
Le système hydraulique du delta du Sénégal, typologie et structuration spatiale

Ce chapitre analyse le fonctionnement hydraulique de l'hydrosystème à l'échelle du bassin versant et du delta. Ce système est régulé par un ensemble d'ouvrages hydrauliques aux fonctions différentes. Ces ouvrages déterminent la ressource (disponibilité) c'est-à-dire l'offre. Ce chapitre étudie donc la situation de l'offre dans le delta et la vallée du Sénégal.

1. Le delta du fleuve Sénégal, un hydrosystème structuré par de nombreux ouvrages hydrauliques : structure spatio-temporelle et niveau des barrages (et ouvrages)

Cette section donne une typologie des ouvrages hydrauliques, analyse le niveau de maîtrise de l'eau ainsi que le système de fonctionnement hydraulique de la vallée du fleuve Sénégal.

1.1. Structure spatiale du système hydraulique à l'échelle du fleuve Sénégal (nœud principal)

1.1.1. Typologie des ouvrages hydrauliques de la vallée du Sénégal

Dans le bassin versant du fleuve Sénégal, les barrages sont différenciés, d'une part, en fonction des générations, d'autre part, en fonction des types de barrages (et objectifs économiques assignés). Les barrages de première génération ont été achevés à la fin des années 1980 (Diama en 1986, Manantali en 1988). Le barrage de Fom Gleïta, construit en 1984 sur le dernier affluent du fleuve Sénégal (Gorgol), a pour finalité de constituer un lac d'eau douce pour l'irrigation et la pêche en amont. Ce barrage ne répond pas aux critères de définition d'un grand barrage (ouvrage de plus de 15 m de haut ou de plus de 3 millions de m³ sur une hauteur comprise entre 5 et 15 m). Les barrages de seconde génération concernent ceux dont le financement est bouclé (Félou, Gouina) et la construction entamée au début en 2009 (Félou). Les barrages de troisième génération sont en cours de développement.

Sur le plan de la typologie, les ouvrages sur le bassin du fleuve Sénégal concernent un barrage mobile, des barrages hydroélectriques et des barrages au fil de l'eau.

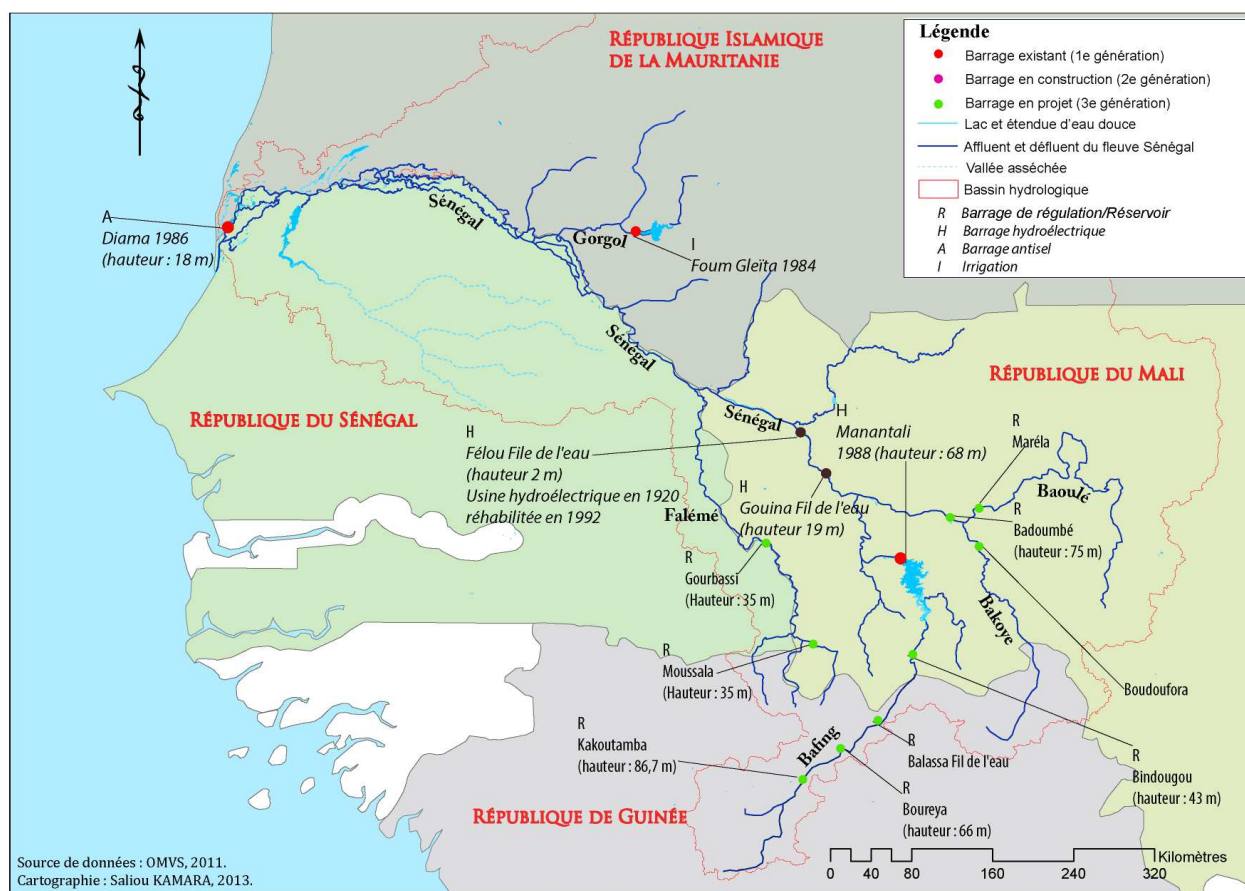
Un barrage mobile est de hauteur limitée et associe un ensemble d'écluses permettant le franchissement pour la navigation (BESSIÈRE, LONDE, 2013). Diama est un barrage mobile ouvert durant la crue du fleuve ; les cinq passes vannées s'effaçant complètement. Il permet, en même temps, d'arrêter la remontée de la langue salée sur le fleuve et de maintenir des cotes, dans le plan d'eau amont, quasi constantes pour les activités d'irrigation ou de production d'eau potable. Il est équipé d'une écluse de navigation de 175 m.

Manantali est un barrage hydroélectrique. Ses principales fonctions sont le soutien d'étiage et la crue artificielle sur le bras principal du fleuve Sénégal et la production d'électricité en s'opposant à l'écoulement naturel du fleuve (constitution d'un lac artificiel). Diama et Manantali ont contribué à une semi-artificialisation de l'hydrosystème du fleuve Sénégal pour soutenir les activités économiques (irrigation, production d'eau potable et d'hydroélectricité, etc.) dans un contexte à la fois d'insécurité alimentaire et de crise énergétique des différents États gravitant autour du fleuve (Sénégal, Mauritanie, Mali, Guinée ; Fig. 51).

Les barrages au fil de l'eau sont localisés dans des chutes (Félou, Gouina). Ils profitent des débits importants des chutes d'eau pour la production d'électricité. Les barrages de Félou et de

Gouina sont des ouvrages au fil de l'eau devant permettre une production d'électricité permanente (pour une production moyenne annuelle de 900 gigawatts-heures pour les deux).

Figure 51 : Localisation des grands barrages dans la vallée du fleuve Sénégal (d'après OMVS, 2011)



1.1.2. La maîtrise de l'eau douce

À terme, le fleuve Sénégal devrait être complètement maîtrisé. Les différents défluent (Bafing, Bakoye, Baoulé, Falémé) seront régulés par des ouvrages hydrauliques (à l'exception du complexe Kolombiné/Karakoro dont les apports sont très faibles) ; l'objectif étant, à terme, la rentabilisation des investissements par la production d'hydroélectricité, la navigation fluviale sur les différents axes hydrologiques (désenclavement des régions de l'est et du sud-est, développement du tourisme) ou l'irrigation (Fig. 51). Des stocks d'eau douce seront constitués (en amont de Diama, entre Moussala et Gourbassi, etc.). La production agricole, minière et la consommation en eau potable des centres urbains seront les principaux bénéficiaires de ces stocks. Ces stocks seront ainsi répartis (Tableau 23) : le Sénégal à Bakel (18 milliards de m³), Bafing (9,5 milliards de m³), la Falémé (4,7 milliards de m³), Bakoye (3,8 milliards de m³), Badoumbé (10 milliards de m³), Gourbassi (2,1 milliards de m³), Balassa (1,3 milliard de m³), Koukoutamba (3,6 milliards de m³), Boureya (5,5 milliards de m³). Ces stocks compléteront celui existant déjà au niveau de Manantali (11,7 milliards de m³).

Tableau 23 : Typologie des ouvrages hydrauliques à l'échelle de la vallée du Sénégal (d'après SDAGE, 2009)

	Nom du barrage	Rivière	Pays	Année de début de construction	Type de barrage	Fonction	Capacité maximale de la retenue (Md m3)	Capacité hydroélectrique (Mw)	Hauteur (en m)
1	Diama	Sénégal	Sénégal	1981	Barrage mobile	Antisel, irrigation navigation	0,6	0	18
2	Manantali	Bafing	Mali	1982	Barrage hydroélectrique	Navigation production hydroélectrique	11,3	200	68
3	Foum Gleïta	Gorgol	Mauritanie	1984	Barrage voûte	Irrigation	0,5	0	33
4	Férou	Sénégal	Mali	2009	Au fil de l'eau	Production hydroélectrique		59	2
5	Gouina	Sénégal	Mali	2013	Au fil de l'eau	Production hydroélectrique		140	19
6	Gourbassi	Falémé	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	2,1	20 à 25	35
7	Koukoutamba	Bafing	Guinée	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	3,6	281	86,7
8	Boureya	Bafing	Guinée	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	5,5	161	66
9	Balassa	Bafing	Guinée	En projet	Au fil de l'eau	Production hydroélectrique	1,265	181	
10	Badoumbé	Bakoye	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	10	70	75
11	Moussala	Falémé	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	3	30	35
12	Bindougou	Bafing	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	2	49	43
13	Boudoufora	Bakoye	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique		30	
14	Marela	Baoulé	Mali	En projet	Barrage hydroélectrique	Production hydroélectrique	3	24	

L'amélioration de la disponibilité en eau douce par la maîtrise complète des axes hydrologiques du fleuve Sénégal est le principal volet de la politique de l'eau de l'OMVS. Le Mali devra abriter l'essentiel des barrages de régulation ou de production hydroélectrique (8 + le barrage existant de Manantali), la Guinée (3) et le Sénégal (1, existant) devant abriter les autres grands barrages. La Mauritanie n'abrite qu'un petit barrage mis en place en 1984 sur le Gorgol.

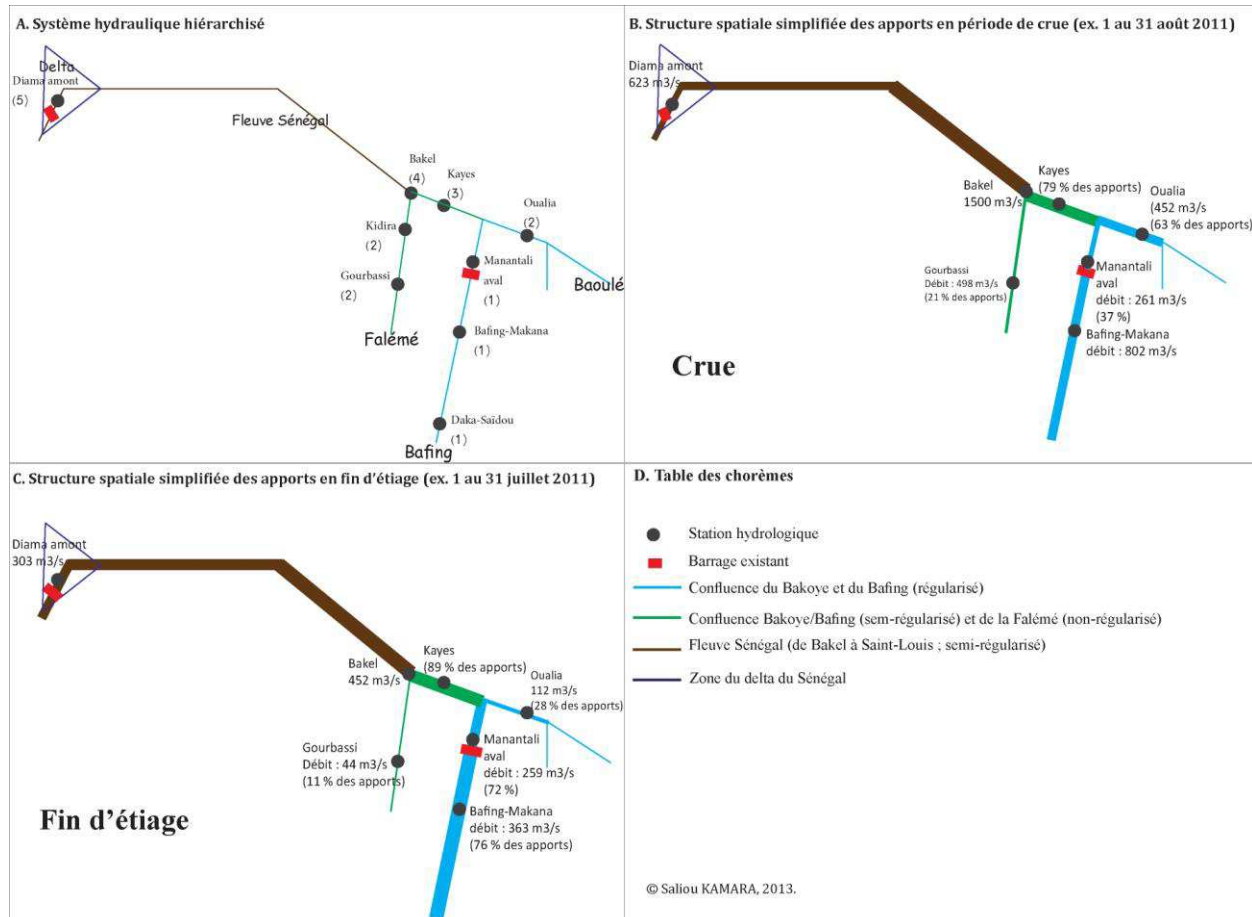
En tout état de cause, la maîtrise actuelle de l'eau est encore partielle. Seul le Bafing est entièrement contrôlé. La Falémé et le Bakoye ont un écoulement encore naturel.

1.1.3. Les dynamiques hydrauliques et hydrologiques

Pour mieux comprendre les dynamiques spatiotemporelles du système hydraulique de la vallée du fleuve Sénégal, nous avons eu recours à une modélisation chorématique. L'analyse chorématique révèle cinq niveaux hiérarchisés (Fig. 52.A) : (1) Bafing (maîtrisé), (2) autres affluents (non maîtrisés), (3) confluence du Bafing et du Bakoye, (4) confluence de la Falémé et du sous-système semi-artificialisé Bafing-Bakoye, (5) le fleuve Sénégal entre Bakel (haute vallée) et Saint-Louis (basse vallée, delta du Sénégal). Les figures 52.B et C sont basés sur les débits enregistrés dans les différentes stations hydrologiques (entre juillet et août 2011) dans des situations de crue (Fig. 52.B) et d'étiage (Fig. 52.C). Évidemment cette modélisation donne une

idée globale du fonctionnement hydrosystémique (entrées et sorties) à deux pas de temps différents ; les débits étant fluctuants de mai à avril (saison hydrologique). Toutefois, le fonctionnement reste calqué sur un modèle en situation de crue et un autre en situation de décrue et d'étiage quasi similaire.

Figure 52 : Analyse (chorématique) du fonctionnement hydraulique du fleuve Sénégal



Ces graphiques révèlent, d'une part, un graphe arborescent hiérarchisé d'amont en aval. D'autre part, il apparaît que le fonctionnement hydrologique est inversé par rapport à la situation naturelle crue / décrue. Durant la période de crue, les principaux apports sont issus des affluents non régularisés ; Manantali ne fournissant que 37 % des débits à la confluence du Bakoye. À l'inverse, durant la période d'étiage, l'affluent régularisé du Bafing fournit environ 72 % des débits à la confluence du Bakoye. De même, les apports au niveau de la Falémé contribuent très faiblement au débit du Sénégal à Bakel en période d'étiage (environ 11 %), ce niveau se relevant en période de crue (environ 21 %). Ce fonctionnement inversé permet la maîtrise des débits importants durant la période d'étiage (plus de 70 % des eaux maîtrisées) alors qu'en période de crue, les vannes de l'ouvrage de Diama sont ouvertes pour évacuer l'eau dans la zone estuarienne.

À partir de cette hiérarchisation des rivières et des débits spécifiques, il est possible d'établir leur variation hydrique à partir de certains rapports (en %) :

- débit en période de crue et débit en période d'étiage ;
- débit à Bakel et débit à Diama en période de crue et en période d'étiage ;
- débit entre Manantali amont et Manantali aval.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 24.

Le rapport crue sur étiage montre que les variations entre la crue et l'étiage sont faibles à Manantali. Le niveau de l'eau varie très peu entre la crue et l'étiage, ce qui est normal. En effet, le barrage de Manantali contrôle les entrées et les sorties ; les lâchers s'effectuant selon des modalités de gestion bien définies. Le rapport de variation reste faible en amont de Manantali (2).

À l'inverse, la Falémé connaît une variation très forte (rapport de 11) entre la crue et l'étiage. Le rapport est moyen au niveau du delta, du Sénégal à Bakel et du Bakoye.

Tableau 24 : Variation hydrique à partir des différents apports

	Rapport C/E	Rapport Bakel/delta en période de crue	Rapport Bakel/delta en période d'étiage	Rapport amont / aval en période de crue	Rapport amont / aval en période d'étiage
Bafing	2				
Manantali aval	1			3	1
Bakoye	4				
Falémé	11				
Sénégal	3				
Delta	2	2	1		

Entre Bakel et le delta, les rapports sont globalement faibles entre la crue (2) et l'étiage (1). Les variations d'eau entre Bakel et le delta sont relativement faibles, suivant la logique de variation imposée par le barrage de Manantali.

1.2. De petits barrages multifonctionnels dans le delta régulés par deux grands barrages

1.1.1. La base d'analyse

Les ouvrages hydrauliques constituent le cœur de la gestion de l'eau en raison de leurs caractéristiques fonctionnelles (eau potable, irrigation, zone humide) et de leur densité dans ce système spatial complexe. Cette réflexion liminaire débouche ainsi sur cette question : quel est le niveau de maîtrise de la ressource et quel est son impact sur les milieux physique et humain (l'organisation des sociétés) dans le delta du Sénégal ?

Un ensemble d'indicateurs constitue la base d'analyse :

- les ouvrages hydrauliques (les ouvrages de prise pour l'irrigation – stations de pompage – ou d'approvisionnement en eau potable – station de traitement – barrages de régulation à batardeaux, canal de dérivation) ;
- les lignes et hauteurs d'eau (débits), la qualité de l'eau (salinité).

Il s'agit essentiellement d'en faire l'inventaire afin d'établir une typologie spatialisée de ces ouvrages à travers une cartographie détaillée à l'échelle du delta du Sénégal (rive gauche). Cette analyse s'appuie donc sur :

- la répartition, densité/concentration spatiale des ouvrages dans l'espace à partir d'un travail de recensement effectué par l'OMVS en 2010, complété par des données d'enquêtes effectuées dans le delta entre 2010 et 2012 (relevés GPS¹) et par les données de la SAED² (2009) ;

¹ Global Positioning System.

² Société d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta et de la Falémé.

- leur fonctionnement à travers l'analyse des débits de certains de ces ouvrages rapportés à la performance des systèmes de gouvernance à l'échelle de l'OMVS.

L'objectif qui sous-tend cette démarche est d'identifier la relation entre performance, localisation et décision. Ce travail est basé sur les ouvrages de régulation hydraulique (eau douce) et d'irrigation (stations de pompage) et de drainage (stations d'exhaure). Au total, 25 ouvrages à batardeaux majeurs, en rive gauche sénégalaise, ont été analysés. Les données sont parfois incomplètes (Tableau 25), mais permettent, globalement, d'avoir une meilleure vision du système hydraulique du delta.

1.2.2. Le fonctionnement naturel de l'hydrosystème

Le delta du Sénégal est un hydrosystème semi-artificiel régulé par un ensemble d'ouvrages hydrauliques. Ceux-ci permettent d'alimenter gravitairement (par l'ouverture et la fermeture de vannes) différents défluent (Gorom, Lampsar, Djeuss, Ngalam, etc.) et lacs (lacs de Guiers et R'kiz) connectés au fleuve Sénégal.

Les différents défluent du delta ont donc été progressivement (entre 1884 et 1964) équipés de barrages qui ont permis une relative maîtrise de l'eau douce et la satisfaction de certains besoins (eau potable, projet d'irrigation de coton et de riz, etc.).

Ce protosystème hydraulique était rendu fragile par la remontée de la langue salée sur le fleuve et celle de la nappe phréatique salée ainsi que par la planéité du relief qui rendait difficile et complexe la maîtrise de l'eau douce (MIETTON et *al.*, 2008). À cela s'ajoute la durée importante des périodes d'étiage (février/mai) qui réduisait les possibilités d'une activité agricole intensive (Fig. 53). La variabilité intra-annuelle du régime hydrologique dans la vallée et le delta commandait donc la maîtrise de la ressource.

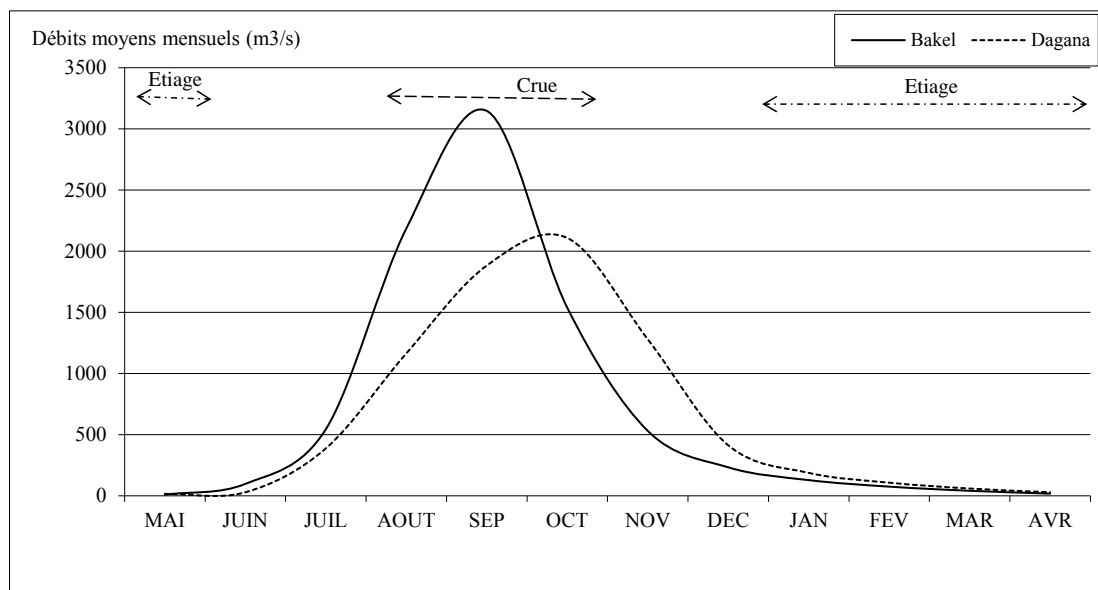
Pour analyser le fonctionnement hydrologique du fleuve Sénégal de Bakel à Dagana, nous sommes basées sur les débits relevés de 1903 à 1984 (mise en place du barrage de Kheune ; cf. Fig. 28.B). Sur cette période, les débits maximums observés sont de 5 891 m³/s à Bakel en septembre 1950 et 3 084 m³/s en octobre 1936 à Dagana. Les valeurs minimales sont les suivantes : 0 à Bakel en mai 1973, mai 1981 et juin 1982 ; 0,3 à Dagana en juin 1981. Ces valeurs nulles correspondent au point culminant des sécheresses climatiques sahéliennes.

Le maximum de crue atteint Bakel dans la première quinzaine du mois de septembre et Dagana dans la seconde quinzaine du mois d'octobre. D'après la monographie de ROCHETTE (1974), les dates moyennes sont le 10/09 (Bakel) et 19/10 (Dagana) et les dates extrêmes 7/08 et 7/10 (Bakel), 15/09 et 23/11 (Dagana). Ainsi, de Bakel à Dagana, la crue met environ 40 jours pour atteindre Dagana, sur un parcours de 640 km.

L'étiage est quasi simultané entre Dagana et Bakel. Le retrait des eaux est plus rapide que la remontée de la crue. Ceci s'explique, évidemment, par la configuration topographique de la vallée de Bakel à Dagana.

En fonctionnement naturel donc, la crue était perceptible entre août et novembre à Dagana (3 mois), à l'apex du delta, avec une pointe au début du mois d'octobre et un étiage entre février et mai (4 mois ; Fig. 53). Durant cette période de l'année, les débits sont quasiment nuls ; ce phénomène s'accroissant en période de sécheresse comme ce fut le cas en 1970 et 1980 (assèchement du cours du fleuve dans le delta).

Figure 53 : Évolution des débits moyens mensuels à Bakel et à Dagana de 1903 à 1984 (avant la mise en eau des barrages) (d'après OMVS, 2008)



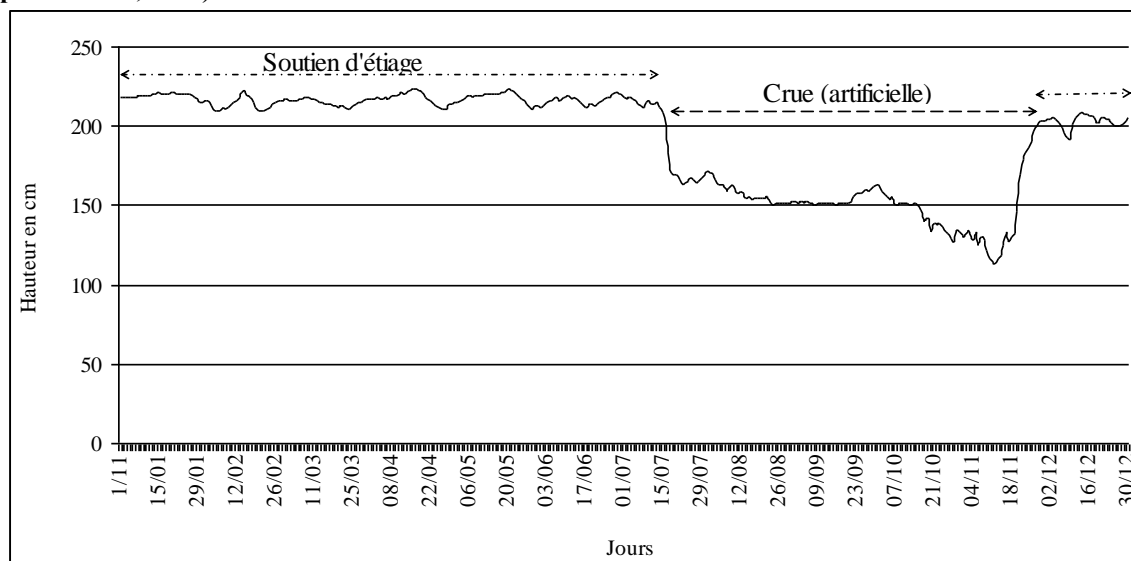
1.2.3. L'artificialisation de l'hydrosystème (Diama et Manantali)

La première phase d'artificialisation du milieu s'est traduite par la mise en place de petits barrages qui régularisent l'eau à l'échelle locale, en rive gauche et en rive droite (Tableau 25). Ainsi, l'ouvrage de Gani (Mauritanie) favorise le remplissage du lac R'kiz (OMVS, 2011). Sa construction remonte à 1958. À l'inverse, le lac de Guiers est alimenté, depuis le fleuve Sénégal, par le pont-barrage de Richard Toll. Cet ouvrage date de 1957. L'alimentation du lac est complétée par la rectification du cours de la Taouey réalisée entre 1971 et 1974. Ce cours d'eau, qui connecte directement le fleuve et le lac, a permis d'améliorer le remplissage du lac de Guiers, beaucoup plus artificiel que le lac R'kiz.

Ces barrages permettaient, avant la mise en place de Diama, d'arrêter la remontée de la langue salée sur le delta qui se faisait au moment de la décrue, quand le débit fluvial descendait à $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (KAMARA, 2008). Ils ont permis une relative régulation des eaux, entre Bakel et Diama. À Diama, les hauteurs d'eau fluctuent autour de 2,10 m entre novembre et juin (saison sèche) et 1,50 m en période pluvieuse (Fig. 54). Ce barrage permet de maintenir une hauteur d'eau stable (supérieure à 60 cm) afin de satisfaire la demande des usagers (écoulement gravitaire) et de préserver l'ouvrage. Dès les premières pluies dans le haut bassin, le barrage est ouvert afin d'évacuer les débits importants venant par Bakel (Fig. 54).

La figure 54 montre que lors de la phase de crue, le niveau dans le barrage est bas et inversement. Il faut toutefois considérer que lors de la phase de crue, en particulier lors de la pointe, une énorme partie des terres du delta est sous les eaux et inversement. Lors de la phase de basses eaux ou de très basses eaux, la plus grande partie du delta est exondée. Il y a donc un double mouvement : vertical pour le fleuve en amont de Diama, horizontal pour le delta ; ces deux mouvements étant relatifs l'un à l'autre dans le temps et dans l'espace.

Figure 54 : Hauteurs d'eau enregistrées à Diama (en amont du barrage) en 2003 (période post barrage) (d'après OMVS, 2008)



Ce dispositif hydraulique est complété, à partir de 1985, par la construction d'une digue entre Diama et Rosso, le long des rives du fleuve. Les digues en rive gauche et droite permettent de rehausser le niveau de l'eau dans la zone de la réserve de Diama.

1.2.4. Typologie des ouvrages dans le delta du Sénégal

Les ouvrages hydrauliques rencontrés dans le delta sont de trois ordres.

Les barrages de régulation hydraulique dont le plus important est le barrage antisel de Diama. Sa fonction secondaire est de créer un stock d'eau douce en amont. Ce barrage est complété par un ensemble de barrages à batardeaux (25). Leur fonction est de réguler l'eau douce dans l'hydrosystème du delta. Les barrages à batardeaux, dans le delta, sont commandés par le barrage antisel de Diama.

Les digues de rives gauche et droite permettent de rehausser le niveau de l'eau en amont du barrage de Diama, de créer un stock d'eau sur près de 90 km (une largeur de crête de 6 m pour une gestion hydraulique à la côte de 2,5 m) et de lutter contre les inondations dans le delta. Les digues de rive gauche et droite ont une longueur de 175 km (85 km en rive droite et 90 km en gauche). La construction de cet ouvrage a été décidée en 1985 et achevée en 1986. Cet endiguement permet de créer une retenue de 250 à 585 millions de m³ (selon la côte de gestion de 1,50 à 2,50 m) d'eau douce en amont de Diama (OMVS, 2010), mais colonisée par des plantes aquatiques réduisant l'hydraulicité et la capacité de stockage en amont du barrage (Fig. 55). Sur cette digue est localisée une partie importante des ouvrages de prises (barrages à batardeaux, mais aussi des stations de pompage).

Les ouvrages de dérivation hydraulique sont des canaux permettant d'acheminer l'eau d'un point à un autre. Les deux plus importants dans le delta sont : le canal de Gandiolais (longueur de 8 km) qui permet d'acheminer l'eau douce du défluent du Ngalam vers la dépression de Rao (achevé en 2006) ; l'autre canal (canal de Krankaye) permettant de transporter l'eau du Gorom-aval vers le Lampsar (débit théorique de 13 m³/s). Ce canal d'environ 10 km de longueur a été mis en service en 2009 dans le but de compléter l'alimentation en eau douce de l'affluent du Lampsar (déjà alimenté depuis Ronq) largement sollicité par les prélèvements agricoles en amont (périmètres de Boundoum, Kassack) avec des pics importants en fin de saison sèche

(entraînant des difficultés d'alimentation en aval). Ce canal a fortement réduit les difficultés d'accès à l'eau dans le Lampsar et les compétitions qui en découlent (canal informel de dérivation de l'eau vers les périmètres irrigués agricoles).

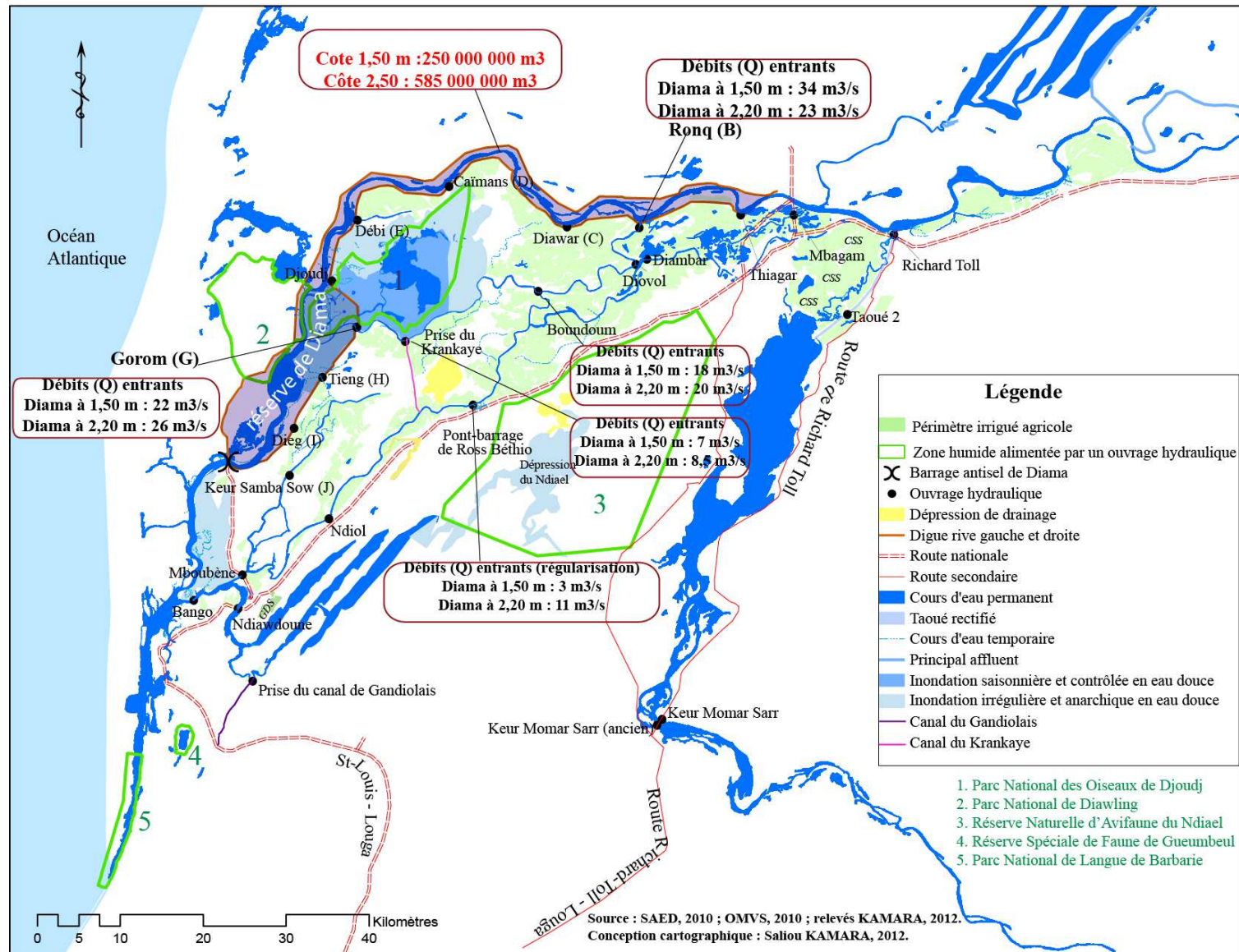
Le système hydraulique est organisé en fonction de deux barrages : le barrage de Ronq et le barrage de Gorom directement connecté à la réserve d'eau douce de Diama (Fig. 55). En fonction des niveaux de gestion de Diama (hivernage : 1,50 m ; saison sèche : 2,20 m), les débits qui entrent dans le delta du Sénégal avoisinent 50 m³/s. L'ouvrage de Boundoum permet de redistribuer l'eau dans le Lampsar. Combiné à l'ouvrage de prise du canal de Krankaye, les débits qui entrent dans le Lampsar fluctuent entre 25 et 29 m³/s en fonction des niveaux de gestion. L'ouvrage de Ross Béthio joue un rôle de barrage régularisateur en créant un stock d'eau douce entre Boundoum et Ross Béthio. En fonction de la demande, des lâchers sont effectués pour alimenter le bief aval du défluent du Lampsar.

Les usages sont donc multiples autour de ces ressources en eau du delta. Les usages modernes correspondent à l'agriculture irriguée (espace rizicole), à l'agribusiness (CSS, GDS, etc. ; espace de polyactivité), aux zones humides (Djoudj, Ndiel, etc. ; espace écologique) et à l'approvisionnement en eau potable des centres urbains et des espaces ruraux. Les usages traditionnels concernent l'élevage transhumant (espace pastoral), la pêche continentale (espace hydraulique), etc. La dimension spatiale des usages de l'eau est forte ; la compétition pour l'accès à l'eau douce prenant alors une dimension spatiale importante.

Tableau 25 : Typologie des ouvrages hydrauliques dans le delta du fleuve Sénégal (Source : OMVS, 2009)

Ouvrage	Code graphe	Localisation GPS	Débit nominal m ³ /s	Digue m IGN	Radier m IGN	Nombre de passes	Ecoulement	Fonction	
Niveau 1									
1	Barrage de Diama	1	16°12'52.53"N 16°24'54.32"W			7 passes		Barrage réservoir barrage antisel	
Niveau 2									
2	Ouvrage de Richard Toll	1.1	16°27'53"N 15°41'34"W	40	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Gravitaire Irrigation	
3	Ouvrage de Mbagam	1.2	16°29'11"N 15°47'58"W	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Gravitaire	Irrigation	
4	Ouvrage A de Thiagar	1.3	16°29'09"N 15°51'31"W	10	4,63	-0,50	2 passes vannées et batardeaux	Gravitaire Irrigation	
5	Ouvrage B de Ronq	1.4	16°28'38"N 16°58'02"W	30	4,36	-1,30	8 passes vannées et batardeaux	Gravitaire Pompape	Irrigation
6	Ouvrage C de Diawar (entrée)	1.5	16°28'22"N 16°02'49"W	15	4,16	0,00	3 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation
7	Ouvrage D île Caïmans	1.6	16°31'02"N 16°10'29"W	10	3,90	-1,00	4 passes vannées et 2 batardeaux	Gravitaire	Irrigation Faune
8	Ouvrage F de Djoudj	1.7	16°29'36"N 16°16'31"W	20	3,38	-2,00	2 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation Faune
9	Ouvrage E de Débi	1.8	16°30'57"N 16°13'57"W		3,55	-0,50	3 passe vannée et batardeaux	Gravitaire	Irrigation
10	Ouvrage G de Gorom	1.9	16°21'50"N 16°16'29"W	20	3,25	-0,60	1 passe vannée et batardeau	Gravitaire	Irrigation Environnement
11	Ouvrage de Tieng	1.10	16°16'12"N 16°19'40"1W	15	3,05	0,00	1 passe vannée et batardeau	Gravitaire	Irrigation Environnement
12	Ouvrage I de Dieg	1.11	16°15'5"N 16°20'5"W	5	3,10	0,00	1 passe vannée et batardeau	Gravitaire	Irrigation
13	Ouvrage K de Bango	1.12	16°42.14"N 16°27'7.28"W	9	2,40	-1,60	3 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	AEP
Niveau 3									
14	Pont-barrage de la Taoué	1.1.1	16°27'52"N 15°41'36"W	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	8 passes vannées	Gravitaire	Stockage eau douce
15	Ouvrage de Keur Momar Sarr (nouveau)	1.1.2	16°56'06"N 15°56'44"W	30	Données non disp.	Données non disp.	8 passes vannées	Gravitaire	AEP
16	Ouvrage de Keur Momar Sarr (ancien)	1.1.3	16°56'20"N 15°56'39"W	10	Données non disp.	Données non disp.	3 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	AEP
17	Pont-barrage de Boudoum (sortie)	1.9.1 = 1.4.1	16°24'4.90"N 16° 4'23.84"W	9	3,40	-1,15	5 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation
Niveau 4									
18	Ouvrage de Diambar	1.4.2	16°26'16.75"N 15°57'49.87"W	7	2,50	-0,15	3 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation
19	Pont-barrage de Ross Béthio (régulateur)	1.4.1.1	16°16'46'97"N 16°8'57'11"W	8	2,50	-1,75	4 passes vannées et 2 batardeaux	Gravitaire	Irrigation
20	Ouvrage J de Keur Samba Sow	1.10.1	16°12'9.92"N 16°20'53.20"W	Données non disp.	2,20	-0,77	1 passe vannée et batardeau	Gravitaire	Irrigation
21	Ouvrage de prise canal du Krankaye (sortie)	1.9.2	16°20'55.11"N 16°13'13.94"W	13,00	3,00	naturelle	3 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation Stockage
Niveau 5									
22	Pont-barrage de Ndiol	1.4.3.1.1.1	16°9'20.44"N 16°18'19.41"W	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Gravitaire	Irrigation
23	Barrage de Diovol	1.4.2.1	16°26'16.65"N 15°57'49.82"W	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Données non disp.	Gravitaire	Irrigation
Niveau 6									
24	Pont-barrage de Mboubène	1.12.1 = 1.10.1.1 = 1.4.1.1.1.1	16°5'41.32"N 16°23'58.28"W	10	2,10	-1,63	2 passes vannées et batardeaux	Gravitaire	Irrigation AEP
Niveau 7									
25	Ouvrage L de Ndiawdoune	1.12.2 = 1.4.1.1.1.1.1	16°3'24.25"N 16°24'7.39"W	10	2,26	0,16	6 passes avec batardeaux	Gravitaire	AEP
Niveau 8									
26	Ouvrage de prise du canal du Gandiolais	1.12.2.1 = 1.4.1.1.1.1.1.1	15°58'59.29"N 16°23'12.04"W	4,00	1,50	-1,15	2 passes avec batardeaux	Gravitaire	Irrigation AEP

Figure 55 : Le système hydraulique delta du Sénégal (entrées, sorties et régulation)



En sommes, les ouvrages sont organisés autour d'un système de commande qui permet d'alimenter gravitairement, d'amont en aval, différents usages de l'eau. Ce système de commande est hiérarchisé dans le delta du Sénégal.

1.3. Une relation hiérarchisée entre les différents ouvrages hydrauliques : analyse des entrées et des sorties à partir d'un graphe

Le delta du Sénégal est structuré autour de 25 ouvrages de régulation hydraulique et d'un grand barrage (Diama) qui assure le stockage de l'eau (Fig. 56). Le fonctionnement hydraulique est globalement gravitaire (amont-aval et nord-sud – Fig. 56), mais peut être suppléé par des pompages spécifiques pour certains types d'aménagements hydroagricoles. L'écoulement naturel est spécifique aux différents barrages vannés (à l'exception du nœud central – Ronq – où des pompages sont effectués quand le niveau de l'eau du fleuve est trop bas) alors que des pompages sont réalisés au niveau des surfaces hydroagricoles exploitées pour transférer l'eau des canaux dans les rizières.

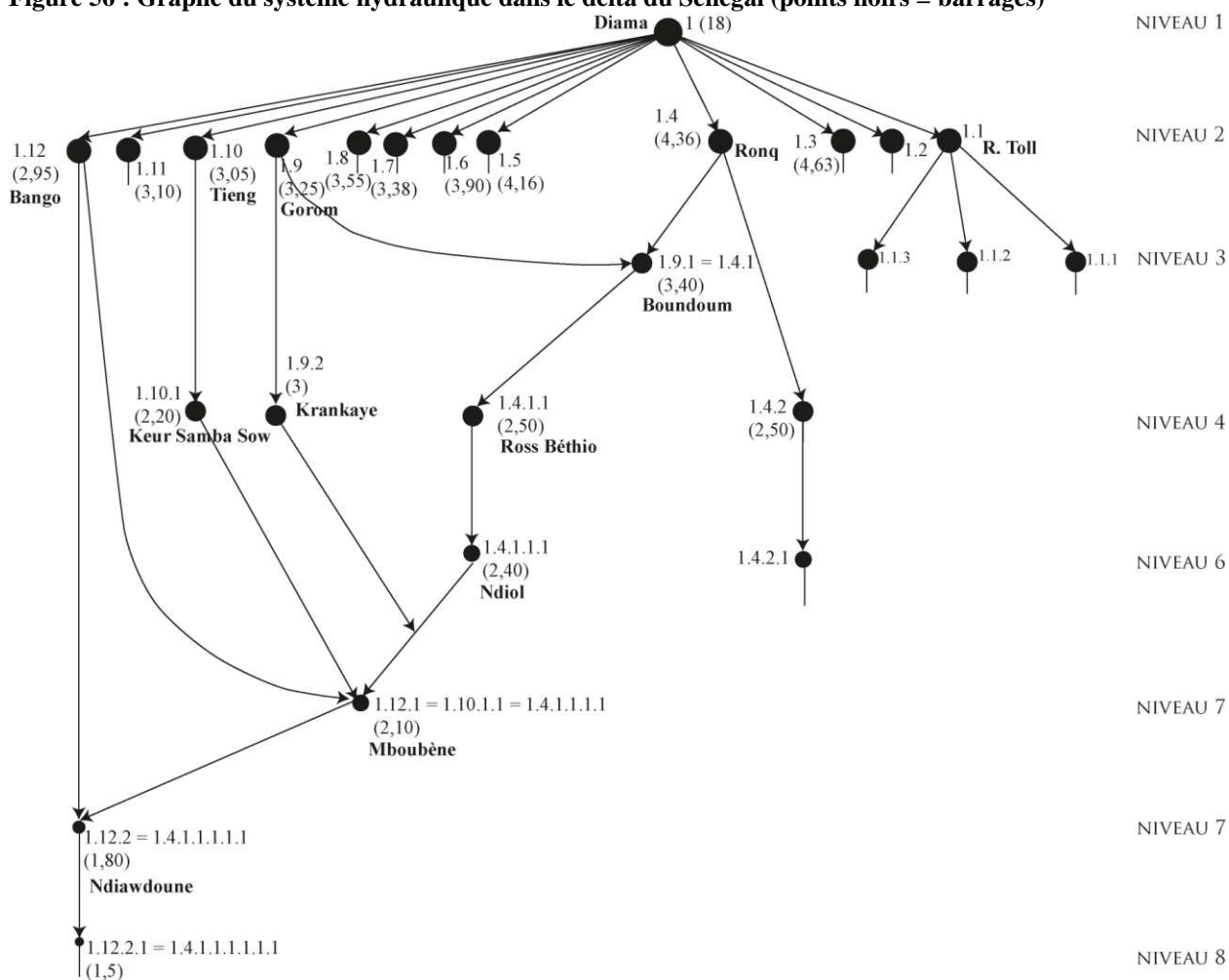
L'arbre ainsi obtenu possède 8 niveaux et 5 sommets : le barrage de Diama (1), l'ouvrage de Ronq (1.4), l'ouvrage de Tieng (1.10), le barrage de Richard Toll (1.1), le pont-barrage de Ross Béthio (1.4.3). Ces deux derniers alimentent, à un niveau inférieur (5), des centres urbains (1.12.1, 1.1.2) et, en niveau intermédiaire (4 et 3), des périmètres irrigués agricoles (1.4.1, 1.4.2, 1.4.3.1, 1.10.1.1) ou des zones humides classées (1.6, 1.7, 1.12.1). Les autres ne constituent pas des nœuds de diffluence. Ils permettent d'assurer des fonctions d'irrigation et de conservation de la nature.

L'arbre est subdivisé en trois sous-graphes (sous système) : lac de Guiers – Ferlo, Kassack-Diovol et Djeuss-Gorom-Lampsar-Gandiolais. Le sous-système lac de Guiers-Ferlo est régulé par le nœud 1.1. alors que le sous-système Kassack-Diovol l'est par le nœud 1.4.

Le sous-système Djeuss-Gorom-Lampsar-Gandiolais dispose de multiples connexions hydrauliques (1.4, 1.9, 1.10, 1.12, 1.9.1, 1.10.1, 1.4.1.1, etc.). Ce sous-système connexe permet de sécuriser l'alimentation en eau de l'ensemble des marigots et lacs du delta du Sénégal ainsi que les activités économiques (agriculture irriguée et approvisionnement eau potable notamment).

Le fonctionnement du système hydraulique est marqué par un relatif endoréisme (système semi-fermé dans le sens où il est isolé de l'environnement aval estuarien d'octobre à juillet). En effet, toute l'eau qui s'écoule à l'intérieur de cet hydrosystème artificialisé (à travers les différents défluent et marigots) reste dans le système. Les eaux se perdent, aboutissent dans des dépressions de type sebkha et/ou s'échappent, dans des dépressions de drainage, par évapotranspiration et par infiltration. Cette fermeture est assurée par le barrage de Dakar Bango (bas delta) qui est ouvert d'août à septembre pour assurer le remplissage de la réserve d'eau de Saint-Louis (KAMARA, 2008), mais qui est isolé le reste du temps de la zone estuarienne.

Figure 56 : Graphe du système hydraulique dans le delta du Sénégal (points noirs = barrages)



Globalement, cette relative maîtrise de l'offre est le résultat d'une artificialisation poussée du milieu naturel ; la gestion étant axée autour des débits qui transitent dans les barrages (entrées) et qui dépendent eux-mêmes des hauteurs d'eau (gestion par l'offre).

2. La structure hydraulique dans les aménagements hydroagricoles

L'aménagement hydroagricole est le second niveau d'artificialisation du milieu. Ainsi, cette section caractérise les aménagements hydroagricoles et la structuration spatiale des stations de pompage et de drainage.

2.1. Caractérisation des périmètres hydroagricoles du delta du Sénégal

La caractérisation des périmètres irrigués agricoles est fonction d'un ensemble de paramètres : le mode de financement (public, privé), la surface des périmètres, le système de gestion (public, privé) et le niveau de maîtrise de l'eau. En fonction de tout cela, on distingue, dans le delta du Sénégal, les grands périmètres transférés ou non transférés, les moyens périmètres, les périmètres irrigués villageois, les périmètres irrigués privés et les agribusiness. Les tableaux 26 et 27 proposent des éléments de typologie.

Dans les grands aménagements ainsi que dans les agribusiness, la maîtrise de l'eau est totale (goutte-à-goutte). Dans les grands aménagements, une station de pompage électrifiée dessert un

ensemble de canaux d'irrigation (primaire, secondaire, tertiaire) qui alimentent l'ensemble de la cuvette. Ce système est complété par des canaux de drainage et une station d'exhaure (ou de drainage) qui rejette l'eau dans des dépressions de drainage. Les grands aménagements ont des surfaces de 1 000 à 5 000 ha ; la mécanisation est intense tant au niveau de la mise en place que de l'exploitation ; la gestion technique et comptable est complexe et moderne, souvent mal adapté au contexte socio-économique du delta de par l'approche ascendante prônée (DIAGNE, 1979). La présence de la machine de l'amont à l'aval restreint le rôle de l'homme dans le repiquage du riz (si le semis n'est pas direct ou mécanique) et, dans certains cas, le désherbage et la récolte manuelle (ENGELHARD, TAOUFIK, 1986).

Tableau 26 : Mode de financement et de gestion des aménagements du delta du Sénégal

Financement	Gestion	Type AHA	Encadrement
Public	SAED	GA + AI	Encadrés par des sociétés d'État (SAED).
Public	Privée	GA + AI	
Public	Privée	PIV	
Privé	Privée	PIV+PIP	Le financement et la gestion privés commencent à partir de 1987 avec l'installation des Privés et le transfert de la gestion de certains G.A. aux Organisations Paysannes (Périmètres Autogérés). Périmètres non encadrés par des sociétés d'État.

Ces aménagements sont les premiers à être expérimentés dans le delta, à partir de 1960, dans le cadre des coopératives agricoles. Ils étaient exclusivement gérés par la SAED. Avec le désengagement, la majorité de ces périmètres a été transférée à des Unions et Sections villageoises (gestion décentralisée et articulée à la structure locale regroupant un ensemble de villages) qui en assurent la gestion hydraulique, financière et foncière (grands aménagements transférés). Il faut rappeler que jusqu'en 1987, la SAED était chargée de la gestion des terres inondables du delta du Sénégal. Cette gestion sera une compétence des Conseils ruraux. Au sein des Unions et Sections se fait la distribution des terres attribuées par le Conseil rural dans le cadre des activités agricoles de ces organisations communautaires. Le financement est entièrement public, alors que la gestion est soit publique (grands aménagements non transférés) soit privée (grands aménagements transférés) (Tableau 26). Les principaux grands aménagements transférés (19% des périmètres exploités dans le delta en 2009, en dehors des agribusiness) sont : Thiagar, Kassack, Boundoum, Colonat ou Dagana, Pont-Gendarme, Thilène. Les périmètres de Lampsar, Biffèche, Ndellé, Ndiaye, Ngomène ou Grande Digue sont de grands périmètres non transférés représentant 8 % des superficies exploitées dans le delta.

Un contrat de concession lie la SAED aux Unions dans le cadre des grands périmètres transférés (autogérés). La SAED intervient, ainsi, dans la maintenance des stations de pompage et de drainage et dans l'encadrement, l'entretien et la gestion du périmètre. La SAED dispose d'un droit de regard sur la gestion technique et financière des organisations paysannes (rapport annuel) alors que l'Union assure la gestion des canaux d'irrigation et de drainage (dragage, entretien, etc.). La SAED ou les bailleurs de fonds / ONG (Banque Mondiale) peuvent intervenir dans la réhabilitation des parcelles irriguées dont la durée de vie est d'environ cinq ans. Ainsi, le PDMAS intervient dans le delta depuis 2008 dans le cadre de la réhabilitation de 7 000 ha. La gestion des organisations paysannes est donc semi-privée dans la mesure où la sphère publique (État, SAED, préfecture) peut intervenir en cas de crises, de blocages ou de mauvaises gestions comme ce fut le cas de plusieurs grands aménagements transférés (Débi Tiguette, Dagana A).

Dans les agribusiness, la maîtrise de l'eau et de la technologie est plus sophistiquée (cultures sous serres, irrigation par goutte-à-goutte, etc.). Les superficies aménagées vont de 150 ha (Grands Domaines du Sénégal dans le bas delta) à 8 200 ha (Compagnie Sucrière Sénégalaise dans le haut delta, à Richard Toll). L'investissement est exclusivement privé, souvent dans le

cadre des entreprises franches d'exportation (exonération de certains impôts, autorisation d'exportation de produits agricoles en dehors de la zone Franc).

Les Périmètres Irrigués Villageois ont émergé, au milieu des années 1970, comme une réponse à la sévérité de la sécheresse et à la gestion « dirigiste » des grands aménagements. L'aménagement, sommaire, ne comporte pas souvent de système de drainage. Ces aménagements sont localisés au niveau des berges du cours d'eau (réduction du coût de transfert de l'eau, main-d'œuvre familiale importante). Le financement est entièrement privé (familiale). Selon SECK (1990), les trois critères qui ont été à la base du succès des PIV sont : la crise climatique (sécheresse) des années 1980, l'amélioration agronomique sur les variétés de riz à cycle moyen à court et des techniques d'irrigation, la diffusion des innovations sans pour autant que les traditions socioculturelles ne soient éclatées.

La différence avec les Périmètres Irrigués Privés est que ces derniers sont des initiatives individuelles pouvant appartenir à d'autres individus (citadins, commerçants, etc.). L'alimentation en eau est faite par le biais de mini-stations de pompage ou de groupes motopompes (alimentation au gasoil). Les PIP représentaient, en 2009, 65 % des périmètres exploités dans le delta du Sénégal (7 % pour les PIV)

Les moyens périmètres (aménagements intermédiaires) sont une tentative de synthèse entre la dimension techniciste des grands aménagements et la dimension sociale des périmètres irrigués villageois. La surface des périmètres se situe entre 100 et 500 ha. Le principal aménagement de ce type est localisé dans la Taouey (Ndombo et Thiago). Il représente 1 % des périmètres exploités dans le delta du Sénégal (2009).

Tableau 27 : Typologie des aménagements hydroagricoles du delta du Sénégal

		Aménagement		Hydraulique				Mise en valeur			
		Investissement	Gestion	Taille	Maîtrise de l'eau	Ressource	Exhaure	Distribution	Spéculation	Parcelle	Main-d'œuvre
T1	Grands et moyens périmètres irrigués d'initiative publique	État / bailleur	OP + État	> 100 ha à 55 000 ha	totale	fleuve retenue lac	dérivation, pompe, prise aval barrage	surface, réseau californien	riz, polyculture	< 5 ha	familiale + salariée
T2	Périmètres irrigués villageois d'initiative publique	État / bailleur / ONG	OP	< 100 ha	totale	fleuve retenue	pompe, prise aval barrage	surface	riz céréales polyculture	< 1 ha	familiale
T3	Petits périmètres irrigués collectifs	Groupe d'exploitants	OP	< 50 ha	totale	fleuve retenue	pompe, prise aval barrage	surface	riz céréales polyculture	?	familiale
T4	Petit périmètre irrigué individuel	Exploitant individuel	Exploitant	< quelques ha	totale	fleuve retenue nappe	pompe, manuelle	surface localisée	céréales fruits maraîchage	-	familiale
T5	Petits et moyens périmètres irrigués d'agribusiness	Entrepreneur particulier	Salarié	qq dizaines à qq centaines	totale	fleuve retenue nappe	dérivation, pompe	surface, aspersion, localisée	riz, fruits, maraîchage	-	salariée
T6	Grands et moyens périmètres irrigués agroindustriels	Firme agroindustrielle	Salarié	qq centaines à qq milliers	totale	fleuve	dérivation, pompe	surface, aspersion, localisée	canne, fruits, maraîchage	-	salariée
T7	Cultures de décrue ou de berges	Exploitant individuel	Exploitant	?	partielle	fleuve retenue lac	décru	surface	céréales fourrages	-	familiale

2.2. Les stations de pompages (irrigation) et de drainage (exhaure) : structure spatiale

S'il est plus pertinent d'analyser les ouvrages à batardeaux (cf. Fig. 56) à l'échelle globale du delta, en ce qui concerne les ouvrages de prise pour l'irrigation et l'eau potable, l'échelle du défluent/marigot est plus pertinente. En effet, la notion de besoin (et son corollaire, la demande) et d'offre intervient dans ces espaces. Or le besoin est proportionné par l'offre déterminant ainsi les stratégies de satisfaction et de sécurisation de l'alimentation en eau des sous-systèmes hydrologiques. Alors peut intervenir l'indicateur de densité des ouvrages de prise sur une portion hydrologique (bief) informant sur le niveau du besoin. Pour cela, nous avons attribué à chaque sous-unité hydrologique (Lampsar, Gorom amont, Gorom aval, Kassack, Ngalam-Trois Marigots, réserve de Dakar-Bango, Taouey, Djeuss) – en dehors du lac de Guiers et du bras principal – une couleur particulière. Cette coloration est corrélée aux superficies brutes dépendant directement de l'unité considérée (Fig. 57).

La figure 57 donne des éléments de compréhension de l'hydrosystème artificialisé du delta du Sénégal, autant dans son fonctionnement « endoréique » (l'eau se perdant par évaporation, infiltration ou dans des dépressions fermées) que dans sa structuration spatiale.

De prime abord, ce qui est communément appelé « axe Gorom-Lampsar » concentre, à lui seul, près de 70 % des prélèvements liés à l'agriculture irriguée. En raison de cette importance, la question du rejet des eaux usées agricoles est prégnante d'autant plus que ces eaux restent dans l'hydrosystème (à l'exception du drain du Natché qui rejette ses eaux dans le fleuve Sénégal). Or, l'infiltration des eaux usées très salées et très polluées (Cissé, 2011) peut impacter la qualité des eaux de surface, des sols et l'environnement en général alors que la remontée de la nappe salée est perceptible pendant une partie de l'année. Cette question sera étudiée plus en profondeur dans le cas spécifique de la cuvette de Pont-Gendarme.

Les ouvrages de prise dans le delta, en dehors des barrages vannés, sont des stations de pompage. Les stations de pompage pour l'irrigation permettent la redistribution de l'eau dans les différentes cuvettes. On en compte une vingtaine prélevant directement l'eau sur le fleuve (dont une douzaine incorporée sur la digue de rive gauche). Les autres stations de prise puisent l'eau dans les différents marigots, principalement dans le Lampsar (13), secondairement sur le Gorom (3).

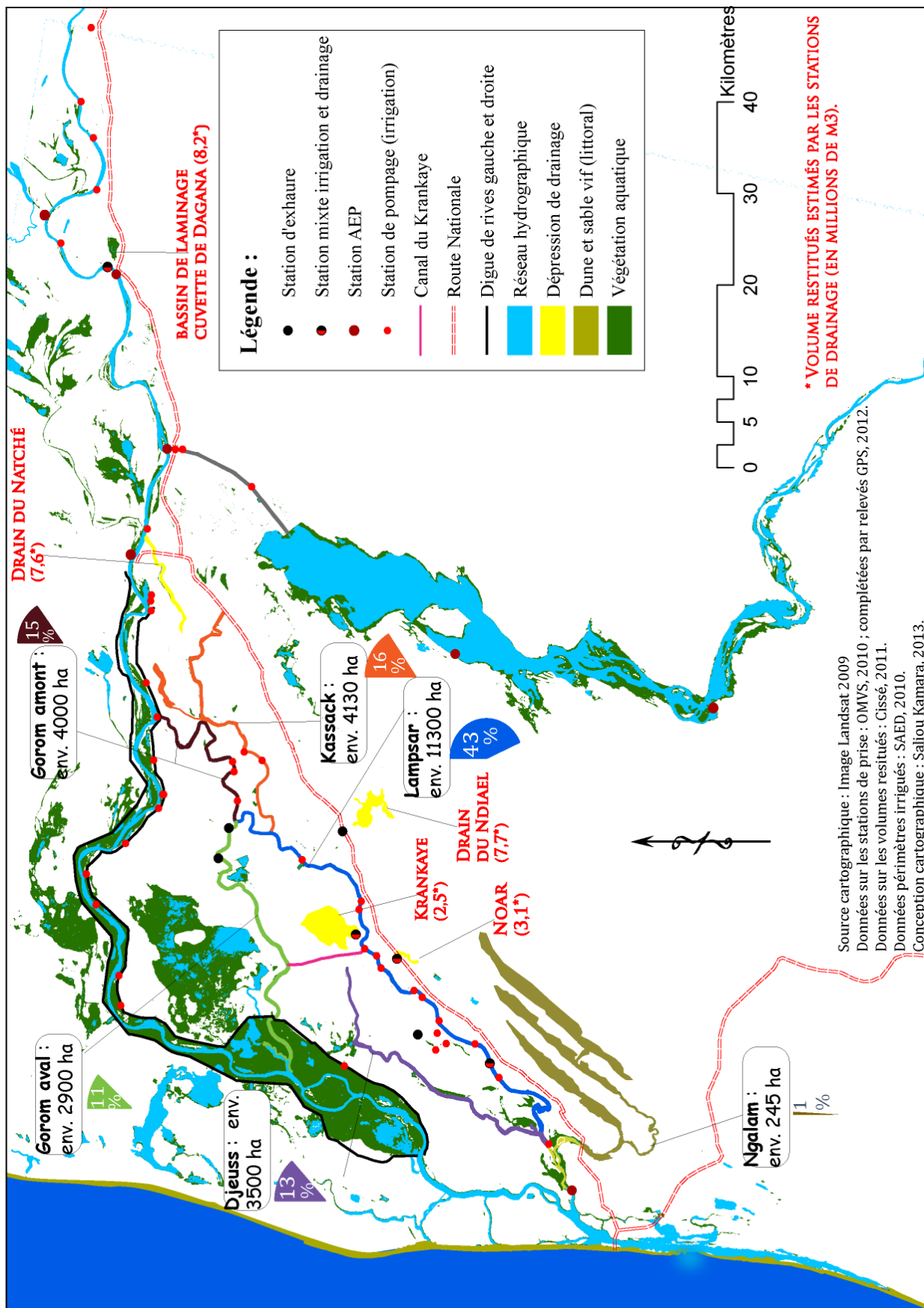
À côté de ces stations alimentant principalement les grands aménagements, il y a les stations de pompage des agro-industries (GDS dans le bas delta, sur le Djeuss ; CSS dans le haut delta, sur la Taouey et le lac de Guiers) et des mini-stations de pompage alimentant des périmètres irrigués privés depuis le bras principal du fleuve Sénégal (une vingtaine).

Les stations de pompage pour l'irrigation sont complétées par des stations de drainage dont certains sont mixtes (irriguent et drainent alternativement, en fonction des spéculations cultivées). Il s'agit, entre autres, de la station de Dagana A sur laquelle nous reviendrons.

Le delta compte environ une dizaine de stations de drainage des rizières. Les eaux usées sont rejetées dans différentes dépressions naturelles. Les drains de Natché, Dagana A et de Ndiael sont les plus importants en termes de volume d'eau reçu (environ 25 000 000 de m³). Ce système est complété par les drains de Noar ou de Krankaye.

Dans un tel système semi-fermé où coexistent à la fois eaux douces, eaux salées et eaux usées, la question de la qualité de l'eau et de l'environnement apparaît essentielle. Cette question est étudiée à travers la question de l'évacuation des eaux usées et de la qualité de l'eau dans les périmètres irrigués (Chap. 9).

Figure 57 : Structure spatiale des ouvrages de prise (irrigation et eau potable)



Les stations de pompage pour l'eau potable alimentent les usines de traitement de la SDE pour différents centres urbains (Saint-Louis, Rosso, Dakar, Richard Toll, Dagana, etc.). Sur le delta, elles sont au nombre de huit : cinq sur le bras principal (Rosso, Gani et Nouakchott en rive droite ; Dagana, Richard Toll en rive gauche), deux sur le lac de Guiers pour la ville de Dakar (Ngith, Keur Momar Sarr) et une sur la réserve de Dakar-Bango (Saint-Louis).

L'étude des canaux d'irrigation et de drainage nécessite une échelle fine. Une telle perspective sera présentée dans le cas des cuvettes de Pont-Gendarme, Thiagar, Dagana A et Boundoum. Il faut surtout retenir qu'il existe des canaux collectant des eaux de différentes cuvettes pour les restituer dans les dépressions de drainage. Dans le cadre de la résolution du problème des eaux usées, le projet d'émissaire du delta a été mis en place en 2006. L'émissaire du delta vise à créer un système de drainage de l'ensemble des périmètres irrigués du delta. Il s'agit de la mise en place de drains collecteurs de plusieurs kilomètres de longueur chargés de transporter les eaux usées agricoles vers certaines dépressions de sebkhas ou certains marigots (le Djeuss). Ainsi, les eaux usées des périmètres de Boundoum sont rejetées dans la dépression de Krankaye.

À terme, le défluent du Djeuss devrait être transformé en émissaire de collecte des eaux de drainage qui seront alors évacuées en aval du barrage de Diama, dans l'estuaire artificiel. Se pose donc, d'une part, la question du devenir des 3 500 ha (13 % de l'ensemble des périmètres) dépendant directement du Djeuss. Le nouveau schéma hydraulique prévoit un canal de dérivation depuis le fleuve Sénégal, en amont de Diama, pour compenser la « perte » du défluent du Djeuss. D'autre part, la question du rejet d'eaux usées agricoles dans l'estuaire (branche B de l'émissaire du delta), dans le fleuve (Natché) ou sur le lac de Guiers (Compagnie Sucrière Sénégalaise) est au centre des changements environnementaux.