220
20	23.371	23.516	23.662	23.809	23.956	24.104	24.254	24.404	24.554	24.706
21	24.858	25.011	25.165	25.320	25.476	25.633	25.790	25.948	26.107	26.267
22	26.428	26.590	26.752	26.915	27.080	27.245	27.411	27.577	27.740	27.914
23	28.083	28.254	28.425	28.597	28.771	28.945	29.120	29.296	29.472	29.650
24	29.829	30.009	30.189	30.371	30.553	30.717	30.921	31.106	31.293	31.780
25	31.668	31.858	32.048	32.239	32.431	32.624	32.819	33.014	33.210	33.407
26	33.606	33.805	34.005	34.207	44.409	34.613	34.817	54.023	35.229	35.137
27	33.646	35.856	36.067	36.279	36.492	36.706	36.921	37.137	37.344	37.573
28	37.703	38.014	38.236	38.459	38.683	39.908	39.134	39.392	39.591	39.821
29	40.052	40.284	40.517	40.752	40.988	41.226	41.163	41.702	41.943	42.184
30	42.427	42.671	43.917	43.163	43.411	43.660	43.910	44.362	44.413	44.669
31	44.924	45.181	45.439	45.698	45.958	46.220	46.483	46.747	47.013	47.280
32	47.548	47.817	48.088	48.360	48.684	48.909	49.185	49.463	49.740	50.022
33	50.303	50.587	50.871	51.157	51.444	51.732	52.022	52.314	52.607	52.901
34	53.197	53.494	53.792	54.092	54.394	54.697	55.001	55.307	55.614	55.923
35	56.233	56.545	56.858	57.173	57.489	57.807	58.126	58.447	58.769	59.093
36	59.418	59.745	60.074	60.404	60.735	61.062	61.404	61.740	62.678	62.417
37	62.759	63.101	63.446	63.792	64.140	64.489	64.840	65.193	65.547	65.903
38	66.260	66.620	66.981	67.343	67.708	68.074	68.441	68.811	69.182	69.555
39	69.930	70.306	70.684	71.064	71.446	73.829	72.214	72.601	72.992	73.381
40	73.773	74.168	74.564	74.961	75.361	75.763	76.166	76.571	76.978	77.387
41	77.798	78.211	78.625	79.042	79.460	79.880	80.303	80.727	81.153	81.581
42	82.011	82.443	82.876	83.312	83.750	84.190	84.632	85.075	85.421	85.969
43	86.419	86.870	87.324	87.780	88.238	88.698	89.160	89.624	90.91	90.555
44	91.029	91.502	91.976	92.453	92.932	93.413	91.896	94.381	94.869	95.358
45	95.850	96.344	96.840	97.389	97.839	98.342	98.847	99.354	99.863	100.38
46	100.89	101.41	101.92	102.44	102.97	103.49	104.02	104.53	105.08	105.62
47	106.15	106.69	107.24	107.78	108.33	108.87	109.43	109.98	110.53	111.09
48	111.65	112.22	112.78	113.35	113.92	114.49	115.07	115.65	116.23	116.81
49	117.40	117.98	118.57	119.17	119.76	120.36	120.96	121.56	122.17	122.78
50	123.39	124.00	124.62	125.24	125.86	126.48	127.11	127.74	128.37	129.01

extrait des tables météorologiques internationales de l'OMM

Table 15
Valeur de 0,93 RA en mm d'eau par mois

T° de l'air en °C	J	V	M	A	M	J	J	A	S	O	N	O
10	444	495	429	391	350	327	337	370	403	439	447	442
12°,5 S	450	473	426	380	338	313	322	360	398	439	452	451
15°,0	457	452	424	370	327	299	307	350	393	439	457	462
17°,5	464	452	416	361	313	284	293	341	388	439	462	469
20°,0	472	452	409	353	299	269	279	332	383	439	467	477
22°,5	477	450	402	342	284	255	265	318	376	444	469	482
25°,0	482	449	336	332	269	241	251	304	370	449	470	487

Table 16
Valeur de $(1 + \gamma / \Delta)^{-1} \times 100$ de 0 à 35 ° C

Dizaine	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30			0°	0,56	1,11	1,67	2,22	2,78	3,33	3,89
40	4,44	5,00	5,56	6,11	6,67	7,22	7,78	8,33	8,29	9,44
60	15,56	16,11	16,67	17,22	17,78	18,33	18,89	19,44	20,00	20,56
70	21,11	21,67	22,22	22,78	23,33	23,89	24,44	25,00	25,56	26,11
80	26,67	27,22	27,78	28,33	28,89	29,44	30,00	30,56	31,11	31,67
90	32,22	32,78	33,33	33,89	34,40	35	-	-	-	-

Ex : Pour une température de 17,78° C $(1 + \gamma/\Delta)^{-1}$ est égal à 0.64

Table 17 N
Moyenne journalière au cours des différents mois de la durée d'insolation
astronomiquement (N) possible
exprimée en heure et dixièmes

Latitudes Nord	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Latitudes Sud	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	10.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Table 18
Valeur de σT^4 mm/j

T° de l'air en °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
5	11,87	11,89	11,91	11,92	11,94	11,96	11,97	11,99	12,01	12,03
6	12,04	12,06	12,08	12,10	12,11	12,13	12,15	12,16	12,18	12,20
7	12,23	12,23	12,25	12,27	12,29	12,30	12,32	12,34	12,34	12,37
8	12,39	12,41	12,43	12,45	12,46	12,48	15,50	12,52	12,53	12,55
9	12,57	12,59	12,61	12,62	12,64	12,66	12,68	12,69	12,71	12,73
10	12,75	12,77	12,78	12,80	12,82	12,84	12,86	12,88	12,89	12,91
11	12,93	12,95	12,97	12,98	13,00	13,02	13,04	13,06	13,08	13,09
12	13,11	13,13	13,15	13,17	13,19	13,21	13,22	13,24	13,26	13,28
13	13,30	13,32	13,34	13,35	13,37	13,39	13,41	13,43	13,45	13,47
14	13,48	13,50	13,52	13,54	13,56	13,58	13,60	13,62	13,64	13,66
15	13,67	13,69	13,71	13,73	13,75	13,77	13,79	13,81	13,83	13,85
16	13,86	13,88	13,90	13,92	13,94	13,96	13,98	14,00	14,02	14,04
17	14,06	14,08	14,10	14,12	14,13	14,15	14,17	14,19	14,21	14,23
18	14,25	14,27	14,29	14,31	14,33	14,35	14,37	14,39	14,41	14,43
19	14,45	14,47	14,49	14,51	14,53	14,55	14,57	14,59	14,61	14,63
20	14,65	14,67	14,69	14,71	14,73	14,75	14,77	14,79	14,81	14,83
21	14,85	14,87	14,89	14,91	14,93	14,95	14,97	14,99	15,01	15,03
22	15,05	15,07	15,09	15,11	15,13	15,15	15,17	15,20	15,22	15,24
23	15,26	15,28	15,30	15,32	15,34	15,36	15,38	15,40	15,42	15,44
24	15,46	15,48	15,51	15,53	15,55	15,57	15,59	15,61	15,63	15,65
25	15,67	15,69	15,72	15,74	15,76	15,78	15,80	15,82	15,84	15,86
26	15,88	15,91	15,93	15,95	15,97	15,99	16,01	16,03	16,06	16,08
27	16,10	16,12	16,14	16,16	16,18	16,21	16,23	16,25	16,27	16,29
28	16,31	16,34	16,36	16,38	16,40	16,72	16,44	16,47	16,49	16,51
29	16,53	16,55	16,58	16,60	16,62	16,64	16,66	16,69	16,71	16,73
30	16,75	16,77	16,80	16,82	16,84	16,86	16,88	16,91	16,93	16,95
31	16,97	17,00	17,02	17,04	17,06	17,09	17,11	17,13	17,15	17,17
32	17,20	17,22	17,24	17,27	17,29	17,31	17,33	17,36	17,38	17,40
33	17,42	17,45	17,47	17,49	17,52	17,54	17,56	17,58	17,61	17,63
34	17,65	17,68	17,70	17,72	17,75	17,77	17,79	17,81	17,84	17,86
35	17,88	17,91	17,93	17,95	17,98	18,00	18,02	18,05	18,07	18,10

Table 19
Valeur de $0,56 - 0,92\sqrt{e_d}$
suivant la température du point de rosée

T °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,363	0,362	0,361	0,360	0,360	0,359	0,359	0,358	0,357	0,356
1	0,355	0,355	0,354	0,353	0,353	0,352	0,351	0,350	0,350	0,349
2	0,348	0,374	0,347	0,346	0,345	0,344	0,344	0,343	0,332	0,334
3	0,341	0,340	0,339	0,338	0,338	0,337	0,336	0,335	0,334	0,333
4	0,333	0,332	0,331	0,330	0,330	0,329	0,328	0,327	0,327	0,326
5	0,325	0,324	0,323	0,322	0,322	0,321	0,320	0,319	0,318	0,317
6	0,317	0,316	0,315	0,314	0,313	0,312	0,312	0,311	0,310	0,309
7	0,308	0,307	0,307	0,306	0,305	0,304	0,303	0,302	0,301	0,300
8	0,300	0,299	0,298	0,297	0,296	0,295	0,294	0,293	0,292	0,292
9	0,291	0,290	0,289	0,288	0,287	0,286	0,285	0,284	0,283	0,282
10	0,282	0,281	0,280	0,279	0,278	0,277	0,276	0,275	0,274	0,273
11	0,272	0,271	0,270	0,269	0,268	0,267	0,266	0,265	0,265	0,263
12	0,263	0,262	0,261	0,260	0,259	0,258	0,257	0,255	0,255	0,254
13	0,253	0,252	0,251	0,250	0,249	0,248	0,247	0,246	0,245	0,244
14	0,243	0,242	0,240	0,239	0,238	0,237	0,236	0,235	0,234	0,233
15	0,232	0,231	0,230	0,229	0,228	0,227	0,226	0,225	0,224	0,223
16	0,222	0,221	0,220	0,219	0,217	0,216	0,215	0,214	0,213	0,212
17	0,211	0,210	0,208	0,207	0,206	0,205	0,204	0,203	0,202	0,201
18	0,200	0,198	0,197	0,196	0,195	0,194	0,193	0,192	0,190	0,189
19	0,188	0,187	0,186	0,185	0,183	0,182	0,181	0,180	0,179	0,178
20	0,176	0,175	0,174	0,173	0,172	0,170	0,169	0,168	0,167	0,166
21	0,164	0,163	0,162	0,161	0,160	0,158	0,157	0,165	0,155	0,153
22	0,152	0,151	0,150	0,148	0,147	0,146	0,145	0,143	0,142	0,141
23	0,140	0,138	0,137	0,136	0,134	0,133	0,132	0,131	0,129	0,128
24	0,127	0,126	0,124	0,123	0,122	0,120	0,119	0,118	0,116	0,115
25	0,114	0,112	0,111	0,110	0,108	0,107	0,106	0,104	0,103	0,101

Calcul de la température du point de rosée connaissant la température et l'humidité relative.

$$e_d = \text{humidité de l'air en \%} \times e_a$$

e_a est donné par la table : c'est la tension maxima de vapeur d'eau en fonction de la température. On peut donc calculer e_d .

On utilise la même table en sens inverse : connaissant e_d , on déterminera la température correspondante qui est la température du point de rosée.

Table
Valeur de 0,20 + 0,48 x (n / N)

n/N	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
0,1	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29
0,2	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34
0,3	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39
0,4	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
0,5	0,44	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,48
0,6	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53	0,53
0,7	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58
0,8	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63
0,9	0,63	0,64	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67

Table
Valeur de 0, 10 + 0, 90 (n / N)

n / N	0, 00	0, 1	0, 02	0, 3	0, 04	0, 05	0, 06	0, 07	0, 08	0, 09
0, 0	0, 10	0, 11	0, 12	0, 13	0, 14	0, 15	0, 15	0, 16	0, 17	0, 18
0, 1	0, 19	0, 20	0, 21	0, 22	0, 23	0, 24	0, 24	0, 25	0, 26	0, 27
0, 2	0, 28	0, 29	0, 30	0, 31	0, 32	0, 33	0, 33	0, 34	0, 35	0, 36
0, 3	0, 37	0, 38	0, 39	0, 40	0, 41	0, 42	0, 42	0, 43	0, 44	0, 45
0, 4	0, 46	0, 47	0, 48	0, 49	0, 50	0, 51	0, 51	0, 52	0, 53	0, 54
0, 5	0, 55	0, 56	0, 57	0, 58	0, 59	0, 60	0, 60	0, 61	0, 62	0, 63
0, 6	0, 64	0, 65	0, 66	0, 67	0, 68	0, 69	0, 70	0, 70	0, 71	0, 72
0, 7	0, 73	0, 74	0, 75	0, 76	0, 77	0, 78	0, 78	0, 79	0, 80	0, 81
0, 8	0, 82	0, 83	0, 84	0, 85	0, 86	0, 87	0, 87	0, 88	0, 89	0, 90
0, 9	0, 91	0, 92	0, 93	0, 94	0, 95	0, 96	0, 96	0, 97	0, 98	0, 99

Table 11
Calcul de 0,56 – 0,08 √e

(Voir page suivante)

e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e	e mb.	0,56 – 0,08 √e
3.0	0.42	7.0	0.35	11.0	0.29	15.0	0.25	19.0		23.0	0.18	27.0	0.14
.1	0.42	.1	0.35	.1	0.29	.1	0.25	.1	0.21	.1	0.18	.1	0.14
.2	0.42	.2	0.35	.2	0.29	.2	0.25	.2	0.21	.2	0.17	.2	0.14
.3	0.41	.3	0.34	.3	0.29	.3	0.25	.3	0.21	.3	0.17	.3	0.14
.4	0.41	.4	0.34	.4	0.29	.4	0.25	.4	0.21	.4	0.17	.4	0.14
.5	0.41	.5	0.34	.5	0.29	.5	0.24	.5	0.21	.5	0.17	.5	0.14
.6	0.41	.6	0.34	.6	0.29	.6	0.24	.6	0.21	.6	0.17	.6	0.14
.7	0.41	.7	0.34	.7	0.29	.7	0.24	.7	0.20	.7	0.17	.7	0.14
.8	0.40	.8	0.34	.8	0.29	.8	0.24	.8	0.20	.8	0.17	.8	0.14
.9	0.40	.9	0.34	.9	0.28	.9	0.24	.9	0.20	.9	0.17	.9	0.14
4.0	0.40	8.0	0.33	12.0	0.28	16.0	0.24	20.0	0.20	24.0	0.17	28.0	0.14
.1	0.40	.1	0.33	.1	0.28	.1	0.24	.1	0.20	.1	0.17	.1	0.14
.2	0.40	.2	0.33	.2	0.28	.2	0.24	.2	0.20	.2	0.17	.2	0.14
.3	0.39	.3	0.33	.3	0.28	.3	0.24	.3	0.20	.3	0.17	.3	0.13
.4	0.39	.4	0.33	.4	0.28	.4	0.24	.4	0.20	.4	0.16	.4	0.13
.5	0.39	.5	0.33	.5	0.28	.5	0.24	.5	0.20	.5	0.16	.5	0.13
.6	0.39	.6	0.33	.6	0.28	.6	0.23	.6	0.20	.6	0.16	.6	0.13
.7	0.39	.7	0.32	.7	0.28	.7	0.23	.7	0.20	.7	0.16	.7	0.13
.8	0.38	.8	0.32	.8	0.27	.8	0.23	.8	0.20	.8	0.16	.8	0.13
.9	0.38	.9	0.32	.9	0.27	.9	0.23	.9	0.19	.9	0.16	.9	0.13
5.0	0.38	9.0	0.32	13.0	0.27	17.0	0.23	21.0	0.19	25.0	0.16	29.0	0.13
.1	0.38	.1	0.32	.1	0.27	.1	0.23	.1	0.19	.1	0.16	.1	0.13
.2	0.38	.2	0.32	.2	0.27	.2	0.23	.2	0.19	.2	0.16	.2	0.13
.3	0.37	.3	0.32	.3	0.27	.3	0.23	.3	0.19	.3	0.16	.3	0.13
.4	0.37	.4	0.32	.4	0.27	.4	0.23	.4	0.19	.4	0.16	.4	0.13
.5	0.37	.5	0.31	.5	0.27	.5	0.23	.5	0.19	.5	0.16	.5	0.13
.6	0.37	.6	0.31	.6	0.26	.6	0.22	.6	0.19	.6	0.16	.6	0.12
.7	0.37	.7	0.31	.7	0.26	.7	0.22	.7	0.19	.7	0.15	.7	0.12
.8	0.37	.8	0.31	.8	0.26	.8	0.22	.8	0.19	.8	0.15	.8	0.12
.9	0.36	.9	0.31	.9	0.26	.9	0.22	.9	0.19	.9	0.15	.9	0.12
6.0	0.36	10.0	0.31	14.0	0.26	18.0	0.22	22.0	0.18	26.0	0.15	30.0	0.12
.1	0.36	.1	0.31	.1	0.26	.1	0.22	.1	0.18	.1	0.15	.1	0.12
.2	0.36	.2	0.30	.2	0.26	.2	0.22	.2	0.18	.2	0.15	.2	0.12
.3	0.36	.3	0.30	.3	0.26	.3	0.22	.3	0.18	.3	0.15	.3	0.12
.4	0.36	.4	0.30	.4	0.26	.4	0.22	.4	0.18	.4	0.15	.4	0.12
.5	0.36	.5	0.30	.5	0.26	.5	0.22	.5	0.18	.5	0.15	.5	0.12
.6	0.35	.6	0.30	.6	0.25	.6	0.22	.6	0.18	.6	0.15	.6	0.12
.7	0.35	.7	0.30	.7	0.26	.7	0.21	.7	0.18	.7	0.15	.7	0.12
.8	0.35	.8	0.30	.8	0.27	.8	0.21	.8	0.18	.8	0.15	.8	0.12
.9	0.35	.9	0.30	.9	0.28	.9	0.21	.9	0.18	.9	0.14	.9	0.12

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE DANS LA REGION DE SAINT-LOUIS DE 1972 à 2008

Postes pluviométriques	1972/73	1973/74	1974/75	1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	1980/81	1981/82
	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Dagana	124,4	221,4	288,1	262,1	257,1	143,3	306,2	157,8	259,7
Richard-Toll	124,4	174,1	186,2	310,2	421,1	118	250,5	200	246,5
Diaglé	76,9	231,5	204,8	247	207,5	79,6	159,7		319,1
Ross-Béthio	163,2	149	276,7	329,6	209,9	313,5	266,9	146,8	332,2
Rao	72,4	229,6	374,9	247,1	158,4	126,4	249,6	271	483,1
Saint-Louis	121,9	181	183,2	40,99	189,2	91,8	220,9	288,3	328,3
Podor	74	150,7	147,7	225,1	233,4	119,7	278,5	362	135,4
Fanaye	35,5	193,6	250,2	204,9	247,7	76,1	390,7		153,8
Ndioum	54,5	225,2	224,5	243,5	264,2	65,7	175,1	314	139,9
Aéré-Lao	72,3	198	237,2	218,4	345,3	120,6	225,7	316,2	156
Galoya			298,8	304,8	345,8	116,2	130,8		
Postes pluviométriques	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91
	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Dagana	142	68,4	65,6	202,7	138,3	153,3	251,8	271,5	172,8
Richard-Toll	145,7	13,6	118,8	135,7	198,5	228,1	223,6	217,9	139,1
Mbane	189,1	54,7	75,9	144,6	366,2	173,7	205,1	314,3	250,3
Ross-Béthio	79,7	49,2	137,8	196,5	323,3	192,1	224,2	232,3	202,4
Rao	187,2	22	43,6	153,4	160,7	374,5	349,4	359,5	267,7
Saint-Louis	176,6	79,4	96,2	223,3	131,7	346,4	293,1	243,5	188,3
Podor	165,7	72,2	63,3	140,4	243,3	200,1	306,8	334,6	140,4
Fanaye	93	18,6	26,7	119,7	239,2	238,6	290	300,6	108
Ndioum	109,7	50,5	28,8	145,5	273,9	139,6	237,9	349,1	158,7
Aéré-Lao	140,3	6,9	42,2	135,2	372,9	235,9	363,2	373,3	211,3
Galoya		32,9	65,7	306,6	213,7	309,3	315,3	374,8	232,5

Postes pluviométriques	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00
	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Dagana	104,5	130,2	269,2	256,3	180,8	343,5	219,1	404,7	254
Richard-Toll	216	142	317,8	236,8	187,5	262,8	194	220,9	242
Mbane	239,1	73,9	125,2	328,4	321,8	128,3	174,7	270,9	230,1
Ross-Béthio	93,1	99,1	226,2	301,2	317	129,3	202,4	257,3	297,5
Rao	286,4	66,5	190,4	324,2	333,7	151,1	219,6	244	524,3
Saint-Louis	173,5	51,8	231,4	277,6	265	99,7	229,3	271,4	366,3
Podor	136,2	158	283,3	142,5	267,6	160,1	192,3	255,6	221,,5
Fanaye	61,9	196	160,4	271,1	217	240,2	130,1	301	210,5
Ndioum	92,4	47,6	171,5	110	258,5	297,9	144,4	264,9	219,5
Aéré-Lao	69,3	75,8	262,2	189,6	324,5	212,3	239,5	360,8	291,5
Galoya	86,1	119,2	301	273,1	285,9	308,4	269,7	196,4	Dm
Postes pluviométriques	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09
	H	H	H	H	H	H	H	H	H
Dagana	Dm	307,1	170,1	275	118	268,9	249,4	208	298
Richard-Toll	358,5	317,8	162,8	260,7	220,5	372	333,4	196,3	243
Mbane	386,9	349,5	236,6	308,2	207,3	440,9	235,5	242	368,4
Ross-Béthio	Dm	336,1	226,1	263	184,5	199,8	213	216,8	250,5
Rao	418,5	Dm	190,5	216	158,5	222,8	162,8	303	301,5
Saint-Louis	446,3	282,2	228,1	353,3	130,5	278,2	311,5	310,7	247
Podor	211,3	389,6	110,8	364,2	145,5	327,3	302,5	192,3	213,9
Fanaye	208,6	190,4	87	226,6	160,4	282,2	223,9	219,7	237,8
Ndioum	337	249,2	155	258,4	175,1	396	255,1	239,7	225,5
Aéré-Lao	361,3	178,7	123,3	364,6	262,5	548	223	204,5	202,9
Galoya	397,5	130,2	216,5	DM	215	544,1	352,1	145,1	274,4

H : Hauteur en mm

DM : donnée manquante

Source : Direction Régionale du Développement Rural de Saint-Louis

LISTE DES TABLEAUX

- t. 1 : caractères physiques du bassin supérieur, p.18
- t. 2 : caractères physiques du bassin inférieur, p.19
- t. 3 : types de sols, p.41
- t. 4 : lame d'eau issu des pluies de heug, p.76
- t. 5 : précipitation moyenne annuelle (1972-2001), p.78
- t. 6 : % mensuel lame d'eau précipitée (1961-90), p.80
- t. 7 : variation interannuelle de la lame d'eau précipitée, p.81
- t. 8 : probabilité % occurrence hauteur de pluie –Fanaye, p.82
- t. 9 : fréquence d'une pluie par décade (Fanaye), p.83
- t.10: fréquence occurrentielle d'une pluie utile, p.84
- t.11: probabilité d'une pluie ≤ 2 mm, p.85
- t. 12 : analyse des eaux de puits en 1990-1991, p.118
- t. 13 : durée insolation moyenne à Podor, St-Louis et Matam en heure (1961-1990), p.124
- t. 14 : insolation à Fanaye, p.124
- t. 15 : moyenne mensuelle des températures dans la moyenne vallée, p.127
- t. 16 : maxima et minima moyennes des températures dans la vallée, p.127
- t. 17 : moyenne mensuelle des températures maximales et minimales absolues à Fanaye, p.128
- t. 18 : évolution de la température moyenne annuelle à Podor (1961- 1990), p.129
- t. 19 : évolution de la température moyenne annuelle à St- Louis et Matam (1956-1986), p.131
- t. 20 : moyenne mensuelle de l'humidité relative % dans vallée (1971- 1990), p.132
- t. 21 : maxima et minima moyens mensuels d'humidité relative à St- Louis, p.133
- t. 22 : variabilité de l'humidité relative à Matam de 1981- 1990, p.133
- t. 23 : comparaison de l'humidité moyenne en saison des pluies et saison sèche, de 1981 à 1990, p.134
- t. 24 : évolution des taux d'humidité 1951-1990, p.134
- t. 25 : direction dominante des vents à Podor 1957- 1981, p.135
- t. 26 : fréquence des vents selon la direction en saison des pluies à Podor, p.138
- t. 27 : vitesse des vents en (m /s) (1961-1990), p.138
- t. 28 : fréquence des vents supérieurs à 2,5 m/s par décade, p.139
- t. 29 : vitesse du vent – moyenne horaire au cours de la journée (fev 90- janv 91), p.140
- t. 30 : évaporation journalière bac A- Fanaye, p.141
- t. 31 : ETP gazon (mm) mesurée à l'aide de cuve lysimètre- Richard- Toll, p.146
- t. 32 : ETP décadaires au lysimètre, en sept- oct- nov 1991, p.146
- t. 33 : ETP décadaires mesurée à la règle graduée- 1991, p.147
- t. 34 : organigramme calcul ETP- Turc, p.149

- t. 35 : organigramme ETP- Thornthwaithe, p.150
- t. 36 : coefficient (k) de Bouchet - Piche corrigé à Richard - Toll- moyenne par décades, p.151
- t. 37 : organigramme calcul ETP Penman, p.158
- t. 38 : paramètres climatiques sur Podor (1990) - application des formules ETP, p.163
- t. 39 : données climatiques sur Fanaye (1988) - T°C du thermomètre mouillé et T°C, du thermomètre sec, p.163
- t. 40 : moyenne mensuelle de vitesse du vent dans la vallée- période 1961-90, p.164
- t. 41 : T°C moyenne mensuelle - période 1961-90, p.164
- t. 42 : moyenne mensuelle de l'insolation journalière en heure, p.164
- t. 43 : moyenne mensuelle de la tension de vapeur à Matam- 1981-90, p.165
- t. 44 : évaporation bac A et ETP en saison sèche et pendant l'hivernage, p.165
- t. 45 : ETP Penman – Saint- Louis, p.168
- t. 46 : ETP Penman- Fanaye, p.168
- t. 47 : ETP Penman- Podor, p.169
- t. 48 : ETP Penman- Matam, p.169
- t. 49 : ETP Turc- St- Louis, p.169
- t. 50 : ETP Turc- Fanaye, p.170
- t. 51 : ETP Turc- Podor, p.170
- t. 52 : ETP Turc- Matam, p.170
- t. 53 : ETP Making- Podor, p.171
- t. 54 : ETP Walker- Podor, p.171
- t. 55 : ETP Businger- Podor, p.172
- t. 56 : Evaporation bac A- Richard - Toll, p.172
- t. 57 : T°C moyenne maximale à Podor- période 1961- 1990, p.174
- t. 58 : T°C moyenne minimale à Podor- période 1961- 1990, p.174
- t. 59 : insolation totale (h/ dizaines)- 1961-1990, p.174
- t. 60 : humidité relative (%) – 1961-1990, p.174
- t. 61 : vitesse du vent (m/s) - 1961- 1990, p.174
- t. 62 : ETP selon Penman modifiée, p.175
- t. 63 : ETP Penman- Monteht, p.175
- t. 64 : pluviométrie à Podor 1984-1990-1995-1996, p.187
- t. 65 : apports fluviaux (estimés)-Podor 1990, p.188
- t. 66 : apports totaux (pluie et fleuve) en 1990- Podor, p.188
- t. 67 : bilan hydrique théorique sols de la vallée- Podor 1990, p.194
- t. 68 : bilan hydrique théorique sols de la vallée – Podor 2004, p.194
- t. 69 : résultats analytiques- station terrasse sableuse (ND1), p.200
- t. 70 : bilan hydrique théorique- station ND1, p.201
- t. 71 : résultats analytiques- station cuvette de Ndierba (ND2), p.204
- t. 72 : résultats analytiques (ND3), p.205
- t. 73 : résultats analytiques- station haute levée (ND4), p.208
- t. 74 : résultats analytiques – petite levée (ND5), p.211

- t. 75 : résultats analytiques – levée subactuelle (ND6), p.213
- t. 76 : coefficient cultural (kc) de quelques cultures, p.223
- t. 77 : indice d'aridité P/ETP- Podor (moyenne 1931-60 et 1961-90), p.229
- t. 78 : indice d'aridité P/ETP- Matam (moyenne 1931-60 et 1961-90), p.230
- t. 79 (a) : total annuel des pluies et ETP Thornthwaite à Podor et Matam, p.231
- t. 79 (b) : ETP Thornthwaite dans la vallée moyenne mensuelle, p.232
- t. 80 : T°C moyenne mensuelle du sol à 50 cm de profondeur, p.233
- t. 81 : limites des zones bioclimatiques, p.236
- t. 82 : indice bioclimatique Podor 1931- 1960, p.241
- t. 83 : indice bioclimatique Podor 1961-90, p.241
- t. 84 : indice bioclimatique Podor 1972, p.242
- t. 85 : indice bioclimatique Podor 1984, p.242
- t. 86 : indice bioclimatique Podor 1991-2000, p.242
- t. 87 : indice bioclimatique Matam 1931-60, p.243
- t. 88 : indice bioclimatique Matam 1961-1990, p.243
- t. 89 : indice bioclimatique Matam 1984, p.244
- t. 90 : indice bioclimatique Matam 1991-2000, p.244
- t. 91 : indice bioclimatique St- Louis 1931- 1960, p.244
- t. 92 : indice bioclimatique St- Louis 1961-1990, p.245
- t. 93 : indice bioclimatique St-Louis 1991-2000 , p.245
- t. 94 : paramètres climatiques et corrélations avec ETP à St-Louis, p.247
- t. 95 : paramètres climatiques et corrélations avec ETP à Podor, p.249
- t. 96 : paramètres climatiques et corrélations avec ETP à Matam, p.251

TABLE DES FIGURES

- fig 1 : profil en long du fleuve Sénégal, p.23
fig 2 : coupe topographique de la vallée, p.33
fig 3 : courbe d'évolution pluie à Saint-Louis, p.51
fig.4 : courbe d'évolution pluie à Podor, p.51
fig.5 : profil crue , p.98
fig 6 : régression linéaire 1961-1988 Podor- Matam et Saint-Louis, p.130
fig 7 : fréquence des directions des vents au sol, p.136
fig 8 : graphique bilan hydrique 1990- Podor, p.195
fig 9 : graphique du bilan hydrique 2004- Podor, p.196
fig 10 : croquis séquence topographique – stations de Ndierba, p.198
fig 11 : profil hydrique des sols de février 1990 en janvier 1991, p.215
fig 12 : profil hydrique des sols hivernage 1995, p.218
fig 13 : profil hydrique des sols hivernage 1996, p.219
fig 14 : profil variation du stock hydrique en profondeur (40-60 cm) sol de cuvette, p.220
fig 15 : régime hydrique des sols- année pluviométrique déficitaire, p.221
fig 16 : régime hydrique des sols- année pluviométrique normale ou excédentaire, p.222
fig 17 : bilan de l'eau des cuvettes de la vallée, p.226
fig 18 : bilan de l'eau de la levée subactuelle, p.227
fig 19: corrélation ETP – vent à St-Louis, p.248
fig 20: corrélation ETP – T°C à Podor, p.250
fig 21: corrélation ETP – T°C à Matam, p.252
fig 22: courbe d'évolution facteurs climatiques et ETP à St-Louis, p.254
fig 23: courbe d'évolution ETP et facteurs climatiques à Podor, p.254
fig 24: courbe d'évolution ETP et facteurs climatiques à Matam, p.255

CARTES

- carte 1 : carte de situation, p.8
- carte 2 : géologie de la vallée, p.26
- carte 3 : les secteurs géographiques de la vallée, p.29
- carte 4 : nombre d'habitants au kilomètre carré, p.62
- carte 5 : les stations et postes pluviométriques, p.73
- carte 6: circulation des alizés, p.74
- carte 7 : migration du F.I.T, p.77
- carte 8 : carte des pluies au Sénégal, p.79
- carte 9 : bassin du fleuve Sénégal, p.94
- carte 10 : les nappes phréatiques de la vallée, p.112
- carte 11 : localisation des échantillons d'eau analysés dans le bassin supérieur et bassin inférieur, p.119
- carte 12 : températures moyennes annuelles, p.126
- carte 13 : indice bioclimatique (selon Hiernaux) en Afrique de l'Ouest, p.235
- carte 14 : déplacement des isohyètes, p.238
- carte 15 : translation des zones bioclimatiques, p.239
- carte 16 : oscillations climatiques en Afrique, p.262

PHOTOS

- P1 : paysage d'une cuvette cultivée, p.42
P2 : paysage sur la transition sableuse, p.42
P3 : paysage de la levée subactuelle, p.43
P4 : bac classe A, p. 143
P5 : cuve lysimètre, p.145
P6 : sol de la transition sableuse, p.199
P7 : sol de la levée fluvio-deltaïque haut, p.207
P8 : acacia nilotica isolé, p.281
P9 : désertification des paysages de la forêt classée de Donaye, p.282
P10 : sol raviné avec présence de sel, p.286
P11 : un périmètre à Dagana sous pâturage, p.295

SIGLES

- ASECNA : Association pour la Sécurité de la Navigation Aérienne
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et minières
CILSS : Comité Inter- états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CRDS : Centre de Recherche et de Documentation du Sénégal
ENDA : Environnement et Développement du Tiers- Monde
D.R.D.R : Direction Régionale du Développement Rural
DPS : Direction des Prévisions Statistiques
FAO : Organisation des Nations- Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IARS : Inspection Agricole de la Région de Saint-Louis
IFAN : Institut Fondamental de L'Afrique Noire
IRAT : Institut de Recherche en Agronomie Tropicale
ISRA : Institut Sénégalais de Recherche agricole
OAD : Office pour l'Aménagement du Delta
OAV : Office pour l'Aménagement de la Vallée
OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal
ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération
(actuellement IRD – Institut pour la Recherche et le Développement)
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SAED : Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la Falémé
SASIF : Société Africaine de Sondages Injections Forages
SOGETHA : Société Générale des Techniques Hydro- Agricoles
SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
SONADER : Société Nationale de Développement Rural (Mauritanie)
SRES : Service Régional de l'Elevage de Saint-Louis
UHEA : Union Hydro-Electrique Africaine
USAID : United States Agency – International Development

TABLE DES MATIERES

1

AVANT-PROPOS	3
INTRODUCTION GENERALE	5
PREMIERE PARTIE :	14
LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	15
CHAPITRE 1 : LES CARACTERES PHYSIQUES DE LA VALLEE	16
I. RELIEF, RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET PROFIL	16
1. Le relief	17
2. Le réseau hydrographique	18
a) Le haut bassin	18
b) Le cours inférieur	19
3. Le profil	21
II. GEOLOGIE ET MORPHOLOGIE DE LA VALLEE	23
1. Les formations géologiques (voir carte 2, p.26)	23
a) Formations du bassin supérieur	23
b) Formations du bassin inférieur	24
2. La morphologie de la vallée	26
a) La transition diéri-walo	29
c) Les levées fluvio-deltaïque	31
d) Hautes levées et levée subactuelle	31
III- SOLS ET VEGETATION : LEURS USAGES	33
1. Sols et végétation du lit majeur (walo)	33
a. Les cuvettes argileuses de décantation	33
b. Les sols et végétation des levées fluviales et fluvio-deltaïques ou fondé	35
2. Sols et végétation des bordures de la vallée	36
a) Sols et végétation de la zone de transition ou Jejogol	36
b) Sols et végétation des terres bordières ou diéri	37
CHAPITRE 2 : CHANGEMENTS ET VULNERABILITE DU CLIMAT DE LA VALLEE	43
1- CARACTERISTIQUES DU CLIMAT	43
1. CARACTERES GENERAUX	43
2. LA SECHERESSE : PROBLEMES ET DEFINITIONS	45
II- L'EVOLUTION DU CLIMAT DE LA VALLEE	47
1. Les crises climatiques du début du siècle	47
2. Le climat de 1968 à nos jours	48

3. Sécheresses et crues	51
III- QUELLES FREQUENCES POUR LES CRISES DU CLIMAT ?	52
1. Oscillations climatiques et périodicités	53
2. Les causes	55
CHAPITRE 3 : POPULATIONS ET ACTIVITES	57
I. LE PEUPLEMENT DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL	57
II. CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION	59
III. LA VOCATION AGRICOLE DE LA VALLEE	62
1. Le développement des cultures irriguées	62
2. Les autres activités	65
a) Les cultures de décrue	65
b) L'élevage et la pêche	67
DEUXIEME PARTIE :	70
LES DISPONIBILITES EN EAU	70
CHAPITRE 1 : LA PLUIE	71
I – MECANISMES ET MANIFESTATIONS DE LA PLUIE	71
1. Les pluies hivernales	74
2. Les pluies estivales	75
II - LA PLUVIOMETRIE DANS LA MOYENNE VALLEE	77
1. Une diminution du sud au nord	77
2. Des pluies concentrées	79
3. Des pluies irrégulières	80
4. Probabilité d'occurrence d'une pluie	81
5. Durée des périodes sèches	83
CHAPITRE 2 - LE FLEUVE	85
I - LES MISSIONS LE LONG DU BASSIN	85
II. LE SENEGAL, UN COURS D'EAU INTERNATIONAL	86
1. Présentation	86
2. L'OMVS	88
3. Mission et programme de l'OMVS	89
4. Le Sénégal, un fleuve aux eaux partagées (la CPE)	92
III - LES APPORTS DU FLEUVE	94
1. Avant la construction des barrages	94
a) Le régime naturel	94
b) Les écoulements irréguliers et une sécheresse sévère	95
c) Des crues irrégulières et une décrue précoce	96
2. Le régime artificiel de la crue	99
a) Objectifs et fonctionnement de la crue	99
b) Les risques d'inondation	103

CHAPITRE 3 : LES NAPPES106

I - L'HISTOIRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIE DU BASSIN 106

L'histoire géologique du bassin du fleuve reflète celle du continent africain, pays de socle, de vieilles plates formes et de bassins sédimentaires. Le fleuve s'étend sur deux ensembles structuraux bien distincts (carte 2, p.26) renfermant des réserves aquifères dont les plus importantes sont dans le cours inférieur. 106

3. Les formations du cours supérieur 106

2. Formations géologiques du cours inférieur 107

a) Les formations tertiaires 107

b) Les formations du quaternaire 108

II - LES NAPPES DE LA VALLEE 109

1. Les formations aquifères 109

2. Les nappes de la vallée 110

a) La nappe Maestrichtienne 110

b) La nappe du Brachna 110

c) La nappe de l'Amechtil 112

d) La nappe de Trarza 112

e) La nappe du Continental terminal 112

f) La nappe alluviale 113

III - L'ALIMENTATION DES NAPPES ALLUVIALES 113

1. Recharge par les eaux de pluie 113

2. Alimentation par transfert latéral 114

3. Alimentation par les eaux d'irrigation 114

4. Les variations de la nappe 115

IV - LA QUALITE DES EAUX 116

CONCLUSION..... 119

TROISIEME PARTIE : L'EVAPOTRANSPIRATION ET LES AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES DE PERTES EN EAU 120

CHAPITRE 1 : LES FACTEURS CLIMATIQUES DE L'EVAPOTRANSPIRATION123

I - L'INSOLATION 123

II - LES FACTEURS THERMIQUES 124

1. Considérations générales 124

2. L'ampleur des écarts 126

3. Le rôle des températures supérieures à 35°C 127

III - L'HUMIDITE DE L'AIR 130

1. Variation dans l'espace 130

2. Variation interannuelle et tendances 132

IV - LE VENT 134

1. Le régime du vent 134

2. Une vitesse des vents généralement faible 137

a) Distribution saisonnière 137

b) Variabilité fréquentielle	138
CHAPITRE 2 : MESURES ET METHODES DE CALCUL DE L'ETP	140
I - LES TECHNIQUES DE MESURE	140
1. Les mesures par bacs de l'évaporation	140
2. Mesures de l'ETP gazon	143
II - METHODES DE CALCUL DE L'ETP	146
1. Les méthodes empiriques	146
a) La formule de Turc	147
b) La formule de Thornthwaite	148
c) La formule de Bouchet	149
d) Les formules de Prescott	150
e) Formule de Haude	152
f) Les formules d'Olivier	152
g) Formule de Makking	154
2. Les méthodes analytiques ou mathématiques	154
a) Formule de Penman	155
b) Formule de Walker	158
c) Formule de Businger	159
III - APPLICATIONS DES FORMULES.....	161
1. Présentation des paramètres	162
a) données sur Podor (année 1990) (tableau 38) utilisées pour expliquer les formules d'ETP au sous-chapitre précédent	162
2. Tableau (44) récapitulatif des valeurs de l'évaporation (ev) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculées selon (avec) dix méthodes à Podor en saison sèche et en saison pluvieuse.	164
3. Critiques et observations sur les résultats	164
* Formule de Turc	165
* La méthode Thornthwaithe	165
* La méthode de Bouchet	165
* La méthode de Prescott	165
* La méthode de Haude	165
* La méthode d'Olivier	166
* La méthode de Makking	166
* La méthode de Walker	166
* La méthode de Penman	166
* La méthode de Businger	167
4. Utilisations des formules représentatives	167
* L'ETP selon la méthode de Penman	167
* L'ETP selon formule de Turc	168
* ETP selon la formule de Makking	170
* ETP selon la formule de Walker	170
* ETP selon la formule de Businger	171

* ETP estimé à partir du bac A	171
5. Les équations recommandées	172
a) la méthode Penman	172
b) les formules de Makking et de Turc	174
CONCLUSION	175

QUATRIEME PARTIE : BILANS HYDRIQUES ET TENDANCES ACTUELLES DU CLIMAT DANS LA MOYENNE VALLEE..... 176

Chapitre 1 : Evaluation du bilan hydrique d'une parcelle	176
--	-----

Chapitre 2 : Le bilan climatique de la vallée.....	176
--	-----

Chapitre 3 : Les impacts du bilan climatique	176
--	-----

CHAPITRE 1 : EVALUATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE PARCELLE..... 177

I - LE STOCK HYDRIQUE DANS LE SOL	178
1. Méthode et technique	178
a) Le matériel	178
b) La mesure	178
c) Réalisation pratique	179
2. Les facteurs intervenant dans la dynamique du sol et dans le bilan de l'eau	182

a) L'humectation	182
------------------	-----

b) L'infiltration	182
-------------------	-----

c) La dessiccation	183
--------------------	-----

3. La variation saisonnière de l'humidité : les états de l'eau dans le sol	183
--	-----

II - LE BILAN HYDRIQUE THEORIQUE DE LA MOYENNE VALLEE 185

1. Les composantes du bilan	185
-----------------------------	-----

a) Les apports (P)	185
--------------------	-----

b) Le drainage	187
----------------	-----

c) Les réserves en eau utile	188
------------------------------	-----

d) L'évapotranspiration réelle (ETR)	188
--------------------------------------	-----

e) Le ruissellement	190
---------------------	-----

4. Les résultats	191
------------------	-----

III - BILAN REEL DES TERRES DU WALO OU VARIATION DU STOCK

1. Bilan sur la transition sableuse	197
-------------------------------------	-----

a) Caractéristiques physiques	197
-------------------------------	-----

b) Variation de la teneur en eau	200
----------------------------------	-----

c) Bilan hydrique	202
-------------------	-----

2. Bilan d'une cuvette	202
------------------------	-----

a) Caractéristiques physiques	202
-------------------------------	-----

b) Variation de la teneur en eau	203
----------------------------------	-----

3. Bilan hydrique sur levée fluvio-deltaïque haut	206
---	-----

a) Propriétés physiques	206
-------------------------	-----

b) Variation de la teneur en eau	206
----------------------------------	-----

4. Bilan hydrique d'une levée fluvio-deltaïque bas	209
a) Propriétés physiques	210
b) Variation de la teneur en eau	210
5. Bilan hydrique de la levée subactuelle.	212
a) Propriétés physiques	214
b) La variation de la teneur en eau	214
6. Les bilans hydriques des principales cultures de la vallée	223

CHAPITRE 2 : POUR UN BILAN ACTUEL DU CLIMAT DE LA VALLEE 228

I – METHODES DE DEFINITION DU CLIMAT APPLIQUEES A LA BIOGEOGRAPHIE ET L' AGRICULTURE 228

1. L'indice d'aridité	229
2. L'indice de Thornthwaithe	230
3. L'indice d'humidité de Hiernaux	233
4. L'indice bioclimatique (I. B.)	236
II - L'AMPLEUR DE LA SECHERESSE 237	

1. Les bilans de l'eau	237
a) Bilans de l'eau – Podor 241	
b) Bilans de l'eau – Matam	243
c) Bilans de l'eau – Saint-Louis 244	
2. Les facteurs déterminants	245
<i>-Le rôle important du vent et de la température 246</i>	
3. Quelques interprétations des causes de la sécheresse	255
a) Hausse de la température	255
b) La variation du vent	258

CHAPITRE 3 : IMPACTS DU BILAN CLIMATIQUE SUR LA VALLEE DU SENEGAL

..... 263	
I- LES IMPACTS SUR LA SANTE 263	
1. Recrudescence des maladies hydriques	263
2. Effets sur la qualité des eaux	266
II. L'IMPACT SOCIAL 268	
III. LES IMPACTS SUR L'ECONOMIE 270	
1. L'impact sur l'élevage	270
2. L'impact sur la pêche	271
3. L'impact sur les cultures	273
IV. LES IMPACTS ECOLOGIQUES 277	
1. Le bois de chauffe, une source d'énergie en disparition	277
2. L'évolution récente des milieux	278
a) Evolution du paysage dunaire	278
b) Evolution morphologique des forêts classées	279
c) Evolution morphologique de la vallée alluviale	282
3. Le sol dans la vallée, un patrimoine en péril	285
a) L'action du vent. 285	

b) Le rôle de la pluie.	285
c) L'influence du sel.	286
4. La préservation de ces milieux : l'approche agroforestière	288
a) Qu'est ce que l'approche agroforestière ?	288
b) Le Projet de Ceinture Verte	290
c) Les systèmes de protection du milieu	292
<i>c 1 Les techniques forestières et agroforestières</i>	292
<i>c 2) Système foresterie et exploitation agricole</i>	293
<i>c 3) Les systèmes agro sylvo-pastoraux</i>	294
V. IMPACTS POLITIQUES	297
1. la sécheresse, un des facteurs de la crise sénégal-mauritanienne	297
2. La crise sénégal-mauritanienne	298
3. Elaboration de la charte des eaux	300
CONCLUSION GENERALE.....	302
BIBLIOGRAPHIE	309
ANNEXES	334
ANNEXE 1 : HUMIDITE DES SOLS (%) ANNEE 1990-1991	335
S1	336
ANNEXE 2 : autres considérations pour le calcul de l'évapotranspiration de la culture de référence selon les méthodes de la température, du rayonnement et les méthodes combinées de : Penman modifié (FAO) et Penman Monteith (FAO) (source SAED)	337
1. Méthodes avec formules empiriques	337
a) Méthode de la température	337
b) Méthode du rayonnement	337
IV. Méthodes combinées ou mathématiques	338
a) L'équation de Penman modifiée	338
b) La formule de Penman- Monteith	338
ANNEXE 3 : Données climatiques complémentaires pour l'utilisation des méthodes de calcul de l'ETP	340
ANNEXE 4 Tableaux pour effectuer les calculs de l'ETP	341
Table 1	341
Table 2	342
Table 3	343
Table 4	344
Table 5	345
Table 6	345
Table 7	346
Table 8	346
Table 9	347
Table 10	348

Table 12	349
Table 13	350
Table 14	351
Table 15	352
Table 16	352
Table 17 N	353
Table 18	354
Table 19	355
Table	356
Table	356
Table 11	356
LISTE DES TABLEAUX	360
TABLE DES FIGURES	363
CARTES	364
PHOTOS	365
SIGLES	365
TABLE DES MATIERES	366

RESUME DE LA THESE

**SUJET : Les bilans hydriques des sols dans la moyenne vallée du Sénégal-
Contribution à l'étude des besoins en eau de la végétation.**

A cause de la sécheresse, les volumes d'eau précipités, les écoulements fluviaux varient d'une année à l'autre avec une tendance à la baisse. Les surfaces inondées se réduisent, les puits s'approfondissent, l'herbe disparaît. L'eau est un facteur limitant dans la région nord du Sénégal. Sa maîtrise est la clé du développement de la région. Le relèvement du plan d'eau du fleuve, grâce aux barrages de Diama et Manantali, est considéré comme une des solutions pour nourrir et assurer le développement des populations riveraines du fleuve.

Le fondement de toute politique d'irrigation repose sur une évaluation correcte des besoins en eau du couvert végétal. Des méthodes de mesures et de calculs (plus d'une dizaine) sont analysés. Les moyens techniques permettent actuellement d'avoir des résultats estimés proches des besoins réels de la plante.

L'évapotranspiration est une valeur indispensable pour l'établissement du bilan de l'eau, pour caractériser les régimes hydriques des sols et pour déterminer un climat stationnel. En plus de ses effets dans la destruction et la réduction des ressources disponibles dans les différents milieux, la sécheresse a engendré d'autres impacts graves sur la santé des populations, des crises politiques catastrophiques entre Etats riverains du fleuve Sénégal.

Mots Clés :

Bilan hydrique des sols - évapotranspiration potentielle – sécheresse – indice bioclimatique – agriculture irriguée – agroforesterie – impacts.

TITRE : *Les Bilans Hydriques dans la Moyenne Vallée du Sénégal – Contribution à l'étude des besoins en eau de la végétation.*

RESUME DE LA THESE

A cause de la sécheresse, les volumes d'eau précipités, les écoulements fluviaux varient d'une année à l'autre avec une tendance à la baisse. Les surfaces inondées se réduisent, les puits s'approfondissent, l'herbe disparaît. L'eau est un facteur limitant dans la région nord du Sénégal. Sa maîtrise est la clé du développement de la région. Le relèvement du plan d'eau du fleuve, grâce aux barrages de Diama et Manantali, est considéré comme une des solutions pour nourrir et assurer le développement des populations riveraines du fleuve.

Le fondement de toute politique d'irrigation repose sur une évaluation correcte des besoins en eau du couvert végétal. Des méthodes de mesures et de calculs (plus d'une dizaine) sont analysés. Les moyens techniques permettent actuellement d'avoir des résultats estimés proches des besoins réels de la plante.

L'évapotranspiration est une valeur indispensable pour l'établissement du bilan de l'eau, pour caractériser les régimes hydriques des sols et pour déterminer un climat stationnel. En plus de ses effets dans la destruction et la réduction des ressources disponibles dans les différents milieux, la sécheresse a engendré d'autres impacts graves sur la santé des populations, des crises politiques catastrophiques entre Etats riverains du fleuve Sénégal

Mots Clés :

Bilan hydrique des sols - évapotranspiration potentielle – sécheresse – indice bioclimatique – agriculture irriguée – agroforesterie - impacts

SUBJECT : « *Hydrous assessments of the grounds in the Middle Valley of Senegal- Contribution to the study of requirements of water for the vegetation.* »

Because of the dryness, precipitated volumes of water, the river flows vary from a year to another with a downward trend. Flooded surfaces are reduced, the wells deepen, the grass disappears. Water is a limiting factor in the northern area of Senegal. Its control is the key of the development of the area. The raising of the river water plan, thanks to the dams Diama and Manantali is regarded as one of the solutions to nourish and ensure the development of the bordering populations of the river.

The foundation of any policy of irrigation is based on a correct evaluation of the requirements of water for vegetable cover. Methods of measurements and calculations (more than ten) are analysed. Technical means presently make it possible to obtain results considered very close to the real needs for the plant.

Evapotranspiration is an essential value for water assessment, to characterize the hydrous modes of the grounds and to determine the climate of an area. In addition to effects in the destruction and reduction of resources of the environment, drought has produced other serious impacts on populations's health and political crises among the river Senegal bordering states.