

Étude comparative de l'efficacité des équipements hydrauliques de régulation des barrages et digues anti-sel dans les processus de lessivage des sols salés sulfatés acides du Sénégal : batardeaux, vannes murales et orifices circulaires longs

Adolphe DIATTA^{1,2*}, Daouda BADIANE¹, Baba SARR³, Saïdou Moustapha SALL¹ et Issa LEYE²

¹ *Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Ecole Supérieure Polytechnique (ESP),
Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO / SF), Sénégal*

² *Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Faculté des Sciences et Techniques,
Département de Physique, Laboratoire d'Hydraulique et Mécanique des Fluides (LHMF), Sénégal*

³ *Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Institut Fondamental de l'Afrique Noire (IFAN),
Laboratoire de Géologie, Sénégal*

(Reçu le 23 Octobre 2022 ; Accepté le 29 Novembre 2022)

* Correspondance, courriel : dadhit69@yahoo.fr

Résumé

Dans le cadre de la récupération et la valorisation durables des sols salés sulfatés acides du pays, plusieurs méthodes sont appliquées dont la construction de barrages et digues anti-sel. Cette contribution a pour objectif de déterminer les équipements hydrauliques de régulation des barrages et digues anti-sel (batardeaux, vannes murales et orifices circulaires longs) qui permettent d'évacuer l'eau saumâtre et de conserver celle de pluie plus propice à la riziculture. Ainsi, un dispositif d'expérimentation a été construit au laboratoire à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il est constitué entre autres de trois bacs équipés d'un orifice long circulaire, d'un déversoir seuil (batardeaux) ou d'une vanne murale à mouvement vertical. Du gasoil (plus léger et simulant l'eau de pluie) et de l'eau de robinet (plus lourde et simulant l'eau saumâtre des ouvrages anti-sel) sont introduits dans chacun des bacs et le mélange des deux fluides est vidé pour remplir un seau de 15 L. Après chaque vidange, les quantités d'eau et de gasoil recueillies sont mesurées. L'expérience a été répétée 30 fois. Les résultats ont montré que le seuil déversoir est moins efficace dans l'évacuation de l'eau de robinet et la conservation du gasoil que les autres équipements. Ainsi, les batardeaux sont moins performants que les orifices longs et les vannes murales à mouvement vertical dans l'évacuation de l'eau saumâtre des ouvrages anti-sel et la conservation de celle de pluie.

Mots-clés : *barrages, digues anti-sel, efficacité, batardeaux, vannes murales, orifices longs.*

Abstract

Comparative study of the anti-salt dams et dykes 's regulation hydraulic equipment in the leaching processes of acid sulphate saline soils in Senegal: cofferdams, wall valves and long circular orifice

In the purpose of the recovery and sustainable development of the country's acid sulphate saline soils, several methods are applied, including the construction of anti-salt dams and dykes. The objective of this contribution is to determine the anti-salt dams and dykes' regulation hydraulic equipment (cofferdams, wall valves and long circular orifices) which allow brackish water evacuation and rainwater conservation more suitable for rice growing. Thus, an experimental device was built in laboratory at the Cheikh Anta Diop University of Dakar. It consists, among other things, of three tanks equipped with a long circular orifice, a sill weir (cofferdams) or a vertical movement wall valve. Diesel (lighter and simulated to rainwater) and tap water (heavier and simulated to anti-salt structures' brackish water) are introduced into each of the tanks and the two fluids mixture is emptied to fill a 15 L bucket. After each emptying, the quantities of water and diesel collected are measured. The experiment was repeated 30 times. The results showed that the sill weir is less efficient in the evacuation of tap water and the conservation of diesel than the other equipment. Thus, cofferdams are less efficient than long circular orifices and wall valves in the evacuation of the anti-salt structures' brackish water and the conservation of rainwater.

Keywords : *dams, anti-salt dykes, efficiency, cofferdams, wall valve, long orifices.*

1. Introduction

Avec 700 km de côtes atlantiques, le Sénégal a 9 404 475 Ha de terres arables dont 1 700 000 ha de terres salées [1] et 660 000 ha de sols salés sulfatés acides [2]. Son climat est caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche (octobre à juin) et d'une courte saison pluvieuse (juin à octobre) [3, 4 - 8]. Le secteur agricole contribue à hauteur de 9,4 % du Produit Intérieur Brut (PIB) national et 62,8 % de la valeur ajoutée en terme nominal du secteur primaire [9]. Il engage plus de 53 % de la population nationale [6]. Cependant, malgré le retour des pluies noté depuis les années 2000, cette agriculture est régulièrement confrontée à des difficultés liées entre autres aux changements climatiques en cours [3, 4, 7, 8, 10 - 13], ainsi qu'à la salinisation et à l'acidification croissantes des bas-fonds côtiers [14, 15 - 19]. De vastes étendues de terres stériles « tannes vifs » ou occupées par des herbes halophiles (tannes herbacées) jalonnent les zones côtières du pays. Afin de lutter contre la salinisation et l'acidification croissantes des bas-fonds côtiers du pays [15 - 19] dont les origines remonteraient aux sécheresses des années 1910 - 1914 [20], plusieurs techniques furent adoptées [21, 22] dont celle de la construction de barrages et digues anti-sel. Leur rôle est d'empêcher l'intrusion marine dans les basses terres amont, d'accumuler de l'eau douce et de lessiver les sols contaminés par des lâchers. Ainsi, de nombreux petits barrages et digues anti-sel modernes [14, 23 - 32] dotés d'ouvrages évacuateurs de crues furent réalisés dans différentes vallées de la Basse Casamance et du Sine Saloum. Ils sont équipés de batardeaux ou de vannes murales pour la régulation de la retenue et l'évacuation des eaux de lessivage des sols [14, 23, 29]. Cependant, les résultats obtenus demeurent encore mitigés à cause d'une acidité incontrôlée, d'une longue période de lessivage et/ou des remontées de la nappe sous-jacente hyper salée (...), du choix des équipements hydrauliques de régulation, mais aussi du mode de gestion des ouvrages. Par exemple, trois ans après la construction d'un barrage anti-sel équipé de trois batardeaux dans la vallée de Djilakoune (Basse Casamance) en 1984, il n'a été noté aucun dessalement tangible des sols en 1987. En 1988, un des batardeaux a été remplacé par une vanne murale actionnée verticalement pour permettre la vidange des eaux de la retenue par le fond. A cause des résultats obtenus, les deux derniers

batardeaux furent remplacés en 1989 [30]. A Fayil (région de Fatick), des terres salées sulfatées acides protégées par un barrage anti-sel réalisé en 2009 n'ont été partiellement exploitées qu'en 2020, soit 11 ans plus tard. En plus de ces ouvrages modernes, les paysans diola construisent des barrages et digues anti-sel traditionnels depuis plusieurs centaines d'années pour coloniser les terres de mangrove. Ils sont équipés de troncs de palmiers ou de rôniers perforés pour permettre l'entrée de l'eau de mer dans la retenue pendant la saison sèche et le lessivage des sols pendant la saison des pluies [32]. Cependant, très peu d'études s'intéressent au choix et à l'efficacité des équipements hydrauliques de régulation des ouvrages anti-sel dans les processus de récupération et valorisation durable des terres contaminées. L'objectif de la présente contribution est de déterminer lequel des batardeaux, des vannes murales à mouvement vertical et des orifices longs circulaires permettrait d'évacuer l'eau saumâtre des barrages et digues anti-sel et d'y conserver l'eau de pluie plus propice à la riziculture.

2. Matériel et méthodes

2-1. Descriptions des barrages et digues anti-sel

2-1-1. Description des barrages et digues anti-sel modernes

Les barrages et digues anti-sel modernes sont composés d'une digue en terre compactée permettant d'arrêter l'intrusion marine et d'accumuler l'eau douce, et d'un évacuateur de crues [29]. Au Sénégal, les digues sont constituées de remblais d'apport compactés à la machine tandis que les évacuateurs de crues sont généralement des ouvrages en béton massif de diverses formes (Creager simplifié, bec de canard simplifié ou mur de soutènement avec contreforts ou gradins) qui servent de déversoir seuil (*Figure 2.a*). Ils sont équipés de portes munies de glissières dans lesquelles des planches se superposent (batardeaux) (*Figures 1*) ou de vannes à crémaillères à déplacement vertical (*Figure 2.b*) [29].

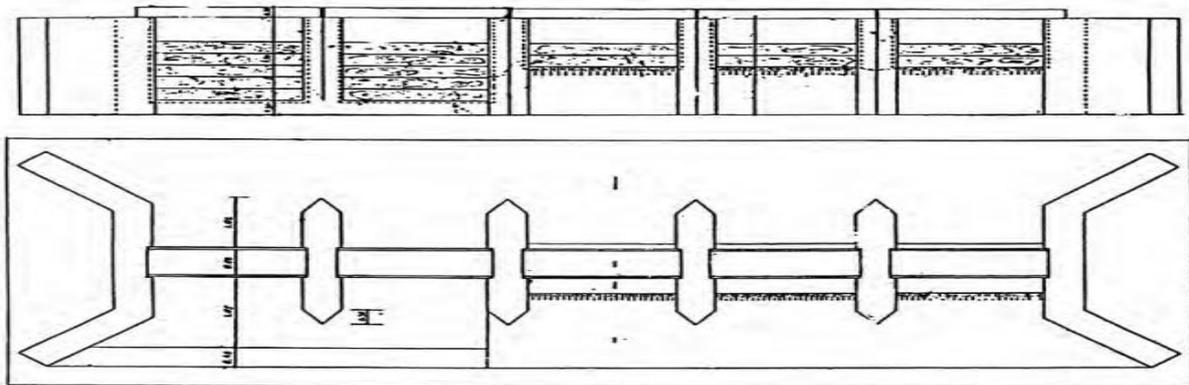


Figure 1 : *Illustration d'ouvrage de régulation de hauteur avec batardeaux*
 Source : [29]

Les équipements hydrauliques de régulation fonctionnent en mode déversoir seuil (batardeaux) ou orifice rectangulaire mince noyé/dénoyé (vannes murales à déplacement vertical).

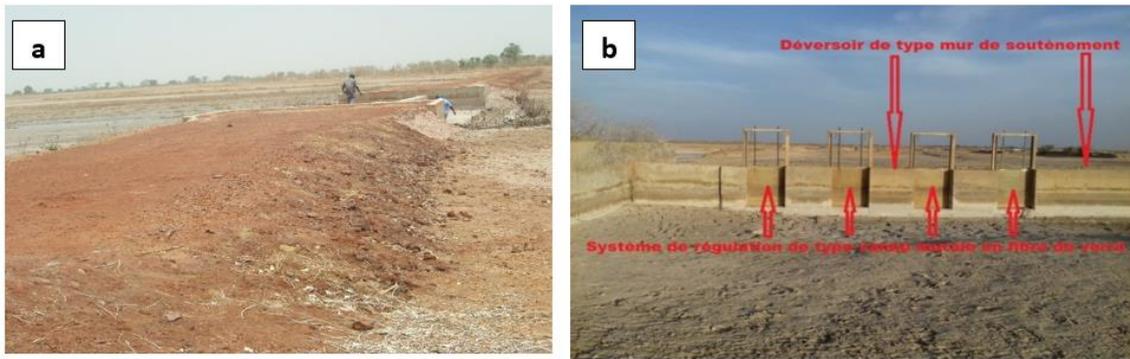


Figure 2 : Illustration de barrages et digues anti-sel modernes : a. digue d'un ouvrage moderne (Barrage anti-sel N°1 de Fayil) - b: Systèmes de régulation des barrages avec vannes murales en fibre de verre (barrage anti-sel N°3 de Fayil)

En fonction de la hauteur de la lame d'eau et des conditions atmosphériques locales (vents), les retenues d'eau des barrages et digues anti-sel se stratifient [29]. Les eaux douces plus légères surnagent celles salées plus lourdes. Ces dernières sont en contact direct avec la solution de sol et généralement plus troubles. Bovin et Loyer [34] notèrent que si le cours d'eau atteint une certaine profondeur (4m à Guidel), une stratification des eaux de la retenue apparaît quelque soit les conditions atmosphériques ; les couches les plus salées se trouvant en profondeur.

2-1-2. Description des barrages et digues anti-sel traditionnels diola

Les barrages et digues anti-sel traditionnels diolas sont essentiellement constitués d'une digue en terre traversée par des drains de régulation de la retenue d'eau. Les drains sont généralement des troncs évidés de palmiers ou de rôniers, noyés dans la terre au moment de la construction de la digue [32]. En outre, les remblais des digues sont constitués de matériaux prélevés sur le site d'implantation de l'ouvrage par excavations dans les parties marneuses et marno-vaseuses longeant l'ouvrage (*Figure 3.a*). Ils sont compactés par la force des pieds en petites tranches (en fonction de la nature des matériaux) et reposent directement sur le sol. Cependant, les drains de vidange de la retenue étant généralement plus basse que le terrain naturel aval, des chenaux en terre sont aménagés pour évacuer les eaux de lessivage vers le lit mineur du cours d'eau (*Figure 3.b*).



Figure 3 : Barrage anti-sel traditionnel diola et orifices de régulation de la retenue d'eau : a. Barrage anti-sel traditionnel diola à Diantène b. Système de régulation avec orifice long

2-2. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental polyvalent en maçonnerie (**Figure 5**) a été construit au laboratoire d'Hydraulique et de Mécanique des Fluides de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). Il est un ouvrage de génie civil de dimensions extérieures 5,40 m x 2,50 m x 1,10 m. Il est divisé en trois grands bacs de dimensions intérieures 2,06 m x 1,20 m x 0,96 m et de trois autres plus petits de dimensions intérieures 0,54 m x 0,50 m x 0,70 m. Les surfaces intérieures ont été rendues étanches avant d'être carrelées. Les présentes investigations ont été réalisées avec les trois petits bacs (**Figures 4**).

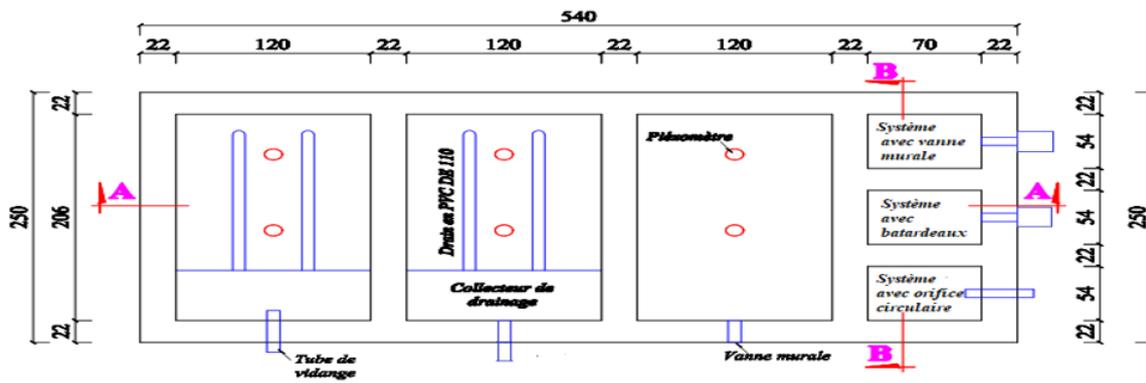


Figure 4.a : Dispositif expérimental - vue de dessus

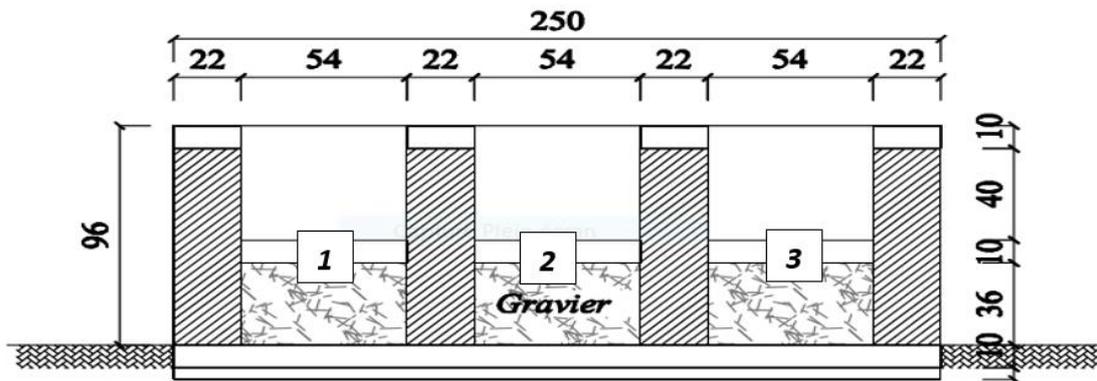


Figure 4.b : Dispositif expérimental - Coupe BB

Ceux-ci sont tous équipés d'un orifice long en PVC DE25 installé à 3,5 cm du fond pour leur vidange et la régulation du niveau d'eau. L'orifice long de chaque bac est fermé avec un bouchon en PVC DN25, installé en amont. Deux des petits bacs (2, 3) (**Figure 4.b**) sont aussi équipés chacun d'orifice épais parallélépipédique aménagé sur un mur et colmaté avec du papier mouillé et du plastique afin de se rapprocher des conditions de terrain. L'orifice du bac 2 (**Figure 4.b**) a une section transversale de 5 cm x 9 cm. Il est aménagé à 22 cm du fond du bac pour servir de déversoir seuil ; tandis que celui du bac 3 est aménagé à 14 cm du fond. Il a une section transversale de 3,4 cm x 12 cm. Les trois bacs ont respectivement 42,5 cm, 46,4 cm et 49 cm de profondeur. Afin de canaliser l'eau de vidange, des cunettes de 15 cm de long sont placées dans les parties extérieures des bacs 2 et 3 en prolongement des orifices. En plus du dispositif expérimental, le matériel utilisé pour mener l'expérience est composé de :

- un seau en plastique de 15 L ;
- deux éprouvettes de 1000 mL ;
 - une éprouvette de 10 mL ;
 - deux béciers de 500 mL ;
 - un erlenmeyer de 100 mL ;
- une pissette en plastique ;
- deux pots d'échantillonnage en plastique ;
 - deux bidons de 30 L de gasoil chacun ;
 - les chronomètres de trois téléphones ;
 - un double mètre pliable en bois.

2-3. Principe de l'expérience

Le principe de l'expérience est basé sur l'écoulement de deux liquides non-miscibles à travers un orifice horizontal et un déversoir seuil. En effet, la vidange des retenues d'eau des barrages et digues anti-sel équipés d'orifices longs circulaires (systèmes diola) ou de vannes murales à mouvement vertical (ouvrages modernes) fonctionnant généralement en charge, lesdits ouvrages sont simulés par les bacs 1 et 3 respectivement. En outre, celle des barrages et digues anti-sel équipés de batardeaux fonctionnant à surface libre, lesdits ouvrages sont simulés par le bac 2. Le dispositif est conçu en tenant compte des réalités de terrain dont la légère surélévation des équipements (par rapport au fond de la retenue) pour éviter leur colmatage par les dépôts de décantation et la hauteur totale de mélange quasi-constante (par rapport à la génératrice inférieure de l'orifice) imposée par le déversoir évacuateur de crues.

2-4. Mode opératoire

L'expérience consistait à introduire 40 L de gasoil dans un des bacs d'expérimentation et de le remplir avec de l'eau de robinet jusqu'à ce que la surface libre du gasoil soit à 27 cm au-dessus de la génératrice inférieure des orifices (bacs 1 et 3) ou 31 cm du fond du bac 2 (écoulement à surface libre). Ensuite, afin de s'assurer de la stratification du mélange des deux fluides dans les bacs, à la fin du réglage du niveau de la surface libre du gasoil, nous mélangeons dans une éprouvette de 1000 mL un échantillon d'eau de robinet avec du gasoil. Dès qu'une stratification nette apparaît dans l'éprouvette, nous considérons qu'elle l'est aussi dans le bac test. Nous ouvrons alors l'équipement de vidange pour remplir un seau de 15 L. Nous mesurons le temps de remplissage du seau, ainsi que les volumes d'eau et de gasoil recueillis. L'expérience est exécutée trente fois par bac avant de passer au suivant.

2-5. Calculs statistiques et caractérisation du régime d'écoulement

2-5-1. Calculs statistiques

Un échantillon de N valeurs de X_i se caractérise d'une part par ses valeurs centrales comme la moyenne algébrique X_{moy} , et d'autre part par des paramètres de dispersion telle que l'écart type, la variance ou moment centré d'ordre 2 et le moment centré d'ordre 3 [35].

$$\text{Moyenne algébrique : } X_{moy} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (1)$$

$$\text{Ecart type : } \sigma = \left(\frac{\sum (X_i - X_{moy})^2}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\text{Variance : } \sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X_{moy})^2}{N-1} \quad (3)$$

$$\text{Moment centré d'ordre 3 : } \mu_3 = \frac{N}{(N-1)(N-2)} * \sum (X_i - X_{moy})^3 \quad (4)$$

2-5-2. Caractérisation du régime d'écoulement

Par définition, le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel qui caractérise le régime d'écoulement des fluides (Re). Il est le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses. Sa **Formule** générale est :

$$Re = \frac{UD_h}{\vartheta} \quad [36, 39] \tag{5}$$

avec,

- Re le nombre de Reynolds qui définit le régime d'écoulement des fluides
- U la vitesse moyenne du fluide,
- D_h le diamètre hydraulique de la section transversale traversée par le fluide,
- ϑ la viscosité cinématique du fluide.

Selon la théorie des fractions dans les mélanges de fluides, en régime dynamique, la viscosité du mélange eau + gasoil ($\vartheta_{mélange}$) est :

$$\vartheta_{mélange} = \alpha_{eau} * \vartheta_{eau} + \alpha_{gasoil} * \vartheta_{gasoil} \quad [37] \tag{6}$$

avec,

- $\alpha_{eau} * \vartheta_{eau}$: la viscosité cinématique partielle de l'eau dans le mélange
- $\alpha_{gasoil} * \vartheta_{gasoil}$: la viscosité cinématique partielle du gasoil dans le mélange ;
- α_{eau} : la fraction de l'eau dans le mélange ;
- α_{gasoil} : la fraction du gasoil dans le mélange.

Soient S_m et P_m la surface et le périmètre de l'orifice mouillés par le fluide (**Figure 8**). Par définition, le diamètre hydraulique D_h est :

$$D_h = \frac{4 * S_{mouillée}}{\Phi_{mouillé}} \quad [36] \tag{7}$$

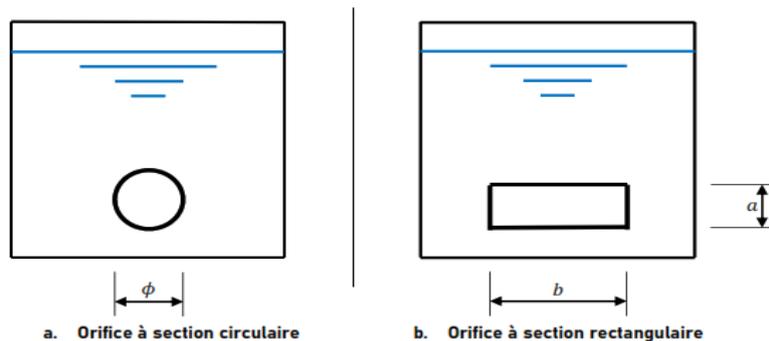


Figure 5 : Illustration des orifices : a. orifice circulaire – b. orifice rectangulaire

En fonction de la nature de l'orifice et de l'écoulement, le **Tableau 1** ci-après résume le périmètre mouillé, la surface mouillée, le diamètre hydraulique et les nombres de Reynolds correspondants.

Tableau 1 : Formules mathématiques de caractérisation de l'écoulement à travers un orifice

Désignations	Périmètre mouillé	Surface mouillée	Diamètre hydraulique	Nombre de Reynolds
Orifice circulaire noyé	$\pi * \varnothing$	$\frac{\pi}{4} * \varnothing^2$	\varnothing	$\frac{U * \varnothing}{\nu_{mélange}}$
Orifice rectangulaire noyé	$2 * (a + b)$	$a * b$	$\frac{2 * a * b}{a + b}$	$\frac{U}{\nu_{mélange} * \frac{2 * a * b}{a + b}}$
Orifice rectangulaire partiellement noyé sur une hauteur h	$2h + b$	$b * h$	$\frac{4 * b * h}{b + 2h}$	$\frac{U}{\nu_{mélange} * \frac{4 * b * h}{b + 2h}}$

L'expérience montre que le régime d'un écoulement de fluide sous pression est [36] :

- ✓ Laminaire si $Re < 2000$;
- ✓ Transitoire si $2000 \leq Re < 3000$;
- ✓ Turbulent lisse si $3000 \leq Re < 10^5$;
- ✓ Turbulent rugueux si $Re \geq 100\ 000$

Dans le cadre de notre expérience :

- diamètre intérieur de la conduite en PVC DE25 : $\varnothing = 23\ mm$;
- orifice rectangulaire (déversoir seuil) : $a = h = 9\ cm$;
- orifice rectangulaire (déversoir seuil) : $b = 5\ cm$;
- orifice rectangulaire noyé : $b = 3,4\ cm$;
- orifice rectangulaire noyé : $a = 12\ cm$;
- viscosité cinématique de l'eau à $20^\circ C$: $\nu_{eau} = 0.0000010034\ m^2/s$ (Norme ISO3666)
- viscosité cinématique du gasoil à $20^\circ C$: $\nu_{gasoil} = 0.0000095\ m^2/s$ [38] ;

3. Résultats

Nous présentons ci-après les résultats obtenus en fonction des différents équipements hydrauliques de régulation utilisés.

3-1. Résultats du Bac avec orifice long

Les résultats obtenus sont résumés dans le **Tableau 2** ci-dessous. Ils montrent un écoulement en charge turbulent lisse du mélange (eau + gasoil) et une conservation quasi-totale du gasoil dans le bac. Ils confirment les résultats obtenus à Djilakoune par Brunet [30].

Tableau 2 : Résultats de la vidange du mélange eau + gasoil du bac avec orifice long

N°	Temps de remplissage (s)	Volume (L)			Pourcentage (%)		U (m/s)	D _h (mm)	Re
		Eau	Gasoil	Total	Eau	Gasoil			
1	29,0	15,015	Traces	15,015	100,00	-	1,25	23,0	28 580
2	28,0	15,410	Traces	15,410	100,00	-	1,33	23,0	30 379
3	29,0	15,940	Traces	15,940	100,00	-	1,32	23,0	30 340
4	26,0	14,450	Traces	14,450	100,00	-	1,34	23,0	30 678
5	29,0	16,840	Traces	16,840	100,00	-	1,40	23,0	32 053
6	29,0	15,080	Traces	15,080	100,00	-	1,25	23,0	28 703
7	29,0	15,860	Traces	15,860	100,00	-	1,32	23,0	30 188
8	29,0	15,710	Traces	15,710	100,00	-	1,30	23,0	29 902
9	28,0	15,430	Traces	15,430	100,00	-	1,33	23,0	30 418
10	29,0	15,700	Traces	15,700	100,00	-	1,30	23,0	29 883
11	29,0	15,640	Traces	15,640	100,00	-	1,30	23,0	29 769
12	29,0	16,000	Traces	16,000	100,00	-	1,33	23,0	30 454
13	31,0	17,000	Traces	17,000	100,00	-	1,32	23,0	30 270
14	28,0	14,450	Traces	14,450	100,00	-	1,24	23,0	28 486
15	28,0	15,100	Traces	15,100	100,00	-	1,30	23,0	29 768
16	30,0	15,700	Traces	15,700	100,00	-	1,26	23,0	28 887
17	29,0	15,300	Traces	15,300	100,00	-	1,27	23,0	29 122
18	30,0	16,034	Traces	16,034	100,00	-	1,29	23,0	29 502
19	29,0	15,600	Traces	15,600	100,00	-	1,30	23,0	29 693
20	30,0	15,950	Traces	15,950	100,00	-	1,28	23,0	29 347
21	30,0	15,880	Traces	15,880	100,00	-	1,27	23,0	29 218
22	29,0	15,250	Traces	15,250	100,00	-	1,27	23,0	29 027
23	30,0	15,260	Traces	15,260	100,00	-	1,22	23,0	28 078
24	30,0	16,100	Traces	16,100	100,00	-	1,29	23,0	29 623
25	30,0	15,970	Traces	15,970	100,00	-	1,28	23,0	29 384
26	31,0	16,225	Traces	16,225	100,00	-	1,26	23,0	28 890
27	31,0	16,267	Traces	16,267	100,00	-	1,26	23,0	28 965
28	31,0	16,300	Traces	16,300	100,00	-	1,27	23,0	29 024
29	31,0	16,199	Traces	16,199	100,00	-	1,26	23,0	28 844
30	30,0	16,650	Traces	16,650	100,00	-	1,34	23,0	30 635
X _{moy}	29,4	15,744	-	15,744	100,00	-	1,29		29 604
σ ²	1,3	0,370	-	0,370	-	-	0,001		702 839
σ	1,1	0,608	-	0,608	-	-	0,037		838
μ ₃	- 1,07	- 0,0367	-	- 0,0367	-	-	0,000001		13 332 537

3-2. Résultats du Bac avec déversoir seuil

Les résultats obtenus sont résumés dans le **Tableau 3** ci-dessous. Ils montrent un écoulement à surface libre transitoire à turbulent lisse du mélange et une évacuation moyenne 42,90 % d'eau et 57,10 % de gasoil. Ils confirment les résultats obtenus à Djilacoune par [30].

Tableau 3 : Résultats de la vidange du mélange eau + gasoil du bac avec déversoir seuil

N°	Temps de remplissage (s)	Volume (L)			Pourcentage (%)		U (m/s)	D _h (mm)	Re
		Eau	Gasoil	Total	Eau	Gasoil			
1	11,0	6,943	8,130	15,073	46,06	53,94	0,305	0,078	4 266**
2	11,0	6,560	8,370	14,930	43,94	56,06	0,302	0,078	4 093**
3	12,0	6,950	8,590	15,540	44,72	55,28	0,288	0,078	3 951**
4	11,0	6,430	8,020	14,450	44,50	55,50	0,292	0,078	3 995**
5	12,0	6,350	8,200	14,550	43,64	56,36	0,269	0,078	3 641**
6	12,0	6,250	8,220	14,470	43,19	56,81	0,268	0,078	3 597**
7	12,0	5,550	8,520	14,070	39,45	60,55	0,261	0,078	3 316**
8	11,0	6,403	8,620	15,023	42,62	57,38	0,303	0,078	4 040**
9	11,0	9,190	8,330	17,520	52,45	47,55	0,354	0,078	5 493**
10	12,0	6,420	8,840	15,260	42,07	57,93	0,283	0,078	3 732**
11	13,0	6,400	9,020	15,420	41,50	58,50	0,264	0,078	3 453**
12	12,0	6,100	8,340	14,440	42,24	57,76	0,267	0,078	3 541**
13	12,0	6,630	8,920	15,550	42,64	57,36	0,288	0,078	3 834**
14	12,0	6,118	8,252	14,370	42,57	57,43	0,266	0,078	3 540**
15	13,0	6,240	8,720	14,960	41,71	58,29	0,256	0,078	3 360**
16	12,0	5,463	7,570	13,033	41,92	58,08	0,241	0,078	3 181**
17	13,0	6,430	8,630	15,060	42,70	57,30	0,257	0,078	3 431**
18	14,0	6,410	9,140	15,550	41,22	58,78	0,247	0,078	3 221**
19	15,0	6,650	9,160	15,810	42,06	57,94	0,234	0,078	3 093**
20	15,0	6,480	9,230	15,710	41,25	58,75	0,233	0,078	3 038**
21	15,0	6,460	8,970	15,430	41,87	58,13	0,229	0,078	3 010**
22	15,0	5,340	8,880	14,220	37,55	62,45	0,211	0,078	2 613*
23	15,0	6,530	9,100	15,630	41,78	58,22	0,232	0,078	3 046**
24	15,0	7,472	8,580	16,052	46,55	53,45	0,238	0,078	3 356**
25	15,0	6,730	8,750	15,480	43,48	56,52	0,229	0,078	3 091**
26	16,0	6,780	9,120	15,900	42,64	57,36	0,221	0,078	2 941*
27	16,0	6,410	8,830	15,240	42,06	57,94	0,212	0,078	2 795*
28	16,0	6,650	8,620	15,270	43,55	56,45	0,212	0,078	2 862*
29	15,0	6,000	8,420	14,420	41,61	58,39	0,214	0,078	2 803*
30	16,0	6,630	8,600	15,230	43,53	56,47	0,212	0,078	2 854*
X_{moy}	13,3	6,50	8,62	15,122	42,90	57,097	0,256		3 440
σ^2	3,3	0,444	0,153	0,631	56,88	6,23	0,001		11 377
σ	1,8	0,666	0,391	0,795	7,54	2,50	0,035		107
μ_3	1,4	0,6217	-0,0316	0,11755	27,68	-27,62	0,00003		3029 350

(*) : Ecoulement transitoire

(**) : Ecoulement turbulent lisse

3-3. Résultats du Bac avec vanne murale

Les résultats obtenus sont résumés dans le **Tableau 4** ci-dessous. Ils montrent un écoulement en charge turbulent lisse du mélange et une évacuation moyenne 99,79 % d'eau et 0,21 % de gasoil. Ils confirment les résultats obtenus à Djilakoune par [30].

Tableau 4 : Résultats de la vidange du mélange eau + gasoil du bac avec vanne murale

N°	Temps de remplissage (s)	Volume (L)			Pourcentage (%)		U (m/s)	D _h (mm)	Re
		Eau	Gasoil	Total	Eau	Gasoil			
1	6,0	13,490	0,020	13,510	99,85	0,15	0,55	0,053	28 790
2	4,0	13,980	0,020	14,000	99,86	0,14	0,86	0,053	44 770
3	4,0	14,920	0,010	14,930	99,93	0,07	0,91	0,053	48 049
4	3,0	13,430	0,010	13,440	99,93	0,07	1,10	0,053	57 636
5	3,0	13,600	0,020	13,620	99,85	0,15	1,11	0,053	58 054
6	4,0	15,410	0,040	15,450	99,74	0,26	0,95	0,053	48 932
7	4,0	13,610	0,020	13,630	99,85	0,15	0,84	0,053	43 573
8	4,0	15,530	0,010	15,540	99,94	0,06	0,95	0,053	50 023
9	4,0	15,520	0,030	15,550	99,81	0,19	0,95	0,053	49 519
10	4,0	15,420	0,140	15,560	99,10	0,90	0,95	0,053	46 795
11	5,0	14,940	0,030	14,970	99,80	0,20	0,73	0,053	38 114
12	4,0	14,070	0,030	14,100	99,79	0,21	0,86	0,053	44 828
13	4,0	14,350	0,010	14,360	99,93	0,07	0,88	0,053	46 204
14	5,0	14,960	0,020	14,980	99,87	0,13	0,73	0,053	38 353
15	4,0	15,240	0,130	15,370	99,15	0,85	0,94	0,053	46 421
16	4,0	15,230	0,040	15,270	99,74	0,26	0,94	0,053	48 350
17	4,0	15,730	0,050	15,780	99,68	0,32	0,97	0,053	49 738
18	4,0	14,420	0,010	14,430	99,93	0,07	0,88	0,053	46 431
19	4,0	13,240	0,020	13,260	99,85	0,15	0,81	0,053	42 375
20	4,0	14,660	0,040	14,700	99,73	0,27	0,90	0,053	46 506
21	4,0	16,040	0,040	16,080	99,75	0,25	0,99	0,053	50 970
22	4,0	14,250	0,010	14,260	99,93	0,07	0,87	0,053	45 881
23	4,0	15,450	0,060	15,510	99,61	0,39	0,95	0,053	48 607
24	3,0	14,980	0,020	15,000	99,87	0,13	1,23	0,053	64 008
25	4,0	15,430	0,030	15,460	99,81	0,19	0,95	0,053	49 228
26	4,0	14,790	0,020	14,810	99,86	0,14	0,91	0,053	47 391
27	4,0	15,230	0,010	15,240	99,93	0,07	0,93	0,053	49 052
28	3,0	14,270	0,010	14,280	99,93	0,07	1,17	0,053	61 261
29	4,0	15,150	0,020	15,170	99,87	0,13	0,93	0,053	48 556
30	3,0	14,540	0,020	14,560	99,86	0,14	1,19	0,053	62 110
X _{me}	4,0	14,729	0,031	14,761	99,792	0,208	0,931	0,053	48 351
σ ²	0,4	0,578	0,001	0,598	0,039	0,039	0,019		51 456 766
σ	0,6	0,760	0,031	0,773	0,198	0,198	0,137		7 173
μ ₃	0,2	-0,189	0,00008	-0,19074	-0,0209	0,02118	-0,00025		11 702 159 135

Nous remarquons ce qui suit :

- *Aucun tourbillon ou vortex (écoulement rotationnel) n'a été noté dans la partie amont lors des essais ;*
- *Le volume moyen de mélange recueilli du bac équipé d'un orifice circulaire long noyé par essai est de 15,744 L. Son temps de remplissage est de 29,4 s, tandis que le débit correspondant est de 1,93 m³/h.*
- *Le volume moyen de mélange recueilli du bac équipé d'un orifice rectangulaire noyé par essai est de 14,761 L. Son temps de remplissage est de 4 s, tandis que le débit correspondant est de 13,28 m³/h.*
- *Le volume moyen de mélange recueilli du bac équipé d'un orifice rectangulaire partiellement noyé (déversoir seuil) par essai est de 15,122 L. Son temps de remplissage est de 13,3 s, tandis que le débit correspondant est de 4,09 m³/h.*

3-4. Récapitulatif des résultats

Les résultats obtenus montrent qu'avec des taux moyens d'évacuation d'eau de robinet et de gasoil respectifs de 42,90 % et 57,10 %, les orifices rectangulaires avec déversoir seuil (écoulement à surface libre) sont moins performants pour l'évacuation de l'eau et la conservation du gasoil que les orifices rectangulaire noyé (99,79 % et 0,21 %) et circulaire long noyé (100 % et Traces). En sus, les écoulements à travers le déversoir seuil sont à régimes transitoires à turbulents lisses ; tandis que ceux à travers les orifices noyés sont turbulents lisses. Le **Tableau 5** ci-après récapitule les résultats obtenus lors des investigations.

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats obtenus lors des investigations

N°	DESIGNATIONS	% Eau recueillie			% Gasoil recueilli		
		Moyenne	Variance	Ecart Type	Moyenne	Variance	Ecart Type
1	Système avec orifices longs	100,00	-	-	Traces	-	-
2	Système avec batardeaux	42,90	56,88	7,54	57,10	6,23	2,50
3	Système avec vannes murales	99,79	0,04	0,20	0,21	0,04	0,20

4. Discussion

4-1. Bac avec orifice long

L'orifice circulaire long étant noyé, il fonctionne en charge. La **Figure 6** illustre son mode de fonctionnement.

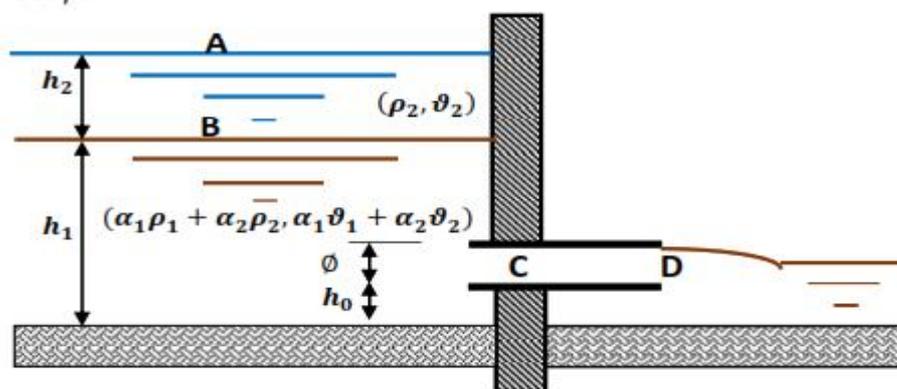


Figure 6 : Illustration d'un écoulement en charge à travers un orifice long circulaire noyé

Le nombre de Reynolds moyen étant $Re = 29\,604$, le régime de l'écoulement moyen du mélange eau + gasoil est turbulent lisse. Aucun vortex n'étant noté lors des expériences et l'eau de robinet étant plus lourde que le gasoil, il constitue un écran pour l'écoulement du gasoil. En effet, tant que la vitesse d'écoulement du mélange dans la partie amont de l'orifice est faible ($U_3 = 0.003\text{ m/s}$), le liquide le plus lourd constitue un écran isolant celui le plus léger [33]. Il se vide en premier avant le second (Principe de la séparation des liquides non-miscibles avec des ampoules à décanter). Cependant, si la vitesse de l'écoulement amont augmente, les forces de viscosité deviennent plus importantes à l'interface des deux liquides. Les particules fluides du liquide le plus lourd entraînent dans leurs mouvements celles adjacentes

du fluide le plus léger (Forces de Stokes). Au cas où l'écoulement à travers l'orifice devient turbulent rugueux, un vortex apparaît au droit de celui-ci. L'air atmosphérique est entraîné en même temps que les deux liquides. Dans notre cas, la faiblesse de la vitesse ($U_3 = 0.003 \text{ m/s}$) et le régime turbulent lisse ($Re = 29\,604$), expliquent la présence de traces de gasoil dans les échantillons de mélanges recueillis. L'eau de robinet et le gasoil simulant respectivement l'eau saumâtre des retenues et celle de pluie, nous pouvons conclure que les orifices longs sont efficaces dans l'évacuation du premier liquide et la conservation du second.

4-2. Bac avec seuil déversoir

Le seuil déversoir fonctionne en écoulement à surface libre. Quel que soit le régime d'écoulement, les deux liquides sont engagés dans l'écoulement avec un avantage pour le fluide le plus léger (*Figure 7*).

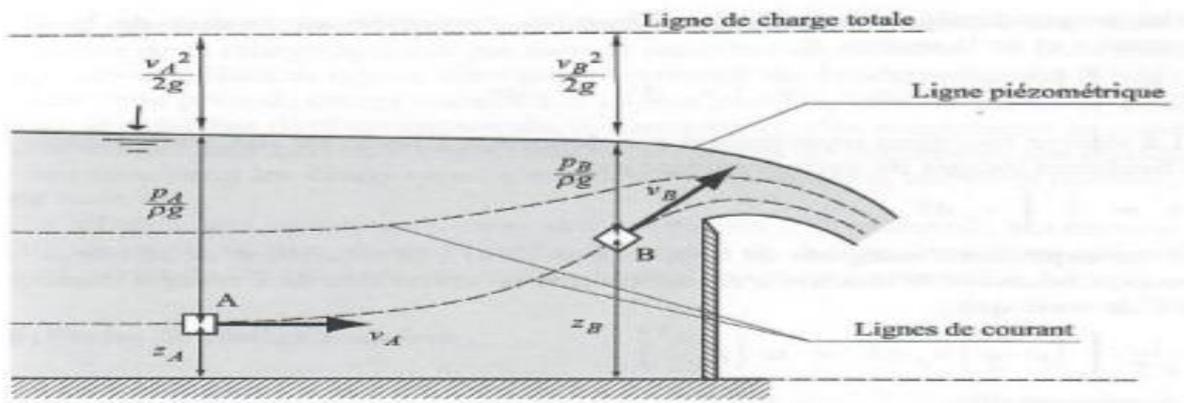


Figure 7 : Illustration d'un écoulement à surface libre par-dessus un déversoir
Source : [39]

En effet, le fluide le plus léger (gasoil) surnageant celui le plus lourd (eau de robinet), quel que soit le régime d'écoulement, la quasi-totalité de la hauteur de sa lame est engagée ; tandis que celle du plus lourd est influencée par le seuil, la ligne piézométrique et la ligne de charge totale (Théorème de Bernoulli) [35, 36, 39]. Les deux fluides sont évacués en même temps. C'est ce qui explique l'évacuation moyenne de 57,10 % de gasoil et 42,90 % d'eau de robinet. L'eau de robinet et le gasoil simulant respectivement l'eau saumâtre des retenues et celle de pluie, nous pouvons conclure que les batardeaux ne sont pas performants dans l'évacuation du premier liquide et la conservation du second. Ces résultats confirment ceux observés par Brunet à Djilakoune [30]. A Fayil, les terres sulfatés acides protégées par un barrage anti-sel réalisé en 2009 et équipé de batardeaux, n'ont été partiellement aménageables qu'en 2020 ; soit onze ans après la réalisation de l'ouvrage.

4-3. Bac avec vanne murale

La vanne murale étant noyée, elle fonctionne en charge. La *Figure 8* illustre son mode de fonctionnement.

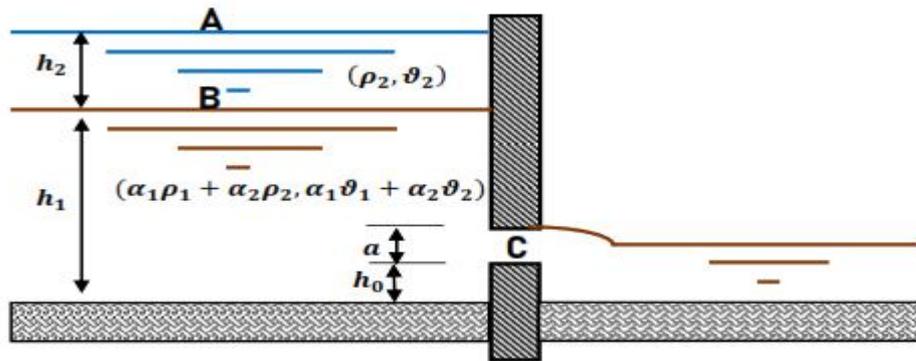


Figure 8 : Illustration d'un écoulement en charge à travers une vanne murale (régime dynamique)

Le nombre de Reynolds moyen étant $Re = 48\,351$, le régime de l'écoulement moyen du mélange eau + gasoil est turbulent lisse. Aucun vortex n'étant noté lors des expériences et l'eau de robinet étant plus lourde que le gasoil, il constitue un écran pour l'écoulement du dernier liquide [33]. Cependant, le débit moyen d'écoulement étant $Q_3 = 13,28\text{ m}^3/h$, tandis que la vitesse moyenne loin de l'orifice est $U_3 = 0.017\text{ m/s}$, loin de l'orifice, à l'interface des deux liquides, les particules fluides de l'eau ont entraîné dans leurs mouvements celles du gasoil. La vitesse moyenne U_3 étant supérieure à U_1 , ceci explique les 0,21 % de gasoil dans les échantillons de mélanges recueillis. L'eau de robinet et le gasoil simulant respectivement l'eau saumâtre des retenues et celle de pluie, nous pouvons conclure que les vannes murales sont efficaces dans l'évacuation du premier liquide et la conservation du second. Ces résultats confirment ceux observés par Brunet à Djilakoune [30].

5. Conclusion

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons dire que les équipements hydrauliques de régulation constitués de batardeaux sont moins performants que les orifices circulaires longs ou rectangulaires noyés dans les processus d'évacuation des eaux saumâtres de lessivage des sols salés sulfatés acides et de conservation des eaux douces plus propices à la riziculture. Cependant, les dimensions des vannes murales étant plus importantes que celles des orifices circulaires, ces derniers sont plus efficaces. Il est donc déconseillé d'utiliser les batardeaux pour équiper les barrages et digues anti-sel.

Références

- [1] - Centre de Suivi Ecologique (Sénégal), "Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal", Edition (2015) 202 p.
- [2] - S. SADIO, "Pédogénèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine - Saloum, Sénégal", Editions de l'ORSTOM, (1991) 290 p. - ISBN :2-7099-1039-X
- [3] - T. SANE, M. DIOP et P. SAGNA, in "Sécheresse", 19 (1) (2008) 23 - 28
- [4] - D. A. BAMA NATI, "Impact de la variation pluviométrique sur la salinisation des bas-fonds côtiers et processus de leur récupération pour la riziculture : cas des bas-fonds du Sine-Saloum au Sénégal", Thèse de doctorat unique, Ecole doctorale « Eau, Qualité et Usage de l'eau », Université Cheikh Anta Diop de Dakar, (2016) 151 p.

- [5] - T. SANE, "Vulnérabilité et adaptabilité des systèmes agraires à la variabilité climatique et aux changements sociaux en Basse Casamance (Sud-Ouest du Sénégal)", Thèse de Doctorat unique de Géographie, Université Sorbonne, Paris Cité ; Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), (2017) 377 p. Français
- [6] - Agence Nationale de la Statistique et de Démographie (ANSD) (Sénégal), "*Situation économique et sociale du Sénégal 2019*", Edition, (Janvier 2022) 310 p. - ISSN 0850-1491, site www.ansd.sn
- [7] - T. SANE, M. DIOP, P. SAGNA, in '*Sécheresse*', 19 (1) (2008) 23 - 28
- [8] - I. MBALLO, O. SY, C. FAYE, in "*Espace géographique et Société Marocaine*", Infrastructure et développement, 28 - 29 (2019) 161 - 178 p. hal-024388v1
- [9] - Agence Nationale de la Statistique et de Démographie (ANSD), "*Situation économique et sociale du Sénégal 2017 – 2018*", Edition, (Juillet 2020) 413 p. - ISSN 0850-1491, site www.ansd.sn
- [10] - O. DIENG, P. ROUCOU, S. LOUVET, in "*Sécheresse*", 19 (2) (2008) 87 - 93
- [11] - P. SAGNA, O. NDIAYE, C. DIOP, A. D. NIANG, P. C. SAMBOU, in "*Pollution atmosphérique*", N°227 (Octobre - Décembre 2015) 1 - 17
- [12] - A. MENDY, in '*Ethique et Economie / Ethics and Economics*', 11 (1) (2014) 109 - 125 p. - <http://ethique-economique.net/>
- [13] - T. SANE, I. DIEDHIOU, C. MERING, B. D. BA, M. C. CORMIER-SALEM, A. T. DIAW, A. K. TINE, in "Belin/ « L'Espace géographique 2018/3 Tome 47 »", pp201-218, <https://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2018-3-page-201.htm>
- [14] - P. M. BOSCH, "A la croisée des pouvoirs : une organisation paysanne face à la gestion des ressources - Basse Casamance, Sénégal", IRD Editions — Cirad, 2005 313p ISSN : 0998-4658, ISBN IRD : 2-7099-1562-6, ISBN CIRAD : 2-87614-601-0
- [15] - M. MANZELLI, E. FIORILLO, M. BACCI, V. TARCHIANI, in '*Cah. Agric.*', 24 (5) (2015) 301 - 312 doi : 10.1684/agr.2015.0772
- [16] - J. BIAYE, Y. SANE, C. A. AIDARA, L. FALL, in '*Agronomie Africaine*', 33 (1) (2021) 1 - 12
- [17] - M. TENDING, N. NDOUR, B. SAMBOU, M. DIATTA, A. AOUTA, in '*Int. J. Biol. Chem. Sci.*', 10 (2) : 666-680 (2016)
- [18] - A. M. FAYE, in '*Revue Espace Géographique et Société Marocaine*', N°20/21 (janvier 2018) 129 - 143
- [19] - M. DASYLVA, N. NDOUR, M. A. A. DIEDHIOU, B. SAMBOU, in '*European Scientific Journal*', 15 (15) (2019) 165 - 189
- [20] - J. LE BORGNE (J.), *La pluviométrie au Sénégal et en Gambie*, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Editions ORSTOM, Ministère Français de la Coopération, (1988) 96 p.
- [21] - T. DIOP, R. NDIAYE, S. A. SOW, D. D. BA, in '*Afrique Science*', 15 (4) (2019) 71 - 80, <http://www.afriquescienc.net>
- [22] - C. A. T. SEYE, E. H. FAYE, A. THIAM, F. MATTY, B. SAMBOU, in '*Journal of Applied Biosciences*', 130 (2018) 1162 - 13174
- [23] - J. P. MONTOROI, "Dynamique de l'eau et géochimie des sels d'un bassin versant aménagé de Basse-Casamance (Sénégal) : Conséquence sur la gestion durable de l'écosystème de mangrove en période de sécheresse", Thèse de Doctorat Université Nancy I, France, (1994) 352 p.
- [24] - J. P. MONTOROI, '*Agriculture et développement*', N°10 (Juin 1996) 61 - 73 p.
- [25] - J. P. MONTOROI, "Les rizicultures en Afrique de l'Ouest. Actes du colloque international Quel avenir pour les rizicultures de l'Afrique de l'Ouest ? 5-7 avril 1995", Bordeaux, France. Editeurs CHENEAU-LOQUAY A., LEPLAIDEUR A., Cirad Montpellier, France, (1998) 476 p.
- [26] - A. D. BAMA NATI, B. V. BADO, S. SAMBOU, S. FAYE, F. LOMPO et C. B. GAYE, '*Journal of Water Resources and Ocean Science*', Vol. 5, N°6 (2016) 104 - 107 p. doi: 10.11648/j.wros.20160506.14
- [27] - A. D. BAMA NATI, B. V. BADO, S. SAMBOU, S. FAYE (S.), V. MEL, C. B. GAYE, '*African Journal of Agricultural Research*', Vol. 10, (23) (4 June 2015) 2378 - 2388 p.

- [28] - M. CAMARA, M. KEBE, M. M. KOUAME, in ‘*Sciences & Nature*’, Vol. 4, N° 1 - 15 (2007)
- [29] - J. ALBERGEL, D. BRUNET, G. DUBEE, J. P. MONTOROI, P. ZANTE, “Utilisation rationnelle de l’eau des petits bassins versants en zone aride”. Edition AUPELF – UREF, John Libbey eurotext, Paris, (1991) 275 - 285 p.
- [30] - D. BRUNET, “Dessalement des terres dans la vallée de Djiguinoum. Bilan hydrique et salin de l’hivernage 1988”, Edition ORSTOM (Dakar), (1989)
- [31] - C. MARIUS, “Mangroves du Sénégal et de la Gambie. Ecologie, Pédologie, Géochimie, Mise en Valeur et aménagement”, Thèse de Doctorat Ès Sciences Naturelles soutenue le 30 mars 1984 à l’université Louis Pasteur - Editions de l’ORSTOM, Collection Travaux et Documents, Paris, N°193 (1985) 335 p.
- [32] - P. PELISSIER P., “Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance”, Thèse soutenue à l’Université de Bordeaux le 30 juin 1966, Version électronique de l’ouvrage paru sous le même titre (Saint-Yrieix Fabrègue : 939p), 74 figures, 64 planches. Dakar, UCAD, Département d’Histoire, (juin 2008) 537 p.
- [33] - A. CRAYA A., in ‘*La Houille blanche*’, (Janvier - Février 1949) 44 - 55 p.
- [34] - P. BOIVIN P., J. Y. LOYER, “Mise en valeur des mangroves au Sénégal”. Rapport final, Orstom, Commission des Communautés européennes, Rapport TSD A 104 (MR), France, (1989) 64 p.
- [35] - N. VAN TUU, B. LEMOINE, J. POUPLARD, ‘*Hydraulique routière*’, Ministère de la Coopération et du Développement, Imprimerie JOUVE, (France) 4^e trimestre, (1981) 341 p.
- [36] - J. ROUSSEL, “Cours de Physique, Mécanique des fluides”, Version en ligne femto-physique.fr/mecanique_des_fluides, p69, Copyright © 2021 Jimmy Roussel, site web : <http://person.ensc-rennes.fr/jimmy-roussel>, (09 février 2023)
- [37] - W. J. MOORE, “Chimie Physique” (traduit de l’anglais PHYSICAL CHEMISTRY, Prentice Hall New York par ABERDAM H), Editions DUNOD, (1965) 792 p.
- [38] - A. GERINI, X. MONTAGNE, in “*Revue de l’Institut Français du Pétrole*”, Vol. 52, N°5 (Septembre - Octobre 1997) 513 - 530 p.
- [39] - M. SOUTTER, A. MERMOUD, A. MUSY, “*Ingénierie des eaux et du sol : Processus et aménagements*”, Première édition, Presses polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), (2007) 283 p.