

09476

P.O.G.R.

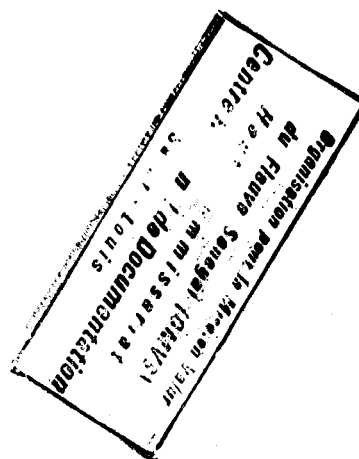
PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS

***Impacts potentiels de la gestion des ouvrages
et des eaux de surface du Fleuve Sénégal sur la
DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES***

Rapport de synthèse

Version Provisoire 15/12/1998

TOME 5.4



09476

Impacts potentiels de la gestion des ouvrages et des eaux de surface du Fleuve Sénégal sur la dynamique des eaux souterraines

Rapport de synthèse – Version Provisoire 15/12/1998

- ✧ La question qui nous intéresse ici est celle de l'impact potentiel de la gestion des réservoirs du Fleuve Sénégal sur la dynamique des eaux souterraines et sur les usages humains et environnementaux associés.

Le Fleuve Sénégal est en interaction directe avec sa nappe alluviale et en interaction indirecte (via la nappe alluviale) avec différentes nappes plus profondes exploitées par des forages. Classiquement un fleuve réalimente sa nappe alluviale en période de hautes eaux, par son lit principal et son lit majeur (les zones d'inondation) et la draine en période d'étiage. Ce schéma est globalement applicable au Fleuve Sénégal, à l'exception de certains tronçons où le Fleuve est toujours en position d'alimentation de la nappe. Par ailleurs la nappe alluviale suit un écoulement d'ensemble parallèle à l'axe de la Vallée.

Les échanges de volume entre les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent être fortement modifiés en **quantité** par les changements de régime hydrologique du Fleuve, changements naturels (sécheresse ou succession d'années humides) ou d'origine anthropique (régulation des crues et des étiages). Ils sont également modifiés au niveau des périmètres irrigués, notamment rizicoles, où la percolation vers la nappe est importante.

L'impact quantitatif de la gestion des aménagements réside donc essentiellement dans :

- La diminution des superficies inondées (ou la réduction de leur durée de submersion) qui sont des zones de recharge potentielle, ce qui peut donc limiter la réalimentation des eaux souterraines
- Le soutien des étiages qui remonte le niveau de base et limite le drainage de la nappe (tout en pouvant même générer une recharge continue), et plus généralement limite l'amplitude des fluctuations de niveau dans le Fleuve.
- Le relèvement de la ligne d'eau à l'amont du barrage de Diama qui provoque un relèvement généralisé de la nappe de la Basse Vallée et du Delta.

Par ailleurs la **qualité** des eaux souterraines peut être sensiblement modifiée dans la zone du Delta (remontée de nappes salées en lien avec la surélévation du niveau d'eau dans le fleuve au barrage de Diama) ou dans les zones d'intensification de l'irrigation

Le rapport s'articule en 4 parties.

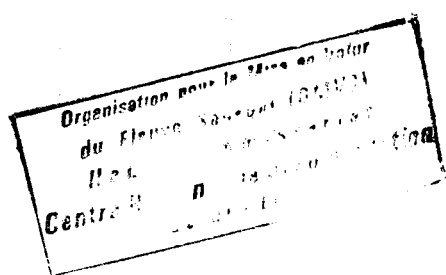
La première regroupe des informations d'une part sur les usages humains des eaux souterraines, principalement en alimentation villageoise (eau pour la consommation et l'usage humain, ainsi que pour l'abreuvement du bétail), d'autre part sur les enjeux environnementaux liés à la nappe alluviale, notamment sur la sensibilité des écosystèmes végétaux (forestiers).

La seconde partie présente de façon synthétique les caractéristiques des principaux aquifères liés au Fleuve et le dispositif de suivi existant ou ayant existé.

La troisième partie fait le point de nos connaissances sur les échanges entre le Fleuve et sa nappe alluviale, et sur les différences potentielles entre régime naturel et régime de gestion.

La quatrième partie conclut sur une synthèse globale des connaissances et des implications sur la gestion des ouvrages, et propose des voies pour améliorer ces connaissances dans le futur.

Chacun des sujets évoqués ci-dessus a fait l'objet de différentes études détaillées auxquelles nous faisons explicitement référence (cf. bibliographie en fin de rapport). La présente expertise a pour seul objectif de recenser et de synthétiser ces connaissances, sans pouvoir permettre d'acquérir ou de développer de nouvelles connaissances.



I. Les usages humains et les enjeux environnementaux des eaux souterraines

I.A. Usages humains

Dans l'ensemble de la moyenne vallée et de la basse vallée, la nappe alluviale fournit une eau facilement accessible par les puits, pour la consommation humaine, animale et pour l'irrigation des jardins maraîchers (notamment les jardins des groupements de femmes). Les puits peu profonds ouverts sont les plus fréquents, la profondeur de l'eau y étant en moyenne de 8 à 10m.

En rive gauche du Fleuve, les rapports régionaux du Recensement Général de la Population et de l'Habitat sénégalais de 1988 donnent des informations sur les habitations des ménages et notamment sur l'approvisionnement en eau. Les rapports de la Région de Saint Louis et de la Région de Tambacounda (Département de Bakel) donnent les informations suivantes :

Sources RGPH88	Dagana		Podor		Matam		Bakel		Total Vallée Rive Gauche	
	ménages	%	ménages	%	ménages	%	ménages	%	ménages	%
Robinet intérieur	6922	22.2	519	2.6	1020	4.2	431	4.1	8892	10.3
Robinet extérieur	8705	28.0	626	3.1	4138	16.9	1009	9.6	14478	16.8
Forage ou pompe	599	1.9	3281	16.3	2344	9.6	673	6.4	6897	8.0
Puits intérieur	651	2.1	369	1.8	483	2.0	578	5.5	2081	2.4
Puits extérieur	6016	19.3	8920	44.2	11067	45.3	5086	48.4	31089	36.0
Autre	8238	26.5	6460	32.0	5386	22.0	2732	26.0	22816	26.5
Total	31131	100.0	20175	100.0	24438	100.0	10508	100.0	86252	100.0

Les réseaux d'adduction (robinets) alimentent 27% des ménages ce qui correspond de manière très nette au pourcentage de population urbaine (27%).

On peut donc considérer que sur la population rurale 11% est alimentée par forage (nappe profonde), 53% par des puits en nappe alluviale et 36% par d'autres moyens, notamment l'accès direct au Fleuve, aux marigots et aux lacs.

Il est évidemment difficile d'estimer les volumes prélevés par les populations à partir des puits. Si l'on adopte un chiffre global de 50 000 ménages s'alimentant en eau par des puits et des besoins journaliers de l'ordre de 50 l/jour/ménage, le chiffre obtenu est de l'ordre de 2 500 m³/j soit 1 Million de m³/an. Il ne s'agit là que d'une estimation mais on peut considérer dans tous les cas que les volumes de prélèvements pour les besoins humains restent négligeables (<0,5%) devant les volumes échangés entre le Fleuve et la nappe.

Les différents entretiens ne semblent pas indiquer de baisse significative du niveau d'eau dans les puits qui aurait pu amener à leur abandon ou à leur approfondissement. Une enquête plus systématique pourrait s'avérer utile.

____ Compléments _____

Acquérir des informations côté Mauritanien

Identifier des puits et piézomètres qui ont été suivis depuis 1990

Identifier des puits et des piézos qui ont été suivis avant

Enquêter sur la dynamique de la nappe et l'alimentation en eau par les puits

I.B. Les enjeux environnementaux liés aux eaux souterraines

Il est connu qu'avant la sécheresse qui a commencé en 1973, la vallée était couverte de forêts de Gonakiés. La germination des gonakiés requiert une durée de submersion suffisante et des conditions propices d'humidité de surface pour les trois premières années. Au-delà, les gonakiés ayant développé leur système racinaire peuvent s'alimenter dans les eaux de la nappe alluviale.

C'est le cas par exemple d'une forêt restante en rive gauche à l'amont de la défluence du Doué et du Sénégal. Cette forêt d'arbres adultes persiste sur une zone qui n'a pas été submergée depuis 25 ans, ce qui s'explique par l'accès direct du système racinaire à l'eau de la nappe.

En ce sens le relèvement global du niveau de base de la nappe doit avoir un impact positif sur les écosystèmes forestiers.

Dans la partie aval de la Vallée, notamment au niveau du Delta, le relèvement de la nappe généré par le plan d'eau à l'amont du barrage de Diama, peut s'accompagner d'hydromorphie et de remontées salines, la nappe alluviale ayant longtemps été contaminée par les eaux marines.

II. Les différentes nappes liées au Fleuve Sénégal et leur dynamique

* II.A. Les différentes formations géologiques et leurs aquifères

On peut distinguer dans la région du Fleuve trois aquifères superposés. Ces aquifères correspondent à des formations géologiques différentes qui se sont mises en place respectivement à la fin du Secondaire, au Tertiaire et au Quaternaire¹ (cf. carte) :

Formations Maastrichiennes (fin du Secondaire) :

Le bassin sénégalo-mauritanien a pris naissance pendant l'ère Secondaire entre la fin du Trias et le début du Jurassique supérieur. Depuis le Jurassique le bassin s'affaisse de manière continue. La formation supérieure de cette période est le Maastrichien² (fin du Crétacé).

La formation Maastrichienne est décrite en détail dans le rapport EQUESEN 1993 (Tome IV, Chap. 7), lui-même s'appuyant sur le rapport de Illy 1973. Elle est organisée en un bombement anticlinal (en forme de dôme), dont la dorsale (sommet du dôme) suit un croissant qui est à l'aplomb du fleuve de Bakel à Matam, passe ensuite au nord de la vallée, pour redescendre vers le Fleuve à hauteur de Dagana.

Les deux principales zones d'affleurement du Maastrichien (contact direct avec les formations alluviales) sont donc :

- La moyenne vallée de Sémmé à Matam, où le Maastrichien est à l'altitude -10m et est en contact direct avec les formations alluviales quaternaires.
- La basse vallée dans la zone de Dagana (-20m au niveau de Dagana, Guidakhar, Ker Mour ; -40m à Binguel Déné, -50m à la jonction Lac de Guiers – Canal de la Taouaye)

Le Maastrichien s'enfonce rapidement de part et d'autre de la dorsale (-50m au Lac de R'Khiz, -100m à l'ouest du Lac de Guiers, -400m sur une ligne Rosso – Gnit – Louga). De Kaédi à l'aval de Podor, où la dorsale passe nettement au nord de la vallée, le Maastrichien est ainsi au-dessous de -50m et même au-dessous de -100m entre Boghé et Podor.

Selon les mesures réalisées par le BRGM en Septembre 1970, la nappe du Maastrichien s'écoule dans une direction parallèle à l'axe du bombement anticlinal, donc parallèlement au Fleuve, vers une dépression piézométrique située vers Tiatki et Diaglé (Sénégal). La nappe du Maastrichien est en charge et sa piézométrie varie : +9m à hauteur de Sémmé, +6m à hauteur de Kaédi, +4m à hauteur de Boghé, +1m à hauteur de Dagana.

Formations sédimentaires de l'Eocène (Tertiaire) :

Au cours de l'Eocène des formations sédimentaires marines et littorales³ se sont mises en place. Elles couvrent l'ensemble de la vallée, à l'exception de sa partie amont (Sémmé – Matam). Leur épaisseur est variable : 50m à l'aval de Matam, 80m à Pété.

A la fin du Tertiaire des phénomènes tectoniques ont fracturé les roches dures du socle ancien et les formations sédimentaires de l'Eocène. Le substratum est donc fortement accidenté.

¹ On rappelle la succession des périodes géologiques :

Préambrien, Primaire ou Paléozoïque [Cambrien, Silurien, Dévonien, Carbonifère, Permien], Secondaire ou Mésozoïque [Trias, Jurassique, Crétacé], Tertiaire ou Cénozoïque [Eocène, Oligocène, Miocène], Quaternaire

² Maastrichien : sables hétérométriques souvent grossiers avec quelques passages d'argile et de grès sableux à niveaux de quartz translucides.

³ Eocène : les formations sédimentaires d'origine marine sont essentiellement argileuses, marneuses et calcaires, les formations de type littorales présentent des dépôts détritiques sableux gréseux ou argileux.

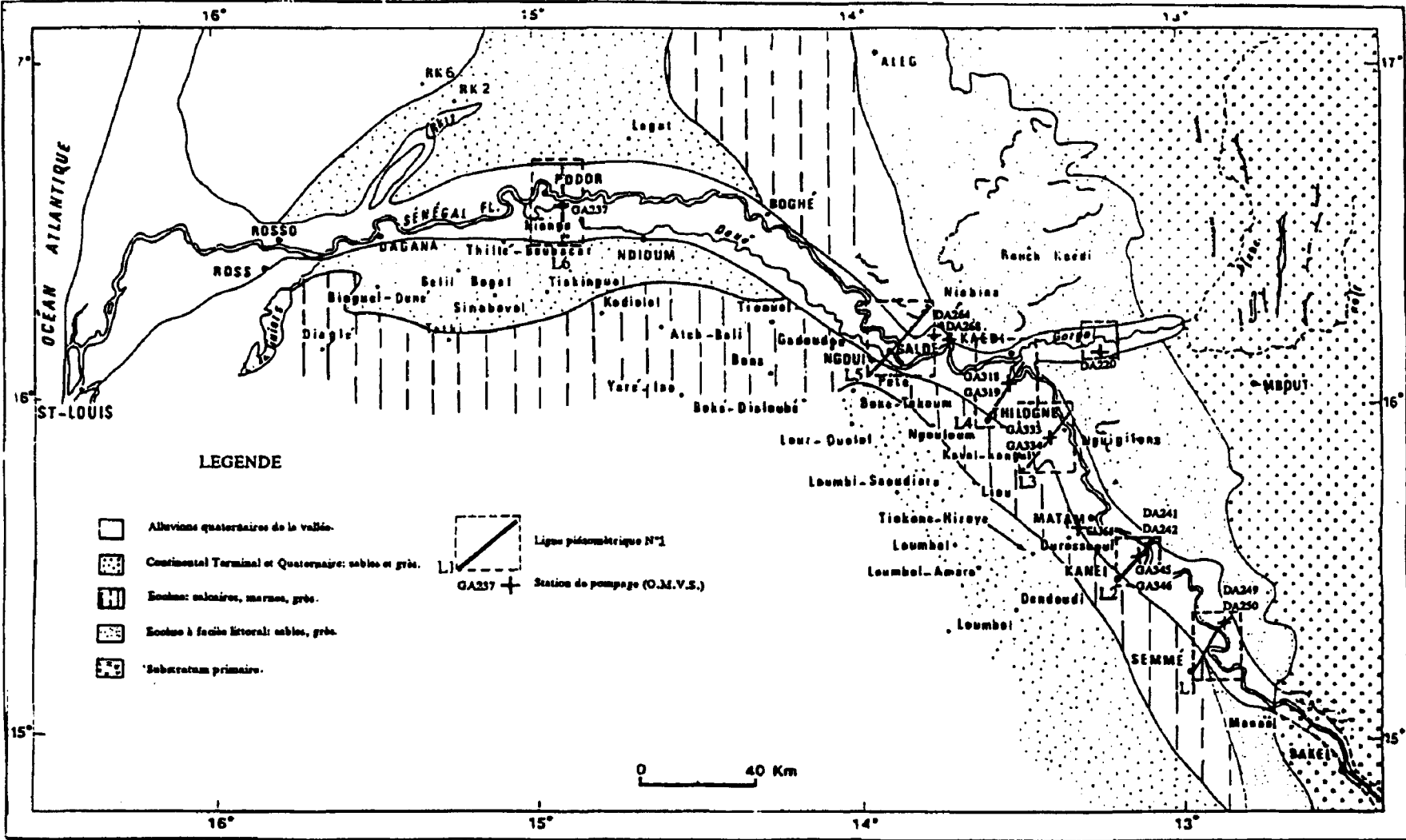
Formations alluviales (Quaternaire) :

Postérieures aux phénomènes tectoniques les formations alluviales du quaternaire⁴, déposées par le Fleuve et ses affluents, ont recouvert le substratum. Ces formations sont très hétérogènes.

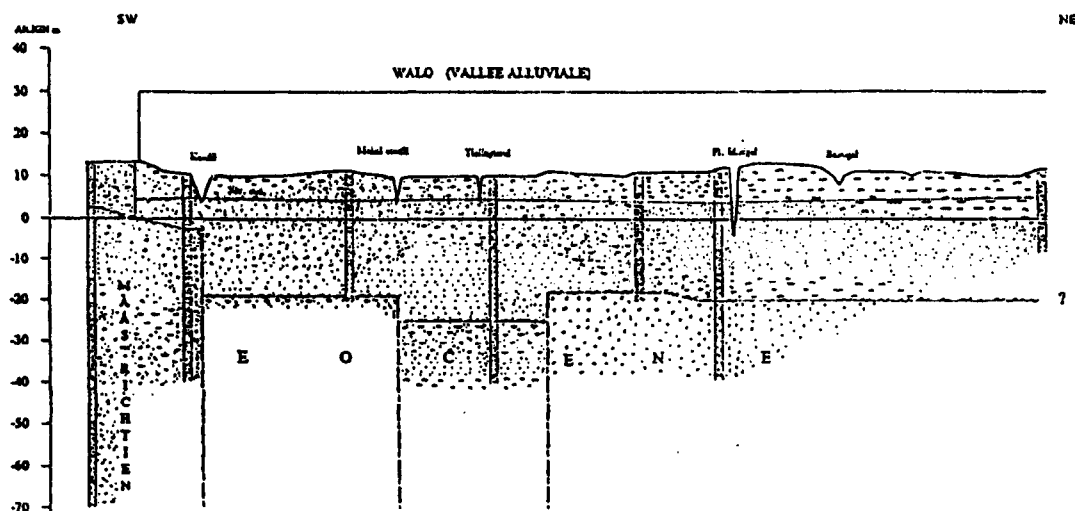
Leur épaisseur est en moyenne de 35m dans l'axe de la vallée et de +15m aux bords.

A l'amont de la vallée les formations alluviales reposent directement sur les formations Maastrichiennes, les formations Eocènes se rencontrant sur les côtés. A l'aval de la vallée on observe la superposition régulière des trois étages : Maastrichien, Eocène, Quaternaire.

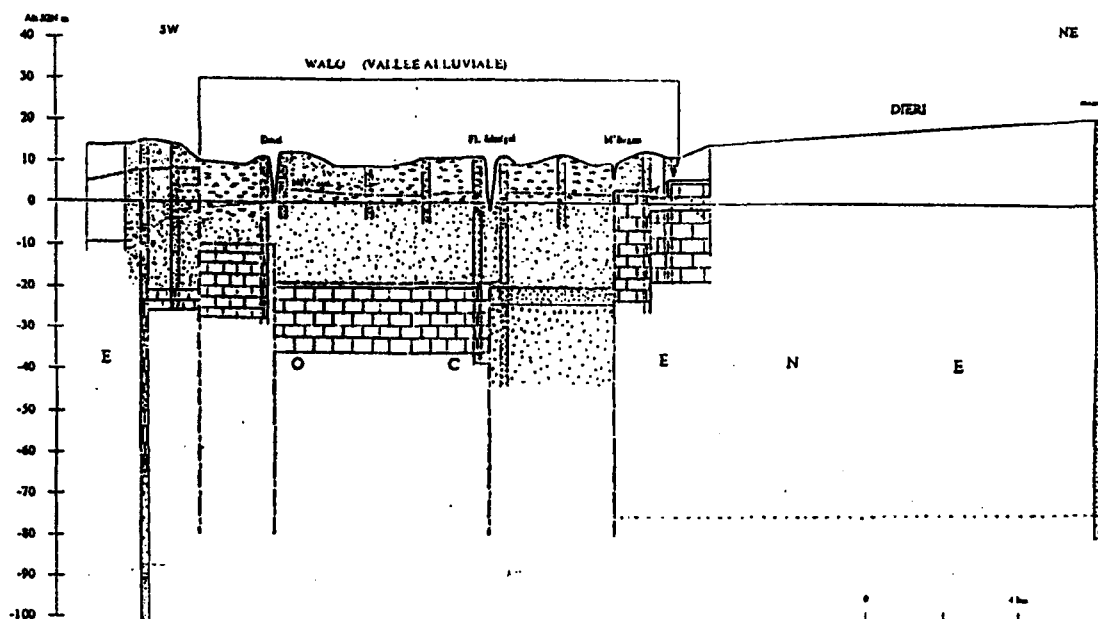
⁴ Quaternaire : calcaires lacustres, vases, sables marins, alluvions fluviales,...



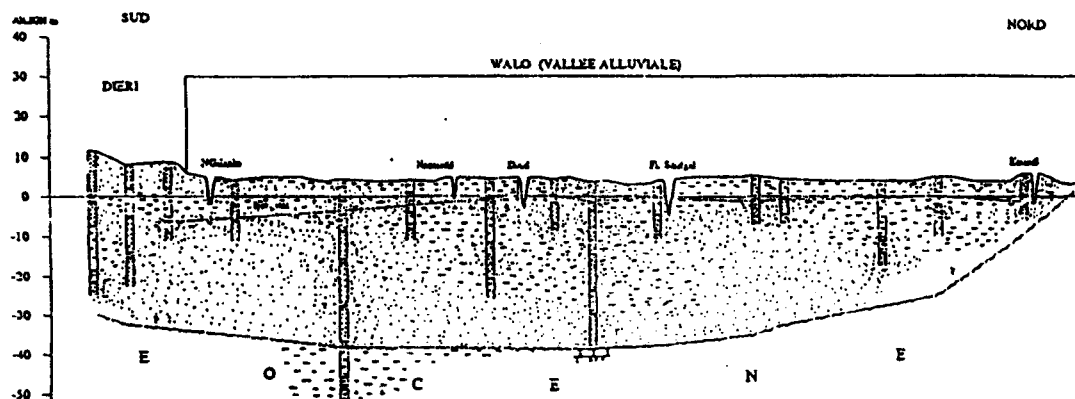
COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L4 THIOLOGNE



COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L5 SALDE



COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L6 PODOR



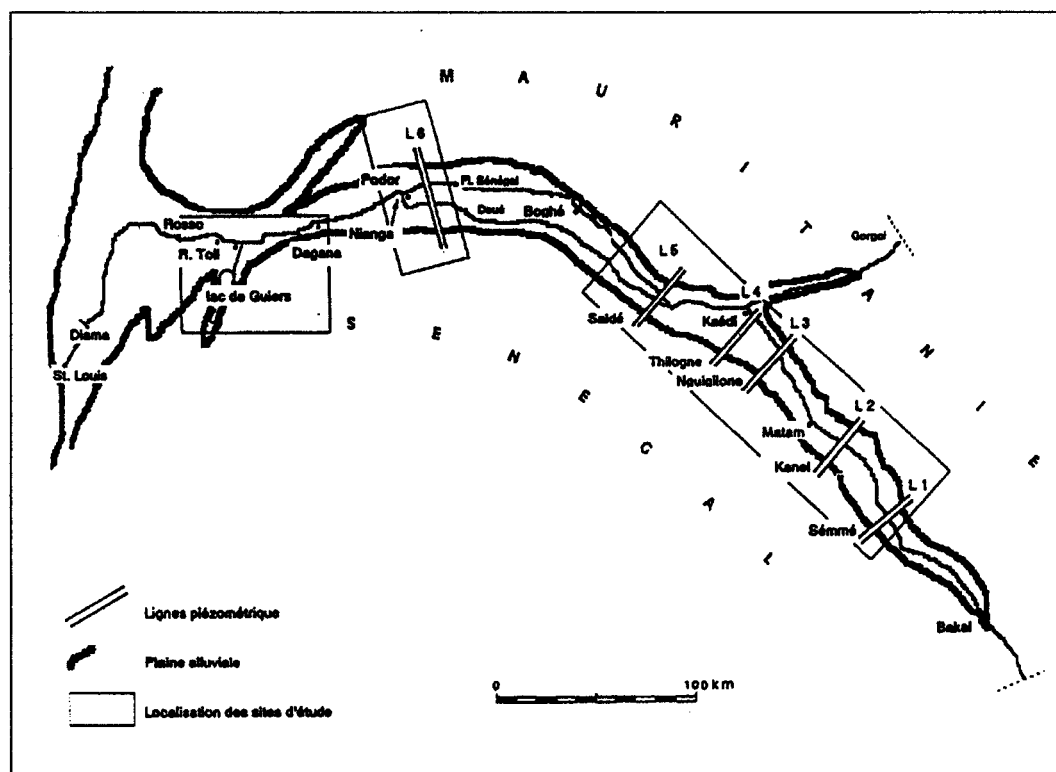
II.B. Le dispositif de suivi piézométrique

Un projet initié par l'OMVS et l'USAID (1985-1990) a permis la réalisation d'un réseau de suivi de 589 piézomètres et 562 puits villageois.

	Total			Delta			Moyenne Vallée			Haute Vallée		
	Total	RG	RD	Total	RG	RD	Total	RG	RD	Total	RG	RD
Piezomètres	589						268	138	130			
Quatern.							193					
Eocène							59					
Maestr.							16					
Primaire							3					
Puits	562						327	241	86			
Quatern.							98					
Eocène							230					
Maestr.												
Primaire												

(tableau à compléter)

Le dispositif mis en place par l'USAID sur la vallée du Fleuve est représenté sur la carte ci-dessous, extraite du rapport Equesen



Ce réseau de suivi consiste essentiellement en :

- six lignes piézométriques transversales à la Vallée, respectivement de l'amont vers l'aval à Sémmé, Kanel, Nguigilone, Thilogne, Saldé et Podor
- un dispositif piézométrique sur la partie amont du Delta

Le rapport de Dieng (1997) indique pour chacun des piézomètres et des puits de la moyenne Vallée : le code, le pays, la profondeur, la formation géologique, la distance au cours d'eau et le nom du cours d'eau, les coordonnées géographiques, la proximité à une zone inondée ou à un périmètre irrigué.

On trouvera en annexe au présent rapport la durée de la période de suivi pour chacun de ces piézomètres.

Les données sont disponibles à l'OMVS.

✶ II.C. Les caractéristiques hydrodynamiques des nappes.

Dans le cadre du Programme EQUSEN, des travaux de caractérisation des différentes formations ont été menés. :

- sondages géophysiques (notamment électriques) pour définir les formations alluviales, leur géométrie, et dessiner les profils.
- Essais de pompage pour caractériser les paramètres hydrodynamiques.
- Plusieurs essais de pompage de longue durée ont été menés sur les piézomètres de gros diamètre de l'OMVS, fournissant un tableau de caractéristiques (cf. p 11 du rapport EQUSEN).

Les résultats de caractérisation hydrodynamique obtenus par Illy 1973 et Equesen 1993 sur les formations Quaternaires, Eocène et Maastrichtienne sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (qui complète celui de Dieng 1997) :

Nappes de formation Quaternaire			
Sondage de	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement	Source
Kanel (F1)	6,0 10 ⁻³	2,0 10 ⁻³	Illy 1973
Matam (F5)	7,2 10 ⁻³	0,6 10 ⁻³	Illy 1973
Bogué (Fg bis)	0,7 10 ⁻³	1,3 10 ⁻³	Illy 1973
Nianga (F10)	9,2 10 ⁻³		Illy 1973
Nianga (F12)	0,07 10 ⁻³		Illy 1973
Saldé	1,3 10 ⁻³		Illy 1973
Podor (GA 237)	5,5 10 ⁻³	0,45 10 ⁻³	Equesen 1993
Mbakhna (GA 334)	15 10 ⁻³	2,2 10 ⁻³	Equesen 1993
Thilogne (GA 318)	9,5 10 ⁻³	0,2 10 ⁻³	Equesen 1993
Wali (DA 250)	5,0 10 ⁻³	0,07 10 ⁻³	Equesen 1993
Kanel (GA 346)	17 10 ⁻³	0,054 10 ⁻³	Equesen 1993
Keur Macene (DA 032)	2,0 10 ⁻³	0,45 10 ⁻³	Equesen 1993
Lac de Guiers (GA 26)	1,0 10 ⁻³	0,45 10 ⁻³	Equesen 1993
Diana (DA 001)	2,5 10 ⁻³	0,25 10 ⁻³	Equesen 1993

Nappes de formation Eocène			
Sondage de	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement	Source
Boynadj (GA 368)	9,0 10 ⁻³	850 10 ⁻³	Equesen 1993
Bbakana (GA 333)	40 10 ⁻³	8,5 10 ⁻³	Equesen 1993
Thilogne (GA 319)	7,5 10 ⁻³	12 10 ⁻³	Equesen 1993
Wali (DA 249)	8,0 10 ⁻³	0,051 10 ⁻³	Equesen 1993
Youmaniré (DA 241)	21 10 ⁻³		Equesen 1993
Mbagne (DA 264)	9,0 10 ⁻³	0,58 10 ⁻³	Equesen 1993
Bagoudine (DA 268)	12 10 ⁻³	?	Equesen 1993
Mafoundou (DA 220)	40 10 ⁻³	0,2 10 ⁻³	Equesen 1993

Nappes de formation Maastrichtienne			
Sondage de	Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement	Source
Kanel (GA 345)	15 10 ⁻³	0,42 10 ⁻³	Equesen 1993

La transmissivité des nappes est globalement plus forte à l'amont de la vallée (Dieng 97)

II. Les échanges Fleuve – Nappe en régime naturel et en régime de gestion

L'analyse et le traitement des données piézométriques recueillies entre 1989 et 1992 a fait l'objet de trois rapports :

- Synthèse des données piézométriques du Delta du Fleuve Sénégal
- Synthèse des données piézométriques aux environs du barrage de Manantali
- Synthèse et analyse des données hydrogéologiques de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal

Cette analyse a fourni des enseignements importants sur la dynamique naturelle des nappes et des échanges fleuve-nappe. Il est plus difficile d'en tirer des enseignements sur l'effet de la gestion des ouvrages. En effet le barrage de Manantali n'était pas encore en service et la diversité des années hydrologiques est la première cause de la variation des résultats observés.

Dans un premier temps ce rapport fait le point des résultats sur le fonctionnement naturel des nappes (III.A.), avant de s'intéresser plus particulièrement aux effets observés ou potentiels de la gestion des ouvrages du Fleuve Sénégal (III.B.).

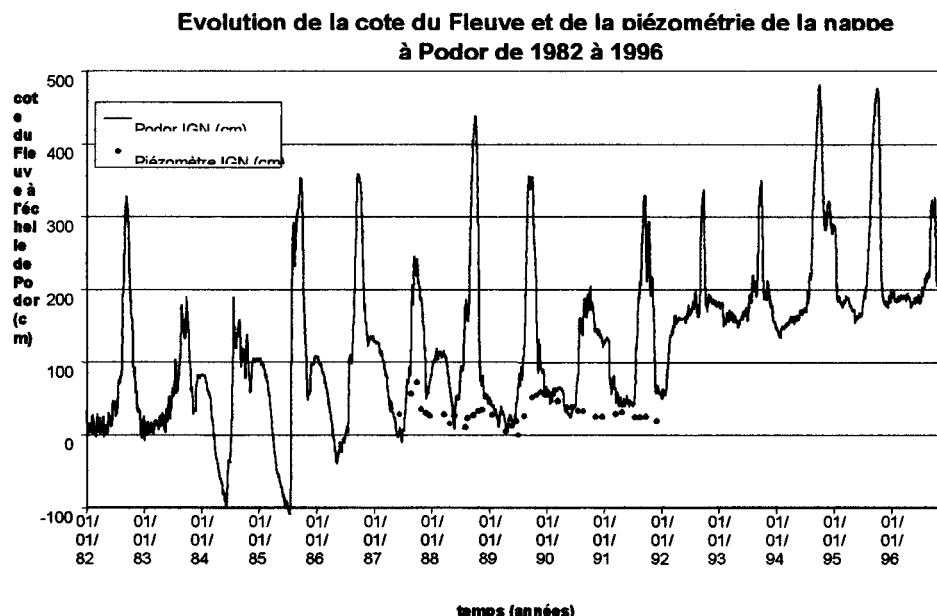
III.A. La dynamique naturelle des nappes

L'écoulement général des nappes

Il semble, au vu de cartes piézométriques établies entre Bakel et Saldé en Novembre 1988 (juste après les hautes eaux) et Juin 1989 (basses eaux) (cf. rapport Equesen 1993 Tome 4, Chapitre VII), que le Fleuve soit constamment en position d'alimentation de la nappe alluviale sur le tronçon Bakel – Saldé. En revanche, à l'aval de Saldé on rencontre différentes situations relatives entre le niveau de l'eau dans le fleuve et le niveau de l'eau dans la nappe.

Un cycle de fluctuation annuel

Au cours des quelques années de suivi, la nappe de l'aquifère alluvial quaternaire a montré des oscillations annuelles de niveau dont l'ampleur est fonction de la distance au Fleuve et de la proximité d'un périmètre irrigué.



Les hautes eaux du Fleuve provoquent une recharge de la nappe qui fait monter sa piézométrie. Lorsque le niveau dans le Fleuve descend, le niveau dans la nappe baisse, soit par drainage de la nappe vers le Fleuve, soit par vidange d'ensemble de la nappe (ce qui explique que le niveau piézométrique de la nappe puisse rester en permanence inférieur au niveau dans le Fleuve).

On trouve en fait une grande diversité de situations de la piézométrie de la nappe par rapport aux niveaux dans le Fleuve (Touzi 1998) .

Analysant l'amplitude des fluctuations du niveau de la nappe en fonction de la distance au Fleuve, Dieng propose, pour la moyenne Vallée, le tableau synthétique suivant :

	Variation annuelle du niveau piézométrique				
	Dagana	Podor	Kaedi	Matam	Selibabi
Hors périmètre et loin des cours d'eau	0,2 à 0,3m	0,5 à 0,8m	0,2 à 0,5m	0,5 à 1,2m	0,4 à 1m
A côté des cours d'eau	1m	0,8 à 1,85m	0,6 à 2,5m	1,6 à 3m	–
A l'intérieur des périmètres	1,9m	0,8 à 1,5m	1 à 2m	–	1m
Dans les périmètres et à côté des cours d'eau	–	1,5 à 2m	2,7m	–	3m

La communication entre les nappes

La relation hydraulique entre les différentes nappes (nappes alluviale, Eocène et Maastrichienne) est globalement très bonne. Elle présente toutefois quelques variations spatiales :

- La communication entre la nappe alluviale et la nappe Eocène est très bonne sur la zone de Podor où il n'y a pratiquement pas de différence de niveau entre ces deux nappes. Elle est moins bonne sur la zone de Kaedi où la différence de niveau peut atteindre 1m. Elle est de nouveau très bonne sur la zone de Matam
- La communication entre la nappe du Maastrichien et les autres nappes supérieures (alluviale et Eocène) est bonne sur la zone de Matam.

L'estimation du volume échangé entre le Fleuve et la nappe

Dieng (1997) reprend la méthode utilisée par Illy pour l'estimation du volume échangé entre le fleuve et la nappe, calculé sur la base de l'amplitude de fluctuation de la nappe en fonction de la distance au Fleuve. Il obtient ainsi une estimation de 330 Millions de m³/an (contre 250 Millions de m³/an estimés par Illy).

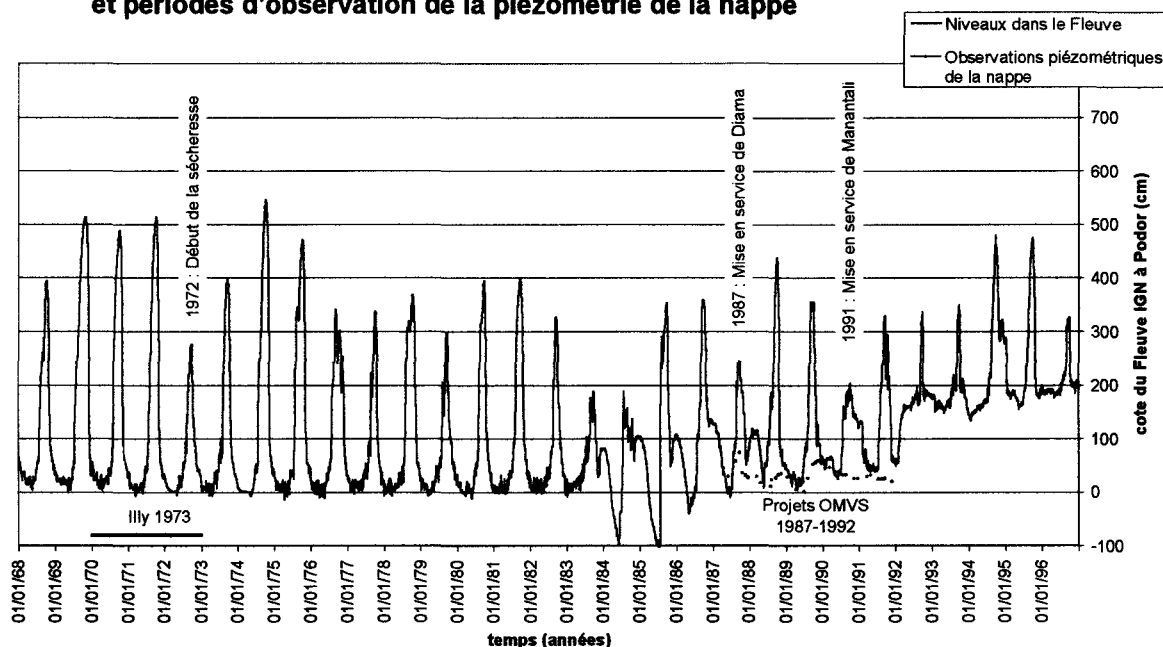
Comme nous le verrons plus loin il est nécessaire d'affiner par la modélisation cette méthode d'estimation qui demeure très grossière (les lois amplitude de fluctuation du niveau en fonction de la distance au Fleuve sont très mal corrélées aux mesures, la distance limite de 5000m est arbitraire, le coefficient d'emmagasinement pris égal à 0,1 est également une estimation).

III.B. La dynamique des nappes sous l'effet de la gestion des ouvrages

Pour comprendre la dynamique des eaux souterraines sous l'effet de la gestion des ouvrages, l'idéal serait de disposer de chroniques longues d'observation piézométrique des nappes couvrant les périodes avant, pendant et après la mise en service des ouvrages. Nous ne disposons pas de telles chroniques d'observation. En revanche nous disposons de longues chroniques d'observation du régime des eaux de surface.

Le graphique ci-dessous illustre pour la période 1968-1996 et pour la zone de Podor l'évolution observée de la dynamique hydrologique des eaux de surface et les quelques observations piézométriques de la nappe.

**Evolution des niveaux d'eau à Podor de 1968 à 1996
et périodes d'observation de la piézométrie de la nappe**



On conçoit aisément que la durée et le nombre des observations piézométriques sont insuffisants pour permettre une quantification et développer une capacité de prévision de l'impact de la sécheresse et de la gestion sur les eaux souterraines.

On dispose toutefois de modèles simplifiés qui peuvent nous permettre de reconstituer les effets des changements du régime de surface sur le régime des eaux souterraines.

Ce rapport analyse dans un premier temps les principales évolutions du régime des eaux de surface (niveaux à l'étiage, amplitude de fluctuation annuelle, surface inondée et durée de la submersion, irrigation) pour lesquelles des données sont disponibles (III.B.1.) puis dans un second temps leurs effets observés ou prévus sur la nappe (III.B.2.).

III.B.1. Les principales modifications du régime hydrologique des eaux de surface

✕ A. Observation de l'évolution des niveaux d'eau dans le Fleuve

Les cinq figures des pages suivantes présentent l'évolution des niveaux observés dans le Fleuve entre 1952 et 1996 aux échelles de Bakel, Matam, Saldé, Podor et Dagana. Les niveaux à ces échelles sont représentatifs des conditions d'alimentation de la nappe par le Fleuve le long de la vallée.

Les principaux constats sont les suivants :

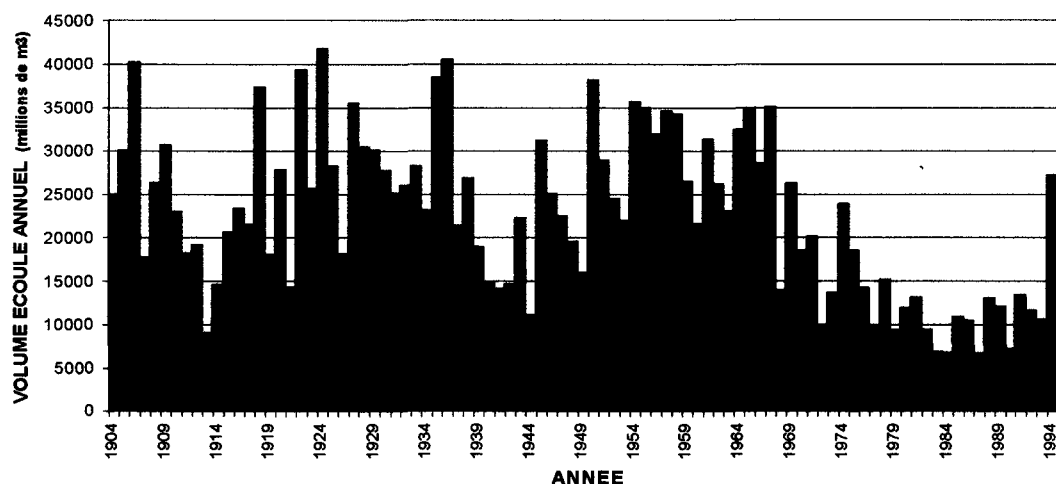
- Les niveaux maximum annuels, qui traduisent les débits de crue, ont nettement diminué entre la période 1952-1971 et la période 1972-1996. Ceci résulte de la sécheresse naturelle qui affecte la région depuis 1972
- Les niveaux de base des différentes stations sont restés relativement constants jusqu'en 1972, puis ont diminué sous l'effet de la sécheresse (à l'exception de Matam et Podor influencés par l'aval).
- Les niveaux de base sont remontés à partir de 1987 sous l'effet conjugué du barrage de Diama (Dagana et Podor) et du soutien d'étiage (Bakel, Matam, Saldé). Cette remontée du niveau de base est de l'ordre de 170 cm à Dagana et Podor, 200 cm à Saldé, 130cm à Matam (données de mauvaise qualité) et 130 cm à Bakel

Cette superposition des effets de la sécheresse et de la gestion des ouvrages doit rendre très prudent dans tout travail de comparaison et d'interprétation de données piézométriques de différentes années. En l'absence de chroniques piézométriques de longue durée ce type de comparaison nous semble hasardeux et l'utilisation de modèles, même simplifiés, est particulièrement recommandée.

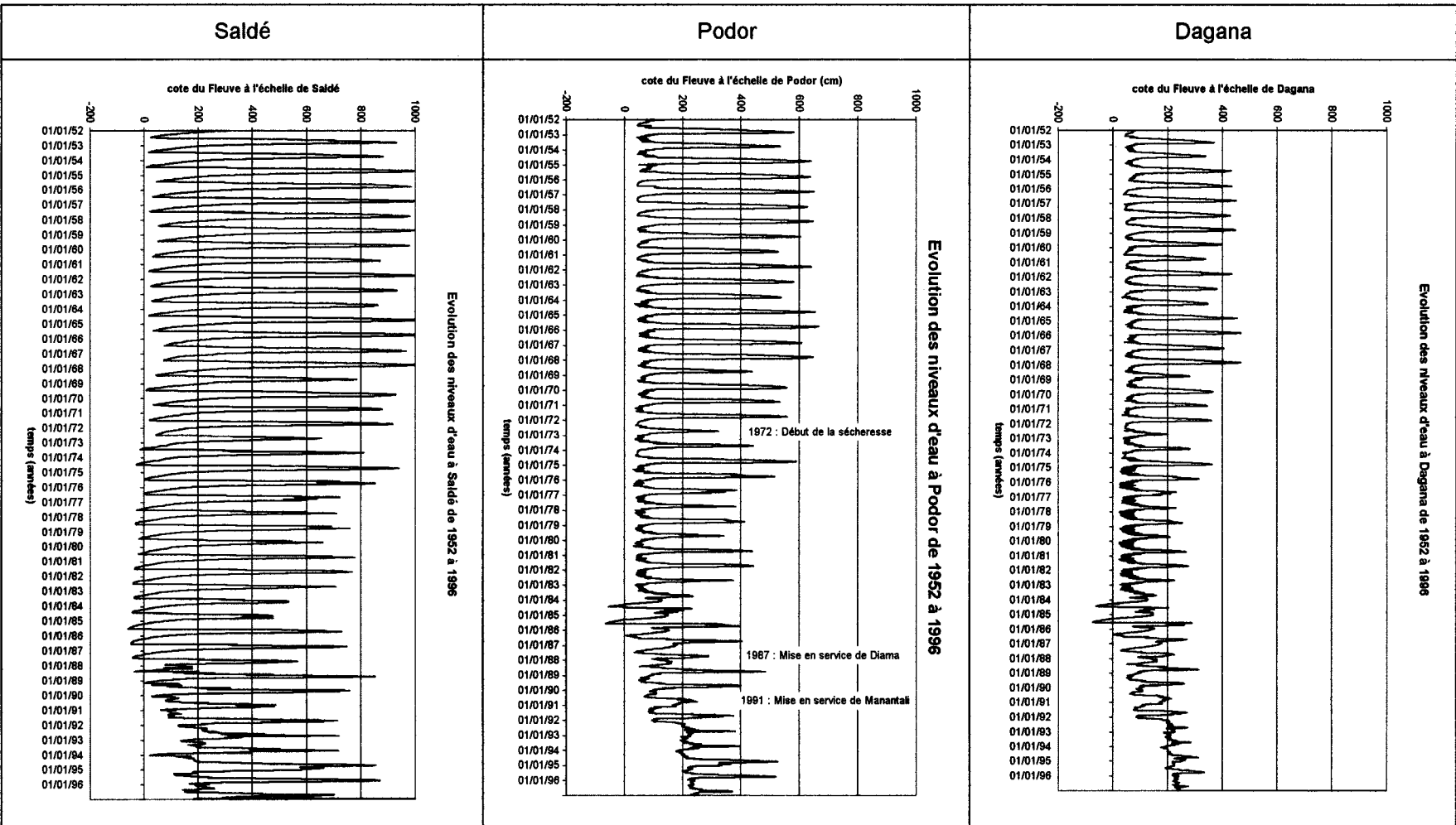
B. La sécheresse

La principale modification hydrologique de ces vingt dernières années n'est pas imputable à la mise en place et à la gestion des ouvrages du Fleuve Sénégal mais à une sécheresse naturelle qui a fortement limité la lame d'eau écoulee du bassin comme l'illustre la figure suivante :

FLEUVE SENEGAL : VOLUME ANNUEL ECOULE A BAKEL
DE 1904 A 1995



Comme signalé plus haut toute comparaison interannuelle doit d'abord préciser le régime hydrologique naturel de l'année.



C. Comparaison sur 27 ans (1970-1996) de l'effet de la gestion par rapport au régime naturel

Pour séparer l'impact de la gestion de celui de la variabilité hydrologique naturelle, nous avons comparé sur 27 ans (1970-1996) la dynamique des niveaux à Bakel selon un scénario de régime naturel et un scénario de gestion optimisée.

Le scénario de gestion optimisée a été élaboré à l'aide du logiciel SIMULSEN (ORSTOM). La gestion de la retenue a été simulée suivant les consignes listées ci-dessous par ordre de priorité décroissante :

- *Respect d'une cote minimale de 187 m dans la retenue. D'après les informations obtenues récemment, il est nécessaire que le niveau ne descende pas en dessous de cette cote, afin de ne pas risquer d'endommager le parement amont de l'ouvrage (batillage)*
- *Respect d'un débit réservé de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la sortie du barrage et à Bakel*
- *fourniture d'eau nécessaire pour l'irrigation de 100.000 ha de cultures (suivant les hypothèses des études de Gibb concernant ces besoins), augmentée de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la compensation des pertes et de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la consommation humaine*
- *production de 90 MW d'électricité (ou du maximum productible quand le barrage déverse) si le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage S_{turb} fixé à 198m. En dessous de ce seuil, cette consigne n'est pas prise en compte.*
- *soutien de crue visant à réaliser à date fixe un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel. La règle adoptée pour le déclenchement annuel du soutien est la suivante : si la cote du lac dépasse au 20 août un seuil de soutien S_{sout} fixé à 195m, alors le soutien de crue est réalisé de façon à caler sur le 28 août à Bakel, le premier jour de palier de débit à $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dans le cas contraire, cette consigne n'est plus prise en compte jusqu'à la fin de l'année, et le soutien de crue n'est pas réalisé.*

La simulation a été menée sur la période 1970-1997, la cote initiale du lac étant fixée à la limite de débordement (208,05m le 1^{er} janvier 1970). On envisage qu'il est toujours turbiné la part maximale turbinable du débit lâché.

Les deux figures de la page suivante illustrent cette comparaison.

La première figure montre pour les années 1987, 1988 et 1989 l'évolution des niveaux à Bakel en régime naturel et en régime de gestion. Ces trois années sont contrastées :

- 1987, année sèche, présente une crue naturelle de faible maximum. Ce maximum aurait été renforcé par la gestion.
- 1988 est une année naturellement humide (pour la période 1972-1997). La gestion aurait écrêté la crue et diminué le maximum
- 1989 est une année moyenne où crue naturelle et crue de gestion sont comparables.

Pour les trois années on note que le niveau à l'étiage est fortement relevé par la gestion (d'environ 2 mètres). On note également que le régime de gestion donne des hydrogrammes semblables d'une année à l'autre.

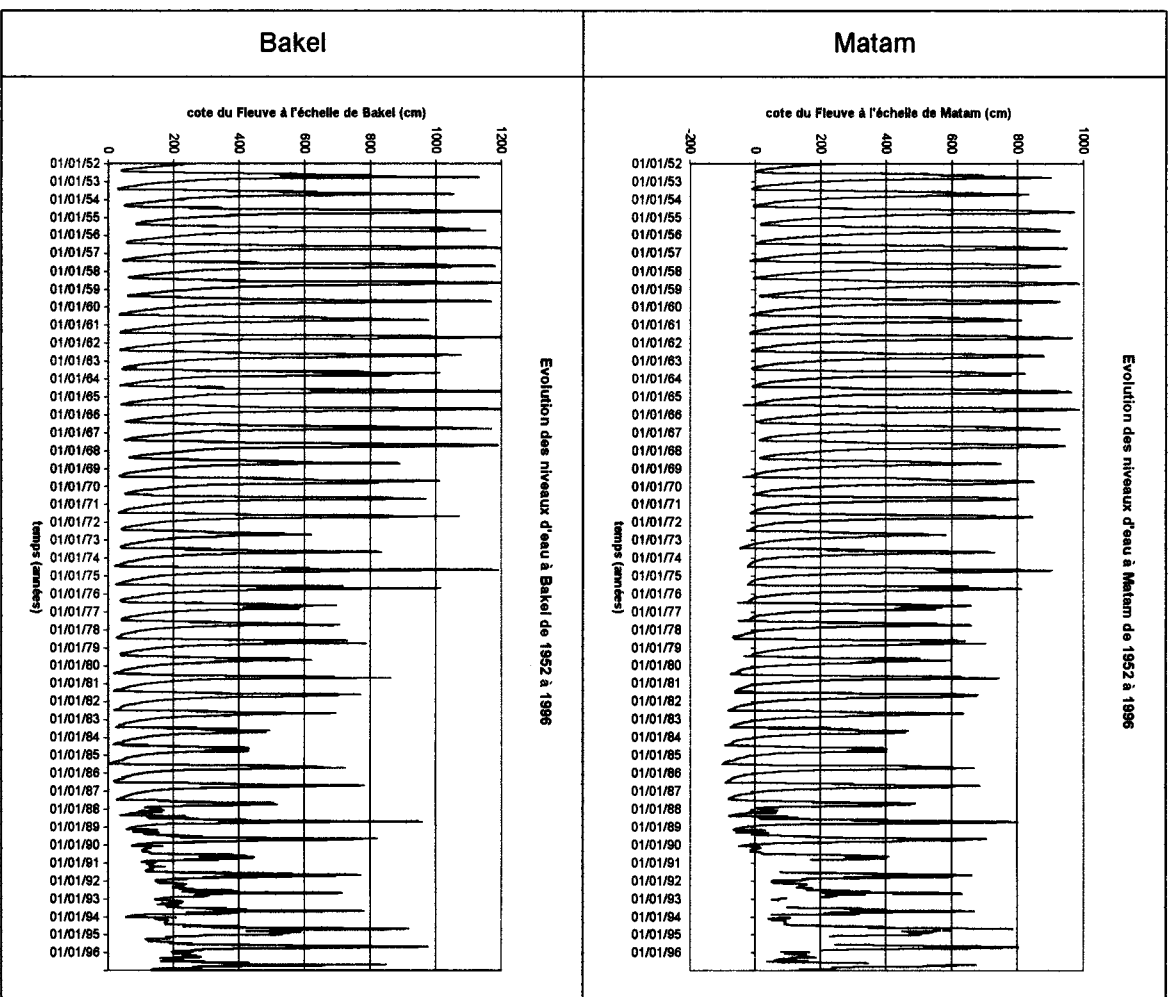
La seconde figure présente pour les 27 années le niveau minimum non dépassé 15 jours (que l'on juge représentatif des étiages) et le niveau maximum dépassé 30 jours (que l'on juge représentatif de la propagation de la crue dans la vallée) à Bakel.

Dans 70% des cas (19 années sur 27) le niveau maximum en régime naturel est supérieur au niveau maximum en régime de crue. Pour huit années la gestion du soutien de crue artificielle a permis de générer une crue supérieure à la crue naturelle. Dans tous les cas les niveaux en étiage sont fortement relevés par la gestion.

Ainsi on peut considérer que sur la période 1970-1996, la gestion aurait, à Bakel :

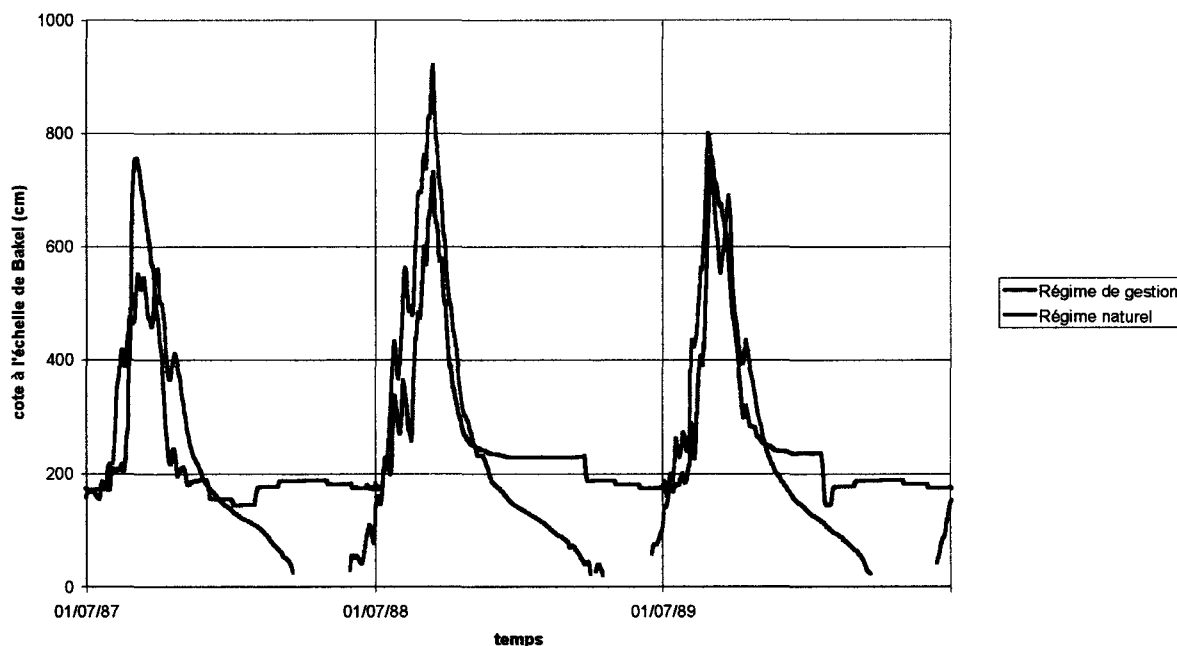
- relevé le niveau de base en moyenne de 126 cm (passé de 44 cm à 170 cm)
- réduit l'amplitude de fluctuation annuelle⁵ de 180 cm (passé de 509 cm à 329 cm)

⁵ amplitude de fluctuation annuelle définie à Bakel comme la différence entre le niveau maximum dépassé trente jours et le niveau minimum non dépassé 15 jours

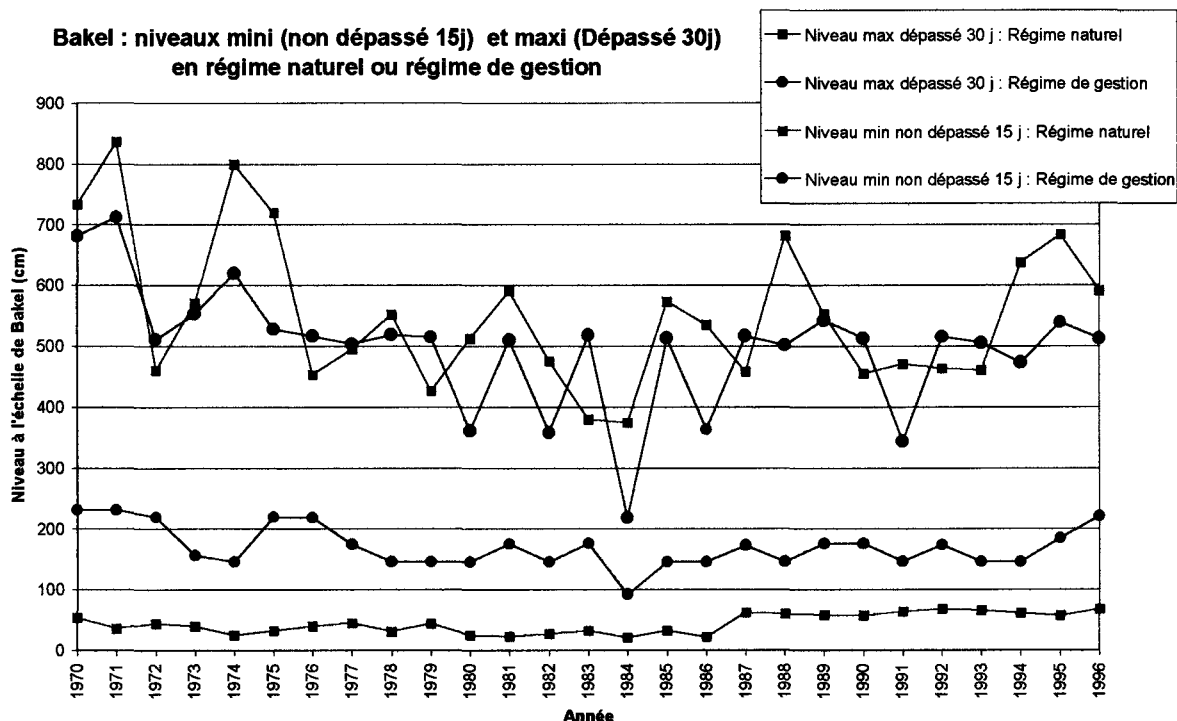


Les valeurs correspondantes pourront être établies pour d'autres stations de la vallée

Comparaison des niveaux à Bakel en régime naturel et en régime de gestion



Comparaison de la dynamique des niveaux à Bakel en régime naturel et en régime de gestion



Comparaison des fluctuations de niveaux à Bakel en régime naturel et en régime de gestion

D. Superficies inondées et durée de submersion

L'extension des superficies inondées par la crue et leur durée de submersion peuvent jouer un rôle important dans la recharge des nappes.

Des travaux de traitement d'images satellite sont actuellement en cours pour quantifier, par tronçon de Fleuve, les superficies inondées pour différentes années de régimes hydrologiques contrastés. Ces données seront ensuite utilisées pour caler un modèle de prévision de la superficie inondée en fonction de l'hydrogramme à Bakel.

Nous développons plus loin la dynamique de recharge des nappes à partir des zones inondées.

E. Les périmètres irrigués

Le développement des périmètres irrigués, et particulièrement des périmètres rizicoles qui restent en eau plusieurs mois, favorise la percolation profonde des eaux de surface vers les nappes.

Dieng (1997) a mené une estimation du volume infiltré en profondeur (au-delà de la couche racinaire) sous les périmètres irrigués, qui l'amène à un chiffre de 30 à 100 mm/an selon le type de périmètre (PIV ou casier).

Pour un total de 100 000 ha irrigués, la percolation totale serait de l'ordre de 65 Millions de m³.

III.B.2. Les effets sur les eaux souterraines des modifications du régime des eaux de surface

A. Comparaison des données piézométriques de la nappe en 1971-1972 et en 1987-1992

Les tentatives de comparaison des piézométries de 1971-1972 (mesures Illy) et de 1989-1992 (mesures Projet OMVS) n'apportent qu'une information limitée et ne permettent pas une réelle quantification des échanges Fleuve-Nappe avant et après mise en service des ouvrages.

Amplitudes de fluctuation :

Ainsi par exemple, Dieng a comparé, sur la moyenne vallée, l'amplitude des fluctuations de niveau de la nappe observée avant la mise en service des barrages (observations par Illy en 1971 et 1972) et après la mise en service (observations par le projet USAID entre 1987 et 1991). Il conclue d'une part que l'influence de la recharge se fait sentir plus loin du Fleuve après barrage qu'avant barrage, d'autre part que l'amplitude de fluctuation près du Fleuve semble avoir diminué après barrage.

Ces conclusions nous semblent devoir être relativisées car les observations sont très dépendantes de l'année hydrologique. Le tableau ci-dessous indique les valeurs de fluctuations du niveau dans le Fleuve à Podor pour les différentes années.

	Niveau max à Podor	Niveau min à Podor	Fluctuation à Podor
1971	514	-7.5	521
1972	276	-7	283
1987	245	-11	256
1988	438	5	433
1989	356	5	351
1990	204	24	180
1991	329	39	290
1992	335	49	286

L'année 1971 apparaît comme une année bien plus humide que les autres ce qui suffirait à expliquer que les fluctuations près du Fleuve observées par Illy soient supérieures à celles observées en 1989

Volumes échangés

Par ailleurs Dieng a repris la méthode d'Illy pour estimer les volumes échangés entre Fleuve et nappe par le volume de la zone de fluctuation. Il a ainsi comparé les estimations d'Illy (250 millions de m³ / an) avec des estimations sur les données de 1989 (330 millions de m³/an).

Là aussi les chiffres doivent être relativisés (les coefficients de corrélation des lois fluctuation en fonction de la distance sont mauvais) et remis en perspectives par rapport à l'année hydrologique (1971 était bien plus humide que 1989).

B. Effets du relèvement du niveau de base

Le relèvement du niveau de base dans le Fleuve, lié à la fois au relèvement de la ligne d'eau à l'amont de Diama et au soutien des débits d'étiage, est de l'ordre de 1,5 m tout le long du Fleuve, de Diama à Bakel.

Si l'on considère que le niveau moyen de la nappe alluviale à l'étiage s'est relevé de moitié (0,75m) le volume qui a été stocké dans la nappe est de l'ordre de 225 Millions de m³.

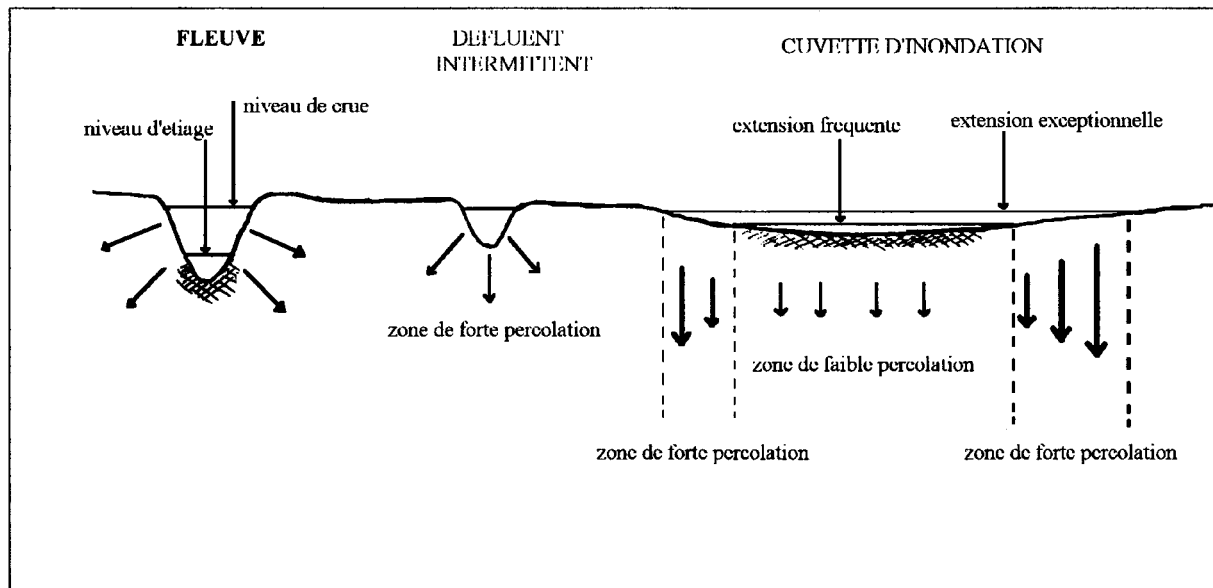
Il conviendrait de vérifier l'extension et l'intensité de cette remontée du niveau de base de la nappe longitudinalement et transversalement à la Vallée, pour déterminer si cette recharge s'écoule vers l'extérieur de la vallée ou bien reste dans la nappe alluviale et joue elle-même un rôle positif dans le soutien des étiages.

X C. Contribution des zones inondées à la recharge des nappes

Si le soutien des étiages et le relèvement du Plan d'eau à l'amont de Diama vont indéniablement dans le sens d'une augmentation de la recharge des eaux souterraines, la limitation de l'extension des zones inondées et de leur durée moyenne de submersion peut jouer un effet contraire

Il est aujourd'hui impossible, faute d'un dispositif de mesure et de suivi adapté, de quantifier le rôle joué par les zones d'inondation dans la recharge des nappes. Les quelques piézomètres installés dans les cuvettes inondées n'ont généralement pas été suivis au cours des phases d'inondation en raison de leur difficulté d'accès.

On peut légitimement supposer que le fond des cuvettes, ayant accumulé des sédiments fins et étant constitué de sols argileux lourds très peu perméables, est peu propice à la percolation verticale et à la réalimentation de la nappe alluviale. En revanche les défluent intermittents et les zones périphériques des cuvettes peuvent assurer une part sensible de la réalimentation des eaux souterraines (cf. figure ci-dessous).



Coupe transversale schématique de la Vallée et processus de recharge de la nappe à partir du Fleuve, des défluent intermittents et des cuvettes d'inondation

Pour améliorer notre compréhension des mécanismes d'échange entre le Fleuve, les cuvettes d'inondation et la nappe, trois approches complémentaires devraient être mises en œuvre :

- Le suivi régulier des débits (par mesure directe hebdomadaire) en différentes sections du Fleuve pour quantifier les différents éléments du bilan hydrique (Débits amont et aval, évaporation, infiltration, stockage, drainage des cuvettes et de la nappe)
- Un dispositif de mesure spécifique sur une cuvette d'inondation, suivi sur plusieurs années, avec une caractérisation hydrodynamique conséquente de la cuvette. Ce dispositif permettrait de quantifier localement le lien entre le volume infiltré et l'extension de la zone inondée. Resterait toutefois le problème délicat de l'extension de ces résultats locaux à l'ensemble de la vallée.
- Une approche de modélisation permettant de représenter les processus d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines et de les quantifier selon différents scénarios de débits et niveaux dans le Fleuve et d'extension des zones inondées

Nous allons illustrer ici le troisième point en étudiant de façon schématique la contribution d'une zone d'inondation à la recharge de la nappe. Il s'agit ici d'une étude préliminaire montrant la faisabilité et l'intérêt de la modélisation, et non pas d'une véritable estimation des volumes de recharge, qui nécessiterait un travail plus important.

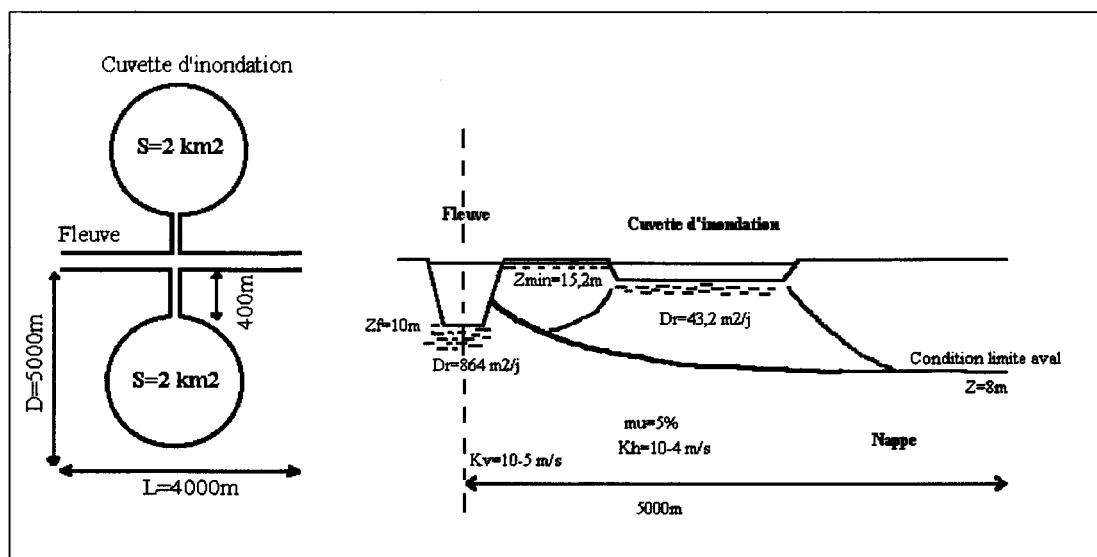
Contribution des zones d'inondation à la recharge de la nappe. Approche par la modélisation

Une étude a été réalisée par l'ORSTOM sur la base d'un modèle de simulation (Touzi 1998) avec pour objectifs :

- De représenter la dynamique de la recharge de la nappe et les rôles respectifs du Fleuve et d'une zone d'inondation dans cette recharge
- De comparer sur 5 années les volumes de recharge en régime naturel et en régime de gestion (voir D.)

Dynamique de la recharge de la nappe et rôle de la zone d'inondation

Les résultats reposent sur une schématisation volontairement simplifiée du système fleuve – zone d'inondation – nappe. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été choisies sur la base des résultats de l'étude de Diagana (1993).



Les figures de la page suivante illustrent la dynamique de la nappe en interaction avec le Fleuve seul ou bien avec le Fleuve et une zone d'inondation.

Cas du Fleuve seul : Lorsque le niveau dans le Fleuve monte, la recharge démarre en atteignant d'abord les piézomètres les plus proches. Lorsque le niveau dans le Fleuve redescend, les niveaux piézométriques continuent à monter tant que le niveau du Fleuve leur est supérieur puis ils décroissent. On observe alors un maximum piézométrique intermédiaire entre le Fleuve et la limite aval : une partie de la nappe est drainée par le Fleuve, une autre est drainée par la condition limite aval.

Cas du Fleuve avec zone d'inondation : Le processus est le même mais la forme piézométrique de la nappe est influencée par la présence de la cuvette. En phase de descente des eaux, la cuvette constitue la zone de piézométrie haute et alimente à la fois la nappe et le retour vers le Fleuve.

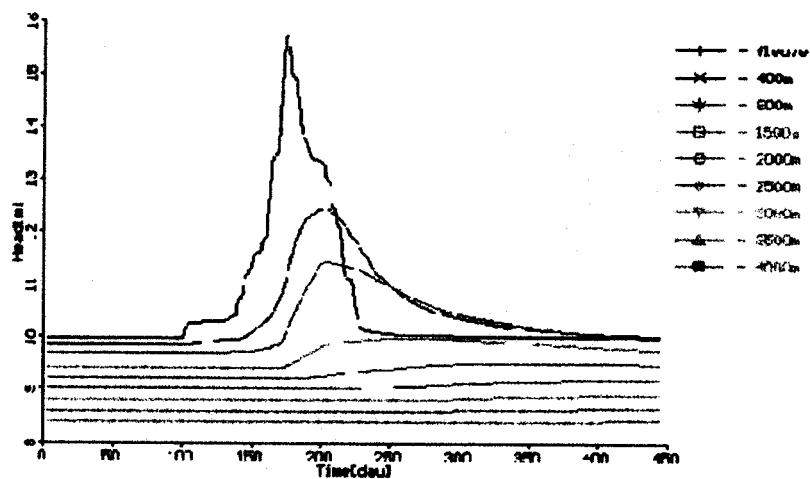
Comparaison des volumes de recharge de la nappe avec ou sans zone d'inondation:

Il est intéressant, sur la base des paramètres choisis pour le modèle, de comparer les volumes échangés entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans le cas du Fleuve seul ou avec cuvettes d'inondation.

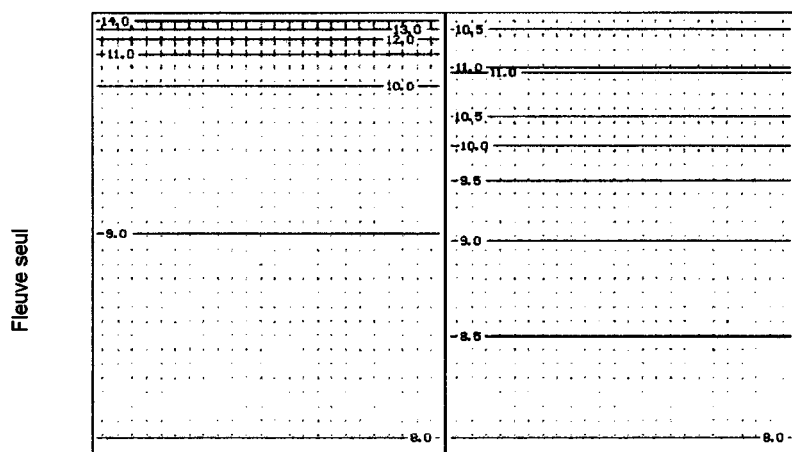
	Recharge à partir du Fleuve	Recharge à partir de la cuvette	Recharge Totale (Vt)	Vt / VFseul	Extrap. Vallée
Fleuve seul	385 402 m³/an		385 402 m³/an	1.00	173 Millions m³
Fleuve+cuvette	189 216 m³/an	472 883 m³/an	662 098 m³/an	1.71	298 Millions m³

On constate que la présence de la cuvette a augmenté de près de 70% la recharge totale de la nappe. Les cuvettes jouent également un rôle important en transférant une partie du volume d'écoulement du Fleuve de la période de crue à la période d'étiage.

Le volume de recharge extrapolé à l'ensemble de la vallée n'a bien sûr qu'une valeur indicative mais on constate qu'il est du même ordre de grandeur que les estimations de Illy et Dieng.



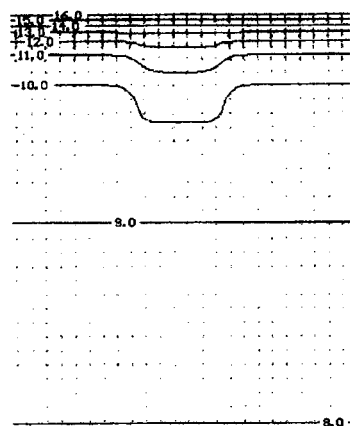
Recharge de la nappe à partir du Fleuve : évolution des piézométries en fonction de la distance au Fleuve



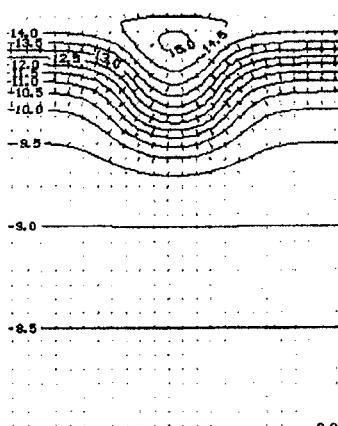
a) Phase de montée ($t = 163j$)
Niveau dans le fleuve : 14,5 m
(Écoulement dans le sens fleuve - nappe)

Phase de descente ($t = 270j$)
Niveau dans le fleuve : 10,2 m
(Écoulement dans le sens nappe - fleuve dans la partie amont du maillage)

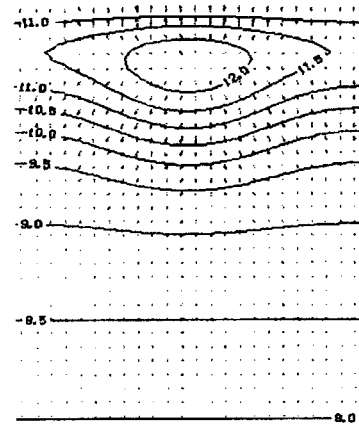
Fleuve avec cuvettes d'inondation



a) 7 jours après la mise en eau de la cuvette.
Niveau dans le fleuve : 16,8 m
Niveau dans la cuvette : 16,8 m



b) Un mois après la mise en eau de la cuvette
Niveau dans le fleuve : 14,3 m
Niveau dans la cuvette : 15,5 m

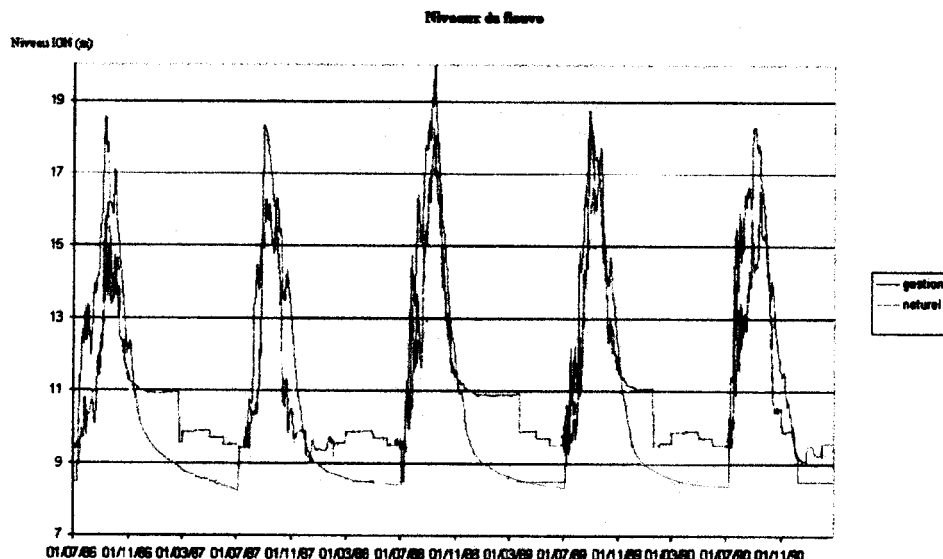


c) Fin de la phase de descente dans le fleuve
Niveau dans le fleuve : 11 m
Cuvette à sec

**Cartes piézométriques de la nappe à différentes phases de la recharge à partir du Fleuve seul
(2 figures du haut) ou du Fleuve avec cuvettes d'inondation (3 figures du bas)**

D. Comparaison sur 5 années des volumes de recharge estimés en régime naturel et en régime de gestion

L'étude compare, sur le modèle simplifié présenté plus haut, le volume de recharge des eaux souterraines au cours de la période 1986-1991 selon que le Fleuve aurait été en régime naturel ou bien géré selon les règles de gestion optimisée (cf. III.B.1.C.). Elle prend en compte les différences de niveau dans le Fleuve entre les deux scénarios ainsi que les différences de durées de submersion, mais pas les différences d'extension des zones inondées (données non disponibles)



Le tableau ci-dessous indique année par année le volume de la recharge du Fleuve vers la nappe (en m3 pour une rive et un tronçon de 4 km de Fleuve) en régime naturel et en régime de gestion des ouvrages pour un sous-système situé à l'amont de Matam (Waoundé).

Saison	Vn = Volume infiltré en crue naturelle	Vg = Volume infiltré en gestion "optimisée"	Rapport Vg/Vn (%)
1986-1987	613085	514254	84
1987-1988	293639	429374	146
1988-1989	625698	534987	86
1989-1990	434396	453482	104
1990-1991	390432	402250	103
moyenne	471450	466869	99

Pour la période 1986-1991 et pour le système considéré (selon la schématisation adoptée), les volumes de recharge des eaux souterraines sont donc globalement équivalents.

x **E. Qualité des eaux souterraines.**

L'analyse de la conductivité des eaux souterraines ($\mu\text{S/cm}$), traduite en minéralisation (g/l), et sa cartographie sur la vallée donne les résultats suivants :

- C'est sur la partie ouest de la vallée et en période de hautes eaux que l'on trouve les conductivités les plus élevées dans la nappe alluviale.
- On constate le même phénomène sur la nappe de l'Eocène.
- Les valeurs de conductivité ont tendance à diminuer par rapport à celles déterminées par Illy (1973)

Sur la moyenne Vallée on ne dispose pas de données sur la qualité des eaux souterraines en termes de nitrates et phosphates.

Compléter avec les données Delta

IV. Conclusions et Recommandations :

Les eaux souterraines de la Vallée du Fleuve Sénégal sont organisées en trois aquifères principaux superposés : le Maastrichien (le plus ancien), l'Eocène et le Quaternaire (nappe de formations alluviales récentes). Le Maastrichien et l'Eocène sont des nappes captives mais ont une très bonne communication piézométrique (équilibre des pressions) avec la nappe alluviale.

Les effets de la gestion du Fleuve sur les eaux souterraines sont donc principalement sensibles sur la nappe alluviale.

Un réseau de piézomètres et de puits existe mais n'a été observé de façon systématique qu'au cours des périodes 1971-1972 et 1989-1992.

Ces observations ont permis de déterminer certaines caractéristiques hydrodynamiques des aquifères, de vérifier leur communication, et de saisir les grands traits de leur fonctionnement : fluctuations annuelles liées aux crues du Fleuve et s'atténuant avec la distance au Fleuve.

Elles sont en revanche insuffisantes pour permettre d'apprécier et de quantifier l'impact de la gestion du Fleuve sur la recharge des eaux souterraines.

La gestion des eaux de surface du Fleuve a un quintuple impact sur la recharge des eaux souterraines :

- Le relèvement de la ligne d'eau à l'amont de Diama et le soutien des étiages ont fait remonter d'environ 1,50 m le niveau de base du Fleuve sur l'ensemble de la Vallée (de Diama à Bakel). Ceci a dû se traduire (il n'y a pas encore eu d'observation systématique) par une remontée généralisée du niveau de la nappe alluviale. On peut estimer à 250 Millions de m³ l'augmentation du volume stocké dans le sous-sol de la Vallée depuis la mise en service des ouvrages. Cette élévation du niveau de base de la nappe rend plus rapide la propagation à travers la nappe alluviale des fluctuations de niveau dans le Fleuve.
- L'amplitude de fluctuation des niveaux dans le Fleuve a diminué du fait de la gestion et de l'écrêtage des crues (passage de l'amplitude de fluctuation significative à Bakel de 5,10 m à 3,30 m).
- L'extension des zones inondées et leur durée de submersion sont réduites ce qui pénalise la recharge de la nappe. Il est toutefois impossible de quantifier cet effet sur la base des informations actuellement disponibles. Seul un travail de modélisation peut renseigner sur l'impact possible de cette réduction de la contribution des zones inondées mais il doit pour cela utiliser une quantification, actuellement en cours d'élaboration, de l'extension des superficies inondées en fonction de la gestion.
- Le développement des périmètres irrigués accroît localement la percolation profonde vers la nappe alluviale, de l'ordre de 30 à 100 mm/an, soit 65 Millions de m³/an pour 100 000 ha irrigués.
- En termes de qualité des eaux souterraines, la zone du Delta est la principale zone affectée. Elle connaît des remontées de taux de minéralisation (sels d'origine marine dans la nappe) à chaque période de hautes eaux.

En l'état actuel des connaissances, la gestion des eaux de surface du Fleuve Sénégal semble ne pas avoir d'effet négatif sur la dynamique des eaux souterraines, à l'exception de la zone du Delta où l'hydromorphie se développe (nécessité de réseaux d'émissaires pour le drainage et d'une évacuation raisonnée de ces eaux de drainage), accompagnée de remontées salines qui constituent un phénomène transitoire (dont la durée n'a pas été évaluée, l'apport d'eau douce et le drainage devant progressivement évacuer les sels).

Sur le reste de la vallée le rehaussement du niveau de base doit avoir un effet positif tant sur la capacité de prélèvement des puits que sur l'accès à l'eau des écosystèmes forestiers.

Recommandations :

Si ce tableau globalement positif ne soulève pas de contraintes pour la gestion des ouvrages (mis à part le raisonnement des émissaires de drainage sur la partie aval), les lacunes de connaissance sur le fonctionnement réel des aquifères depuis la mise en service des ouvrages nous amènent à formuler trois recommandations, qui s'accordent d'ailleurs avec les recommandations du rapport de Dieng (1997) :

1. La remise en service d'un réseau minimum de piézomètres pour le suivi régulier et à long terme des eaux souterraines le long de la vallée. Une attention particulière devrait être accordée à la recharge par les périmètres irrigués et par les zones d'inondation (pour lesquelles un dispositif spécifique devrait être mis en place). Les données ainsi acquises seront confrontées aux données des périodes 1971-1972 et 1989-1992.
2. La mesure régulière et systématique des débits en différentes sections du Fleuve et l'interprétation détaillée des bilans par tronçons au cours de l'année.
3. Le développement d'une approche de modélisation pour obtenir une vision d'ensemble de la relation eaux de surface – eaux souterraines.

Références Bibliographiques :

1960	Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale Auteur : Archambault J. Imprimeries Berger-Levrault, Nancy	
1973	« Etude Hydrogéologique de la vallée du Fleuve Sénégal, Projet Hydroagricole du bassin du Fleuve Sénégal » Auteur : Illy P. 158 pages Rapport RAF 65061	
1975	Cartes de planification pour l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique sahélienne Auteur : BRGM 93 pages ; Cartes 1 / 1 500 000 ème	
1990	« Senegal River Basin monitoring activity, hydrological issues, Part I – II » Auteur : Hollis G.E. 55p. ; Institute for Development Anthropology	
1992	« Connaissances sur l'inondation dans l'Ile à Morphil » Auteur : Diop A. 57 pages ; Université Cheik Anta Diop de Dakar ; Mémoire de Maîtrise	
1993	Equesen – Environnement et Qualité des Eaux du Sénégal Rapport de synthèse Tome 4 - Chapitre VII : « Relations eaux de surface – eaux souterraines dans la vallée alluviale » Auteurs : Gac, Saos 42 pages ; ORSTOM ; Projet CEE TS 2 0198 F EDB	
1994	« Etudes Hydrogéologiques dans la vallée du Fleuve Sénégal de Bakel à : Relations Eaux de Surface / Eaux Souterraines » Auteur : Diagana A. 123 pages ; Université Cheik Anta Diop de Dakar ; Rapport de Thèse	
1995	« The effects of climate changes on aquifer storage and river baseflow » Auteurs : Cooper D.M., Wilkinson W.B., Arnell N.W. 615-629 = 17 pages ; Hydrological Sciences Vol 40-5	
1997	« Synthèse et Analyse de données Hydrogéologiques de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal » Auteur : Dieng B. 42 pages et annexes ; EIER – OMVS ; Rapport de synthèse	
1998	Formalisation des échanges Fleuve-Nappe en présence de zones d'inondation : cas de la régularisation des crues du Fleuve Sénégal Auteur : Touzi S. 78 pages et annexes ; ORSTOM ; Rapport de DEA	

