



INSTITUT SENEGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
Centre de Recherche Agricole de Saint Louis

**PROJET : Evaluation agronomique et socio-économique des systèmes
agricoles dans le bassin du fleuve Sénégal**

Rapport de l'activité :

**EVALUATION DE LA PRODUCTIVITE DE L'EAU DANS LA VALLEE ET LE
DELTA DU FLEUVE SENEGAL**

Saint Louis, Décembre 2021

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
1.1. Concepts	3
1.2. Contexte et justifications	3
1.3. Objectifs	4
1.4. Zone d'étude	4
1.4.1. Caractéristiques générales	4
1.4.2. Sites de la zone du Delta	6
1.4.3. Sites de Ndiayene Pendao	7
1.4.4. Sites de Nguidjilone et Dondou	8
2. APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	10
2.1. Enquêtes et revue documentaire.....	10
2.2. Visites techniques de périmètres irrigués.....	11
2.3. Analyse de la disponibilité de l'eau et de la mise en valeur agricole.....	11
2.4. Analyse des contraintes d'irrigation.....	12
2.5. Evaluation de la productivité de l'eau et d'indicateurs de performance de l'irrigation	13
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	15
3.1. Disponibilité de l'eau au cours des dernières années.....	15
3.2. Mise en valeur agricole au cours des dernières années	16
3.3. Contraintes d'irrigation au niveau des sites du Delta	19
3.4. Contraintes d'irrigation au niveau des sites de Ndiayene Pendao	21
3.5. Contraintes d'irrigation au niveau des sites de NGuidjilone et Dondou.....	23
3.6. Productivité de l'eau et indicateurs de performance de l'irrigation.....	24
3.6.1. Cas des sites du Delta	24
3.6.2. Cas des sites de Ndiayene Pendao	28
3.6.3. Cas des sites de Nguidilone et Dondou	31
3.7. Perspectives d'amélioration de la productivité de l'eau et des performances de l'irrigation	
33	
3.7.1. Réduction des pertes d'eau sur les systèmes d'irrigation.....	33
3.7.2. Solarisation des stations de pompage.....	34
3.7.3. Promotion de l'utilisation des bonnes pratiques agricoles.....	34
4. CONCLUSION	34
REFERENCES	35

1. INTRODUCTION

1.1. Concepts

La productivité de l'eau PE désigne le rapport entre la quantité (ou la valeur) de la production obtenue et la quantité d'eau utilisée (Kijne, et al., 2003). Le rapport entre la production et l'eau évapotranspirée par la culture permet de rendre compte de la performance de la culture à valoriser l'eau et donc de l'efficacité des pratiques culturales. Dans les systèmes irrigués, on peut aussi s'intéresser au rapport entre la production et la quantité d'eau fournie à différents niveaux (pompage, parcelle) pour évaluer la performance de l'irrigation. D'autres paramètres permettent aussi d'évaluer l'efficacité de la gestion de l'eau et la performance de l'irrigation. C'est le cas du rapport entre les besoins en eau des cultures et les quantités d'eau mobilisées ou encore l'efficacité de l'utilisation de l'eau qui est le rapport entre l'eau disponible à la sortie et celle fournie à l'entrée de différents niveaux du système d'irrigation (stockage, transport, distribution).

1.2. Contexte et justifications

La région naturelle de la vallée et du delta du fleuve Sénégal, se trouve en milieu sahélien où une pluviométrie insuffisante et irrégulière est régulièrement observée. L'irrigation y est développée pour mieux sécuriser la production agricole et améliorer les revenus des producteurs. Les cultures pratiquées sont le riz mais aussi de plus en plus les cultures maraichères et l'arboriculture. La culture du blé est également en train d'y être promue. Les techniques d'irrigation les plus répandues sont l'irrigation de surface qui nécessite des quantités d'eau importantes. Le contexte est marqué par des ressources en eau limitées et exposées à des risques accrus de dégradation liée aux activités humaines et aux effets du changement climatique.

Le manque de productivité de l'eau peut être dû à des pertes dans les systèmes d'irrigation et des conditions qui ne favorisent pas la rétention d'eau dans le sol. Il peut aussi être expliqué par de faibles rendements découlant d'un manque d'efficacité des pratiques culturales (types de cultures, variétés, timing des opérations, gestion de l'eau, fertilisation, protection phytosanitaire etc.). L'évaluation de la productivité de l'eau et d'autres indicateurs de performance de l'irrigation peut aider à identifier les contraintes et les opportunités pour une gestion efficace et durable de l'eau. L'économie d'eau qui découle de l'amélioration de sa productivité, contribue à la sécurité alimentaire et à la préservation de l'environnement en permettant d'étendre les surfaces irrigables ou l'allocation des eaux excédentaires à d'autres besoins (pêche, hydro-électricité, services écosystémiques). L'identification de contraintes et levier de production liée à la gestion de l'eau supporte la perspective de produire plus et mieux avec moins d'eau.

Les méthodes qui étaient le plus utilisées permettaient de déterminer l'évapotranspiration et la productivité de l'eau à une échelle localisée et souvent expérimentale mais avec l'utilisation des images satellitaires et la méthode du bilan d'énergie, des outils sont développés pour évaluer la productivité de l'eau évapotranspirée à une échelle plus représentative des systèmes agricoles. Pour ce qui est de la productivité de l'eau mobilisée que ce soit du niveau des grands aménagements hydro-agricoles (AHA), des périmètres irrigués villageois (PIV) et des périmètres irrigués privés (PIP), les volumes d'eau ne sont pas mesurés et la redevance hydraulique est calculée à l'hectare et non sur la base des volumes d'eau réellement utilisés. Néanmoins, quelques estimations localisées de la productivité de l'eau utilisée dans la parcelle (rapport entre production et volume d'eau entrant dans la parcelle) ont été effectuées dans le cadre de quelques activités de recherches. Ainsi, dans le cadre de projets de recherches

menés à l'ISRA sur l'efficacité de l'irrigation dans la vallée (IRRIWEST, RAF 5079, SOSTAGRI), divers dispositifs comme des déversoirs et stations agrométéorologiques ont été utilisés pour mesurer les paramètres liés aux quantités d'eau utilisées et à l'évapotranspiration. Ces informations ont été complétées par des données sur les rendements pour pouvoir calculer le rapport entre le rendement en paddy et la quantité d'eau reçue dans la parcelle. D'autres activités de recherche se sont aussi intéressées à la gestion de l'eau au niveau des cultures de décrue (WAAPP/Hydro, AGRICORA/ GENERIA). L'activité qui est développée dans le cadre du présent projet vient renforcer ces travaux avec une documentation, des enquêtes et une collecte de données de terrain.

1.3. Objectifs

L'objectif général est d'évaluer la productivité de l'eau dans la région d'étude au cours de ces dernières années. Pour ce faire, il s'est agi :

- D'étudier la disponibilité de l'eau et la mise en valeur agricole.
- De faire un diagnostic des contraintes liées à l'accès à l'eau ainsi qu'à la gestion et au coût de l'irrigation.
- D'évaluer des indicateurs de performances de l'irrigation dont la productivité de l'eau et discuter les perspectives de son amélioration.

1.4. Zone d'étude

1.4.1. Caractéristiques générales

La zone d'étude (figure 1) se situe le long de la rive gauche du fleuve Sénégal entre Bakel et Saint Louis. Le climat de la zone dont certaines caractéristiques sont sur la figure 2 est caractérisé par l'existence de 3 saisons que sont la saison des pluies (hivernage) entre les mois de Juillet et Octobre, la saison sèche chaude (SSC) entre Mars et Juin et la saison sèche froide (SSF) entre Novembre et Février. Les précipitations se concentrent entre Août et Septembre et ont varié au cours des dernières décennies entre moins de 300 mm dans la partie aval (Saint Louis) et plus de 500 mm dans la partie amont (Bakel). L'évapotranspiration potentielle (ET₀) dépasse 1500 mm par an et un vent chaud et sec (Harmattan) est observé entre mars et juin. Les principaux types de sols sont :

- Les sols argileux lourds appelés localement « Hollaldé » qui contiennent 50 à 75% d'argile et ont une forte capacité de rétention d'eau
- Les sols intermédiaires avec : ceux dénommés « Faux-hollaldé » qui ont un pourcentage d'argile de 30 à 50% avec une capacité moyenne de rétention en eau ; et ceux dénommés « Fondé » qui ont une teneur en argile plus faible (10 à 30%) et une capacité de rétention en eau moyenne à faible
- Les sols sableux « Dieri » qui sont situés dans les zones plus éloignées du fleuve et qui sont très filtrants du fait de leur pourcentage de sable très élevé (plus de 90%).

La zone dispose d'importantes potentialités pour l'agriculture irriguée, mais aussi les cultures de décrue et pluviales. Outre la riziculture d'hivernage et celle de saison sèche chaude, des cultures de diversification sont pratiquées en saison sèche froide avec notamment l'oignon et la tomate. La principale source d'eau pour l'irrigation est le fleuve Sénégal et ses dépendances. Le fleuve Sénégal prend sa source à la confluence des affluents Bafing et Bakoye, et est alimenté un peu plus en aval par le Falémé. Deux grands barrages (Diama et Manantali) ont été construits dans les années 1980 pour réguler le régime du fleuve avec plusieurs objectifs : le

barrage de Diama construit vers l'embouchure (27 km en amont de Saint-Louis) vise à éviter la salinisation de l'eau en période d'étiage et à maintenir le niveau d'eau suffisamment haut (réduisant les coûts de pompage) ; le barrage-réservoir de Manantali (capacité de 11,3 milliards de m³ et volume utile de 8 milliards de m³) est destiné à la production hydroélectrique, tout en soutenant d'autres usages (alimentation en eau potable, irrigation, inondation et navigation). En aval du barrage de Manantali, le barrage de Félou a ensuite été construit, et un autre (Gouina) est en cours de réalisation. Deux autres barrages sont également prévus, l'un (Koukoutamba) sur le Bafing et l'autre (Gourbassi) sur le Falémé. Il faut noter qu'en 2003, une brèche a été réalisée à 19 km en amont de l'embouchure naturelle du fleuve, soit 7 km en aval de Saint-Louis, pour réduire le risque d'inondation dans cette ville. Avant cet aménagement, les eaux rejetées dans l'océan par l'embouchure naturelle contribuaient à réduire la salinité des ressources en eau en aval du barrage de Diama, notamment dans la zone du Gandiolois, où d'importantes activités de maraîchage utilisent la nappe phréatique.

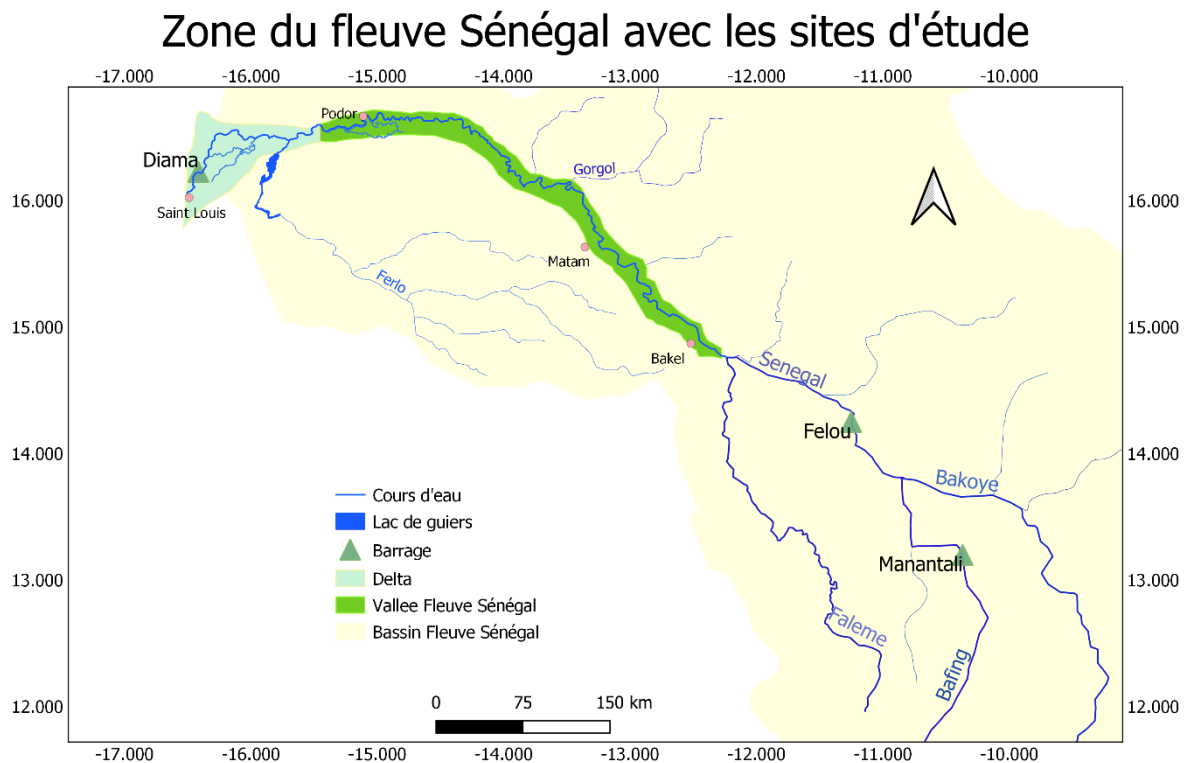
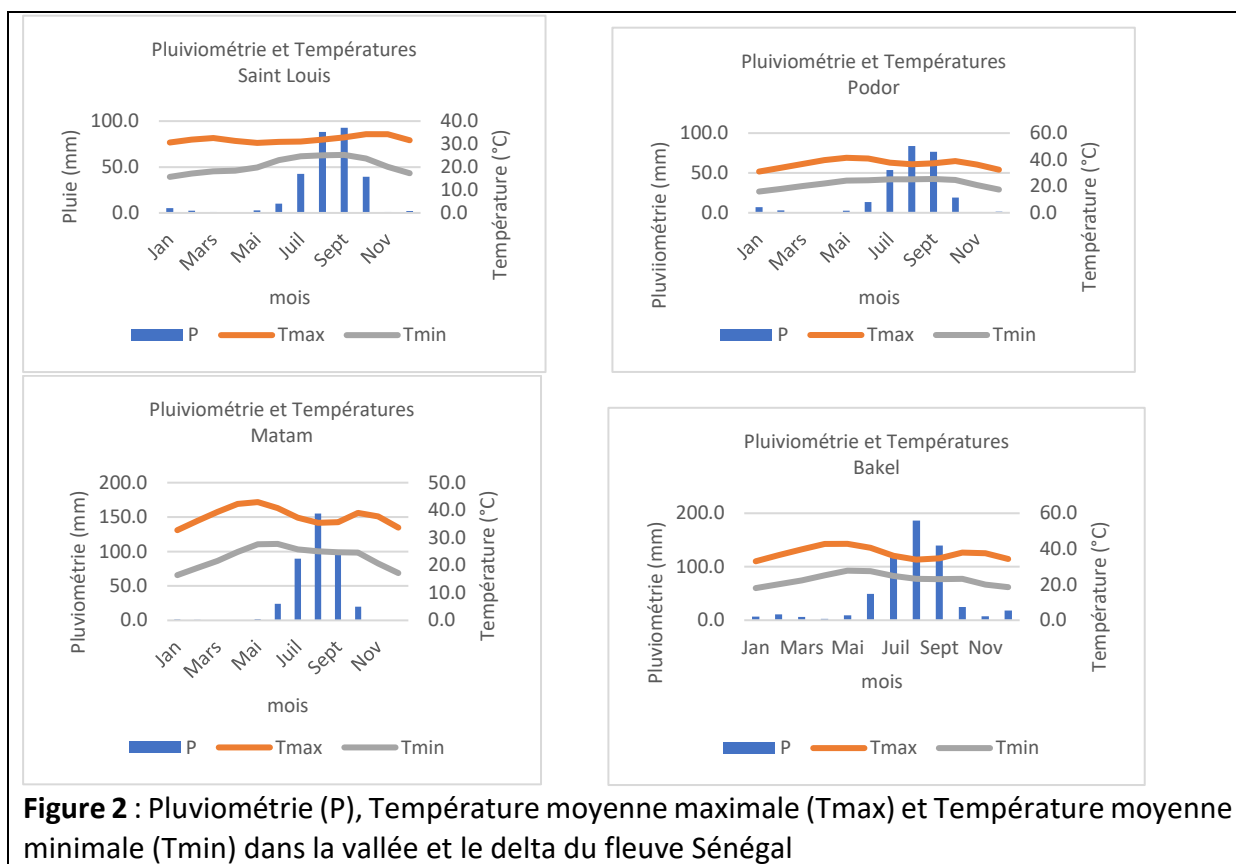


Figure 1 : Zone d'étude (vallée et delta du fleuve Sénégal)



Dans la zone d'étude, les périmètres qui ont été suivis se situent dans les localités de Diama (delta), de Ndiayene Pendao (moyenne vallée) et de Nguidjilone et Dondou (moyenne vallée).

1.4.2. Sites de la zone du Delta

Dans ce site du delta (figure 3), la principale ressource en eau est le fleuve Sénégal avec ses défluent que sont le Lampsar et le Gorom. Comme ouvrage principal sur le cours d'eau, il y a le barrage de Diama. Avant la construction du barrage, les agriculteurs pratiquaient une campagne par année mais avec l'après barrage, 2 à 3 campagnes de cultures sont effectuées. On note la présence de plusieurs exploitations agroindustrielles. L'émissaire du delta qui collecte des eaux de drainage est présente dans la zone avec la station de pompage de Mboubène qui évacue ces eaux salées en aval du barrage mais beaucoup de périmètres ne sont pas encore connectés à cet ouvrage. De nombreux aménagements ont été réalisés dans la zone qui abrite en partage avec la commune de Ronkh, le grand périmètre de Boundoum (3200 ha). Parmi les aménagements, il y a ceux de la cuvette de Ndiaye réalisés en 1981 et exploités par les unions de Ndiaye et Ndelle. L'union de Ndelle est composée d'une douzaine de GIE et dispose d'une superficie totale de 182,37 ha subdivisée en parcelles de 0.25 ha à 1 ha. Le périmètre de l'union de Ndelle est alimenté en eau par une station de pompage équipée de 3 GEP ayant chacun un débit de 210 l/s. On remarque un ancien équipement annexe de pompage sous pression qui permettait d'irriguer un périmètre d'arachide mais qui est abandonné à cause du coût hydraulique qui était trop élevé (375 000 F/ha). Pour l'Union de Ndiaye qui est composée de 7 GIE, la superficie totale est de 204 ha avec des parcelles de 0.3

ha à 1 ha. Le périmètre de l'union de Ndiaye est alimenté en eau par une station de pompage équipée de 5 GEP ayant chacun un débit de 210 l/s.

Sites d'étude dans la zone du Delta

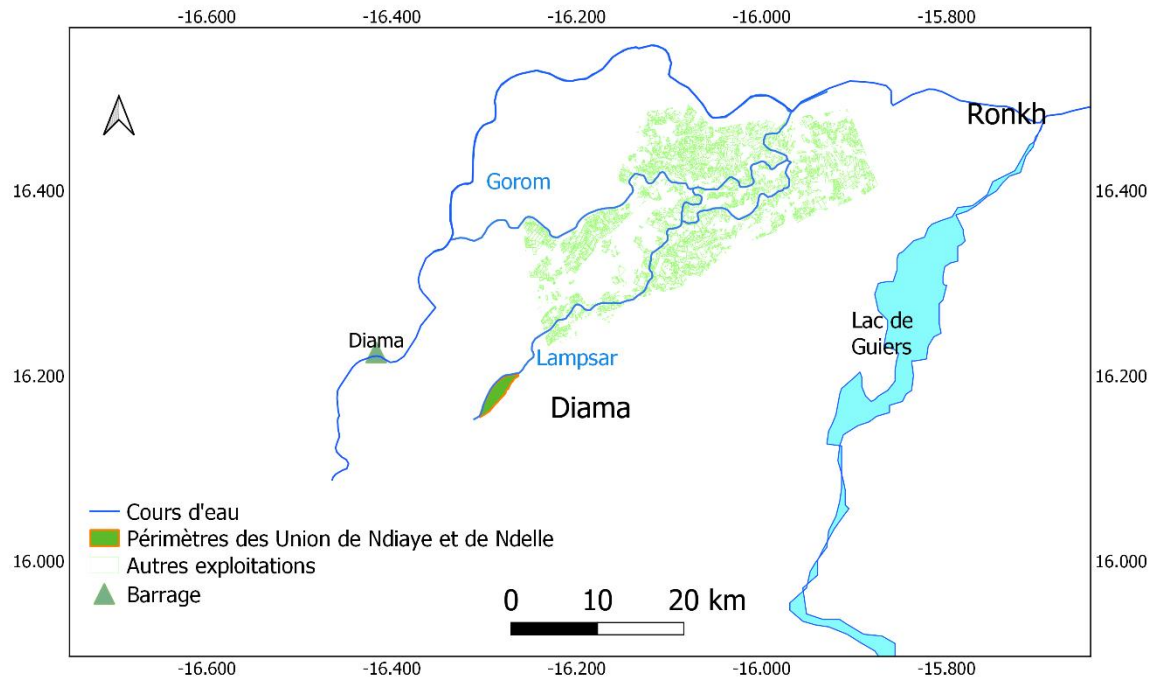


Figure 3 : sites de la zone du Delta

1.4.3. Sites de Ndiayene Pendao

Dans ce site (figure 4) du département de Podor, la principale ressource en eau utilisée pour l'irrigation est le Ngalenka. En 1997, ce cours d'eau a subi des travaux de réhabilitation et de recalibrage permettant de le raccorder gravitairement au Doué qui est un défluent du fleuve Sénégal. Ces travaux avaient été effectués dans le cadre du projet « Ngalenka amont » (KFW) d'aménagement de PIV dans cette zone. Avant l'aménagement des PIV, l'élevage était l'activité dominante mais actuellement la riziculture pratiquée en SSC et en hivernage a pris une place importante. Dans la zone, il existe des unions d'usagers qui regroupent les GIE pour la gestion de l'eau d'irrigation et de drainage et qui ont dans leurs rôles, l'entretien des infrastructures. Le tableau 1 montre quelques caractéristiques de certains de ces PIV qui ont une superficie comprise entre 10 et 40 ha et subdivisée en parcelles de taille 0,4 ou 0,5 ha. Au départ durant les périodes de tests, les périmètres fonctionnaient avec des groupes motopompes (GMP) qui ont été par la suite remplacés par des groupes électropompes (GEP) immergés dont le débit nominal est de 60 ou 80 L/s. Des compteurs horaires installés devaient permettre de connaître le temps de fonctionnement mais actuellement ils ne sont pas relevés par les pompistes. Le refoulement à travers des tuyaux est fait sur un bassin de dissipation situé non loin (à quelques mètres ou dizaines de mètres) de la station de pompage. Un canal d'amenée en terre compactée prend ensuite le relais jusqu'au PIV pour desservir des canaux arroseurs également en terre. La longueur totale du tuyau de refoulement et du canal

d'amenée (tableau 1) est très variable et atteint environ 900 m pour le PIV5B. Les parcelles sont irriguées en utilisant des siphons ou des morceaux de tuyaux traversant les cavaliers des canaux et il existe également un réseau de drainage dans les PIV.

Sites d'étude dans la zone de Podor

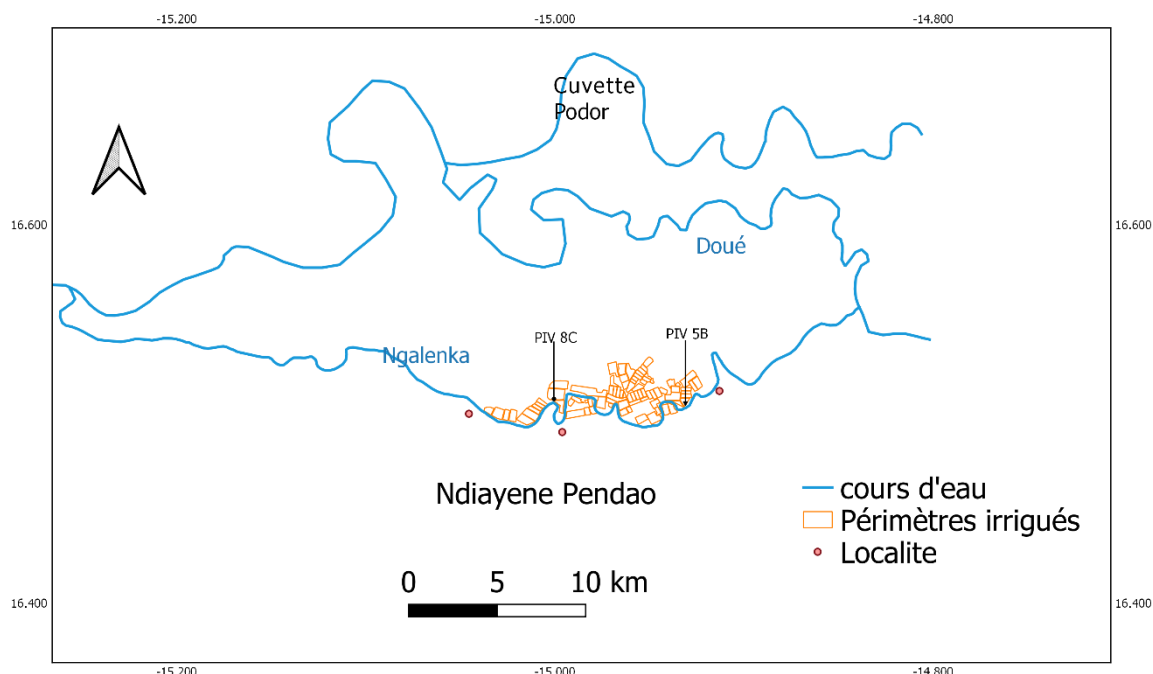


Figure 4 : sites de Ndiayene Pendao

Tableau 1 : Caractéristiques de quelques PIV à Ndiayene Pendao :

GIE/ PIV	Superficie (ha)	Station de pompage	Coordonnés GPS	Village
11C	16,8	1 GEP de 60 L/S	x 497223 y1823902	Ndiayène
11D	17,49	1 GEP de 60 L/S	x 497673 y1824328	Ndiayène
10A	32,6	1 GEP de 80 L/S	x 498344 y 1823963	wodabé
10 B	26,32	1 GEP de 60 L/S	x 498817 y 1823963	wodabé
10C	29,04	1 GEP de 80 L/S	x 498946 y1824424	kadione
8A	26,2	1 GEP de 80 L/S	x 499860 y1825095	wodabé
8C	33,92	1 GEP de 80 L/S	x 500592 y 1826034	Figo
8D	33,92	1 GEP de 80 L/S	x501243 y1825818	Pendao
7D	21,62	1 GEP de 60 L/S	x 502000 y 1824841	Figo
5B	12	1 GEP de 60 L/S		Nianga-Dieri

1.4.4. Sites de Nguidjilone et Dondou

Dans ces sites (figure 5) du département de Matam, la principale ressource en eau pour l'irrigation est le fleuve Sénégal ainsi que son défluent le Diamel (aussi appelé Yedia dans la zone) qui traverse la zone et dont le sens de l'écoulement est variable. Au moment de la visite (2^{ème} semaine d'Août 2020) l'écoulement se faisait du Diamel vers le fleuve Sénégal mais lorsque le niveau du fleuve Sénégal monte l'écoulement est inversé. Un ouvrage vanné réalisé à Dondou et un autre vers Matam sont utilisés pour améliorer le contrôle de l'eau pour les cultures de décrue et la pêche du côté aval de Doundou à Oréfondé. Il est géré pour avoir une

inondation assez longue de la cuvette de décrue mais n'empêche pas complètement la vidange de la cuvette. Les agriculteurs estiment que pour contrôler complètement l'inondation de la cuvette, il faudrait réaliser un troisième ouvrage au niveau d'Orofondé. Il existe un conflit d'intérêt entre irrigation et décrue dans la gestion de l'ouvrage : les irrigateurs profitent de la fermeture des portes hydrauliques pour irriguer à partir du Diamel à une période où l'ouverture de ces portes permet de cultiver dans la zone de décrue. Il y a un comité de gestion de l'ouvrage composé des irrigateurs, des cultivateurs de décrue et des pêcheurs avec la présence de la SAED. Le Conseiller agricole de la SAED détient une clé et les producteurs détiennent aussi une clé pour manœuvrer les portes hydrauliques. D'après les producteurs, jusqu'à maintenant il n'y a pas eu de gros problème causé par le conflit d'intérêt entre différents usagers.

Dans les villages de Nguidjilone et de Dondou, il existe des PIV (tableau 2) qui ont été réalisés ou réhabilités dans les années 1997 à 2003 par le Projet de Développement Agricole de Matam (PRODAM). Grâce à l'existence des PIV, la riziculture irriguée est devenue une activité de premier plan et actuellement, les cultures de saison sèche chaude ont plus d'importance qu'auparavant. Les cultures de décrue et pluviales sont toujours pratiquées mais dans une moindre mesure. Les PIV de Nguidjilone au nombre de 10 ont une superficie comprise entre 35 et 46 ha. Ils étaient initialement aménagés en parcelles de 1 ha mais avec les cessions et le système d'héritage certaines ont été subdivisées en des parcelles plus petites. Il existe également des périmètres irrigués privés (PIP) au nombre de 6 pour un total de 14 ha et dont le plus grand fait 5 ha. Le pompage se fait pour chaque PIV avec un groupe motopompe. Le refoulement est fait à travers des tuyaux jusqu'au canal d'amenée en terre compactée dont la longueur très variable avoisine 2000 m pour le PIV5).

Pour le village de Dondou, le nombre de PIV est également de 10 avec des superficies comprises entre 38 et 54 ha et des parcelles de taille 0,5 à 1 ha. Il y a aussi 2 PIP, 1 GPF (groupement de promotion féminine) et 1 jardin communautaire qui n'est plus exploité. Chaque PIV est alimenté par un GEP à la place de GMP qui existait avant la réhabilitation. Les GEP sont installés sur bacs flottants et sont alimentés en électricité à partir d'un transformateur pour chaque lot de 2 GEP. Ici aussi les canaux d'amenée ont une grande longueur qui avoisine quelquefois 2000 m comme pour le PIV6 et le PIV10.

Tableau 2 : Caractéristiques des PIV de Nguidjilone et Dondou

SITE DE NGUIDJILONE				SITE DE DONDOU			
PIV	Superficie totale (ha)	Station de pompage	Coordonnées GPS	PIV	Superficie totale (ha)	Station de pompage	Coordonnées GPS
1	36	GMP		1	45	GEP	-13.385480° / 16.004015°
2	43.25	"	-13.336226° / 15.923195°	2	38		-13.383092° / 16.029502°
3	38	"	-13.332437° / 15.924906°	3	54		-13.383731° / 16.034140°
4	45.75	"	-13.337590° / 15.916037°	4	38		-13.396533° / 16.025508°
5	45	"	-13.363696° / 15.929053°	5	50		-13.393110° / 16.007166°
6	40.5	"	-13.360859° / 15.940112°	6	46		-13.399034° / 16.015953°
7	44	"		7	38		-13.391250° / 16.028409°
8	42.55	"		8	42		-13.381239° / 16.003101°
9	44.5	"	-13.373732° / 15.945740°	9	37		-13.387340° / 16.009410°
11	44	"	-13.334813° / 15.909331°	10	46		-13.401805° / 16.020475°

Sites d'étude dans la zone de Matam: Nguidjilone et Dondou

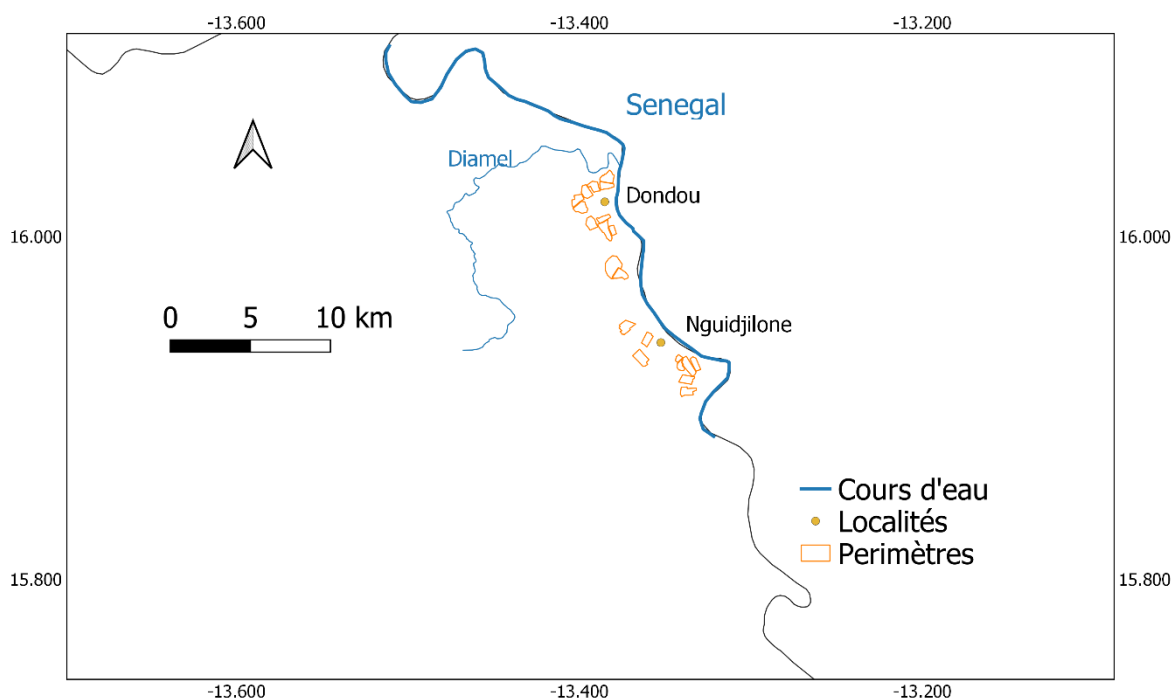


Figure 5 : Sites de Nguidjilone et Dondou

2. APPROCHE METHODOLOGIQUE

2.1. Enquêtes et revue documentaire

Une mission de diagnostic participatif a été effectuée du 09/08 au 13/08/2020 pour confirmer les sites d'étude et collecter des informations générales sur les systèmes agricoles. Les travaux de diagnostic ont enregistré la participation des producteurs trouvés sur les sites et des services techniques de l'agriculture. Pour des informations plus détaillées, des périmètres ont été choisis dans les sites de Matam (PIV2 de Nguidjilone et PIV2 de Dondou), de Ndiayene Pendao (PIV5B de Nianga-Dieri et PIV8C de Figo) et du Delta (Union de Ndiaye et Union de Ndelle). Des personnes ressources (responsables de groupe de producteurs et d'utilisateurs de l'eau) ont servi comme facilitateurs pour obtenir les informations recherchées. Les fiches d'enquêtes remises à ces collaborateurs demandent des informations sur l'exploitation des périmètres irrigués au cours des dernières saisons de cultures. Ces informations concernent principalement les surfaces exploitées, les cultures pratiquées, les rendements obtenus, la gestion de l'eau et la consommation d'énergie.

Des fiches de pompage et des factures d'électricité ont été collectées au niveau des stations de pompage et des entretiens ont été tenus avec les pompistes pour obtenir des informations sur les équipements et la gestion du pompage. Des documents sur les plans d'aménagement des périmètres et sur le suivi des campagnes de cultures ont été obtenus auprès de la SAED, du PRODAM et du CGER (Centre de Gestion et d'Economie Rurale). Comme autres documents techniques, il y a les bulletins hydrologiques sur le fleuve Sénégal et les relevés de hauteurs d'eau sur les axes hydrauliques fournis par la Division Régionale de l'Hydraulique de Saint Louis, ainsi que les bulletins agrométéorologiques du Groupe de Travail Pluridisciplinaire (GTP) coordonné par l'ANACIM.

2.2. Visites techniques de périmètres irrigués

Parallèlement aux enquêtes, trois missions ont été effectuées respectivement durant les périodes du 01/03 au 06/03/2021, du 31/05 au 04/06/2021 et du 12/07 au 16/07/2021 pour collecter des informations sur le terrain. Les périmètres visités sont ceux de Nguidjilone (PIV2) et Dondou (PIV2) dans la zone de Matam, ceux de Nianga Dieri (PIV5B) et Figo (PIV8C) dans la zone de Podor et les unions de Ndiaye et Ndelle dans la zone du delta.

Il s'agissait de faire des visites techniques sur des périmètres irrigués pour faire des observations, relever des coordonnées géographiques, évaluer des paramètres comme l'état des équipements d'irrigation, la source d'eau et d'énergie, les débits des pompes, l'occupation des parcelles et la gestion de l'eau dans les parcelles. Des mesures de débits de refoulement sur le canal d'amenée, ont été effectuées pour les PIV8C (Figo), PIV5B (Nianga-Dieri), PIV2 de Nguidjilone et PIV2 de Dondou en relevant le temps de remplissage de récipients de volume connu. A l'occasion des visites techniques, les contraintes sur l'irrigation étaient aussi discutées avec les producteurs trouvés dans les parcelles. Des responsables de groupe de producteurs ont servi de guides pour ces visites et des images étaient prises à chaque fois pour faciliter l'analyse.

2.3. Analyse de la disponibilité de l'eau et de la mise en valeur agricole

Pour évaluer la disponibilité de l'eau au cours des dernières années, les données hydrologiques sur le fleuve Sénégal ont été analysées en fonction des 3 saisons de cultures (SSC, SSF et hivernage). Les volumes lâchés aux barrages de Diama et Manantali ont été estimés en faisant de produit des débits (en litres/s) disponibles sur des périodes de 24h avec le temps correspondant. La pluviométrie annuelle a aussi été examinée sur la même période pour les stations de Matam, Podor et Saint Louis.

L'analyse de la mise en valeur agricole est effectuée en utilisant deux méthodes :

- D'une part avec un triage des bulletins de suivi de campagnes de la SAED entre 2016 et 2020. Des analyses statistiques ont été effectuées pour évaluer les superficies mises en valeur pour les différentes saisons.

D'autre part en faisant une analyse de l'indice NDVI (Indice de Différence Normalisée de la Végétation) sur les périmètres qui se trouvent dans la partie amont du delta et qui abrite de nombreux périmètres parmi les plus grands.

L'Indice de Différence Normalisée de la Végétation (NDVI) qui est défini par l'équation (1) a été utilisé sur des images Sentinel2

$$NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge} \quad (1)$$

Avec Rouge et PIR qui sont respectivement les réflectances dans le Rouge et le Proche Infra Rouge

Cet indice est largement utilisé pour l'étude de couvert végétal et de du stade de développement (Huang et al., 2021) et les valeurs NDVI supérieures à 0 sont associées à l'occupation par la végétation. Comme le montre la figure 7, sur 30 échantillons de la zone, les valeurs moyennes de NDVI en SSC en en hivernage sont comprises entre 0 et 0,8 au cours de la saison. L'indice NDVI a été calculé à des périodes déterminées pour observer l'occupation des parcelles sur les différentes saisons. Cependant, la distinction entre les parcelles de saison

sèche froide et de saison sèche chaude peut être difficile car il y a une période de chevauchement de ces deux campagnes. Ainsi pour limiter les risques de confusion l'analyse de NDVI pour la SSC est effectuée entre fin Mai et fin juin car à cette période, les parcelles de SSF sont pour la plupart récoltées. Pour la saison d'hivernage du riz, les images de la période de Novembre à mi- Décembre sont choisies pour des raisons similaires. Durant cette période choisie, les cultures de saison sèche froide (SSF) commencent à peine et sont au stade de pépinière. Comme le riz est à un stade de développement très avancé durant les périodes considérées et en s'aidant des connaissances sur le terrain, les valeurs de NDVI supérieures ou égales à 0.3 ont été considérées comme mises en valeur. Ces valeurs permettent d'exclure des parcelles non cultivées qui pourraient être occupées par une végétation spontanée.

Les images Sentinel2 datant depuis 2016 sont disponibles gratuitement sur les sites <https://earthexplorer.usgs.gov> de l'United States Geological Survey (USGS) et <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> de l'European Space Agency (ESA). Pour les bandes B04 (Rouge) et B08 (PIR) des images utilisées, la résolution spatiale de 10m x 10m permet de bien distinguer les contours des parcelles dans les périmètres irrigués de la zone. Les images peuvent être obtenues à une fréquence (résolution temporelle) de 5 ou 10 j ce qui facilite un choix adéquat de la période d'intérêt. Le logiciel QGIS a été utilisé pour l'analyse cartographique. Après la définition de la valeur seuil de NDVI suivi d'une polygonisation sur l'image, une élimination des entités ne respectant pas le seuil ($NDVI \geq 0.3$) est effectuée et des calculs de champs sont faits sur les entités restantes pour évaluer les surfaces mises en valeur.

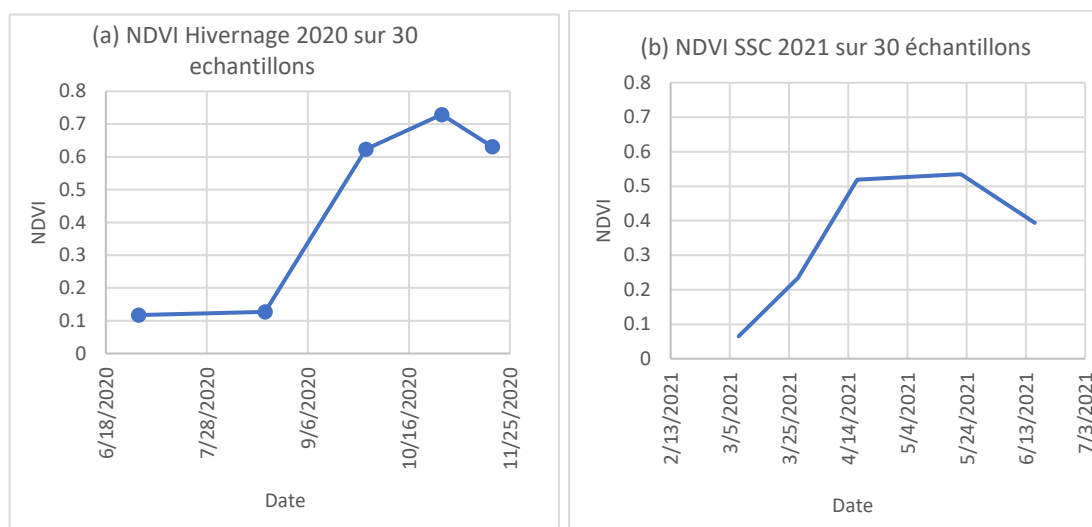


Figure 7 : NDVI moyen en Hivernage 2020 (a) et SSC 2021 (b) et sur 30 échantillons dans la cuvette de Ndiaye

2.4. Analyse des contraintes d'irrigation

Cette analyse s'est intéressée à l'accès à la ressource en eau, aux équipements d'irrigation ainsi que la gestion du pompage et de l'eau à la parcelle. Les caractéristiques physiques des périmètres et les informations rapportées sur l'irrigation ont été étudiées pour identifier les contraintes qui affectent la productivité de l'eau. Il s'agit par exemple des facteurs causant des pertes d'eau, affectant l'hydraulicité des canaux et augmentant les charges d'exploitation. Les questions liées à la salinité des sols, au drainage, au rythme d'exploitation des périmètres,

le pourcentage de superficies exploitées, les fréquences d'irrigation, les lames d'eau, les temps de pompage sont aussi discutés.

Au niveau des unions de Ndiaye et de Ndelle (zone Delta), des fiches de suivi de station de pompage disponibles sur quelques périodes comportent des informations sur le nombre d'heures de pompage. Ces fiches ont été utilisées pour évaluer les volumes pompés en effectuant un triage des périodes couvrant des saisons entières. Les volumes pompés sont calculés avec le produit du débit nominal par le temps de pompage. Au niveau du PIV8C de Figo (zone Ngalenka), les heures de pompage sont obtenues à partir des renseignements fournis par l'enquête sur le nombre de jours et la durée journalière de pompage. Pour le PIV2 de Nguidjilone qui utilise un GMP, l'estimation du volume pompé est également faite en se basant sur les renseignements fournis par l'enquête.

Pour estimer le coût de l'énergie de pompage au niveau des périmètres équipés de GEP, les factures d'électricité disponibles ont été regroupées par saison et les montants correspondant aux consommations ont été obtenus en s'assurant qu'ils ne comportent pas d'arriérés. Le type d'abonnement et la puissance souscrite qui renseignent sur la facturation ainsi que le cosinus-phi ($\cos\phi$) qui témoigne de l'efficacité de l'installation ont aussi été examinés. Les consommations en heures normales et en heures de pointe ont également été considérées dans l'analyse. Au niveau du PIV2 de Nguidjilone qui utilise un GMP, l'analyse de la consommation en carburant s'est basée sur les résultats de l'enquête.

2.5. Evaluation de la productivité de l'eau et d'indicateurs de performance de l'irrigation

Cette évaluation a été effectuée sur des saisons de culture au niveau des périmètres du GIE Ngayene (zone Delta), PIV2 de Nguidjilone), PIV2 de Dondou et PIV8C de Figo. Les renseignements issus de l'enquête sur les rendements en paddy ont été utilisés pour calculer la productivité de l'eau PE à l'échelle parcellaire ou à l'échelle du périmètre avec l'équation (2).

$$PE = \frac{R}{ETR} \quad (2)$$

Avec R(kg/ha), le rendement en paddy et ETR (m^3/ha) le volume correspondant à l'évapotranspiration réelle et l'interception.

ETR a été obtenue à partir de l'outil WaPOR 2.1 (FAO, 2019) sur son site internet. Cet outil fournit des images avec des informations sur ETR et d'autres paramètres tels que l'évapotranspiration potentielle, la transpiration ou la biomasse. Les images sont à différentes résolutions spatiales (250 m, 100 m ou 30 m) et temporelle (année, mois, décade). Pour la Sénégal, la résolution spatiale de 30 m est disponible sur une partie du delta. Le facteur de correction de ETR indiqué (0.1) a été appliqué avant de faire une intégration sur la saison considérée des valeurs d'ETR par décade (moyenne journalière). Les valeurs de rendement obtenus sur le terrain ont ensuite été utilisées avec ETR pour le calcul de PE. En se basant sur les connaissances de terrain, le calage utilisé pour la période des campagnes de culture est du 1 Juillet au 20 Décembre pour l'Hivernage ; du 10 février au 30 juin pour la saison sèche chaude et du 20 Décembre au 31 Mai pour la saison sèche froide. L'outil WaPOR a aussi été utilisé pour évaluer d'autres indicateurs de performance de l'irrigation qui sont rappelés par Chukalla (2020) et qui sont :

- L'Efficacité (Eff) qui est le rapport (équation 3) entre Tr (transpiration saisonnière) et ETR saisonnière. Elle donne une indication sur l'efficacité des pratiques agronomiques dans l'utilisation de l'eau pour la croissance des cultures.

$$\text{Eff} = \frac{\text{Tr}}{\text{ETR}} \quad (3)$$

- L'Adéquation (Ad) qui est estimée par le rapport (équation 4) entre ETR saisonnière et ETP (évapotranspiration potentielle saisonnière).

$$\text{Ad} = \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}} \quad (4)$$

L'évapotranspiration potentielle pour le riz a été globalement estimée sur la saison à $\text{ETP} = 1.125 \times \text{ET0}$ (FAO). Une bonne performance est considérée pour $0,8 < \text{Ad} \leq 1$, une performance acceptable pour $0,68 < \text{Ad} \leq 0,8$ et une mauvaise performance pour $\text{Ad} \leq 0,68$.

D'autres paramètres qui ont aussi été évalués comme indicateurs de l'efficacité de la gestion de l'eau sont le rapport entre les volumes d'ETP et les volumes d'eau disponibles (pompage et pluie) ou encore le rapport entre le rendement et les volumes d'eau disponibles.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Disponibilité de l'eau au cours des dernières années

Les volumes d'eaux relâchés annuellement et saisonnièrement aux barrages de Diama et Manantali sont dans les figures 8 et 9. On constate au niveau du barrage de Diama que des volumes pouvant dépasser 10 milliards de m³ par année sont relâchés à l'aval. Ceci est lié au fait que pendant l'hivernage les vannes du barrage sont grandes ouvertes pour des raisons de sécurité. On remarque que pour les années 2017 et 2021, les cumuls sont les plus faibles sur la période étudiée. Durant l'hivernage, une grande partie des ressources ne provient pas de Manantali comme le montre les volumes plus élevés observés à Diama. La pluviométrie (figure 10) dans la zone a été très variable mais les volumes relâchés au barrage sont aussi influencés par la pluviométrie dans le haut bassin. Pour la saison sèche chaude, les volumes relâchés à Manantali sont supérieurs à ceux de Diama et permettent de soutenir l'irrigation durant cette saison. La différence de volumes entrant et sortant pour la SSC est de l'ordre de 2 milliards de m³ (tableau 3). Durant la saison sèche froide les effets de l'hivernage sont encore perceptibles avec les volumes relâchés plus proches au niveau des deux barrages. Des informations complémentaires sur les débits, les hauteurs d'eau et les questions liées à l'inondation des cuvettes de décrue sur la période 2015-2019 sont disponibles dans une autre étude (Sall et al., 2020).

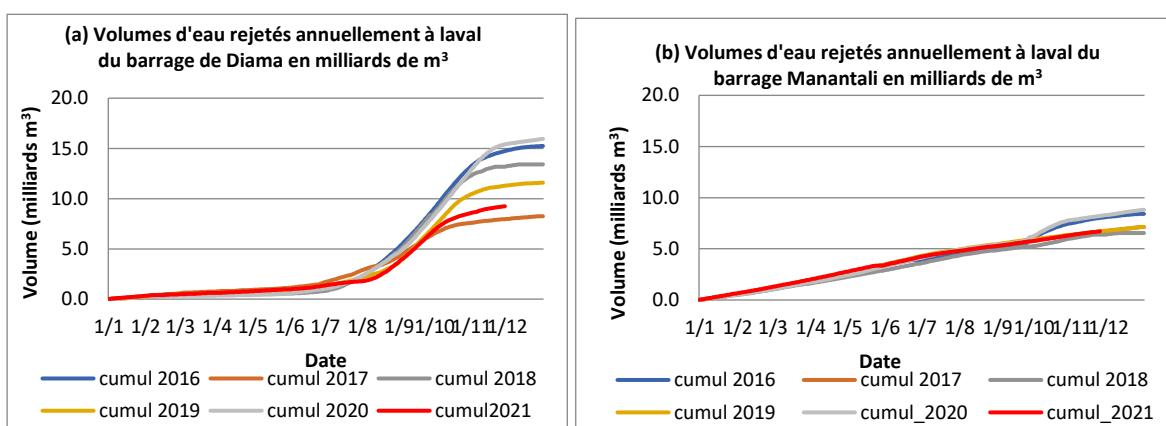


Figure 8 : Volumes d'eau annuels relâchés aux barrages de Diama (a) et Manantali (b) (Données : DRH/ Saint Louis)

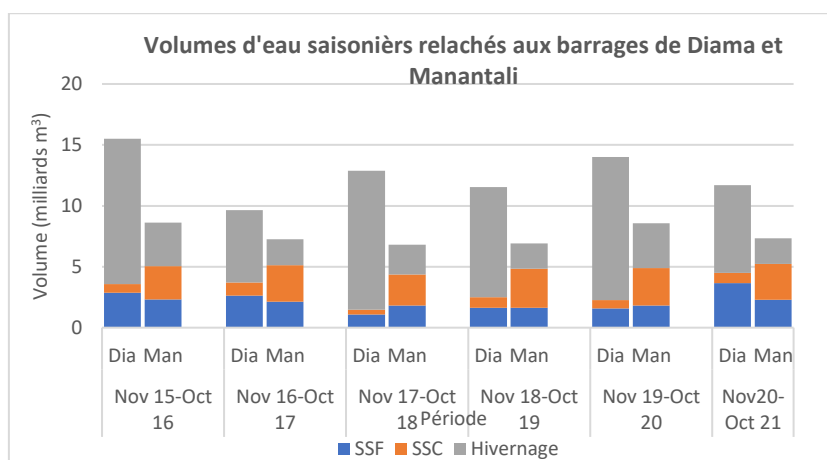


Figure 9 : Volumes saisonniers d'eau relâchés aux barrages de Diama et Manantali (Données : DRH/ Saint Louis)

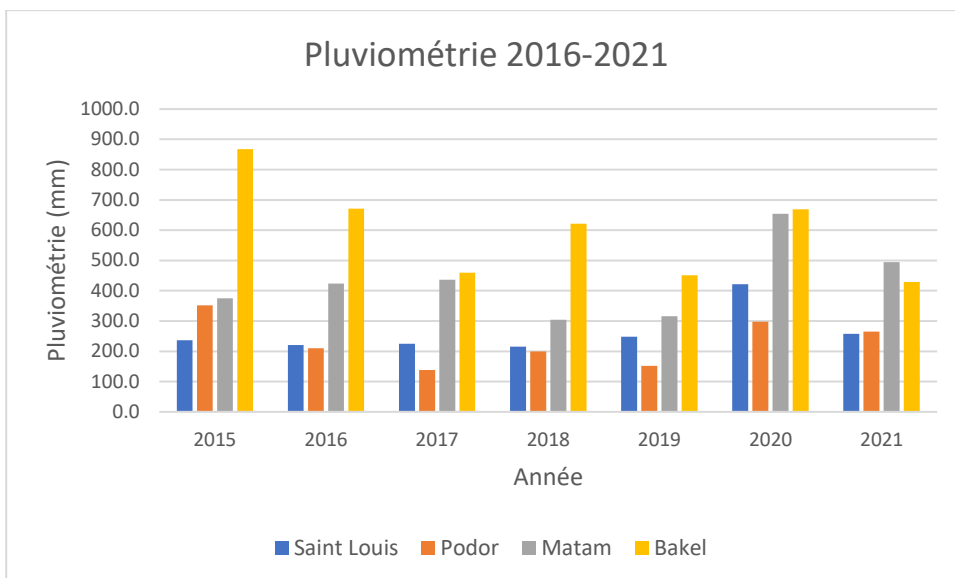


Figure 10 : Pluviométrie de la zone entre 2016 et 2021

Tableau 3 : Différences entre Volumes entrants (Manantali) et sortants (Diama) en SSC

Période	Volume (x 10 ⁹ m ³)
SSC 2016	2.02
SSC 2017	1.93
SSC 2018	2.17
SSC 2019	2.33
SSC 2020	2.39
SSC 2021	2.10

3.2. Mise en valeur agricole au cours des dernières années

Les résultats d'analyse des bulletins de suivi de campagne des années 2016-2017 à 2020 – 2021 concernant les surfaces mises en valeur sont sur la figure 11. Globalement les surfaces totales emblavées annuellement ont connu une augmentation régulière passant de près de 81 318 ha à 109 416 ha. Pour le riz, les surfaces emblavées en hivernage ont été plus faibles et ont représenté moins de 80% de celles cultivées en saison sèche chaude. Par rapport aux superficies totales, la mise en valeur de la campagne de SSC se situe entre 46 et 56%, celle d'hivernage entre 28 à 35% et enfin celle de SSF 12 à 23 %.

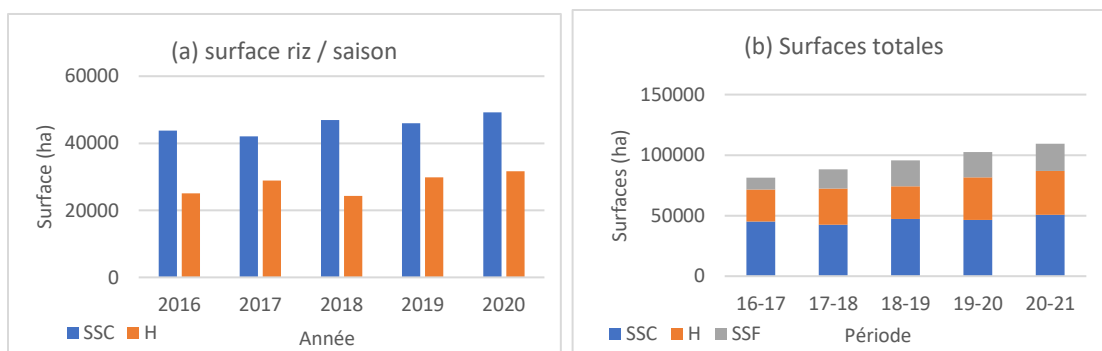


Figure 11 : Superficies en riz (a) et totale (b) mises en valeur ces dernières années

Les résultats de l'analyse du NDVI pour la mise en valeur dans la zone amont du delta sont montrés sur la figure 12. Sur la période 2016 – 2020, les surfaces emblavées en SSC ont été

plus importantes en 2018 et 2019 et ont baissé en 2020. Pour la saison d'hivernage et pour les deux saisons réunies, les mêmes observations sont aussi valables. La figure 13 montre la représentation cartographique de la mise en valeur et on observe une mise en valeur bien inférieure en hivernage. On peut donc retenir que la saison d'hivernage où les ressources en eau sont plus élevées est moins valorisée pour la riziculture. Cette situation préoccupante serait liée à un manque de rendement durant la saison d'hivernage et un comité scientifique regroupant les acteurs (institutions et producteurs) est d'ailleurs mis en place pour y réfléchir. Mais on peut déjà présumer que les conditions plus favorables d'infestation parasitaire, les problèmes d'inondation des parcelles et leur accès plus difficile y sont pour beaucoup. Il existe aussi des contraintes de mise en valeur liées au chevauchement des calendriers. Comme le montre le tableau 4, beaucoup d'exploitants ne parviennent pas à réaliser une campagne d'hivernage à la suite d'une campagne de saison sèche chaude, donc deux campagnes de riz sur une même année et sur la même sole. Ainsi ils choisissent de mettre partiellement le périmètre ou de sauter une saison. A l'union de Ndelle, le rythme d'exploitation est de 2 campagnes de riz (Hivernage et SSC) pour une campagne de maraichage en SSF. Si la campagne de riz de SSC est effectuée, celle d'hivernage qui suit n'est pas effectuée. Les périmètres doivent aussi choisir entre la campagne maraichère de saison sèche froide et la campagne de riz de contre saison chaude car une bonne période de ces deux campagnes coïncide. Certaines parcelles des PIV qui ont des problèmes de salinité du sol ne sont pas utilisées pour la culture de l'oignon. Les facteurs de retard sont liés au manque de coordination dans les organisations de producteurs, à la gestion du crédit entre les deux campagnes (remboursement et acquisition d'un nouveau crédit), à la disponibilité des machines (préparation du sol et récolte, évacuation de la production, pompage) et des intrants.

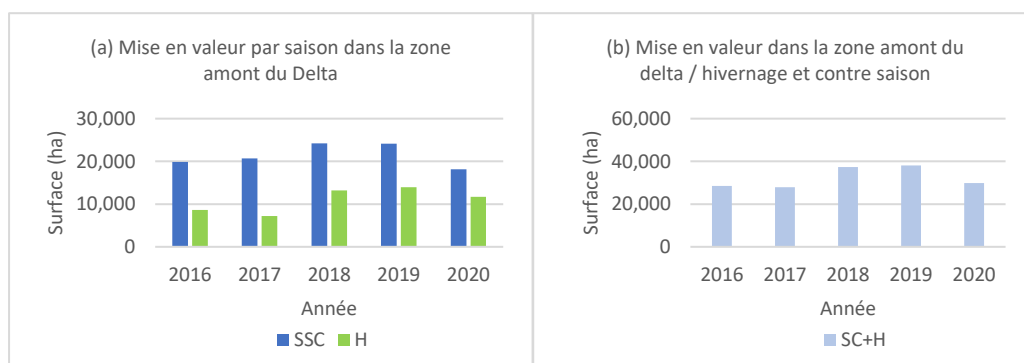


Figure 12 : Mise en valeur en riz par saison (a) et par année (b) dans la zone amont du delta à partir de l'analyse NDVI

Mise en valeur par saison dans la zone amont du Delta entre 2016 et 2020 (analyse NDVI)

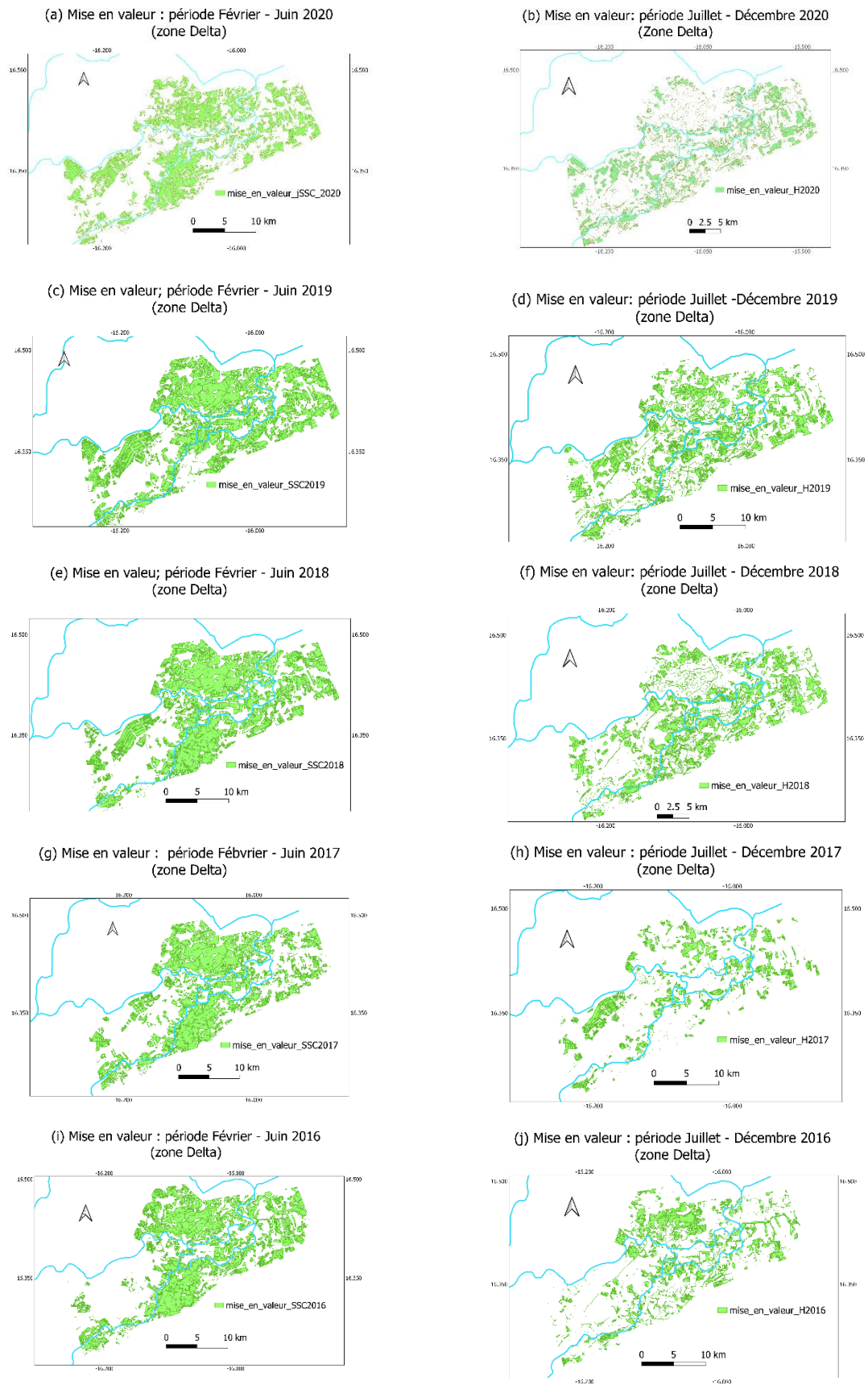


Figure 13 : Mise en valeur dans une zone du Delta en SSC (a, c, e, g, i) et Hivernage (b, d, f, h, j) : Période 2016 - 2020

Tableau 4 : Surface en % mise en valeur dans quelques périmètres

Périmètres / Union	Hivernage 2020	SSF 20-21	SSC 2021
Ndelle	0	87	0
Ndiaye	74	0	91
Nianga-Dieri PIV5B	50	50	50
Figo PIV8C	50	50	50
Dondou PIV2	0	0	100
NGhuidjilone PIV2	100	0	0
NGhuidjilone PIV3	73.7	0	39.5
NGhuidjilone PIV5	24.4	0	0
NGhuidjilone PIV6	39.9	9.9	34.6
NGhuidjilone PIV9	74.2	15.7	29.8
NGhuidjilone PIV11	55.1	0	15.9

3.3. Contraintes d'irrigation au niveau des sites du Delta

Accès à l'eau et problèmes d'aménagement

Beaucoup de périmètres de la zone du delta signalent des problèmes d'accès à l'eau avec la baisse régulièrement constatée du niveau d'eau dans les canaux d'irrigation surtout dans la zone amont dès le mois de janvier. L'invasion des canaux par les plantes aquatiques qui rend difficile l'irrigation est noté. Des problèmes de drainage des eaux salées avec des aménagements défectueux (canal de drainage inexistant, mauvais planage des parcelles) sont courants. Il existe une vaste zone entre le barrage de Diama et Bango qui est inondée durant l'hivernage et une petite partie aménagée sommairement sans système de drainage. Quand le barrage est ouvert les eaux salées en aval sont refoulées dans les périmètres, ce qui accentue la salinisation déjà importante de ces derniers. Ces problèmes sont quelques fois à l'origine d'abandon en pleine campagne de SSC. A l'union de Ndellé, des problèmes de fuites d'eau dans le canal principal et l'inondation des parcelles les plus proches de la station de pompage sont signalés.

Gestion de l'irrigation

Les aménagements regroupant plusieurs périmètres sont alimentés en eau par des stations de pompage équipées de GEP et gérés par des unions hydrauliques. Certains périmètres utilisent des GMP pour l'irrigation et sont aussi gérés par des groupes de producteurs. Durant la mise en eau pour l'irrigation du riz de SSC au niveau de la Station de Ndelle, les 3 GEP de 210 l/s peuvent fonctionner en même temps 6 jours sur 7 durant 1 mois pour couvrir la surface à exploiter en évitant autant que possible l'heure de pointe (pour la facturation de l'électricité) et le débordement des canaux. Après la mise en eau un arrêt d'une semaine est observé et par la suite, seules 02 pompes peuvent être utilisées à la fois pour une irrigation de 6h à 18h. La troisième pompe maintenue au repos change chaque jour. Pour la campagne de SSC, la durée totale d'irrigation est d'environ 4 mois y compris la mise en eau. Pour l'hivernage, la mise en eau se fait avant l'installation des pluies et de la même façon qu'en SSC mais en cours de campagne, l'irrigation dépend de la pluviométrie et une durée d'un mois sans pompage est possible si la situation pluviométrique le permet. Pour la SSF (cultures maraîchères), la mise en eau est effectuée entre 6h et 18 h. Après repiquage, un arrêt de 10 jours est observé avant la reprise de l'irrigation tous les 2 jours en démarrant avec 1 pompe à partir de 3h du matin et en renforçant avec une deuxième pompe à partir de 4h30 jusqu'à 15 h. La figure 14 montre le rythme de pompage en SSC 2019 à l'union de Ndiaye où des règles de fonctionnement

similaires à l'union de Ndelle sont appliquées. Au moment de la visite effectuée le 06/03/2021, certaines parcelles étaient mises en eau avec une lame d'eau de 10 à 20 cm pour le riz de SSC déjà semé à la volée et qui n'avait pas encore levé. Le semis dans une lame d'eau assez épaisse est utilisé pour lutter contre les oiseaux qui mangent les semences. Durant certaines périodes le niveau du fleuve offre la possibilité d'irriguer gravitairement à certains endroits de la cuvette de Ndiaye et réduire ainsi les temps de pompage.

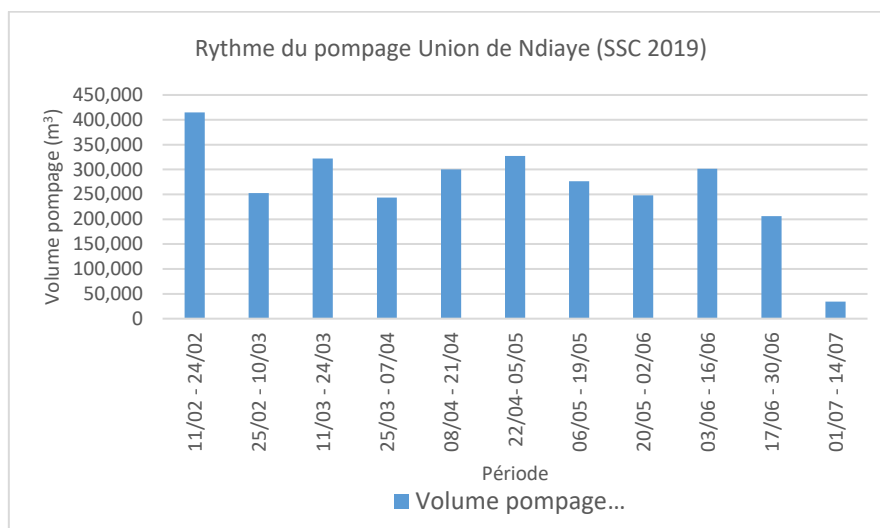


Figure 14 : Rythme de pompage en SSC 2019 à l'union de Ndiaye

Coûts liés au pompage

L'examen des factures d'électricité entre 2019 et 2020 a montré que les stations de pompage de Ndelle et Ndiaye sont alimentées en électricité par la Senelec en tarif MT avec une puissance souscrite de 40 KW pour Ndiaye et 34 kW pour Ndelle. Dans ce mode de facturation, un tarif plus élevé en heures de pointe (19h à 23h) ainsi qu'une prime fixe sont appliqués. Sur les factures de 2020, on constate des consommations en heures de pointe, ce qui veut dire que les producteurs sont quelquefois amenés à pomper durant ces heures même s'ils disent éviter de le faire. Ainsi, des consommations en heure de pointe (K2) atteignant 47% de celles en heures normales (K1) sont notées sur la facture de la période de novembre 2020 (26/10 – 25/11) alors que le tarif en K2 était 1.6 fois plus élevé. Des valeurs de $\cos\phi$ inférieur à 0.5 sont observées sur certaines factures de l'union de Ndiaye sur la période de Avril à Août 2020 (25/03 -25-08). Cette situation influe négativement sur la consommation d'énergie (énergie réactive). La prime fixe qui a été appliquée en 2020 atteint aussi 16% du montant de la facture sur la période du 26/03 au 01/05 2020. Le tableau 5 montre le coût calculé par ha de la facture d'électricité pour les unions de Ndellé (SSC 2020) et de Ndiaye (Hivernage 2020). Pour les périmètres utilisant un GMP, la capacité est de l'ordre de 300m³/h pour 20 ha pris en charge avec une consommation de 120 à 140 litres de carburant pour un hectare de riz. La mise en eau peut prendre 60 litres de carburant par ha et chaque irrigation supplémentaire 20 litres par ha. En comparant avec le cas des GEP de Ndelle et Ndiaye, le coût de l'énergie par ha apparaît plus élevé pour les GMP. Chaque membre doit payer au GIE un cout hydraulique proportionnellement à la surface exploitée pour supporter les charges liées à l'irrigation. Pour les récentes campagnes aux unions de Ndellé et Ndiaye, le coût hydraulique a varié de 95 000 FCFA à 105 000 FCFA, les montants les plus élevés étant pour la saison sèche chaude.

Tableau 5 : Coûts d'énergie de pompage au niveau des unions de Ndiaye et Ndelle

Union	Surface exploitée (ha)	Période	Montant factures d'électricité	Coût d'énergie par ha (FCFA/ha)
Ndiaye	151.6	26/06/2020 – 25/12/2020 (H2020)	4 369 500	28 823
Ndelle	174.71	26/01/2020 – 25/05/2020 (SSC2020)	5 290 000	30 279

3.4. Contraintes d'irrigation au niveau des sites de Ndiayene Penda

Aménagements et accès à l'eau

On note des problèmes d'accès à l'eau surtout durant la saison sèche chaude car il arrive que le niveau de l'eau dans le Ngalenka baisse au point d'occasionner un dénoyage des pompes immergées (figure 15). Au niveau des périmètres du tableau 2, les producteurs déplorent la vétusté des pompes qui n'ont pas été changées depuis l'installation de départ. On observe des pannes fréquentes avec des réparations nécessitant quelques fois un rebobinage des moteurs. Il se pose également un problème de trouver des pièces de rechange adaptées. On a noté des débits au refoulement d'environ 250 m³/h pour le PIV8C et 200 m³/h pour le PIV5B de Nianga-Dieri pour des débits nominaux respectifs de 288 m³/h et 216 m³/h. Il y a des pertes importantes à travers des fuites sur les tuyaux de refoulement et également par infiltration sur des canaux en terre de grande longueur et envahis par les herbes qui accentuent le problème d'écoulement. Ainsi, pour le périmètre 5B avec un canal d'amenée long d'environ 900 m, l'eau met près de 3h de temps pour arriver à la parcelle (entre 6h et 9h du matin). L'éloignement des membres de certains GIE de plusieurs km par rapport à leur PIV et qui réduit leur temps de présence dans leurs parcelles est aussi noté comme une contrainte.



Figure 15 : Dénoyage de pompe dû à la baisse de l'eau dans la Ngalenka

Gestion de l'irrigation

Au départ, les pompes fonctionnaient 12 h de temps par jour et 5 jours sur 7 et permettait de prendre en charge totalement les périmètres. Mais actuellement chaque GIE gère le pompage en fonction de ses contraintes. Certains GIE utilisent à tour de rôle une moitié du périmètre par saison expliquant cela par un manque de débit d'eau qui a diminué avec le temps. Mais

même avec l'occupation partielle par saison dans ces périmètres, on constate que des cultures de SSF et de SSC peuvent coexister durant une même période (mars à mai) sur des parcelles différentes. Durant la mise en eau pour le riz, la durée d'irrigation est de 12h à 23h30 par jour suivant les PIV pendant une période de 7 à 16 jours. Après la mise en eau certains PIV observent un repos hebdomadaire de 1 à 3 jour durant la SSC ou en fonction de la pluie durant l'hivernage. Pour certains PIV, une durée de pompage de 23H30 par jour (avec seulement une pause de 30 mn par jour) et 6 Jour sur 7 sur toute la saison est justifiée par l'insuffisance du débit. Une durée de tour d'eau atteignant 3 semaines est aussi expliquée par les mêmes contraintes de débit. Considérant l'hétérogénéité des sols avec des parcelles qui retiennent l'eau à peine durant 3 jours et d'autres pendant plus de 2 semaines, il est difficile de respecter un tour d'eau strict. Ainsi des arrangements sont effectués sur les tours d'eaux pour venir en aide aux parcelles les moins favorisées. Le tableau 6 montre le nombre d'irrigations et la lame d'eau pour les parcelles du PIV5B de Nianga-Dieri en SSC 2021. Pour le maraichage, l'irrigation débute en Novembre - Décembre pour se terminer vers fin Mai. Pour la mise en eau au repiquage de l'oignon, un pompage de 10 à 12 h par jour sur une période de 7 à 10 jours est effectué. Ensuite un repos de 1 à 3 jours est observé par semaine suivant les PIV et les surfaces exploitées. Plusieurs spéculations (oignon, aubergine, gombo, ...) peuvent coexister dans certains périmètres comme celui de PIV8C de Figo.

Tableau 6 : Gestion de l'irrigation Nianga-Dieri SSC 2021

Nombre irrigation/ parcelle	Lame d'eau moyenne (cm)	Type de sol	Temps d'irrigation (j/ha)	Volume en m ³ /ha
13 -14	10	Hollaldé	3 .1- 4.7	13000 – 14 000

Coûts d'énergie du pompage

L'examen des factures d'électricité montre un abonnement en tarif PMP (Professionnel Moyenne Puissance) avec une puissance souscrite de 8.589 kW, sans application de prime fixe. Les factures d'électricité rapportées aux surfaces exploitées au niveau des PIV8C (hivernage 2020, SSF 20-21 et SSC 2021) et 5B (SSF 20-21 et SSC 2021) sont montrées sur le tableau 7. On remarque que ces coûts sont plus élevés que ceux au niveau des unions de Ndelle et Ndiaye dans le Delta. Le coût hydraulique a varié de 70 000 FCFA/ha à plus de 105 000 FCFA/ha et est ajusté en fin de campagne en fonction des coûts définitifs comprenant toutes les factures d'électricité. Il arrive que le coût hydraulique soit plus élevé en SSF comme dans le PIV8C de Figo, ce qui est lié à l'utilisation de plusieurs spéculations et l'allongement de la campagne jusqu'en Juin.

Tableau 7 : Coûts liés au pompage au niveau des PIV8C et PIV5B

Périmètre	Surface exploitée (ha)	Période	Montant factures d'électricité	Coût d'énergie par ha (FCFA/ha)	Coût hydraulique (FCFA/ha)
Nianga - Dieri PIV5B	12.8	24/11/2020 – 25/05/2021 (SSF 20-21 et SSC 2021)	790268	61739.7	75 000 (SSF) et 125000 (SSC)
Figo PIV8C	32	24/11/2020 – 25/05/2021 (SSF 20-21 et SSC 2021)	1894900	59215.6	100 000 (SSF) et 70 000 (SSC)
Figo 8PIVC	16	26/05/2020 – 23/11/2020 (H 2020)	827900	51743.8	75 000

3.5. Contraintes d'irrigation au niveau des sites de NGuidjilone et Dondou

Aménagements et accès à l'eau

Dans la zone, le niveau du fleuve Sénégal est très variable et il se pose un problème de baisse du niveau du fleuve pendant la saison sèche. Les pompes sont donc installées sur bac flottant pour limiter la hauteur d'aspiration mais en revanche ceci augmente la hauteur de refoulement et l'énergie de pompage. Avec la longueur élevée des canaux qui peut atteindre 2000 m, l'eau peut mettre 3 h de temps entre le pompage et l'arrivée au niveau dans certains périmètres, ce qui accentue les pertes par infiltration. Les PIV sont dans un état très délabrés et surtout les canaux d'amenées dont la vétusté et la fragilité causent des affaissements fréquents. De nombreuses fuites avec des phénomènes de renard (Figure 16) s'ajoutent à un enherbement excessif qui réduit leur capacité et leur hydraulité avec des pertes par débordement. En se basant sur les observations, un coefficient de rugosité K_s (Manning Strikler) inférieure à 30 peut être estimé sur certaines parties des canaux très enherbés. Des pannes fréquentes et un manque de pièces de rechange sont signalés sur les derniers modèles de GMP qui ont été acquis. Pour le GMP du PIV2 de Nguidjilone, la capacité est de $396\text{m}^3/\text{h}$ et le débit mesuré à la sortie du refoulement sur le canal d'amenée a donné environ $300\text{m}^3/\text{h}$. A Dondou, les GEP ne sont pas renouvelés depuis leur installation en 2013. Le défaut de planage cause des difficultés de gestion de la lame d'eau avec comme conséquences des inondations au niveau des zones basse (surtout pendant l'hivernage). Ces contraintes ont pour conséquences des retards par rapport aux calendriers culturels et des surcoûts non négligeables.



Figure 16 : Canal d'amenée dégradé et très enherbé à Nguidjilone

Gestion de l'irrigation

Dans le PIV2 de Nguidjilone, le GMP fonctionne généralement 10 h de temps par jour. Le tour d'eau commence par les parcelles les plus éloignées de la station de pompage et qui ont plus

de difficultés d'irrigation. Le défaut de planage cause un allongement du temps d'irrigation pour satisfaire les zones à niveau élevé. Certains producteurs ont tendance à appliquer une lame d'eau de plus de 20 cm pour se prémunir du risque de manque d'eau entre deux tours et ceci a pour effet d'allonger encore plus le tour d'irrigation. Pour le PIV2 de Nguidjilone, un nombre de 5 irrigations avec une lame d'eau de 20 cm est rapporté pour l'hivernage 2020.

Coûts liés au pompage

La consommation des GMP est évaluée à 150 litres de gasoil pour irriguer 1 hectare par campagne agricole et il n'y a pratiquement pas de différence entre l'hivernage et la saison sèche chaude. Le coût hydraulique atteint 105 000 FCFA pour l'hivernage 2020 dans le PIV2 de Nguidjilone et encore plus pour l'extension utilisée en SSC 2021. Sur les charges d'exploitation (tableau 8), on note que le carburant représente près de 30%. A Dondou, l'utilisation des GEP en remplacement des GMP est considérée comme avantageuse car il y a moins de dépenses d'entretien et pas de dépenses en carburant. Mais, les longues durées d'irrigation (de 8h à 17h chaque jour), la cherté de la facture d'électricité avec la prime fixe (jusqu'à 400 000 FCFA) à payer hors consommation sont mentionnées. Parmi les améliorations attendues par les producteurs, il y a l'utilisation de l'énergie solaire qui a été envisagée mais qui ne s'est pas encore concrétisée. Pour améliorer la situation, certains producteurs souhaitent que les PIV soient transformés en grand aménagement comprenant une station de pompage électrique comme c'est le cas à Kobilou donné en exemple.

Tableau 8 : Charges pour 1 ha de riz (PIV2 de Nguidjilone)

Désignation	Quantité	Coût (%)
Gasol	150 litres/ha	29.1
Urée	6 sacs	25.1
DAP	2 sacs	8.4
Ofsettagé	25 000 F/ha	7.0
Semences	40 k/ha (15 000 F)	4.2
Main d'œuvre repiquage	30 000 F/ha	8.4
Insecticide	1500 F/ha	0.4
Herbicide	2500 F/ha	0.7
Récolte	30 000 F/ha	8.4
Battage	100 F/sac	2.8
Prix d'un sac	100 F/sac	2.8
Transport	100 F/sac	2.8

3.6. Productivité de l'eau et indicateurs de performance de l'irrigation

3.6.1. Cas des sites du Delta

Les résultats d'exploitation (tableau 9) au niveau du GIE NGayene de l'union de Ndelle montre des rendements de 3 à 6.8 t/ha en hivernage 2019 et de 2.6 à 8.5 t/ha en SSC 2020. En se basant sur ces résultats et l'analyse de l'évapotranspiration obtenue avec l'outil WaPOR 2.1, la productivité de l'eau évapotranspirée en Hivernage 2019 et en SSC 2020, est montrée sur la figure 17. En hivernage 2019, la productivité de l'eau évapotranspirée pour le paddy varie dans la plage de 0.6 à 1.7 kg/m³, la majorité des parcelles se situant entre 0.5 et 1.5 kg/m³ et avec un coefficient de variation de 23%. En SSC 2020, les parcelles ont une productivité de l'eau évapotranspirée se situant entre 0.7 et 2.4 kg/m³ avec une majorité comprise entre 1 et 2 kg/m³ et un coefficient de variation de 21%. Pour l'oignon, sur la base d'un rendement

moyen de 17.8 t/ha en SSF 2020-2021 la productivité moyenne de l'eau évapotranspirée au niveau de l'union est de 5.3 kg/m³.

Les quantités de pompage, de pluie et d'évapotranspiration potentielle pour de récentes campagnes sont sur le tableau 10. Globalement, les quantités d'évapotranspiration potentielles représentent environ 69% en SSC 2019 et 84 % en SSC 2020 des volumes totaux (pompage et pluie).

La figure 18 montre l'adéquation (rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle) dans la zone amont du delta en 2020. En SSC, les valeurs sont comprises entre 0.2 et 0.8 et se situent entre 0.4 et 0.6 pour la majorité des périmètres, ce qui peut être jugé faible. Pour l'hivernage, les valeurs d'adéquation sont entre 0.4 et 0.8 et la majorité se situe entre 0.6 et 0.8.

La figure 19 montre l'efficacité (rapport entre la transpiration et l'évapotranspiration réelle) dans la zone amont du delta en 2020. Aussi bien en SSC qu'en hivernage, les valeurs sont supérieures à 0.6 et en majorité comprises dans la plage 0.6 à 0.8.

Tableau 9 : Productivité de l'eau évapotranspirée (GIE Ngayene de l'union de Ndelle)

GIE	Campagne	Culture	Variétés	Rendement	Productivité de l'eau évapotranspirée : R / ETR (kg/m ³)			
					Min	Moy	Max	CV (%)
GIE Ngayene	H 2019	Riz	Sahel 108	3,0 - 6,8	0.6	1.1	1.7	23
	SSC 2020	Riz	Sahel 108	2,6 - 8,5	0.7	1.6	2.4	21

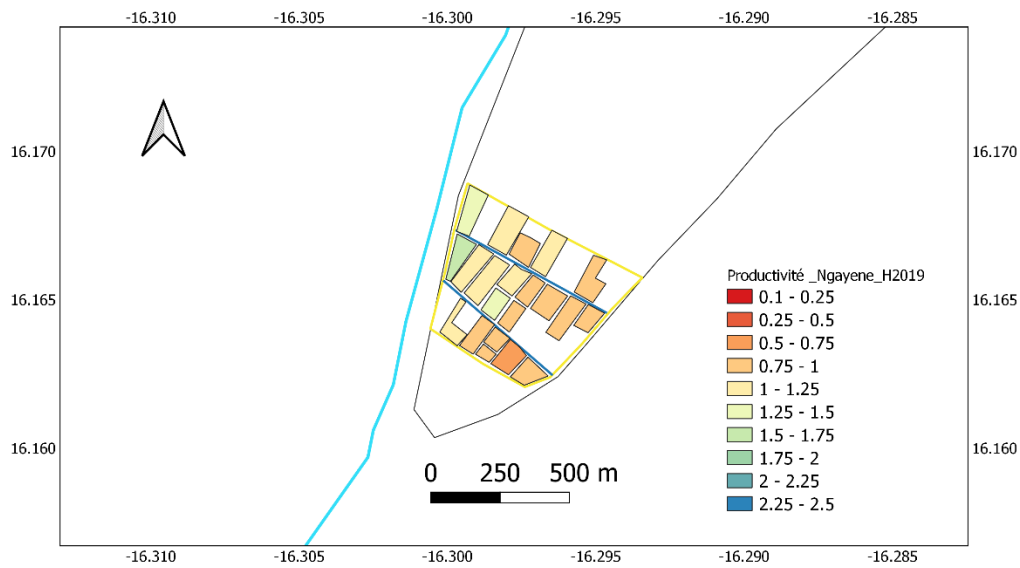
Tableau 10 : Autres indicateurs de performance de l'irrigation (Union de Ndaye et Ndelle)

Union	Saison	Culture	ETP (mm)	Pompage (mm)	Peff (mm)	ETP/ (Pompage +Peff)	Rendement / (pompage + Peff) (kg/m ³)
Ndiaye	H2020	Riz	1045.6	(-)	343		-
Ndiaye	SSC 2019	Riz	1081.7	15 63.1	0	0.69	0.38
Ndiaye	SSC 2021	Riz	1081.7	12 82.1	0	0.84	0.47

Peff = Pluie efficace

Carte de productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m^3) / GIE Ngayene

(a) Productivité de l'eau pour le paddy en Hivernage 2019 / Gie Ngayene



(b) Productivité de l'eau pour le paddy en SSC 2020 GIE Ngayene

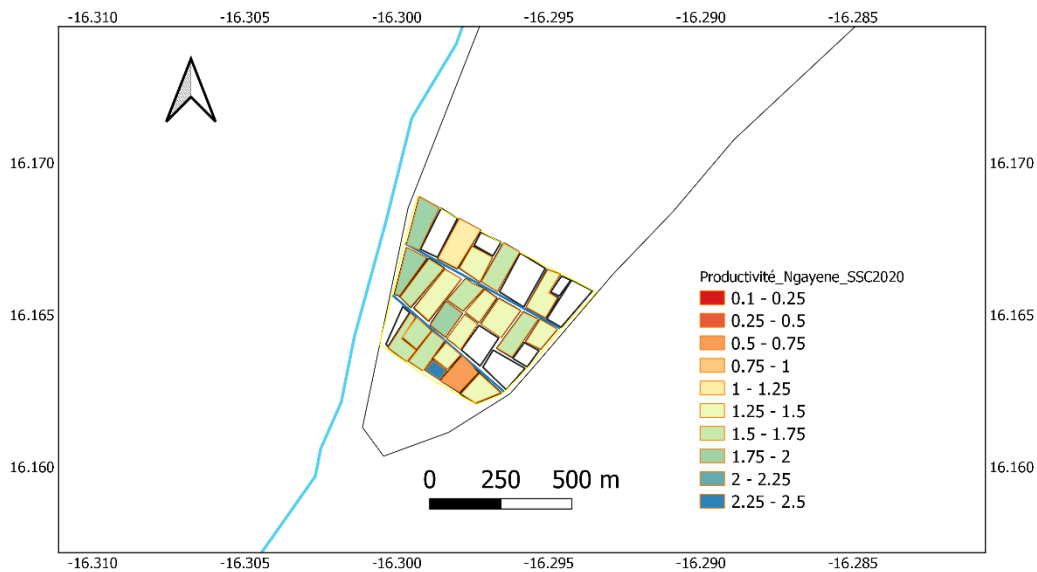
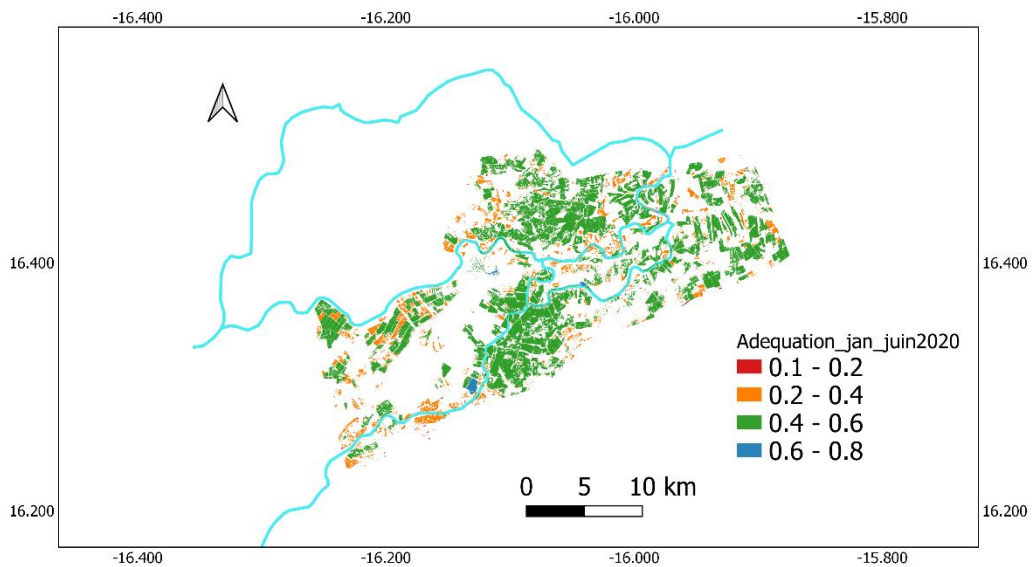


Figure 17 : Productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m^3) en hivernage 2029 (a) et SSC 2020 (b)/ GIE Ngayene ($< \text{PE} \geq$)

Carte d'adéquation / Delta

(a) Adéquation: période Février - Juin 2020
(zone Delta)



(b) Adéquation: période Juillet - Décembre 2020
(zone delta)

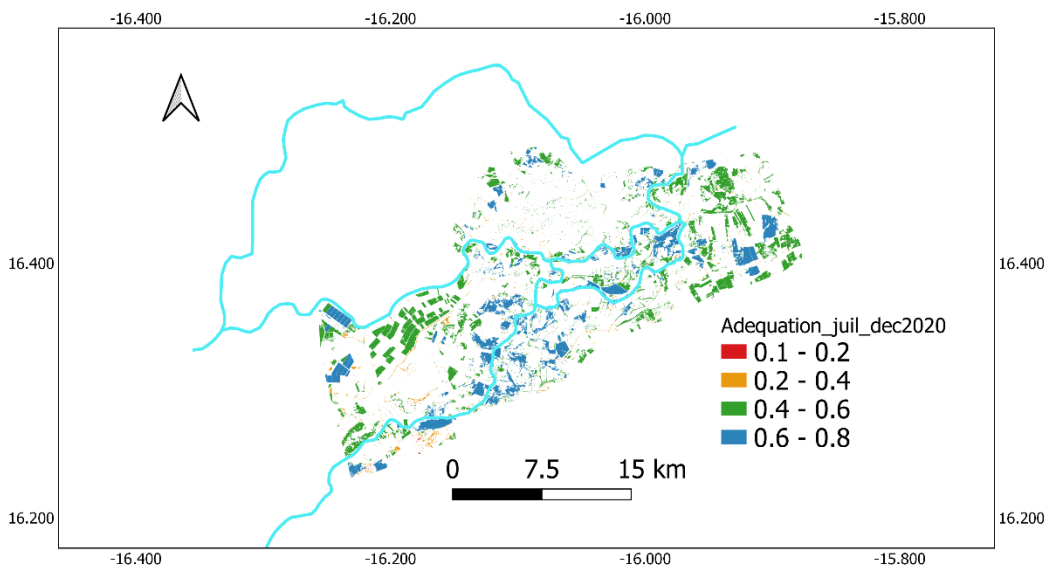
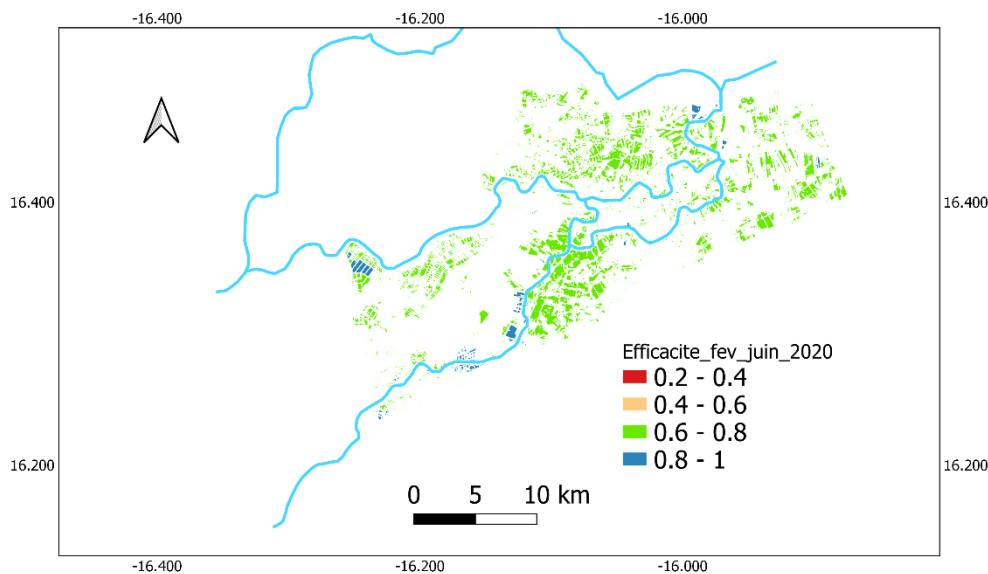


Figure 18 : Valeurs d'adéquation en SSC 2020 (a) et Hivernage 2020 (b) dans la zone amont du Delta ($< \text{Adéquation} \geq$)

Carte d'efficacité / Delta

(a) Efficacité: période Janvier - Juin 2020
(zone Delta)



(b) Efficacité: période Juillet-Décembre 2020
(zone Delta)

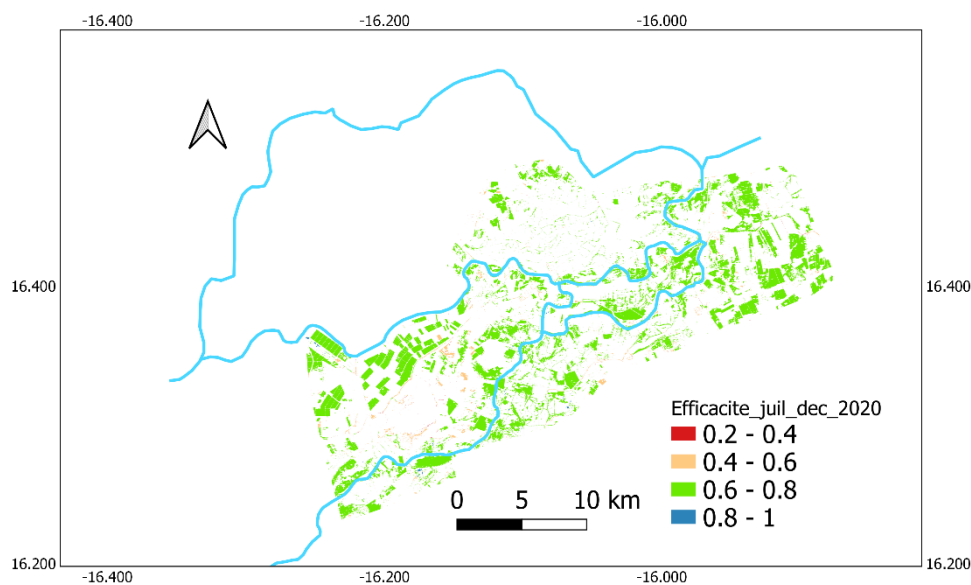


Figure 19 : Valeurs d'efficacité en SSC 2020 (a) et Hivernage 2020 (b) dans la zone amont du Delta ($< \text{Efficacité} \geq$)

3.6.2. Cas des sites de Ndiayene Pendao

Le tableau 11 montre les rendements obtenus au niveau du PIV8C de Figo. Les rendements sont de 3 à 4.5 t/ha en hivernage 2020 correspondant à des valeurs de productivité de l'eau évapotranspirée comprises entre 0.5 et 0.9 kg/m³ avec un coefficient de variation de 13.8%. Pour la SSC 2021, les rendements ont varié de 2.8 à 7 t/ha avec des valeurs de productivité de

l'eau évapotranspirée comprises entre 1 à 2.4 kg/m³ et un coefficient de variation de 13.9%. La représentation cartographique des résultats de productivité est sur la figure 20.

Le tableau 12 montre d'autres indicateurs de performance de l'irrigation au niveau du périmètre. On note une valeur du rapport entre ETP et les quantités pompées de 71% qui peut être considérée comme bonne pour un réseau de canaux en terre. Le rapport entre le rendement et l'eau pompée est de 0.3 kg /m³. Dans de précédentes études qui ont été effectuées dans la zone pour mesurer la productivité de l'eau arrivant à la parcelle en utilisant des déversoirs en V pour mesurer la quantité d'eau, les résultats obtenus variaient entre 0.34 et 1.05 kg /m³ sur 6 parcelles suivies.

Tableau 11 : Productivité de l'eau dans le PIV8C de Figo

	Campagne	Surface exploitée (%)	Culture	Variétés (%)	Rendement (t/ha)	Productivité de l'eau R / ETR (kg/m ³)			
						Min	Moy	Max	CV (%)
PIV8C	Hivernage 2020	50%	Riz	Sahel 108 (60%) Sahel 202 (17%) Sahel 201 (6.5%) Sahel 177 (6.5%)	3 – 4.5	0.5	0.6	0.9	13.8
PIV8C	SSC 2021	50%	Riz	Sahel 108 (32) Sahel 177 (68)	2.8 - 7	1	1.9	2.4	13.9

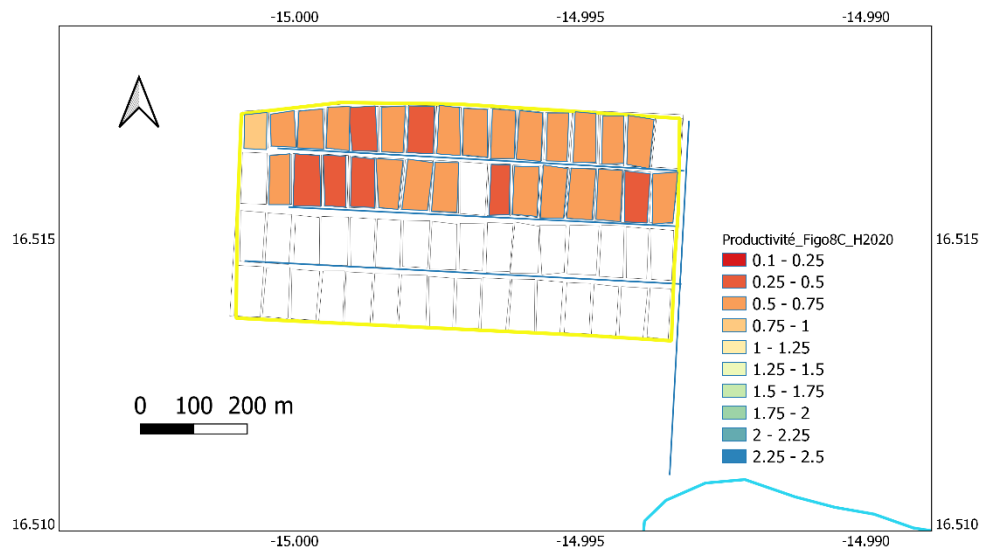
Tableau 12 : Autres indicateurs de performance de l'irrigation dans le PIV8C de Figo

Périmètre	Saison	Culture	ETP (mm)	Pompage (mm)	Peff (mm)	ETP/ (pompage +Peff)	Rendement / (pompage +Peff) (kg/m ³)
PIV8C	SSC 2021	Riz	1180	1663	0	0.71	0.3

Peff = Pluie efficace

Carte de productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m^3) / PIV8C

(a) Productivité de l'eau pour le paddy en Hivernage 2020 / Figo - PIV8C



(b) Productivité de l'eau pour le paddy en SSC 2021 - Figo PIV8C

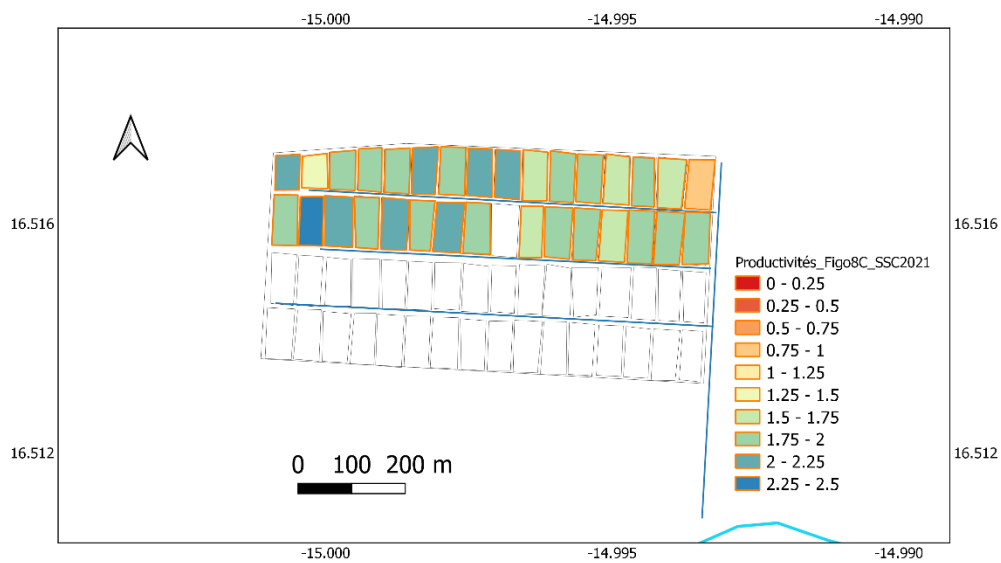


Figure 20 : Productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m^3) en hivernage 2020 (a) et SSC 2021 (b) pour le PIV8C ($< \text{PE} \geq$)

3.6.3. Cas des sites de Nguidilone et Dondou

Les résultats d'exploitation du PIV2 de Nguidjilone et du PIV2 de Dondou sont montrés sur le tableau 13. Au niveau du PIV2 de Nguidjilone, les rendements ont varié entre 1 et 5.6 t/ha en hivernage 2020 ce qui correspond à une productivité de l'eau qui se situe entre 0.3 et 1.3 kg/m³ avec une moyenne de 0.8 kg/m³ et un coefficient de variation de 30.4%. Pour le PIV2 de Dondou en SSC 2021, des rendements de 2.8 et 4 t/ha ont été obtenus ce qui donne une productivité de l'eau comprise entre 1.2 et 2 kg/m³ avec un coefficient de variation de 11.5%. La représentation cartographique des valeurs de productivité est sur les figures 21 et 22. Le tableau 14 montre pour le PIV2 de Nguidjilone que le rapport entre ETP et la quantité totale d'eau apportée (pompage et pluie efficace) est de 61%.

Tableau 13 : Résultats d'exploitation et Productivité de l'eau

	Campagne	Surface exploitée (%)	Culture	Variétés (%)	Rendement (t/ha)	Productivité de l'eau R / ETR (kg/m ³)			
						Min	Moy	Max	CV (%)
NGuidjilone PIV2	Hivernage 2020	100	Riz	Sahel108 (98.5%) Sahel177 (1.5%)	1 – 5.6	0.3	0.8	1.3	30.4
Dondou PIV2	SSC 2021	100	Riz	Sahel108 (100%)	2.8 -4	1.2	1.5	2	11.5

Tableau 14 : Autres indicateurs de performance de l'irrigation

Périmètre	Saison	Culture	ETP (mm)	Pompage (mm)	Peff (mm)	ETP/ (Pompage + Peff)	Rendement/ (Pompage + Peff) (kg/m ³)
PIV2 de Nguidjilone	H2020	Riz	1074	1270	490.5	0.61	0.3

Carte de productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m³) / PIV2 Nguidjilone

Productivité de l'eau pour le paddy en
Hivernage 2020 PIV2 de NGuidjilone

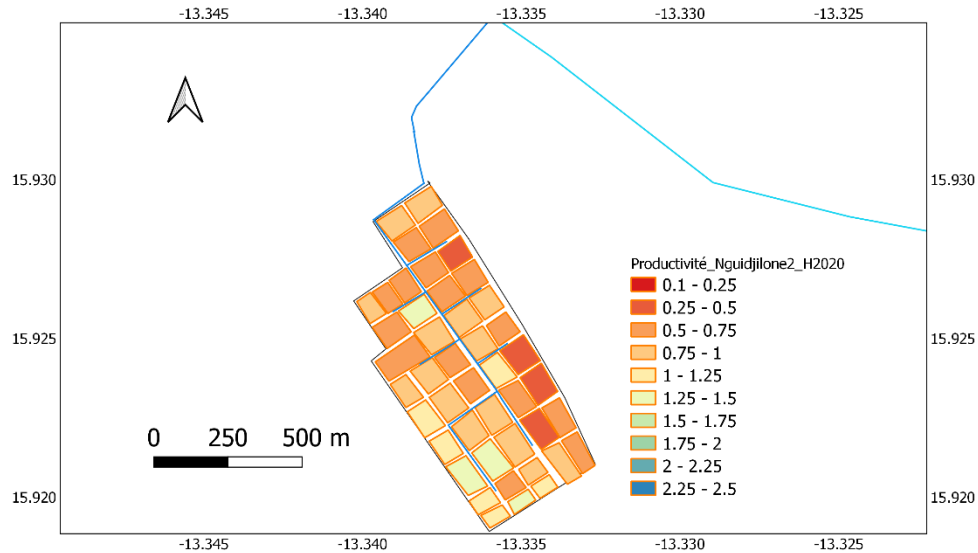


Figure 21 : Productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m³) en Hivernage 2020 pour le PIV2 de Nguidjilone (< PE ≥)

Carte de productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m³) / PIV2 Dondou

Productivité de l'eau du paddy en SSC 2021 /
PIV2 de Dondou

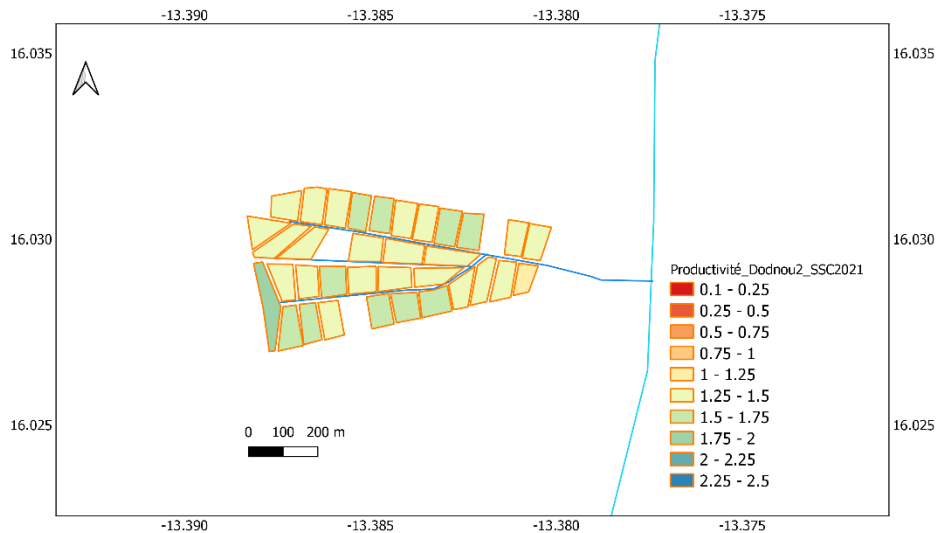


Figure 22 : Productivité de l'eau évapotranspirée (kg/m³) en SSC 2021 pour le PIV2 de Dondou (< PE ≥)

3.7. Perspectives d'amélioration de la productivité de l'eau et des performances de l'irrigation

Les valeurs mesurées de productivité de l'eau évapotranspirée PE rapportées dans la littérature se situent globalement dans une plage comprise entre 0.46 et 2.2 kg/m³ avec une moyenne de 1.09 kg/m³ (Zwart et Bastiaanssen, 2004). Les valeurs moyennes trouvées dans cette étude se situent entre 0.6 et 1.1 kg/m³ en hivernage tandis qu'en SSC elles sont entre 1.5 et 1.9 kg/m³. Ces valeurs qui sont relativement acceptables surtout pour la SSC peuvent se comprendre par les rendements de l'ordre de 6 t/ha rapportés durant cette saison. Pour le rapport entre le rendement et les quantités d'eau fournie (pompage + pluie efficace), les valeurs sont comprises entre 0.3 kg/m³ et 0.47 kg/m³ avec les valeurs les plus faibles pour l'hivernage. Quant au rapport entre l'évapotranspiration potentielle et ces mêmes quantités d'eau fournies, les valeurs trouvées sont entre 61% et 84%. Le rapport le plus faible est aussi noté pour l'hivernage. Au vu de ces résultats, les potentialités d'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau existent surtout avec une meilleure valorisation des eaux pompées et de l'eau de pluie. Pour la productivité de l'eau évapotranspirée, une amélioration devrait surtout être recherchée en hivernage. Les actions devraient aussi viser à réduire les disparités, vu les coefficients de variation qui sont parfois assez élevés (jusqu'à 30%). Ainsi les perspectives d'amélioration des performances devraient concerner :

3.7.1. Réduction des pertes d'eau sur les systèmes d'irrigation

Bien que le riz soit une plante ayant une évapotranspiration élevée et tolérant les conditions anaérobies de la submersion, il n'est pas nécessaire de le cultiver en inondation pour avoir des rendements acceptables. Une diminution des pertes d'eau peut aussi être obtenue avec les méthodes d'irrigation goutte à goutte et par aspersion. Dans un test d'irrigation du riz avec goutte à goutte (espacement 20X20) en Inde, Singh et al. (2019) rapportent un volume de 938 à 1836 litres d'eau pour produire 1 kg de riz alors que dans le système de submersion (espacement 20X10), plus de 4 m³ d'eau était utilisé pour 1 kg de riz. Le rendement en submersion était plus important mais les réductions relatives de l'apport d'eau étaient plus importantes que les pertes relatives de rendement. Les rendements de l'ordre de 5 à 6 T/ha qui étaient rapportés par cette étude sont comparables aux rendements moyens obtenus actuellement dans la vallée. L'étude de Pinto et al., (2017) signale l'augmentation de l'utilisation de systèmes d'irrigation par aspersion mécanisés (pivot central et déplacement latéral mécanique) dans la production de riz dans le sud du Brésil, en raison des besoins des agriculteurs d'atteindre une gestion facile de l'irrigation du riz combinée à une utilisation plus efficace de l'eau. Dans une étude réalisée au Pakistan, Kahlowan et al. (2007), ont conclu que l'irrigation par aspersion du riz permettait d'obtenir un rendement supérieur de 18 % par rapport au riz irrigué par submersion tout en réduisant la consommation d'eau de 35 %.

Ces techniques faciliteraient aussi l'automatisation de l'irrigation. Toutefois une adaptation des pratiques comme le semis direct en ligne pourraient être nécessaire.

D'autres options de réduction des pertes consistant à utiliser des réseaux mixtes (canaux et tuyaux) ou l'imperméabilisation des parois des canaux peuvent aussi être utilisées pour l'irrigation du riz mais aussi des cultures horticoles. Des tests / Démonstration sont effectués depuis 2013 dans des sites de la zone du lac de Guiers (Nder, Mbane Sanente, Mbayene), pour introduire l'utilisation du réseau d'irrigation de type « Système californien ». Cette technique qui est de plus en plus adoptée dans la zone consiste à utiliser des tuyaux PVC pour transporter l'eau jusqu'à la parcelle et la distribuer à travers des bornes d'irrigation. La construction de canaux maçonnés qui a déjà montré de bons résultats dans quelques périmètres (exemple de Ndombo) est aussi envisagé de plus en plus dans les nouveaux projets.

3.7.2. Solarisation des stations de pompage

Le coût du pompage est considéré comme une contrainte majeure pour les exploitations agricoles. L'utilisation mixte de l'énergie solaire et de l'énergie électrique avec la solarisation des stations de pompage est très attendue par les producteurs pour réduire le fardeau du coût du pompage. Un exemple de l'avantage de cette solarisation est montré avec la station de Boundoum effectué en 2020 et qui permet la diminution du coût hydraulique payé par les producteurs et de nouveaux projets sont aussi en train de s'y intéresser. D'autres exemples concernant les cultures horticoles sont les SIIPA d'Orkadiéré et de Thiambé où des enquêtes ont été réalisées en 2019. Dans ces SIIPA, les recettes étaient pratiquement toutes utilisées pour payer les factures d'électricité et les membres du SIIPA se retrouvaient sans aucun revenu après l'écoulement de la production à part les écarts de tri peu importants qui leur était distribués. Ceci qui a poussé à leur solarisation qui a permis d'améliorer leur exploitation.

3.7.3. Promotion de l'utilisation des bonnes pratiques agricoles

L'augmentation de la production par unité de volume d'eau nécessite l'utilisation de bonnes pratiques agricoles. Bien que les rendements moyens de SSC considérés se situent entre 5 et 6 t/ha, des progrès peuvent être réalisés pour l'hivernage. Les écarts de rendement importants reflétés par les coefficients de variation devraient aussi être réduits. Les recommandations actuelles ont besoin d'être adaptées continuellement aux conditions changeantes du milieu et du climat. Une gestion de la lame d'eau permettant un meilleur tallage du riz est aussi possible lorsque le planage des parcelles le permet. Des tests de SRI (Système de riziculture intensive) réalisés à la station de Fanaye en saison sèche chaude 2016 et 2017 et combinant un ensemble de techniques ont montré qu'un meilleur tallage est obtenu par rapport à la pratique commune de submersion continue. Dans cette pratique la lame d'eau est maintenue nulle durant la période de tallage, ce qui permet une consommation moindre d'eau tout en favorisant le tallage. L'observation des bonnes pratiques nécessite un bon accompagnement par les services d'encadrement et le système de crédit ainsi que l'amélioration de la capacité des producteurs. Les outils développés pour l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation dans le cadre d'une agriculture climato-intelligente devraient aussi être mieux promus.

4. CONCLUSION

Cette étude s'est intéressée à la productivité de l'eau dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal où la ressource en eau utilisée pour l'irrigation est le fleuve Sénégal et ses dépendances. Sur la période étudiée (2016-2020), on note une disponibilité de la ressource très variable suivant les années et les saisons ainsi que des volumes importants relâchés à l'aval du barrage de Diama durant l'hivernage. L'analyse de la mise en valeur avec le NDVI dans la zone du Delta montre une évolution irrégulière avec une pic des surfaces en riz en 2018 et 2019. La saison d'hivernage est moins valorisée pour la riziculture alors que la disponibilité de l'eau est plus importante à cette période. Au niveau des sites étudiés, des problèmes d'accès à l'eau sont notés en SSC avec la baisse du niveau de l'eau dans la zone de Ndiayene Pendao et du delta conduisant à des abandons en pleine campagne. Le manque de performance des équipements de pompage est constaté avec une réduction de leur capacité et des pertes importantes dans les tuyauteries de refoulement. La grande longueur des canaux d'amenée de certains PIV ainsi les problèmes de vétusté et de manque d'entretien causent beaucoup de pertes d'eau et allongent les temps d'irrigation avec parfois plus de 3 jours pour

irriguer un 1 ha. Avec le problème du drainage et le défaut de planage des parcelles, on note des zones continuellement inondées qui sont difficilement exploitables pendant l'hivernage. Les problèmes d'insécurité en eau amènent certains producteurs à appliquer une lame d'eau de plus de 20 cm pour se prémunir d'éventuelles conséquences d'un tour d'eau allongé pouvant atteindre plus de 3 semaines. Le cout du pompage représente jusqu'à 30% et plus des charges d'exploitation et constitue une contrainte majeure pour les PIV qui devraient évoluer vers la solarisation des stations de pompage. Les valeurs moyennes de productivité de l'eau évapotranspirée pour le riz sont comparables à celles rapportées dans la littérature et sont plus faibles pour l'hivernage que pour la SSC. L'évaluation d'autres indicateurs de performance (rapport entre rendement et eau fournie ; rapport entre ETP et eau fournie) montre qu'une amélioration de l'efficacité de la gestion de l'eau devrait non seulement considérer la productivité de l'eau évapotranspirée mais aussi celle de l'eau mobilisée et fournie par l'irrigation et la pluie. Ces améliorations peuvent être obtenues avec une réduction des pertes dans les systèmes d'irrigation ainsi que la promotion des bonnes pratiques avec un renforcement de l'accompagnement des services d'encadrement et de la capacité des producteurs.

REFERENCES

Chukalla, A.D., Mul, M., van Halsema, G., van der Zaag, P., Uyttendaele, T., Karimi, P., 2020. Water Productivity Analyses Using WaPOR Database. A Case Study in Xinavane, Mozambique.

WaterPIP technical report series. IHE Delft Institute for Water Education, Delft, the Netherlands.

FAO. 2019. (https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1).

Huang S., Tang L., Hupy J. P., Wang popular Y., Shao G. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of remote sensing. *J. For. Res.* **32**, 1–6 (2021).

Kahlowan, M.A., Raoof, A., Zubair, M., Kemper, W.D., 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agric. Water Manage.* **87**, 292–298.

Kijne, J. W.; Barker, R.; Molden. D. (Eds.) 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. Wallingford, UK: CABI; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). xix, 332p. (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series 1).

Pinto M. A. B., Parfitt J. M. B., Timm L. C., Faria L. C., Concenço G., Stumpf L., Nörenberg B.G. 2020. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. *Field Crops Research* **248** (2020) 107714.

Sall M., Poussin J-C, Bossa A.Y. Ndiaye R., Cissé M., Martin D., Bader J-C, Sultan Benjamin, Ogilvie A. 2020. Water Constraints and Flood-Recession Agriculture in the Senegal River Valley. *Atmosphere* **2020**, **11**, 1192.

Singh P. K., Srivastava P. C., Sangavi R., Gunjan P., Sharma V. 2019. Rice water management under drip irrigation: an effective option for high water productivity and efficient zinc applicability. Vol. **17** (1), January-April, 2019.

Zwart S. J., Bastiaanssen W.G.M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. 2004. *Agric. Water Manage;* **69** (2004) 115–133.