

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UN PEUPLE – UN BUT – UNE FOI
Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement Rural

Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des
Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du
Fleuve Sénégal et de la Falémé

(SAED)



HAUT COMMISSARIAT

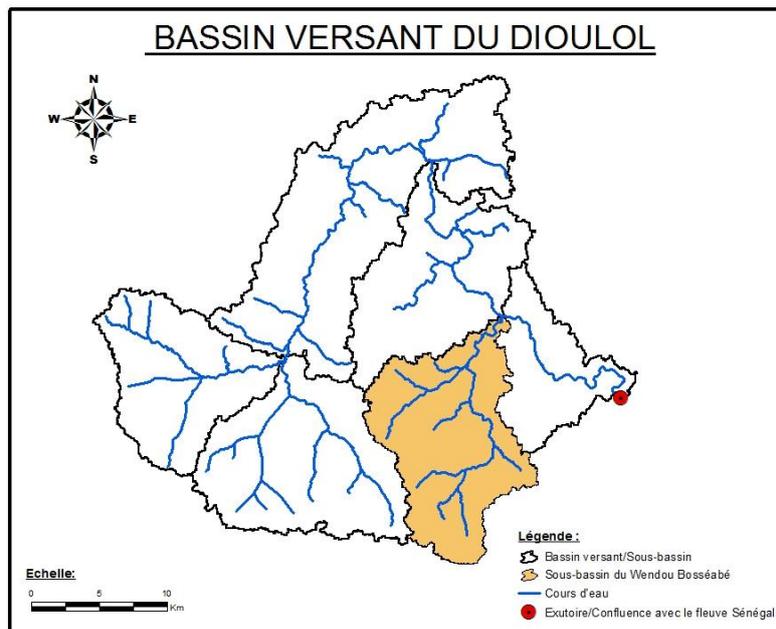
Projet de Gestion Intégrée des Ressources
en Eau et de Développement des Usages
Multiples du Bassin du fleuve Sénégal –
Phase II (PGIRE 2)



MARCHE N° 15.15.09 / 2016

ETUDES DE FAISABILITE, D'AVANT-PROJET SOMMAIRE, AVANT-PROJET DETAILLE ET DE
DOSSIER D'APPEL D'OFFRES POUR LES TRAVAUX D'AMENAGEMENT ET D'EQUIPEMENT DU
BASSIN VERSANT DU DIOULOL A MATAM (CONSTRUCTION D'OUVRAGES, REBOISEMENT,...)

PHASE I : ETUDES DE FAISABILITE ET D'AVANT-PROJET SOMMAIRE (APS)



RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES

VERSION FINALE

AVRIL 2017



12, Rue Amir Sidi Mohammed, Rabat, Maroc
Tel : +212 (0)5 37 65 93 96 / fax : +212 (0)5 37 75 60 94
Site : www.alkhibra.ma Email : alkhibra@alkhibra.ma



Sacré Cœur 3 villa N°142 BIS, 2ème Étage B.P 45402
Dakar-Fann Dakar - Sénégal
Tél. : (221) 33 825 54 55 / Fax : (221) 33 825 74 73
Site : www.transecor.com Email : info@transecor.com

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	4
I. INTRODUCTION.....	5
I.1 CADRE DE L'ETUDE	5
I.2 BUTS DES AMENAGEMENTS	6
I.3 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE DE L'AIRES D'ETUDE	6
I.4 COLLECTE DES DONNEES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES.....	7
II. CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT	8
II.1 CADRE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE.....	8
II.1.1 Aperçu géologique	8
II.1.2 Aperçu géomorphologique	9
II.2 CADRE PEDOLOGIQUE	9
II.3 RESSOURCES EN EAU	10
II.3.1 Aperçu hydrologique.....	10
II.3.2 Aperçu hydrogéologique.....	11
II.4 VEGETATION.....	11
II.5 RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	12
II.6 CADRE CLIMATIQUE.....	16
II.6.1 Précipitations	16
II.6.2 Températures.....	19
II.6.3 Humidité relative.....	19
II.6.4 Direction et vitesse des vents	20
II.6.5 Durée d'insolation.....	22
II.6.6 Evaporation	22
III. ETUDE DES CRUES.....	23
III.1 INTRODUCTION	23
III.2 GENERALITES SUR LES METHODES USUELLES ET REGIONALES.....	23
III.2.1 Méthode rationnelle	24
III.2.2 Méthode de l'ORSTOM	25
III.2.3 Méthode du CIEH	27
III.3 METHODOLOGIE ADOPTEE.....	29
III.4 ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS MAXIMALES	29
III.4.1 Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières	29
III.4.2 Estimation des quantiles de pluies maximales en 24 heures.....	31

<i>Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)</i>	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.4.3	Estimation du coefficient d'abattement spatial des pluies	31
III.5	DUREES CARACTERISTIQUES DE CRUES.....	33
III.6	ESTIMATIONS DES DEBITS DE CRUES	36
III.6.1	Détermination des débits de crues d'occurrence modérée (10 à 50 ans) par la méthode du NRCS	36
III-6-1-1	Rappel du principe de la méthode et conduite	36
III-6-1-2	Résultats obtenus	37
III.6.2	Détermination des débits de crues d'occurrence rare (> 50 ans) par la méthode du GRADEX	38
III-6-2-1	Rappel du principe de la Méthode du GRADEX.....	38
III-6-2-2	Démarche adoptée	38
III-6-2-3	Résultats obtenus	40
III.6.3	Application du modèle HEC-HMS au bassin versant du Dioulol.....	42
III-6-3-1	Description de la méthode	42
III-6-3-2	Données d'entrée	43
III-6-3-3	Résultats de la simulation hydrologique	44
III.7	DEBITS DE CRUES RETENUS	44
III.8	HYDROGRAMMES DE CRUES.....	45
IV.	ETUDE DES APPORTS EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT	49
IV.1	GENERALITES SUR LES METHODES PLUS CONNUES ET FREQUEMMENT UTILISEES EN AFRIQUE DE L'OUEST	49
IV.2	APPROCHE ADOPTEE	50
IV.3	RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE	50
V.	EVALUTATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE BASSIN VERSANT.....	53
V.1	GENERALITES ET APPROCHE ADOPTEE	53
V.2	RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE	54
VI.	CONCLUSION	55
VII.	REFERENCES	56
VIII.	ANNEXES.....	57
VIII.1	SITUATION GENERALE ET REGIONALE DU BASSIN VERSANT	58
VIII.2	CARTES THEMATIQUES DU BASSIN VERSANT AVEC LES COORDONNEES.....	59
VIII.3	MATRICES DES APPORTS EN EAU MENSUELS ESTIMES DANS LE BASSIN VERSANT	60

<i>Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)</i>	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
<i>Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol</i>	<i>Version finale</i>	<i>Avril 2017</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Données climatiques et hydrologiques de la station de Matam recueillies.....	7
Tableau 2: Caractéristiques géométriques des bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé.....	12
Tableau 3 : Précipitations mensuelles moyennes à la station de Matam (Période 1981-2015).....	17
Tableau 4: Quantiles des pluies annuelles à la station de Matam	18
Tableau 5 : Quantiles des pluies journalières maximales à la station de Matam	30
Tableau 6 : Pluies maximales journalières maximales en 24 heures à la station de Matam	31
Tableau 7 : Résultats du calcul du temps de concentration	35
Tableau 8 : Estimation des crues d'occurrence modérée par la méthode du NRCS.....	37
Tableau 9 : Estimation du coefficient de pointe Cp	39
Tableau 10 : Gradex et quantiles des pluies estimés	40
Tableau 11 : Coefficients a et b de la droite d'extrapolation des débits	40
Tableau 12 : Résultats du calcul des débits de crues par la méthode du Gradex	40
Tableau 13 : Paramètres utilisés pour le modèle Hec-HMS sur le bassin	43
Tableau 14 : Hauteurs de pluies au bassin du Dioulol pour différentes périodes de retour	43
Tableau 15 : Valeurs du débit de pointe et du volume de ruissellement prévues par le modèle Hec-HMS	44
Tableau 16 : Synthèse des débits de pointe calculés par la méthode du Gradex et la simulation	44
Tableau 17 : Quantiles de débits de crues retenus aux bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé	45
Tableau 18 : Table de l'hydrogramme adimensionnel de l'USSCS.....	46
Tableau 19 : Caractéristiques des hydrogrammes de crues aux bassins du Dioulol et du Wendou.....	48
Tableau 20 : Apports annuels aux bassins du Dioulol et du Wendou pour la période 1981-2015	51
Tableau 21 : Résultats du calcul de la dégradation spécifique (Ds)	54
Tableau 22 : Transports solides et envasement du Dioulol	54

<i>Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)</i>	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
<i>Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol</i>	<i>Version finale</i>	<i>Avril 2017</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte du bassin versant du Dioulol	13
Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Dioulol	14
Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant du Dioulol	14
Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant du Dioulol	15
Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Dioulol	15
Figure 6 : Pluies moyennes mensuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015	17
Figure 7 : Pluies annuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015.....	17
Figure 8 : Ajustement des pluies annuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015.....	18
Figure 9 : Températures de l'air à la station de Matam pour la période 1981-2015	19
Figure 10: Humidité relative à la station de Matam pour la période 1981-2015	20
Figure 11: Direction des vents dominants à la station de Matam pour la période 1981-2015.....	21
Figure 12 : Vitesses moyennes des vents à la station de Matam pour la période 1981-2015.....	21
Figure 13 : Insolation moyenne journalière à la station de Matam pour la période 1981-2015	22
Figure 14 : Evaporation moyenne mensuelle à la station de Matam pour la période 1981-2015	22
Figure 15 : Ajustement des pluies journalières maximales pour la période 1981-2015 à Matam	30
Figure 16 : Carte des CN du bassin versant du Dioulol	37
Figure 17 : Représentation graphique de la méthode du Gradex pour le bassin versant du Dioulol	41
Figure 18 : Représentation graphique de la méthode du Gradex pour le bassin versant du Wendou.....	41
Figure 19 : Modèle HEC-HMS du bassin versant du Dioulol	42
Figure 20 : Hydrogrammes de crues au bassin versant du Dioulol	47
Figure 21 : Hydrogrammes de crues au bassin versant du Wendou Bosséabé	48
Figure 22 : Apports moyens mensuels au bassin du Dioulol pour la période 1981-2015	50
Figure 23 : Apports moyens annuels au bassin du Dioulol pour la période 1981-2015.....	52
Figure 24 : Apports annuels au bassin du Wendou Bosséabé pour la période 1981-2015	52

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

I. INTRODUCTION

I.1 CADRE DE L'ETUDE

Par marché ouvert, la Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des vallées du Fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED), Agence d'exécution du programme PGIRE en République du Sénégal, a chargé le groupement d'ingénieurs conseils TEC-CUATRO / ALKHIBRA / AFRECOM /TRANSECOR (désigné ci-après par « IC ») de la réalisation des études et contrôle des travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (Construction d'ouvrages, reboisement, ...). Ces prestations s'inscrivent dans le cadre de la mise en œuvre du **Projet de Gestion Intégrée des Ressources en Eau et de Développement des Usages Multiples du Bassin du fleuve Sénégal – Phase II (PGIRE2)**.

Le présent marché N°15.15.09/2016/SAED/OMVS/PGIRE2/Crédit N°5321SN, correspond à la première partie des prestations précitées. Il a pour objet les **études de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)**.

Ces études sont structurées selon les phases suivantes :

- **Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet Sommaire (APS)**
- **Phase II : Etudes d'Avant-projet Détaillé (APD) et Elaboration du dossier d'Appel d'Offres des travaux (DAO)**

Le présent document s'inscrit dans le cadre de la première phase des études et correspond au rapport des études hydrologiques. Il a été établi à la lumière des données disponibles recueillies.

Les principaux objectifs de ces études hydrologiques sont les suivants :

- Décrire l'environnement hydrologique du bassin versant du Dioulol ;
- Caractériser le bassin versant (géomorphologie, pluviométrie, etc.) avec établissement des cartes thématiques ;
- Estimer les apports en eau mensuels et annuels du bassin ;
- Estimer les débits de crues pour différentes fréquences ;
- Evaluer les apports solides dans le bassin.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

I.2 BUTS DES AMENAGEMENTS

Le projet d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol vise à lutter contre l'ensablement de ce défluent du fleuve Sénégal.

Il consiste particulièrement, à la réalisation d'ouvrages et l'installation d'équipements adéquats permettant une sécurisation de l'alimentation en eau du Dioulol par une lutte contre l'érosion hydrique. Ces aménagements ainsi que leurs mesures d'accompagnement devront contribuer également à l'amélioration de la sécurité alimentaire et au développement économique des territoires ruraux situés sur le bassin versant.

I.3 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE DE L'AIRE D'ETUDE

L'aire de l'étude concerne le cours d'eau Dioulol et son bassin versant. Elle se situe dans l'hémisphère Nord entre les 15°16' et 15°28' de la latitude Nord et les 12°52' et 13°15' de la longitude Ouest au Sénégal.

Sur le plan administratif, le bassin versant fait partie dans son ensemble du Département de Kanel, qui, avec les Départements de Matam et de Ranérou-Ferlo forment la Région de Matam.

La région de Matam est située au Nord-Est du Sénégal et est limitée :

- Au Nord par la Région de Saint-Louis et la République Islamique de Mauritanie ;
- Au Sud et au Sud-est par la Région de Tambacounda.
- Au Sud-ouest par la Région de Kaffrine.
- A l'Ouest par la Région de Louga ;
- A l'Est par la République Islamique de Mauritanie. Le fleuve Sénégal constitue tout au long de cette partie orientale jusqu'au Nord de la Région, la frontière naturelle entre les Républiques du Sénégal et de la Mauritanie.

Le bassin versant du Dioulol a une superficie d'environ 800 Km². Il couvre principalement les communes de Orkadiéré (Arrondissement du même nom) et secondairement de Ndendory (Arrondissement de Ouro Sidy). La Commune Rurale (CR) de Orkadiéré à elle seule s'étale sur une superficie de 288 km², soit près de 36 % de la superficie du bassin versant. Elle est limitée à l'Ouest par la CR de Bokiladji, au Nord-est par la CR de Aouré et au Sud par les CR de Gabou, de Aouré et de Semmé. La Commune de Diawara est enclavée à l'Est dans le territoire de la CR de Orkadiéré.

La situation générale et régionale de la zone d'étude est illustrée en **Annexe 1**.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

I.4 COLLECTE DES DONNEES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les données climatiques et hydrologiques recueillies pour la présente étude, sont celles relatives à la station de Matam. Elles couvrent une période de fonctionnement de 35 ans (1981-2015) pour les plus longues.

Il est à noter que cette station est la seule située à proximité de la zone d'étude disposant d'une longue série d'enregistrements et pour laquelle l'IC a pu recueillir les données. Celles relatives à la station de Semmé (plus proche du bassin versant par rapport à la station de Matam) ne sont pas disponibles.

Les données collectées, leurs sources ainsi que les périodes couvertes sont listées dans le tableau suivant.

Tableau 1: Données climatiques et hydrologiques de la station de Matam recueillies

Station : Matam	Latitude : 15. 65 ° Nord	Longitude : 13. 25 ° Ouest	Altitude : 17 m
Données		Périodes	Sources
Données climatiques			
Pluies mensuelles (Cumul-pluie) en mm	1981 - 2015	Agence Nationale de l'Aviation Civile (ANACIM)	
Pluies journalières maximales mensuelles (Pluie-max) en mm			
Températures maximales et minimales (TMAX et TMIN) mensuelles en °C			
Humidités relatives maximales et minimales (UMAX et UMIN) mensuelles en %			
Direction dominante du vent (DD), mensuelle			
Vitesse moyenne mensuelle du vent (FF) en m/s			
Durée d'insolation (INS) mensuelle en heures			
Evaporation (EVAPO) mensuelle en mm			
Données hydrologiques			
Débits moyens journaliers du fleuve Sénégal en m ³ /s	1986 - 2016	SAED	
Hauteurs d'eau moyennes journalières du fleuve Sénégal en cm			

Par ailleurs en l'absence de données hydrométriques enregistrées sur le Dioulol, seules les données pluviométriques ont été exploitées pour les études des crues et des apports dans le bassin.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

II. CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT

II.1 CADRE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

II.1.1 Aperçu géologique

La région de la zone d'étude appartient à la vallée du fleuve Sénégal établie sur les formations sédimentaires marines ou continentales du bassin sénégalo-mauritanien. La géologie de la région de Matam est caractérisée par l'affleurement des formations du Tertiaire et du Quaternaire.

Le Tertiaire :

Le Tertiaire dans la région de Matam est formée essentiellement des formations de l'**Oligo-Mio-Pliocène** (grès argileux et argiles kaoliniques) et de l'**Eocène Moyen** (grès argileux jaune à passées de cherts, lumachelle, calcaire, dolomie, argile feuilletée, grès tendre, phosphate de chaux, grès fin argileux tendre, argile sableuse, sable siliceux, grès ferrugineux).

Le Quaternaire :

L'évolution de la vallée du Sénégal et de ses bordures pendant le Quaternaire a été complexe. Elle a été influencée à la fois par les variations climatiques et les oscillations du niveau marin. Le Quaternaire dans la région Matam est caractérisé par des **dépôts Actuels et Sub-Actuels**, des **dépôts Post-Nouakchottiens**, **Ogolien** et **Quaternaire Ancien et Moyen**.

➤ Quaternaire Ancien et Moyen

On distingue généralement trois niveaux de terrasses graveleuses : les cuirasses ferrugineuses, les basses terrasses (galets) et les moyennes terrasses (poudingues).

➤ Ogolien :

L'Ogolien est caractérisé par des grands massifs dunaires (dunes rouges), on trouve aussi des remblais arasés et des remblais sablo-argileux.

➤ Dépôts post Nouakchottiens :

Le fleuve Sénégal a construit à cette époque des hautes levées dont les parties les plus élevées sont maintenant insubmersibles. Ces hautes levées fluviales et fluvio-deltaïques sont formées de sable fin et limon, bien compactés, de couleur jaune ou brun-jaune.

➤ Dépôts Actuels et Sub-Actuels :

On trouve des Cuvettes argileuses de décantation, de partie basses au sol très argileux, des bancs de sable, et des levées actuelles et subactuelles.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

II.1.2 Aperçu géomorphologique

Les effets combinés de la variation du niveau de la mer et de plusieurs cycles d'érosion ont donné lieu à la morphogénèse de la vallée. Ainsi plusieurs unités géomorphologiques ont été identifiées, que sont les zones de décantation de même que les bourrelets de berges :

- **Les Massifs collinaires** sont constitués de sols bruns subarides sur cuirasse. Ils sont localisés de part et d'autre de la Route Nationale N°2 (RN2).
- **Les Versants, pentes et glacis d'épandage** avec lithosols sur cuirasse sont constitués de sols peu évolués d'apport hydromorphe sur matériau gravillonnaire dont l'évolution est liée à la disponibilité de l'eau.
- **Les Plateaux et buttes résiduels** avec des lithosols constitués de sols ferrallitiques, bruns rouges, peu évolués et/ou de sols ferrugineux tropicaux lessivés ou non, sur cuirasse ou matériau gravillonnaire.
- **Les Vallées** forment des dépressions plus ou moins élargies qui ont été creusées par érosion hydrique (cour d'eau) dans le relief. Le fond des vallées est occupé par un dépôt sableux.
- **Les Terrasses colluviales** constituées de sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion. Ce sont des sols caractérisés par la présence de divers horizons.

II.2 CADRE PEDOLOGIQUE

Sur le plan pédologique, les sols de la zone d'étude sont dans l'ensemble favorables au développement des activités agro-pastorales. Ils sont particulièrement très favorables à l'agriculture irriguée et, selon leur texture, ils se spécialisent soit en cultures maraîchères, soit en riziculture. On distingue quatre grands types de sols en fonction de leur texture et de leur structure : les hollaldé, les faux hollaldé, les fondé et les sols de diéri.

- **Les Fondé** : Les sols des levées fluvio-deltaïques qui sont à l'abri des faibles crues, partie non submersible, sont appelés « Foondé ». Ce sont des sols silico-argileux à humifères plus ou moins compacts qu'on retrouve dans le Walo. Leur drainage est moyen et ils ont des propriétés filtrantes. Malgré la faible teneur en matière organique, les sols sont favorables à la culture de décrue ou à la polyculture. Les spéculations sont : le sorgho, du niébé, etc.

- **Les Hollaldé** : Ce sont des sols lourds qu'on retrouve au niveau des cuvettes de décantation. Ce sont donc des sols qui subissent une longue période de submersion au moment de la crue. Ils sont argileux à hydromorphes et s'apparentent à des vertisols. Leur teneur en argile est importante (dépasse 35% et peut atteindre plus de 75%). Cette teneur en argile varie selon leur topographie. Leur drainage est mauvais. Ces sols sont favorables à la riziculture parce qu'ils supportent la submersion mais ils sont très difficiles à travailler aussi bien en sec qu'en humide.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

- **Les Faux Hollaldé**: Ils sont retrouvés également dans le Walo. Ce sont des sols hydromorphes qui contiennent entre 30 à 50 % d'argile ; Ce sont donc surtout des sols argilo limoneux sans structure avec un drainage mauvais. Les Faux Hollaldé sont donc des sols favorables à la riziculture et aux autres cultures.

- **Les Deck-Dior** : Ce sont des sols dunaires qu'on retrouve le Diéri et le Ferlo sableux. Ces sols contiennent 80 à 90 % de sable (sols Dior) avec une faible teneur en argile de l'ordre de 5%. Ces sols sont favorables à la culture sous pluie.

En plus de ces quatre grands types, on peut trouver :

- **les Falos** : ce sont les talus des berges du lit mineur du fleuve et de ses défluent ou marigots, situés en bordure du fleuve, donc submersible où sont pratiqués très localement des cultures maraîchères ;
- **les Diacré** : ils constituent les bourrelets recouverts par les crues moyennes à fortes, rarement cultivés mais occupés par des Acacias.

II.3 RESSOURCES EN EAU

A l'échelle de la région de Matam et du bassin versant objet de l'étude, le potentiel hydraulique est important et est constitué des eaux de surface et des eaux souterraines.

Cependant, cette région connaît depuis plusieurs années une baisse accentuée de ses ressources hydriques. Ces contraintes au développement durable de la région s'expliquent d'une part par l'irrégularité spatio-temporelle des ressources en eau (tout comme à l'échelle du grand bassin du fleuve Sénégal : variation des précipitations, sécheresse, inondations, etc.) et d'autre part par les actions de l'homme notamment : la surexploitation des eaux souterraines, le gaspillage et la sous-valorisation des eaux, etc.

II.3.1 Aperçu hydrologique

Du point de vue hydrologique, le réseau hydrographique régional s'ordonne essentiellement autour du fleuve Sénégal et ses principaux défluent que sont le Diamel et le Dioulol. Ces ressources en eaux de surface revêtent une importance particulière et structure globalement la vie des populations de la zone.

Le fleuve Sénégal longe la région à l'Est et au Nord sur environ 200 km. Et particulièrement la Commune de Orkadiéré dans sa partie Nord sur une distance de près de 48 Km.

Le défluent Dioulol a une longueur d'environ 70 Km et traverse le territoire d'Est en Ouest en passant par les Communes de Orkadiéré et Ndendory.

Le régime hydrologique du fleuve Sénégal qui commande le remplissage du Dioulol et des autres marigots se caractérise par une saison des hautes eaux (de juillet à octobre) et une saison de

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

basses eaux (de décembre à début juin). Le débit moyen interannuel du fleuve à la station de Matam sur la période 1986 - 2016 est de 426 m³/s.

Un autre axe d'écoulement saisonnier relie Polel Awloubé à Wendou Bosséabé pour se jeter dans le Dioulol. Le Wendou Bosséabé est le principal affluent du marigot Dioulol.

Outre ces cours d'eau importants, on recense de nombreux marigots et mares temporaires ou permanents disséminés dans la région et qui se remplissent pendant la saison des pluies. Il s'agit entre autres de : Douti, Elélol Marigot, Thiofeul, Guidé-Baroudi, Babondol, Coubar, Soma, Ndoukou. Les mares temporaires sont principalement situées entre le Dioulol et le fleuve Sénégal, et s'assèchent plus ou moins rapidement après la saison des pluies à cause de l'évaporation.

D'autres cours d'eau intermittents formés pendant la saison des pluies, notamment dans le bassin du Dioulol rendent le réseau hydrographique difficilement appréciable par endroit du fait de la mauvaise organisation des écoulements due à la faiblesse des pentes de drainage.

II.3.2 Aperçu hydrogéologique

Du point de vue hydrogéologique, il est possible de subdiviser les aquifères de la zone d'étude en 5 différentes couches ; en partant du bas on a :

- l'aquifère du maastrichtien,
- l'aquifère du paléocène,
- l'aquifère de l'éocène,
- l'aquifère du continental terminal / oligo-miocène
- et l'aquifère du quaternaire.

Dans la région de Matam, les eaux souterraines sont exploitées à partir des puits et des forages dont la profondeur varie entre 25 et 100 m. Les eaux profondes sont constituées principalement par le Maestrichtien accessible à moins de 90 m et présent dans toute la région. C'est la nappe la plus profonde et la plus douce, elle est alimentée par les eaux de ruissellements. Les puits peu profonds ouverts sont les plus fréquents dans l'aire du bassin versant car la nappe phréatique est accessible entre 4 et 10 m de profondeur.

II.4 VEGETATION

Dans l'aire du bassin versant du Dioulol, la végétation est relativement riche et variée, avec une composition qui varie selon les saisons, les types de sols et le microrelief. Le couvert végétal est dominé par des épineux sur la plus grande partie du territoire du bassin versant, avec un tapis herbacé et des arbustes par endroit.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

II.5 RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant du Dioulol a été délimité à partir d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de type ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) qui est un instrument d'imagerie utilisant le satellite EOS (Earth Observing System) de la NASA. Sa précision est proche de celle des cartes topographiques à l'échelle du 1/50000^{ème}. Ce MNT se présente sous la forme d'une grille dont les éléments sont des carrés de 29.77 m de côté. Il a été projeté dans le système de coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator), WGS_1984, dans la zone 28 Nord correspondant au Sénégal.

Le calcul du réseau hydrographique et des limites du bassin versant s'est fait à l'aide de l'outil ArcGIS en plusieurs étapes résumées comme suit :

- **Correction du MNT** : cette étape permet d'éliminer les erreurs du MNT et de le creuser pour imposer les lignes d'écoulement majeures en vue de l'obtention d'un MNT hydrologiquement correct ;
- **Calcul des directions d'écoulement et définition et segmentation des cours d'eau** ;
- **Calcul et tracés des sous-bassins et/ou du bassin et génération du réseau hydrographique.**

Les caractéristiques géométriques et le réseau hydrographique du bassin versant du Dioulol ainsi que le sous-bassin de son affluent Wendou Bosséabé sont présentés et illustrés respectivement dans le Tableau 2 et les figures 1 à 5 suivants.

Tableau 2: Caractéristiques géométriques des bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé

CARACTERISTIQUES			Valeurs au niveau du bassin versant	
			Dioulol	Wendou Bosséabé
Surface (A)		[km ²]	792.23	132.6
Longueur du plus long thalweg (L)		[Km]	70.7	26.87
Longueur totale des cours d'eau		[Km]	263.37	42
Périmètre (P)		[Km]	256.96	99.9
Indice de compacité de Gravelius (K _G)		-	2.56	2.43
Indice de forme de Horton (K _H)		-	0.16	0.18
Rectangle équivalent	Longueur (L _{eq})	[Km]	121.99	47.14
	Largeur (l _{eq})	[Km]	6.49	2.81
Altitude	Correspondant à 5 % de A (Z _{5%})	[m]	87.69	88.91
	Correspondant à 95 % de A (Z _{95%})		3.84	14.53
	Médiane		40.67	57.99
	Moyenne		41.75	51.10
Dénivelée utile (D _u)		[m]	83.85	74.38
Indice de pente	Pente moyenne (P _{moyc}) du cours d'eau principal	[%]	0.12	0.28
	Pente moyenne du bassin (P _{moyb})		4.93	4.94
	Indice de pente globale (I _g)		0.07	0.16
Dénivelée spécifique (D _s)		[m]	61.18	57.46
Densité de drainage (D _d)		[Km ⁻¹]	0.33	0.32

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Le Dioulol et le Wendou Bosséabé drainent respectivement au total des superficies d'environ 800 et 133 km². Leurs bassins versants présentent des caractéristiques morphométriques très semblables ou comparables dont entre autres :

- Une forme allongée justifiée par leurs indices de compacité ($K_G > 1.5$) et de forme ($K_H < 1$).
- La dénivelée globale du bassin est faible par rapport à la longueur du plus long thalweg, ce qui engendre une faible pente globale du cours d'eau, soit en moyenne environ 0.12 % pour le Dioulol et 0.28 % pour le Wendou Bosséabé.
- Une densité de drainage très faible (autour de 0.33) témoignant que le bassin versant n'est pas actif de point de vue drainage et justifiée par les écoulements temporaires des cours d'eau du bassin.

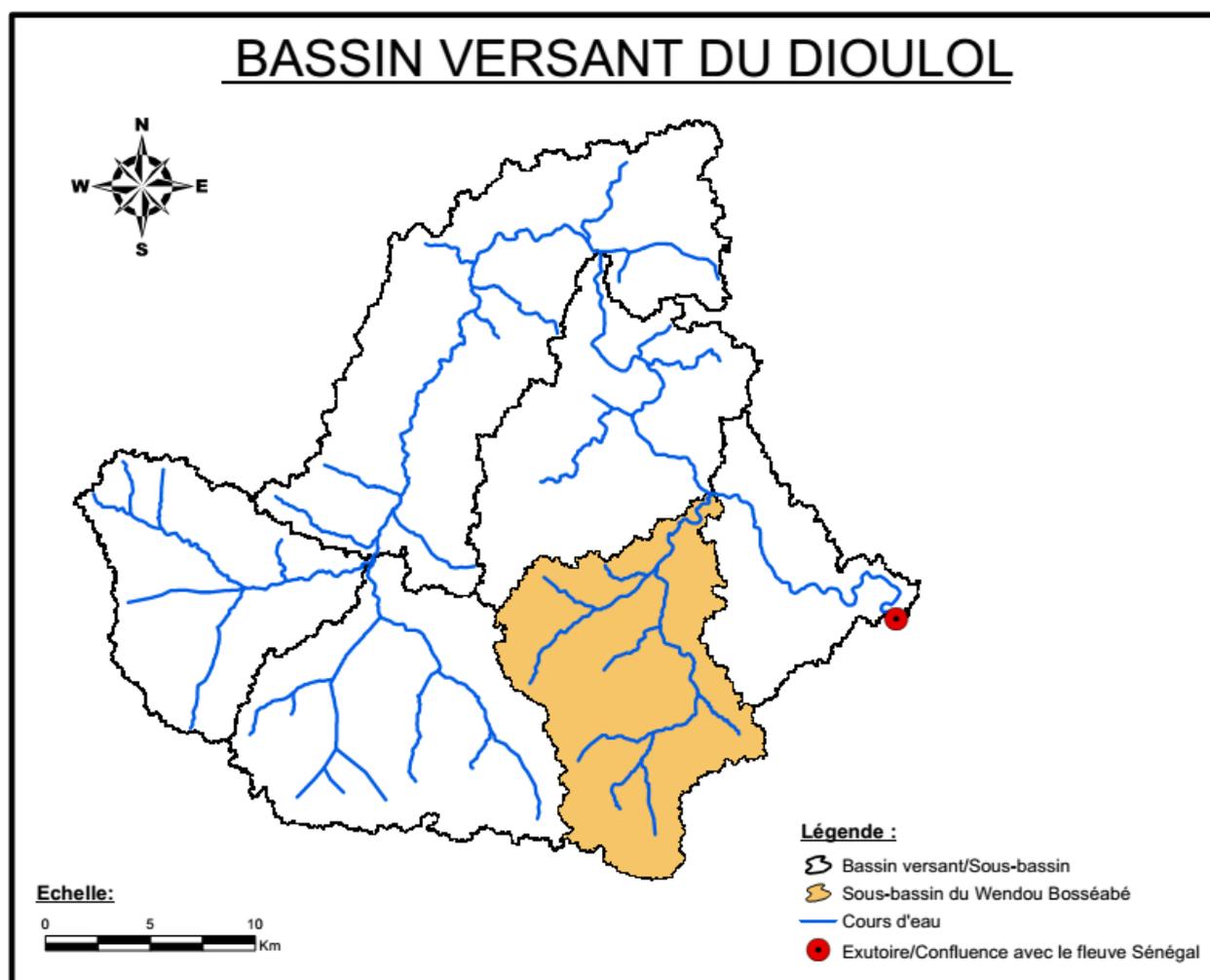


Figure 1: Carte du bassin versant du Dioulol

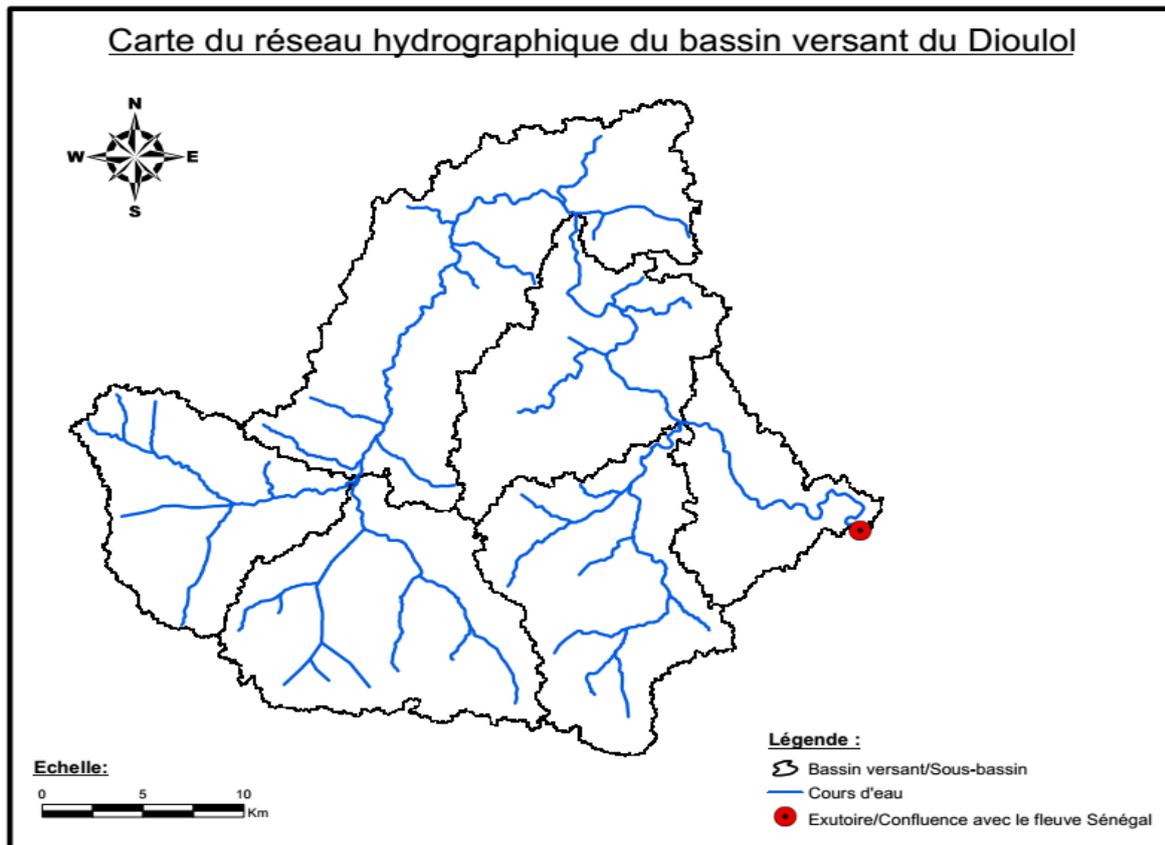


Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Dioulol

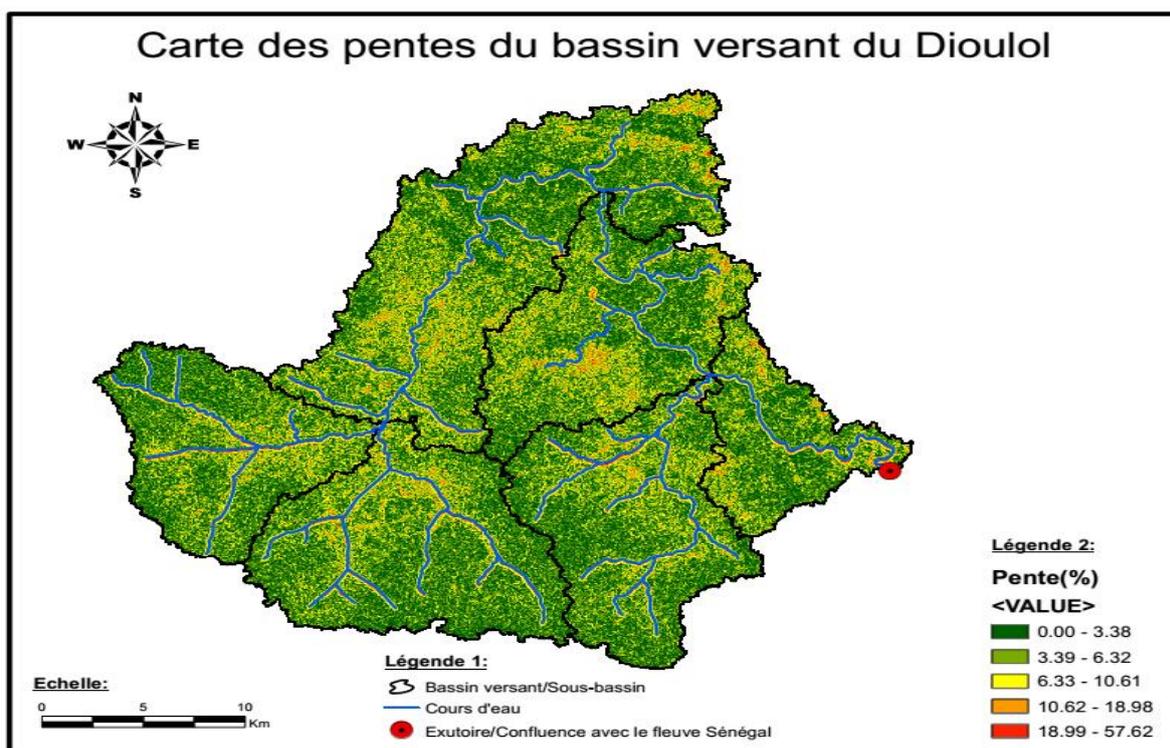


Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant du Dioulol

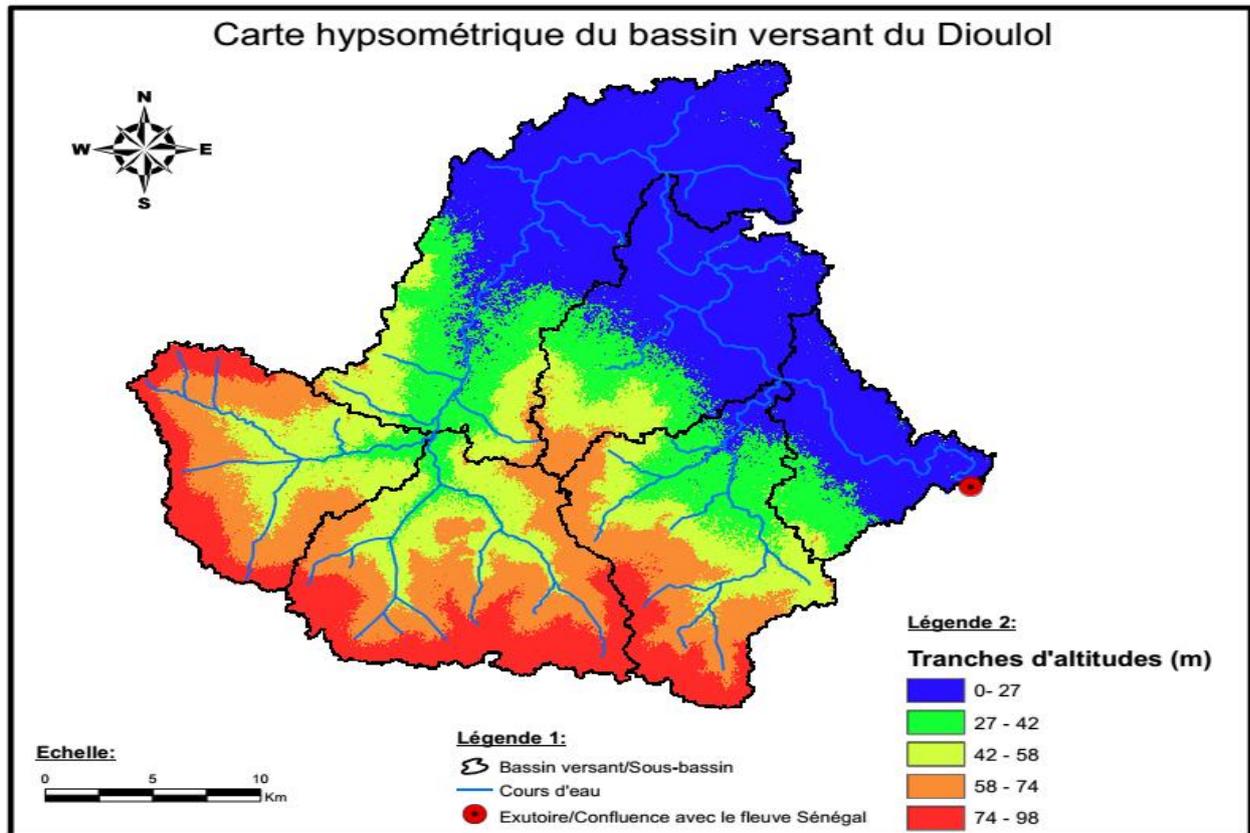


Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant du Dioulol

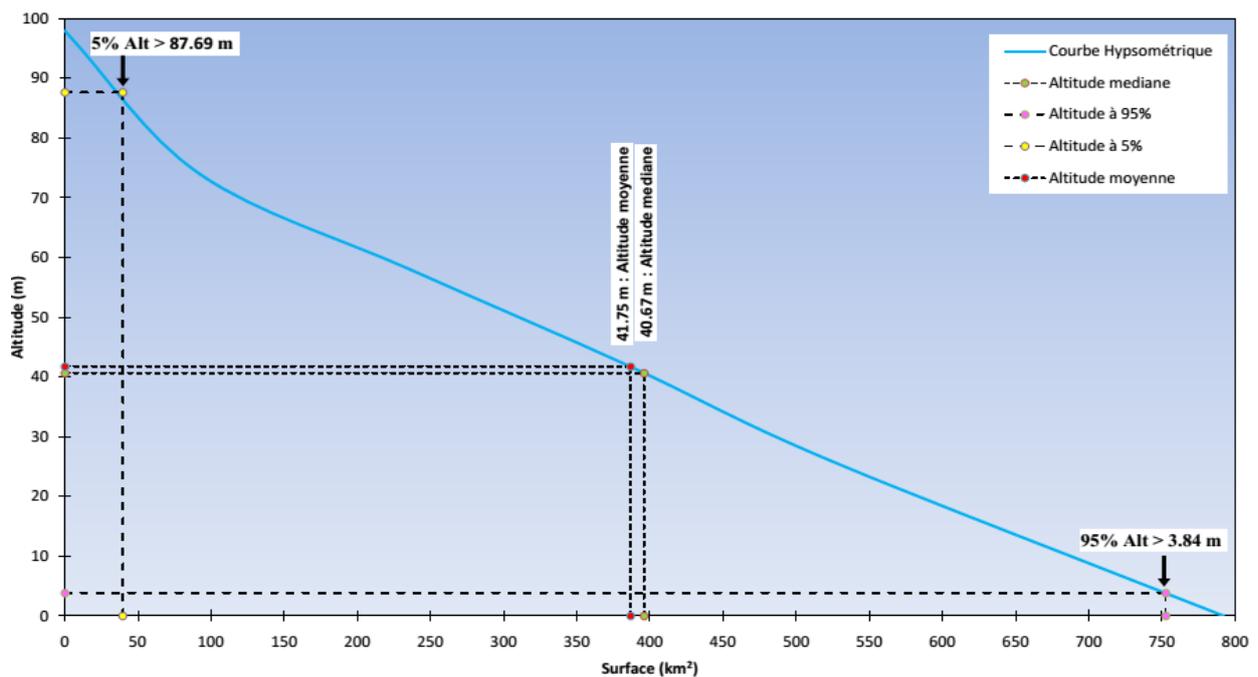


Figure 5 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Dioulol

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

II.6 CADRE CLIMATIQUE

La zone d'étude se caractérise par un climat de type sahélien, comportant deux saisons inégalement réparties sur l'année :

- une saison des pluies qui dure quatre (4) à cinq (5) mois. Elle débute en général en fin mai ou début juin et s'achève entre fin septembre et mi-octobre ;
- et une longue saison sèche qui dure sept (7) à huit (8) mois, allant d'octobre-novembre à mai-juin.

Les données climatologiques disponibles à la station météorologique de Matam ont été exploitées pour caractériser le climat dans le bassin versant du Dioulol.

II.6.1 Précipitations

La région de Matam est comprise entre les isohyètes 300 mm et 500 mm.

Les cumuls mensuels et annuels des précipitations enregistrées à la station de Matam sur la période 1981-2015 sont présentés dans les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et Figure 7 ci-après.

Les précipitations annuelles moyennes (cf. Tableau 3) sont de l'ordre de 380 mm et varient d'une année à l'autre, avec un écart dépassant 500 mm entre les valeurs minimale et maximale (de 165 mm en 1992 à 717 mm en l'an 2000), ce qui montre un grand contraste pluviométrique.

La pluviométrie varie aussi beaucoup d'un mois à l'autre au sein de la même année. Les mois les plus pluvieux sont juillet, août et septembre. Ils enregistrent à eux seuls près de 89 % de la pluviométrie moyenne annuelle, avec une pointe moyenne d'environ 151 mm au mois d'août. Le maximum absolu enregistré est de 334.80 mm en août 2003.

En saison sèche (de novembre à mai), les précipitations sont très faibles à nulles.

Par ailleurs, compte tenu du contexte de variabilité climatique et des précipitations qui peuvent être des variables purement aléatoires auxquelles on peut appliquer les calculs statistiques, une analyse fréquentielle des hauteurs pluviométriques annuelles pour la période 1981-2015 a été effectuée, afin de déterminer la répartition de ces hauteurs sur la chronique et leur apparition. En pratique, on pourra considérer que la pluviométrie moyenne annuelle représente une variable aléatoire qui suit une loi normale. Ainsi un ajustement des pluies annuelles moyennes (cf. le Tableau 4 et la Figure 8) a été fait par la loi de Gauss, qui convient le mieux pour les valeurs moyennes.

Tableau 3 : Précipitations mensuelles moyennes à la station de Matam (Période 1981-2015)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Pluie (mm)	1.01	1.10	0.10	0.02	2.13	22.58	82.70	150.60	103.07	15.83	0.66	0.19	380.01

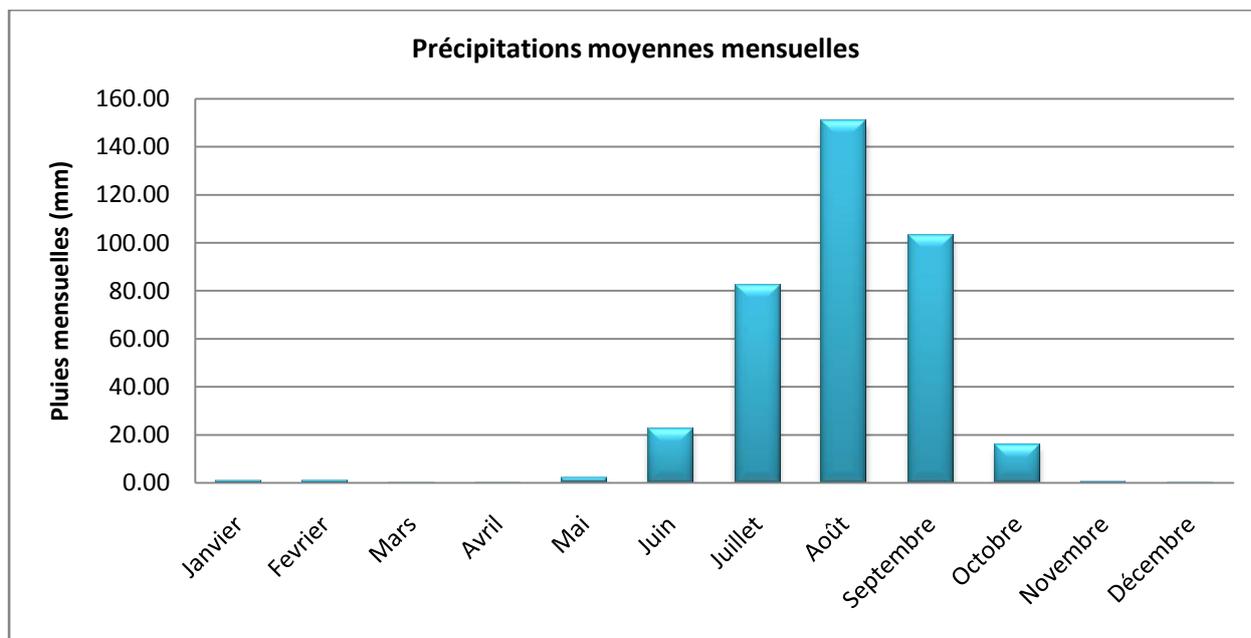


Figure 6 : Pluies moyennes mensuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015

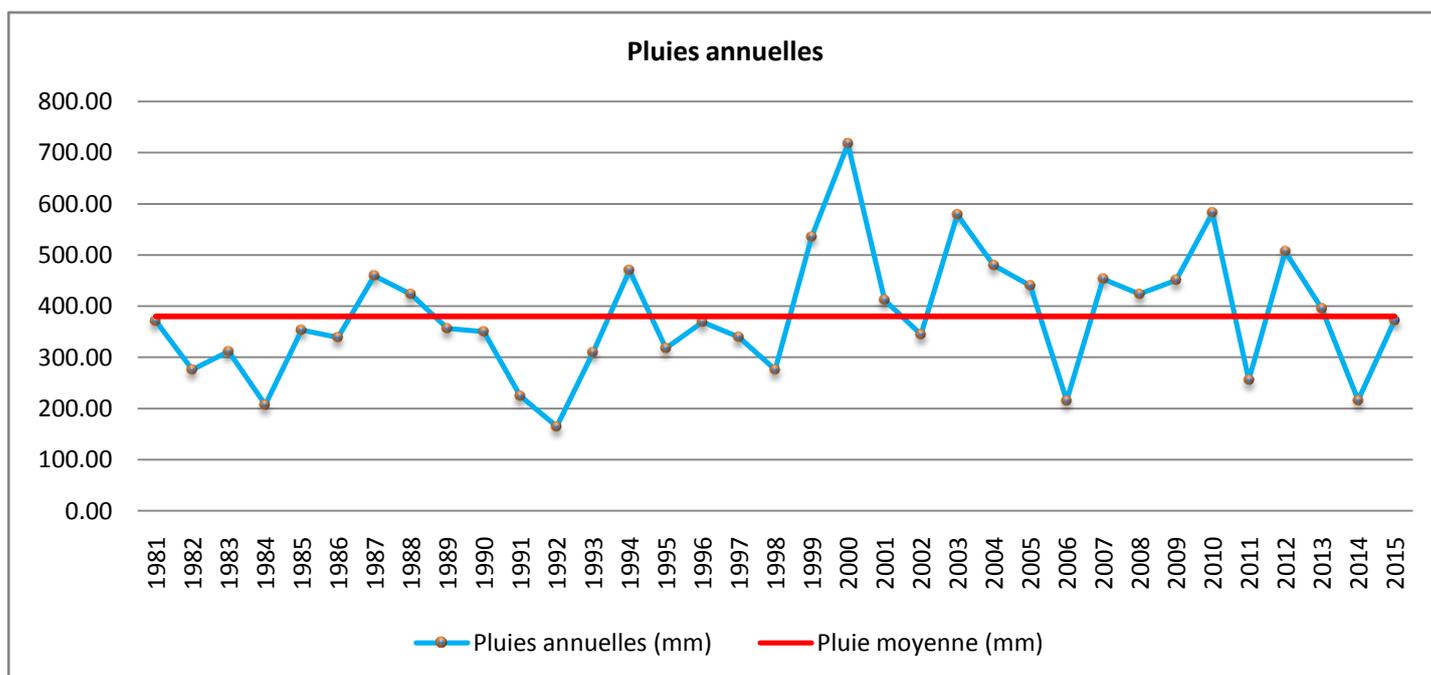


Figure 7 : Pluies annuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015

Ajustement des pluies annuelles (Pan) à la Station de Matam

AJUSTEMENT A LA LOI NORMALE (GAUSS)

Taille de l'échantillon = 35

Moyenne = 380 mm
 Ecart-type = 120 mm
 Médiane = 369 mm

Paramètres estimés :
 mu = 379.98
 sigma = 119.90

Tableau 4: Quantiles des pluies annuelles à la station de Matam

Période de retour T (ans)	Fréquence	Valeur XT (mm)	Ecart-type
2	0.5	380.00	20.30
5	0.80	481.00	23.70
10	0.90	534.00	27,50
20	0.95	577.00	31,40
50	0.98	626.00	36,10
100	0.99	659.00	39,40
1000	0.999	751.00	49,30

Ajustement des pluies annuelle à la Station pluviométrique de Matam
 Normale (Maximum de vraisemblance)

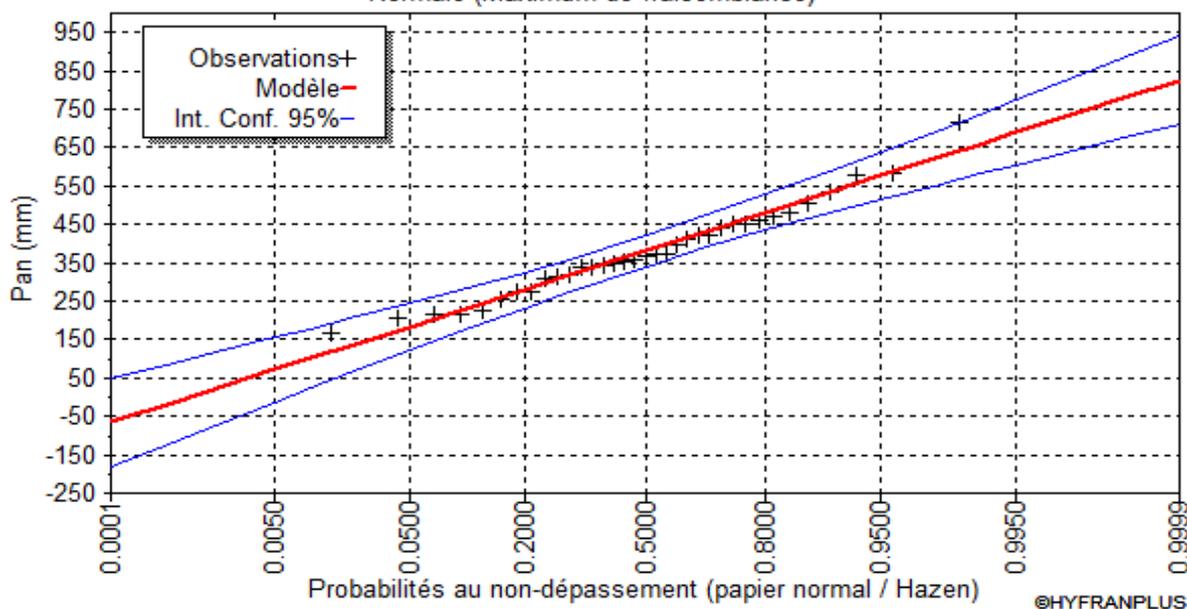


Figure 8 : Ajustement des pluies annuelles à la station de Matam pour la période 1981-2015

II.6.2 Températures

Les températures maximales, minimales et moyennes mensuelles dans la zone d'étude pour la période 1981- 2015, sont représentées dans la Figure 9.

Leurs amplitudes de variation au cours de l'année permettent de distinguer deux saisons, une saison fraîche de novembre à mars et une saison chaude d'avril à octobre. Néanmoins pendant la saison chaude on observe une période d'adoucissement des températures, allant de juillet à octobre liée à la tombée des pluies.

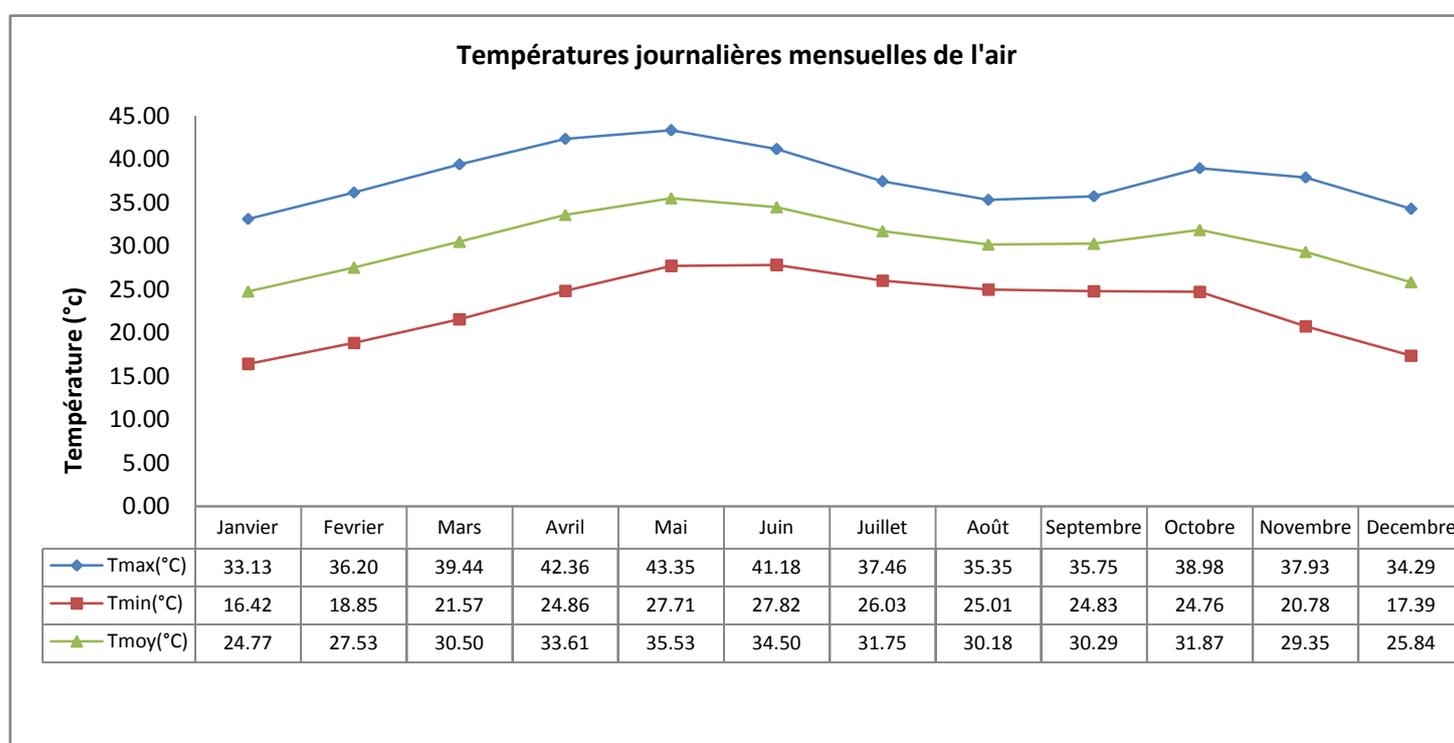


Figure 9 : Températures de l'air à la station de Matam pour la période 1981-2015

II.6.3 Humidité relative

L'humidité relative de l'air à la station de Matam pour la période comprise entre 1981 et 2015 (cf. la Figure 10) atteint un maximum de 86 à 88 % en août-septembre au cœur de la saison pluvieuse, les valeurs les plus faibles sont enregistrées entre mars et avril.

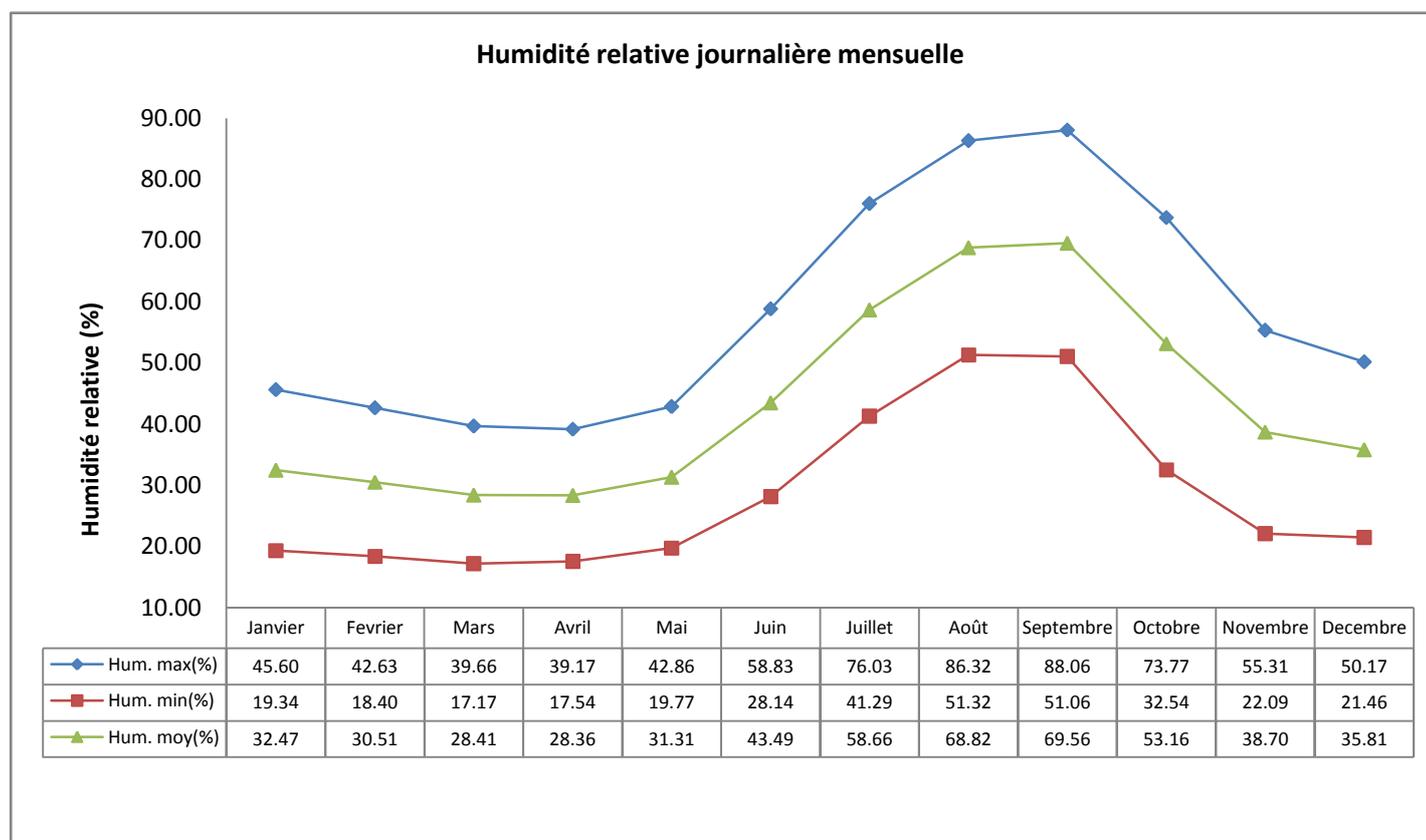


Figure 10: Humidité relative à la station de Matam pour la période 1981-2015

II.6.4 Direction et vitesse des vents

Les Figure 11 et Figure 12 suivantes illustrent la direction des vents et leurs vitesses moyennes à la station de Matam.

L'analyse de ces graphes montre que la direction des vents entre juin et octobre est généralement Ouest et Sud-ouest (81 % du temps) avec des vitesses moyennes décroissantes (en allant du maximum de 2.24 m/s au mois de juin pour atteindre 0.79 m/s en octobre). Il s'agit de la mousson, un vent chaud et humide soufflant pendant la saison des pluies. Entre novembre et mai, on constate une prédominance des vents de direction Nord à Sud-est, avec quelques nuances devant Nord-ouest. Il s'agit de l'alizé continental (appelé harmattan), un vent chaud et sec soufflant pendant la saison sèche avec des vitesses moyennes pouvant atteindre un maximum de 1.44 m/s en mai et un minimum de 1.05 m/s en novembre.

On note également la présence des vents de poussières, en particulier durant les mois de saison sèche.

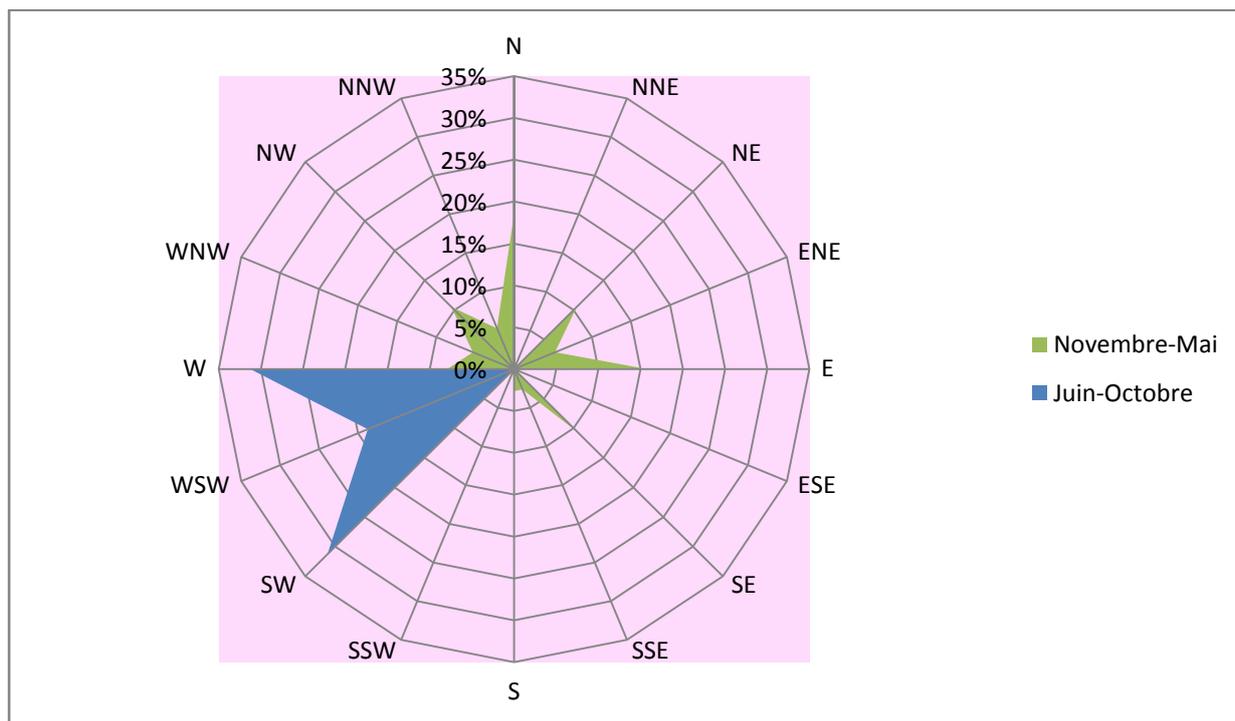


Figure 11: Direction des vents dominants à la station de Matam pour la période 1981-2015

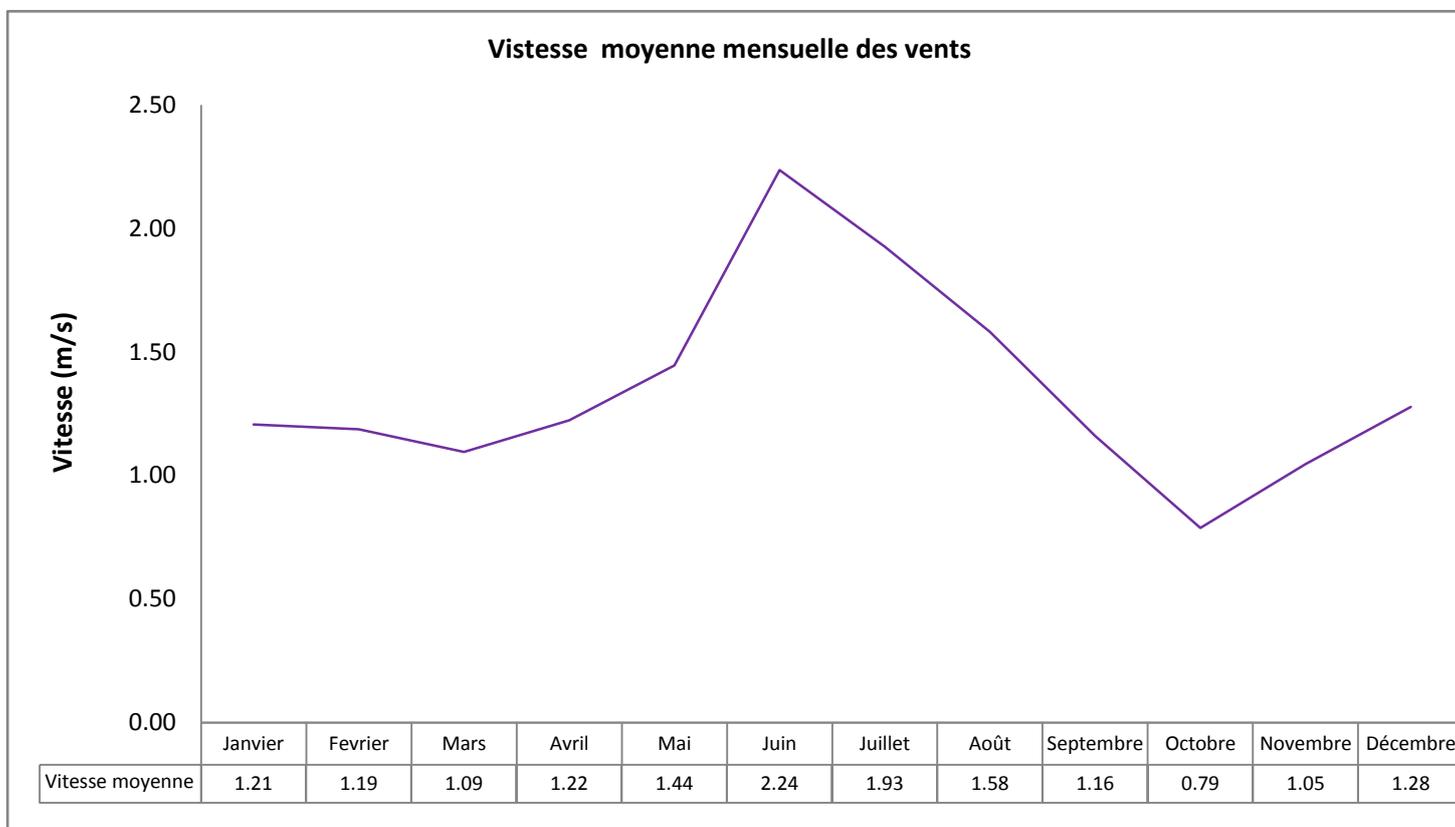


Figure 12 : Vitesses moyennes des vents à la station de Matam pour la période 1981-2015

II.6.5 Durée d'insolation

La zone d'étude est caractérisée par une insolation importante et présente toute l'année. La moyenne journalière annuelle (cf. la Figure 13) est de 7.85 heures pour la période 1981-2015. Soit une durée moyenne de l'insolation de près de 2865 heures par an, correspondant à 239 heures d'ensoleillement par mois. Avec des maxima de 263 heures en avril et des minima atteignant 222 heures en décembre.

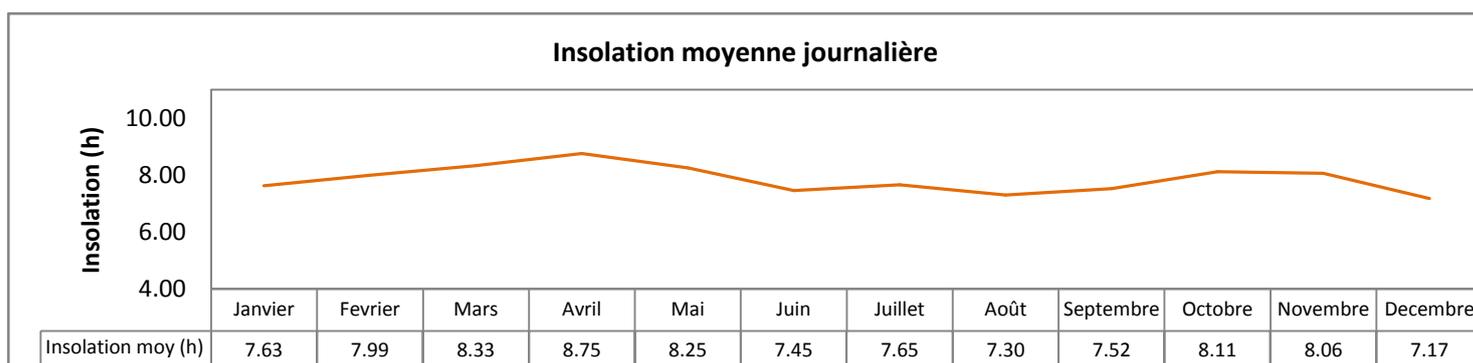


Figure 13 : Insolation moyenne journalière à la station de Matam pour la période 1981-2015

II.6.6 Evaporation

D'une manière générale, l'évaporation est minimale pendant la saison des pluies et maximale en saison sèche.

Pour la période 1981-2015, les valeurs mensuelles d'évaporation (cf. la Figure 14) dans la zone d'étude varient entre un minimum de 120 mm en septembre et un maximum de près de 342 mm en mai. L'évaporation annuelle moyenne est d'environ 2716 mm, soit le septuple des précipitations annuelles moyennes.

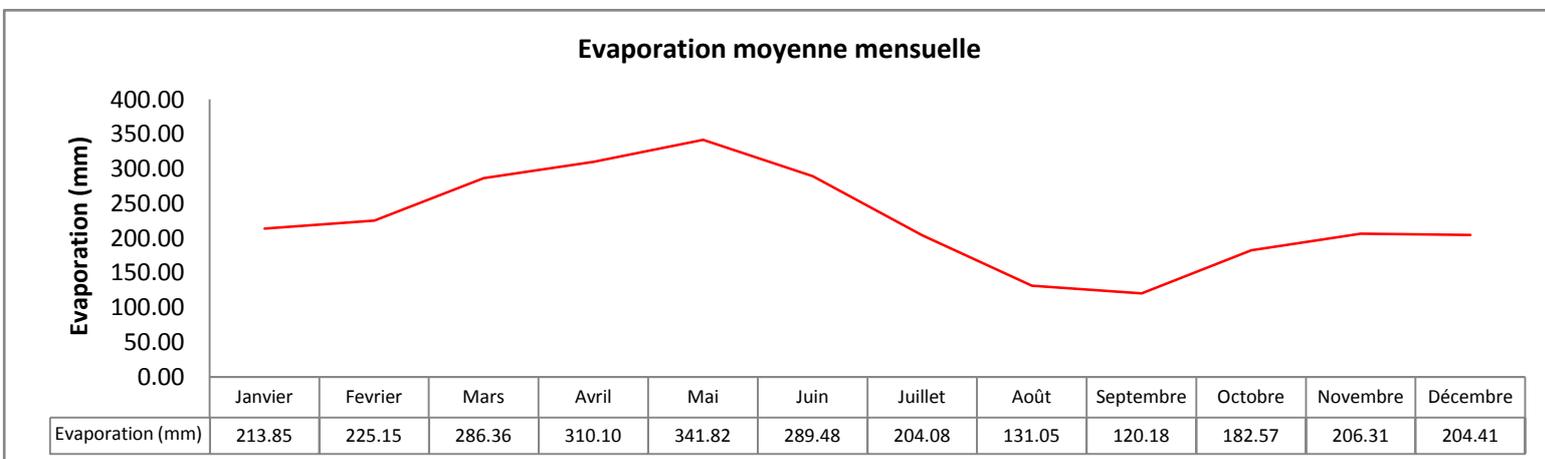


Figure 14 : Evaporation moyenne mensuelle à la station de Matam pour la période 1981-2015

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III. ETUDE DES CRUES

III.1 INTRODUCTION

Une crue est caractérisée par son hydrogramme, duquel on ne retient pour l'étude des ouvrages et/ou des aménagements que la valeur maximale correspondant au débit maximum instantané ou de pointe. L'objectif donc de ce chapitre est de définir les crues de projet sous le double aspect du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue.

La méthodologie employée pour obtenir les débits de crues de projet et les hydrogrammes est brièvement décrite dans les paragraphes suivants.

III.2 GENERALITES SUR LES METHODES USUELLES ET REGIONALES

D'une manière générale, plusieurs formules empiriques et méthodes existent pour l'estimation des crues. Les plus fréquemment utilisées en Afrique francophone de l'Ouest et du Centre sont les méthodes de l'ORSTOM, du CIEH et la Rationnelle.

Ces méthodes sont basées sur la transformation de pluies en débits et simples d'utilisation. Leurs limites dépendent essentiellement :

- de la taille du bassin versant. Elles sont adaptées ou appropriées pour les bassins versants de superficie en général allant de quelques hectares à des km² n'excédant pas :
 - 150 km², pour la méthode rationnelle ;
 - 200 km², pour la méthode de l'ORSTOM. Malgré la possibilité de l'utiliser pour des bassins de plus grande taille (jusqu'à 1500 km²) par découpage ;
 - 2500 Km² pour la méthode du CIEH.
- de la période de retour des crues à estimer. Bien qu'un coefficient majorateur permette de passer de la crue décennale à la centennale, les méthodes de l'ORSTOM et du CIEH sont plutôt des approches destinées à l'estimation des débits de crues d'occurrence décennale.
- de la pluviométrie annuelle de la zone d'étude.
- du problème de fiabilité des régressions multiples pour le cas de la méthode du CIEH (du fait de l'incertitude sur les paramètres relevés pour les bassins versants considérés) mais aussi d'un certain arbitraire vis-à-vis de la fixation de la perméabilité du bassin dans la méthode de l'ORSTOM.

Ainsi, eu égard à la taille du bassin versant du Dioulol (800 km² environ), aux limites des méthodes usuelles précitées et aussi à l'estimation des crues de fréquences rares, les méthodes usuelles de calcul des débits des crues présentées et expliquées ci-après ne sont données qu'à titre indicatif et ne seront pas utilisées pour la suite des études.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.2.1 Méthode rationnelle

Cette méthode très ancienne, est basée sur un modèle simple de transformation de la pluie, supposée uniforme et constante dans le temps, en un débit instantané maximal à l'exutoire. Elle est adaptée aux bassins versants dont la superficie n'excède pas 150 km². Elle fait intervenir la pente du bassin versant et la nature du couvert végétal.

La méthode rationnelle suppose donc que le débit de pointe de ruissellement ne peut être observé à l'exutoire d'un bassin versant que lorsque toute la superficie y contribue. Ceci est vrai si la durée de l'averse est uniforme, généralisée et au moins égale au temps de concentration T_c du bassin en question.

Si on admet que la période de retour du débit maximum déterminé est égale à celle de la pluie maximale au cours de la durée T_c, le débit de pointe pour une période de retour T s'énonce comme suit :

$$Q_t = \frac{C \cdot I(T, T_c) \cdot A}{3,6}$$

Où :

- Qt : Débit de pointe en m³/s pour la période de retour T ;
- I : Intensité de la pluie en mm/h;
- T : Période de retour (ans);
- T_c : Temps de concentration en min;
- A : Superficie du bassin versant en km² ;
- C : Coefficient de Ruissellement.

L'intensité est calculée par la formule de Montana qui s'exprime :

$$I = a \cdot T_c^{-b}$$

Les paramètres **a** et **b** de Montana sont des coefficients qui dépendent de la région et de la fréquence de la pluie.

Le coefficient de ruissellement **C** peut s'obtenir d'après la formule d'homogénéisation des coefficients de surfaces élémentaires relatifs aux différentes zones de chaque bassin versant :

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + \dots + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Où : $A_1, A_2 \dots A_n$: sont les surfaces élémentaires classifiées d'après la texture du sol et la topographie.

$C_1, C_2 \dots C_n$: sont les coefficients de ruissellement correspondants aux surfaces élémentaires. Leurs valeurs peuvent être tirées à partir du tableau suivant :

Coefficients de ruissellement C			
Topographie et Végétation	Texture du sol		
	Sablonneux	Argile et Silt	Argile Compacte
<u>BOISE</u>			
Plat Pente 0- 5%	0,10	0,30	0,40
Valonneux Pente 5- 10%	0,25	0,35	0,50
Montagneux Pente 10- 30%	0,30	0,50	0,60
<u>DEBOISE ET FRICHES</u>			
Plat Pente 0- 5%	0,10	0,30	0,40
Valonneux Pente 5- 10%	0,16	0,36	0,55
Montagneux Pente 10- 30%	0,22	0,42	0,60
<u>CULTURES DRAINEES</u>			
Plat Pente 0- 5%	0,30	0,50	0,60
Valonneux Pente 5- 10%	0,40	0,60	0,70
Montagneux Pente 10- 30%	0,52	0,72	0,82

III.2.2 Méthode de l'ORSTOM

Cette méthode dite de l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-mer, organisme aujourd'hui remplacé par l'IRD : Institut de Recherche pour le Développement), a été établie par J.Rodier et C.Auvray à partir d'un certain nombre de données provenant de près d'une soixantaine de petits bassins versants représentatifs et expérimentaux aménagés et équipés par l'ORSTOM en Afrique francophone ou d'expression française entre 1958 et 1965.

Comme pour presque toutes les méthodes de calcul de débit de pointe à partir des précipitations journalières d'une fréquence donnée, l'hypothèse de base admise pour cette méthode est que la crue décennale est engendrée par une averse décennale.

Il s'agit d'une méthode déterministe d'estimation des débits de crues décennaux applicable à des bassins versants de superficie inférieure à 200 Km², dans des zones de pluviométrie annuelle n'excédant pas 1700 mm. La limite de validité dépasse donc largement le domaine sahélien ou des zones semi-arides. Toutefois en ce qui concerne la superficie des bassins, on considère qu'au-delà de 200 km², il devient difficile et souvent impossible de déterminer la lame précipitée de fréquence décennale à partir de l'averse ponctuelle de même récurrence.

La méthodologie proposée pour l'estimation du débit de pointe de la crue décennale est résumée par la relation suivante :

$$Q_{10} = \frac{K * P_{10j} * Kr_{10} * S * \alpha}{T_b}$$

Où :

- Q_{10} : le débit de pointe de la crue décennale en m^3/s ;
- K : le rapport de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin, aussi appelé coefficient d'abattement ;
- P_{10j} : la pluie journalière décennale en mm ;
- Kr_{10} : le coefficient de ruissellement correspondant à la pluie décennale ;
- S : Superficie du bassin versant en km^2 ;
- α : le rapport du débit maximal sur le débit moyen pendant le temps de base, aussi appelé coefficient de pointe ;
- T_b : Temps de base en seconde.

La détermination des caractéristiques hydrologiques (Kr , T_b et T_m le temps de montée) se fait au moyen d'abaques en fonction de la superficie (S), de classes de perméabilité (P) et de relief (R).

Les valeurs du coefficient de pointe sont classées comme suit :

- **Valeurs du coefficient de pointe pour le climat sahélien et subdésertique**

Superficie du bassin versant (km^2)	2	10	25	50	100
Coefficient de pointe α	3	3	3	4.5	4

- **Valeurs du coefficient de pointe pour les bassins versants forestiers**

Relief du bassin versant	$S < 5 km^2$	$5 km^2 < S < 10 km^2$	$S > 10 km^2$
R2 (Plaine)	1.90	2.20	2.30
R2 (Montagne)	2	2.30	2.40

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.2.3 Méthode du CIEH

Il s'agit d'une méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale, établie à partir de 1983 par Puech et Chabi-Gonni du Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.).

Les deux auteurs ont réalisé une étude statistique à partir des débits des crues décennales estimées et des données hydrométriques de base sur 162 bassins versants du recueil de Dubreuil, couvrant des superficies de 0.07 km² à 2500 km² recevant des pluies annuelles comprises entre 95 et 2000 mm, jusqu'alors observés par l'ORSTOM.

Cette méthode statistique connue depuis sous le nom de « méthode CIEH » suppose que le Q₁₀ varie avec les autres variables comme une fonction de puissance du style :

$$Q_{10} = a * S^s * P_{anmoy}^p * I_g^i * K_{r10}^k * D_d \dots$$

Où :

a, s, p, i, k, d....sont des coefficients à déterminer;

Q₁₀ : débit de pointe de la crue décennale en m³/s ;

S : superficie du bassin versant en km² ;

P_{anmoy} : pluie annuelle moyenne en mm ;

I_g : indice global de pente en m/km ;

P_{10j} : la pluie journalière décennale en mm ;

K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal %. Kr décennal est fonction de la géologie et de la précipitation annuelle ;

D_d : Densité de drainage en km⁻¹.

Ainsi, à partir des observations sur la centaine de bassins versants, les auteurs ont obtenu par régressions linéaires multiples des relations donnant le débit maximum de la crue décennale en fonction d'un petit nombre de paramètres ou de caractéristiques qui expliquent le plus les débits décennaux de l'échantillon de départ. De ce principe, il y a lieu de distinguer deux cas :

- Cas où on ne connaît pas du tout le coefficient de ruissellement décennal ;
- Cas où on peut estimer le coefficient de ruissellement décennal à partir de la pluie annuelle et de la géologie du bassin.

Ces formules de régressions multiples sont synthétisées dans le tableau suivant.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Formules de régressions multiples proposées par la méthode CIEH

N° Formule	Description selon la zone climatique/région et en fonction des paramètres utilisés	Formules de régressions multiples
DECOUPAGE CLIMATIQUE		
F1	Zones de Pan : 0 - 400 mm et sans le coefficient de ruissellement : Avec S et I _g	$Q_{10} = 2.83 * S^{0.624} * I_g^{0.491}$
F2	Zones de Pan : 0 - 400 mm et avec le coefficient de ruissellement : Avec S et K _{r10}	$Q_{10} = 0.553 * S^{0.655} * K_{r10}^{0.802}$
DECOUPAGE POUR LA ZONE DE Pan < 1000 mm		
F3	Tous les bassins : Avec S et K _{r10}	$Q_{10} = 0.410 * S^{0.524} * K_{r10}^{0.982}$
F4	Tous les bassins : Avec S, I _g et K _{r10}	$Q_{10} = 0.095 * S^{0.643} * I_g^{0.406} * K_{r10}^{1.038}$
F5	Longitude < 10° Ouest (Seulement au Sénégal et en Mauritanie) : Avec S et I _g	$Q_{10} = 1.78 * S^{0.557} * I_g^{0.805}$
F6	Longitude < 10° Ouest (Seulement au Sénégal et en Mauritanie) : Avec S, P _{m10} et I _g	$Q_{10} = 55 * S^{0.462} * P_{m10}^{-0.652} * I_g^{0.667}$
F7	Longitude < 10° Ouest (Seulement au Sénégal et en Mauritanie) : Avec S, I _g et K _{r10}	$Q_{10} = 0.224 * S^{0.540} * I_g^{0.622} * K_{r10}^{0.767}$
F8	Longitude < 10° Ouest (Seulement au Sénégal et en Mauritanie) : Avec S et K _{r10}	$Q_{10} = 0.661 * S^{0.375} * K_{r10}^{0.910}$
DECOUPAGE PAR PAYS OU GROUPES DE PAYS		
F9	Sénégal et Mauritanie : Avec S et K _{r10}	$Q_{10} = 0.288 * S^{0.405} * K_{r10}^{1.117}$
F10	Sénégal et Mauritanie : Avec S, I _g et K _{r10}	$Q_{10} = 0.195 * S^{0.471} * I_g^{0.239} * K_{r10}^{1.046}$
AUTRE FORMULE TYPE DE REGRESSIONS		
F11	Afrique de l'Ouest : Avec S, I _g et K _{r10}	$Q_{10} = 0.163 * S^{0.628} * I_g^{0.26} * K_{r10}^{0.877}$

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.3 METHODOLOGIE ADOPTEE

La méthodologie adoptée pour la présente étude a consisté dans un premier temps à réaliser une analyse fréquentielle des précipitations extrêmes enregistrées à la station de Matam afin d'évaluer des quantiles de pluies pour différentes périodes de retour.

Ensuite une approche combinatoire basée sur les méthodes suivantes a été suivie pour déterminer les débits de crues au niveau du bassin pour différentes périodes de retour :

- Détermination des débits de crues courantes ou d'occurrence modérée (10 à 50 ans) par la méthode du NRCS : Détermination des ruissellements journaliers maximums et des débits journaliers maximums correspondants à partir des quantiles de pluies ;
- Détermination des débits de crues rares à extrêmes (d'occurrence > 50 ans) par la méthode hydro-pluviométrique probabiliste du Gradex à partir des quantiles de débits de crues courantes ainsi estimés et à partir de la dynamique des précipitations observées pour les périodes de retour considérées.

Enfin une application du modèle HEC-HMS au bassin versant a été effectuée par l'utilisation des pluies quantiles, en vue de simuler l'effet d'averses de périodes de retour différentes sur l'hydrogramme du débit et comparaison des valeurs des pics prévus par le modèle à celles obtenues par la méthode du GRADEX.

III.4 ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS MAXIMALES

III.4.1 Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières

Les pluies maximales journalières annuelles (P_{jmax}) enregistrées à la station de Matam pour la période 1981-2015 ont été ajustées suivant la loi de Gumbel. Cette loi s'adapte le mieux aux variables pluviométriques extrêmes.

La probabilité des valeurs de l'échantillon observé a été donnée par la formule de Hazen.

Ainsi l'ajustement statistique de cet échantillon à la loi de Gumbel a permis d'aboutir aux quantiles de pluies journalières pour différentes périodes de retour. Ces résultats sont illustrés dans le Tableau 5 et la Figure 15 suivants.

La pente de la droite d'ajustement (le paramètre d'échelle ou gradient de l'exponentielle « Gradex ») est estimée à 21, 83 mm. Elle présente une constance quelle que soit la période sur laquelle on prend la pluie maximale.

Ajustement des Pluies journalières maximales annuelles à la Station de Matam

AJUSTEMENT LOI DE GUMBEL (Méthode des moments)

Taille de l'échantillon = 35

Moyenne = 60.0 mm	Paramètre de position = 47,41
Ecart-type = 28.0 mm	Paramètre d'échelle = 21,83
Médiane = 55.4 mm	

Tableau 5 : Quantiles des pluies journalières maximales à la station de Matam

Période de retour T (ans)	Fréquence	Valeur XT (mm)	Ecart-type	I.C.
				95 %
2	0.50	55.40	4.34	46.9 - 63.9
5	0.80	80.20	7.31	65.8 - 94.5
10	0.90	96.50	9.88	77.2 - 116
20	0.95	112.00	12.50	87.8-137
50	0.98	133.00	15.90	101 -164
100	0.99	148.00	18.60	111 -184
1000	0.999	198.00	27.40	145 - 252

Ajustement des Pluies journalières max à la Station pluviométrique de Matam
Gumbel (Méthode des moments)

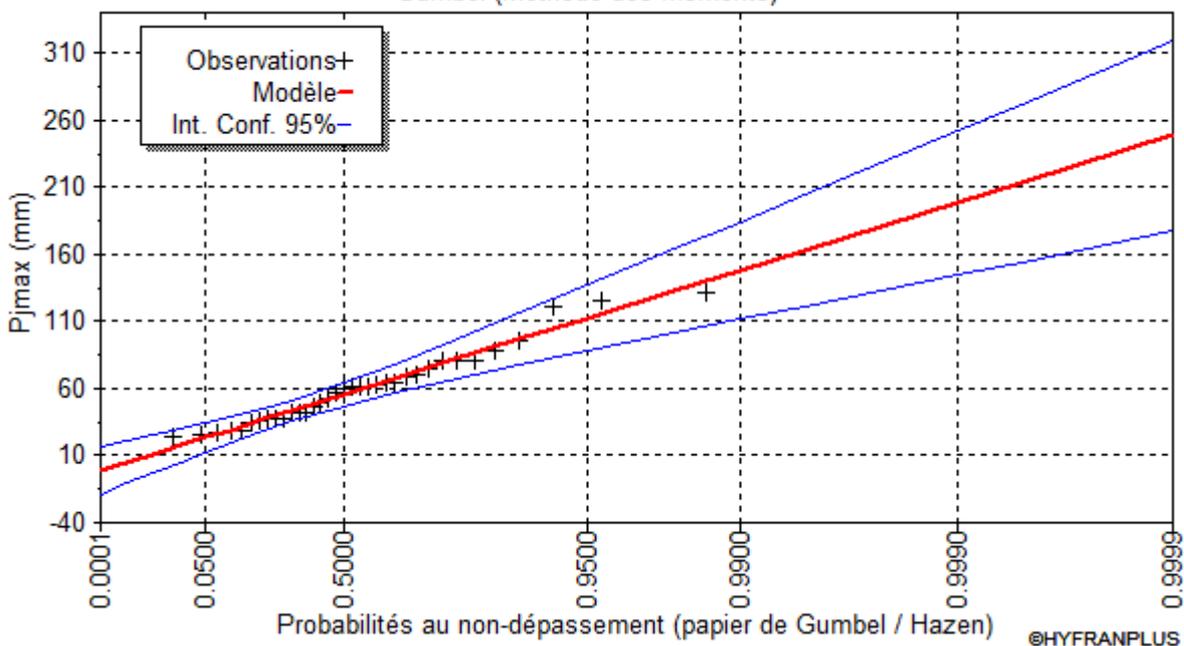


Figure 15 : Ajustement des pluies journalières maximales pour la période 1981-2015 à Matam

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.4.2 Estimation des quantiles de pluies maximales en 24 heures

Les valeurs de pluies journalières maximales estimées pour différentes périodes de retour et leur gradex correspondent à des valeurs journalières. Le passage aux pluies en 24 heures, se fera en procédant à la correction dite « correction de Weiss ». Cette méthode ou correction permet de corriger l'écart entre l'intensité de l'événement réel et la valeur enregistrée sur un pas de temps fixe. En effet un dispositif de mesure des pluies à pas de temps constant conduit à une sous-estimation systématique des intensités.

Pour les pluies de 24 heures, la correction de Weiss à apporter à la pluie sur un jour est :

$$P_{24h} = 1.14 * P_j$$

Les pluies maximales sur 24 heures sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Pluies maximales journalières maximales en 24 heures à la station de Matam

	Gradex	T 10 ans	T 20 ans	T 50 ans	T 100 ans	T 1000 ans
P_jmax (mm)	21,83	96,50	112,00	133,00	148,00	198,00
P₂₄max (mm)	24,95	110,30	128,02	152,02	169,16	226,31

III.4.3 Estimation du coefficient d'abattement spatial des pluies

Considérant que les quantiles de pluies calculés à la station de Matam ne seraient pas représentatifs des quantiles de la pluie spatiale sur l'ensemble du bassin du Dioulol et qu'un événement pluvieux ne se produit pas de manière homogène sur le bassin considéré, un abattement des pluies a été appliqué.

Plusieurs auteurs ont donné des formules ou une valeur à ce coefficient qui permet de passer d'une pluie ponctuelle à une pluie de bassin. Il dépend de la surface du bassin, de la fréquence, de la pluie et aussi de la répartition spatiale de la pluie.

Les expressions suivantes ont été utilisées pour estimer l'abattement :

1. J.P. Laborde : a proposé en 1986 les formules suivantes :

- Fréquence décennale, l'expression s'écrit de la forme :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{S}}{30 * \sqrt[3]{t}}}$$

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

- Fréquence rare, l'expression s'écrit de la forme :

$$K = 1 - \frac{\sqrt{S}}{36 * t^{0.42}}$$

Avec :

- ✓ **K** : coefficient d'abattement ;
- ✓ **S** : superficie du bassin versant en Km² ;
- ✓ **t** : Durée en heure (cf. Chapitre III.5 : Durées caractéristiques de crues).

2. J. Rodier et C. Auvray : donnent en 1965 une valeur de coefficient d'abattement valable pour la crue décennale, égale à 0.8 pour des bassins versants d'une superficie entre 150 et 200 km².

Les coefficients d'abattement estimés par les deux méthodes pour les fréquences décennales et rares sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 6. Coefficient d'abattement dans le bassin versant du Dioulol

Méthodes	Fréquence décennale		Fréquence rare		Valeurs moyennes pour toute fréquence	
	Dioulol	Wendou Bosséabé	Dioulol	Wendou Bosséabé	Dioulol	Wendou Bosséabé
Laborde	76%	85%	80%	88%	78%	81%
Rodier & Auvray	80%	80%	-	-	80%	80%
Moyenne	78%	83%	80%	88%	79%	81%

Les résultats restent proches et comparables pour les différentes fréquences. Ainsi nous retiendrons la valeur moyenne globale des coefficients estimés.

Un coefficient d'abattement égal à 0.8 est donc choisi pour le bassin versant du Dioulol et son sous-bassin Wendou Bosséabé.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.5 DUREES CARACTERISTIQUES DE CRUES

La durée caractéristique de crue (assimilée au concept du temps de concentration) peut se déterminer graphiquement si l'on dispose d'hydrogrammes de crues, ou alors de manière théorique en utilisant des formules empiriques.

En l'absence d'hydrogrammes observés dans la zone d'étude, nous allons utiliser les formules empiriques pour déterminer le temps de concentration.

L'évaluation de ce temps de concentration T_c (temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin versant jusqu'à son exutoire ou jusqu'au point de calcul) est basée sur l'hypothèse que les gouttes de pluie se déplacent perpendiculairement aux lignes de niveau. On l'assimile également à la durée de temps entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Ce facteur est en relation directe avec le temps de réponse d'un bassin versant, qui lui, reflète le décalage entre la pointe de l'hyétogramme de pluie et la pointe de l'hydrogramme de débit. Ainsi il s'avère très utile de le déterminer pour l'anticipation des crues.

Une variété de formules empiriques (où interviennent le plus souvent les paramètres géométriques et/ou l'état de surface du bassin versant) existent pour déterminer ce temps.

Le choix de la méthode appropriée, dépend donc de facteurs topographiques, pluviométriques et aussi de facteurs d'échelle, liés à la taille du bassin versant.

Les formules utilisées dans la présente étude sont présentées et expliquées ci-après :

- **Giandotti**

$$T_c = 60 * (4 * S^{0,5} + 1,5 * L) / (0,8 * H^{0,5})$$

T_c : en minute ; L : en km

S : en km² ; H : dénivelée en m

- **Turrazza & Passini**

$$T_c = 60 * 0,108 * (L * S)^{0,333} * I^{0,5}$$

T_c : en minute ; L : en km

S : en km², I : en m/m

- **Ventura**

$$T_c = 76,3 * (S/I)^{0,5}$$

T_c : en minute

S : en km²

I : en %

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

- **Kirpich**

$$T_c = L^{0,77} * I^{0,385} / 52$$

Tc : en minute

L : en m

I : en m/m

- **Formule Espagnole**

$$T_c = 18 * (L / 1000)^{0,77} * I^{0,1925}$$

Tc : en minute

L : en m

I : en m/m

- **Van Te Chow**

$$T_c = 60 * 0.123 * (L * I^{0,5} / 1000)^{0,64}$$

Tc : en minute

L : en m

I : en m/m

- **Formule Californienne**

$$T_c = 60 * 0.1452 * (L * I^{0,5} / 1000)^{0,77}$$

Tc : en minute

L : en m

I : en m/m

- **Formule de l'US Corps**

$$T_c = 16.682 * (L * I^{0,25} / 1000)^{0,77}$$

Tc : en minute

L : en m

I : en m/m

- **Formule SCS (NRCS)**

$$T_c(h) = 0.023 * \frac{L^{0.8}}{I^{0.5}} * \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}$$

- L : La longueur du plus long thalweg en m ;
- I : Pente moyenne du bassin en m/m ;
- CN (Curve Number) : Coefficient d'indexation des sols (cf. Chapitre III.6.1: Méthode NRCS).

Il est à noter qu'aucune de ces formules n'est à priori meilleure que les autres pour l'estimation du temps de concentration, et que seule une vérification ou étude régionale permettrait leur validation sur la base des données hydro-pluviométriques disponibles de la zone d'étude.

Les temps de concentration calculés par les différentes formules empiriques et convertis en heures, ainsi que le temps de réponse du bassin (estimé à 60 % du temps de concentration) sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Résultats du calcul du temps de concentration

		Valeurs au niveau du bassin versant	
		Dioulol	Wendou Bosséabé
Temps de concentration Tc [h]	Ventura	103.93	27.83
	Espagnole	29.13	11.75
	Van Te Chow	16.21	6.65
	Californienne	51.58	17.67
	US Corps	27.00	10.89
	Turrazza / Passini	119.99	31.35
	Kirpich	23.25	7.96
	Giandotti	29.85	12.52
	SCS	23.52	12.40
	Valeur retenue	24.83	10.36
Temps de réponse [h]		14.90	6.22

Les différentes méthodes de calcul donnent des résultats de temps de concentration divergents.

La valeur adoptée pour la présente étude correspond à la moyenne des valeurs de temps de concentration qui sont comparables et assez voisines, soient tous les autres résultats à l'exception de : Ventura, la californienne et Turrazza/Passini.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.6 ESTIMATIONS DES DEBITS DE CRUES

III.6.1 Détermination des débits de crues d'occurrence modérée (10 à 50 ans) par la méthode du NRCS

III-6-1-1 Rappel du principe de la méthode et conduite

La méthode hydrométéorologique NRCS dite SCS (Soil Conservation Service) autrefois et très employée en hydrologie, a été élaborée par l'United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservative Service (USDA-NRCS, anciennement USDA-SCS). Elle permet le passage ou la transformation des pluies en débits, en faisant intervenir directement l'état du sol.

Elle consiste à faire l'hypothèse qu'à un instant t donné, le rapport entre l'infiltration cumulée jusqu'à l'instant t et l'infiltration potentielle en début d'épisode est égal au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée.

La pluie nette ou ruissellement R_0 est calculée à partir des formules classiques suivantes :

$$R_0 = \frac{(P - I)^2}{P + 4I} \quad \text{Avec : } I = 5.08 \left(\left(\frac{1000}{Cn} \right) - 10 \right)$$

Où : R_0 = Pluie nette (mm) ;

P = Pluie brute (mm) ;

I = Infiltration (mm) ;

CN (Curve Number) = Coefficient d'indexation des sols (adimensionnel).

Le CN est un nombre donné à un type de sol et qui permet d'estimer les précipitations cumulées en fonction de sa couverture et de son humidité initiale, caractérisant donc son aptitude au ruissellement. Il se détermine en fonction de la nature du sol (groupe hydrologique et occupation du sol de la surface contributive) et de l'antécédent pluviométrique, habituellement à partir des tables du NRCS ou à partir des cartes topographiques et géologiques ou pédologiques et de l'inspection de terrain. Il s'agit d'un paramètre extrêmement sensible et il convient donc de le choisir avec soin. Toutefois ces valeurs ayant été déterminées sur le territoire américain, il est possible qu'elles ne soient pas toujours adaptées aux conditions africaines.

Par ailleurs à titre indicatif on notera que, CN = 0 correspond à un terrain parfaitement perméable tandis que CN = 100 est associé à un terrain complètement imperméable.

Pour évaluer les pertes et l'humidité initiale dans le cadre de la présente étude, la carte pédologique et la carte d'occupation des sols dans le bassin du Dioulol, extraites de la base de données spatiales de la FAO y afférente, ont été utilisées pour générer la grille du CN.

Cette grille générée pour le bassin du Dioulol est présentée dans la Figure 16 ci-après.

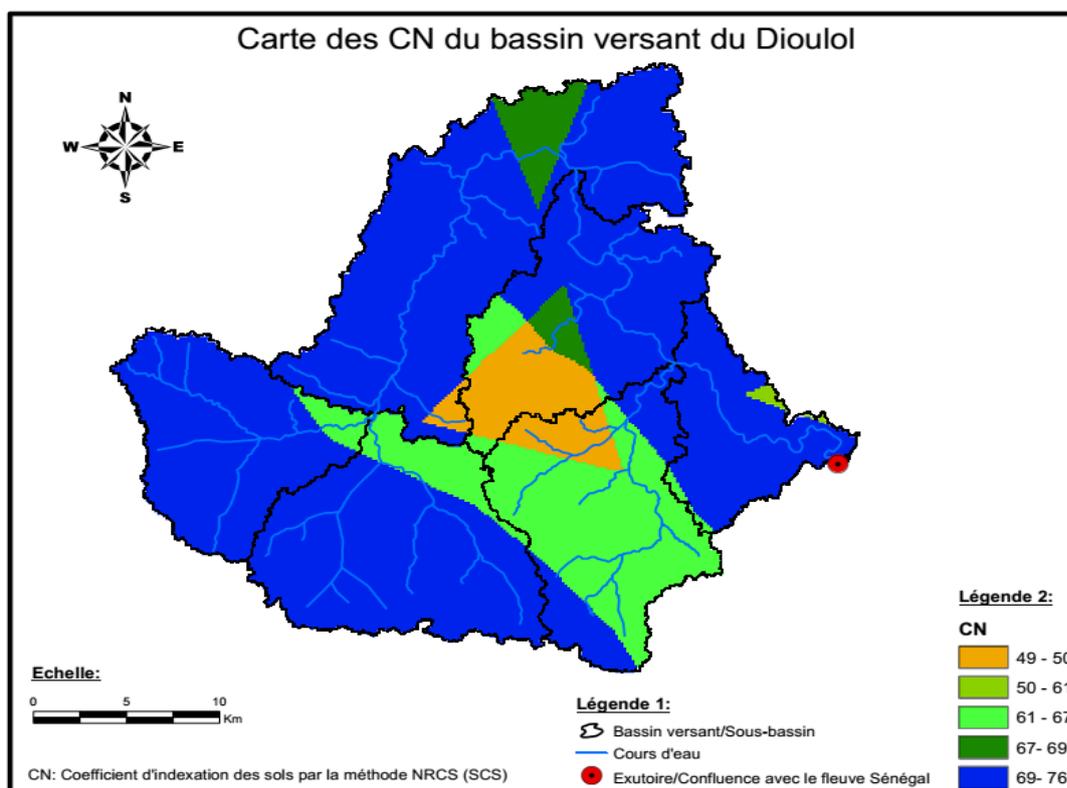


Figure 16 : Carte des CN du bassin versant du Dioulol

III-6-1-2 Résultats obtenus

Les résultats du calcul des ruissellements journaliers maximums (R0j) et des débits journaliers maximums moyens (Qjmax) correspondants dans les bassins versants du Dioulol et du Wendou Bosséabé sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Estimation des crues d'occurrence modérée par la méthode du NRCS

Période de retour T de retour	Pluie max journalière de 24h P24hmax	Pluie max journalière de 24h abattue P24hmax *0.8	Dioulol				Wendou Bosséabé			
			CN composite	la	R0j	Qjmax	CN composite	la	R0j	Qjmax
			-	[mm/j]	[mm/j]	[m³/s]	-	[mm/j]	[mm/j]	[m³/s]
2	63.32	50.51	72.00	19.76	7.30	66.94	67.00	25.02	4.31	6.62
5	91.67	73.12	72.00	19.76	18.72	171.61	67.00	25.02	13.36	20.50
10	110.30	87.98	72.00	19.76	27.87	255.54	67.00	25.02	21.08	32.34
20	128.02	102.11	72.00	19.76	37.44	343.32	67.00	25.02	29.39	45.11
50	152.02	121.25	72.00	19.76	51.44	471.65	67.00	25.02	41.84	64.21

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III.6.2 Détermination des débits de crues d'occurrence rare (> 50 ans) par la méthode du GRADEX

III-6-2-1 Rappel du principe de la Méthode du GRADEX

La méthode du Gradex est une approche hydro-pluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues rares à extrêmes d'un cours d'eau, pour des événements de durée de retour située entre 100 et 10 000 ans. Elle a été développée par P.Guillot et D.Duband de la Division Technique Générale de l'EDF pour la sécurité des grands barrages.

Elle est basée sur le principe, selon lequel l'extrapolation de la courbe des débits vers les fortes valeurs correspondant aux faibles probabilités ne peut se faire raisonnablement que de façon parallèle à la courbe des précipitations, puisqu'il ne peut pas ruisseler plus d'eau qu'il n'en tombe et que la rétention du sol est limitée. Cette méthode admet les principes suivants :

- Les précipitations journalières s'ajustent par des lois à comportement exponentiel simple. Donc, les valeurs maximales mensuelles ou annuelles des précipitations s'ajustent au moins dans les valeurs fortes par la loi de Gumbel.
- Au-delà de la crue charnière, l'extrapolation de la loi des débits la plus raisonnable consiste à porter une parallèle à la loi des précipitations.
- La loi des débits instantanés est obtenue par une affinité faite sur la loi des débits journaliers.

Autrement dit, le passage du débit journalier se fera via un coefficient de pointe. Le choix de ce coefficient dépendra soit de l'analyse des débits maximums instantanés et des débits journaliers maximums disponibles au niveau de la station considérée, ou le cas échéant par son calcul par d'autres formules expérimentales.

III-6-2-2 Démarche adoptée

L'ajustement des précipitations selon la loi de Gumbel étant fait, le gradex correspondant à une durée de pluie de 24 heures pour l'ensemble du bassin et les crues courantes estimés, la méthode du Gradex pour déterminer les débits théoriques d'occurrence rare a été mise en œuvre selon la démarche suivante :

1- Détermination du point pivot :

La saturation des bassins versants se produit pour des périodes de retour généralement comprises entre 10 et 50 ans.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Toutefois, en l'absence de données horaires et de représentation d'ajustement sur des observations, nous déterminerons le débit seuil de façon conservative (c'est-à dire en retenant l'hypothèse de base énoncée par P.Guillot et D.Duband) : le point pivot est considéré être le débit décennal.

2- Extrapolation :

A partir du débit journalier maximum moyen Q_{jmax} (T) converti en lame écoulée (mm/24h) ou ruissellement R_{0j} (T) pivot et du gradex des pluies de 24 heures sur l'ensemble du bassin, on estime les Q_{jmax} (T) pour des périodes de retour supérieures à la période de retour charnière (décennale).

3- Calcul des débits de pointe :

Calculer les débits de pointe Q_p (T) en considérant un coefficient de pointe. En effet, en appliquant la loi d'ajustement extrapolée des débits pour les temps de retour au-delà de la crue charnière et en faisant la conversion adéquate pour avoir des valeurs en m^3/s , on obtient des valeurs de débits moyens journaliers. Il faut donc utiliser un coefficient de pointe pour passer aux débits de pointe.

Le coefficient de pointe C_p correspond au rapport du débit de pointe (Q_p) au débit journalier maximum moyen (Q_{jmax}). Les données hydrométriques observées étant absentes, nous l'avons estimé à partir de la valeur recommandée par la méthode ORSTOM pour les bassins versants de type sahélien et celle donnée par la formule de FULLER qui exprime une relation expérimentale entre le coefficient de pointe et la superficie du bassin versant. Le tableau suivant présente les valeurs estimées du C_p .

Tableau 9 : Estimation du coefficient de pointe C_p

Bassin versant	Estimation du Coefficient de pointe C_p		
	Formule FULLER $C_p = 1 + (2.66/S)^{0.3}$	Méthode ORSTOM pour un grand bassin de type sahélien	Moyenne
Dioulol	1.18	4	2.59
Wendou Bosséabé	1.31	4	2.65

Un coefficient de pointe moyen global égal à 2.62 est donc retenu pour le bassin versant du Dioulol et son sous-bassin Wendou Bosséabé.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

III-6-2-3 Résultats obtenus

La synthèse de l'étude de la variable « pluie », les coefficients de la droite d'extrapolation des débits et les résultats du calcul des débits de crues rares à extrêmes déterminés par la méthode du Gradex pour les bassins du Dioulol et le Wendou Bosséabé sont présentés et illustrés dans les tableaux et figures ci-après.

Tableau 10 : Gradex et quantiles des pluies estimés

	Gradex des pluies	Pluies				
		T =10 ans	T =20 ans	T =50 ans	T =100 ans	T =1000 ans
P _j max (mm/j)	21.83	96.50	112.00	133.00	148.00	198.00
P ₂₄ max (mm/24h)	24.95	110.30	128.02	152.02	169.16	226.31
P ₂₄ max*0.8 (mm/24h)	19.90	87.98	102.11	121.25	134.93	180.51

Tableau 11 : Coefficients a et b de la droite d'extrapolation des débits

	b (mm/24h)	a (mm/24h)
Dioulol	19.90	-16.91
Wendou Bosséabé	19.90	-15.39

Tableau 12 : Résultats du calcul des débits de crues par la méthode du Gradex

Période de retour	Dioulol				Wendou Bosséabé			
	Débits moyens (Qjmax)			Débits de pointe Qp	Débits moyens (Qjmax)			Débits de pointe Qp
	estimés	extrapolés			estimés	extrapolés		
T (ans)	mm/24h	mm/24h	m ³ /s	m ³ /s	mm/24h	mm/24h	m ³ /s	m ³ /s
10	27.87	27.87	255.54	670.20	29.39	29.39	45.11	118.30
20	37.44	42.19	386.87	1 014.63	41.84	43.71	67.09	175.95
50	51.44	60.73	556.87	1 460.46	51.40	62.25	95.54	250.57
100	-	74.62	684.25	1 794.55	-	76.14	116.86	306.49
1000	-	120.53	1105.18	2 898.49	-	122.05	187.31	491.26

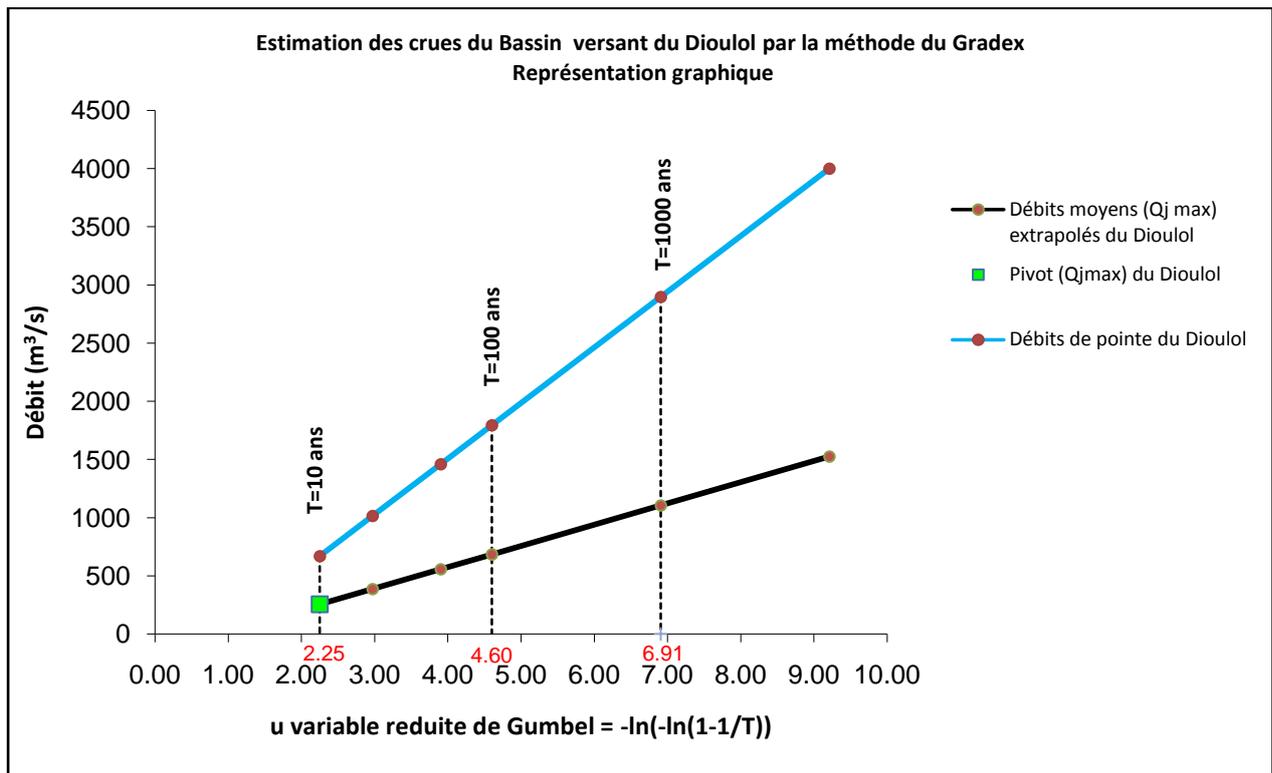


Figure 17 : Représentation graphique de la méthode du Gradex pour le bassin versant du Dioulol

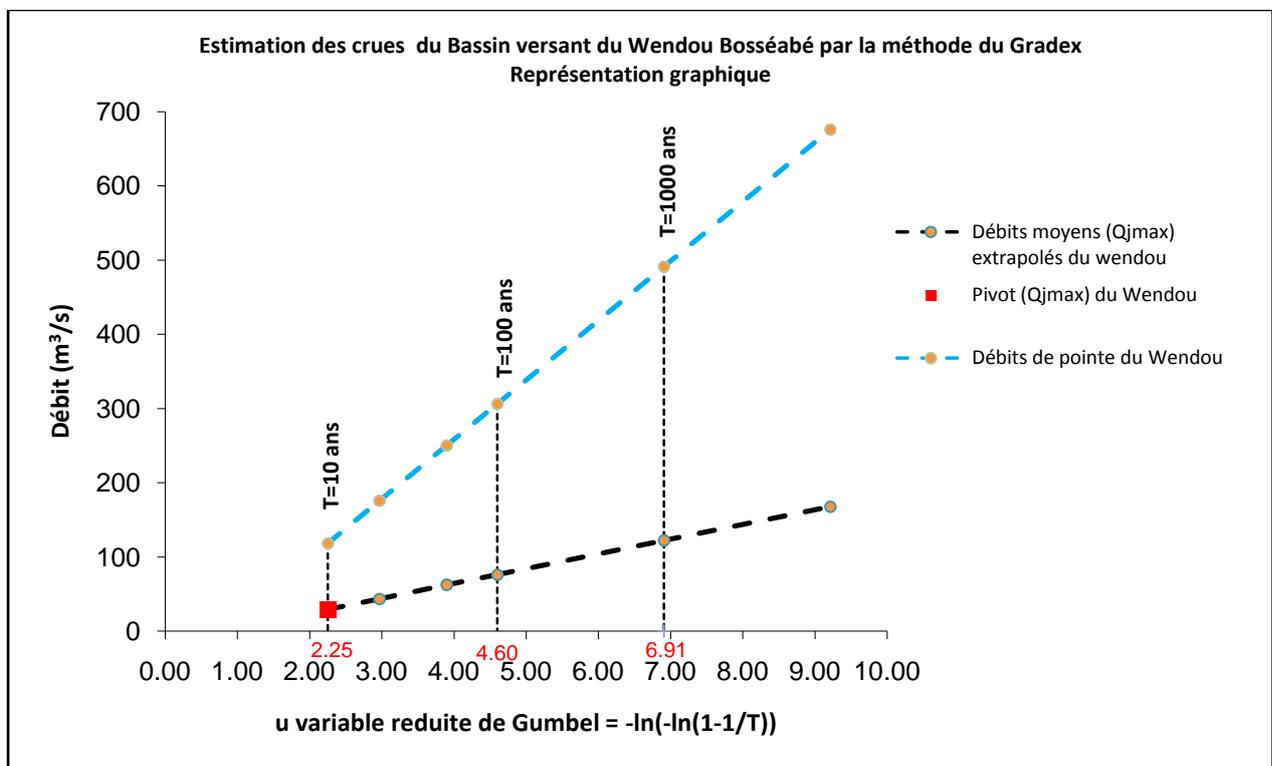


Figure 18 : Représentation graphique de la méthode du Gradex pour le bassin versant du Wendou

III.6.3 Application du modèle HEC-HMS au bassin versant du Dioulol

III-6-3-1 Description de la méthode

Dans cette partie, nous avons essayé d'estimer les débits de pointe des crues et/ou de prédire la réponse du bassin à un scénario de changement climatique par l'utilisation des pluies quantiles dans la plate-forme de modélisation HEC-HMS.

En effet le choix s'est porté sur cet outil HEC-HMS car il convient d'une part aux terrains de faible pente en général tel que le cas du bassin du Dioulol et d'autre part à l'étude de réponse hydrologique simple.

La figure suivante présente le modèle HEC-HMS construit du bassin du Dioulol.

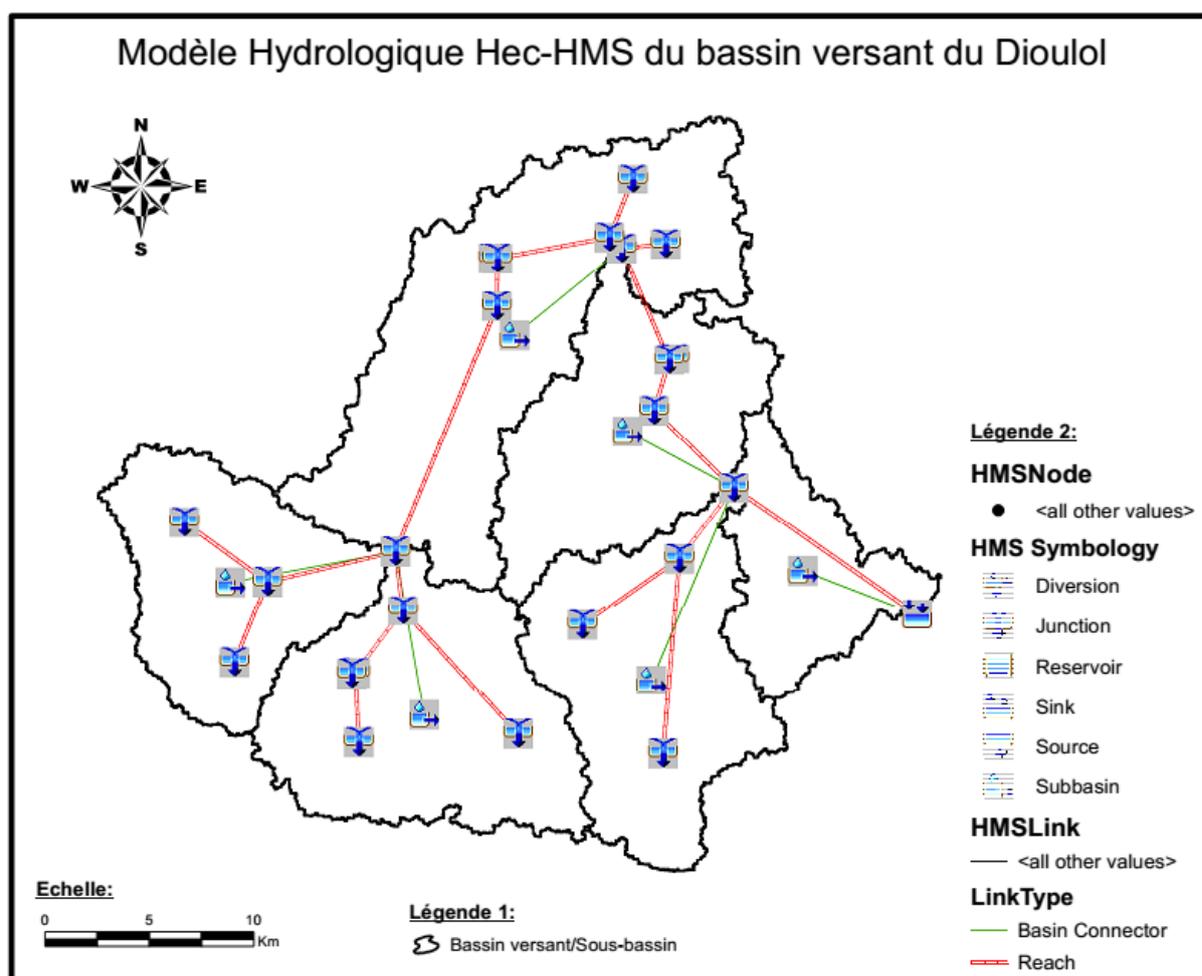


Figure 19 : Modèle HEC-HMS du bassin versant du Dioulol

III-6-3-2 Données d'entrée

Les données d'entrée principales dans le modèle sont les suivantes :

1. Paramètres d'entrée :

Le tableau suivant présente les paramètres d'entrée dans le modèle Hec-HMS sur les bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé.

Tableau 13 : Paramètres utilisés pour le modèle Hec-HMS sur le bassin

Bassin versant	Fonction de production		Fonction de transfert	% d'imperméable
	CN	la [mm]	Lag Time ou temps de réponse [mm]	
Dioulol	72	19.76	893.75	5
Wendou Bosséabé	67	25.02	383.51	5

La méthode du NRCS (SCS) a été retenue pour les fonctions de production et de transfert dans le modèle. En effet cette méthode, nécessite moins de paramètres d'entrée et offre l'avantage de se fonder sur une description objective et relativement simple du bassin versant en termes d'aptitude au ruissellement de crues.

2. Pluies :

Afin d'estimer les débits de pointe de crues à l'exutoire du bassin versant pour différentes périodes de retour, nous avons utilisé les quantiles de pluies journalières issus de l'ajustement statistique à la loi de Gumbel des pluies journalières maximales annuelles à la station de Matam, corrigées et abattues au bassin du Dioulol. Ainsi nous avons remplacé les pluies journalières maximales par les hauteurs estimées par la loi statistique.

Le tableau suivant résume les valeurs des pluies quantiles utilisées dans les simulations.

Tableau 14 : Hauteurs de pluies au bassin du Dioulol pour différentes périodes de retour

	T =10 ans	T =20 ans	T =50 ans	T =100 ans	T =1000 ans
P ₂₄ max*0.8 (mm/24h)	87.98	102.11	121.25	134.93	180.51

III-6-3-3 Résultats de la simulation hydrologique

Les résultats résumés dans le tableau suivant présentent les valeurs prévues par le modèle HEC-HMS aux bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé en termes du pic de l'hydrogramme et du volume du ruissellement.

Tableau 15 : Valeurs du débit de pointe et du volume de ruissellement prévues par le modèle Hec-HMS

		T = 10 ans	T = 20 ans	T = 50 ans	T = 100 ans	T = 1000 ans
Dioulol	Q _p (m ³ /s)	242.20	329.60	458.20	555.70	902.80
	V (Mm ³)	4.97	6.98	10.12	12.62	22.09
Wendou Bosséabé	Q _p (m ³ /s)	52.50	70.50	96.40	115.80	183.50
	V (Mm ³)	1.36	1.92	2.78	3.47	6.04

III.7 DEBITS DE CRUES RETENUS

Les résultats issus des différentes méthodes de calculs des débits de pointe de crues sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Synthèse des débits de pointe calculés par la méthode du Gradex et la simulation

		Débits des crues [m ³ /s] pour différentes périodes de retour				
		Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀	Q ₁₀₀₀
Dioulol	Gradex	670.20	1 014.63	1 460.46	1 794.55	2 898.49
	HEC-HMS	242.20	329.60	458.20	555.70	902.80
Wendou Bosséabé	Gradex	118.30	175.95	250.57	306.49	491.26
	HEC-HMS	52.50	70.50	96.40	115.80	183.50

L'analyse de ces résultats montre des différences très notables (pour toutes les fréquences) entre les débits de pointe obtenus par la simulation HEC-HMS et ceux estimés par la méthode du Gradex. Cette dernière est particulièrement adaptée aux crues extrêmes et a donc tendance parfois à surestimer les débits lorsqu'on l'applique aux crues seulement modérées ou rares.

En revanche, l'absence de données de débits réellement observés dans la zone d'étude n'a pas permis d'effectuer le calage du modèle pluie-débit obtenu (qui se serait effectué à l'aide des algorithmes d'optimisation du logiciel Hec-HMS).

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Ainsi nous retiendrons les débits de pointe calculés par la méthode du Gradex, basés sur l'estimation des crues courantes par la méthode du NRCS.

Le tableau suivant récapitule les valeurs de débits de crues maximales retenues pour chaque période de retour.

Tableau 17 : Quantiles de débits de crues retenus aux bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé

		Crues retenues				
		T=10 ans	T=20ans	T=50ans	T=100ans	T=1000ans
Débits de pointe Qp retenus [m ³ /s]	Dioulol	670.20	1 014.63	1 460.46	1 794.55	2 898.49
	Wendou Bosséabé	118.30	175.95	250.57	306.49	491.26

III.8 HYDROGRAMMES DE CRUES

L'élaboration des hydrogrammes de crues repose, au delà de l'évaluation du débit de pointe, sur le choix des différents temps caractéristiques, notamment les temps de montée de la crue, de concentration et de base.

L'hydrogramme type pour les crues d'un cours d'eau s'obtient, en rendant adimensionnelles les crues les plus représentatives inventoriées par leurs temps de pointe et débit de pointe. Puis afin de choisir la forme ou le type qui représente le mieux la forme des crues du bassin considéré, on les superpose aux hydrogrammes types.

Cependant, en l'absence de toute mesure instantanée des débits sur le bassin versant objet de la présente étude, l'IC a procédé à l'établissement des hydrogrammes de crues pour le bassin du Dioulol en adoptant la forme de l'hydrogramme type du NRCS (USSCS).

Il s'agit d'un hydrogramme type adimensionnel avec comme données entrées le temps de montée et le débit de pointe. Il implique un temps de concentration et un coefficient de pointe constant.

Le tableau suivant donne la tabulation de la forme adimensionnelle de l'hydrogramme de l'USSCS.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Tableau 18 : Table de l'hydrogramme adimensionnel de l'USSCS

t/tp	q/qp	t/tp	q/qp
0.0	0.000	2.5	0.155
0.1	0.015	2.6	0.130
0.2	0.075	2.7	0.114
0.3	0.160	2.8	0.098
0.4	0.280	2.9	0.087
0.5	0.430	3	0.075
0.6	0.600	3.1	0.067
0.7	0.770	3.2	0.059
0.8	0.890	3.3	0.052
0.9	0.970	3.4	0.044
1.0	1.000	3.5	0.036
1.1	0.980	3.6	0.032
1.2	0.920	3.7	0.029
1.3	0.840	3.8	0.025
1.4	0.750	3.9	0.022
1.5	0.660	4	0.018
1.6	0.560	4.1	0.016
1.7	0.490	4.2	0.014
1.8	0.420	4.3	0.013
1.9	0.370	4.4	0.011
2.0	0.320	4.5	0.009
2.0	0.320	4.6	0.008
2.1	0.280	4.7	0.007
2.2	0.240	4.8	0.006
2.3	0.210	4.9	0.005
2.4	0.180	5	0.004

Le temps de montée T_p de l'hydrogramme est calculé par la formule suivante :

$$T_p = 0.5D + 0.6T_c$$

Avec :

- D : la durée de pluie excédentaire (en heures) estimée par la formule :

$$D = 2 * \sqrt{t_c}$$

- T_c = temps de concentration (cf. le Tableau 7).

Les hydrogrammes de crues résultants du type USSCS adopté pour les bassins du Dioulol et le Wendou Bosséabé sont illustrés dans les Figure 21 et Figure 21.

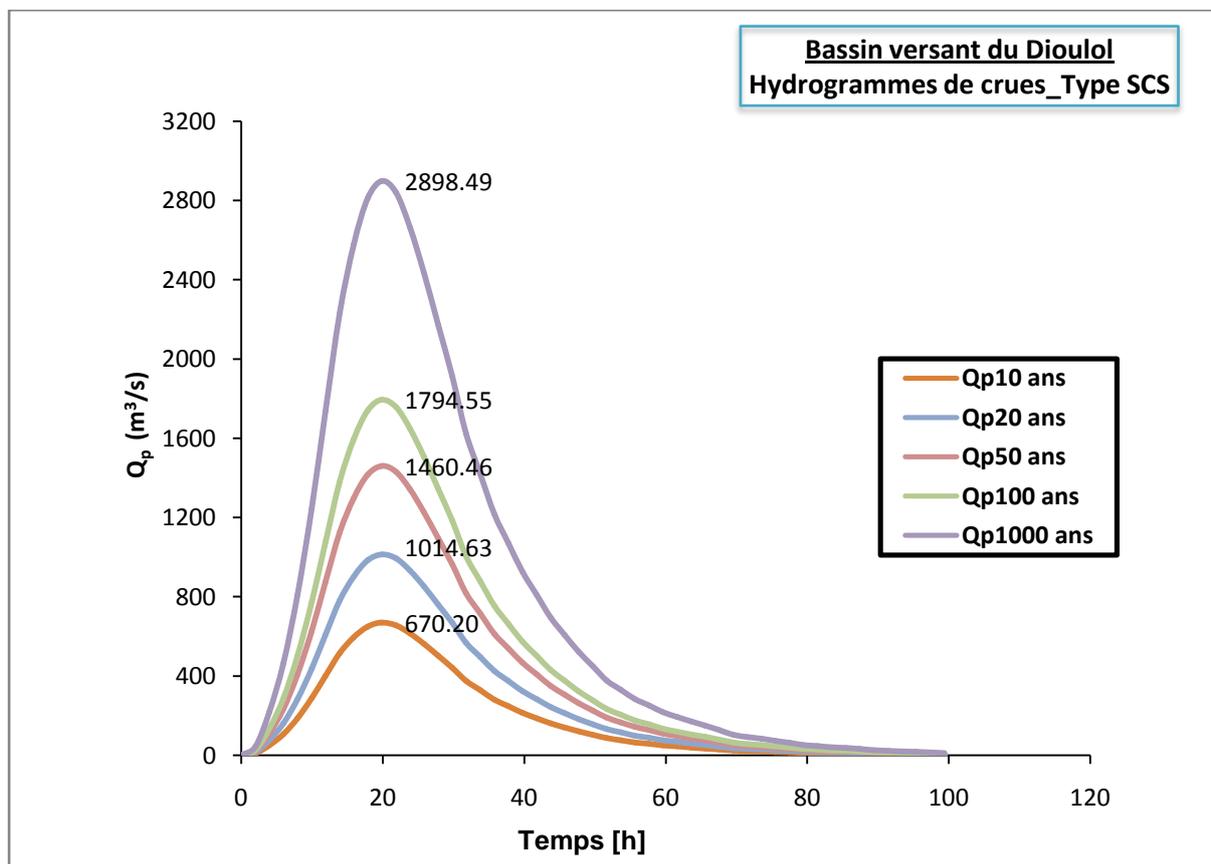


Figure 20 : Hydrogrammes de crues au bassin versant du Dioulol

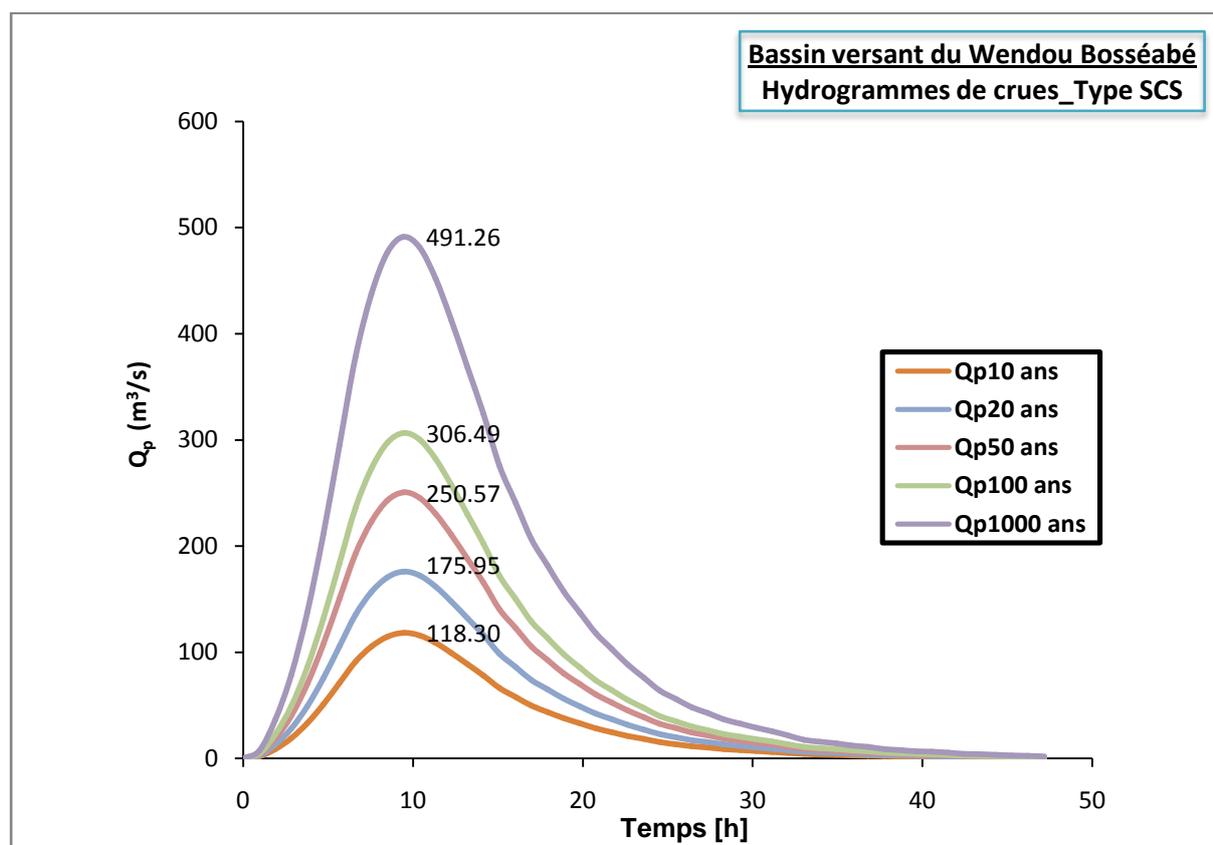


Figure 21 : Hydrogrammes de crues au bassin versant du Wendou Bosséabé

Les caractéristiques des crues de projet déterminées pour les deux bassins sont synthétisées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Caractéristiques des hydrogrammes de crues aux bassins du Dioulol et du Wendou

Bassin	Période de retour T (ans)	Qp (m³/s)	Tc (h)	D (h)	Tp (h)	Volume total de l'hydrogramme (Mm³)
Dioulol	T10	670.20				64.96
	T20	1014.63				98.34
	T50	1460.46	24.83	9.96	19.88	141.55
	T100	1794.55				173.94
	T1000	2898.49				280.93
Wendou Bosséabé	T10	118.30				5.44
	T20	175.95				8.10
	T50	250.57	10.36	6.43	9.44	11.53
	T100	306.49				14.10
	T1000	491.26				22.60

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

IV. ETUDE DES APPORTS EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT

Le but de la présente partie est de générer une longue série d'apports annuels au bassin versant du Dioulol.

IV.1 GENERALITES SUR LES METHODES PLUS CONNUES ET FREQUEMMENT UTILISEES EN AFRIQUE DE L'OUEST

De manière générale, quatre (04) méthodes aux caractéristiques et approches très différentes sont les plus connues et les plus fréquemment employées en Afrique francophone de l'Ouest et du Centre, à savoir :

1. La méthode Rodier :

La méthode RODIER, élaborée dans les années 1970, consiste à identifier, dans un catalogue de bassin-type, celui ou ceux ayant les caractéristiques les plus voisines du bassin étudié pour estimer ainsi l'écoulement annuel de ce dernier. La zone étudiée par RODIER est limitée au nord par le 22ème parallèle, de sorte que la partie du Sahara qui y est incluse reste largement sous l'influence de la mousson. Au sud, la délimitation correspond sensiblement à une hauteur pluviométrique annuelle de 1000 mm.

2. Le modèle Girard :

C'est un modèle hydrologique simple, développé par GIRARD (1975) et mis au point sur des bassins ne dépassant pas 150 km². Ce modèle est valable dans les zones où l'écoulement se produit principalement sous la forme de ruissellement et son emploi est donc limité aux zones de précipitation annuelle inférieure à 750 à 850 mm.

3. La méthode Dubreuil-Vuillaume :

Mise au point en 1975, cette méthode consiste à déterminer l'écoulement moyen annuel des bassins versants non jaugés à partir de leurs caractéristiques physiques et climatiques. Elle est applicable entre les isohyètes de 400 et 4 200 mm.

4. La méthode basée sur le bilan d'eau des retenues :

Sur la base de relevés de niveau d'eau dans les retenues existantes, cette méthode consiste à établir le bilan hydrologique de ces retenues et à en tirer des informations quantitatives concernant les volumes d'écoulement dans les bassins versants.

IV.2 APPROCHE ADOPTEE

Les séries d'apports en eau aux bassins du Dioulol et du Wendou Bosséabé ont été estimées à partir des données pluviométriques de la station de Matam après application de l'abattement, suivant la méthode du NRCS (SCS) déjà décrite dans le Chapitre III.6.1.

L'IC a d'abord procédé au calcul des pluies efficaces à partir de la série des pluies mensuelles du poste de Matam en utilisant le coefficient d'indexation des sols (**CN**) relatif à chaque bassin et la valeur des pertes initiales avant le début du ruissellement (**Ia**) correspondant.

Dans l'utilisation de la série de pluies mensuelles pour 35 années, les pluies mensuelles en dessous de la valeur **Ia** ont été éliminées, ce qui permet de déterminer la matrice de forme des pluies efficaces mensuelles pour la même période (cf. **Annexe 3**).

La pluie efficace correspond à un volume d'écoulement $V_e = P_e * S$, où est S la superficie du bassin versant.

IV.3 RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE

Les résultats de l'estimation des apports en eau mensuels et annuels en million de mètre cubes au bassin versant du Dioulol sont illustrés et présentés respectivement dans la Figure 22, le Tableau 20 et les Figure 23 et Figure 24 ci-après.

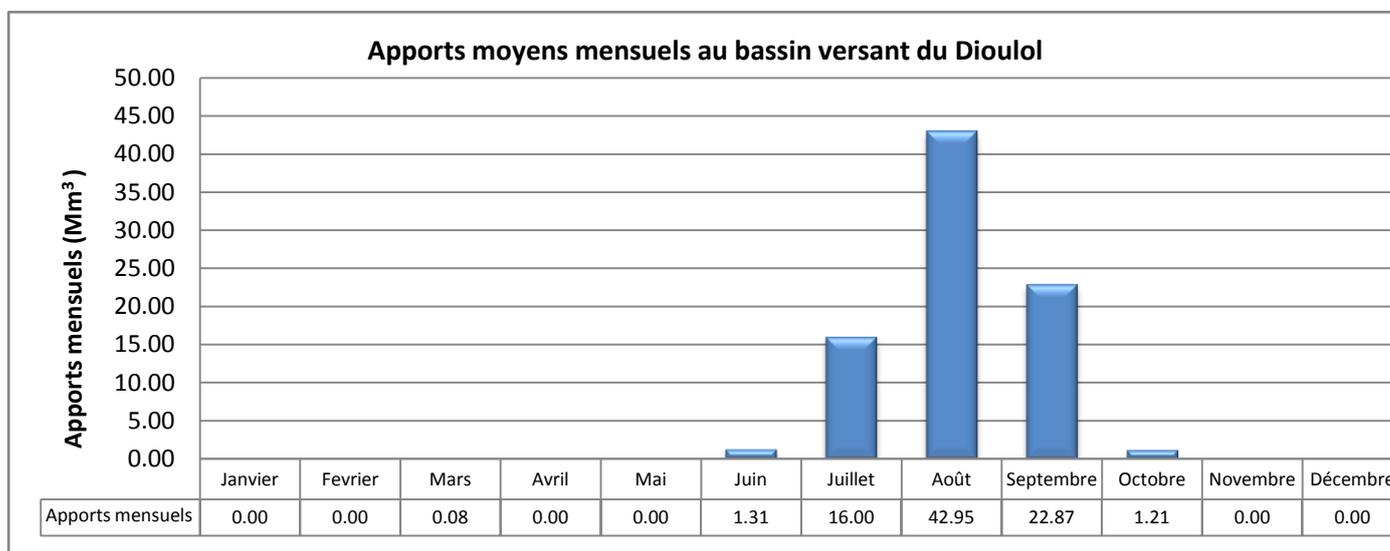


Figure 22 : Apports moyens mensuels au bassin du Dioulol pour la période 1981-2015

Il ressort que pour la période 1981-2015, l'écoulement du Dioulol intervient en général entre les mois de juin-juillet et octobre, avec un pic en août. Ce mois d'aout correspond également à la période pendant laquelle l'eau du fleuve Sénégal entre dans le Dioulol.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Tableau 20 : Apports annuels aux bassins du Dioulol et du Wendou pour la période 1981-2015

Années	Apports au bassin versant du Dioulol (Mm ³ /an)	Apports au bassin versant du Wendou Bosséabé (Mm ³ /an)
1981	86.63	11.53
1982	43.59	5.46
1983	57.99	7.6
1984	5.4	0.34
1985	66.64	9.38
1986	76.55	10.31
1987	124.19	17.66
1988	95.96	12.85
1989	87.59	12.47
1990	81.07	11.04
1991	18.92	2.01
1992	8.86	0.75
1993	64.19	8.49
1994	148.07	21.44
1995	60.4	7.68
1996	61.81	7.97
1997	71.38	9.58
1998	45.3	5.53
1999	146.7	20.44
2000	183.91	24.92
2001	90.65	11.99
2002	54.65	7.01
2003	185.08	27.3
2004	116.01	15.69
2005	83.92	10.63
2006	34.36	4.27
2007	146.34	21.38
2008	82.53	10.67
2009	92.02	11.97
2010	161.73	22.67
2011	42.49	5.61
2012	108.98	15.72
2013	98.72	13.55
2014	37	4.83
2015	84.95	11.45
Moyenne	84.42	11.49
Max	185.08	27.3
Min	5.4	0.34
Taille	35	35

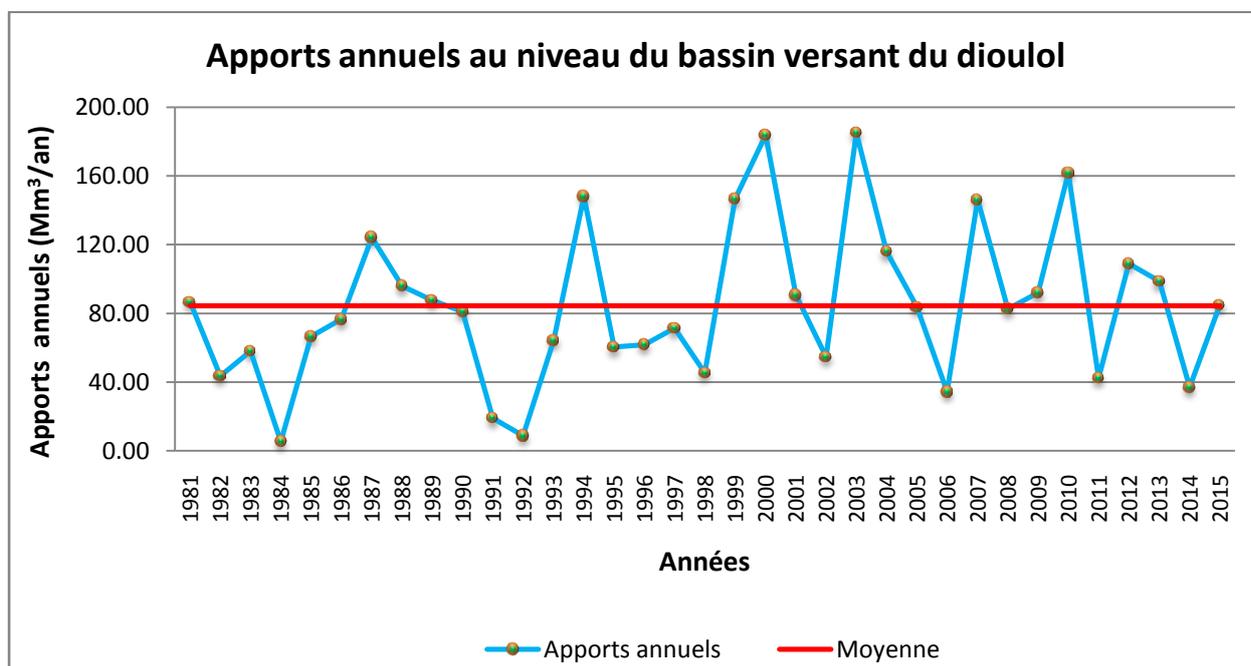


Figure 23 : Apports moyens annuels au bassin du Dioulol pour la période 1981-2015

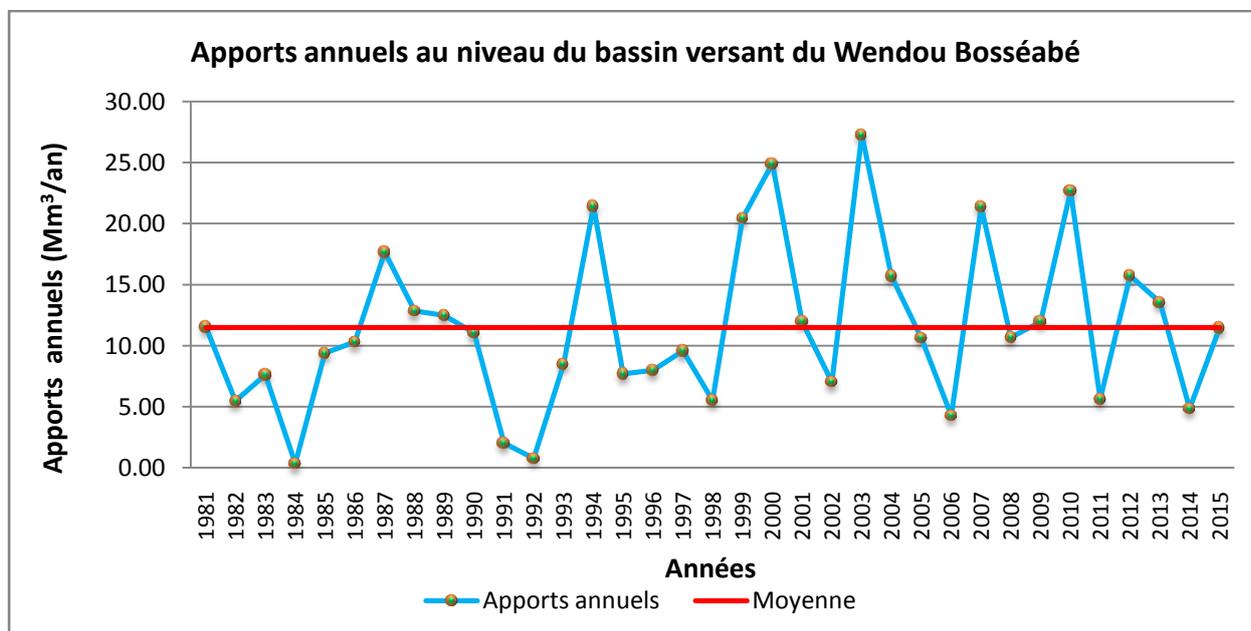


Figure 24 : Apports annuels au bassin du Wendou Bosséabé pour la période 1981-2015

Il en résulte un apport moyen annuel au bassin du Dioulol, de l'ordre de **85 Mm³** et d'environ **11.5 Mm³** au bassin du Wendou Bosséabé. Soit près de **14 %** des apports en eau annuels au bassin du Dioulol proviennent du Wendou Bosséabé.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

V. EVALUTATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE BASSIN VERSANT

V.1 GENERALITES ET APPROCHE ADOPTEE

Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation plus ou moins fiable des apports solides. Cependant les meilleures estimations des apports solides sont fournies par la comparaison avec des bassins versants voisins présentant des caractéristiques proches en superficie, en érodabilité, en classe, en pente et en végétation, et pour lesquels on dispose de données.

L'eau qui ruisselle sur les bassins versants entraîne avec elle des matériaux solides qu'elle arrache tout au long de son parcours. Ces matériaux se déposent dès que la vitesse de l'eau devient inférieure à un certain seuil, ce qui est le cas lorsque les cours d'eau aboutissent à un autre cours d'eau (cas de l'affluent Wendou Bosséabé) ou à une retenue. Les mécanismes érosion-transport-sédimentation sont complexes et ils dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Les caractéristiques physiques du bassin versant (superficie, classe de relief, forme, etc.) ;
- La nature du réseau hydrographique ;
- Les caractéristiques géologiques (nature de la roche mère) et édaphiques ;
- L'environnement climatique et en particulier la pluviométrie ;
- Le couvert végétal et la mise en culture éventuelle.

La grandeur associée aux transports solides est la dégradation spécifique (en t ou $m^3/km^2/an$).

En l'absence de toute mesure de transports solides dans le bassin du Dioulol, ainsi que de celle de levés bathymétriques dans la zone, l'IC à adopter les approches suivantes pour estimer et/ou caractériser les transports solides dans le bassin :

1- Se baser sur un rapport de dégradation spécifique par la lame d'eau écoulée (concentration en g/l ou en g/m^3). Pour la présente étude, une concentration de sédiments moyenne de 3 g/l a été adoptée correspondant à un taux de lessivage moyen annuel (Ds) de 5.12 t/ km^2/an . L'expression du flux sédimentaire en taux spécifique (par km^2) permet de comparer des bassins versants de tailles différentes.

2- Calculer Ds par la formule de GOTTSALK :

$$Ds = 260. S^{-0.1}$$

Avec : S = surface du bassin versant en km^2

Ds = dégradation spécifique annuelle en $m^3/km^2/an$.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

Cette expression a été établie après des observations faites sur la dégradation spécifique annuelle de soixante-dix bassins d'Amérique. Elles avaient permis, comme le montre la formule, de mettre en évidence une certaine réduction moyenne de D avec la surface.

- Et enfin après comparaison, une valeur moyenne des Ds issues des deux approches a été retenue.

V.2 RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE

Les tableaux 21 et 22 présentent les résultats du calcul de la dégradation spécifique et des apports solides et le rythme d'envasement estimés du Dioulol.

Tableau 21 : Résultats du calcul de la dégradation spécifique (Ds)

Caractéristiques		Valeurs au niveau du bassin versant	
		Dioulol	Wendou Bosséabé
Surface (A)	[km ²]	792.23	132.6
Dégradation spécifique par la lame d'eau écoulée	Densité (D)	[t/m ³]	1.50
	Apports liquides moyens annuels (Al)	[Mm ³ /an]	84.42
	Concentration	[g/l]	3
	Dégradation spécifique DS	[t/km ² /an]	319.68
Dégradation spécifique par la méthode de GOTTSALK		[t/km ² /an]	200.07
Valeur retenue de la Dégradation spécifique		[t/km ² /an]	259.87
			249.59

Tableau 22 : Transports solides et envasement du Dioulol

	Transports solides et envasement					
	Surface du bassin	Dégradation spécifique	Densité	Densité spécifique volumique	Apports solides moyens annuels	Rythme d'envasement
	[km ²]	DS [t/km ² /an]	D [t/m ³]	DSV [m ³ /km ² /an]	As [t/an]	[m ³ /an]
Dioulol	792.23	259.87	1.50	173.25	205 880.27	137 253.52
Wendou Bosséabé	132.60	249.59	1.50	374.39	33 095.75	22 063.83

Il en résulte un envasement moyen du Dioulol par le Wendou Bosséabé de l'ordre de **22 000 m³/an**, soit **16 %** des apports solides de l'ensemble du bassin.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

VI. CONCLUSION

La présente étude hydrologique a été menée à partir des données recueillies de la station de Matam pour la période 1981-2015. Elle a permis d'une part de décrire le milieu physique du bassin versant du Dioulol et de le caractériser, et d'autre part d'évaluer les crues, les apports en eau et les apports solides.

Les résultats obtenus seront utilisés pour la suite des aménagements et à toutes autres fins utiles à la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin et du potentiel hydraulique qu'il offre. Ils permettront ainsi de faire le dimensionnement hydraulique des ouvrages qui seront projetés, d'établir des prévisions (de lutte contre l'érosion hydrique et l'ensablement, des inondations, de la gestion des ressources en eau, etc.) et proposer des actions ciblées et localisées d'aménagements de protection ou d'irrigation.

Toutefois elle est loin d'être exhaustive ou une fin en soi par le fait de la complexité du problème étudié, et ne prête nullement encore avoir cerné tous les aspects des phénomènes de crues et de transports solides dans le bassin du Dioulol. Cette étude prendrait une autre dimension et les résultats seraient encore plus représentatifs si les données hydrométriques observées du Dioulol, du Wendou Bosséabé et les mesures de transports solides dans le bassin étaient disponibles.

C'est ainsi que nous recommandons d'approfondir les études et recherches au niveau de ce bassin du Dioulol sur la base d'observations et mesures représentatives, afin d'affiner la qualité des études hydrologiques et hydrauliques indispensables aux projets de lutte contre l'érosion hydrique, de protection contre les inondations et/ou autres aménagements envisagés dans le bassin et la région.

<i>Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)</i>	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

VII. REFERENCES

- FAO (Bulletin 54) : ORSTOM, CIEH & LCT/CEMAGREF/ENGREF.1996. – Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugeés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche.
- Plan Directeur de la Haute vallée du fleuve Sénégal : J.ALBERGEL, J.P. LAMAGAT & B.MARIEU. 1991. – Exemple d'application des méthodes de prédétermination de crues décennales.
- USDA-NRCS: National Engineering Handbook-Part 630 (Hydrology). 1997.
- USACE: Hydrologic Modeling System HEC-HMS. 2000 & 2010. Technical Reference Manual-Version 3.5 & 4.0.
- Bulletin du Comité Français des Grands Barrages. Novembre 1996. – Les crues de projet : Méthode de Gradex.
- J.P. LABORDE, Université de Nice-Sohpia Antipolis. Edition 2000. – Eléments d'Hydrologie de surface.
- P. MEYLAN & A. MUSY, Office Fédéral de l'Education et de la Science/Suisse. Edition 1999. – Hydrologie fréquentielle.
- ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM): <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>).
- J. RODIER & C. AUVRAY, «Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale,» Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer (ORSTOM) /Comité Inter africain d'études hydrauliques (CIEH), 1965.
- ANSD/SRSD de la Région de Matam. Août 2011 – Rapport de l'édition 2010 de la situation économique et sociale régionale de Matam-Sénégal.
- SAED/BET ALKHIBRA & TRANSECOR. Décembre 2016 - Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)- Sénégal. Etudes pédologiques : Rapport préliminaire.
- MINEPAT/BET ALKHIBRA & INTEGC. Décembre 2015 - Etudes techniques en vue de la construction d'une digue-route, la protection des berges et l'aménagement des infrastructures Hydro-agricoles le long du fleuve Logone entre Gobo et Kousseri, dans la région de l'Extrême-Nord-Cameroun- Rapports : Etudes hydrologiques et hydrauliques.
- PRICI/BET ALKHIBRA, 2EC & SOGED. Août 2016 - Etudes environnementales, études techniques, études d'impact environnemental et social pour la restauration et la préservation de la retenue d'eau brute du Kan de Bouaké –Côte d'Ivoire : Rapport d'APS-Etudes hydrologiques.
- ALKHIBRA.2016 – Etude de conception du barrage Toudgha dans la Province de Tinghir au Maroc- Rapport : Etude hydrologique.
- TRACTEBEL ENGINEERING/ALKHIBRA/BET-GP- Décembre 2015 - Etude d'APD et dossier d'appel d'offres pour l'exécution des travaux du barrage de Seguelil dans la Wilaya d'Adrar-Mauritanie. Rapport de l'étude hydrologique.
- TRACTEBEL ENGINEERING/ALKHIBRA/BET-GP- Février 2017- Elaboration des APD et DAO pour 4 grands barrages en Adrar et au Tagant-Mauritanie. Rapport de l'étude hydrologique.
- Ecole Polytechnique de Thiès-Sénégal : A.AMANI, A. SARR, Ph.D. Juin 1990. – Pluie de projet et modèles de transfert pluie-débit pour les petits bassins versants-Cas de bassins versants au Sénégal en zone sahélienne.
- Ministère de l'Agriculture et de la pêche-Dépt. Rhone-Contrat Rivière de Garon/SMAGGA. Octobre 2007 - Etude hydrologique et hydraulique du bassin versant du Garon –France : Rapport de synthèse.
- FST de Marrakech & ABH Tensift-Maroc : A.AHBARI, M. SAIDI, N.LIMAM, S.RACHIDI. Juin 2013. – Bassin versant de Rhéraya : Modélisation Pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique.

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

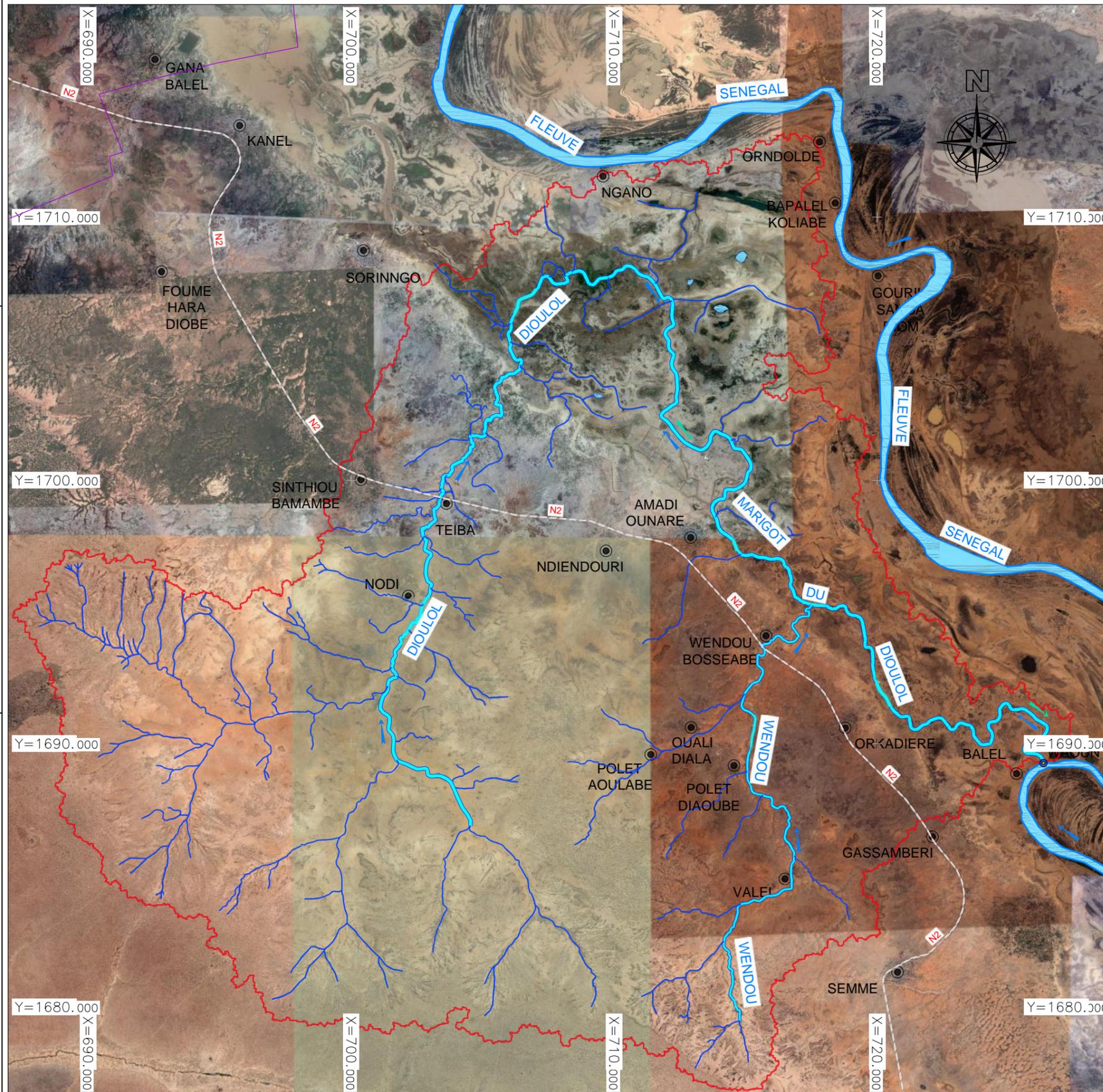
VIII. ANNEXES

<i>Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)</i>	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
<i>Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol</i>	<i>Version finale</i>	<i>Avril 2017</i>

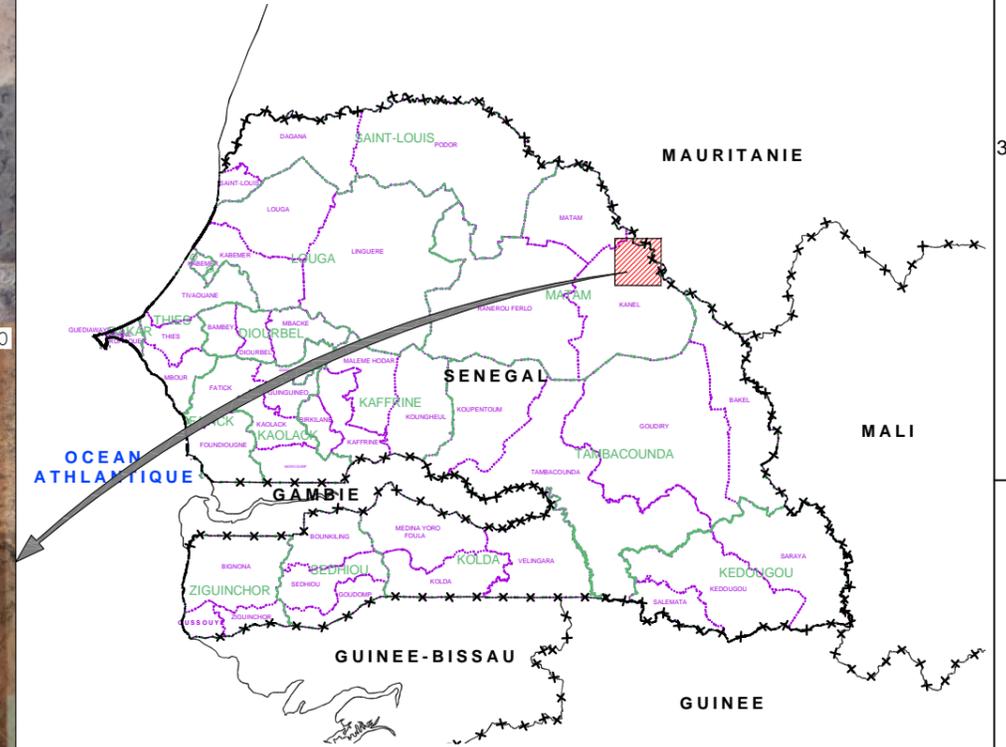
VIII.1 SITUATION GENERALE ET REGIONALE DU BASSIN VERSANT

SITUATION REGIONALE DU BASSIN VERSANT DU DIOULOL

ECH : ①



SITUATION GENERALE DU SENEGAL



- LEGENDE :**
- : Localités
 - ✂ : Limites Frontières
 - : Limites de la région de l'Extrême-Nord
 - : Limite du bassin versant du Dioulol
 - : Limites des départements
 - : Cours d'eau
 - : Sens d'écoulement
 - : Exutoire/confluence avec le fleuve Sénégal

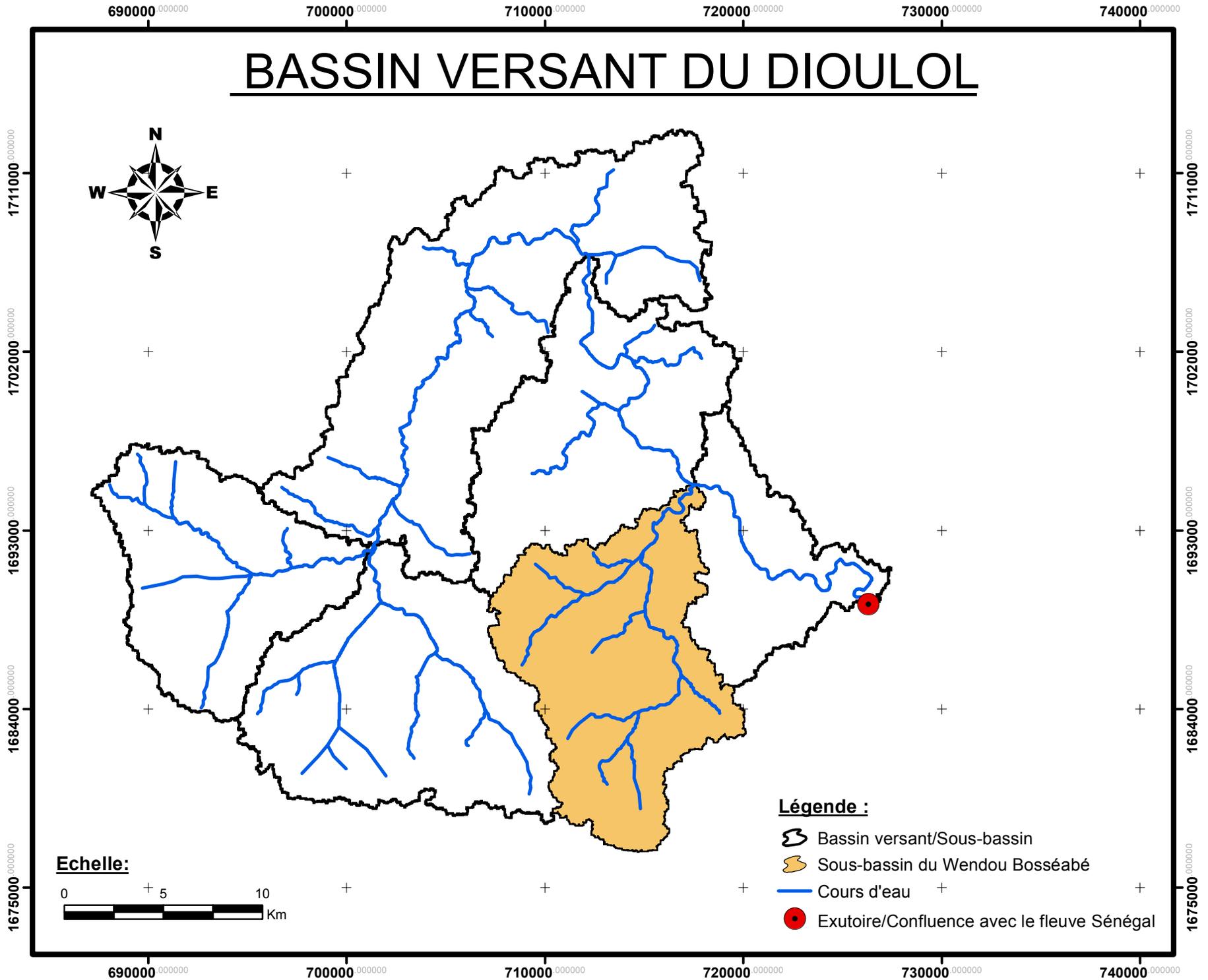
ECH ① : 0 3.6 7.2 Km

INDEX	DATE	MODIFICATION
REPUBLIQUE DU SENEGAL UN PEUPLE - UN BUT - UNE FOI MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'EQUIPEMENT RURAL SOCIÉTÉ NATIONALE D'AMÉNAGEMENT ET D'EXPLOITATION DES TERRES DU DELTA DU FLEUVE SENEGAL ET DES VALLÉES DU FLEUVE SENEGAL ET DE LA FALÈME HAUT COMMISSARIAT PROJET DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU ET DE DÉVELOPPEMENT DES USAGES MULTIPLES DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL - PHASE II (PGIRE 2)		
 		
ETUDES DE FAISABILITE, D'AVANT PROJET SOMMAIRE, AVANT PROJET DETAILLE ET DE DOSSIER D'APPEL D'OFFRES POUR LES TRAVAUX D'AMENAGEMENT ET D'EQUIPEMENT DU BASSIN VERSANT DU DIOULOL A MATAM (CONSTRUCTION D'OUVRAGES, REBOISEMENT,...)		
PHASE I : ÉTUDES DE FAISABILITE ET D'AVANT-PROJET SOMMAIRE		
SITUATION GENERALE ET REGIONALE DE LA ZONE D'ETUDE		
GROUPEMENT DE BUREAUX D'ETUDES:		
 		
DESS M.S	PROJ. M.S	CONTR. A.C
APPR. A.C	ECHELLE : ...	
ANNEXE : 01		DATE : 2017
INDEX : A		

Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

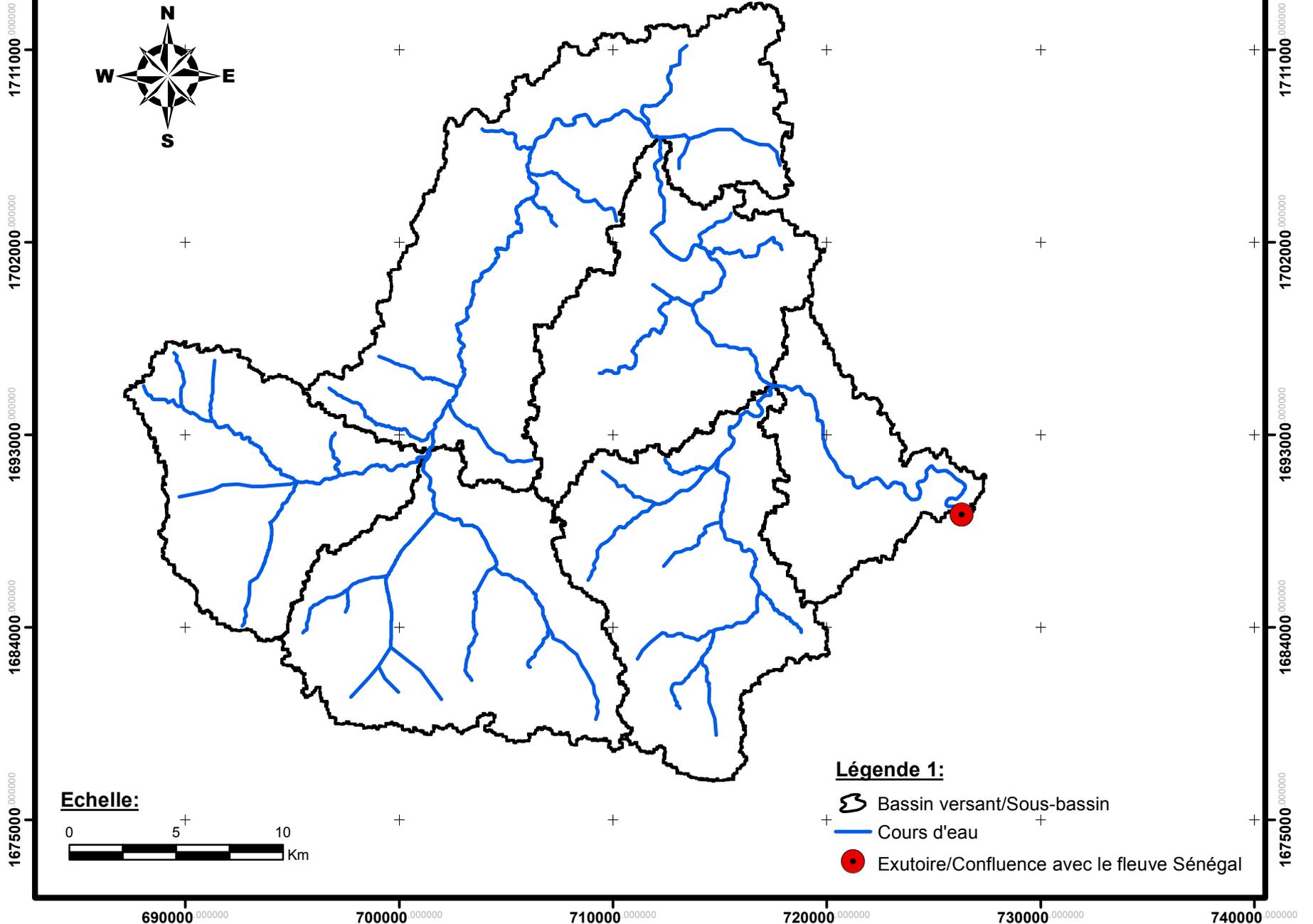
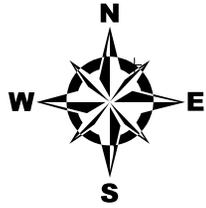
VIII.2 CARTES THEMATIQUES DU BASSIN VERSANT AVEC LES COORDONNEES

BASSIN VERSANT DU DIOULOL

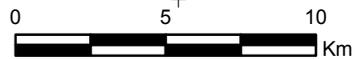


690000 000000 700000 000000 710000 000000 720000 000000 730000 000000 740000 000000

Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Dioulol



Echelle:



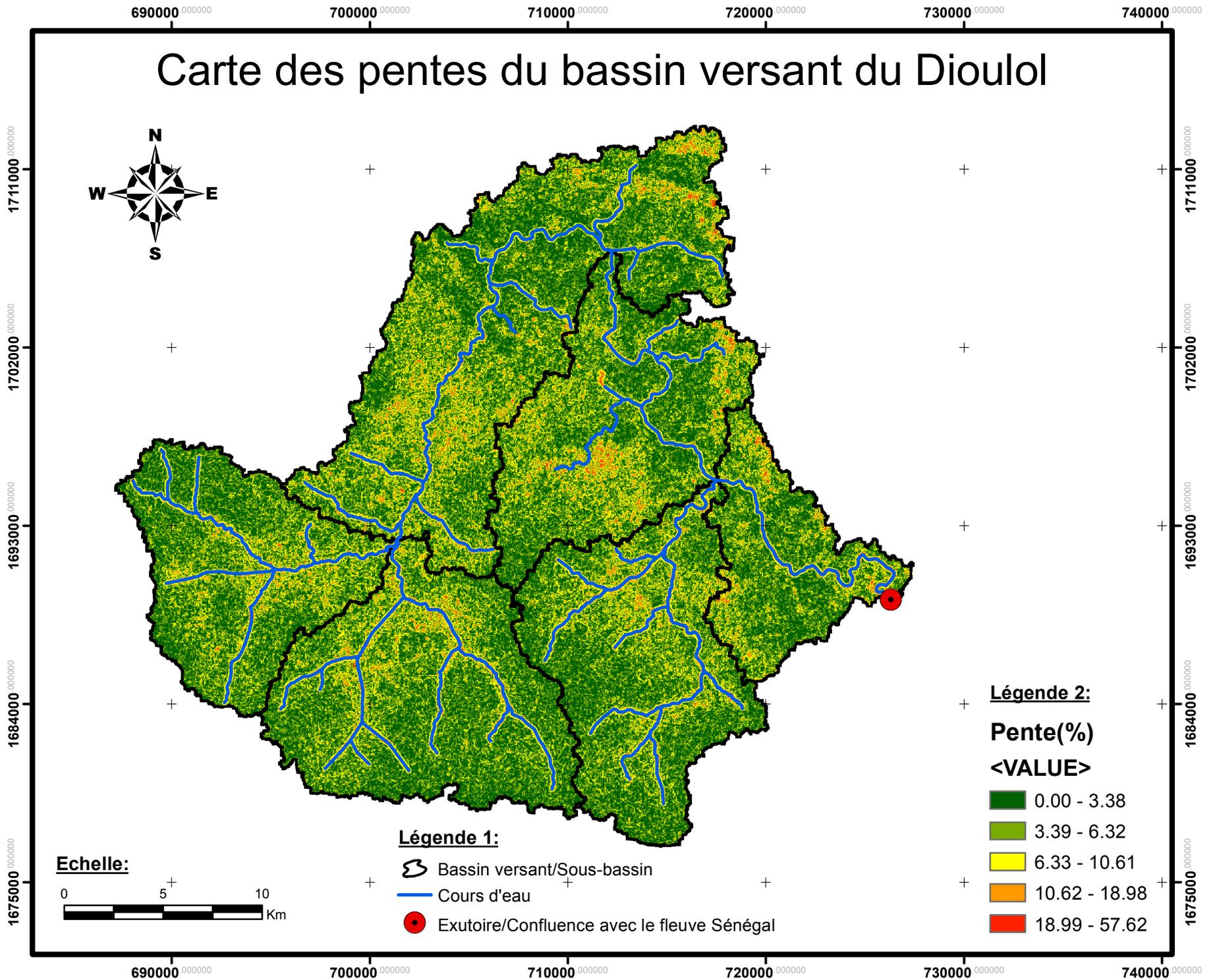
Légende 1:

- Bassin versant/Sous-bassin
- Cours d'eau
- Exutoire/Confluence avec le fleuve Sénégal

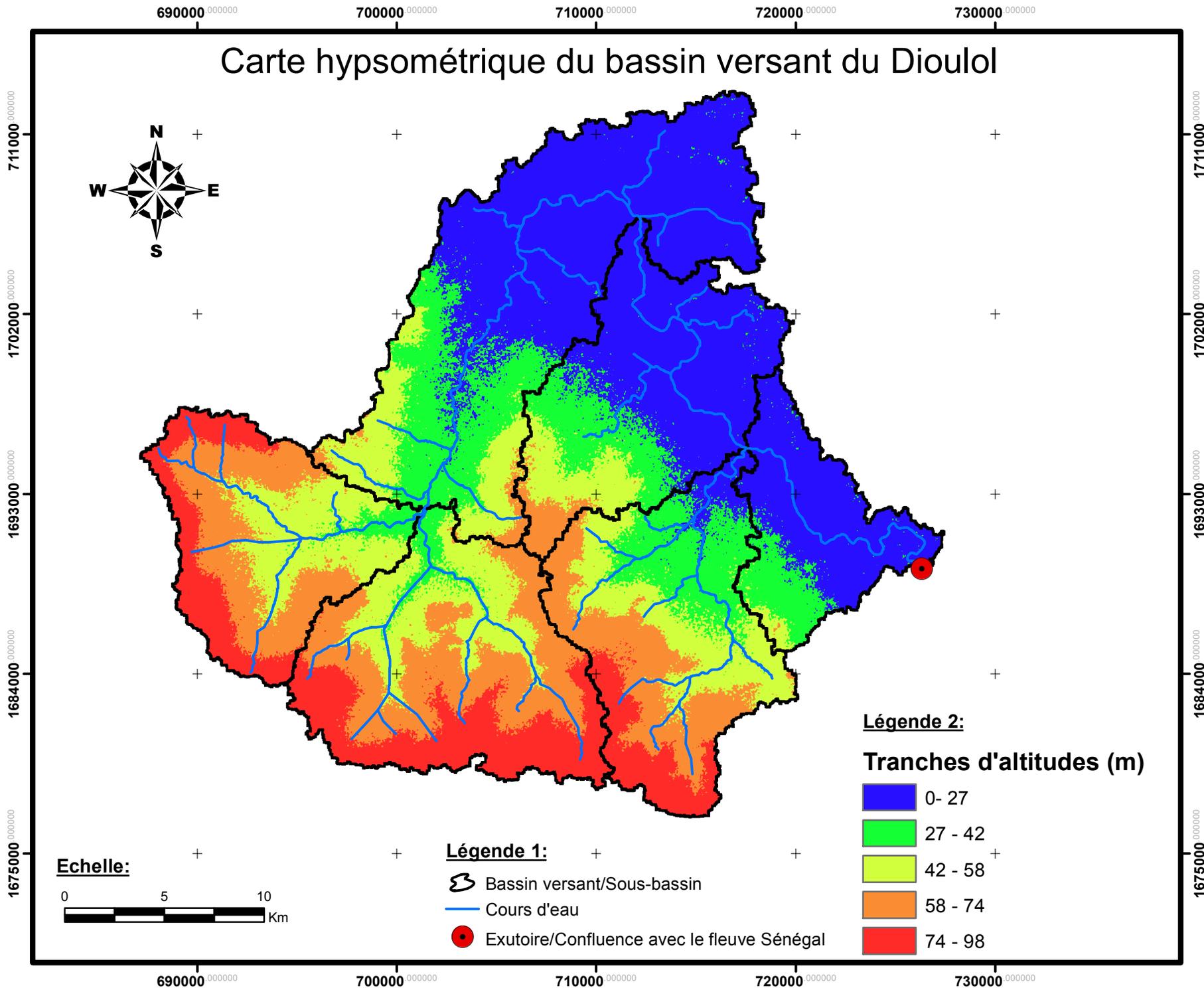
1711000 000000 1702000 000000 1693000 000000 1684000 000000 1675000 000000

690000 000000 700000 000000 710000 000000 720000 000000 730000 000000 740000 000000

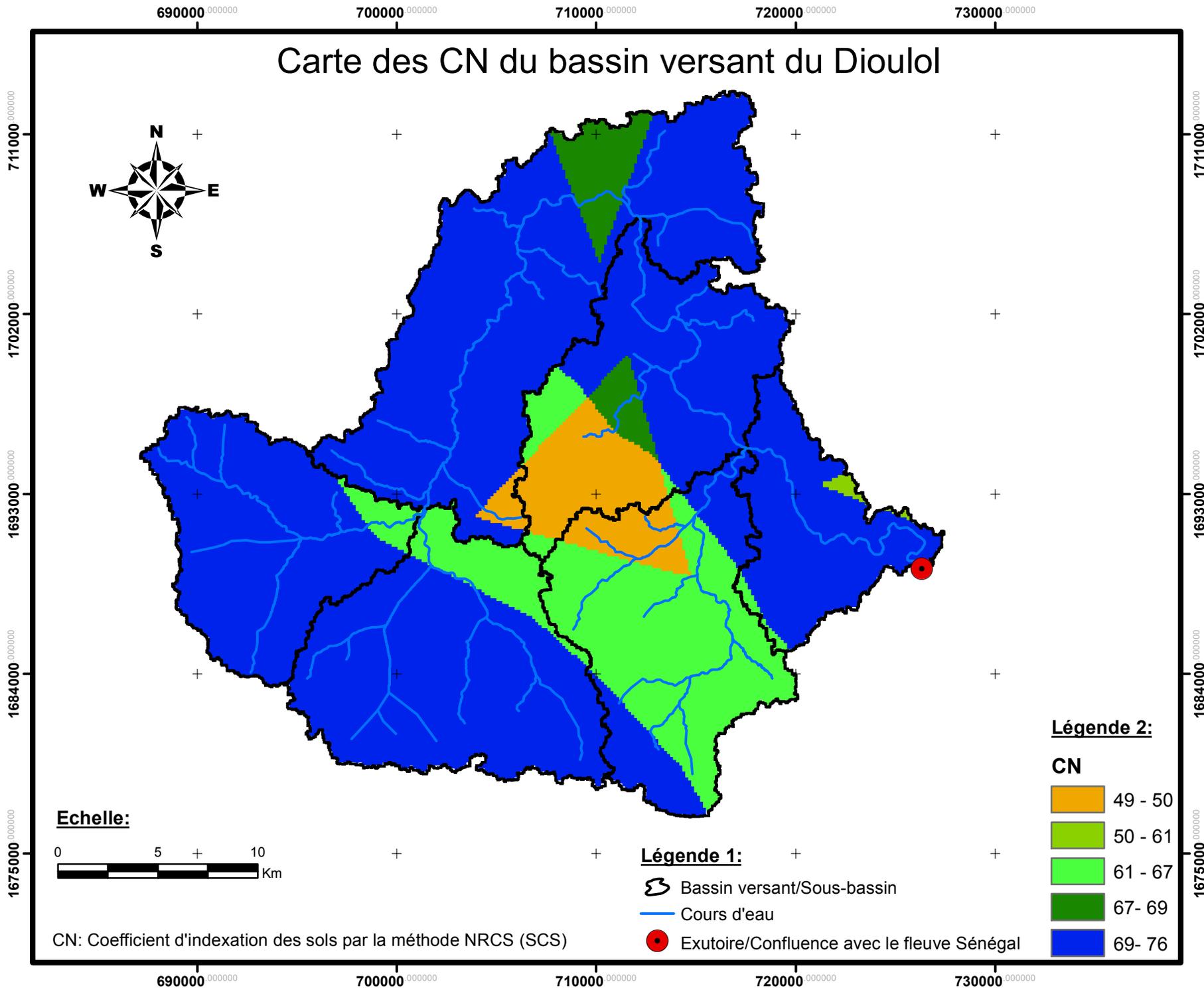
Carte des pentes du bassin versant du Dioulol



Carte hypsométrique du bassin versant du Dioulol



Carte des CN du bassin versant du Dioulol



Etudes de faisabilité, d'avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et de dossier d'appel d'offres pour les travaux d'aménagement et d'équipement du bassin versant du Dioulol à Matam (construction d'ouvrages, reboisement,...)	Phase I : Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS)	
	RAPPORT DES ETUDES HYDROLOGIQUES	
Réf. : Marché N°15.09/2016/SAED-OMVS/PRGIRE2/Sénégal//Etudes/BVDioulol	Version finale	Avril 2017

VIII.3 MATRICES DES APPORTS EN EAU MENSUELS ESTIMES DANS LE BASSIN VERSANT

