

Année Universitaire : 2009-2010



**Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et
Qualité des Eaux**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN
VERSANT DE BOUREGREG (S.S) ET
EVALUATION DE TAUX D'ENVASEMENT DU
BARRAGE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH
(MAROC) PAR LA METHODE BATHYMETRIQUE**

Présenté par :

Mohamed RAHDOU

Encadré par :

Pr. Abdellah DRIDRI

Pr. Moulay Idriss HASNAOUI

Soutenu le 25 Juillet 2010 devant le jury composé de :

Abdel-Ali CHAOUNI , Professeur à la Faculté Polydisciplinaire- Taza	Président
Abdellah DRIDRI , Professeur à la Faculté des Sciences DHM- Fès	Encadrant
My Driss HASNAOUI , Professeur à l'Ecole Mohammadia des Ingénieurs (EMI)- Rabat	Co-encadrant
Hassan TABYAOUI , Professeur à la Faculté Polydisciplinaire- Taza	Examineur
Mohamed Touji , Chef de la division des petits et moyens barrages au S.E.C.E.-Rabat	Examineur
Lahcen BENAABIDATE , Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques- Fès	Examineur

Stage effectué au :



ENFI-SALE

**Laboratoire de Génie Civil à L'Ecole Mohammadia des
Ingénieurs- Rabat sous-conseil de l'Ecole Nationale
Forestière d'Ingénieurs- Salé.**



EMI-RABAT



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: RAHDOU Mohamed

Année Universitaire : 2009/2010

Titre: Modélisation hydrologique du bassin versant de Bouregreg (s.s) et évaluation de taux d'envasement du barrage SMBA (Maroc) par la méthode bathymétrique

Résumé

La sédimentation des barrages au Maroc est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et provoqueront à l'entrée des retenues des courants de densité. Cette sédimentation pose d'énormes problèmes à savoir; la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, la sédimentation des canaux d'irrigation et elle a même un impact sur la qualité de l'eau.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la mémoire de fin d'étude du cycle de master. Elle a pour objectif le suivi de taux d'envasement du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah, situé dans la zone de Rabat Salé à l'Ouest du Maroc sur le bassin versant de Bouregreg. Ce barrage est considéré parmi les cinq grands barrages du royaume, il produit **31,5** % de l'eau potable à l'échelle national d'où son importance. Une étude de la bathymétrie par sondage ponctuel a montré que le taux de sédimentation est de l'ordre de **1,08** % par an depuis la mise en service du barrage en 1974 jusqu'à 2009. Cette perte en eau de la capacité totale de la retenue est une conséquence directe d'une forte dégradation spécifique du bassin versant estimée à **4,545** t/ha/an.

Un deuxième objectif de ce travail, concerne l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques des stations du bassin versants de Bouregreg (S.S). Les résultats ont montré que la pluviométrie moyenne interannuelle enregistrée dans le sous-bassin est de l'ordre de **408,2** mm, très irrégulière conforme à un climat de type semi aride, ce dernier subisse aux effets de l'altitude, de l'extension de la latitude et de son ouverture sur la façade atlantique.

Les apports sont généralement très irréguliers et assez variables d'une année à l'autre, sa valeur moyenne est de **647,4 Mm³** enregistré à la station du barrage SMBA.

Mots clés :

Sédimentation des barrages ; Maroc ; érosion ; particules solides ; courants de densité ; taux d'envasement ; barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah ; bassin versant de Bouregreg ; bathymétrie ; dégradation des sols ; bassin versant de Bouregreg (S.S).

DÉDICACES

Ce travail est dédié :

*À mon cher père ; ma chère mère ;
ma chère épouse, ma sœur, mon
beau-frère et à tous les membres de
ma famille, que ce travail soit le
symbole de ma reconnaissance de
leur amour infini.*

Remerciement

Au long de cette étude, plusieurs personnes étaient impliquées d'une façon ou d'une autre dans l'aboutissement de ce travail.

*Au terme de la rédaction de ce mémoire, je tiens à exprimer tout d'abord ma profonde reconnaissance et mon sincère respect à **Mr. Mohamed Sabir** le Directeur de l'**ENFI** (Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs) pour avoir organisé le déroulement de ce stage et me fournir les documents nécessaires pour réussir ce sujet.*

*Une mention particulière à **Mr. HASNAOUI** responsable en Secrétariat Chargé de l'Eau et d'Environnement et professeur à l'EMI (Ecole Mohamadia des Ingénieurs), pour son encadrement, ses encouragements, ses orientations et son suivi continu. Au-delà de ses prodigieux conseils, j'ai bénéficié de ses larges connaissances et surtout de son sens humain.*

*Mes vifs remerciements s'adressent aussi à **Mr. TOUJI** responsable au Secrétariat Chargé de l'Eau et d'Environnement pour sa coopération et ses encouragements. Sans oublier de remercier les enseignants de l'Ecole Mohamadia des Ingénieurs, représenté par le département de Génie Civile, surtout **Mr. Driss OUAZZAR**, qui a mis à ma disposition le laboratoire au sein duquel j'ai effectué mon stage.*

*Mes sincères remerciements à **Mr A. DRIDRI** pour avoir accepté d'assurer l'encadrement de ce mémoire de fin d'études, et pour son aide précieuse, ses conseils et ses suggestions qui ont été très utiles.*

*Je remercie vivement le responsable du Master, **Mr. H. Bennabidate** pour ses orientations, son esprit humain et surtout sa disponibilité immédiate durant les deux années du Master.*

Merci également au corps enseignant du Département des Sciences de la terre pour les années de formation.

Mes chaleureux remerciements à mon cher père et à ma chère mère, qui m'ont soutenu moralement et financièrement le long de cette formation. Je tiens à remercier aussi ma sœur et mon beau-frère pour leurs soutiens continus, sans oublier de remercier toute ma famille à Salé de m'avoir accueilli chaleureusement durant la période du stage.

Je remercie particulièrement mes chers collègues et amis qui m'ont toujours soutenu notamment Mimoun ; Hicham ; Amarouch ; Said ; El-hitoune ; Jamal ; Morad ; Rachid ...etc

Enfin, je tiens à remercier ma très chère épouse pour son affection, son appui continu et pour son soutien.

Je souhaite donc que ce travail soit à la hauteur des exigences.

Merci infiniment

RESUME

La sédimentation dans les barrages au Maroc est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et provoqueront à l'entrée des retenues des courants de densité. Cette sédimentation pose d'énormes problèmes à savoir : la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, la sédimentation des canaux d'irrigation et elle a même un impact sur la qualité de l'eau.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la mémoire de fin d'étude du cycle de master. Elle a pour objectif le suivi de taux d'envasement du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah, situé dans la zone de Rabat Salé à l'Ouest du Maroc sur le bassin versant de Bouregreg. Ce barrage est considéré parmi les cinq grands barrages du royaume, il produit **31,5** % de l'eau potable à l'échelle national d'où son importance. Une étude de la bathymétrie par sondage ponctuel a montré que le taux de sédimentation est de l'ordre de **1,08** % par an depuis la mise en service du barrage en 1974 jusqu'à 2009. Cette perte en eau de la capacité totale de la retenue est une conséquence directe d'une forte dégradation des sols du bassin versant estimée à **4,545** t/ha/an.

Un deuxième objectif de ce travail, concerne l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques des stations du bassin versants de Bouregreg (S.S). Les résultats ont montré que la pluviométrie moyenne interannuelle enregistrée dans le sous-bassin est de l'ordre de **408,2** mm, très irrégulière conforme à un climat de type semi aride, ce dernier subisse aux effets de l'altitude, de latitude et de son ouverture sur la façade atlantique.

Les apports sont généralement très irréguliers et assez variables d'une année à l'autre, sa valeur moyenne est de **647,4** Mm³ enregistré à la station du barrage SMBA.

Mots clés :

Sédimentation des barrages ; Maroc ; érosion ; particules solides ; courants de densité ; taux d'envasement ; barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah ; bassin versant de Bouregreg ; bathymétrie ; dégradation des sols ; bassin versant de Bouregreg (S.S).

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
OBJECTIFS ET METHODOLOGIE	3
<u>CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	
1. Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation dans les retenues de barrage.....	4
2. Problèmes posés par la sédimentation	5
3. Méthode de détermination de taux d'envasement	7
<u>CHAPITRE II: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</u>	
I. Situation géographique du bassin versant de Bouregreg (S.S).....	18
II. Description du milieu physique	21
1. Géomorphologie	21
2. Hydrographie	24
3. Lithologie et stratigraphie	26
4. Pédologie.....	28
5. Occupations des sols	32
6. Climatologie.....	34
III. Description du milieu humain.....	40
1. Démographie.....	40
2. Activités socio-économiques	42
3. Agriculture	43
4. Elevage.....	47
<u>CHAPITRE III:ANALYSE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE ET BILAN HYDROLOGIQUE</u>	
I. Traitement et Critique des données pluviométriques.....	49
1. Les données disponibles	49
2. Traitement des données.....	49
3. Hauteurs des précipitations annuelles et leurs variations	54
4. Précipitations moyennes mensuelles et leurs variations	59
5. Les précipitations à l'échelle du bassin versant	61
II. Critique des données hydrométriques	64
1. Les débits moyens annuels.....	64
2. Les débits moyens mensuels.....	66
3. Les débits moyens saisonniers	67
Conclusion	69
III. Les apports du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA)	69
1. Apports annuels	69
2. Apports mensuels.....	70
IV. Relations pluie-débit	70
1. Corrélation entre précipitations et débits	70
2. Corrélation entre les précipitations et les écoulements annuels.....	71
3. Corrélation entre les précipitations et les écoulements mensuels.....	72
V. Relation débit-débit entre Aguibet Ezziar et Lalla Chafia.....	74
1. Corrélation débit-débit à l'échelle annuelle.....	74
2. Corrélation débit-débit à l'échelle mensuelle	75
VI. Les bilans hydrologiques	75
1. La lame d'eau écoulée	75

2.	Le déficit d'écoulement	76
3.	Le coefficient d'écoulement	77
4.	Les bilans hydrologiques annuels	79
5.	Calcul du bilan hydrologique de la retenue du barrage SMBA	82
VII.	Mobilisation et utilisation des ressources en eau	86
1.	L'effort de mobilisation	86
2.	Utilisation de l'eau	87
<u>CHAPITRE IV: ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE</u>		
I.	Méthode et Matériels	90
1.	Méthode de campagne bathymétrique	90
2.	PROSPECTION BATHYMETRIQUE : Processus ; principe et traitement des données	91
II.	Taux d'envasement la retenue du barrage SMBA	96
III.	Méthodes pour réduire l'envasement des retenues des barrages	102
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		105
ANNEXE.....		109

LISTES DES SYMBOLES, ABREVIATIONS ET UNITES

Symboles et abréviations

A.B.H.B.C	Agence du bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia- Ben Slimane.
BF	Sol brun forestier.
Br	Sol brunifié.
C	Terres de culture.
Ca²⁺	Calcium.
Ca	Sol calcimagnésique.
CaCO₃	Taux de carbonates de calcium (%)
CEC	Capacité d'échange cationique.
CL	Chêne liège
Cs	Césium
CV	Chêne vert
D.G.H	Direction Générale de l'Hydraulique
D.P.A.E	Direction de la Planification Agricole et de l'Economie.
EMI	Ecole Mohamadia des Ingénieurs.
ENFI	Ecole Nationale forestière d'Ingénieurs.
EUPT	Equation Universelle de Perte en Terre
F	Sol fersialitiques.
Fe³⁺	Fer.
Hyd	Sol hydromorphe
IME	Institut Méditerranéen de l'Eau.
IRD	Institut de Recherche pour le Développement.
Is	Sol isohumique.
Kr	Coefficient de ruissellement.
LANDSAT ETM⁺	Land Satellite Earth Thematic Mapper.
M	Matorral pâturé.
MO	Taux de matière organique.
NW-SE	Nord Ouest- Sud Est.
PAMS	Plantes Aromatiques Médicinales.
Pb	Plomb.
pH (H₂O)	pH eau.
pH (KCl)	pH KCl.
Pi	Pluie d'imbibition (mm).
PMH	Petite et moyenne hydraulique.
R	Coefficient de corrélation.
S	Taux de Sables (%).
S.E.C.E.E	Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et d'Environnement
S.L	Au sens large.
S.M.B.A	Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah.
SS	Au sens strict.
Sab	Sol sableux.
SIG	Système d'Information géographique.
USLE	Universal Soil Loss Equation.
V	Vertisol.
Vég	Végétation (%).

Unités

%	Pourcentage.
g/m²/h	Gramme par mètre carré et par heure.
g/cm³	Gramme par centimètre carré.
Kg/cm²	Kilogramme par centimètre carré.
mm	Millimètre.
mm/h	Millimètre par heure.
Mm³	Millions de mètres cubes.
µm	Micromètre.
m	Mètre.
cm	Centimètre.
ha	Hectare.
m³/s	Mètre cube par seconde.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Propagation d'un courant de densité	5
Figure 2 : Quelques exemples des retenues type canal.....	5
Figure 3 : Décantation et tassement des particules solides fines	5
Figure 4 : Problèmes posés par la sédimentation	6
Figure 5 : l'embouchure et les deux oueds principaux du BV Bouregreg.....	18
Figure 6 : Situation géographique du bassin versant de Bouregreg (s.s)	19
Figure 7 : Découpage administratif du bassin versant Bouregreg (s.s).....	20
Figure 8 : Unités du relief du bassin versant de Bouregreg (S.S).....	23
Figure 9 : Réseau hydrographique du bassin versant Bouregreg (S.S).....	25
Figure 10 : Lithologie et stratigraphie du bassin versant Bouregreg (S.S).....	27
Figure 11 : Type de sol dominant du bassin versant Bouregreg (S.S)	31
Figure 12 : Utilisation des terres dans le bassin versant Bouregreg (S.S).....	33
Figure 13 : Diagramme ombrothermique de la station d'Oulmès	37
Figure 14 : Répartition spatiale de l'agressivité climatique dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) pour la période la période 1972-2002	39
Figure 15 : Evolution de la population totale et des ménages entre 1994 et 2004 dans les principales communes intégrant le bassin de Bouregreg (S.S).....	41
Figure 16 : Répartition des occupations des sols dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	44
Figure 17 : Répartition des effectifs du cheptel dans les principales intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996)	47
Figure 18 : Situation géographique des stations climatologiques dans le bassin de Bouregreg (S.S)...	50
Figure 19 : Corrélations entre les pluviométries des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux.....	54
Figure 20 : Test de double-cumul entre les pluviométries mensuelles des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux	55
Figure 21 : Test de double-cumul entre les pluviométries mensuelles des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux	56
Figure 22 : Variation des précipitations annuelles à la station du Barrage SMBA.....	57
Figure 23: Variation des précipitations annuelles à la station de Dar Soltane.....	57
Figure 24: Variation des précipitations annuelles à la station d'Aguibet Ezziar.....	58
Figure 25: Variation des précipitations annuelles à la station de Lalla Chafia	58
Figure 26: Variation des précipitations annuelles à la station de Tsalat	59
Figure 27 : Variation des précipitations mensuelles à la station du Barrage SMBA	59
Figure 28 : Variation des précipitations mensuelles à la station Dar Soltane	60
Figure 29 : Variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguibet Ezziar	60
Figure 30 : Variation des précipitations mensuelles à la station de Lalla Chafia.....	61
Figure 31: Variation des précipitations mensuelles à la station de Tsalat	61
Figure 32: Variation des précipitations mensuelles à l'échelle du bassin de Bouregreg (S.S)	62
Figure 33: Répartition saisonnière des précipitations à l'échelle du bassin de Bouregreg (S.S)	63
Figure 34: Variation des précipitations annuelles dans le bassin de Bouregreg (S.S).....	63
Figure 35: Variation des débits moyens annuels (en m3/s) à la station d'Aguibet Ezziar	65
Figure 36: Variation des débits moyens annuels (en m3/s) à la station de Lalla Chafia	65

Figure 37: Variation des débits moyens annuels (en m ³ /s) à la station de Tsalat	66
Figure 38: Variation des débits moyens mensuels (en m ³ /s) à la station d'Aguibet Ezziar.....	66
Figure 39: Variation des débits moyens mensuels (en m ³ /s) à la station de Lalla Chafia	67
Figure 40: Variation des débits moyens mensuels (en m ³ /s) à la station de Tsalat.....	67
Figure 41: Variation saisonnière des débits (en m ³ /s) à la station d'Aguibet Ezziar	68
Figure 42: Variation saisonnière des débits (en m ³ /s) à la station de Lalla Chafia	68
Figure 43: Variation saisonnière des débits (en m ³ /s) à la station de Tsalat	69
Figure 44: Variation des apports moyens annuels (en Mm ³) à la station du barrage SMBA	70
Figure 45: Variation des apports moyens mensuels (en Mm ³) à la station du barrage SMBA.....	70
Figure 46: Corrélacion entre les précipitations et les écoulements annuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar	71
Figure 47: Corrélacion entre les précipitations et les écoulements annuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia.....	72
Figure 48: Corrélacion entre les précipitations et les écoulements mensuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar	73
Figure 49: Corrélacion entre les précipitations et les écoulements mensuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia	73
Figure 50: Corrélacion entre les débits moyens annuels à Aguibet Ezziar et les débits moyens annuels à Lalla Chafia	74
Figure 51: Corrélacion entre les débits moyens mensuels à Aguibet Ezziar et les débits moyens mensuels à Lalla Chafia.....	75
Figure 52: Corrélacion entre les précipitations et les déficits d'écoulements annuels à la station d'Aguibet Ezziar	76
Figure 53: Corrélacion entre les précipitations et les déficits d'écoulements annuels à la station de Lalla Chafia	77
Figure 54: Corrélacion entre les précipitations et les coefficients d'écoulements sur le bassin de Bouregreg (S.S) à Aguibet Ezziar (1977/78 à 2005/06)	78
Figure 55: Corrélacion entre les précipitations et les coefficients d'écoulements sur le bassin de Bouregreg (S.S) à Lalla Chafia (1972/73- 2005/06)	79
Figure 56 : Image satellitaire du barrage SMBA et sa retenue	87
Figure 57 : Photo du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur le bassin versant de Bouregreg	87
Figure 58: Variation des volumes moyens annuels (en Mm ³) restitués par l'ONEP au barrage SMBA	88
Figure 59: Variation des volumes moyens mensuels (en Mm ³) restitués par l'ONEP au barrage SMBA.....	89
Figure 60 : Les phases de prospection bathymétrique	91
Figure 61 : Principe de cheminement.....	93
Figure 62 : Traitement des données bathymétriques	94
Figure 63 : Profil comprimé.	95
Figure 64 : Profil à échelles égales.....	95
Figure 65 : Profil optimal.	95
Figure 66 : représentation isobathymétrique	95
Figure 67 : Représentation tridimensionnelle.....	95
Figure 68 : Evolution de la capacité normale de la retenue du barrage SMBA.....	96
Figure 69 : Variation du volume envasé et la surface obtenues par bathymétrie au barrage SMBA pour les années 1985, 1995, 2000, 2003, 2007 et 2009	97
Figure 70 : Variation de la concentration des éléments solides (en g/l) dans la retenue du barrage SMBA par période	98

Figure 71 : Variation de la concentration des éléments solides (en g/l) dans la retenue du barrage SMBA par cumul depuis 1974 jusqu'à 2000	98
Figure 72 : Variation de la dégradation (t/ha/an) du bassin versant de Bouregreg (S.L) par période ..	99
Figure 73 : Variation de la dégradation (t/ha/an) du bassin versant de Bouregreg (S.L) par cumul	99
Figure 74 : Variation de la concentration (g/l) et la Dégradation spécifique (t/ha/an) en fonction de la lame d'eau écoulée (mm/an) par période.....	100
Figure 75 : Variation de la concentration (g/l) et la Dégradation spécifique (t/ha/an) en fonction de la lame d'eau écoulée (mm/an) par cumul	101
Figure 76 : Représentation schématique de trois types de dragues mécaniques. a) drague à godets ; b) drague à benne ; c) drague à pelle.	103
Figure 77 : Dragues hydrauliques. a) aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement ; b) aspiratrice en marche ; c) dragues fendables.....	104
Figure 78 : La technique de dragage "jetsed"	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau de détermination du facteur K selon la texture du sol	12
Tableau 2 : Détermination du code de perméabilité	12
Tableau 3 : Détermination du code de structure du sol.....	12
Tableau 4 : Détermination du paramètre NN.....	13
Tableau 5 : Facteur de type de culture.....	14
Tableau 6 : Facteur de méthode de travail du sol	14
Tableau 7 : Facteur de pratique de conservation.....	15
Tableau 8 : Caractéristiques physico-chimiques des types de sols dominants dans le bassin versant de Bouregreg (s.s) (BENSALAH N., 2008).....	30
Tableau 9 : Valeurs de l'amplitude thermique de quatre stations dans la zone du bassin versant de Bouregreg (s.s).....	34
Tableau 10 : Ambiances bioclimatiques déterminées en fonction des paramètres Q2 et m (Emberger ; 1955)	35
Tableau 11 : Indices d'agressivité climatique moyens (Rmoy) des stations pluviométriques au niveau du bassin versant de Bouregreg (s.s) (BENSALAH N., 2008).....	37
Tableau 12 : Activités socio-économiques dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	42
Tableau 13 : Caractéristiques de la surface utile agricole (SAU) dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	43
Tableau 14 : Différentes occupations des sols dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	45
Tableau 15 : Facteurs de production et types de matériel agricole utilisés dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	45
Tableau 16 : Effectifs du cheptel dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).....	47
Tableau 17: Périodes d'observation des onze stations du bassin de Bouregreg (S.S).....	51
Tableau 18 : Corrélations entre les pluviométries mensuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)	52
Tableau 19 : Test double-cumul entre les pluviométries mensuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)	52
Tableau 20 : Test double-cumul entre les pluviométries annuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)	52
Tableau 21: Les précipitations mensuelles et saisonnières du bassin de Bouregreg (S.S).....	61
Tableau 22 : Modules annuels des précipitations de chaque station	63
Tableau 23: Bilans hydrologiques annuels dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar	80
Tableau 24: Bilans hydrologiques annuels dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia	81
Tableau 25 : Variation du volume annuel dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la retenue du barrage SMBA.....	85
Tableau 26 : Evolution des besoins en eau potable et industrielle entre 2005 et 2020 au niveau de la zone de Rabat-Salé-Zammour-Zaërs	88
Tableau 27 : Résultats de dépouillement des données de la bathymétrie	96
Tableau 28 : Concentration des particules solides et dégradation du bassin versant de Bouregreg (S.L) dans divers périodes de temps.....	97
Tableau 29 : Concentration des particules solides et dégradation du bassin depuis 1974 à 2000 (Cumul).....	98
Tableau 30 : Paramètre du transport solide par période	100

Tableau 31 : Paramètre du transport solide par cumul depuis 1974 jusqu'à 2000	101
Tableau 32 : Méthodes préventives pour réduire l'envasement des retenues de barrage	102
Tableau 33 : Méthodes curatives pour réduire l'envasement des retenues de barrage	102

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Image satellitaire du bassin versant de Bouregreg (s.s).....	109
Annexe 2 : Carte de situation géographique de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique de Bouregreg Chaouia	109
Annexe 3 : Carte de la forme du bassin versant de Bouregreg (S.L)	110
Annexe 4 : Image satellitaire de la rencontre des deux principaux affluents du bassin versant Bouregreg (S.L)	111
<u>Annexe 5. Fiche technique du barrage sidi mohamed ben abdellah</u>	<u>115</u>
<u>Annexe 6. Les recommandations issues de l'atelier régional des pays méditerranéens</u>	<u>116</u>

INTRODUCTION GENERALE

Le Maroc est un pays dont les ressources en eaux sont limitées. Il dispose d'une quantité d'eau estimée à 22 milliards de m³, dont 18 milliards de m³ sont des eaux de surface et 4 milliards de m³ sont des eaux souterraines (site de Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et d'Environnement ; 2010). La plupart de ces ressources sont localisées principalement dans les régions du Nord et du Nord-Ouest, ce qui laisse apparaître un grand déficit dans le Sud. Avec des périodes de sécheresse qui sont de plus en plus fréquentes ces dernières années, ce déficit devient très grave et touche presque tout le royaume.

Pour faire face à cette situation et satisfaire la demande en eau estimée à 20 milliards de m³ à l'horizon 2020 (DGH, 1998), la politique du Maroc en matière des ressources en eau s'est orientée depuis longtemps vers la construction des barrages. Si l'objectif de départ était essentiellement agricole, par l'irrigation d'un million d'hectare à l'an 2000 et l'approvisionnement des grands centres urbains en eau potable, le monde rural quant à lui, et qui constitue plus de 50 % de la population en majorité non desservie, reste le plus touché par la manque d'eau (MAHFOUD, 1989).

Conscient de l'importance de l'eau dans le développement socio-économique et la stabilité de la population, une nouvelle stratégie a été adoptée depuis les années 1980. Cette stratégie, consiste à construire des infrastructures hydrauliques, lacs et barrages. Aujourd'hui, grâce aux efforts consentis, le Maroc a intimement lié son développement économique et social à la maîtrise et à la valorisation de l'eau. Ainsi, 128 grands barrages sont actuellement en service, totalisant près de 17.2 milliards de m³ de capacité, constituent le résultat de l'effort entrepris dans la mise en œuvre de la politique des barrages.

Les grands ouvrages hydrauliques jouent un rôle clé dans l'économie du pays. Ils contribuent de manière décisive à l'approvisionnement en eau des secteurs de l'eau potable, de l'irrigation et de la production énergétique. Ils permettent également la protection contre les inondations de larges zones du territoire national, d'améliorer l'environnement et la qualité des eaux à l'aval des cours d'eau dominés par des grands réservoirs.

Ils ont enfin contribué à un développement équilibré du pays en permettant l'émergence de véritables pôles régionaux d'activités économiques. Ces ouvrages

constituent également les piliers des projets de transfert d'eau entre les régions humides et les zones déficitaires en eau.

En plus de la réduction de la capacité, la sédimentation a un impact au niveau du réservoir lui-même, en amont, et en aval du barrage. Le Maroc fait partie d'une zone montagneuse caractérisée par un climat agressif avec alternance d'années sèches et humides, et des pluies d'automne dévastatrices pour les sols, d'autant plus qu'elles surviennent à une période où la couverture végétale est réduite ou inexistante, et les sols ameublissent par les labours.

La conséquence est que d'une part, les crues d'automne violentes, et brutales sont la cause d'une forte ablation, et d'autre part, le taux d'érosion dans les bassins versants est important, ce qui favorise l'apparition des courants de densité dans les réservoirs des barrages des pays de l'Afrique du nord.

Dans cette étude, on propose de mettre en relief la gravité du phénomène de la sédimentation des barrages au Maroc, à travers la quantification du taux d'envasement et l'analyse des étapes du processus de sédimentation du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah qui est installé sur le bassin versant de Bouregreg. Cette zone fait partie de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia. Le barrage SMBA constitue la source principale pour l'alimentation en eau potable des villes Rabat, Salé et Casablanca d'où son importance.

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Ce stage a été effectué à Rabat sous conseil de **Mr. Sabir** Directeur de l'Ecole National des Ingénieurs Forestiers (ENFI). Il a porté sur un coté bibliographique et la synthèse des documents fournis, ainsi que sur un coté pratique portant sur l'analyse des données pluvio-hydrométriques et sur les résultats des levés bathymétriques.

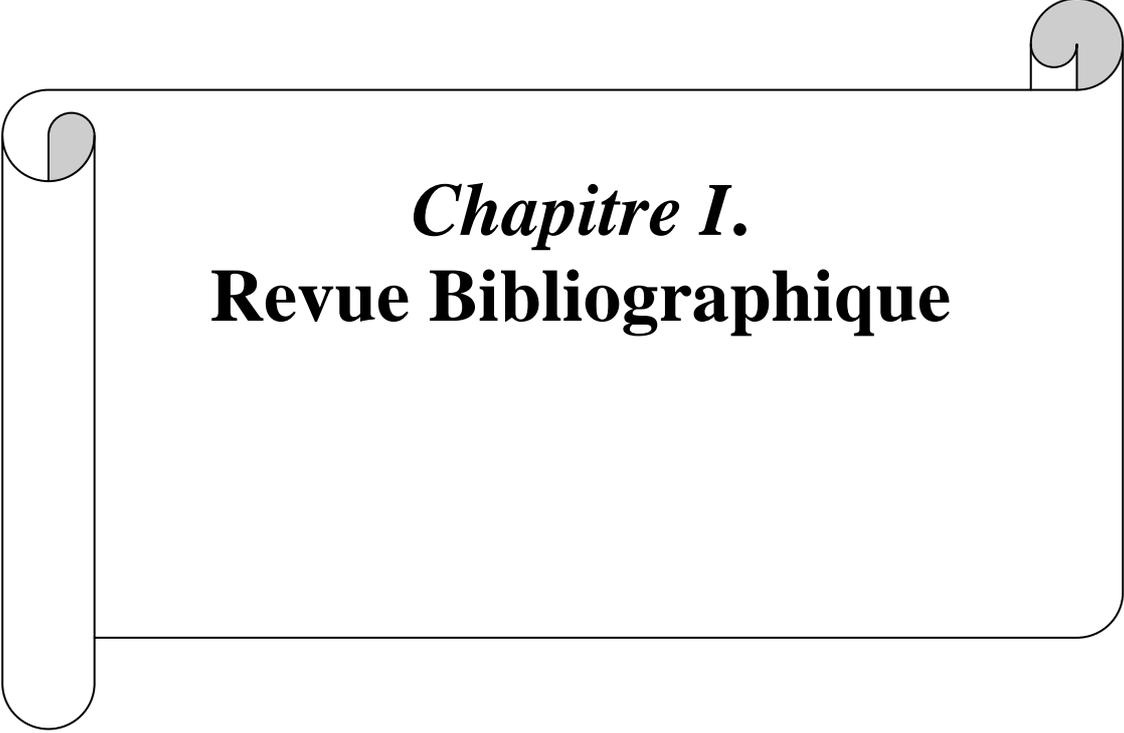
Les objectifs de cette étude sont multiples :

- Caractériser le régime pluviométrique ;
- Caractériser le régime hydrologique de l'oued Bouregreg;
- L'élaboration de bilans hydrologiques à différents pas de temps ;
- Evaluation de taux d'envasement du barrage SIDI Mohamed Ben Abdellah en utilisant la méthode bathymétriques.
- Proposer des méthodes adéquates pour remédier le problème d'envasement de la retenue du barrage SMBA.

Nous allons adopter une démarche qui consiste à :

- L'analyse et l'interprétation du régime pluviométrique ;
- L'étude du régime hydrologique de l'oued Bouregreg;
- L'élaboration de bilans hydrologiques à différents pas de temps ;
- l'analyse et l'interprétation des données bathymétriques.

Ceci après avoir caractérisé la zone étudiée sur le plan géologique et géographique ; récolté des données pluviométriques (précipitations journalières ou mensuelles des différentes stations du bassin), hydrométriques (débits moyens journaliers) et bathymétriques. Enfin illustré ces données par des graphiques plus parlants.



Chapitre I.
Revue Bibliographique

L'envasement des retenues de barrage

1. Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation dans les retenues de barrage

La sédimentation dans les retenues de barrages au Maroc, pose fréquemment d'importants problèmes qui réduisent la rentabilité de l'ouvrage (BOUTAIEB, 1988). C'est un phénomène qui exige un contrôle régulier de la vitesse de dépôt pour la mise à jour des courbes d'étalonnage et pour déterminer le taux d'envasement et par conséquent sa capacité utile et sa durée de vie.

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un « delta » en queue de la retenue. Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser, et à se consolider diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau.

Lorsque la concentration des sédiments est très élevée, les particules fines plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité (fig.1). La configuration géométrique des retenues sous forme de canal (fig.2) pour la plupart des barrages de l'Afrique du nord favorise les courants de densité à se propager jusqu'au pied du barrage. En l'absence d'ouverture des vannes, les sédiments drainés par les courants de densité, se déposent et se tassent puis se compactent selon leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu. (fig.3). Cette consolidation peut gêner, plus tard, l'évacuation des sédiments accumulés dans la cuvette lorsque les manœuvres des vannes seront opérées très en retard.

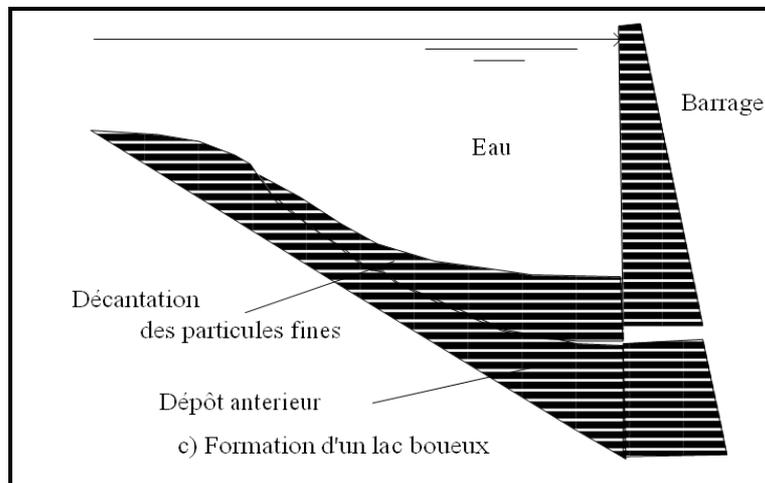
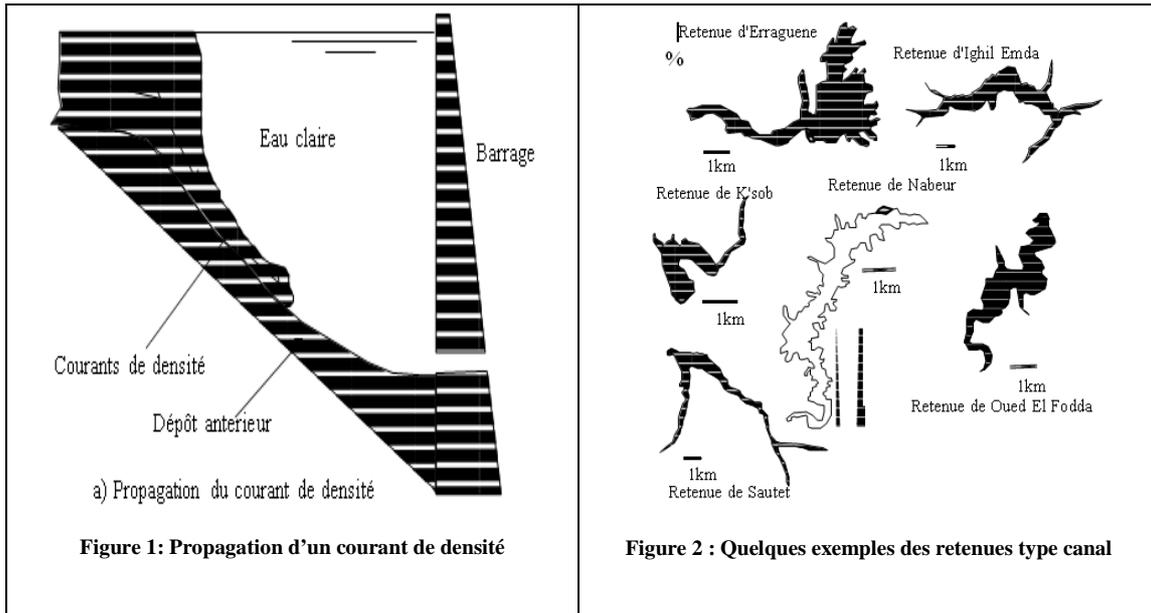


Figure 3 : Décantation et tassement des particules solides fines

2. Problèmes posés par la sédimentation

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui-même, mais aussi en amont et en aval du réservoir. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage. Le blocage des organes de vidange. La sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger.

Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance, et rendent difficile leur exploitation (fig.4).

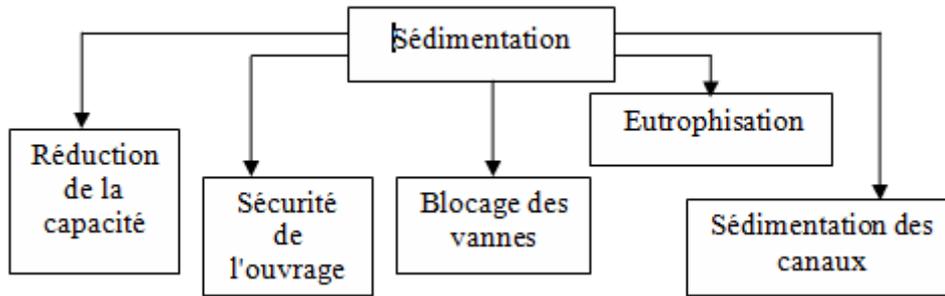


Figure 4 : Problèmes posés par la sédimentation

- Réduction de la capacité :

Les pays de l'Afrique du Nord comme l'Algérie, le Maroc, et la Tunisie, détiennent plus de 220 barrages d'une capacité de plus de 20 milliards de m³. Chaque année, un volume de 120 millions de m³ de vase se dépose dans les réservoirs (W. REMINI., B. REMINI., 2003).

Le barrage Mohamed V (Maroc) est considéré parmi les grands barrages de l'Afrique du nord, il reçoit annuellement un volume de vase égal à 11,6.10⁶ m³. Les quatre barrages marocains Mohamed V, Eddahabi, El Massira, et Bine El Ouidane reçoivent annuellement une quantité de vase de 30.10⁶m³, l'équivalent de ce que les 114 barrages algériens reçoivent annuellement. Ce qui diminue la capacité totale de la retenue (W. REMINI., B. REMINI., 2003).

- La sécurité de l'ouvrage

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. Ceci se traduit par l'accroissement de la masse spécifique qui peut atteindre 1,8 t/m³. Nous pouvons dire que si le taux de comblement d'une retenue dépasse 50% de la capacité initiale et la vase est en contact de l'ouvrage, dans ce cas, il faut prendre au sérieux la stabilité du barrage (W. REMINI., B. REMINI., 2003).

- Blocage des vannes

La présence des courants de densité dans une retenue accélère la sédimentation, et peut causer comme impact l'obturation des organes de vidange. La non maîtrise du mécanisme des courants de densité peut avoir un effet néfaste sur les vannes de fond. En effet, l'ouverture tardive des vannes de fond, par rapport à l'arrivée des courants de densité, favorise la consolidation des vases près des pertuis de vidange et rend plus difficile leurs manœuvres.

- Accélération de l'eutrophisation

Une fois déposées, les particules solides se tassent, et se consolident selon leur nature, et les conditions physico-chimiques du milieu. Du fait de l'eutrophisation

qui en résulte, la qualité de l'eau se dégrade très sérieusement. En effet, les déficits en oxygène, enregistrés près du fond du barrage El Khattabi (Maroc) en 2001 au cours de la saison d'été, ont provoqué une activité de biodégradation dans les zones profondes

- **Sédimentation dans les canaux d'irrigation**

Un autre problème délicat posé par la sédimentation est celui qui s'étend cette fois-ci à l'aval du barrage. En effet, l'irrigation par l'eau chargée provoque le dépôt des sédiments dans les canaux. La section mouillée diminue avec le temps et le par conséquent débit d'écoulement. Ce problème impose leur entretien, et leur dévasement de façon périodique.

Selon Badraoui A. et Hajji A., 2001 au Maroc, plusieurs canaux d'irrigation s'ensavent à chaque opération d'irrigation. C'est le cas du canal de rocade qui alimente les périmètres du Haouz central, et la ville de Marrakech. Il arrive souvent que les siphons se bouchent par la consolidation de la vase, et le curage devient donc indispensable, et d'une manière régulière.

3. Méthode de détermination de taux d'ensablement

Pour déterminer le taux d'ensablement des retenues, plusieurs méthodes sont utilisées. Certaines sont directes, par mesure du volume total de dépôt piégé au sein de la retenue. D'autres sont indirectes par le calcul du taux d'ablation des sols, auquel est associé un coefficient de délivrance qui représente le rapport entre le taux des sédiments arrachés aux champs et ceux déposés au cours du transport dans les rivières. C'est le cas par exemple des modèles de calcul de l'érosion très utilisés au Maroc, comme l'équation universelle de perte en sol USLE (WISHMEYER et SMITH, 1978) et sa forme révisées RUSLE (RENARD, 1996). Cependant, ces équations sont des relations empiriques qui doivent être considérées comme valides seulement dans leurs conditions d'application. En outre, elles n'expriment pas l'érosion totale d'un bassin versant. De ce fait les méthodes directes sont souvent privilégiées pour l'estimation de l'érosion totale du bassin versant.

Parmi les méthodes directes les plus utilisées au Maroc pour déterminer l'érosion, il y a la méthode turbidimétrique, la détermination de la dégradation à partir de la stéréophotographie aérienne des barrages, et la bathymétrie (LAHLOU, 1994 ; MARZOUKI, 1992 ; TAYAA, 1997) réalisée dans les retenues des barrages.

a. Méthode turbidimétrique

Cette méthode a pour objet de déterminer le volume solide annuel déposé dans les retenues à partir des mesures de turbidités observées aux stations hydrométriques se trouvant juste à l'amont des barrages, repose sur la connaissance des concentrations (g/l), déterminées au laboratoire à partir de prélèvements d'échantillons solides.

Les échantillons de transport solide prélevés dans des bouteilles de 1 litre à goulot large, constituent l'élément de prise. A chaque prise instantanée le temps du prélèvement est indiqué ainsi que la cote à l'échelle à laquelle correspond un débit liquide donné par les barèmes de débits obtenus à partir de la courbe de tarage de la station considérée. Remarquons, d'autre part que le transport de matériaux solides en suspension dans les périodes de basses eaux est négligeable. Etant donnée que la quantité de matières transportées augmente dans de fortes proportions lorsque les crues surviennent, les concentrations présentent de grandes variations d'où une fréquence de prise élevée.

L'analyse de dépôt solide au laboratoire est réalisée de la façon suivante: l'opérateur porte les renseignements suivants sur la liste de dépouillement: bassin, oued, station, date de prise en heure et minute, lieu du prélèvement, la cote à l'échelle à la station, la date de l'analyse, la température, la méthode d'analyse utilisée. Les filtres sont mis dans l'étuve à 100°C, durant 24 h et sont pesés. Le volume de l'échantillon est mesuré après agitation. On vide le contenu de l'échantillon agité sur le filtre placé dans l'entonnoir et on attend 1h approximativement. Le filtre avec son dépôt est placé dans l'étuve à 100°C durant 24 h puis placé pendant 15 min dans le dessiccateur pesé. En retranchant de ce poids celui du filtre sec, on obtient celui du dépôt solide qui, divisé par le volume exprimé en litre, donne la concentration en g/l, correspondant à l'échantillon prélevé.

La concentration instantanée ainsi déterminée est multipliée par le débit liquide instantané (tiré de la courbe d'étalonnage de la station) en vue d'obtenir la masse instantanée transitée par l'oued.

On en tire le turbidigramme fournissant la masse solide instantanée véhiculée en fonction de la durée de la crue. Cette courbe, planimétrée, donne la masse totale des matériaux solides durant la crue. Toutes les crues de l'année sont ainsi analysées et une distribution fréquentielle des apports solides déterminée.

b. Méthode de compagnes bathymétriques

Cette méthode est considérée parmi les méthodes directes pour la détermination de taux d'envasement. C'est la méthode qu'on a utilisé dans ce travail pour l'évaluation de taux d'envasement de la retenue du barrage SMBA. On va la détailler dans le quatrième chapitre.

c. L'équation universelle des pertes en terre (USLE)

L'équation universelle des pertes en terre (EUPT, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE : **Universal Soil Loss Equation**) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol.

Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers.

L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné.

Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'EUPT représentent avec plus de précision les moyennes à long terme.

Équation universelle des pertes en sol (USLE) :

$$\mathbf{A = R \times K \times LS \times C \times P}$$

A : exprime les pertes de terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes par acre par année. Cette valeur peut ensuite être comparée aux limites de « pertes de terre tolérables ».

R : correspond au facteur de pluie, caractérisant l'agressivité d'une pluie particulière, mesurée par sa force érosive ou énergie cinétique.

Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion.

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith nécessite la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse.

Elles sont données par la formule empirique de Wischmeier & Smith (1978) :

$$\mathbf{R = E_c I_{30}}$$

Cependant les seules données disponibles concernant les précipitations sont des moyennes mensuelles et annuelles.

Certains acteurs ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R.

La formule de Rango & Arnoldus (1987) peut être appliquée :

$$\mathbf{\log R = 1,74 * \log \sum (P_i^2 / P) + 1,29}$$

Où :

- **P_i** représente les précipitations mensuelles en mm;
- **P** les précipitations annuelles en mm ;

K : représente le facteur d'érodibilité du sol ou indice du sol (tableau, Facteur K). Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement.

Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22,2 m de long sur des pentes de 9 % et sur un sol nu, travaillé dans le sens de la pente et qui n'a plus reçu de matière organiques depuis trois ans.

La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer.

Le facteur érodibilité des sols est le taux d'érosion déterminé expérimentalement sous des conditions standard.

La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100K = 2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3)$$

- **M** est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$;
- **a** est le pourcentage de matière organique (MO) ;
- **b** est le code de la perméabilité (tableau 2) ;
- **c** est le code de la structure (tableau 3) ;

Facteur K			
Classe texturale	Organic Matter Content		
	Moyenne	Moins de 2 %	Plus de 2 %
Argile	0,22	0,24	0,21
Loam argileux	0,30	0,33	0,28
Loam sableux grossier	0,07	--	0,07
Sable fin	0,08	0,09	0,06
Loam sableux fin	0,18	0,22	0,17
Argile lourde	0,17	0,19	0,15
Loam	0,30	0,34	0,26
Sable fin loameux	0,11	0,15	0,09

Sable loameux	0,04	0,05	0,04
Sable très fin loameux	0,39	0,44	0,25
Sable	0,02	0,03	0,01
Terre franche argileuse	0,20	--	0,20
Loam sableux	0,13	0,14	0,12
Loam limoneux	0,38	0,41	0,37
Argile limoneuse	0,26	0,27	0,26
Loam limono-argileux	0,32	0,35	0,30
Sable très fin	0,43	0,46	0,37
Loam sableux très fin	0,35	0,41	0,33

Tableau 1 : Tableau de détermination du facteur K selon la texture du sol

Code	Perméabilité
1	Rapide
2	Moyenne à rapide
3	Moyenne
4	Lente à moyenne
5	Lente
6	Très lente

Tableau 2 : Détermination du code de perméabilité

Code	Structure du sol
1	Très fine
2	Fine
3	Moyenne ou grossière
4	Massive

Tableau 3 : Détermination du code de structure du sol

Certaines surfaces montrent une grande quantité d'éléments grossiers qui ralentissent l'érosion en interceptant les gouttes de pluies, ce qui inhibe l'effet splash (désagrégation des mottes du sol par l'impact des gouttes de pluies).

Ils réduisent la vitesse du ruissellement et font diminuer son énergie et sa capacité à détacher et à transporter les particules du sol. Plusieurs auteurs ont proposé des équations qui impliquent les proportions en éléments grossiers en surface et ajustent la formule de Wischmeier & Smith.

$$\mathbf{K \text{ ajusté} = K (0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2)}$$

Où

- **X** est le pourcentage des éléments grossiers de taille > **2mm** en surface ;
- **K** est le facteur calculé par l'équation de Wischmeier & Smith ;
- **Estimation de K à partir des abaques :**

En suivant l'analyse des échantillons de surface appropriés entrer par la gauche dans le graphe et pointer le % de silt (0,002 à 0,1 mm) puis de sables (0,10 à 2mm) puis de matières organiques , la structure et la perméabilité dans le sens indiqué par les flèches. Interpoler si nécessaire entre les courbes dessinées.

LS : est le facteur de longueur (L en m) et d'inclinaison (S en %) de la pente. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 22,13 m. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion. On établit le facteur LS à l'aide de l'équation servant au calcul du facteur LS donnée plus bas.

$$\mathbf{LS = [0,065 + 0,0456(\text{pente}) + 0,006541(\text{pente})^2] \times (\text{longueur pente} \div \text{cte}) \mathbf{NN}}$$

Où :

pente = inclinaison de la pente (%)
 longueur pente = longueur de la pente (pi)
 Cte = 72,5 en mesures impériales ou 22,1 en mesures métriques

NN = voir le tableau ci-dessous

Pente	< 1	1 < Pente < 3	3 < Pente < 5	> 5
NN	0,2	0,3	0,4	0,5

Tableau 4 : Détermination du paramètre NN

C : correspond au facteur de culture (végétation) et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre.

Le facteur C est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère.

La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales.

Le facteur C ainsi obtenu est une valeur généralisée du facteur C pour une culture en particulier, et ne tient pas compte des rotations des cultures, du climat ni de la répartition annuelle des précipitations dans les différentes régions agricoles du pays. Toutefois, ce facteur C généralisé donne des chiffres relatifs pour différents assolements et systèmes de travail du sol; il aide ainsi à évaluer les avantages respectifs de chaque système.

Type de culture	Facteur
Maïs-grain	0,40
Haricots, canola, maïs d'ensilage	0,50
Céréales (de printemps et d'automne)	0,35
Cultures horticoles saisonnières	0,50
Arbres fruitiers	0,10
Foin et pâturage	0,02

Tableau 5 : Facteur de type de culture

Méthode de travail du sol	Facteur
Labour d'automne	1,0
Labour de printemps	0,90
Déchaumage	0,60
Travail du sol sur billon	0,35
Travail du sol en bandes	0,25
Semis direct	0,25

Tableau 6 : Facteur de méthode de travail du sol

P : correspond au facteur de pratique de conservation.

Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion. Les pratiques de conservation les plus couramment utilisées sont le travail du sol à contre-pente, la culture suivant les courbes de niveau et la culture en bandes (tableau 7, Facteur P).

Pratique de conservation	Facteur P
Culture dans le sens de la pente	1,0
Culture à contre-pente	0,75
Culture suivant les courbes de niveau	0,50
Culture en bandes, à contre-pente	0,37
Culture en bandes, suivant les courbes de niveau	0,25

Tableau 7 : Facteur de pratique de conservation

• **Méthode d'utilisation de l'EUPT :**

1. Trouver le facteur R.
2. En fonction de la texture du sol, trouver le facteur K (tableau 1). Si un champ comporte plus de un type de sol et que ceux-ci ne sont pas très différents, utiliser le type de sol qui caractérise la plus grande partie du champ. Répéter cette étape, au besoin, pour les autres types de sol.
3. Diviser le champ en sections d'inclinaison et de longueur de pente uniformes. Attribuer une valeur LS à chaque section
4. Trouver les éléments type de culture et méthode de travail du sol propres à la culture envisagée. Multiplier ces deux éléments afin d'obtenir le facteur C.
5. Trouver le facteur P en fonction des pratiques de conservation utilisées (tableau 7).
6. Multiplier les cinq facteurs afin d'obtenir la perte de terre par acre.

d. La technique du CESIUM – 137 (Cs137) (*Mabit L., C. Bernard et M.R. Laverdière., 2002*)

Le césium 137 provient essentiellement de la fission de l'Uranium 235 et de l'Uranium 238 (fission = rupture d'un noyau d'atome) (fission d'un noyau d'Uranium de 235 donne un énorme dégagement d'énergie).

Cet élément a été introduit dans l'environnement dès 1945. Ses retombées sont plus importantes en 1952 avec l'avènement d'engins thermonucléaires puissants susceptibles de propulser les débris radioactifs dans la stratosphère. L'accumulation de ces débris par l'intermédiaire des précipitations constitue la principale source du Cs¹³⁷.

Le Cs¹³⁷ constitue un traceur important pour évaluer l'érosion des sols ; une fois en contact avec les sols il est facilement retenu et fixé par les éléments fins des sols. Il n'est prélevé par les cultures qu'en infimes quantités. De ce fait le mode de transport du Cs¹³⁷ est principalement réalisé avec le sol, et, par conséquent, les pertes

en sols sont proportionnellement à la réduction de l'activité du Cs¹³⁷ existant dans les sols.

La méthode d'étude préconisée dans cette technique consiste à délimiter, sur une carte, des unités homogènes définies par une combinaison entre la lithologie ; la nature des pentes et l'utilisation des sols, considérés comme facteurs déterminants de l'érosion. Ceci permet d'avoir des unités d'échantillonnage dans un milieu donné ; qui feront par la suite objet d'une prospection par sondage à l'aide d'un carottier (dont les dimensions sont de 50 cm de longueur et 5 cm de diamètre).

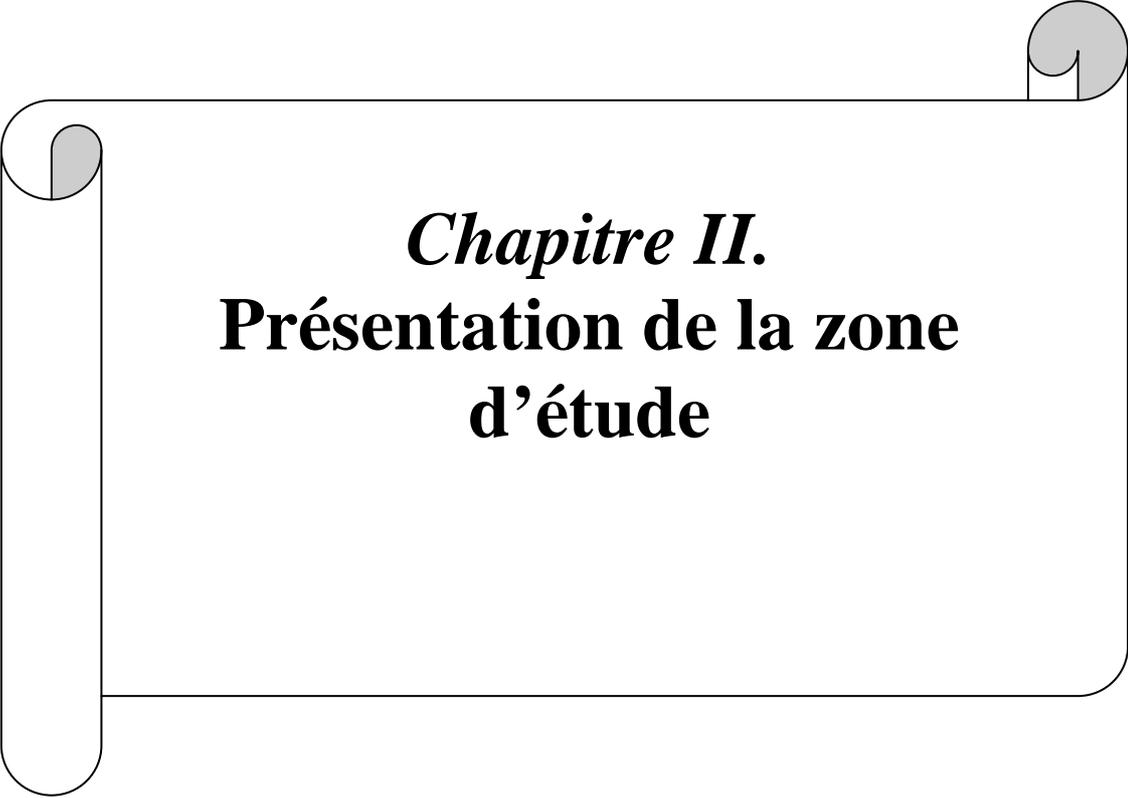
Les carottes prélevées de quelques cm de profondeur (35 cm) et 5 cm de diamètre doivent être séchées dans une étuve à 40°C et tamisées à travers des mailles de 2 mm de diamètre.

Un comptage du nombre des impulsions gamma émises par le Cs¹³⁷ doit être effectué à l'aide d'une chaîne spectrométrique constituée par un détecteur d'excellente efficacité (mesure de l'activité du Cs¹³⁷).

Résultat :

- Une activité spécifique élevée reflète une faible perte en Cs¹³⁷ et, par conséquent une faible érosion.

- Une activité spécifique faible montre forte perte en Cs¹³⁷ et, par conséquent une forte érosion.



Chapitre II.
**Présentation de la zone
d'étude**

I. Situation géographique du bassin versant de Bouregreg (S.S)

La zone étudiée (le sous bassin de Bouregreg) fait partie de l'ensemble du bassin versant de Bouregreg ; lequel est constitué par la réunion, à une vingtaine de kilomètres de son embouchure de deux oueds principaux : au Nord, le Bouregreg et le Grou au Sud, constitué lui même de deux rivières : Grou et Korifla. L'oued Akrech rejoint le Bouregreg à l'aval du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (S.M.B.A).

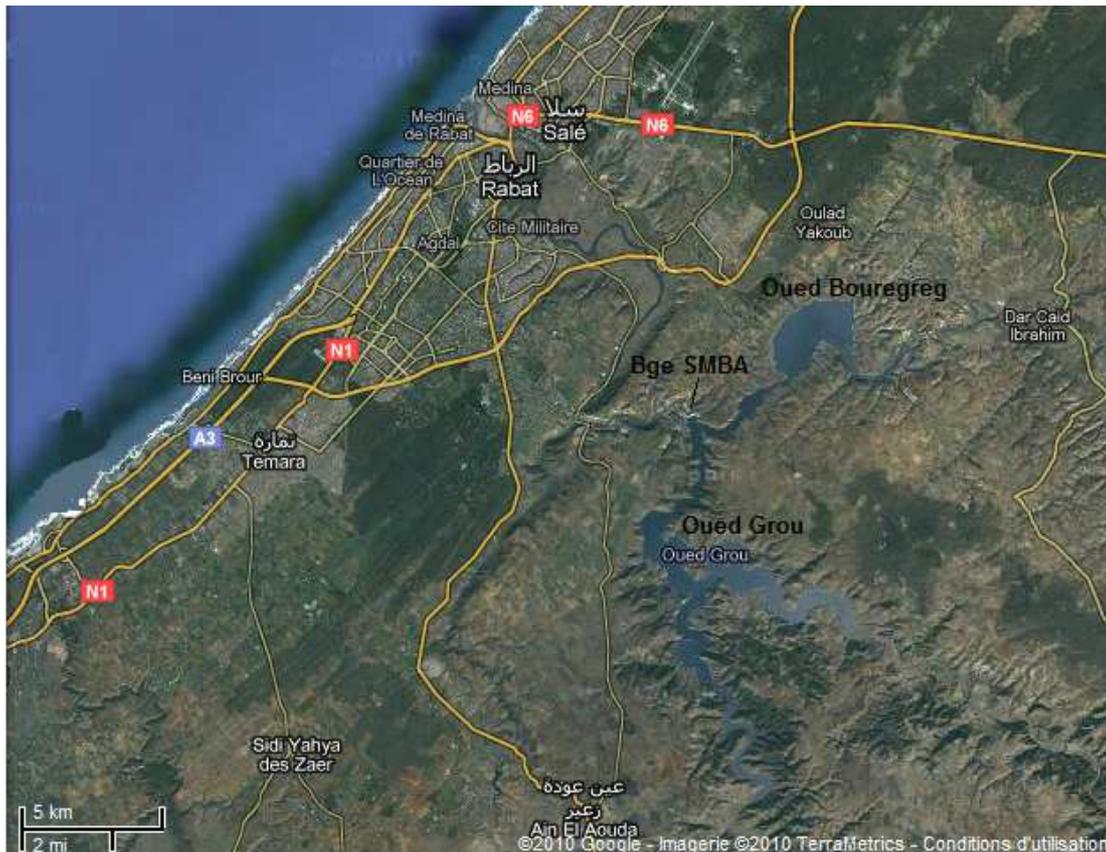


Figure 5 : l'embouchure et les deux oueds principaux du BV Bouregreg

Le bassin versant de Bouregreg sens strict (S.S) de superficie estimée à 3980 km², la longueur totale de l'Oued Bouregreg est de 240 Km (BENSALAH N., 2008). Ce sous-bassin s'étend sur trois provinces : Khemisset, Khénifra et Salé. La carte au-dessous caractérise le découpage administratif du bassin versant Bouregreg (S.S).

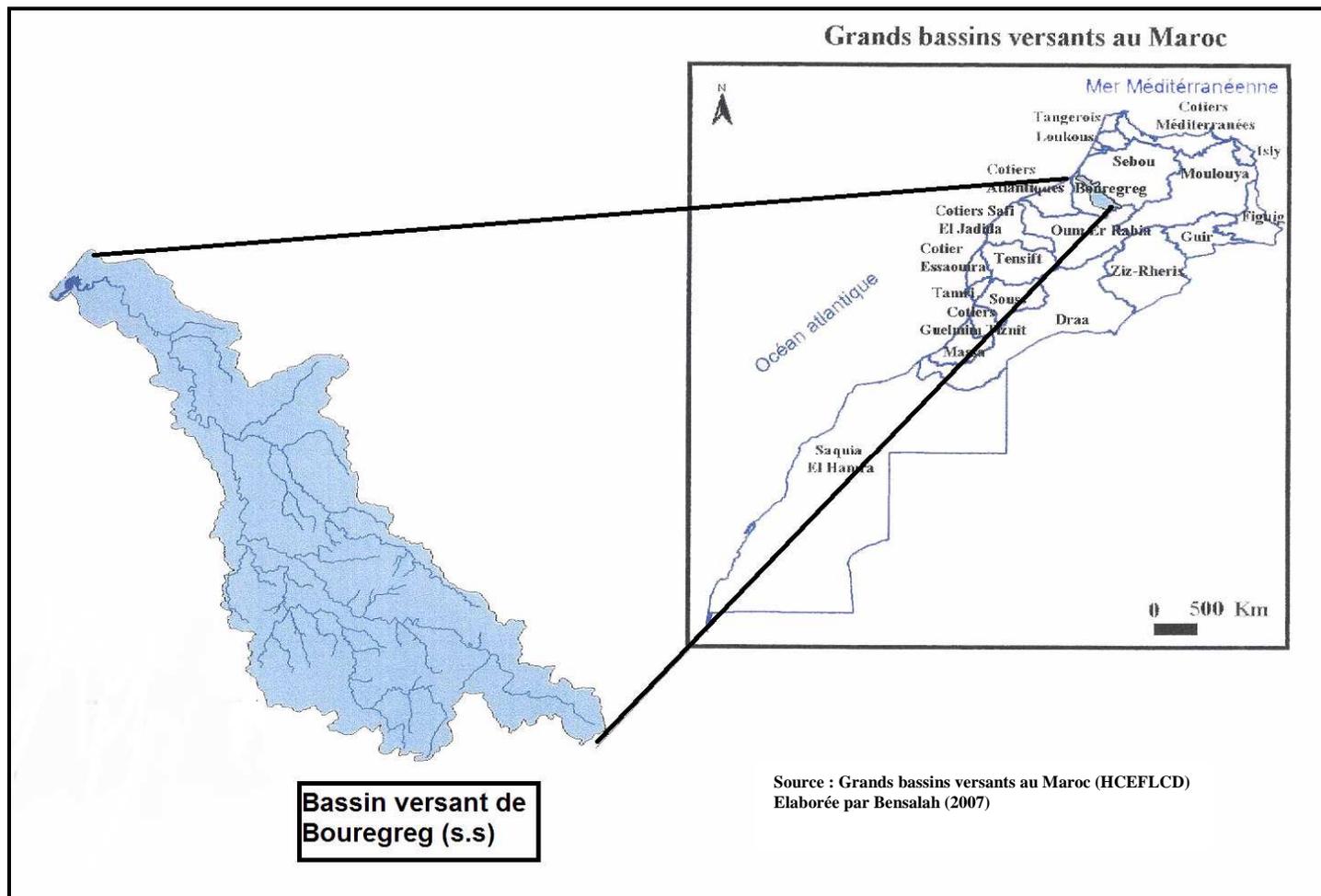


Figure 6 : Situation géographique du bassin versant de Bouregreg (s.s)

Chapitre II.
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

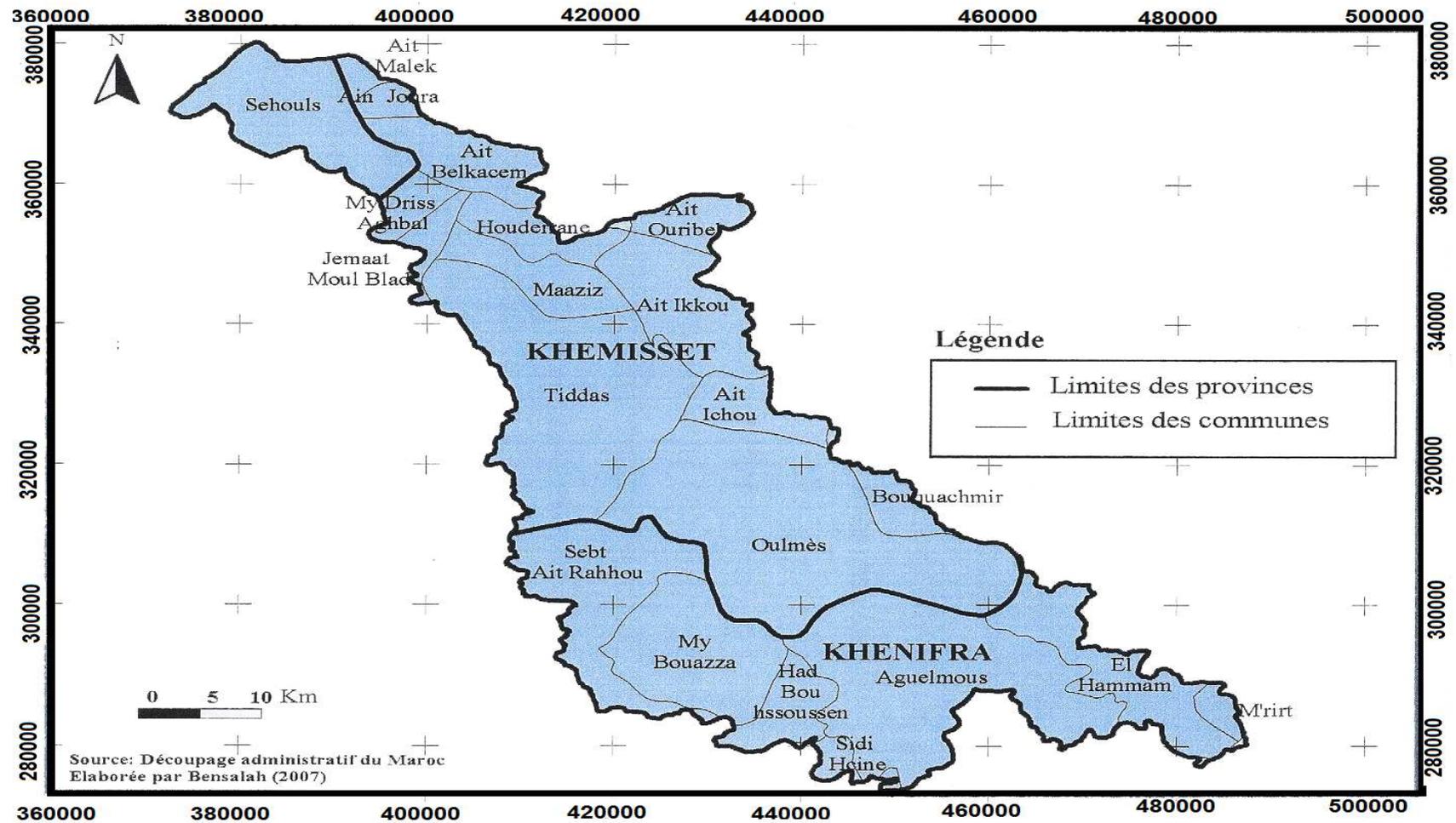


Figure 7 : Découpage administratif du bassin versant Bouregreg (s.s)

II. Description du milieu physique

Le bassin versant de Bouregreg (S.S) est caractérisé par un contraste amont-aval de sa morphologie (Beaudet, 1969) suite à une évolution géologique et géomorphologique. Il présente également une variété pédologique, végétale et climatique.

1. Géomorphologie

L'altitude moyenne du bassin versant de Bouregreg (s.s) est de 260 m NGM, présentant des valeurs maximales en montagne atteignant parfois 1200 m. Il est constitué de trois unités majeures de relief selon un gradient d'altitude croissant de l'aval vers l'amont : le palier inférieur, le palier intermédiaire et le haut pays (figure 8) (BENSALAH N., 2008).

Le palier inférieur regroupe les bas plateaux atlantiques. Les altitudes croissent de l'océan Atlantique à l'intérieur. L'encaissement des oueds est moyen. L'oued Bouregreg s'élargit autour du plateau de Sehouls et au douar Sidi Mohamed Ben Abdellah. Ces élargissements forment des plaines ondulées

Le palier intermédiaire est constitué de plateaux soulignés par des lignes de crêtes schisto-quartzitiques tel que Jbel Al Hadid (837 m) séparant les dépressions ou cuvettes (Tiddas et Maaziz). Au niveau de ce palier, les altitudes s'étagent entre 600 et 850 m.

Le haut pays est caractérisé par son altitude accusée et par l'encaissement vigoureux de ses vallées. Il est constitué par la juxtaposition de plusieurs unités structurales :

(i) Les crêtes culminantes correspondant aux couches gréso-quartzitiques cambriennes qui sont les plus dures et les plus épaisses des séries résistantes du socle hercynien. Les altitudes excèdent 1000 m et culminent à 1627 m au Jbel Mtourzgane. On cite Oum el Grinat (1190 m), Irhir ou Roumi (1218 m), Bou Mheraz (1404), Akzou (1564 m), Bou Mimoun (1321 m), et Bou Dobra (1604 m) ;

(ii) Les hauts plateaux qui atteignent des altitudes entre 1000 et 1330 m. Il existe deux types : les hauts plateaux schisto-gréseux réduits à l'état de lanières (Fourhal, Zguit et Telt) et les étendues planes d'Oulmès (1150-1200m) et de Ment (1200 m) correspondant à des batholites granitiques ;

(iii) les reliefs volcaniques sous divers formes : cônes isolés des volcans tels que le Jbel Arouguiaz (1284) situé au plateau Ment, tables rigides comme les murailles du Jbel Tergou (900 m) au sud d'El Harcha ou coulées dont l'énorme placage de basalte mis en place dans la vallée supérieure de l'oued Ksisksou.

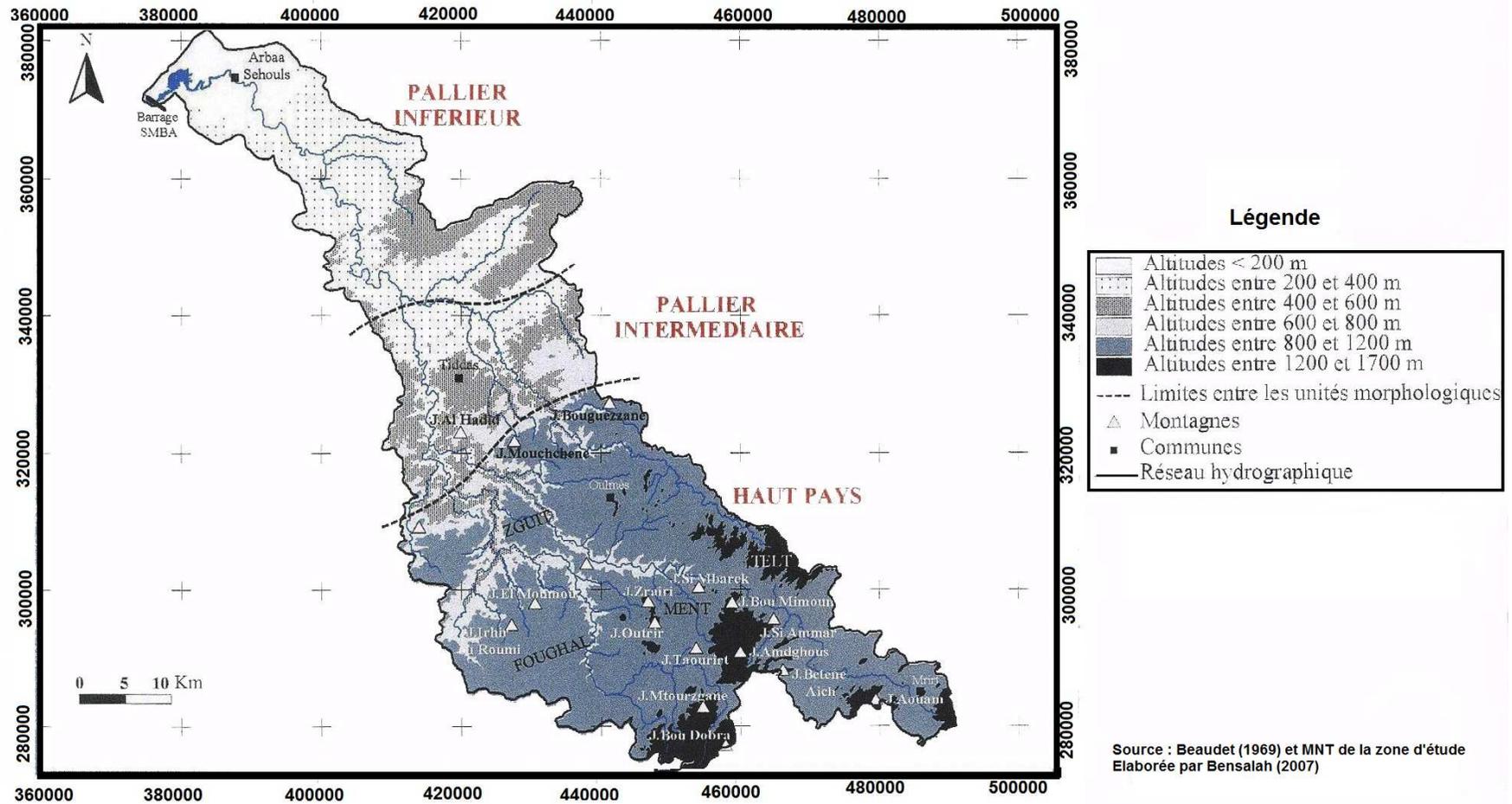


Figure 8 : Unités du relief du bassin versant de Bouregreg (S.S)

2. Hydrographie

Le Bouregreg (s.s) prend naissance dans le Massif central et chemine vers le littoral à travers la Meseta côtière selon une direction SE-NW conformément à la disposition topographique générale du Plateau Central (Beaudet, 1969 ; El Agbani, 1984) (figure 9).

La haute vallée de Bouregreg est formée par la réunion d'affluents supérieurs (Oued Mrirt, Oued Achbani, Oued Aguelmous...) qui appartiennent à la dépression orientale (couloir du Moyen Atlas). Le bassin perché au pied d'Aguelmous et les plaines de Mrirt et de l'Askar Tenndra représentent la zone de partage des eaux du Bouregreg. Ses principaux affluents résultent de la confluence d'un ensemble de sources qui émergent des crêtes délimitant au Sud-Est le haut pays de la dépression orientale.

Les hauteurs modérées des plateaux méridionaux du palier intermédiaire constituent le centre principal de dispersion des eaux du plateau central. Le bas Bouregreg est formé à son cours inférieur par la réunion des affluents Tanoubert et Sidi-Rahhou. Ils drainent la dépression de Rommani-Khemisset et se rencontrent dans la plaine alluviale de Maaziz. Les 23 derniers kilomètres du cours inférieur de l'oued Bouregreg constituent un estuaire.

Les nappes d'eau souterraines sont d'extension limitée. Au niveau du palier inférieur, elles sont localisées dans les dépressions alluvionnaires et sur les plateaux (calacarénite) au niveau de Sehoulis et de Tanoubert à Maaziz. (A.B.H.B.C, 2004). Les sources qui alimentent ces oueds sont, pour la majorité, temporaires et suivent un régime pluvial faute de réservoirs aquifères (imperméabilité du substrat).

Au niveau du palier intermédiaire, le milieu discontinu renferme également des petites nappes développées dans la zone du métamorphisme. Tel est le cas du plateau d'Oulmès connu par ses célèbres sources (Oulmès et Sidi Ali) et la nappe de Tiddas. Exploitées d'une façon intensive et abusive, toutes les nappes du bassin, accusent une baisse généralisée et progressive de leurs niveaux d'eau, témoin d'un déséquilibre hydraulique (A.B.H.B.C, 2004).

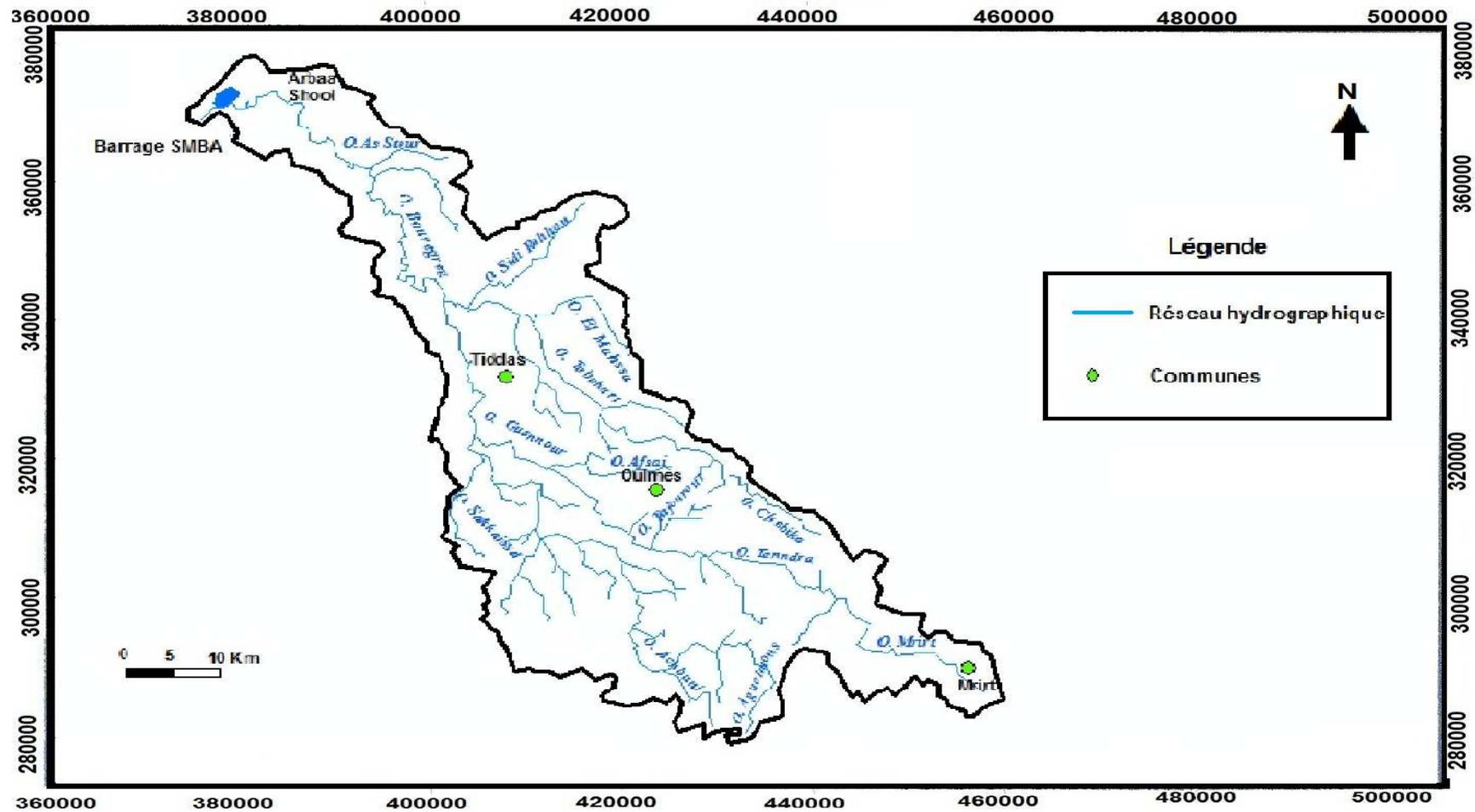


Figure 9 : Réseau hydrographique du bassin versant Bouregreg (S.S)

3. Lithologie et stratigraphie

Le bassin versant de Bouregreg (s.s) fait partie du massif hercynien central (ou Plateau Central). C'est une vaste aire de terrains paléozoïques plissés, schistosés, granitisés et métamorphisés par l'orogénèse hercynienne. Ce socle hercynien a été ensuite arasé et pénéplané par le jeu d'érosion au Permien. Au Trias, ces terrains ont été partiellement recouverts par des dépôts du Secondaire. La région est restée exondée au Jurassique (Beaudet, 1969 ; Michard, 1976 ; Benmohammadi, 1991).

Vue cette évolution paléogéographique, le bassin versant de Bouregreg (s.s) est caractérisé par une diversité lithologique, avec toutefois une nette prédominance des formations schisteuses et gréseuses au niveau du socle hercynien. Ces schistes s'alternent parfois avec des bancs de quartzites ou de grès formant des flyschs. Quelques roches calcaires apparaissent dans des secteurs localisés mais ne représentent que des superficies peu importantes. Des granites et des roches métamorphiques de faible superficie affleurent également dans les plateaux d'Oulmès et du Ment.

La couverture post-hercynienne est représentée au Trias par les argiles rouges salifères (à Maaziz, Tiddas,...). Le Trias a été aussi marqué par une importante activité volcanique qui a donné des coulées basaltiques injectées dans les argiles rouges du Trias. Ces basaltes doléritiques sont bien représentés à Tiddas, Sebt-Ait Ikkou et à l'Ouest de Maaziz. Des filons doléritiques de faible épaisseur se rencontrent aussi dans le bassin versant.

Sur les argiles rouges du Trias et dans la partie atlantique du bassin, il existe les marnes du Miocène supérieur sous forme d'une mince pellicule de 10 à 15 m. les marnes miocènes sont tapissés par des formations pliocènes rouges-brunâtres et comprenant des galets de grès et de quartzite.

Les niveaux quaternaires se manifestent essentiellement par des terrasses quaternaires. La carte au dessous donne une synthèse des types de roches et leur stratigraphie correspondante.

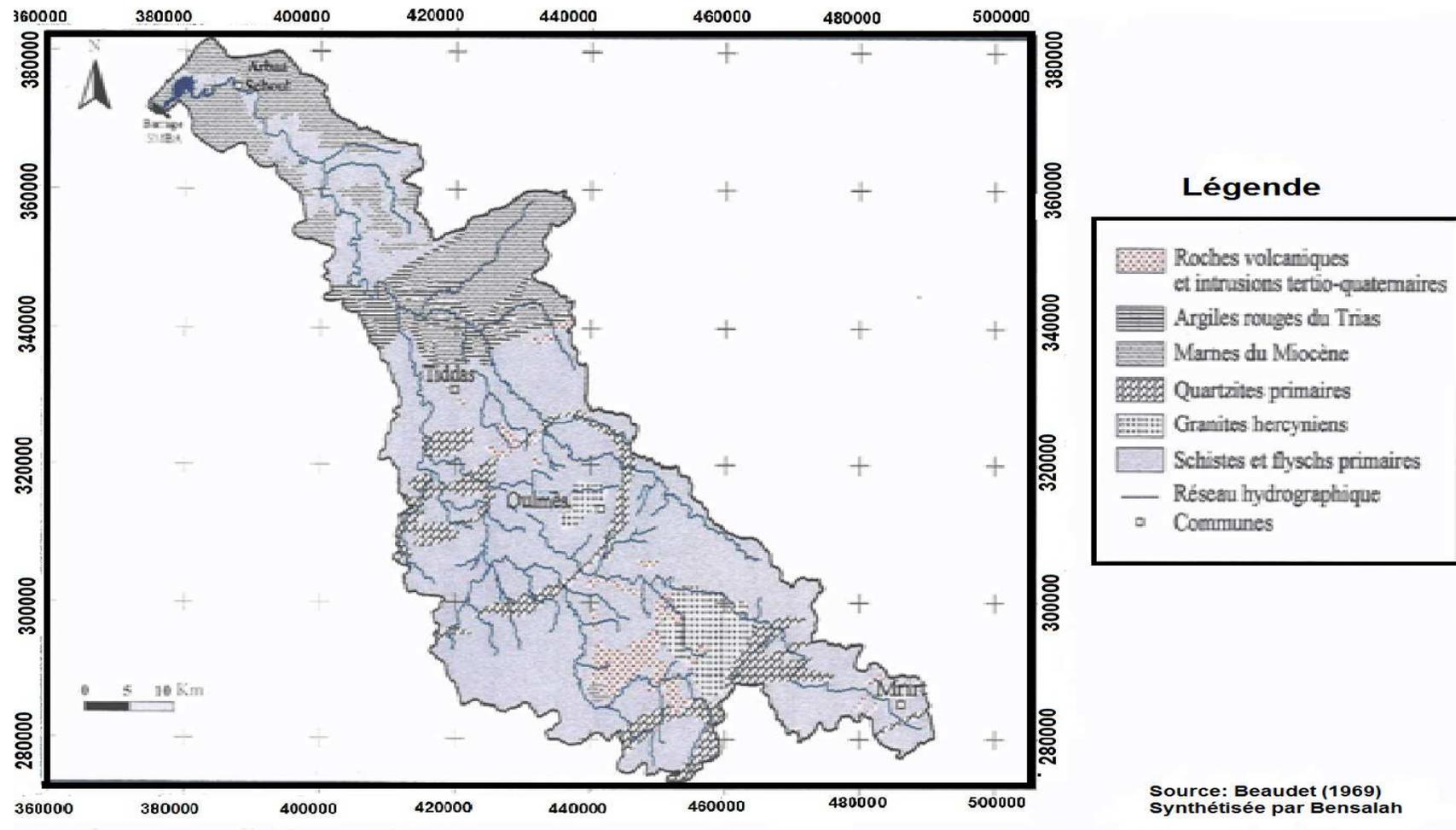


Figure 10 : Lithologie et stratigraphie du bassin versant Bouregreg (S.S)

4. Pédologie

La répartition des sols au niveau de la zone d'étude dépend principalement de la nature des roches mères et de la topographie (Beaudet, 1969 ; Ghanem, 1981 ; D.P.A de Khemisset, 1995).

Les schistes et les flyschs ont été fortement entaillés par l'érosion ancienne et offrent un relief accidenté avec des pentes assez fortes. Sur ces matériaux, les sols se répartissent en fonction de la pente et de l'exposition.

Sur les sommets, se trouvent des lithosols sous forme d'affleurements de barres de grés ou de quartzites et des régosols sous forme d'affleurements de schistes. Sur les versants, les sols développés varient selon la pente ou l'exposition (bilan hydrique du sol). Les sols peu évolués d'érosion existent dans des pentes fortes ou à exposition Sud ou Est. Les sols bruns forestiers et les sols rouges fersialitiques ou sols brunifiés se développent sur les pentes moyennes ou faibles, ou sur des versants à pente forte et à exposition Nord ou Ouest. Ces trois types de sols sont les plus répandus dans le bassin versant de Bouregreg (s.s). Ils sont caractérisés par une évolution rapide de la matière organique et par leurs hydromorphie temporaire. Cette dernière est liée à la fois à l'imperméabilité du substratum schisteux dominant, au climat et à l'évolution pédogénétique.

L'altération du granite a donné lieu surtout à des sols sablonneux. Ces sols sont très peu différenciés ; ils ont une texture sableuse et assez riches en matière organique et en sesquioxydes de fer libre (Ghanem, 1981).

Sur les argiles rouges et les basaltes doléritiques, les sols se répartissent en fonction de la topographie. On trouve des peu évolués (bad-lands) sur les pentes fortes, des sols isohumiques sur les replats et les pentes faibles et des vertisols dans les dépressions.

Les sols isohumiques sont caractérisés par une imprégnation profonde et progressive de la matière organique et présentent un profil calcaire peu différencié. Les vertisols sont des sols de couleur foncée, riches en argiles gonflante (montmorillonite).

Les marnes calcaires blanches du Miocène donnent lieu à des sols bruns calcaires et des sols calcimagnésiques peu profonds (20 à 40 cm) qui reposent sur des croûtes et sa fragmentation par les travaux de labour alimentent le sol en cailloux. Les

marnes argileuses jaunes donnent lieu à des sols vertiques. Sur les faciès gréseux et de calcaire dur se développent également des sols fersialitiques.

Les formations superficielles des plateaux sont caractérisées par les processus du concrétionement du fer et la formation des cuirasses ferrugineuses. Ainsi, elles sont dominées par les sols hydromorphes à concrétions ferrugineuses. Les deux caractères principaux de ce sol sont le lessivage des argiles et hydromorphie.

Les alluvions quaternaires sont principalement représentées dans les dépressions de Maaziz et de Tanoubert. Les alluvions des basses terrasses sont limoneuses et donnent lieu à des sols peu évolués d'apport. Les terrasses moyennes sont façonnées sur des argiles rouges de Trias et donnent lieu à des sols isohumiques ou à des vertisols.

La répartition des types de sols dominants dans le bassin versant de Bouregreg (s.s) est illustrée dans la carte au dessous. Leurs caractéristiques physico-chimiques sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les analyses ont été faites dans le laboratoire du Centre National de la Recherche forestière.

Tableau 8 : Caractéristiques physico-chimiques des types de sols dominants dans le bassin versant de Bouregreg (s.s) (BENSALAH N., 2008)

	BF	Br	F	Ca	Is	V	Hyd	Sab
pH(H ₂ O)	6,6	6,5	7	7,6	7,3	7,3	7,6	6,5
pH(KCl)	6,4	6,5	7,1	7,5	7,1	7,5	7,5	6,4
CaCO ₃ (%)	1,5	1,3	20,6	44,9	55,8	28,6	58	2,2
MO ₁₀ (%)	6,7	7,3	6,6	3,1	2,6	1,9	2,7	1,8
MO ₃₀ (%)	4,6	3,7	3,9	2,4	3,4	1,8	2,6	1,7
A (%)	19	14,5	17	9	17	31	14	9
L (%)	33	26,3	30,8	29	49	26	14	19
S (%)	48	59,3	52,3	62	34	43	72	72
LF (%)	22,4	14,7	16,8	6,9	25,1	3,5	9,9	11,7
LG (%)	10,6	11,6	14	22,1	23,9	22,5	4,1	7,3
A+LF (%)	41,4	29,2	33,8	15,9	42,1	34,5	23,9	20,7
S+LG (%)	58,6	70,9	66,2	84,1	57,9	65,5	76,1	79,3

BF : Sol brun forestier ; Br : Sol brunifié ; F : Sol fersialitique ; Ca : Sol calcimagnésique ; Is : Sol isohumique ; V : Vertisol ; Hyd : Sol hydromorphe ; Sab : Sols sablonneux ; CaCO₃ : Taux de carbonates de calcium ; MO₁₀ : Taux de matière organique dans la couche 0-10 cm ; MO₃₀ : Taux de matière organique dans la couche 20-30 cm ; A : Taux d'argile ; L : Taux de limons ; S : Taux de sables ; LF : Taux de limons fins ; LG : Taux de limons grossiers ; A+LF : Taux d'argile plus limon fin ; S+LG : Taux de sable plus limon grossier.

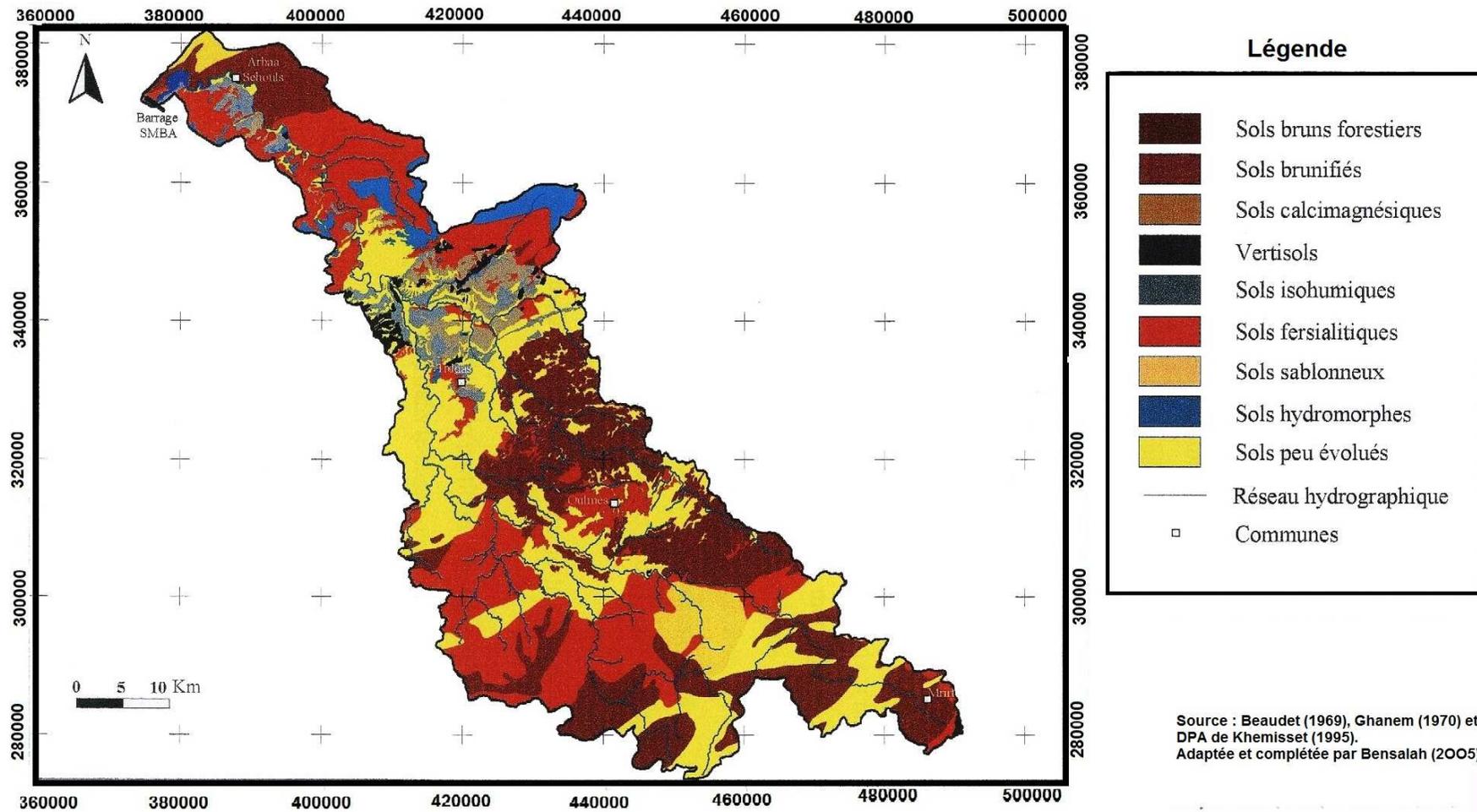


Figure 11 : Type de sol dominant du bassin versant Bouregreg (S.S)

5. Occupations des sols

Le bassin versant de Bouregreg (S.S) recèle une diversité paysagère floristique assez importante. Les écosystèmes de la forêt El Harcha et du plateau Ment son classés comme Sites d'Intérêt Biologiques et Ecologique (SIBE) du domaine continental (A.E.F.C.S, 1998).

Sept forêts sont aménagées dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) : Ait Ichou Ouest, Ait Alla Ouest, El Harcha, Bouregreg, Tifoughaline, Sehoulis et Bouhssoussen. Les espèces dominantes sont le chêne liège (*Quercus suber*) et le chêne vert (*Quercus rotundifolia*). Les chênes sont remplacés en conditions défavorables par des espèces moins exigeantes en eau telle que le thuya (*Tetraclinis articulata*), l'oléastre (*Olea oleaster*) et le lentisque (*Pistacia lentiscus*).

Le reste du bassin versant est occupé par des matorrals destinés au parcours, des reboisements (*Eucalyptus* sp, et *Pinus* sp.) ou des terrains de cultures. La céréaliculture est la spéculation la plus répandue dans la zone. Le blé tendre est le plus cultivés dans la zone, suivi du blé dur, de l'orge et de triticale. Les autres cultures concernent le maraîchage, les cultures fourragères et les légumineuses. L'arboriculture fruitière, utilisant des techniques modernes et d'irrigation, est développée particulièrement dans les bas plateaux à Ain Johra et Sehoulis. La zone d'Oulmès est aussi caractérisée par les plantations des rosacées (pommier, poirier, cerisier,...) de deux grands domaines arboricoles (ARBOR et ABS) dont la superficie est estimée à 430 ha.

La culture de plantes aromatiques Médicinales (PAMs) concerne la lavande dans la zone d'Oulmès et Tarmilet.

La carte en bas illustre, d'une manière générale, la répartition des espaces forestiers et des terrains non boisés (matorrals et terrains cultivés) dans le bassin versant de Bouregreg (s.s).

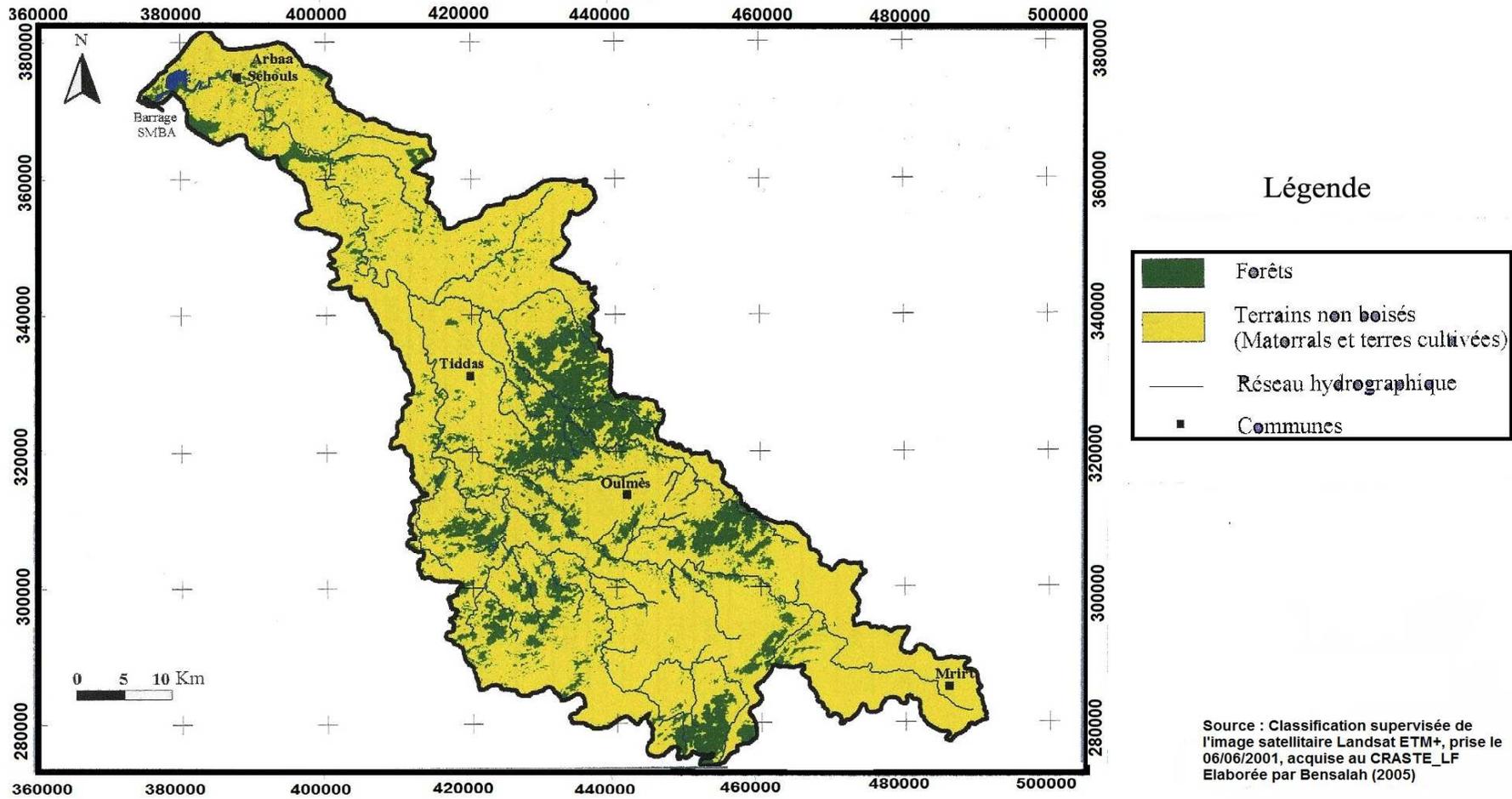


Figure 12 : Utilisation des terres dans le bassin versant Bouregreg (S.S)

6. Climatologie

a. Température

Etant donné que l'ensemble du bassin s'étale du Nord au Sud sur un ou deux degrés de latitude, ce paramètre influence peu l'évolution des températures. En revanche, l'altitude et le degré de continentalité présentent les principaux facteurs qui influencent l'évolution de la température atmosphérique.

Cependant, dans l'ensemble du bassin versant de Bouregreg (s.s), ce paramètre climatique n'est pas mesuré comparativement aux précipitations. Les données retrouvées dans la bibliographie indiquent que les températures maximales du mois le plus chaud varient de 28 à 40°C et les températures minimales du mois le plus froid varient de 1 à 8°C.

b. Synthèse bioclimatique

Diverses formules ont été synthétisées pour caractériser le climat méditerranéen. Toutefois, ce sont les travaux d'Emberger (1955) et de Bagnouls et Gaussen (1953) qui se sont avérés les plus pratiques et les plus appliqués. En effet, ces travaux reposent sur des paramètres facilement quantifiables qui sont les températures et les précipitations.

- *Amplitude thermique*

L'amplitude thermique (M-m) est la différence entre la moyenne des maxima du mois le plus chaud et la moyenne des minima du mois le plus froid. Debrach (1953), définit quatre types de climat à travers cette amplitude :

$M-m < 15$	Climat insulaire
$15^{\circ}\text{C} < M-m < 25^{\circ}\text{C}$	Climat littoral
$25^{\circ}\text{C} < M-m < 35^{\circ}\text{C}$	Climat semi-continentale
$M-m > 35^{\circ}\text{C}$	Climat continental

L'analyse du régime des températures à travers le bassin versant de Bouregreg (s.s), (tableau9), permet de distinguer trois zones thermiques :

Tableau 9 : Valeurs de l'amplitude thermique de quatre stations dans la zone du bassin versant de Bouregreg (s.s)

Station	M	m	M-m	Régime
---------	---	---	-----	--------

Rabat	28,4	8,1	20,3	Climat littoral
Tiddas	35,1	4,5	30,6	Climat semi-continental
Oulmès	33,8	3,2	30,6	Climat semi-continental
Khénifra	40	1,2	39,1	Climat continental

- La région de Rabat-Salé, représentant l'exutoire, sous climat littoral vue sa proximité de l'océan atlantique, avec une amplitude thermique de 21°C.

- Le palier intermédiaire et le haut pays sous climat semi continental, avec amplitude thermique de 30°C en moyenne ;

- La région de Khénifra ; dont l'amplitude thermique atteint 39°C qui correspond au climat continental. Il s'agit du début de la zone de dépression orientale, située au pied du haut pays et dont l'amplitude est influencée par l'éloignement de l'océan et la position abritée qui permettent des écarts thermiques considérables.

- *Quotient pluviothermique d'Emberger*

Le quotient pluviothermique d'Emberger (1955) est défini comme suit :

$$Q_2 = 2000 * P / (M^2 - m^2)$$

Avec : P : pluviométrie annuelle (mm) ;

M : moyenne des T° maximales du mois le plus chaud ;

m : moyenne des T° minimales du mois le plus froid ;

M et m : sont en degré Kelvin (0°K= °C + 273,2) ;

La combinaison du Q₂ et du m permet de déterminer l'ambiance bioclimatique d'une station donnée.

Tableau 10 : Ambiances bioclimatiques déterminées en fonction des paramètres Q₂ et m (Emberger ; 1955)

Valeurs de Q ₂	Type de bioclimat	Valeurs de m	Type de variante

Chapitre II.
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

20 < Q₂ < 30	Bioclimat méditerranéen aride	m > 7°C	Variante chaude
30 < Q₂ < 50	Bioclimat méditerranéen semi-aride	3 < m < 7°C	Variante tempérée
50 < Q₂ < 90	Bioclimat méditerranéen subhumide	0 < m < 3	Variante fraîche
Q₂ > 90	Bioclimat méditerranéen humide	-3 < m < 0	Variante froide

Les valeurs de Q₂ et m, selon le tableau ci-dessous, montrent que le climat est subhumide au niveau de bassin versant de Bouregreg (s.s). La variante est chaude niveau au niveau de la région de l'exutoire, tempérée au niveau du palier intermédiaire et du haut pays et fraîche dans la région amont du bassin versant.

Station	P	M	m	Q ₂	Type de bioclimat
Rabat	393	28,4	8,1	66	Bioclimat méditerranéen subhumide à variante chaude
Tiddas	478	35,1	4,5	53	Bioclimat méditerranéen subhumide à variante tempérée
Oulmès	497	33,8	3,2	56	Bioclimat méditerranéen subhumide à variante tempérée
Khénifra	627	40	1,2	55	Bioclimat méditerranéen subhumide à variante fraîche

Tableau 11: Valeurs du quotient d'Emberger (Q₂) et bioclimats correspondants au niveau de quatre stations dans la zone du bassin versant de Bouregreg (s.s)

- *Diagramme ombrothermique de BAGNOULS-GAUSSEN*

Selon Bagnouls et Gaussens, un mois est sec quand la pluviométrie enregistrée au cours de ce mois est inférieure au double de la température moyenne du même mois. Cette méthode permet ainsi de déterminer les mois secs de l'année ainsi que la durée de la saison sèche.

L'analyse des diagrammes ombrothermiques permet donc de conclure que la saison sèche à Oulmès est plus courte (5 mois) par rapport à celle de Rabat (5,5 mois, mais elles restent quand même relatives longues et handicaperaient le développement de la végétation.

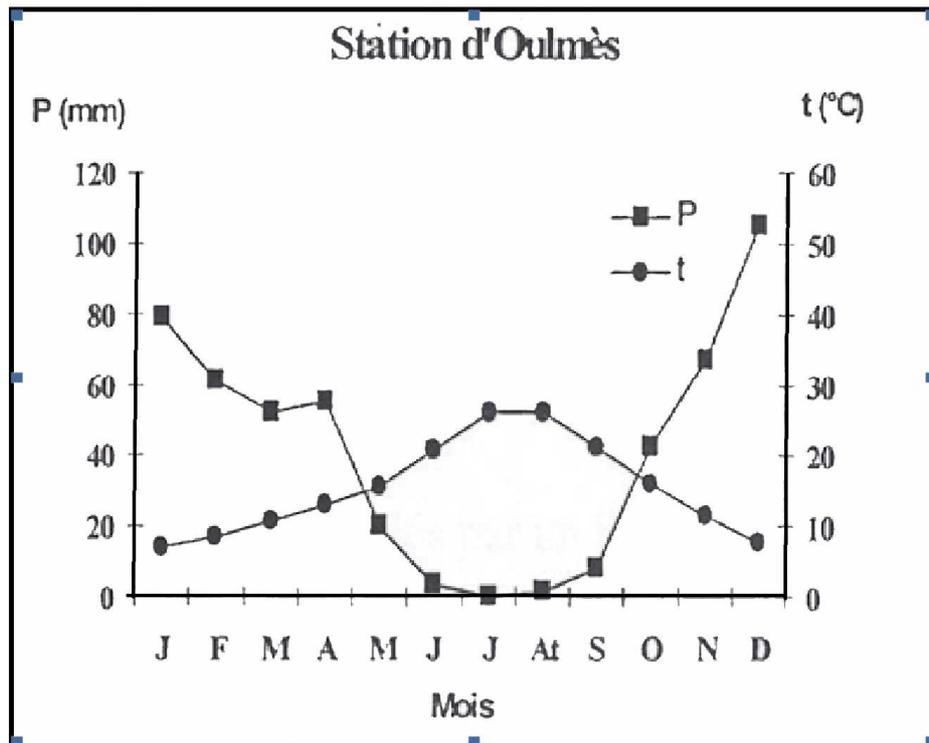


Figure 13 : Diagramme ombrothermique de la station d'Oulmès

c. Indice d'agressivité climatique

En relation avec l'objectif de cette étude, l'étude du climat au niveau du bassin versant de Bouregreg (s.s) a également concerné le calcul de l'indice d'agressivité climatique, considéré comme l'un des facteurs régissant les phénomènes de l'érosion cause principal du phénomène d'envasement des retenues du barrage.

La forme utilisée est celle d'Arnoldus (1980) :

$$R = 17,53 * ((11,5 * \log(\sum_{i=1}^{12} P_i^2 / P)) - 0,8188)$$

Avec R : Indices d'agressivité climatique ; $\sum_{i=1}^{12} P_i^2$: Somme des carrés des précipitations mensuelles de toute l'année ; P : précipitations annuelles.

Les indices d'agressivité moyens correspondants aux 25 stations retenues également à la moyenne des indices calculés pour chaque année.

Tableau 11 : Indices d'agressivité climatique moyens (Rmoy) des stations pluviométriques au niveau du bassin versant de Bouregreg (s.s) (BENSALAH N., 2008).

Station	R moy	Station	R moy
Aguibat Ezziar	362	Oulmès	381
Ain Loudah	353	Rabat-Salé	385
Barrage El Kansera	347	RasEl Fathia	360
Barrage S.M.B.A	376	Rommani	352

Chapitre II.
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chacha n amelah	370	Sidi Amar	353
Chbouka	389	Sidi Battach	376
Cheikh Reguig	375	Sidi Mohammed chérif	354
DarSoltane	372	Sidi mokhfi	367
Lalla Chafia	351	Sidi Jabeur	340
Maaziz	339	Takbalt	377
My Bouazza	382	Tarhat	375
Ouljet Haboub	331	Tsalat	369
Ouljet Soltane	351		

Les indices d'agressivité moyens pour chaque station ont été extrapolés par un logiciel de SIG dans le but d'élaborer la carte des isoR. Cette carte met en évidence l'influence positive de deux facteurs sur l'agressivité climatique. Il s'agit de la proximité de la mer au niveau du palier inférieur et de l'effet orographique au niveau du haut pays. Dans ces deux paliers, l'indice R atteint son maximum (385 à la station Rabat-Salé et 381 à la station Oulmès). Dans les cuvettes de Maaziz et Tiddas, l'indice diminue jusqu'au 340.

On observe que l'indice R calculé ne dépasse pas la valeur 400. L'influence de l'agressivité climatique ne serait pas assez intense. Ceci ne suppose pas un faible risque d'érosion et de ruissellement si les sols sont susceptibles à l'érosion hydrique et à l'influence du splash.

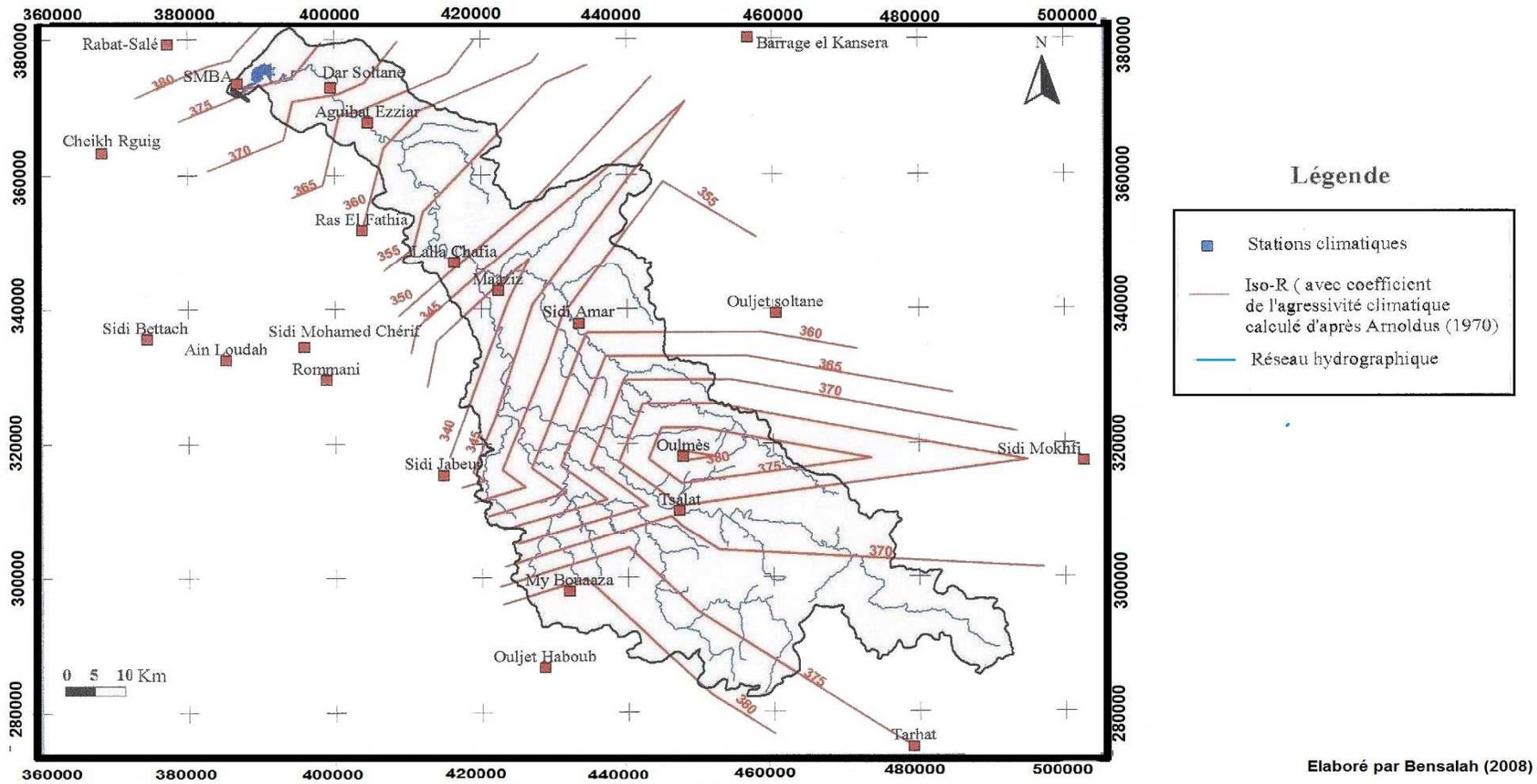


Figure 14 : Répartition spatiale de l'agressivité climatique dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) pour la période la période 1972-2002

d. Précipitations

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles et annuelles va être détaillée dans le chapitre suivant.

III. Description du milieu humain

Dans le bassin versant de Bouregreg, le milieu humain présente des caractéristiques démographiques et des activités socio-économiques qui reflètent l'influence de l'action anthropique sur les risques de ruissellement et d'érosion.

1. Démographie

La répartition de la population dans le bassin versant de Bouregreg (s.s) est influencée par les caractéristiques géomorphologiques. Le palier inférieur est réparti entre les tribus «Zemmour » et « Zaer ». L'agriculture et l'élevage représentent les activités principales de ces tribus. Le palier intermédiaire et le haut pays sont occupés par la tribu « Zayane ». Les habitants de cette région pratiquent l'agriculture et l'élevage (système agro-sylvo-pastoral) (Aderghal, 1993).

On note qu'entre 1994-2004 dans l'ensemble des communes, le nombre des habitants a connu une diminution plus ou moins importante exceptée les trois centres Maaziz, Aguelmous et Oulmès. Ceci peut être expliqué par l'exode vers les centres et les villes à la recherche du travail plus rémunérant. Les jeunes ne veulent plus continuer à faire ce que les anciens ont fait jusqu'à présent pour assurer leur subsistance.

La carte au-dessous illustre l'évolution de la démographie dans les principales communes intégrant le bassin versant Bouregreg (s.s).

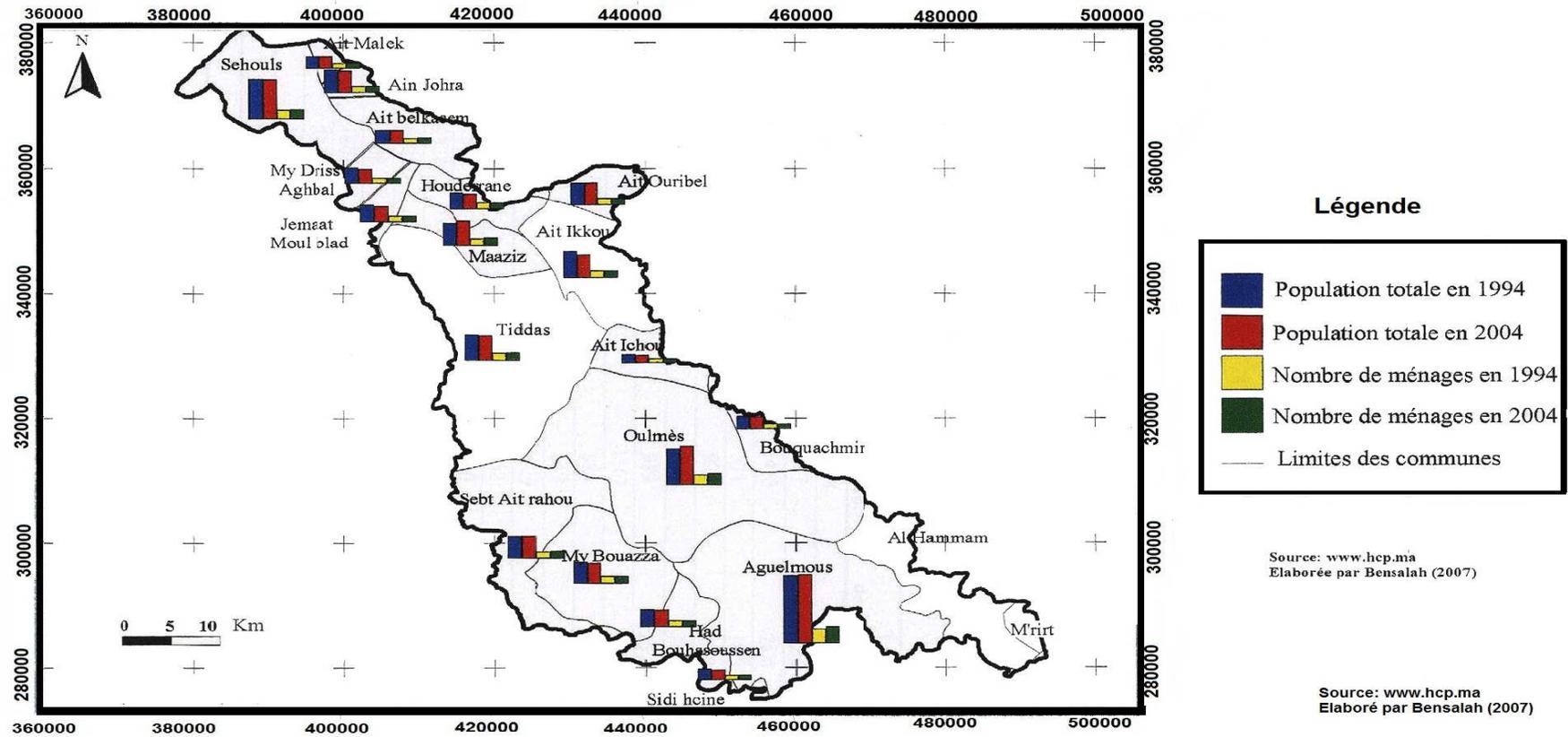


Figure 15 : Evolution de la population totale et des ménages entre 1994 et 2004 dans les principales communes intégrant le bassin de Bouregreg (S.S)

2. Activités socio-économiques

D'après les statistiques (D.P.A.E, 1996), l'analyse du niveau d'instruction de la population du bassin versant de Bouregreg (S.S) montre que 82% sont analphabètes. En moyenne, 6% ont eu accès à l'école coranique ou jusqu'au primaire. Les études collégiales, au lycée ou supérieurs sont très rares, ils ne dépassent pas 2% du total. La région de Sehoulis est caractérisée par un nombre assez important des jeunes qui poursuivent leurs études supérieures, du fait de la proximité de la capitale.

La majorité de la population active travaille dans le secteur agricole. Les activités non agricoles sont peu nombreuses (administration, industrie, artisanat...). Cependant, le nombre des jeunes chômeurs est en croissance. Leur faible niveau d'instruction et le faible développement économiques de la région aggravent ce phénomène.

Tableau 12 : Activités socio-économiques dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996)

COMMUNES	Activités Agricoles	Activité non agricoles	Nombre de chômeurs	Taux de chômage (%)
Ait Ouribel	3846	230	1158	22,1
Ait Ichou	903	79	287	22,6
Ait Ikkou	4148	326	1415	24
Bouqachmir	2288	84	531	18,3
Bouddrane	2793	261	925	23,2
Haaziz	1542	265	519	22,3
Oulmès	2856	111	989	25
Tiddas	4720	514	1362	20,6
Jemaat Moul Blad	1845	167	888	30,6
My Driss Aghbal	1912	88	549	21,5
Ala Johra	3690	199	1029	20,9
Ait Malek	1381	83	352	19,4
Ait Belkacem	1541	232	700	28,3
Aguelmous	9328	404	2738	22
El Hammam	6095	434	1845	22
Had Bouhssoussen	1908	109	498	19,8
My Bouazza	1603	104	399	18,9
Sebt Ait Rahhou	3369	162	1034	22,7
Sidi Heine	1140	49	309	20,6
Sehoulis	9884	961	1752	13,9
Total	66792	4862	19279	21,935

3. Agriculture

Vu la faiblesse des ressources en eau souterraine, conséquence de la formation géologique de la région et la non mobilisation des eaux superficielles, l'irrigation reste très limitée. La superficie irriguée est de l'ordre de 5019 ha soit 2,3% de la surface utile agricole (SAU). Elle est constituée pour la majorité de la petite et moyenne hydraulique (PMH) privée (irrigation par pompage) particulièrement dans la région d'Oulmès et Sehouls. Le morcellement et l'exiguïté des exploitations entravent une gestion durable des eaux et sols.

COMMUNES	Nombre d'exploitations	Nombre de parcelles	SAU (ha)	Nombre de parcelles par exploitation	Taille moyenne de l'exploitation	Bour (ha)	Irrigué (ha)
Ain Johra	1 243	5454	13 142	4	11	12 788	354
Ait Belkacem	935	2 341	8 532	3	9	8 421	111
Ait Ichou	366	1 108	3 465	3	9	3 446	19
Ait Ikkou	1 742	5 690	11 841	3	7	11 763	78
Ait Malek	439	1 510	6 925	3	16	6 821	104
Ait Ouribel	1 388	6 878	9 530	5	7	9 236	294
Bouqachmir	615	1 805	7 191	3	12	7 159	32
Houderrane	1 186	3 797	7 989	3	7	7 814	175
jemaat Moul Blad	1 055	4 238	11 437	4	11	11 119	318
Maaziz	795	2 512	6 459	3	8	6 101	358
My Driss Aghbal	645	2 773	6 505	4	10	6 479	26
Oulmés	1 203	3 248	18 023	3	15	17 534	489
Tiddas	1 878	5 160	18 896	3	10	18 361	535
Aguelmous	3 142	16 674	27 176	5	9	26 780	396
El Hammam	2 279	8 207	15 195	4	7	14 431	764
Had Bouhssoussen	607	2 761	5 590	5	9	5 523	67
Hay Bouazza	503	2 046	4 590	4	9	4 553	37
Sebt Ait Rahhou	1 196	3 795	8 811	3	7	8 776	35
Sadi Hcine	358	1 783	2 571	5	7	2 538	33
Sehouls	2 716	20 102	2 571	7	1	19 308	794
Total	24 291	101 882	213 970	4	9	208 951	5019

Tableau 13 : Caractéristiques de la surface utile agricole (SAU) dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).

La céréaliculture est la culture la plus répandue dans la zone. La superficie occupée par la céréaliculture est de l'ordre de 144.996 ha soit 68% de la S.A.U. Les

céréales constituent une catégorie de produits particulièrement importants car elles interviennent en priorité dans l'autoconsommation, dans les échanges commerciaux (vente au souk) et dans l'alimentation du cheptel (grains, paille, chaumes...). Les autres spéculations concernent les cultures maraichères, fourrages, légumineuses, arboriculture (olivier et arbres fruitiers) et PAMs (lavande).

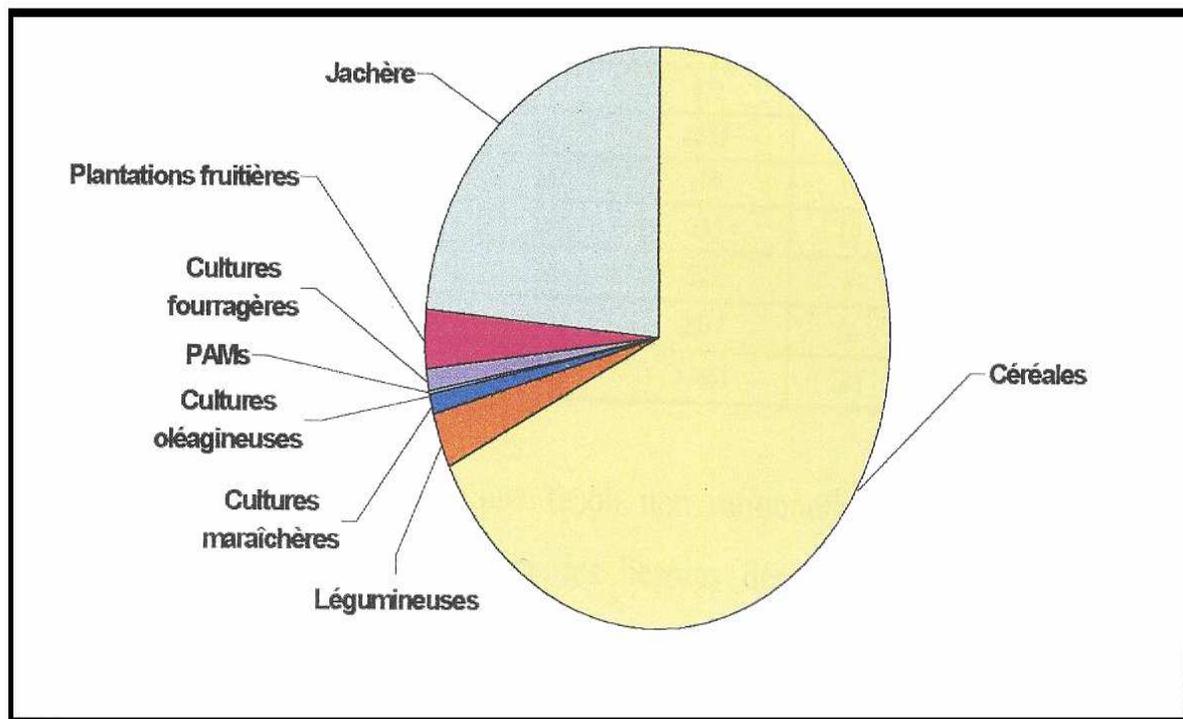


Figure 16 : Répartition des occupations des sols dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).

Tableau 14 : Différentes occupations des sols dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996)

COMMUNES	Céréales	Légumineuses	Cultures maraichères	Cultures oléagineuses	PAMs*	Cultures fourragères	Plantations fruitières	Jachère
Ain Johra	7 312	90	934	1	0	134	1258	3476
Ait Belkacem	5746	39	29	0	2	65	248	2409
Ait Ichou	2307	5	8	0	0	0	54	1114
Ait Ikkou	8647	563	56	1	0	41	503	2152
Ait Malek	4082	26	287	1	0	69	445	2024
Ait Ouribel	7073	247	158	0	57	42	457	1520
Bouqachmir	4828	41	17	0	0	6	30	2269
Houderrane	6227	234	98	7	0	40	207	1231
jemaat Moul Blad	8324	1980	5	0	0	10	196	924
Maaziz	4882	182	204	0	0	27	286	903
My Driss Aghbal	4788	766	21	81	0	36	149	672
Oulmés	11950	22	61	0	155	339	789	4731
Tiddas	13465	1528	162	1	19	3	436	3301
Aguelmous	16734	13	128	1	0	886	267	9193
El Hammam	9304	55	31	0	7	48	161	5595
Had Bouhssoussen	3784	4	21	1	0	63	43	1678
Hay Bouazza	3089	0	14	0	0	133	30	1325
Sebt Ait Rahhou	6041	1	11	0	0	17	24	2729
Sadi Hcine	1808	0	4	0	0	32	22	718
Sehous	14605	308	678	101	2	403	1464	2657
Total	144 996	6 104	2927	195	242	2394	7069	50621

*PAMs : Plantes Aromatiques et Médicinales

En ce qui concerne les techniques de cultures, la nature des travaux du sol est dominée par l'utilisation du cover crop et par la traction animale dans les terrains à forte pente. Le niveau d'utilisation de semences sélectionnées reste assez faible. Les agriculteurs utilisent leurs propres semences.

Tableau 15 : Facteurs de production et types de matériel agricole utilisés dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996)

COMMUNES	Facteurs de production (en nombre d'exploitations)					Matériel agricole (nombre)		
	Mécanisation des travaux du sol	Mécanisation de la mission	Utilisation des engrais	Utilisation des semences sélectionnées	Utilisation des produits phytosanitaires	Tracteurs	Moissonneuses	Motopompes

Chapitre II.
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Ain Johra	499	457	1121	272	903	61	2	211
Ait Belkacem	736	711	665	255	694	45	8	36
Ait Ichou	36	17	158	36	219	1	0	1
Ait Ikkou	653	473	842	309	1284	8	0	30
Ait Malek	265	224	346	103	307	27	2	77
Ait Ouribel	849	809	1066	172	1096	56	6	170
Bouqachmir	107	26	190	62	329	4	0	11
Houderrane	970	918	814	258	926	43	10	93
jemaat Moul Blad	472	458	669	112	761	51	6	21
Maaziz	681	649	571	251	727	30	5	90
My Driss Aghbal	424	432	576	71	582	37	8	25
Oulmés	411	380	731	356	806	74	3	82
Tiddas	963	895	871	688	1112	83	6	89
Aguelmous	1057	865	1577	387	2410	102	10	144
El Hammam	205	201	249	114	472	14	2	20
Had Bouhssoussen	930	796	791	242	1385	44	3	110
Hay Bouazza	91	57	367	147	409	19	0	36
Sebt Ait Rahhou	276	216	663	257	735	10	1	27
Sadi Hcine	126	119	234	28	287	8	0	15
Sehous	1509	1417	2205	1217	2017	66	2	499
Total	11260	10120	14706	5337	17461	783	74	1787

L'utilisation des engrais est pratiquée d'une façon non rationnelle et en fonction de la trésorerie des agriculteurs sans tenir compte des besoins des plantes et du sol. L'état phytosanitaire des différentes cultures reste critique et se caractérise par une prolifération des maladies, des ravageurs et des mauvaises herbes (Aderghal, 1993). Particulièrement pour les céréales, les mauvaises herbes (mono- et dicotylédones) constituent un handicap pour le développement de cette culture. Le désherbage des céréales se limite à l'utilisation d'herbicides anti-dicotylédones. Ces traitements se caractérisent par une méconnaissance du produit (herbicide) adéquat, sa dose et sa période d'application. Parallèlement aux problèmes des mauvaises herbes, les maladies foliaires notamment la septoriose et les rouilles constituent un frein pour l'amélioration de la production céréalière.

La récolte des céréales est effectuée manuellement au niveau des terres accidentées et dans les petites exploitations. L'usage de moissonneuses batteuses est plus fréquent dans les bas plateaux et le palier inférieur.

4. Elevage

Le haut pays (région d'Aguelmous) connaît une activité d'élevage (ovin et caprin) importante.

Le cheptel ovin est dominé par la race Timahdit. Le cheptel caprin est constitué essentiellement par la race locale Noire de l'Atlas.

L'élevage des bovins est plus important dans les paliers intermédiaire et inférieur (Sehoul, Ain Johra, Ait Ouribel, Oulmès,...).

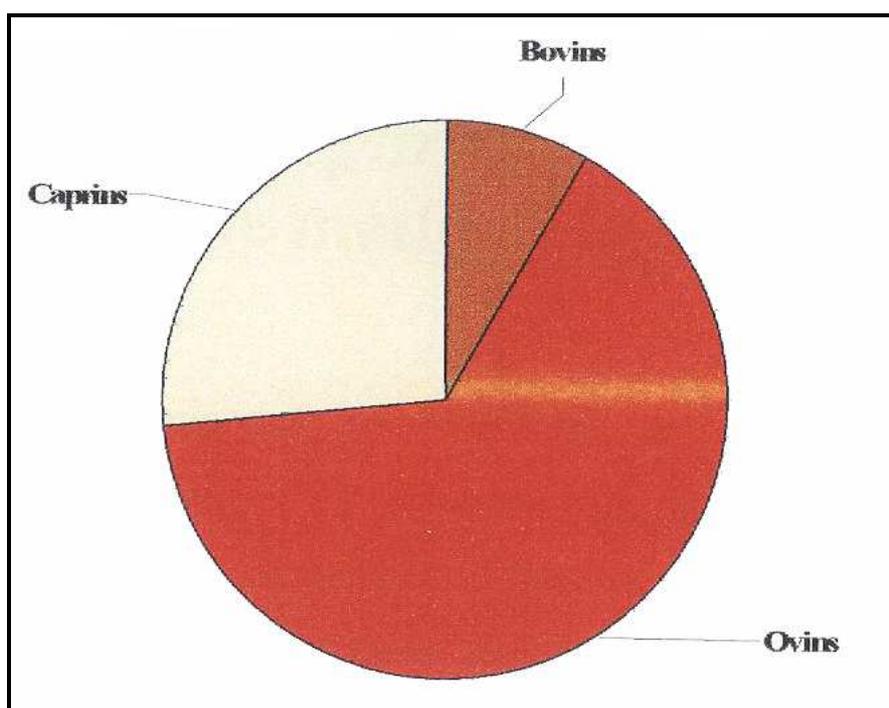


Figure 17 : Répartition des effectifs du cheptel dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).

Tableau 16 : Effectifs du cheptel dans les principales communes intégrant le bassin versant de Bouregreg (s.s) (D.P.A.E, 1996).

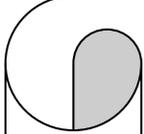
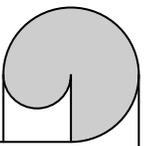
COMMUNES	Bovins	Ovins	Caprins
Ain Johra	5162	21474	299
Ait Belkacem	2696	13336	1118
Ait Ichou	1008	7825	4837
Ait Ikkou	2236	13747	8647
Ait Malek	2048	9768	14
Ait Ouribel	3192	11387	1119
Bouqachmir	1737	16106	12416
Houderrane	1870	6525	1108
jemaat Moul Blad	1480	11757	6301
Maaziz	972	4980	1704

Chapitre II.
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

My Driss Aghbal	2103	9865	3542
Oulmés	3236	47625	18655
Tiddas	2577	27130	18560
Aguelmous	4639	75861	21368
El Hammam	2269	42769	12947
Had Bouhssoussen	1384	16779	13279
Hay Bouazza	1591	13987	9072
Sebt Ait Rahhou	2770	29345	26856
Sadi Hcine	958	9555	5779
Sehoulis	10949	37281	6509
Total	54877	427102	174130

Les bovins et les ovins sont conduits en système agro-pastoral alors que les caprins sont conduits en système sylvo-pastoral.

Les ressources fourragères proviennent également, mais à un faible degré, des terres agricoles laissées en chaume et de la complémentation en période de disette alimentaire. Les forêts souffrent du surpâturage, avec un taux supérieur à la moyenne nationale (estimée à 35%). On cite : 63% pour la forêt Sehoulis, 46,3% à Ait Ichou Ouest et 42% à El Harcha (Benaamar, 2005).



Chapitre III.

Analyse hydro-pluviométrique et

bilan hydrologique

L'hydrologie des oueds de la région du sous-bassin de l'oued de Bouregreg se caractérise par l'extrême irrégularité du régime des cours d'eau. Les débits d'étiage sont très faibles et les débits des crues sont très importants.

I. Traitement et Critique des données pluviométriques

1. Les données disponibles

Les données pluviométriques disponibles sont consignées dans le tableau 17. Ces dernières ont été collectées auprès de la Secrétariat Chargé de l'Eau et d'Environnement.

Les données hydro-pluviométriques correspondent à des mesures qui ont été prises au niveau d'un certain nombre de stations du bassin de Bouregreg (S.S), au cours d'une série d'années variable selon les stations.

2. Traitement des données

La variable pluie est exprimée aux pas de temps journalier mensuel et annuel. Le traitement se fera donc progressivement en agrégeant les données journalières en données mensuelles qui seront à leur tour agrégées en données annuelles.

Pour l'étude de ce sous bassin versant, nous nous sommes servies des données de cinq stations dont la répartition spatiale est illustrée par la figure 18, et qui sont : Aguibat Ezziar ; Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) ; Dar Soltane ; Lalla Chafia et Tsalat, ces stations appartiennent au Bassin versant de oued Bouregreg (S.S). Elles vont fournir des données plus ou moins nombreuses.

Le sous bassin versant de l'Oued Bouregreg est contrôlé par plusieurs stations d'annonce de crue installées sur les principaux affluents à l'amont du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah.

Chaque station est équipée des dispositifs de mesures des débits et vitesse qui sont transmises par radio en temps réel aux Services compétents afin d'assurer une meilleure gestion de cette retenue. Cette gestion de la retenue en période de crue vise les objectifs suivants :

- Contribution à une amélioration de la gestion de crues par la prévision d'un volume garanti en opérant l'ouverture de la vidange de fond pour dévaser la retenue.

- Création d'un creux préventif afin d'assurer un laminage efficace de la crue et limiter le débit à l'aval du barrage.
- Assurance d'une mise en alerte des organismes suffisamment tôt en cas de crues exceptionnelles pour assurer une meilleure sécurité.

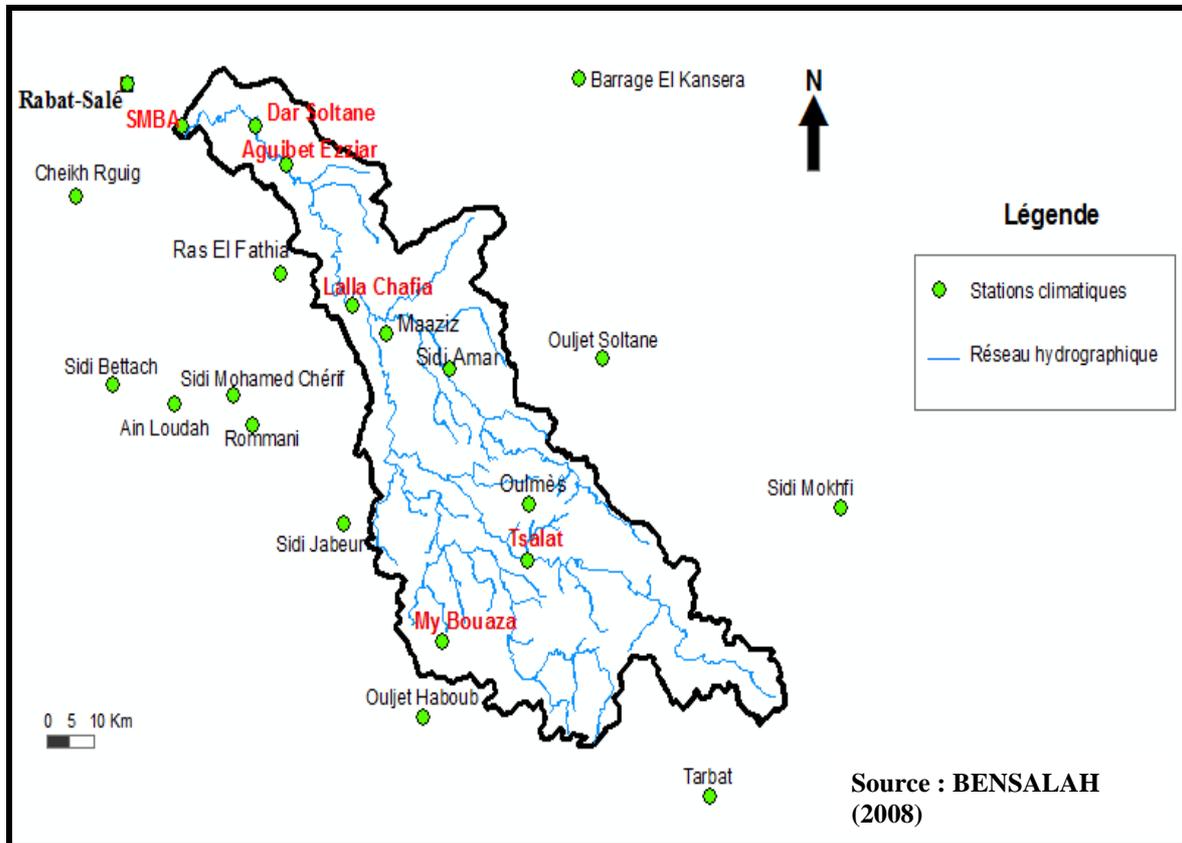


Figure 18 : Situation géographique des stations climatologiques dans le bassin de Bouregreg (S.S)

Sur le bassin versant de Bouregreg (S.S), la pluviométrie est très irrégulière dans le temps et dans l'espace ; en plus plusieurs postes présentent des observations interrompues pendant certaines années ou plusieurs mois d'une année, ce qui rend parfois les séries inexploitable. Les régions montagneuses difficilement accessibles ont été équipées de pluviomètres totaliseurs ; quelques stations principales sont en revanche munies de pluviomètres observés de façon continue en cas de précipitations.

Avant leur utilisation, il est important donc de vérifier l'homogénéité et la fiabilité des données pluviométriques dont on dispose. Celles-ci couvrent une période allant de 1968 à 2005, parsemée, parfois, de quelques lacunes plus au moins nombreuses.

D'éventuelles séquences erronées, ou comblées arbitrairement par l'observateur, peuvent être observées à la mise en place d'une station ou d'un nouvel

observateur. Parfois encore, une importante erreur de saisie ou de copie peut fausser le résultat d'une année.

Il faut reconnaître, cependant, qu'il est assez délicat, dans le travail de détection d'anomalies, de distinguer entre des fluctuations naturelles et des erreurs.

Pour résoudre ce problème, on a essayé de comparer entre elles les données pluviométriques des stations choisies, qui sont voisines géographiquement et de faire des corrélations qui vont nous donner une idée sur la qualité des données accumulées. Aussi on a essayé de regrouper les données de la même tranche de temps dans les cinq stations du bassin. Ces données couvrent en gros des périodes variables allant de 1968 à 2005.

Le tableau au dessous montre les périodes d'observation des cinq stations dont on dispose :

Tableau 17: Périodes d'observation des onze stations du bassin de Bouregreg (S.S)

STATION	N° IRE	Période d'observation	X (m)	Y (m)	Z (m)
Aguibet Ezziar	203	1977-2005	394500	368150	90
Bge SMBA	6920	1984-2005	375650	370500	148
Dar Soltane	2784	1968-2005	387950	374100	55
Lalla Chafia	5032	1972-2005	408400	345650	180
Tsalat	8832	1977-2005	441600	303800	650

- Test des double-cumuls :

Ce test suppose que l'homogénéité des précipitations annuelles d'une station quelconque, soit vérifiée par comparaison avec les données d'une station de référence sur une même période. Le test de doubles cumuls permettra donc de déceler d'éventuelles ruptures dans l'homogénéité des séquences relevées, et de déterminer graphiquement la relation entre les données des deux points du bassin. La fonction est linéaire pour une corrélation parfaite. En cas d'erreur d'estimation ou de déficit systématique, on a une cassure dans la courbe, dont la cause reste à déterminer.

Les postes de références sont généralement choisis en fonction de leur période d'observation qui doit être la plus longue, ainsi que par rapport aux coefficients de corrélation qui doivent être élevés entre ces postes et les autres.

Pour notre exemple, on va choisir les cinq stations déjà citées de la totalité du bassin versant de Bouregreg (s.s), et on va travailler sur la même période pour toutes

les stations allant de 1984 jusqu'à 2005. Par ailleurs, on a cherché les coefficients de corrélation liant les hauteurs de pluies mensuelles et annuelles des cinq stations étudiées.

Tableau 18 : Corrélations entre les pluviométries mensuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)

Stations	Nombre de couple	Coefficient de corrélation (r)
Barrage SMBA - Tsalat	250	0,85
Tsalat - Dar Soltane	341	0,8
Barrage SMBA - Lalla Chafia	231	0,94
Lalla Chafia - Tsalat	324	0,9
Barrage SMBA - Aguiabat Ezziar	203	0,9
Aguiabat Ezziar - Lalla Chafia	322	0,9
Barrage SMBA - Dar Soltane	250	0,9
Dar Soltane - Aguiabat Ezziar	330	0,9
Dar Soltane - Lalla Chafia	321	0,9
Aguiabat Ezziar - Tsalat	330	0,9

Tableau 19 : Test double-cumul entre les pluviométries mensuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)

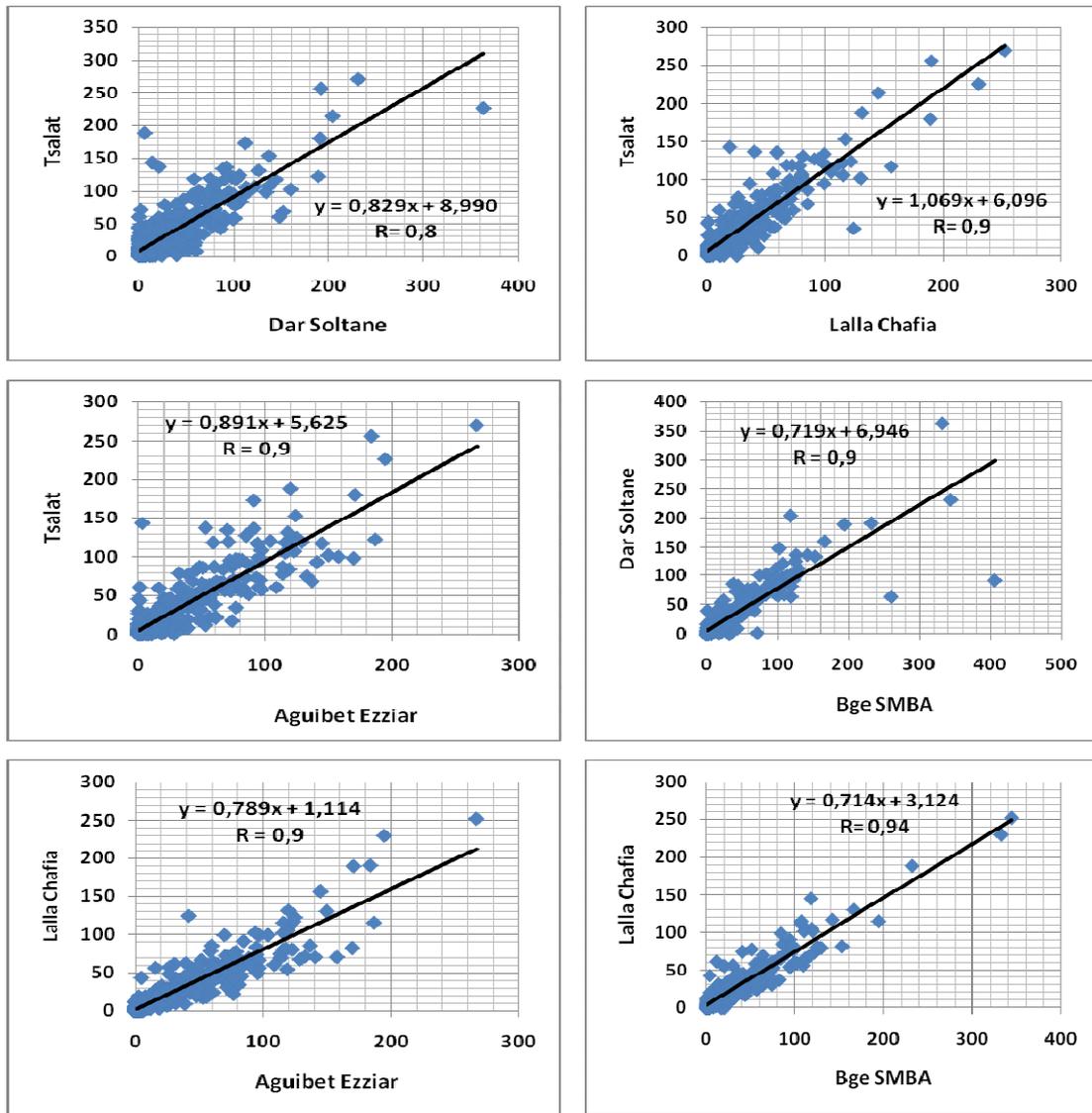
Stations	Nombre de couple	Coefficient de corrélation (R)
Barrage SMBA - Tsalat	251	0,998
Tsalat - Dar Soltane	341	0,999
Barrage SMBA - Lalla Chafia	231	0,999
Lalla Chafia - Tsalat	324	0,999
Barrage SMBA - Aguiabat Ezziar	203	0,998
Aguiabat Ezziar - Lalla Chafia	322	0,999
Barrage SMBA - Dar Soltane	250	0,998
Dar Soltane - Aguiabat Ezziar	330	0,998
Dar Soltane - Lalla Chafia	322	0,999
Aguiabat Ezziar - Tsalat	330	0,999

Tableau 20 : Test double-cumul entre les pluviométries annuelles entre les pluies des stations du bassin Bouregreg (S.S)

Stations	Nombre de couple	Coefficient de corrélation R
Barrage SMBA - Tsalat	22	0,999
Tsalat - Dar Soltane	22	0,999
Barrage SMBA - Lalla Chafia	21	0,999
Lalla Chafia - Tsalat	21	0,999
Barrage SMBA - Aguiabat Ezziar	21	0,993
Aguiabat Ezziar - Lalla Chafia	21	0,99
Barrage SMBA - Dar Soltane	22	0,998
Dar Soltane - Aguiabat Ezziar	21	0,99
Dar Soltane - Lalla Chafia	21	0,999
Aguiabat Ezziar - Tsalat	21	0,992

On remarque que dans l'ensemble, les coefficients de corrélations sont importants entre les diverses stations. Ils témoignent de l'existence d'une liaison significative entre les différentes séries de précipitations mensuelles dans le bassin.

Sur les figures 19, 20 et 21 nous avons illustré les résultats des corrélations et les tests des double-cumuls entre les diverses stations. Ces résultats montrent que la quasi-totalité des postes offrent des données plutôt homogènes et ne présentant pas d'anomalies notables.



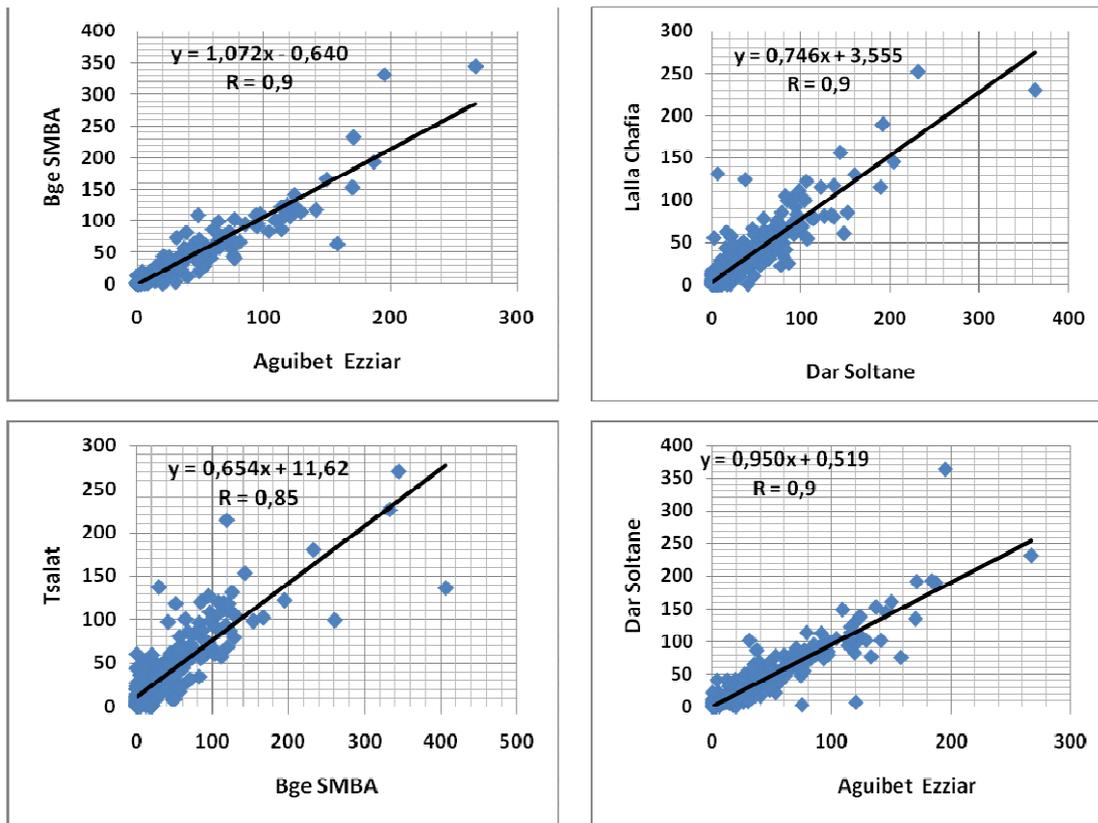
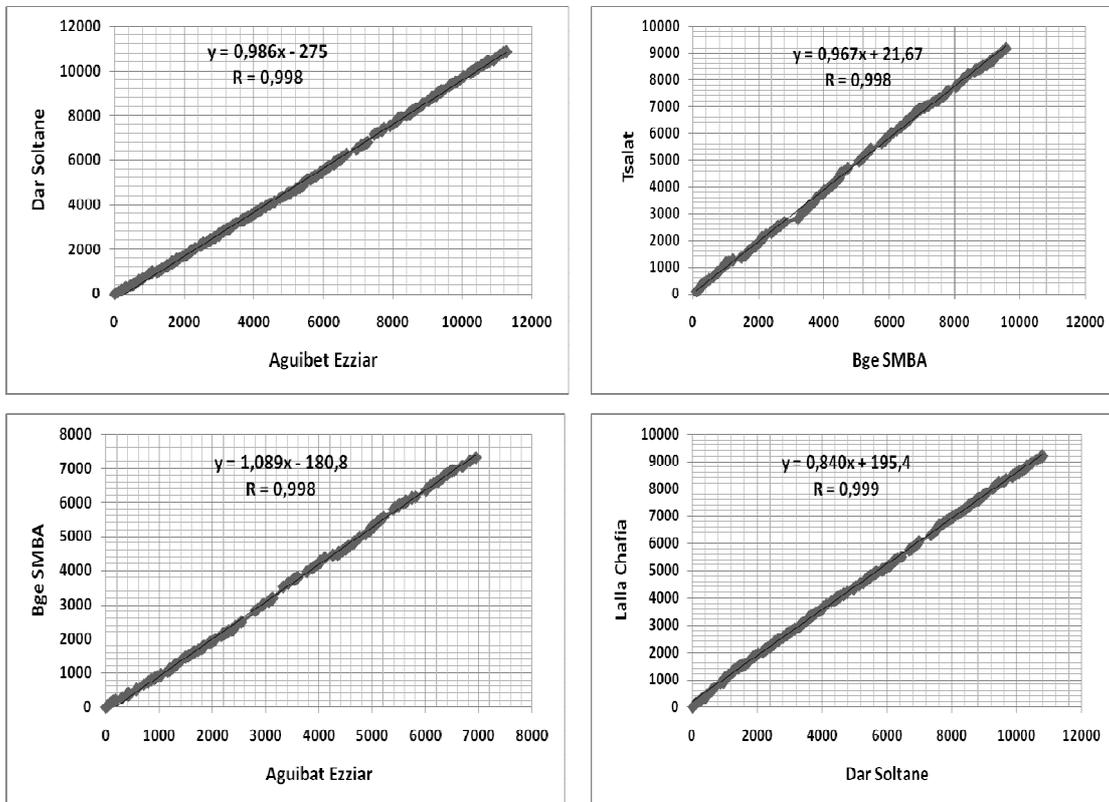


Figure 19 : Corrélations entre les pluviométries des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux



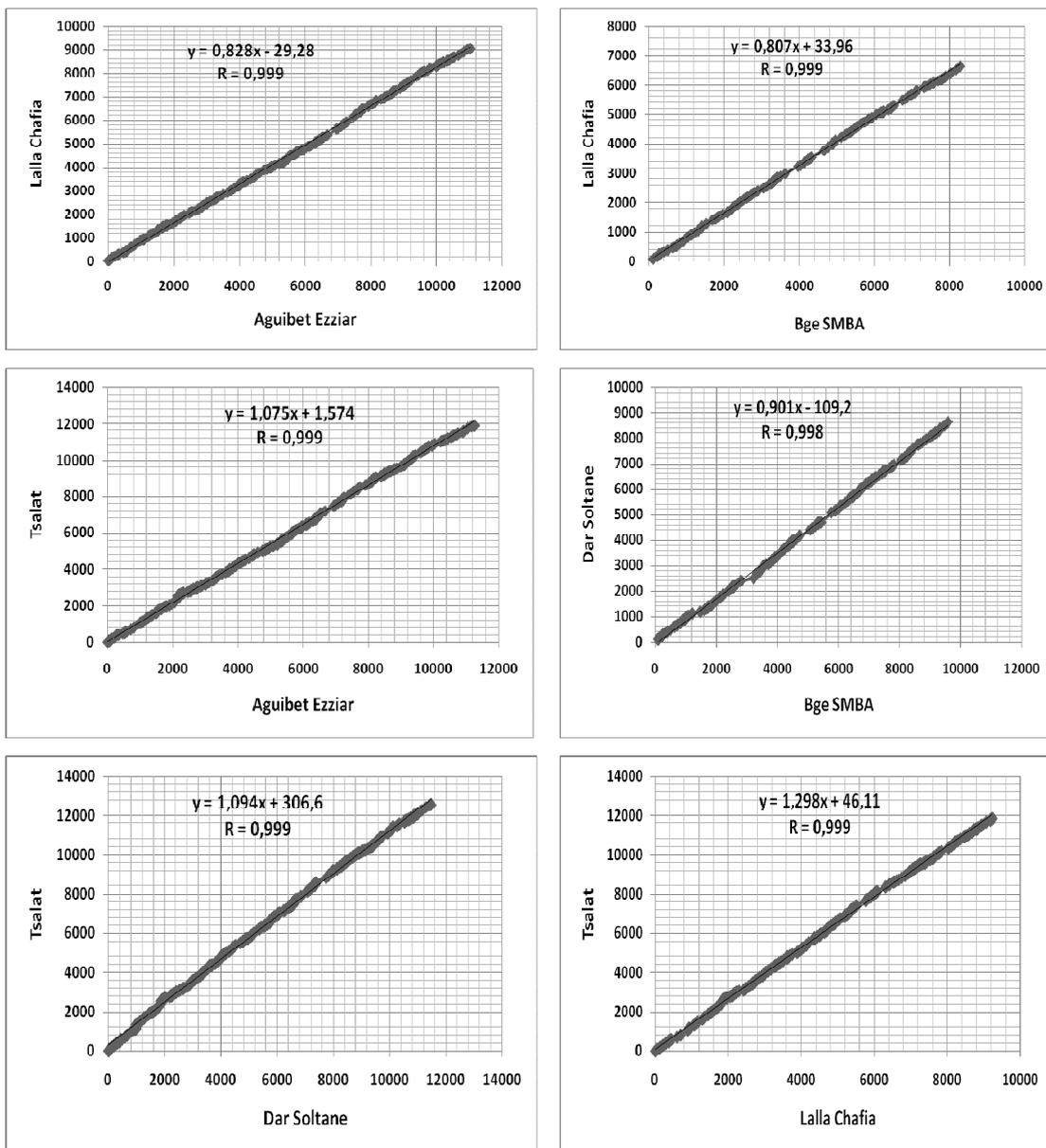
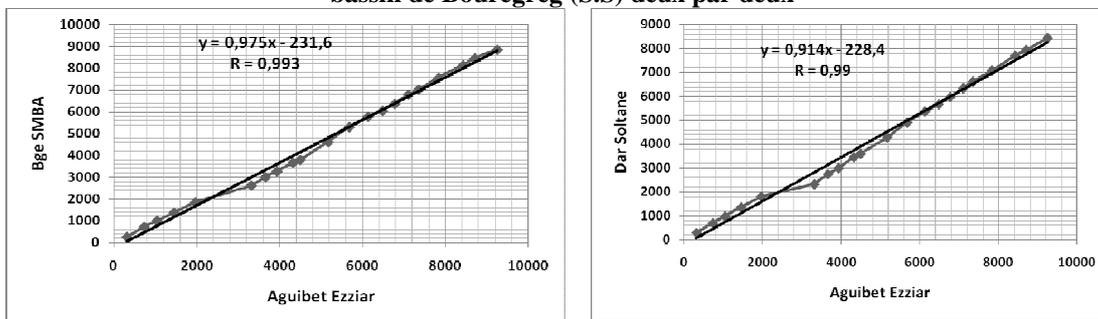


Figure 20 : Test de double-cumul entre les pluviométries mensuelles des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux



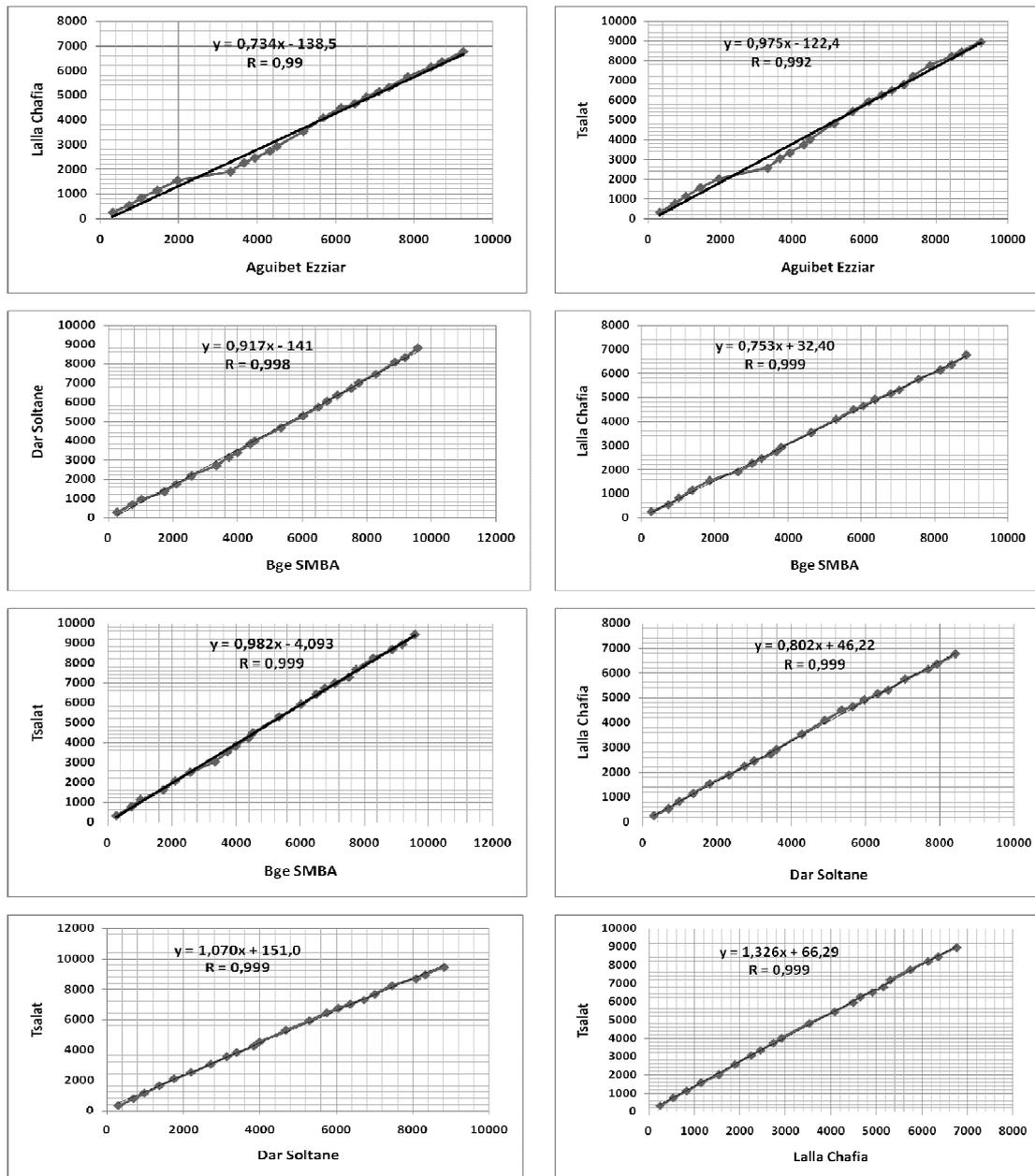


Figure 21 : Test de double-cumul entre les pluviométries mensuelles des différentes stations du bassin de Bouregreg (S.S) deux par deux

3. Hauteurs des précipitations annuelles et leurs variations

La quantité d'eau reçue par le bassin est un élément de base important pour caractériser son climat. Les précipitations moyennes annuelles sont obtenues à partir de la somme des moyennes mensuelles.

a. Station du Barrage SMBA

C'est le barrage installé sur le cours principal et c'est l'exutoire du bassin versant, La période d'observation s'étale de 1984/85 à 2005/06 avec un module pluviométrique annuel de **435,2 mm**. La pluviométrie annuelle varie de 136 mm en

1994/95 à 819 mm en 1995/96 pour la même série d'observation. Le coefficient de variation ne dépasse pas 0,4.

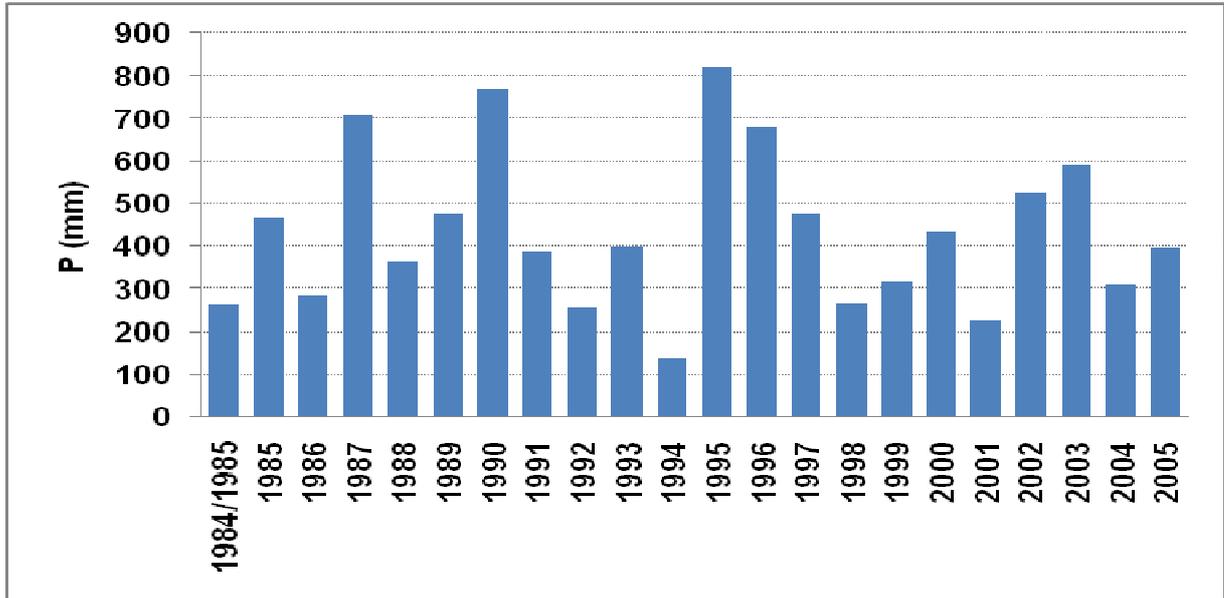


Figure 22 : Variation des précipitations annuelles à la station du Barrage SMBA

b. Station de Dar Soltane

Les précipitations varient de façon irrégulière d'une année à l'autre avec une moyenne inter-annuelle de **401 mm**. Pour une série d'années de 1984/85 à 2005/06, le maximum pluvieux de **686 mm** a été enregistré en 95/96 et le minimum de **152 mm** en 94/95. Le coefficient de variation est égal à 0,3.

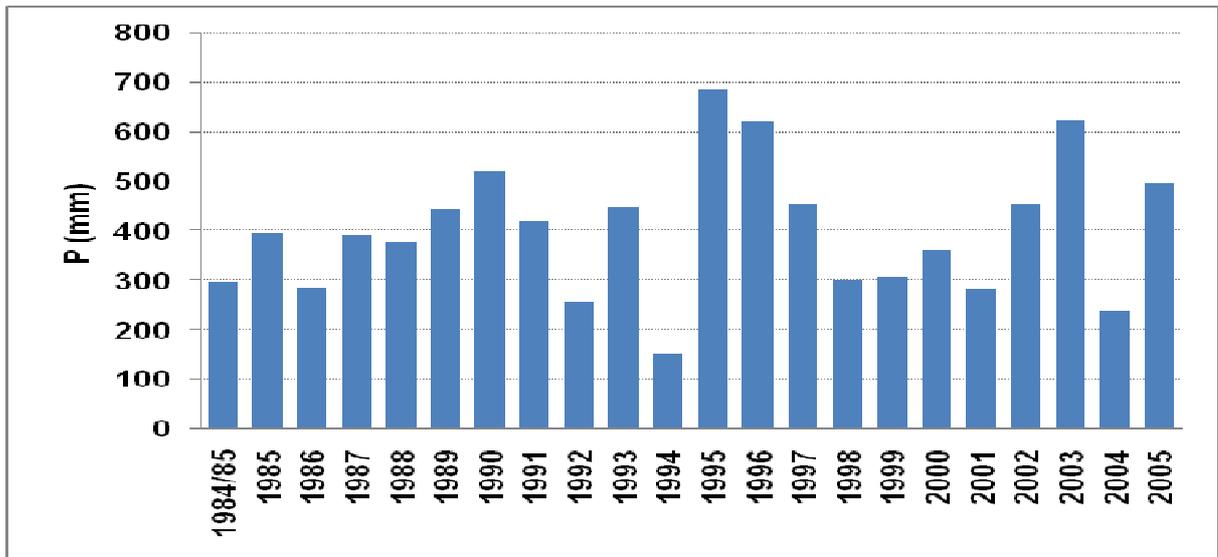


Figure 23: Variation des précipitations annuelles à la station de Dar Soltane

c. Station d'Aguibet Ezziar

Pour une période d'observation allant de 1984/85 à 2005/06, cette station présente une lacune des données pluviométriques pour l'année 87/88. La moyenne inter-annuelle est de **440,7 mm** avec un maximum de 1354 mm en 90/91 et un minimum de 176 mm en 94/95. Le coefficient de variation à la station d'Aguibet Ezziar est égal à 0,6.

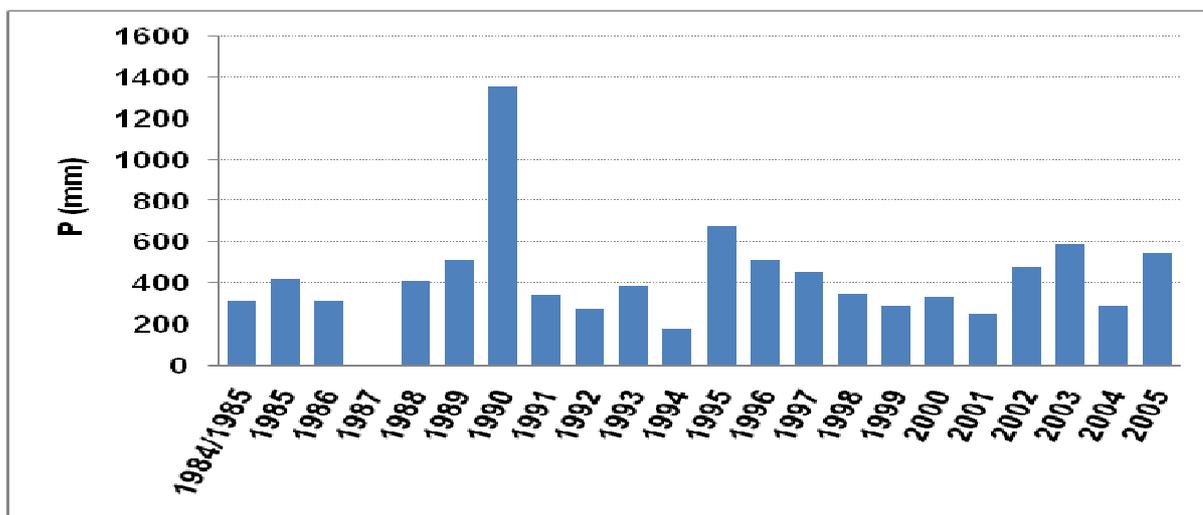


Figure 24: Variation des précipitations annuelles à la station d'Aguibet Ezziar

d. Station de Lalla Chafia

Les données s'étalent sur une période allant de 1984/85 à 2005/06 avec un maximum de 611 mm en 95/96 et un minimum de 151 mm en 2001/02 et dont le module annuel est **321,9 mm**. Le coefficient de variation est égal à 0,4. Cette station aussi présente une lacune des données pluviométriques pour l'année 87/88.

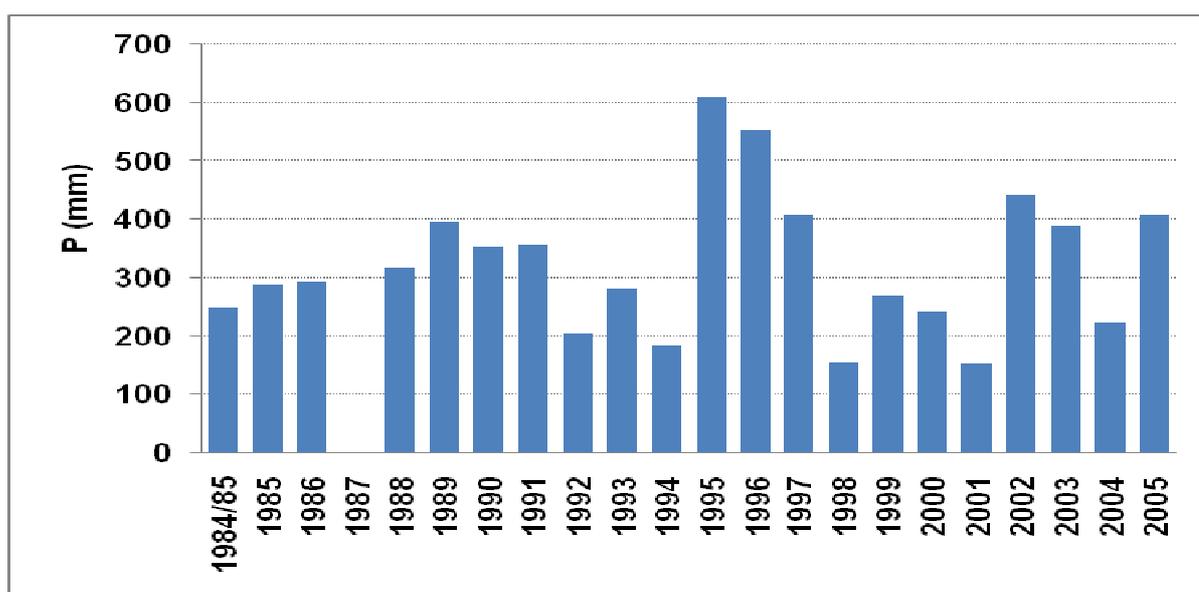


Figure 25: Variation des précipitations annuelles à la station de Lalla Chafia

e. Station de Tsalat

Pour une série d'observation de 1984/85 à 2005/06. La moyenne interannuelle est **428,8 mm**. Le maximum pluvieux est de 803 mm en 1995/96 et un minimum de 250 mm en 2004/05. Le coefficient de variation dans cette station est égal à 0,3.

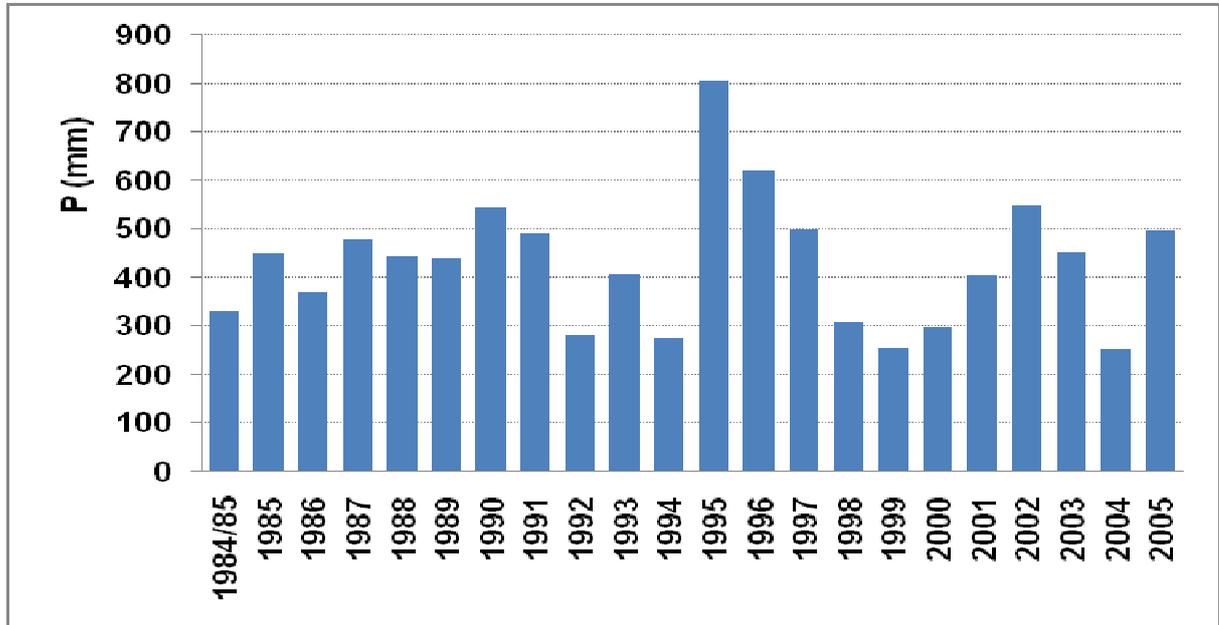


Figure 26: Variation des précipitations annuelles à la station de Tsalat

4. Précipitations moyennes mensuelles et leurs variations

Les moyennes mensuelles interannuelles ont été obtenues à partir des moyennes mensuelles annuelles selon la période d'observation pour chaque station.

a. Station du Barrage SMBA

Les mois d'Octobre à Avril dépassent la moyenne qui est de **37,4 mm** avec un seul pic en décembre (89,4 mm). Les mois juillet et août sont les plus secs n'atteignant pas 2 mm (Fig.27).

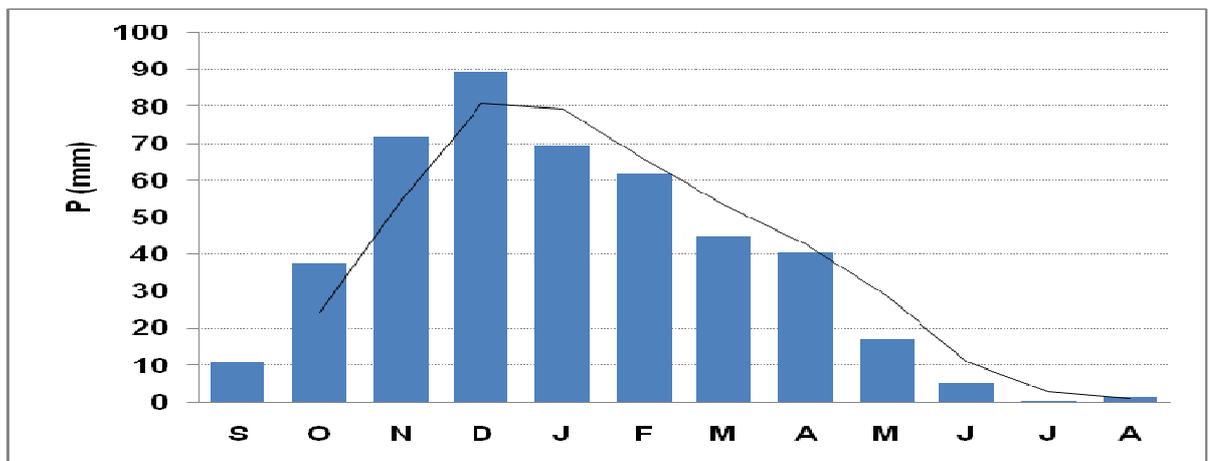


Figure 27 : Variation des précipitations mensuelles à la station du Barrage SMBA

b. Station de Dar Soltane

La figure 28 montre une variation régulière de précipitations mensuelles avec une moyenne de **33,5 mm**. Les mois d'octobre à mars dépassent la moyenne avec un seul pic en décembre (80,6 mm). Les mois de juillet et août étant les plus secs ne dépassant pas 2 mm. Il s'agit donc d'un régime pluvial à un seul pic en hiver.

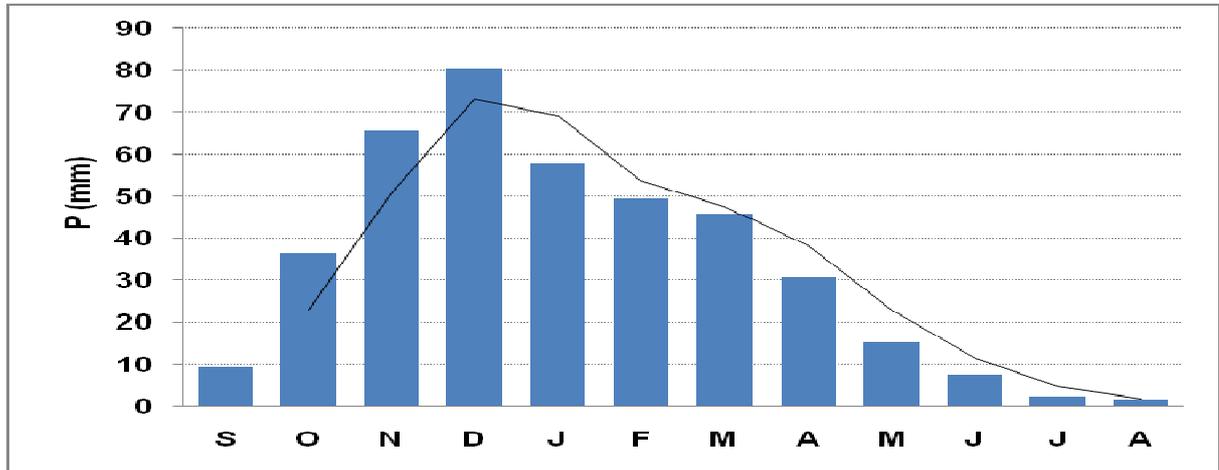


Figure 28 : Variation des précipitations mensuelles à la station Dar Soltane

c. Station d'Aguibet Ezziar

Elle présente deux pics en décembre et en mars dont celui du printemps est le mieux individualisé. La moyenne mensuelle de cette station est de **36,8 mm**. Le mois le plus sec étant juillet avec 0,5 mm (Fig. 29).

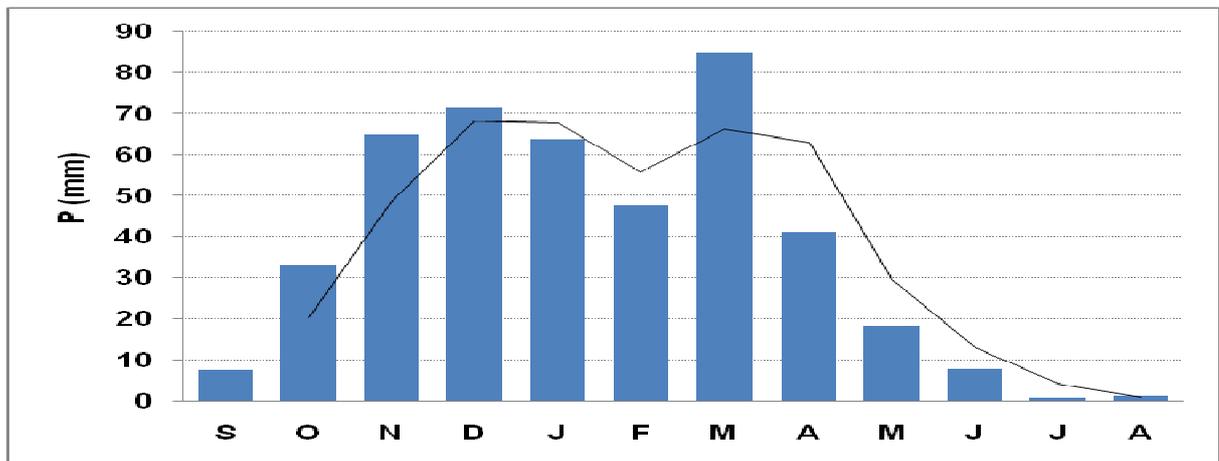


Figure 29 : Variation des précipitations mensuelles à la station d'Aguibet Ezziar

d. Station de Lalla Chafia

Sur l'ensemble de cette station, les précipitations moyennes mensuelles ne dépassent pas 60 mm avec une moyenne de **28,1 mm**. Ces précipitations montrent une variation régulière, avec un seul pic en décembre (57 mm). Le mois de juillet étant le plus sec, il ne dépasse pas 0,2 mm.

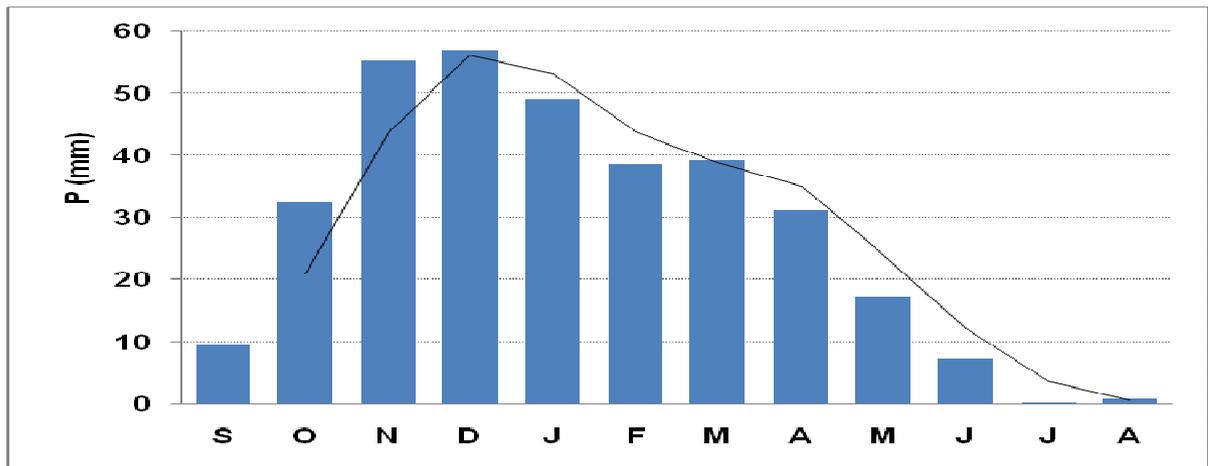


Figure 30 : Variation des précipitations mensuelles à la station de Lalla Chafia

e. Station de Tsalat

La variation de la pluviométrie mensuelle présente un seul pic bien individualisé en décembre (72,6 mm). La moyenne est de **35,8 mm**. Les mois de novembre à avril dépassent cette moyenne, le mois de juillet et août sont les plus secs (Fig.31).

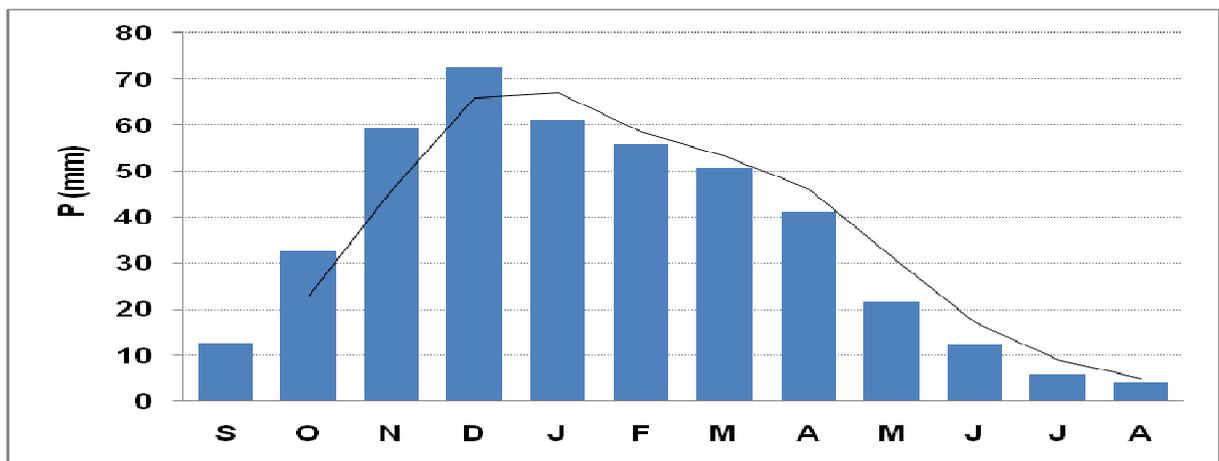


Figure 31: Variation des précipitations mensuelles à la station de Tsalat

5. Les précipitations à l'échelle du bassin versant

a. Les précipitations mensuelles

Le traitement des données pluviométriques de chaque station pour la même période d'observation (de 1984/85 à 2005/06), nous a permis d'élaborer le module pluviométrique mensuel et saisonnier à l'échelle du bassin de Bouregreg (S.S). Le tableau 21 montre les résultats obtenus.

Tableau 21: Les précipitations mensuelles et saisonnières du bassin de Bouregreg (S.S)

Stations	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A

Aguibet Ezziar	7,5	33,0	64,8	71,6	63,9	47,6	84,9	41,1	18,1	7,8	0,5	1,1
Bge SMBA	10,7	37,6	71,9	89,4	69,4	61,9	44,8	40,5	16,8	4,9	0,4	1,2
Dar Soltane	9,2	36,5	65,6	80,6	57,9	49,4	45,8	30,6	15,3	7,6	2,3	1,4
Lalla Chafia	9,5	32,4	55,2	57,0	49,1	38,5	39,1	31,0	17,1	7,2	0,2	0,7
Tsalat	12,7	32,6	59,2	72,6	61,3	55,8	50,8	41,2	21,5	12,4	5,8	4,0
Moyenne	9,9	34,4	63,3	74,2	60,3	50,6	53,1	36,9	17,8	8,0	1,8	1,7
Moyenne saisonnière	107,68			185,17			107,73			11,45		

A l'échelle du bassin versant de Bouregreg (S.S), la variation des précipitations mensuelles est illustrée par la figure 32. Cette dernière montre des histogrammes qui reflètent une variation de la pluviométrie durant toute l'année. On peut ainsi distinguer deux périodes :

- Une période humide et pluvieuse qui s'étend depuis le mois d'octobre jusqu'au mois d'avril avec des hauteurs dépassant 30 mm.
- Une période sèche depuis le mois de mai jusqu'en septembre avec des hauteurs inférieures à 18 mm.

Les écoulements devraient donc être importants en automne-hiver et printemps sauf si les pluies sont en partie nivales et si les formations géologiques du bassin retiennent l'eau en hiver pour la restituer en été.

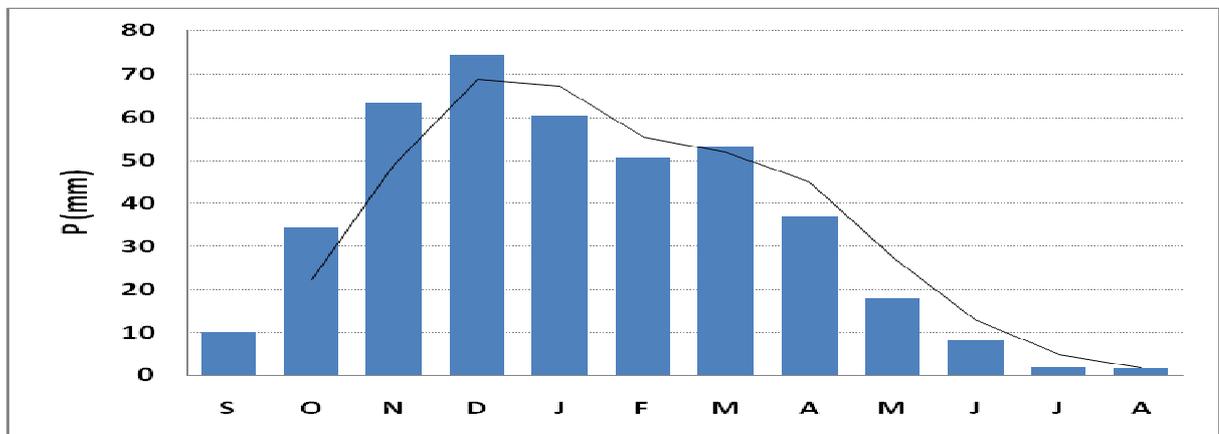


Figure 32: Variation des précipitations mensuelles à l'échelle du bassin de Bouregreg (S.S)

b. Les précipitations saisonnières

D'après la figure 33, on remarque que le bassin de Bouregreg (s.s) est arrosé durant toutes saisons sauf l'été où les précipitations sont très rares. Les précipitations augmentent depuis l'automne jusqu'en hiver avec un maximum de 185,17 mm puis diminuent du printemps à l'été avec un minimum de 11,45 mm.

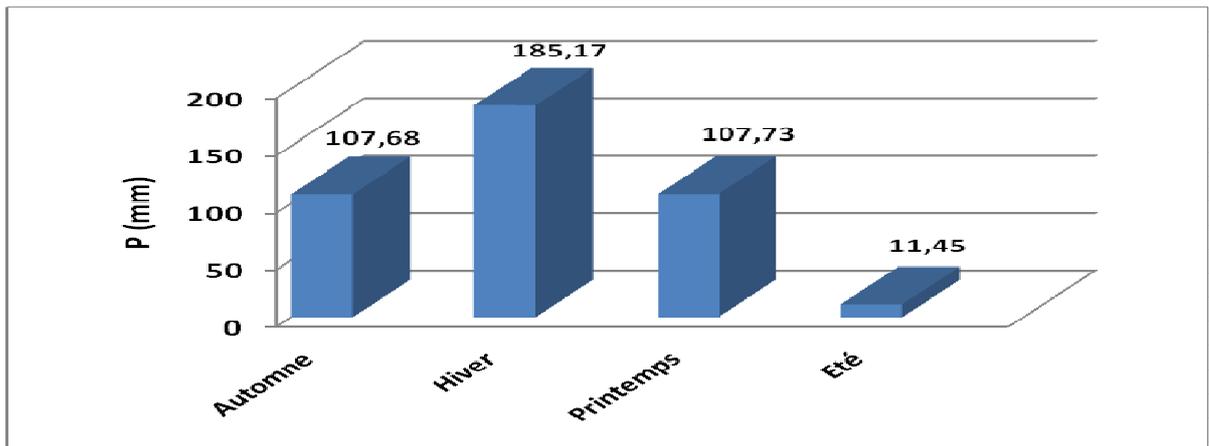


Figure 33: Répartition saisonnière des précipitations à l'échelle du bassin de Bouregreg (S.S)

c. Les précipitations annuelles

D'après le tableau ci-dessous, qui représente les modules annuels des précipitations de chaque station, on remarque que les hauteurs de pluies varient selon les stations.

Tableau 22 : Modules annuels des précipitations de chaque station

station	Aguibet Ezziar	Bge SMBA	Dar Soltane	Lalla Chafia	Tsalat
module annuel (mm)	440,7	435,2	401,0	321,9	428,8

D'après les tableaux des précipitations annuelles de toutes les stations du bassin de Bouregreg (S.S) selon les périodes d'observations (1984/85 à 2005/06), on a pu établir la courbe qui illustre le régime pluviométrique inter-annuel du bassin en y intégrant les données des cinq stations (Fig.34) :

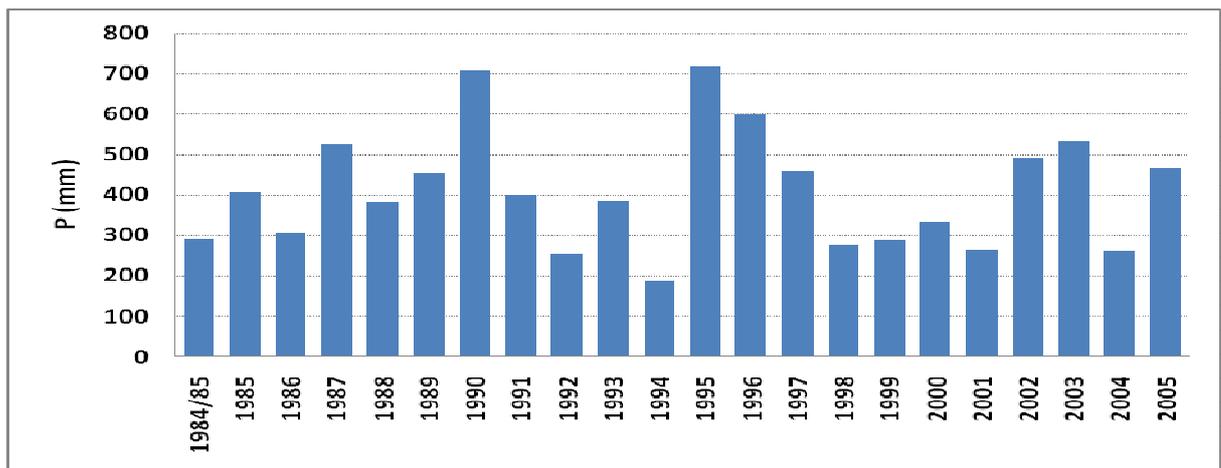


Figure 34: Variation des précipitations annuelles dans le bassin de Bouregreg (S.S)

Les précipitations varient d'une façon irrégulière d'une année à l'autre avec un module annuel de **408,2 mm**. Les années les plus humides dont les précipitations dépassent en moyenne 400 mm sont : 85/86, 87/88, 89/90 à 91/92, 95/96 à 97/98,

2002/03, 03/04, 05/06 et l'année 94/95 est la plus sèche avec des précipitations inférieures à 185 mm.

CONCLUSION

Généralement, Les précipitations varient de façon irrégulière d'une année à l'autre sur la totalité du sous bassin de Bouregreg (s.s), Elles varient peu avec la latitude d'une station à l'autre. Par ailleurs, l'altitude est à l'origine d'un contraste très marqué entre la partie Nord-Est du bassin et la partie Sud-Ouest. Les années pluvieuses sont marquées dans toutes les stations climatologiques avec des valeurs différentes d'une station à l'autre.

La répartition moyenne des précipitations mensuelles montre l'existence de deux saisons pluviométriques distinctes :

- Une saison humide, allant du mois d'octobre à avril où a eu lieu la quasi-totalité des épisodes pluvieux;
- Une saison sèche, allant du mois de mai à septembre.

II. Critique des données hydrométriques

A l'instar de ce qui a été fait pour les données pluviométriques, nous avons considéré trois stations hydrologiques de notre bassin, qui sont Aguibet Ezziar, Lalla Chafia et Tsalat ; pour une étude des débits mensuels et annuels.

1. Les débits moyens annuels

a. Station d'Aguibet Ezziar

Pour une période d'observation allant de 1977/78 à 2005/06 soit 28 ans, la valeur moyenne annuelle de l'écoulement est de l'ordre **5,98 m³/s**. On note que les années 77/78 à 78/79, 87/88, 89/90, 90/91, 95/96 à 97/98, 2002/03 à 03/04 et 05/06 dépassent cette moyenne alors que 4 années sur 28 ont connu des écoulements inférieurs à 1 m³/s avec un minimum de 0,22 m³/s enregistré en 94/95 et un maximum de 22,42 m³/s enregistré en 78/79 .

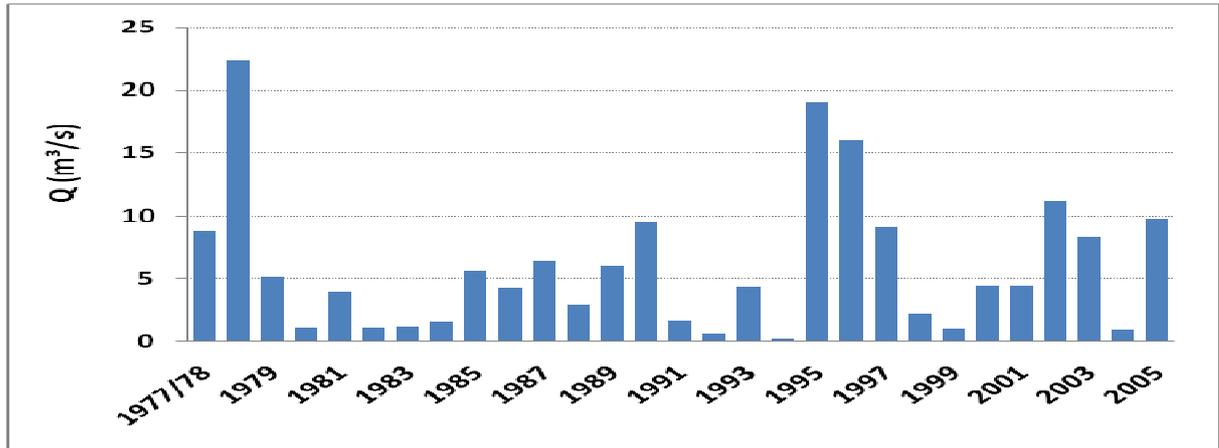


Figure 35: Variation des débits moyens annuels (en m³/s) à la station d'Aguibet Ezziar

b. Station de Lalla Chafia

La période d'observation est la même que celle de la station précédente (Aguibet Ezziar), avec une moyenne annuelle de **6,28 m³/s**, les débits sont plus importants qu'Aguibet Ezziar en raison des apports des affluents de chaque station.

Les débits moyens annuels présentent un maximum de 27,39 m³/s enregistré en 95/96 et un minimum de 0,47 m³/s en 94/95. notons que 2 années sur 28 ne dépassent pas 1 m³/s.

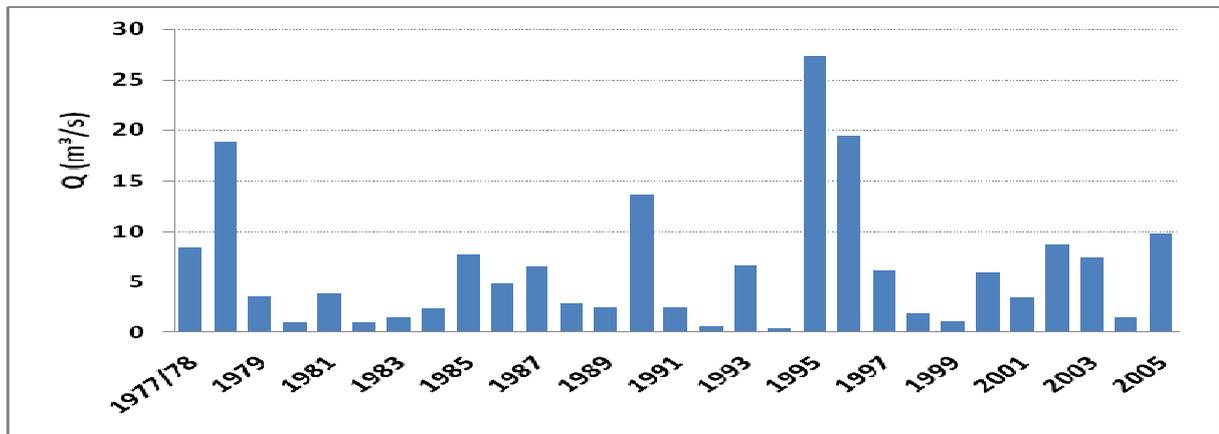


Figure 36: Variation des débits moyens annuels (en m³/s) à la station de Lalla Chafia

c. Station de Tsalat

Pour la même période d'observation, soit 28 ans, la valeur moyenne annuelle de l'écoulement est de l'ordre **1,72 m³/s**. 11 années sur 28 ont connu des écoulements inférieurs à 1 m³/s avec un minimum de 0,19 m³/s enregistré en 98/99 et un maximum de 5,42 m³/s enregistré en 95/96. Les débits sont moins importants que les deux autres stations précédentes en raison des apports des affluents entre les stations.

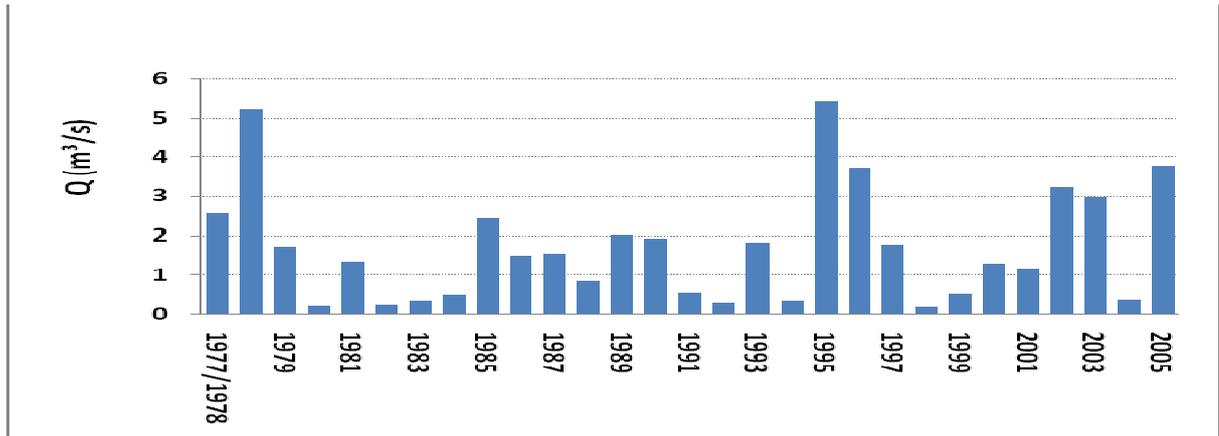


Figure 37: Variation des débits moyens annuels (en m³/s) à la station de Tsalat

2. Les débits moyens mensuels

Les débits moyens mensuels inter-annuels ont été obtenus à partir des moyennes mensuelles annuelles enregistrées selon la même série d'observation allant de 1977/78 à 2005/06 pour chaque station.

a. Station d'Aguibet Ezziar

La figure 38 montre que le débit augmente rapidement de septembre à février où il atteint sa valeur maximale de 20,41 m³/s, puis il diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale de 0,07 m³/s en août. Donc on a un régime pluvial simple à un seul pic en hiver.

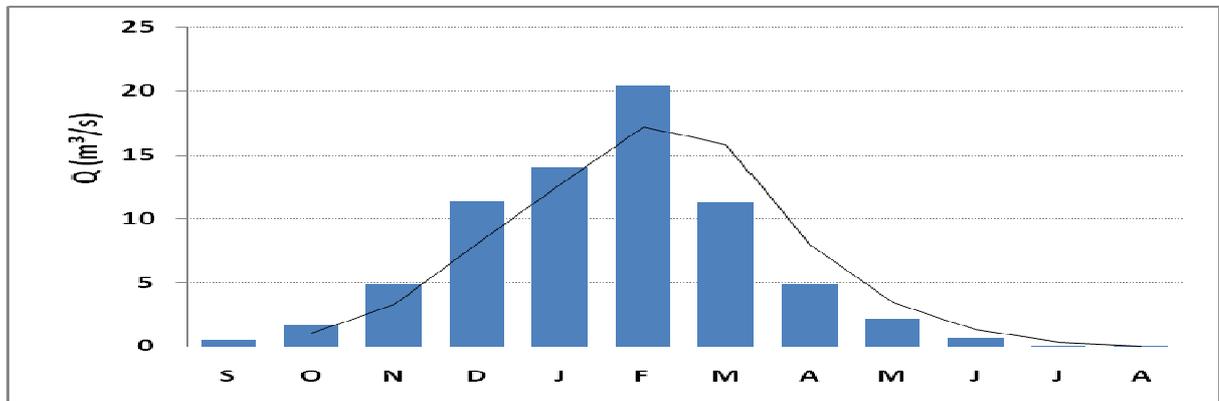


Figure 38: Variation des débits moyens mensuels (en m³/s) à la station d'Aguibet Ezziar

b. Station de Lalla Chafia

On a le même comportement pour la variation des débits moyens mensuels qu'à la station d'Aguibet Ezziar. Le débit qui atteint la valeur maximale de 20,6 m³/s en mois de février, puis il diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale de 0,14 m³/s en août (débit d'été) (Fig.39).

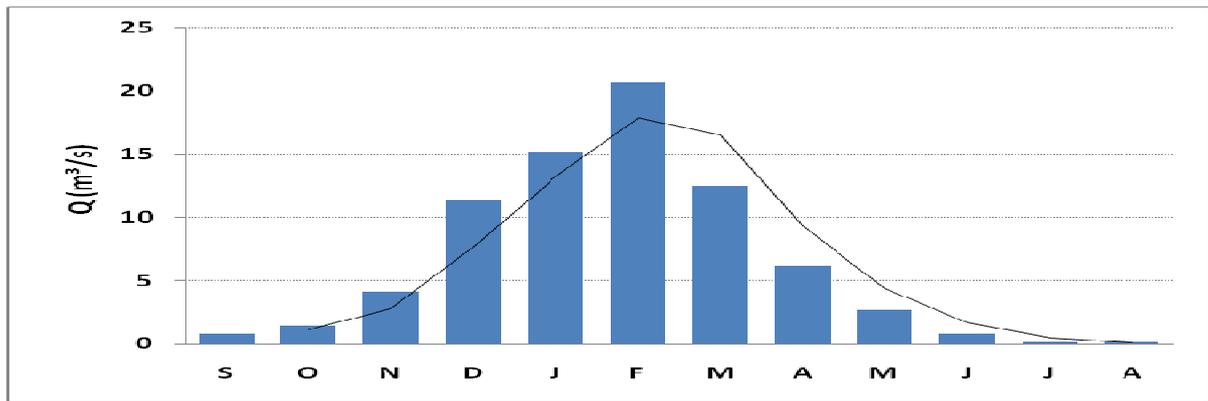


Figure 39: Variation des débits moyens mensuels (en m³/s) à la station de Lalla Chafia

c. Station de Tsalat

La variation des débits moyens mensuels suit l'allure des deux stations précédentes, sauf que le débit de cette station est clairement moins important durant les mois de l'année. La valeur maximale est de 5,44 m³/s enregistré en mois de février. Dans cette station, le débit marque une diminution en juillet où il atteint sa valeur minimale de 0,10 m³/s (Fig.40).

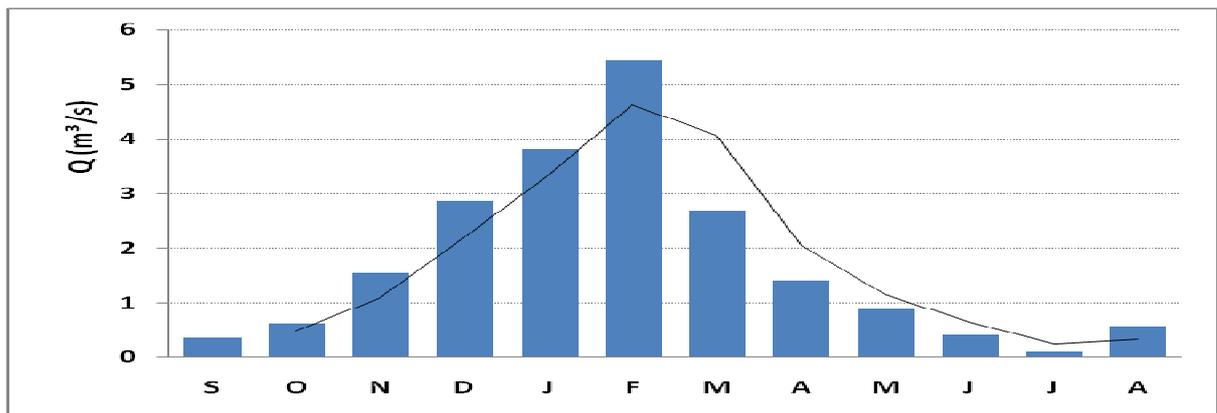


Figure 40: Variation des débits moyens mensuels (en m³/s) à la station de Tsalat

3. Les débits moyens saisonniers

A partir des valeurs moyennes mensuelles interannuelles, nous avons calculé les écoulements moyens saisonniers exprimés en m³/s pour chaque station, en additionnant les débits des mois de chaque saison.

a. Station d'Aguibet Ezziar

La lame d'eau écoulee augmente de l'automne à l'hiver où elle atteint une valeur maximale de 15,25 m³/s puis diminue jusqu'en été avec un minimum de 0,26 m³/s (Fig. 41).

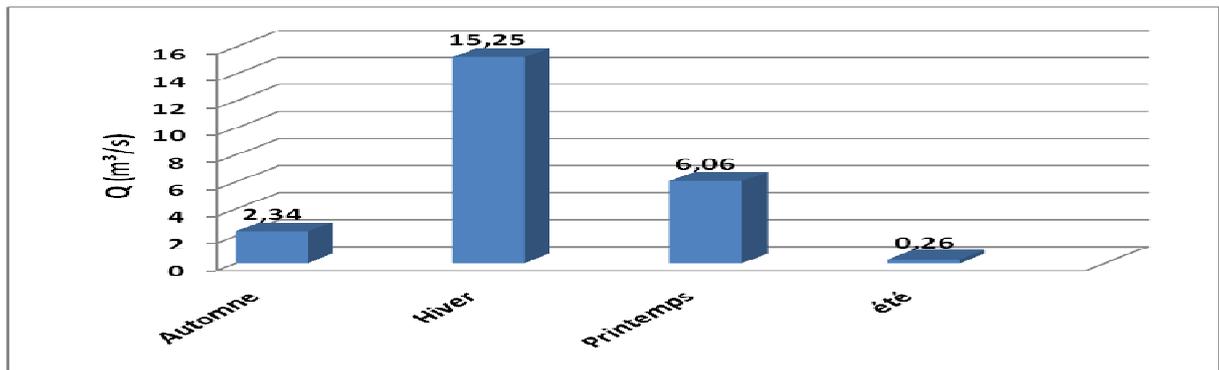


Figure 41: Variation saisonnière des débits (en m³/s) à la station d'Aguibet Ezziar

b. Station de Lalla Chafia

On a le même comportement des débits saisonniers qu'à la station d'Aguibet Ezziar, mais avec des écoulements plus importants en printemps. Le maximum enregistré en hivers est de 15,69 m³/s et le minimum de 0,36 m³/s en été (Fig.42).

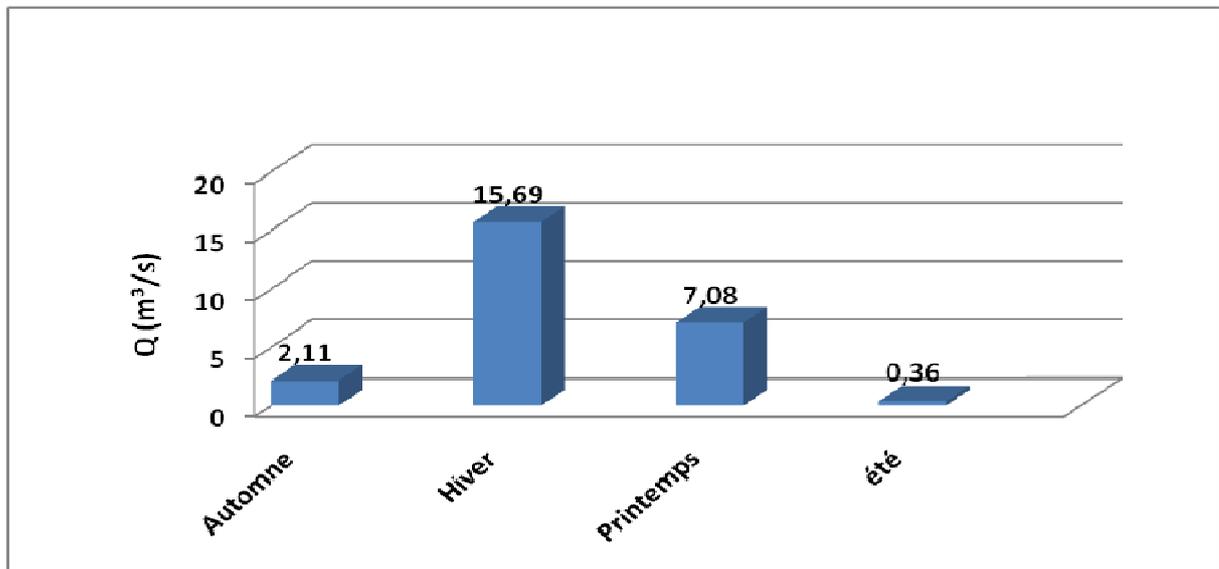


Figure 42: Variation saisonnière des débits (en m³/s) à la station de Lalla Chafia

c. Station de Tsalat

Le débit augmente de l'automne à l'hiver où elle atteint une valeur maximale de 4,03 m³/s puis diminue jusqu'en été avec un minimum de 0,35 m³/s. On a le même comportement des débits saisonniers qu'aux les deux autres stations (Aguibet Ezziar et Lalla Chafia), mais avec des écoulements moins importants.

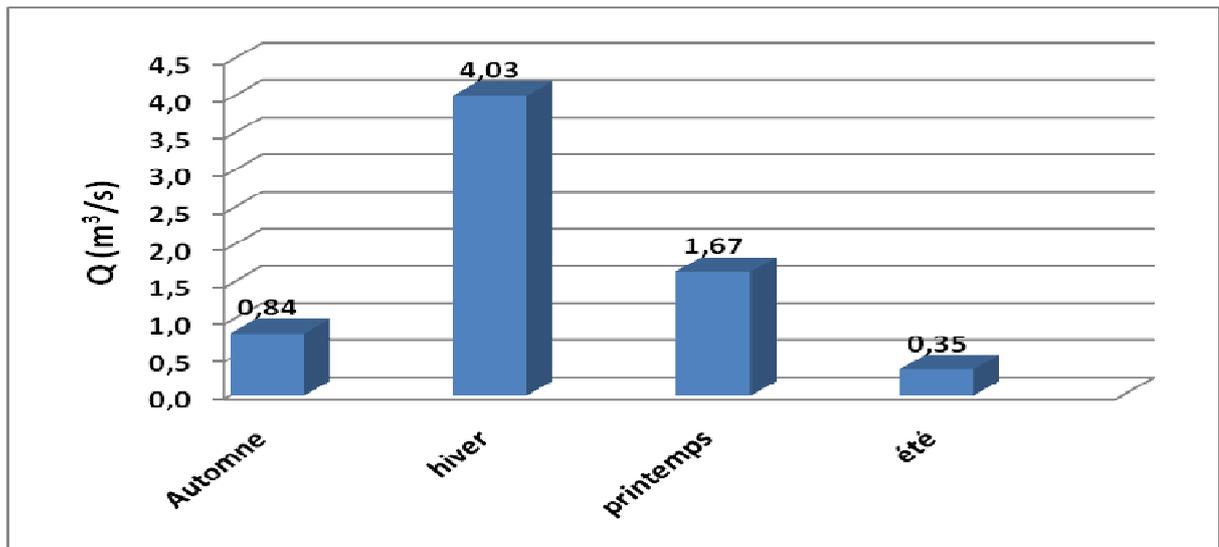


Figure 43: Variation saisonnière des débits (en m³/s) à la station de Tsalat

Conclusion

Pour les trois stations du bassin versant Bouregreg (S.S), l'hiver est la saison la plus pluvieuse et c'est la même saison qui a connu les plus grands écoulements, donc il n'y pas de décalage saisonnier entre les précipitations et les écoulements. Cette bonne réponse des débits aux précipitations abattues, intéresse surtout les mois à forte pluviosité où s'opèrent des averses concentrées déclenchant des crues de courte durée. Ces crues importantes échappent généralement aux effets de l'évaporation et de l'infiltration. Ces derniers agissent sur les faibles crues en diminuant leurs débits.

En conclusion de cette analyse des débits dans ces trois stations, on notera que l'oued Bouregreg présente les caractéristiques des cours d'eau temporaires typiques des régions arides à semi-arides, avec une forte irrégularité interannuelle des débits et des précipitations abattues sur le bassin. Les réserves nivales qui peuvent régulariser le régime de l'oued en période estivale sont faibles. La variation des modules annuels semble fortement influencée par les crues.

III. Les apports du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA)

On va essayer dans cette partie, de faire une étude des apports mensuels et annuels pour la station du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah.

1. Apports annuels

Pour une période d'observation allant de 1939/40 à 2008/09 soit 69 ans, la variation des apports annuels présente une grande irrégularité, la valeur moyenne annuelle des apports est de l'ordre **647,4 Mm³**. On note que le minimum égal à 67,2 Mm³ enregistré en 1940/41 et un maximum égal à 2406,7 Mm³ enregistré en 1992/93.

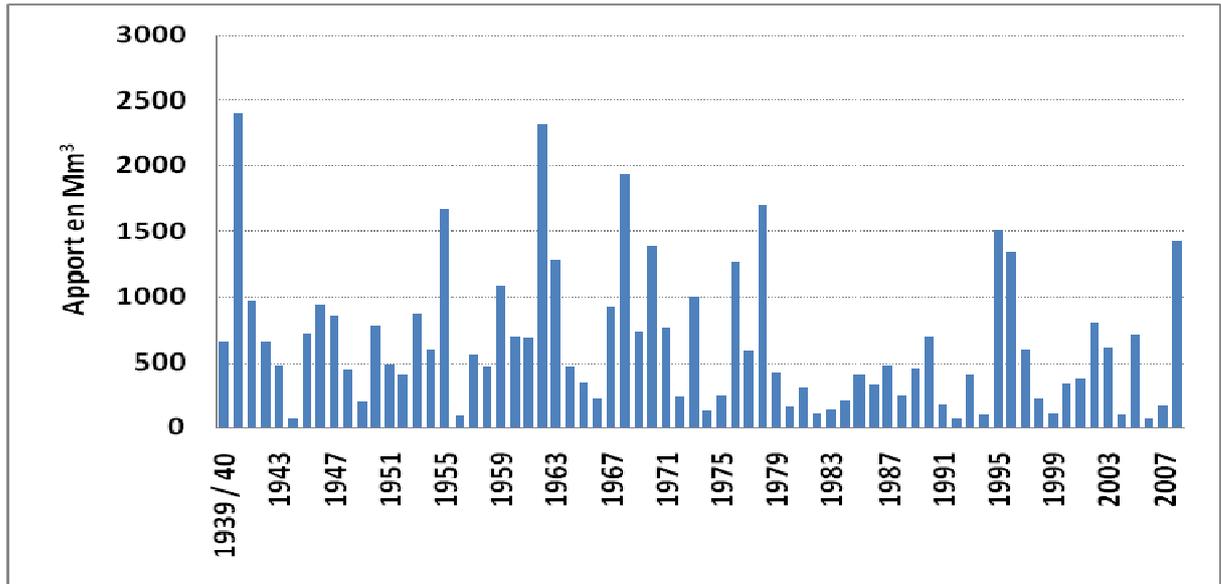


Figure 44: Variation des apports moyens annuels (en Mm³) à la station du barrage SMBA

2. Apports mensuels

La figure 45 montre que les apports augmentent rapidement de septembre à février où ils atteignent une valeur maximale de 140,3 Mm³, puis il diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale de 6,3 Mm³ en août. Avec une moyenne égale à 54,1 Mm³. Donc on a un régime simple à un seul pic en hiver.

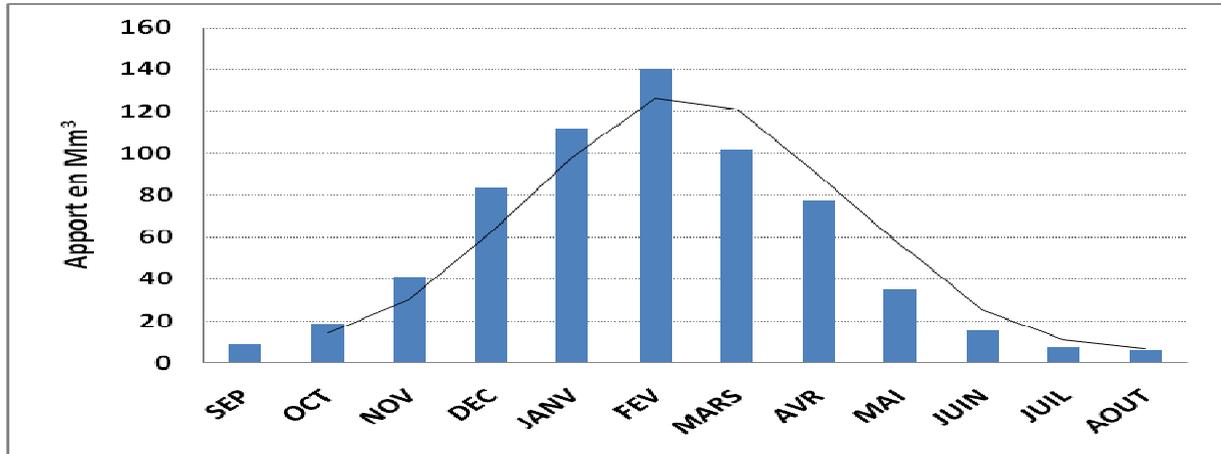


Figure 45: Variation des apports moyens mensuels (en Mm³) à la station du barrage SMBA

IV. Relations pluie-débit

1. Corrélation entre précipitations et débits

La corrélation "pluie-débit" suit généralement une loi linéaire (liaison entre ces deux paramètres). L'étude de la fonction de régression entre les deux paramètres vérifie cette relation. L'existence d'un fort coefficient de corrélation "R" traduit généralement une liaison étroite entre Les précipitations et les débits sont.

La corrélation entre les précipitations et les débits a pour but de mettre en évidence la part des pluies, des écoulements et des pertes dans le bilan hydrologique, et les inter-relations qui existent entre ces différents paramètres. Ceci, afin de mieux

comprendre les mécanismes et de comparer les différents sous bassins versants. Pour cela, une étude des interactions entre les pluies et les débits à des pas de temps annuels et mensuels, s'avère nécessaire pour confirmer les hypothèses sur l'intervention de l'évaporation, l'évapotranspiration et l'infiltration sur les débits que l'on trouve à l'exutoire. Les débits sont convertis en lame d'eau écoulee (en mm) afin de les corrélés avec la pluie (en mm) les superficies des stations utilisées sont : $S_{\text{Aguibet Ezziar}} : 3266 \text{ km}^2$; $S_{\text{Lalla Chafia}} : 3230 \text{ km}^2$.

2. *Corrélation entre les précipitations et les écoulements annuels*

- *Au niveau du sous bassin d'Aguibet Ezziar*

Pour cette corrélation (Fig.46), nous avons tenu compte des lames écoulées à Aguibet Ezziar (calculées à partir des débits moyens annuels) et des précipitations moyennes annuelles des cinq stations (**Barrage SMBA, Aguibet Ezziar, Dar Soltane, Lalla Chafia, Tsalat**) sur une période de 21 ans (1984/1985-2005/2006).

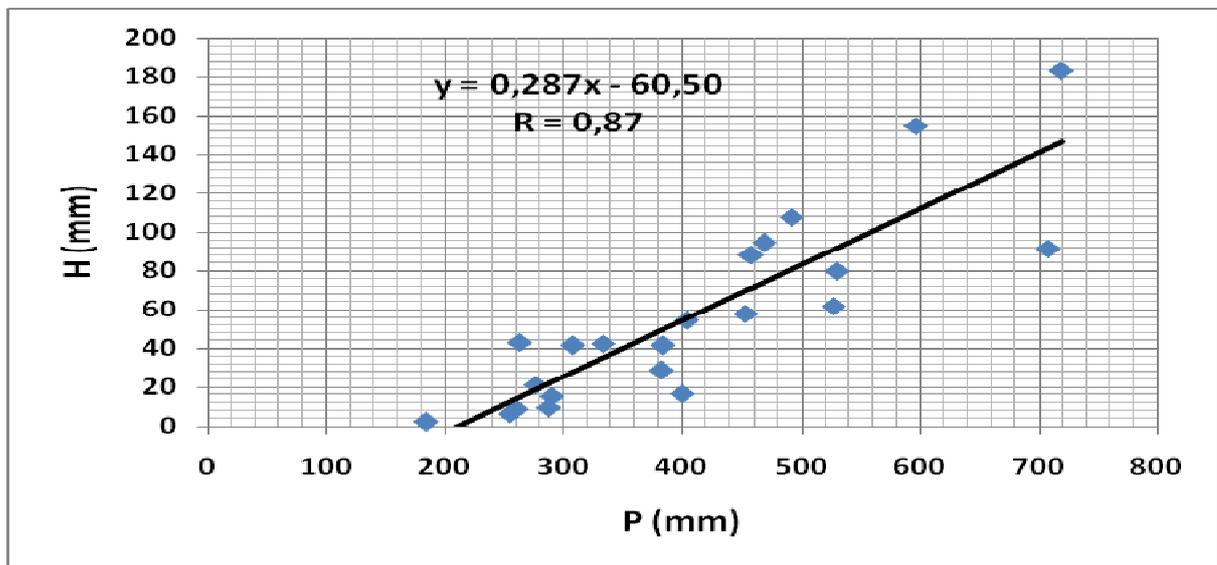


Figure 46: Corrélation entre les précipitations et les écoulements annuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar

La figure montre la variation de la lame d'eau écoulee en fonction des précipitations avec un coefficient de corrélation élevé ($R= 0,87$). Les précipitations et les écoulements sont donc étroitement liés. En effet, ce qui est retenu en automne et hiver, ressort en hiver, en printemps et en été, ce qui donne des années hydrologiques relativement indépendantes.

- *Au niveau du sous bassin de Lalla Chafia*

Sur la figure 47, la corrélation porte sur une période de 21 ans (1984/1985-2005/2006) entre les écoulements à Lalla Chafia et les précipitations moyennes annuelles à l'échelle de tout le bassin de Bouregreg (S.S) en prenant en considération

les précipitations des cinq stations qui couvrent ce bassin (Barrage SMBA, Aguibet Ezziar, Dar Soltane, Lalla Chafia, Tsalat).

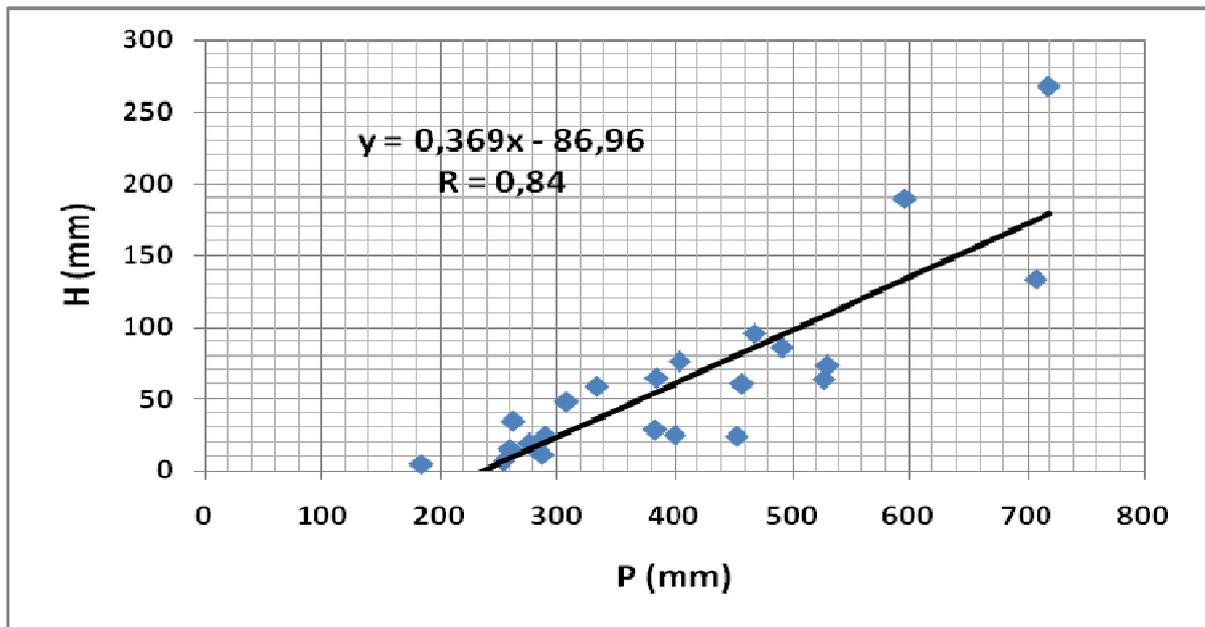


Figure 47: Corrélation entre les précipitations et les écoulements annuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia

Le coefficient de corrélation est élevé ($R= 0,84$). Les pluies et les écoulements sont donc étroitement liés. Les années de forte pluviosité ont des écoulements élevés et les années de faible pluviosité ont généralement des écoulements faibles.

3. Corrélation entre les précipitations et les écoulements mensuels

- *Au niveau du sous bassin d'Aguibet Ezziar*

A l'échelle mensuelle, la figure 48 illustre cette corrélation entre les précipitations moyennes mensuelles dans le bassin de Bouregreg (S.S) (moyenne des cinq stations : Barrage SMBA, Aguibet Ezziar, Dar Soltane, Lalla Chafia, Tsalat, et les écoulements de l'oued enregistrés à la station d'Aguibet Ezziar.

Le nuage des points mesurés prend la forme d'une droite inclinée par rapport aux axes principaux ; la relation entre ces deux signaux, (d'entrée : pluie et de sortie : lame d'eau écoulee) est donc, linéaire. L'équation de la droite de régression est : $Y = 0,186 x - 1,77$.

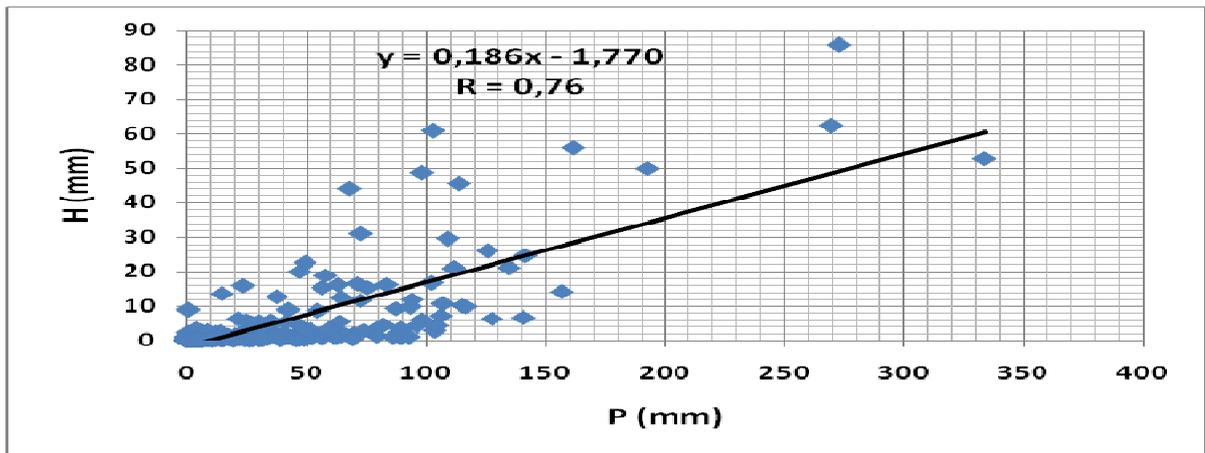


Figure 48: Corrélation entre les précipitations et les écoulements mensuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar

Le coefficient de corrélation entre ces deux paramètres égal à **0,76**, ça confirme le résultat graphique déjà établi. Cette bonne réponse des écoulements aux précipitations abattues, intéresse surtout les mois à forte **pluviosité**. La plupart des averses concentrées déclenchent des crues a courte durée. Ces crues importantes échappent généralement aux effets de l'évaporation et de l'infiltration.

- *Au niveau du Sous bassin de Lalla Chafia*

La figure 49 illustre la corrélation entre les précipitations moyennes mensuelles des cinq stations déjà citées et les lames d'eau écoulés de l'oued enregistrées à la station de Lalla Chafia. Comme à Aguibet Ezziar, la figure ci-dessous présente les mêmes tendances, dont L'équation de la droite de régression est : **Y= 0,216X - 2,223**

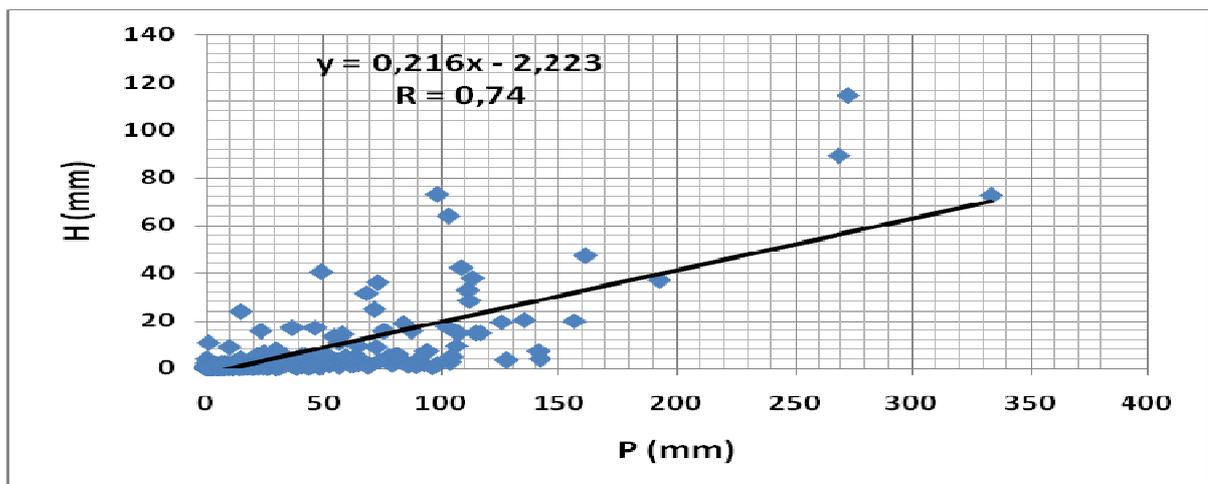


Figure 49: Corrélation entre les précipitations et les écoulements mensuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia

Comme pour Aguibet Ezziar, la corrélation pluie-lame d'eau dans cette station montre un coefficient de corrélation égal à 0,74, le même raisonnement de la station précédente peut se dire pour argumenter ce résultat. Les précipitations et les écoulements sont liés. Les débits ne sont apparemment pas trop perturbés par les facteurs d'évaporation et d'infiltration.

On peut donc conclure que dans le bassin versant de Bouregreg (S.S), on pourrait prévoir les débits en aval à partir de ceux observés en amont.

V. Relation débit-débit entre Aguibet Ezziar et Lalla Chafia

Les résultats des deux corrélations faites sur la station d'Aguibet Ezziar et de Lalla Chafia, montrent une grande ressemblance du régime moyen d'écoulement. Une corrélation des débits à l'échelle annuelle et mensuelle entre ces deux stations semble obligatoire pour connaître le degré de ressemblance (notons que la station Lalla Chafia se situe à quelques kilomètres seulement à l'amont d'Aguibet Ezziar).

1. *Corrélation débit-débit à l'échelle annuelle*

Cette corrélation va nous permettre de suivre les changements du débit d'une station à l'autre. Le coefficient de corrélation est élevé ($R = 0,94$), ce qui implique qu'il existe une bonne corrélation entre les débits des deux stations.

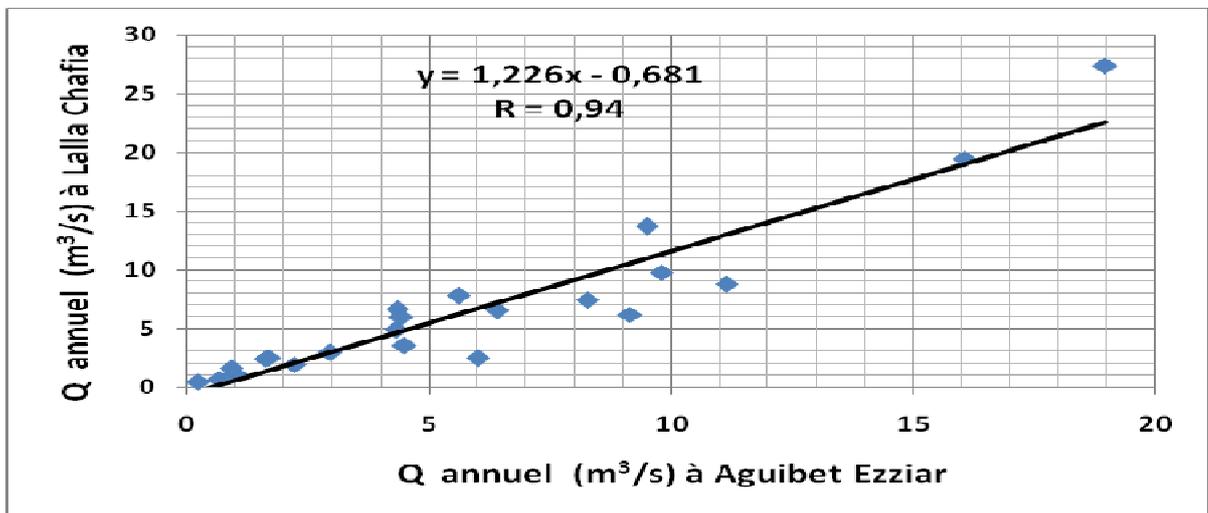


Figure 50: Corrélation entre les débits moyens annuels à Aguibet Ezziar et les débits moyens annuels à Lalla Chafia

En général, on constate à l'échelle annuelle la même tendance des écoulements au niveau des deux stations. Ceci s'explique par le fait que le bassin versant de Bouregreg (S.S) est presque montagneux, les pentes y sont fortes, et les

écoulements superficiels ne sont pas trop influencés ou perturbés par des infiltrations ou des évapotranspirations trop variables.

2. *Corrélation débit-débit à l'échelle mensuelle*

Comme à l'échelle annuelle, la corrélation entre les débits des deux stations est bonne avec un coefficient de corrélation proche de 1 ($R = 0,95$). Les débits des deux stations sont donc fortement liés et rien ne semble perturber. Ceci nous permettrait de prévoir les débits en aval à partir de ceux observés en amont.

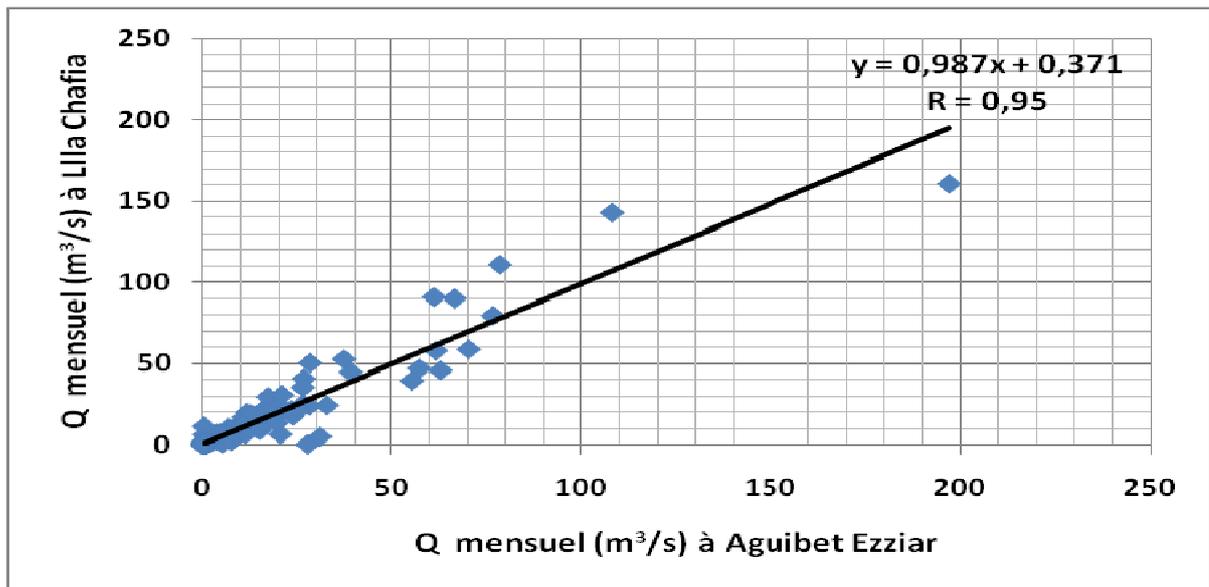


Figure 51: Corrélation entre les débits moyens mensuels à Aguibet Ezziar et les débits moyens mensuels à Lalla Chafia

VI. Les bilans hydrologiques

Le calcul des bilans hydrologiques exacts au niveau d'un bassin versant nécessite une bonne connaissance et une quantification précise de ses entrées "précipitations" et de ses sorties "débits à l'exutoire du bassin" d'une part, et de leurs coefficients particuliers d'autre part. Il importe donc avant toute tentative de calcul, de bien préciser le degré de liaison entre ces différents paramètres.

L'élaboration d'un bilan hydrologique a pour but donc, de comparer les entrées et les sorties de l'eau dans un bassin versant, pour cela trois paramètres sont à calculer :

1. *La lame d'eau écoulée*

La lame d'eau écoulée représente la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire définie comme étant le rapport entre le débit et la surface du bassin versant au laps de temps considéré. Elle est donnée par la relation :

$$H = Q * (3600 * 24 * 365) / S$$

Avec :

H : lame d'eau écoulée en mm

Q : débit à l'exutoire en m³/s

S : la surface du bassin versant en km² ; **S**_{Aguibet Ezziar} : 3266 km² ; **S**_{Lalla Chafia} : 3230 km².

2. Le déficit d'écoulement

Il constitue à côté des précipitations, des débits et de l'évapotranspiration, un des plus importants termes des bilans hydrologiques. Il représente la quantité de pluies ayant échappé à l'écoulement et qui satisfait l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'infiltration (I) dans le bassin :

$$D.E = P - H \quad (1)$$

$$D.E = ETR + I \quad (2)$$

Avec :

D.E : déficit d'écoulement en mm

P : précipitation en mm

H : lame d'eau écoulée en mm

ETR : évapotranspiration en mm

I : infiltration en mm

Sur une longue période, les eaux d'infiltration sont reprises en surface et dans les niveaux supérieurs du sol par l'évapotranspiration (sol + végétaux) ; le reste d'eau qui échappe à cette évapotranspiration va alimenter l'écoulement hypodermique dans un premier temps, puis l'écoulement souterrain. Ces deux types d'écoulement, associés à l'écoulement rapide (de surface ou ruissellement) constituent l'écoulement total mesuré à la station de jaugeage.

- *Corrélations entre les précipitations et les déficits d'écoulement annuels :*

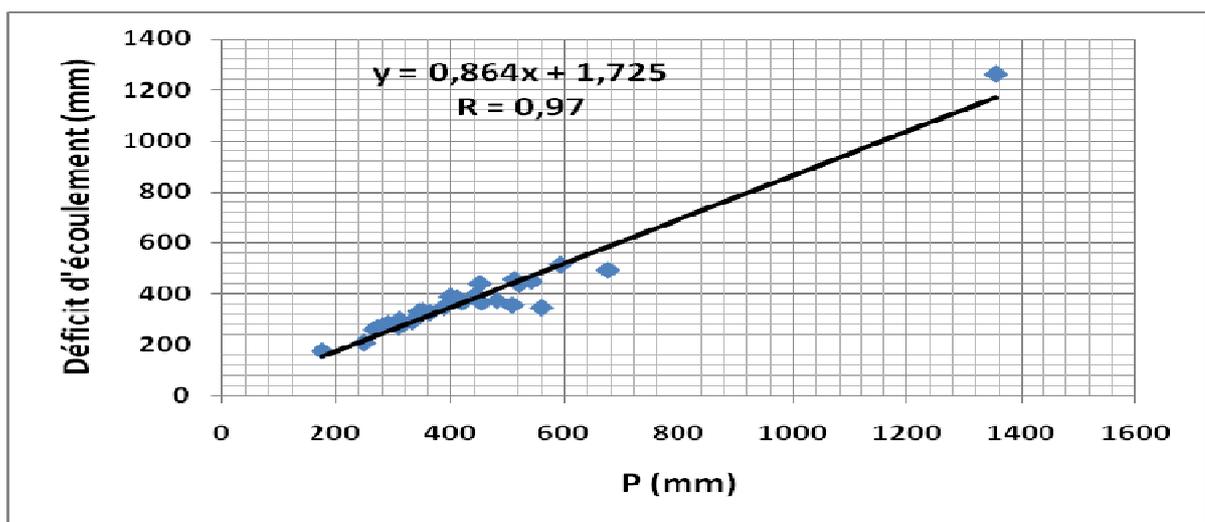


Figure 52: Corrélation entre les précipitations et les déficits d'écoulements annuels à la station d'Aguibet Ezziar

La figure 52 montre la variation du déficit d'écoulement en fonction des précipitations. Le déficit d'écoulement varie de 435,9 mm en 1977/78 à 447,4 mm en 2005/06 avec un déficit moyen de 380,2 mm. La corrélation entre les précipitations et les déficits d'écoulements à Aguibet Ezziar est très bonne avec un coefficient de corrélation de 0,97.

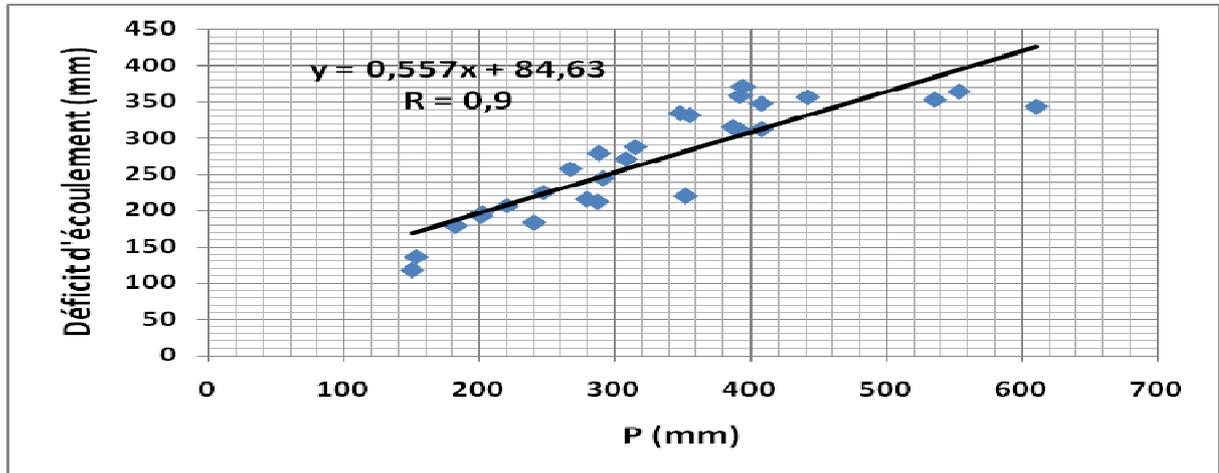


Figure 53: Corrélation entre les précipitations et les déficits d'écoulements annuels à la station de Lalla Chafia

Au niveau de la station de Lalla Chafia, les déficits annuels varient de 310,6 mm en 1977/78 à 312,5 mm en 2005/96 ; le déficit moyen est de l'ordre de 268,4 mm. La corrélation entre les précipitations et les déficits d'écoulements de Lalla Chafia est identique à celle d'Aguibet Ezziar avec un coefficient de corrélation égal à 0,9.

Conclusion

Pour les deux stations d'Aguibet Ezziar et de Lalla Chafia, plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de la variation des déficits d'écoulement : la nature des précipitations, la température et l'évapotranspiration. Pour notre cas, la cause essentielle est la variation des précipitations annuelles. Les deux figures confirment cette interprétation. La corrélation entre ces deux facteurs (précipitations annuelles et déficits d'écoulement annuels) est parfaite. Ceci est aussi vérifié empiriquement par le coefficient de corrélation ($R = 0,97$ et $0,9$).

Les précipitations annuelles semblent donc parmi les facteurs déterminant dans la variation des déficits d'écoulement dans le bassin de Bouregreg (S.S).

3. Le coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement (CE) est par définition le rapport de la lame d'eau écoulé à travers la section de jaugeage à la lame d'eau précipitée sur le bassin ;

il exprime de ce fait la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin.

Il est donné par la relation suivante : $CE = H / P$

Avec :

CE : coefficient d'écoulement en %

P : précipitations en mm

H : la lame d'eau écoulée en mm

Le coefficient d'écoulement dépend généralement de trois facteurs principaux :

- La pluie : qui intervient par son intensité et sa répartition spatio-temporelle.
- Les caractéristiques physiques du bassin versant notamment sa superficie, ses pentes, la nature du substratum, la perméabilité, la végétation et l'état d'humidité d'un sol quand commence la pluie.
- La température qui régit l'évapotranspiration.
- *Corrélation entre les précipitations et les coefficients d'écoulement annuels :*

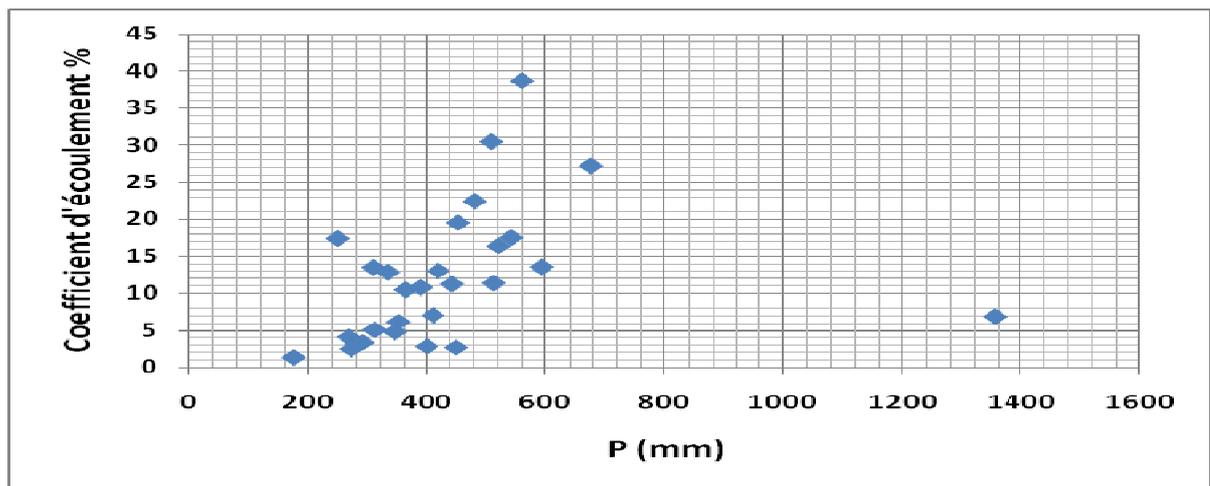


Figure 54: Corrélation entre les précipitations et les coefficients d'écoulements sur le bassin de Bouregreg (S.S) à Aguibet Ezziar (1977/78 à 2005/06)

La figure 54 montre la relation entre les coefficients d'écoulements et les précipitations à l'échelle annuelle ; le coefficient d'écoulement varie de 16,3 % en 1977/1978 à 17,4 % en 2005/06. La corrélation entre ces deux paramètres est peu convaincante comme l'indique le coefficient de corrélation de 0,27 raison pour laquelle on n'a pas tracé la courbe de tendance.

Au niveau de la station de Lalla Chafia (Fig. 55), le bassin montre une mauvaise corrélation entre les coefficients d'écoulements et les précipitations avec un coefficient faible de 0,6. Le coefficient d'écoulement varie ici de 21 en 1977/78 à 23,4 en 2005/06.

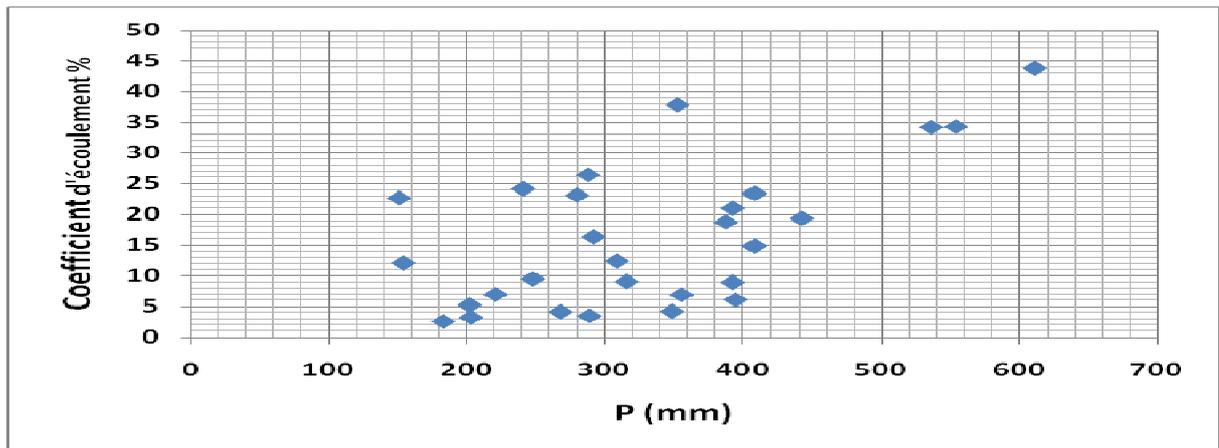


Figure 55: Corrélation entre les précipitations et les coefficients d'écoulements sur le bassin de Bouregreg (S.S) à Lalla Chafia (1972/73- 2005/06)

Conclusion

Une corrélation entre ces coefficients d'écoulements (C.E) interannuelles et les précipitations correspondantes montrent un nuage de points dispersé ; le degré de liaison entre ces deux paramètres est donc assez médiocre comme le montre les deux figures au dessus. En effet, les coefficients d'écoulement présentent des variations importantes pour d'égales lames d'eau précipités ; c'est le cas des deux cycles hydrologiques des deux stations du bassin de Bouregreg (S.S), **1977/78 à 2005/06** pour la station d'Aguibet Ezziar avec une moyenne annuelle de précipitation égal à **437,8 mm** et **1977/78 à 2005/06** pour la station de Lalla Chafia, avec une moyenne annuelle de précipitation égal à **329,7 mm**.

La variation des C.E (13,4 à 14,3 % pour Aguibet Ezziar et 21 à 23,4 % pour Lalla Chafia) peut s'expliquer par la variabilité des intensités des précipitations. Une pluie intense et concentrée en peu de temps aura un coefficient d'écoulement assez grand que pour une pluie fine et étalée dans le temps. Dans ce dernier cas, le déficit d'écoulement est souvent le plus important en raison de l'action conséquente de l'évapotranspiration sur les précipitations de faible intensité.

L'état de l'humidité des sols agit également sur les coefficients d'écoulement. Une pluie abattue sur un sol sec a plus de chance d'être infiltrée et évapotranspirée qu'une pluie tombée sur un sol préalablement humidifié.

4. Les bilans hydrologiques annuels

En conclusion, les deux tableaux au dessous résument l'essentiel de ces termes des bilans hydrologiques annuels au bassin de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar pour une période allant de **1977/78 à 2005/06** et à la station de Lalla Chafia pour la même période (**1977/78 à 2005/06**) :

Tableau 23: Bilans hydrologiques annuels dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la station d'Aguibet Ezziar

Année	Précipitation (mm)	Lame d'eau écoulée (mm)	Déficit d'écoulement (mm)	coefficient d'écoulement (%)
1977/78	521,0	85,1	435,9	16,3
1978	560,0	216,5	343,5	38,7
1979	443,0	49,5	393,5	11,2
1980	268,0	10,8	257,2	4,0
1981	363,0	37,9	325,1	10,4
1982	399,0	10,9	388,1	2,7
1983	450,0	11,7	438,3	2,6
1984	311,0	15,5	295,5	5,0
1985	419,0	54,3	364,7	13,0
1986	309,0	41,4	267,6	13,4
1988	410,0	28,5	381,5	7,0
1989	513,0	58,0	455,0	11,3
1990	1354,0	91,7	1262,3	6,8
1991	345,0	16,3	328,7	4,7
1992	272,0	6,5	265,5	2,4
1993	388,0	41,7	346,3	10,7
1994	176,0	2,2	173,8	1,2
1995	675,0	183,2	491,8	27,1
1996	509	154,9	354,1	30,4
1997	453	88,2	364,8	19,5
1998	351	21,2	329,8	6,1
1999	291	9,6	281,4	3,3
2000	333	42,5	290,5	12,8
2001	249	43,1	205,9	17,3
2002	481	107,6	373,4	22,4
2003	593	79,9	513,1	13,5
2004	281,0	8,9	272,1	3,2
2005	542,0	94,6	447,4	17,4
moy	437,8	57,6	380,2	11,9
max	1354,0	216,5	1262,3	38,7
min	176,0	2,2	173,8	1,2

Tableau 24: Bilans hydrologiques annuels dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la station de Lalla Chafia

Année	Précipitation (mm)	Lame d'eau écoulee (mm)	Déficit d'écoulement (mm)	Coefficient d'écoulement (%)
1977/78	393,0	82,4	310,6	21,0
1978	536,0	183,1	352,9	34,2
1979	393,0	34,9	358,1	8,9
1980	202,0	10,5	191,5	5,2
1981	309,0	38,3	270,7	12,4
1982	289,0	9,9	279,1	3,4
1983	349,0	14,6	334,4	4,2
1984	248,0	23,4	224,6	9,5
1985	288,0	76,1	211,9	26,4
1986	292,0	47,6	244,4	16,3
1988	316,0	28,5	287,5	9,0
1989	395,0	23,8	371,2	6,0
1990	353,0	133,5	219,5	37,8
1991	356,0	24,4	331,6	6,9
1992	203,0	6,5	196,5	3,2
1993	280,0	64,7	215,3	23,1
1994	183,0	4,6	178,4	2,5
1995	611,0	267,4	343,6	43,8
1996	554,0	189,8	364,2	34,3
1997	408	60,4	347,6	14,8
1998	154	18,6	135,4	12,1
1999	268	11,0	257,0	4,1
2000	241	58,2	182,8	24,1
2001	151	34,2	116,8	22,6
2002	442	85,5	356,5	19,3
2003	388	72,7	315,3	18,7
2004	221	15,3	205,7	6,9
2005	408	95,5	312,5	23,4
moy	329,7	61,3	268,4	16,2
max	611,0	267,4	371,2	43,8
min	151,0	4,6	116,8	2,5

Remarque : On note l'absence des données pluviométriques de l'année hydrologique 1987/1988 des deux stations Aguibet Ezziar et Lalla Chafia dans les séries des deux tableaux (23 et 24) des bilans hydrologiques.

5. Calcul du bilan hydrologique de la retenue du barrage SMBA

La détermination du bilan hydrique de la retenue du barrage SMBA a été basée sur l'application de l'équation du bilan qui découle du principe de conservation des volumes d'eaux (Alberg et al., 1997) soit :

$$\Delta V = (V_r + V_{ecs} + V_p + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u)$$

Avec : ΔV : Variation du volume ; V_r : volume ruisselé ; V_{ecs} : volume d'apport souterrain ; V_p : volume d'apport de pluie ; V_f : volume de fonte des neiges ; V_{ev} : Volume d'évaporation ; V_d : Volume déversé ; V_{vi} : volume vidangé ; V_i : volume infiltré ; V_u : volume utilisé.

L'application de cette équation, consiste à mesurer toutes les variables qui sont accessibles à l'observation à un pas de temps de 5 min, puis de les transposer à l'échelle journalière ou mensuelle. Les volumes de fonte de neige (V_f) et des apports d'eaux souterraines (V_{ecs}) sont supposés nuls suite aux caractéristiques de la région qui ne permettent pas la formation d'un tel écoulement.

Le volume d'apport de la pluie tombant directement dans la retenue (V_p), est déterminé en traduisant les volumes obtenus par le pluviographe à l'échelle de la surface inondée de la retenue. Cette surface est déterminée en fonction de la côte enregistrée par la sonde (ΔV), rapportée à la courbe hauteur/ Surface du barrage. De même les apports, sont reconstitués à partir de la variation de la côte de la retenue pour une précision de 1 cm de hauteur et pou un pas de temps de 5 min. Parfois, on utilise une précision de 2 cm pour éviter l'action de déferlement des vagues.

Le tableau 25 ci-dessous montre la variation du volume ΔV (en Mm^3) de la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA), pour une série d'année allant de : 1977/78 jusqu'à 2008/09. Ce volume varie de $-66,6 Mm^3$ en 1977/78 à $654,1 Mm^3$ en 2008/09, avec une moyenne inter-annuelle de : $14,8 Mm^3$, et un maximum égal à : $654,1 Mm^3$ en 2008/09 et un minimum égal à : $-141,8 Mm^3$ en 1982/83.

Chapitre III.
ANALYSE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE ET BILAN HYDROLOGIQUE

Année	APPORT (en Mm ³)	VANNE DE FOND (en Mm ³)	EVACACUATEUR DES CRUES (en Mm ³)	VOLUME EVAPORE (en Mm ³)	AEP (en Mm ³)	ΔV (en Mm ³)
1977 / 78	1257,1	935,8	264,8	42,1	81,0	-66,6
1977	585,8	367,9	95,7	40,9	79,3	2,1
1978	1701,4	795,8	686,0	46,9	87,4	85,2
1979	422,2	281,9	0,0	46,2	92,4	1,6
1980	157,1	84,8	0,0	42,2	111,1	-81,0
1981	309,6	34,5	5,5	35,7	128,0	106,0
1982	109,2	80,0	0,0	32,4	138,7	-141,8
1983	138,3	21,1	0,0	27,2	145,6	-55,6
1984	205,8	5,2	0,0	31,2	144,7	24,6
1985	404,0	63,3	49,6	30,7	147,2	113,1
1986	321,9	140,1	19,1	38,9	157,1	-33,3
1987	477,8	224,3	45,4	39,5	158,6	10,0
1988	244,8	40,1	0,0	41,0	171,6	-7,9
1989	458,7	193,0	24,9	43,6	185,4	11,9
1990	697,5	367,4	96,8	38,1	190,7	4,5
1991	177,9	36,6	0,0	33,1	173,9	-65,7
1992	67,2	0,0	0,0	33,1	163,2	-129,1
1993	409,5	33,6	2,6	37,4	151,3	184,6
1994	101,7	0,0	0,0	39,7	152,2	-90,2
1995	1501,4	512,6	659,1	39,1	160,1	130,4
1996	1338,9	640,4	507,6	41,0	167,9	-18,0
1997	598,3	294,5	104,7	43,5	171,9	-16,2
1998	221,9	21,9	0,9	43,1	170,2	-14,1
1999	106,9	0,0	0,0	43,9	159,6	-96,5
2000	339,4	60,2	12,2	44,0	154,5	68,5
2001	376,4	111,9	22,8	44,1	159,9	37,7
2002	797,9	394,9	189,8	44,3	155,6	13,4
2003	602,9	257,8	152,1	44,8	159,0	-10,8
2004	103,9	0,0	0,0	40,5	164,0	-100,5
2005	706,0	327,8	69,7	31,7	161,9	114,9
2006	69,5	0,0	0,0	32,1	160,0	-122,6
2007	168,7	0,0	0,0	27,2	166,1	-24,6
2008	1424,5	441,4	224,9	9,9	94,3	654,1
moy	503,2	205,1	98,0	37,9	147,4	14,8
max	1701,4	935,8	686,0	46,9	190,7	654,1
min	67,2	0,0	0,0	9,9	79,3	-141,8

Tableau 25 : Variation du volume annuel dans le bassin versant de Bouregreg (S.S) à la retenue du barrage SMBA

Commentaire : la variation du volume de l'eau présente une grande irrégularité, il dépend surtout des apports entrants dans la retenue du barrage et des volumes évacués

par les vannes de vidange et les évacuateurs de crue, sans oublier que l'utilisation des eaux pour l'alimentation en eau potable par l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) a augmenté ces dernières années suite à l'extension démographique pour les trois grandes villes Rabat-Salé et Casablanca.

VII. Mobilisation et utilisation des ressources en eau

1. L'effort de mobilisation

Le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (S.M.B.A), situé à l'aval de la confluence entre les oueds Bouregreg et Grou les rivières les plus importants de Bassin versant Bouregreg. Ce barrage est considéré parmi les ouvrages hydrauliques les plus importants à l'échelle du royaume, il compte parmi les cinq premiers grands barrages qui ont inauguré le lancement de la politique des barrages par feu sa Majesté le Roi Hassan II, que dieu l'ait en sa sainte miséricorde.

L'ouvrage a été exécuté entre 1971 et 1974 pour l'alimentation en eau potable et industrielle de la zone côtière de Rabat à Casablanca. Il fournit 31,5 % des 800 Mm³ consommés en eau potable dans tout le Maroc (Lahlou, 1994).

Pour faire face à la demande en eau de plus en plus croissante et au déficit prévisible à l'horizon 2020 en matière d'AEP de la zone atlantique, la surélévation du barrage SMBA a été entamée en 2003 et achevée en juillet 2006. Elle a permis de porter la capacité de stockage de 480 à 1.025 Mm³ et le volume régularisé de 220 à 340 Mm³/an, destiné exclusivement à la satisfaction des besoins en eau potable et industrielle.



Figure 56 : Image satellitaire du barrage SMBA et sa retenue



Figure 57 : Photo du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur le bassin versant de Bouregreg

2. Utilisation de l'eau

Les besoins en eau potable et industrielle exprimés au niveau de la zone de Rabat-Salé-Zammour-Zaërs passeront de 153 Mm³ en 2005 à près de 170 Mm³ en 2020. (A.B.H.B.C).

Les périmètres irrigués dans le bassin de Bouregreg (S.L), d'une superficie de 9000 ha, nécessitent un volume d'eau de 25 Mm³/an.

Usage	Besoins en eau (Mm ³)	
	2005	2020
AEPI	128	145
Irrigation	25	25
Total	153	170

Tableau 26 : Evolution des besoins en eau potable et industrielle entre 2005 et 2020 au niveau de la zone de Rabat-Salé-Zammour-Zaërs

a. Volumes restitués par la prise ONEP

- *Volumes restitués annuelles et leurs variations*

Pour une période allant de 1974/75 à 2008/09 soit 34 ans, la variation des apports annuels présente une grande irrégularité, la valeur moyenne annuelle du volume est de l'ordre **142,5 Mm³**. On note que le minimum égal à 33 Mm³ enregistré en 1974/75 et un maximum égal à 190,7 Mm³ enregistré en 1990/91.

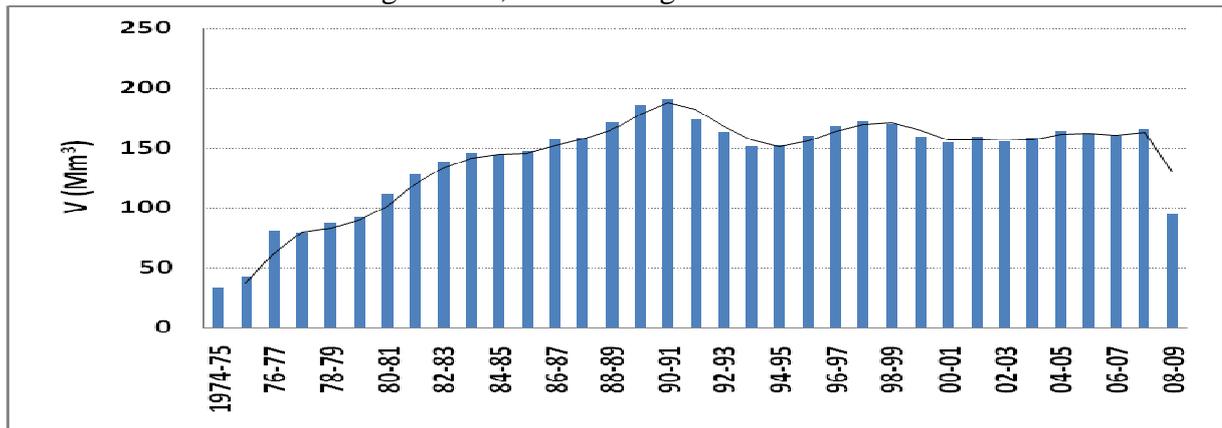


Figure 58: Variation des volumes moyens annuels (en Mm³) restitués par l'ONEP au barrage SMBA

- *Volumes restitués mensuelles et leurs variations*

Pour une série allant de 1974/75 à 2008/09, la valeur maximale des volumes moyens mensuels restitués est enregistrée en juillet et Août de 14 Mm³, suite à une consommation très accentuée dans ces mois de la saison d'été caractérisés par une température très élevée. Alors que la valeur minimale est enregistrée en février (hiver) de 9,8 Mm³, suite d'une demande plus faible de l'eau potable.

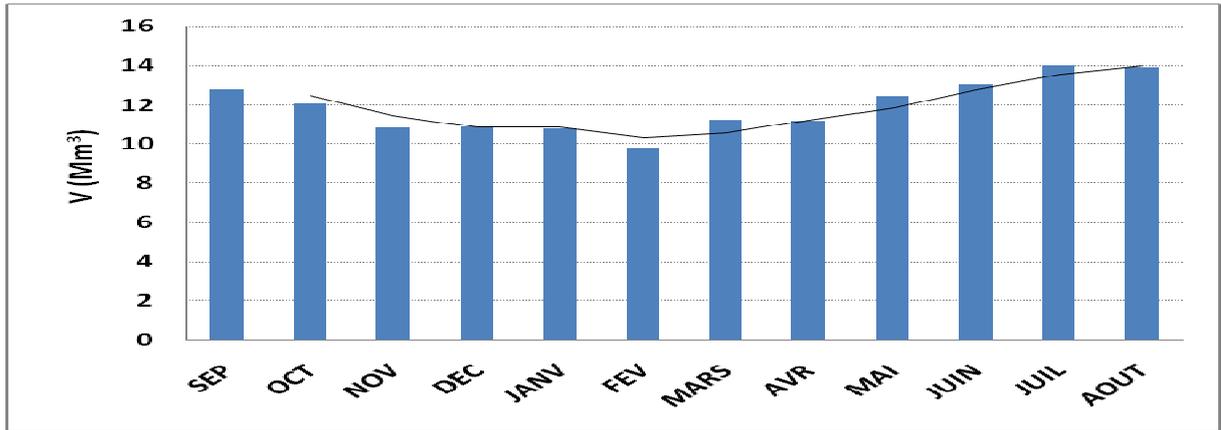
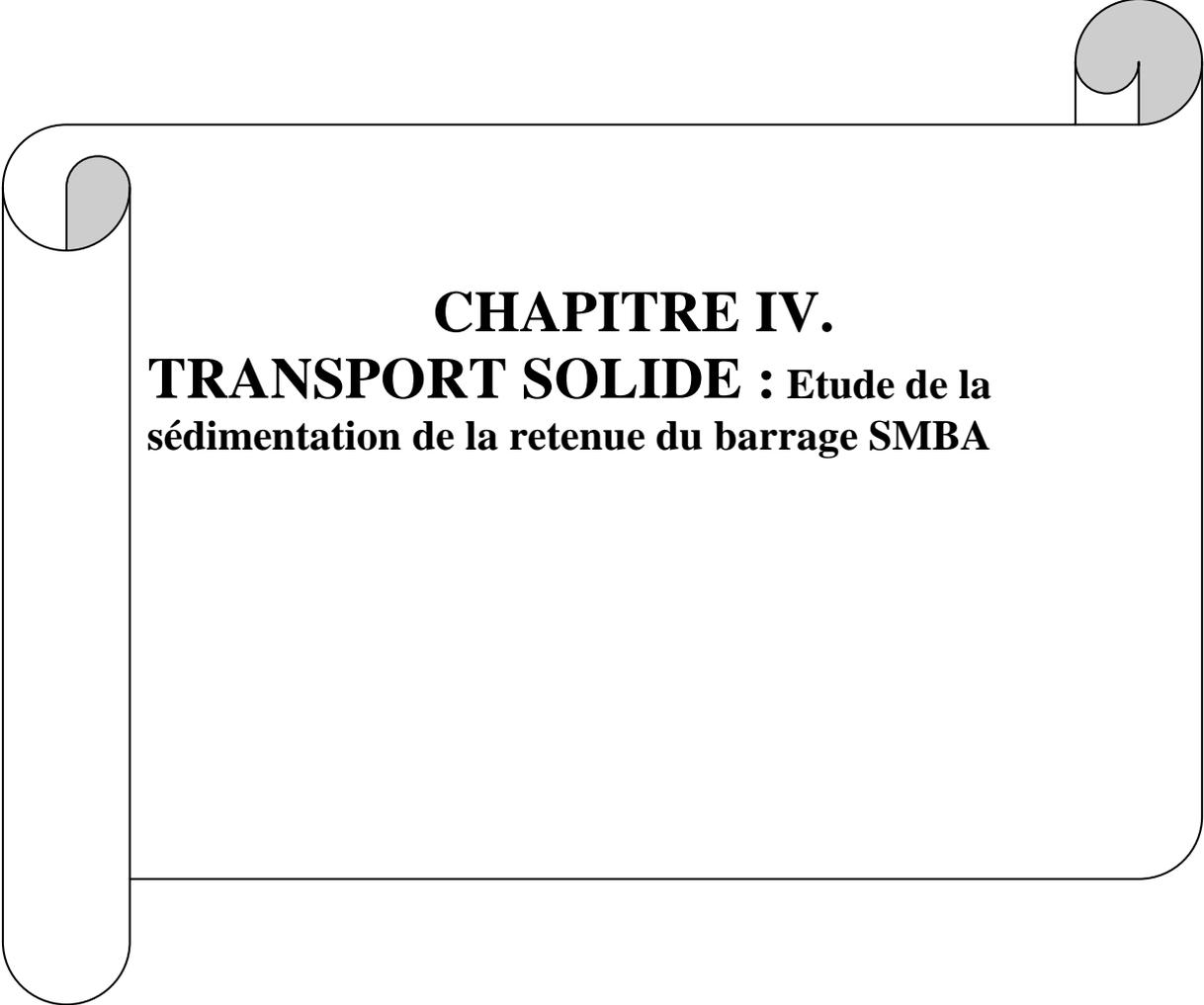


Figure 59: Variation des volumes moyens mensuels (en Mm3) restitués par l'ONEP au barrage SMBA

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right and top. The scroll is outlined in black and has a light gray shaded area on the left side.

CHAPITRE IV.
TRANSPORT SOLIDE : Etude de la
sédimentation de la retenue du barrage SMBA

I. Méthode et Matériels

1. Méthode de campagne bathymétrique

La méthode d'évaluation du taux d'envasement a été basée sur l'étude de la bathymétrie de la retenue du barrage SMBA.

La méthode de campagne bathymétrique a été utilisée pour déterminer l'envasement de plusieurs barrages, en appliquant un sondage ponctuel selon les techniques de l'IRD (ex- ORSTOM) (PEPIN, 1996). Les points de mesures ainsi obtenus sont intégrés dans un système d'information géographique, puis interpolés par krigeage à l'échelle de la surface de la retenue. Le volume totale des sédiments piégés est calculé ensuite par la différence entre le volume initiale et celui obtenu par krigeage.

L'objectif est d'obtenir une représentation graphique du lit de la retenue du barrage notamment sous forme d'un ensemble d'isobathes dont l'analyse permet de mesurer le volume solide due à la sédimentation des particules solides entrant dans la retenue.

Le principe est également applicable à l'exploration d'un plan d'eau quelconque (lac, rivière, mer,...), à condition d'être suffisamment en vue de la rive qui servira au repérage.

Il s'agit donc de mesurer la profondeur sous un niveau de référence, en des points positionnés dans le plan horizontal puis de traiter ces informations pour aboutir à des représentations graphiques exploitables.

2. PROSPECTION BATHYMETRIQUE : Processus ; principe et traitement des données

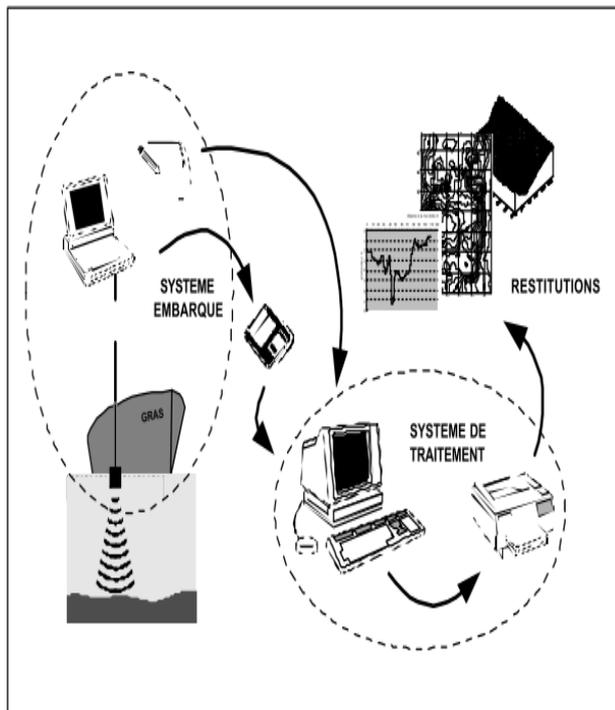


Figure 60 : Les phases de prospection bathymétrique

Le processus complet comprend trois phases :

- préparation,
- acquisition numérique de profils transversaux en respectant simultanément un cheminement (système embarqué),
- traitement des données et restitution (système de traitement).

Une phase complémentaire constitue l'interprétation. Seules les trois premières phases sont présentées ici.

• Préparation

En premier lieu, il convient de disposer d'une carte de la retenue du barrage ou du plan d'eau à une échelle exploitable et que l'on pourra éventuellement agrandir localement.

Lorsque la zone à étudier est définie, on implante un système de repérage sur chacune des deux berges de la retenue.

Il s'agit de deux lignes inextensibles de 100 m de longueur munies de flotteurs numérotés tous les 10 m.

Ces lignes latérales sont tendues sur l'eau à une distance de la berge telle que la hauteur d'eau sous elles soit compatible avec le tirant d'eau du bateau sondeur, en ligne droite, chacune entre deux piquets qui seront topographiés précisément sur la carte de la retenue. Cette opération topographique n'est pas décrite ici.

En principe, on dispose les lignes longitudinalement afin que la droite joignant deux flotteurs de même numéro soit perpendiculaire à l'axe de la retenue. Cependant, on peut avoir avantage à décaler la ligne d'arrivée vers l'amont afin que le

cheminement se fasse contre une composante du courant ce qui facilite la maîtrise de la trajectoire.

Les lignes pourront être brisées si nécessaire. Dans ce cas, les points de brisures seront topographiés comme les extrémités.

Pour élargir la zone de mesure, Il suffira de déplacer les lignes en conservant une des extrémités pour servir d'origine à la zone suivante.

Les repères peuvent également être matérialisés par des signes réalisés avec une bombe de peinture fluorescente sur des surfaces telles des parois de quais parfaitement identifiables sur les cartes.

- *Acquisition numérique de profils*

La chaîne d'acquisition, embarquée sur un bateau motorisé conduit par un pilote, est manipulée par un opérateur et elle est constituée :

- **d'un transducteur à ultra-sons** conditionné par un module électronique. Cet ensemble assure :

- L'émission et la réception des signaux ultrasonores sur commande de l'ordinateur,
- La mesure de la profondeur par comptage du temps aller/retour du signal,
- Le codage de la valeur de la profondeur pour sa prise en compte par l'ordinateur.

- **d'un micro-ordinateur portable** muni d'un logiciel spécifique qui permet :

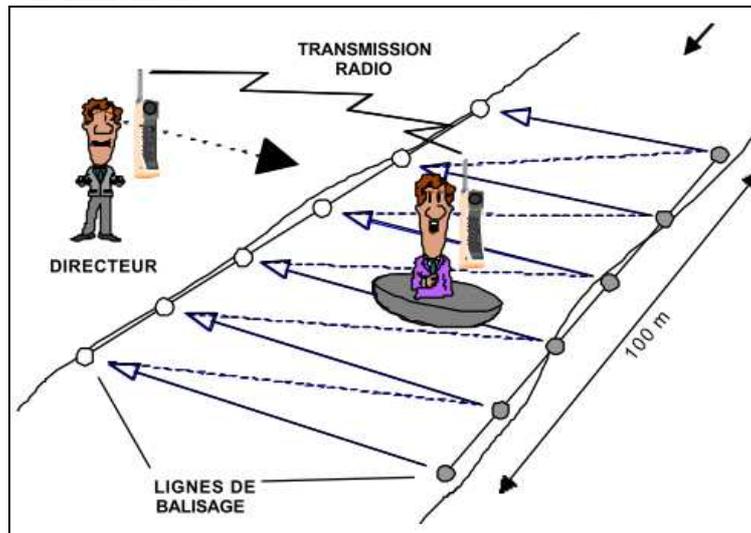
- La prise en compte de la valeur de la profondeur,
- Le choix des paramètres d'acquisition (cadence, échelle de profondeur, échelle de distance, sens d'avance, dénomination du profil, ...),
- De commander le départ et l'arrêt de l'acquisition, l'inscription de tops de repérage, l'enregistrement d'un profil et la réinitialisation pour une nouvelle acquisition,
 - L'affichage en temps réel, à l'écran du profil en cours d'acquisition,
 - L'enregistrement des profils et des paramètres sur une disquette informatique standard 3.5''.
- La relecture d'un profil pour contrôle.

- du **plan de cheminement** sur lequel sont notés, pour mémoire, des informations relatives aux différents profils au cours de leur acquisition (minutes). Ce

principe, à priori trivial, est plus rapide et plus souple donc plus pratique que l'introduction directe dans l'ordinateur.

La particularité du système est que seul le premier écho parvenant au transducteur est pris en compte. On évite ainsi la ligne de fond « baveuse » et imprécise obtenue par les sondeurs du commerce.

Cheminement :



Chaque mesure de profondeur doit être positionnée dans le plan constitué par la surface de l'eau.

La méthode retenue consiste à imposer au transducteur une trajectoire en ligne droite à vitesse constante pendant l'acquisition d'un profil.

Figure 61 : Principe de cheminement

Le bateau est piloté en ligne droite, transversalement à l'axe de la retenue, entre deux des flotteurs (de même numéro) de chacune des lignes de 100 m disposées sur chaque rive.

On peut ainsi réaliser onze profils sensiblement parallèles.

Le déplacement en ligne droite est assuré par des instructions de guidage transmises par radio au pilote par un directeur installé au niveau d'un flotteur. Celui-ci vérifie que le bateau reste sur l'axe matérialisé par les deux flotteurs. Le bateau part de la berge opposée, au niveau du flotteur, et vient vers le directeur.

L'écart latéral maximum constaté, dû principalement à la dérive provoquée par le courant, est inférieur à 1 m sur une distance de 100 m, ce qui est parfaitement admissible.

L'acquisition des mesures de profondeur n'est déclenchée qu'à une certaine distance du flotteur de départ et arrêtée également avant l'arrivée au niveau du flotteur d'arrivée (les deux distances sont notées sur les minutes) pour les raisons suivantes :

- L'utilisation d'un moteur impose un tirant d'eau minimum qui peut être insuffisant si le mouillage au niveau des flotteurs est faible.

- Le bateau doit avoir atteint la vitesse qu'il conservera pendant la traversée au départ de l'acquisition.
- L'arrêt du bateau doit se faire avant de couper la ligne d'arrivée et en tout cas pour éviter une collision avec la berge.

- *Traitement des données et restitution*

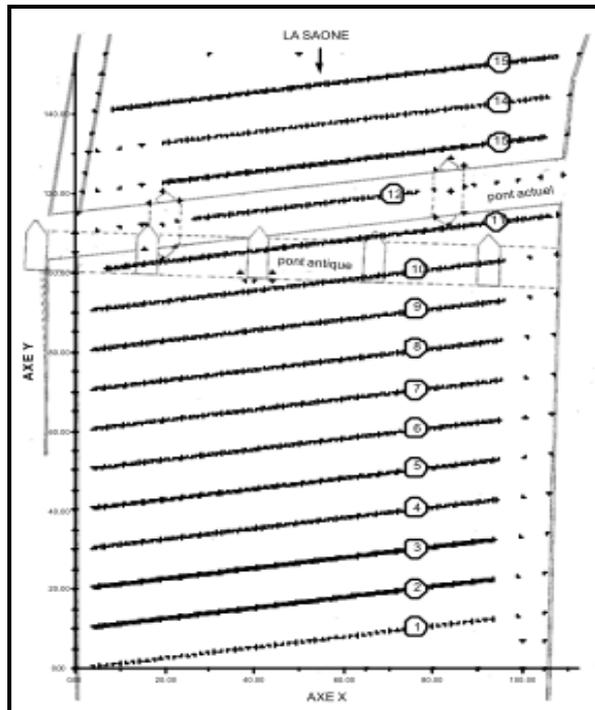


Figure 62 : Traitement des données bathymétriques

Connaissant la position de la trajectoire de chaque profil on peut convertir la coordonnée linéaire de chaque point de mesure en coordonnées X-Y.

La coordonnée Z est disponible directement dans l'enregistrement informatique de chaque profil, exprimée en mètre sous la surface. Elle est transférée dans un tableur (Genre EXCEL) où des traitements numériques sont effectués pour aboutir à un fichier contenant les coordonnées X-Y-Z de chacun des points des profils.

Le tableur permet de produire des représentations graphiques des profils avec des échelles graduées et possibilité de commentaires. Ces représentations peuvent être étendues ou comprimées dans les deux dimensions pour faciliter leur interprétation.

- **Type de profils obtenus :**

Le traitement des données bathymétriques nécessite l'attribution de coordonnées X-Y-Z dans un système orthonormé à chacune des mesures de profondeur.

Connaissant les points de départ et d'arrêt de l'acquisition du profil, donc leur distance et le nombre d'acquisitions faites entre ces deux points et sachant que la vitesse de déplacement a été constante, on en déduit la position linéaire correspondant à chaque acquisition de mesure de profondeur.

On choisit ensuite un système de coordonnées X-Y orthonormé en prenant, par exemple, l'une des deux lignes latérales comme axe X.

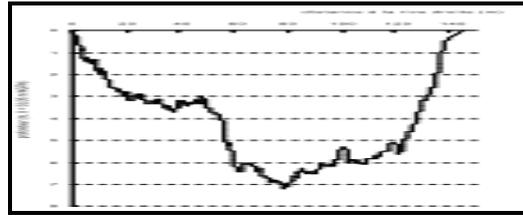


Figure 63 : Profil comprimé.

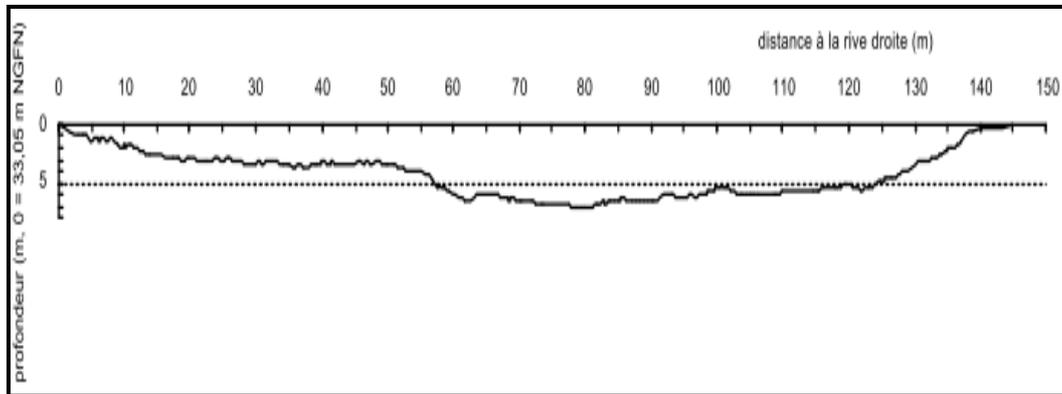


Figure 64 : Profil à échelles égales.

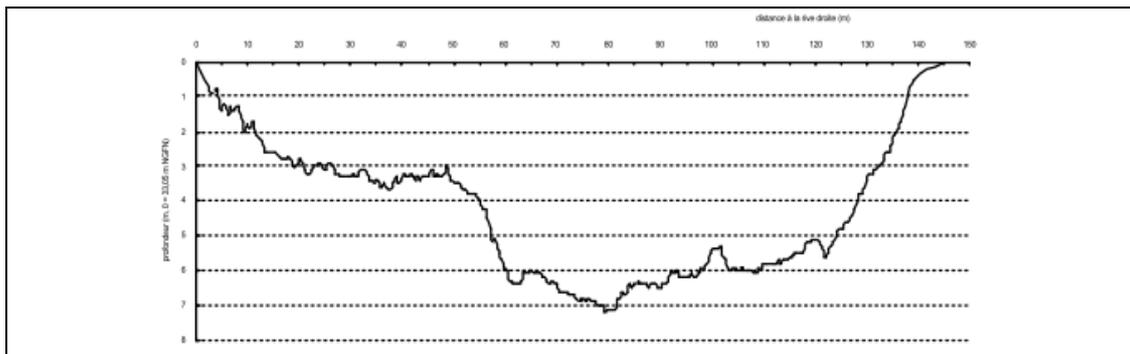


Figure 65 : Profil optimal.

Les données du fichier peuvent être également traitées par un logiciel spécialisé dans la production de représentations isobathymétriques (en couleur éventuellement) et tridimensionnelles. Les cheminements peuvent également être représentés par ce logiciel.

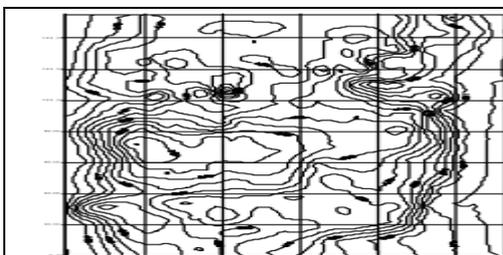


Figure 66 : représentation isobathymétrique

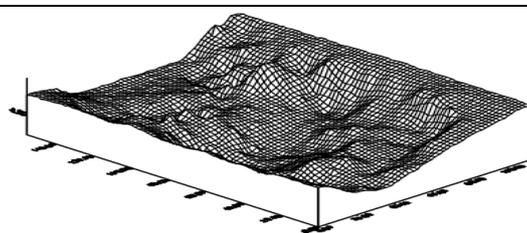


Figure 67 : Représentation tridimensionnelle

II. Taux d'envasement la retenue du barrage SMBA

- *Résultats et discussion*

Les résultats des études bathymétriques du barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah sont représentés dans le tableau 27 :

Le tableau au dessous fait ressortir que l'envasement total depuis la mise en service du barrage en 1974 est de l'ordre de 37,76 Mm³, en 2009 après la surélévation du barrage le taux d'envasement égal à 1,08 Mm³/ an. Cette opération a permis de d'augmenter le volume utile de l'eau dans la retenue du barrage SMBA.

Tableau 27 : Résultats de dépouillement des données de la bathymétrie

ANNEE	Volume Restant (Mm ³)	Volume envasé (Mm ³)	TAUX ENVASEMENT (Mm ³ /an)
1974	508,60		
1985	486,33	22,27	2,02
1995	457,94	50,66	2,41
2000	425,12	83,48	3,21
2003	431,72	76,88	2,65
2007	974,79		
2009	937,03	37,76	1,08

Le diagramme au dessous montre l'évolution de la capacité normale de la retenue du barrage SMBA de point de vue stockage d'eau en fonction des années depuis la mise en service de l'ouvrage en 1974.

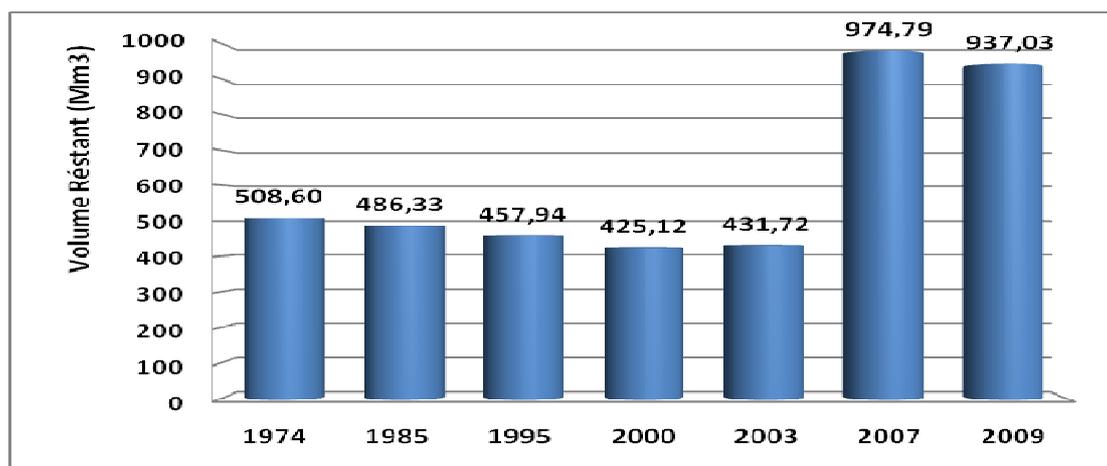


Figure 68 : Evolution de la capacité normale de la retenue du barrage SMBA

Sur la figure 69, nous avons illustré les résultats bathymétriques faites sur le site de la retenue du barrage SMBA dans les années 1985 ; 95 ; 2000 ; 2003 ; 2007 et

2009. Ces résultats montrent la variation des volumes utiles et des surfaces cumulées en fonction des côtes de la retenue du barrage.

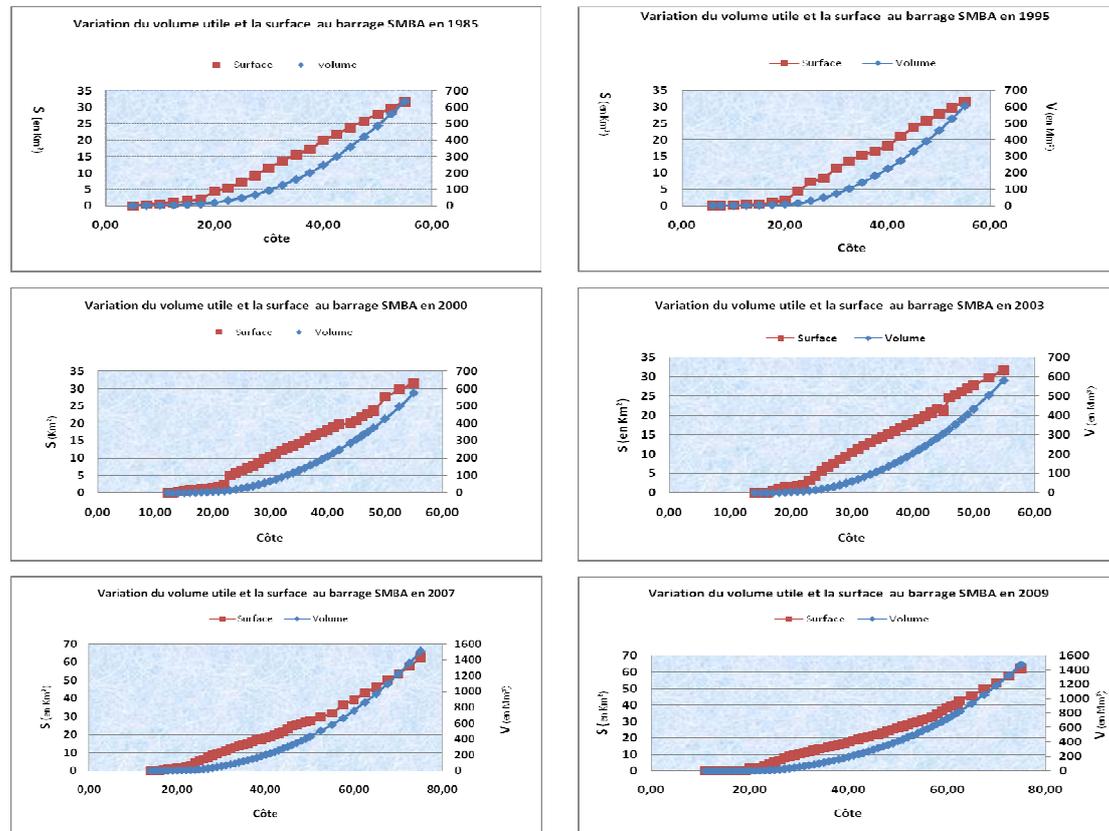


Figure 69 : Variation du volume envasé et la surface obtenues par bathymétrie au barrage SMBA pour les années 1985, 1995, 2000, 2003, 2007 et 2009

Les résultats d'analyse des données bathymétriques d'apports solides et les volumes liquides enregistrés dans la station du barrage SMBA nous ont permis de dresser les deux tableaux en bas (tableau 28 : selon les périodes ; tableau 29 : le cumul), qui représente la variation de la concentration des particules solides dans la retenue du barrage et la dégradation correspondante. Les apports de l'eau avec lequel nous avons calculé la concentration représentent la quantité réelle de l'eau présente dans la retenue de barrage, autrement dit, les apports d'eau entrés dans la retenue moins les volumes d'eau vidangé et évacué lors d'une crue.

Période	Apport de l'eau en Mm ³	Envasement en Mm ³	Concentration en t/m ³	Concentration en g/l	Taux d'envasement en Mm ³ /an	Dégradation en m ³ /Km ² /an	Dégradation en t/km ² /an	Dégradation en t/ha/an
1974-1985	1740,23	22,27	0,02	19,19	2,02	191,03	286,54	2,87
1986-1995	2062,80	28,39	0,02	20,65	3,15	297,69	446,53	4,47
1996-2000	963,14	32,82	0,05	51,12	8,21	774,35	1161,53	11,62

Tableau 28 : Concentration des particules solides et dégradation du bassin versant de Bouregreg (S.L) dans divers périodes de temps

Période	Apport de	Envasement	Concentration	Concentration	Taux	Dégradation	Dégradation	Dégradation
---------	-----------	------------	---------------	---------------	------	-------------	-------------	-------------

	l'eau en Mm ³	en Mm ³	en t/m ³	en g/l	d'envasement en Mm ³ /an	en m ³ /Km ² /an	en t/km ² /an	en t/ha/an
1974 - 1985	1740,23	22,268	0,019	19,194	2,024	191,027	286,541	2,865
1974 - 1995	3803,03	50,659	0,020	19,981	2,412	227,642	341,463	3,415
1974 - 2000	4766,17	83,482	0,026	26,273	3,211	302,996	454,494	4,545

Tableau 29 : Concentration des particules solides et dégradation du bassin depuis 1974 à 2000 (Cumul)

- **Variation de la concentration en g/l :**

La figure 70 montre la variation de la concentration des éléments solides dans les apports d'eau de la retenue par période. La concentration est maximale entre les années 1996-2000 avec une valeur égale à 51,12 g/l. cette période correspond à un apport en éléments solides très important au niveau de la retenue.

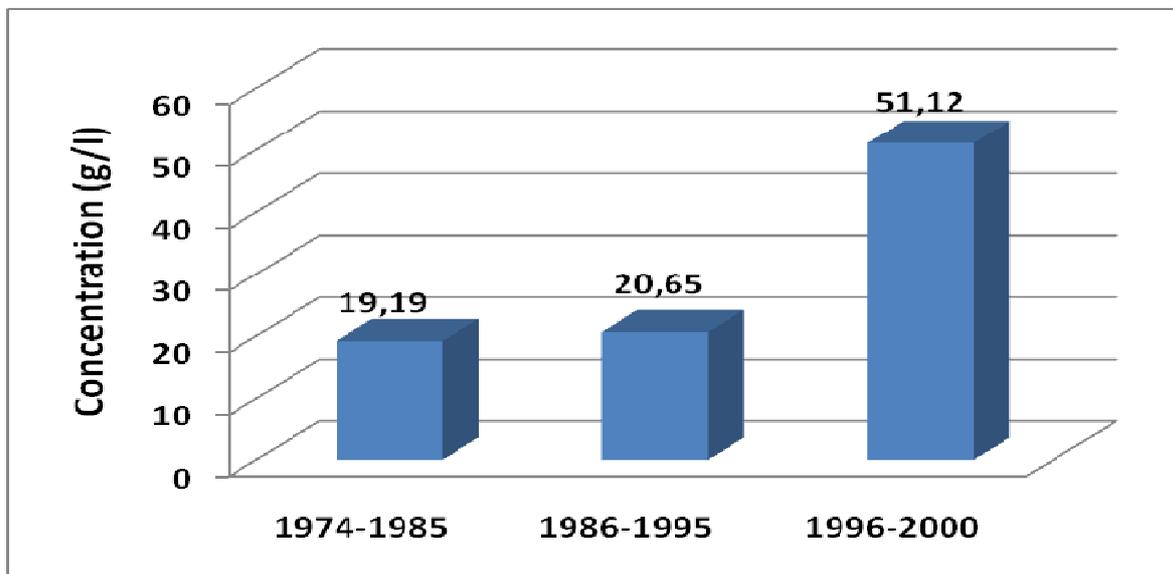


Figure 70 : Variation de la concentration des éléments solides (en g/l) dans la retenue du barrage SMBA par période

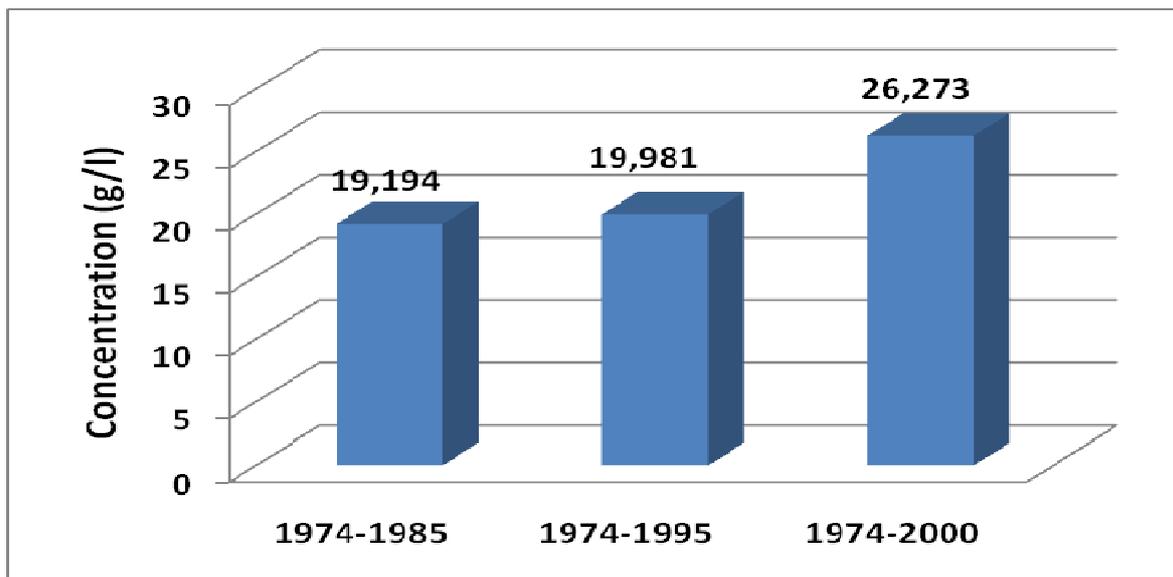


Figure 71 : Variation de la concentration des éléments solides (en g/l) dans la retenue du barrage SMBA par cumul depuis 1974 jusqu'à 2000

La figure 71 montre la variation de la concentration (g/l) des éléments solides dans les apports d'eau entrant dans la retenue depuis 1974 jusqu'à 2000 (cumul). La concentration augmente depuis la mise en œuvre du barrage jusqu'à 2000, où il atteint la valeur 26,273 g/l.

- **Variation de la dégradation en t/ha/an :**

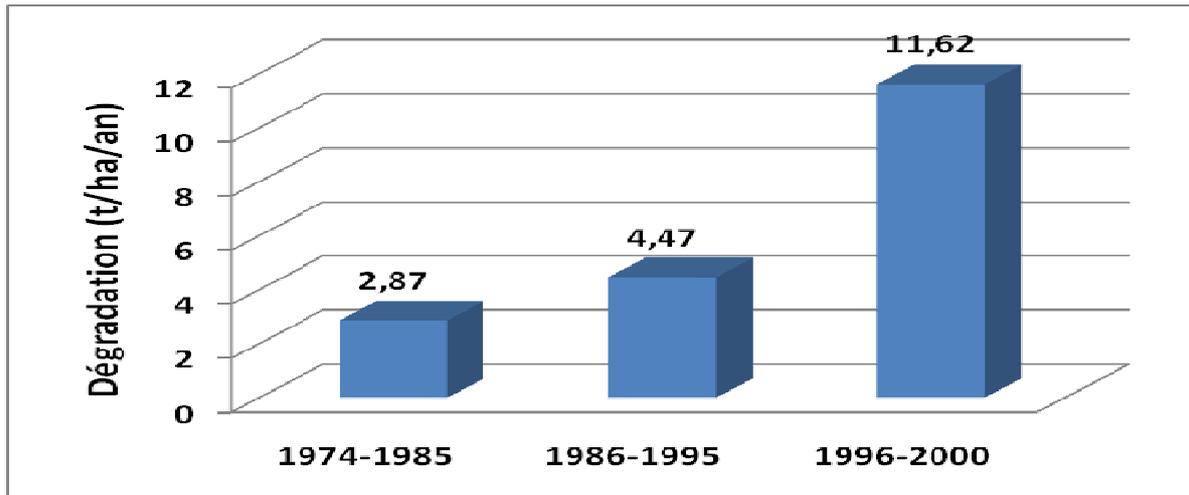


Figure 72 : Variation de la dégradation (t/ha/an) du bassin versant de Bouregreg (S.L) par période

La période entre 1974-1985 a connu une dégradation du bassin faible estimé à 2,87 t/ha/an, cette dégradation augmente jusqu'à arrivée à une valeur maximale de 11,62 t/ha/an entre les années 1996-2000 comme l'indique la figure 72. Cette dégradation est due principalement au phénomène d'érosion hydrique qui libère les particules en suspension transporté dans les cours d'eaux.

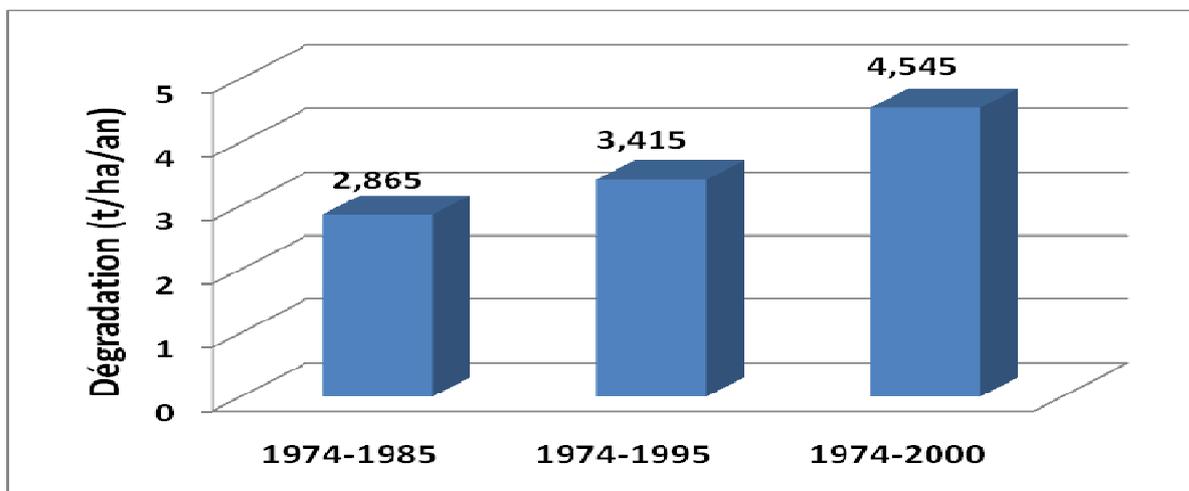


Figure 73 : Variation de la dégradation (t/ha/an) du bassin versant de Bouregreg (S.L) par cumul

La figure 73 représente l'évolution de la dégradation depuis l'année de la mise en service de l'ouvrage en 1974 jusqu'à 2000. Cette dégradation augmente au cours du temps, où il arrive à 4,545 t/ha/an en 2000, elle forte par rapport à la surface du bassin versant de Bouregreg (S.L) estimé à 10597 km².

- **Relation lame d'eau écoulée-concentration-Dégradation spécifique**

Afin de trouver la relation entre l'envasement et l'écoulement de l'eau, nous avons tracé les deux tableaux au dessous (tableau 30 & 31), qui représente la variation des concentrations et dégradation spécifique en fonction de la lame d'eau écoulée annuelle moyenne par période et par cumul depuis la mise en service du barrage SMBA en 1974 jusqu'à 2000.

Tableau 30 : Paramètre du transport solide par période

Année par période	lame d'eau (mm/an)	Concentration en g/l	Dégradation en t/ha/an
1974-1985	48,63	19,19	2,87
1986-1995	46,75	20,65	4,47
1996-2000	61,47	51,12	11,62

Ce tableau nous a permis de tracer le graphique en bas qui montre la variation de la concentration (g/l) et la dégradation spécifique du bassin versant de Bouregreg (S.L) en fonction de la lame d'eau écoulée annelle moyenne qui est obtenue à partir des apports entrant dans la retenue du barrage SMBA à différente période.

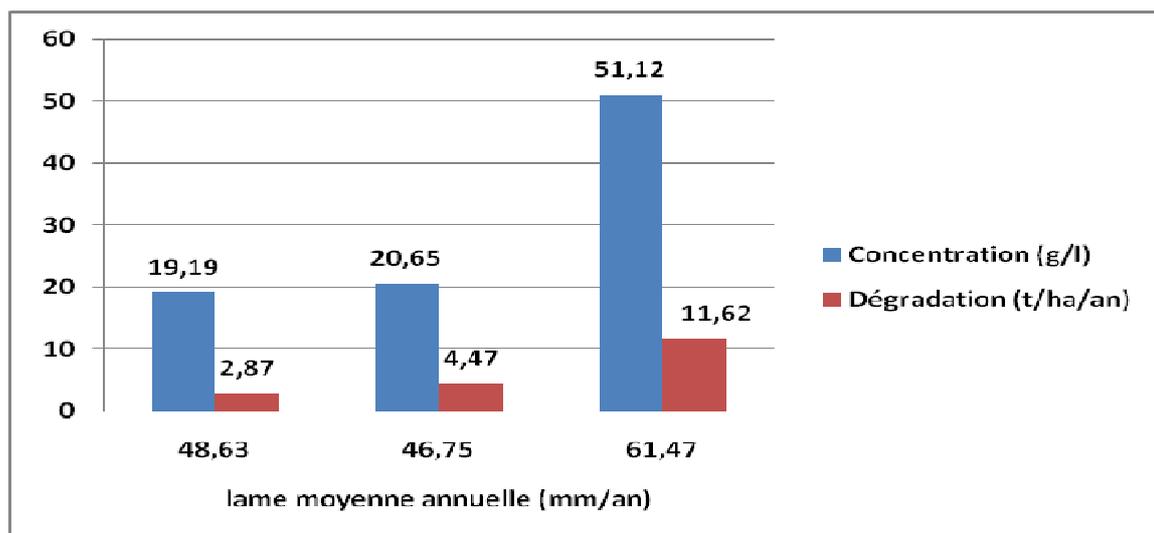


Figure 74 : Variation de la concentration (g/l) et la Dégradation spécifique (t/ha/an) en fonction de la lame d'eau écoulée (mm/an) par période

La figure 74 montre que la dégradation et la concentration augmente avec la lame d'eau écoulée, cette dernière passe de **48,63 mm/an** pour une période de 1974-

1985, c'est la même période qui enregistre les valeurs de la concentration et de dégradation la plus faible, à **61,47 mm/an** enregistré dans la période qui s'étale depuis 1996 jusqu'à 2000, et c'est la période qui correspond à une forte concentration et dégradation à l'échelle du bassin versant.

Tableau 31 : Paramètre du transport solide par cumul depuis 1974 jusqu'à 2000

Année (cumul)	lame d'eau (mm/an)	Concentration en g/l	Dégradation en t/ha/an
1974-1985	48,63	19,19	2,87
1974-1995	45,51	19,98	3,41
1974-2000	46,21	26,27	4,54

Nous avons utilisé les résultats rassemblés dans le tableau 31 pour élaborer un graphique plus parlant illustrer dans la figure 75.

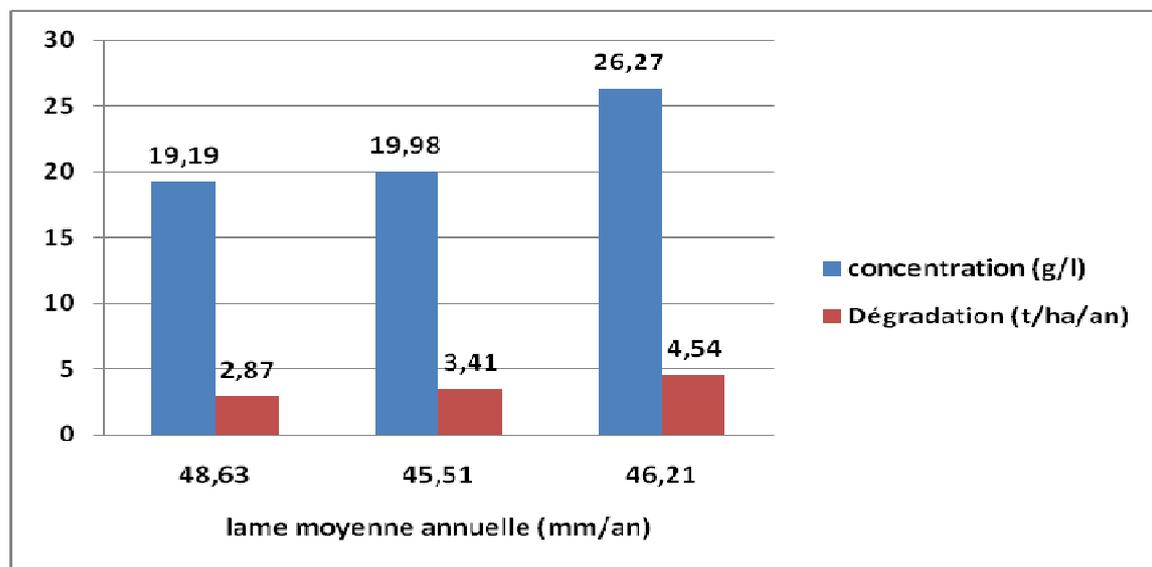


Figure 75 : Variation de la concentration (g/l) et la Dégradation spécifique (t/ha/an) en fonction de la lame d'eau écoulée (mm/an) par cumul

Nous avons la même allure que le graphique précédent, la concentration et la dégradation augmente avec la lame d'eau écoulée, la lame d'eau passe de **48,63 mm/h** pour une période qui s'étend de 1974 jusqu'à 1985 à **46,21 mm/h** pour une période qui s'étend depuis la mise en service du barrage SMBA en 1974 jusqu'à 2000.

Nous pouvons dire que la concentration en élément solide transporté par l'eau et la dégradation spécifique du bassin versant dépend fortement de la lame d'eau écoulée. Autrement dit, pour les années pluvieuses on aura un écoulement important puisque la nature lithologique qui règne dans le bassin versant permet une bonne réponse aux précipitations (faible infiltration et évaporation), ce qui favorise la libération des particules fines (érosion hydrique) qui vont être transporté par les oueds jusqu'à arriver à la retenue du barrage, formant des courants de densité, ces particules vont se sédimer puis se compacter selon leurs nature et les conditions physico-chimiques du milieu, ce qui cause le problème de l'envasement de la retenue du barrage et la formation des vases.

Conclusion :

Nous pouvons dire que si le taux de comblement d'une retenue dépasse 50 % de la capacité initiale et la vase est en contact de l'ouvrage, dans ce cas, il faut prendre au sérieux la stabilité du barrage, pour notre cas, le barrage SMBA n'est pas arrivé à ce stade d'envasement, le volume de vase est de 37,76 Mm³ en 2009, avec un volume utile estimé de 937,03Mm³, soit disant 96,12 % du volume initial.

La forte dégradation du bassin versant de Bouregreg, oblige les responsables de prendre des mesures de sécurité de point de vue aménagement du Bassin versant en amont du barrage afin de réduire le taux d'érosion et d'ablation du sol.

III. Méthodes pour réduire l'envasement des retenues des barrages

En vue de réduire le taux d'ablation et d'érosion des sols et donc réduire la quantité de sédiments censés se déposer dans les retenues de barrage, on propose comme méthodes préventives le plan d'action suivant :

Tableau 32 : Méthodes préventives pour réduire l'envasement des retenues de barrage

Types de méthodes	Objectifs des méthodes utilisées
Méthode préventives	<ul style="list-style-type: none"> • Aménagement des bassins versants Amont ; • Correction torrentielle des fleuves et de leurs berges ; • Réalisation de digues guide-eau pour dévier les sédiments vers les évacuateurs de crues et éviter ainsi leur dépôt dans les réservoirs ; • Réalisation de vannes de dévasage adaptées ; • Adoption d'une législation conséquente basée sur la maintenance et la gestion des réservoirs ;

Au cas de remplissage de la retenue par le vase, on doit adoptée le plan suivant :

Tableau 33 : Méthodes curatives pour réduire l'envasement des retenues de barrage

Types de méthodes	Objectifs des méthodes utilisées
Méthodes curatives	<ul style="list-style-type: none"> • Adoption de l'évacuation, à partir du barrage, des sédiments (soit part vidange à niveau bas, par vidange sans abaissement du plan d'eau ou par l'utilisation des courants de densité) ; • Une "tranche morte" suffisante est à réserver à l'atterrissement des sédiments ; • Dragage des sédiments ; • Surélévation des barrages et utilisation de nouveaux sites de barrages ;

- **Les techniques de dragage**

Le **dragage** consiste en l'excavation de sols ou d'alluvions sous l'eau (lacs, fleuves, rivières, canaux, estuaires, chenaux marins, etc.) Il peut être réalisé à partir de la berge, avec des engins de travaux classiques. Le dragage peut aussi être réalisé sur l'eau à l'aide d'un navire ou d'une barge spécialisé (**drague**).

- Matériel utilisé

Le dragage utilise actuellement les équipements suivants :

- drague à élince traînante, principalement utilisée pour les dragages portuaires d'entretien et les extractions de granulats, et qui procède par aspiration
- drague à disque désagrégateur (ou « drague à cutter »), principalement utilisée pour les dragages dans des matériaux résistants (argiles, roches, graviers consolidés)
- drague à pelle rétro-excavatrice, pour les travaux de finition ou les travaux atypiques.
- Suceuse pour les sédiments fins dans certains cas.

La drague à godets est un équipement dépassé, qui remet trop de sédiments en suspension, mais encore très présent dans la mémoire du grand public.

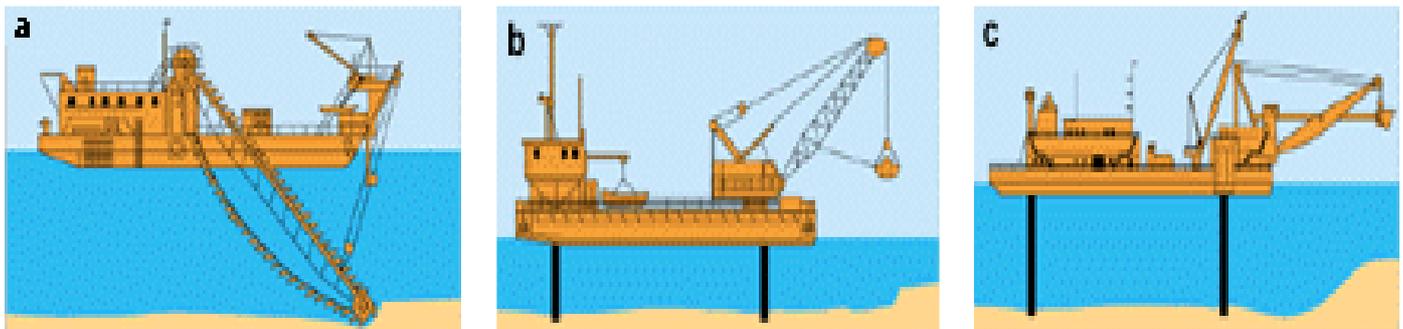


Figure 76 : Représentation schématique de trois types de dragues mécaniques. a) drague à godets ; b) drague à benne ; c) drague à pelle.

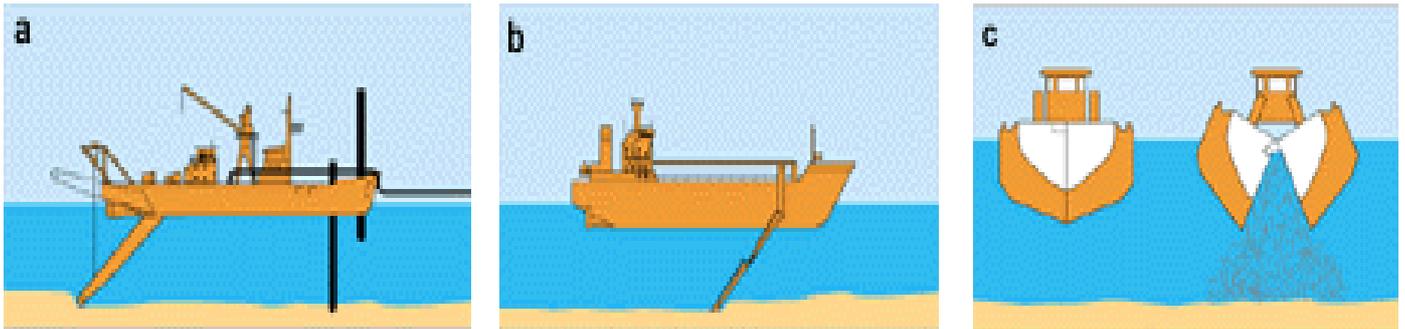


Figure 77 : Dragues hydrauliques. a) aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement ; b) aspiratrice en marche ; c) dragues fendables.

La technique de dragage "jetsed" comme la montre la figure au dessous consiste à fluidiser le sol par application d'eau sous-pression ou d'air comprimé ; le sédiment est alors remis en suspension et peut être véhiculé par les courants.

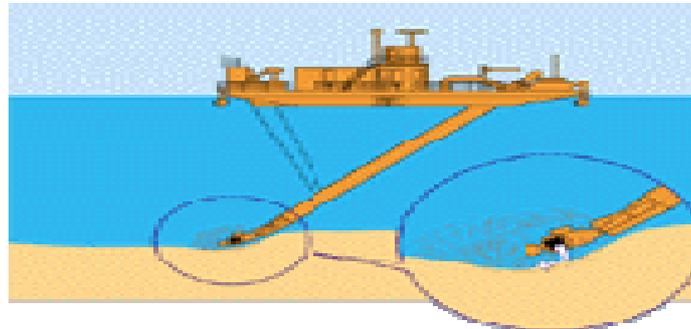


Figure 78 : La technique de dragage "jetsed"

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le barrage SMBA est considéré parmi les barrages stratégiques de production d'eau potable pour l'alimentation des deux capitales, administratives (Rabat) et économique (Casablanca) du Pays. Le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah produit 31,5 % de l'eau potable du Maroc.

Le bassin versant de l'oued Bouregreg est un hydro système qui fait partie du massif hercynien central (ou Plateau Central). Sa géologie est caractérisée par une diversité lithologique, avec une nette prédominance des formations relativement perméables du socle hercynien notamment des schistes, grès et peu de roches calcaires. Et la présence des formations plus imperméables du Trias notamment les argiles rouges salifères et les marnes du Miocène dans la partie atlantique.

Le bassin a une forme allongée avec un réseau hydrographique dense et bien hiérarchisé en amont. Les altitudes peuvent atteindre jusqu'à 1627 m en amont, et les pentes des versants montagneux sont fortes.

La pluviométrie moyenne enregistrée dans le bassin est de l'ordre de 440 mm et une température moyenne de 18 °C. Elle est dans l'ensemble moyenne et conforme au milieu semi-aride. Les précipitations sont très irrégulières à la fois à l'échelle annuelle. L'essentiel des pluies s'abat en saison froide du novembre à mars.

Les débits sont généralement très irréguliers et assez variables d'une année à l'autre. Le régime hydrologique est à hautes eaux d'hiver et de printemps.

La corrélation entre les pluies et les débits est assez bonne aux échelles annuelles et mensuelles. L'écoulement est toujours important lors des années et des mois de forte pluviosité. Les éléments qui peuvent perturber cette relation n'agissent pas de façon conséquente, notamment des retentions durables de l'eau ou de grandes variations de températures et évapotranspirations.

Quant aux coefficients d'écoulement, ils semblent dépendre plus de la façon avec laquelle est tombée la pluie et de l'état du sol que de la hauteur de cette pluie.

Les particules solides en suspension dans l'eau se sédimentent au niveau de la retenue du barrage, ce qui favorise le phénomène de l'envasement qui cause plusieurs problèmes qui menacent la sécurité et la durée de vie de l'ouvrage. Ces apports solides sont le résultat d'une forte dégradation du bassin versant de Bouregreg (S.L) causé par l'érosion accentuée en amont de ce dernier. D'où la nécessité de prendre l'initiative de mettre des plans d'actions pour limiter les dégâts liés à l'érosion.

La méthode bathymétrique est considérée parmi les méthodes directes qui permettent la détermination du taux d'envasement dans les retenues des barrages. Les résultats bathymétriques ont montré que l'envasement total depuis la mise en service du barrage SMBA en 1974 est de l'ordre de 37,76 Mm³, en 2009 après la surélévation du barrage le taux d'envasement égal à 1,08 Mm³/ an. La dégradation du bassin versant de Bouregreg (S.L) est de l'ordre de 4,545 t/ha/an en 2000. La surélévation du barrage a permis d'augmenter le volume utile de l'eau dans la retenue du barrage SMBA.

Notons en fin que grâce à cet aménagement, les excédents d'écoulement des saisons et années humides compensent en grande partie les apports d'alimentation en eau potable et industriels.

Considérant l'importance vitale des barrages dans la protection des hommes, des infrastructures et des biens contre les inondations, et leur rôle essentiel dans la régularisation et la mobilisation des eaux de surface au service du développement socio-économique des pays de la région ;

Considérant les risques menaçant la durée de vie des barrages et en conséquence, la durabilité des politiques hydrauliques qu'ils concrétisent ;

Les recommandations suivantes sont proposées afin de réduire le phénomène d'envasement des retenues de barrages :

- Constituer des bases de données propres aux problèmes d'envasement et de protection des bassins versants qui puissent servir de référentiels pour la conception et la gestion des barrages ;

- Effectuer les lâchers d'eau périodiques pour maintenir dans les cours d'eau un débit minimal pour soutenir l'écosystème et les ressources aquatiques et d'atténuer les effets négatifs des barrages en exploitation;

- Soutenir la recherche scientifique dans le domaine de l'économie de l'eau, de maintenance des ouvrages hydrauliques, et encourager l'introduction de nouvelles technologies ;

- Encourager les étudiants pour étudier et quantifier l'érosion des bassins versant qui est l'agent principal du comblement des retenues de barrages (envasement), en les fournissant le finance et les matériels nécessaires pour ce genre d'étude.

Références bibliographiques

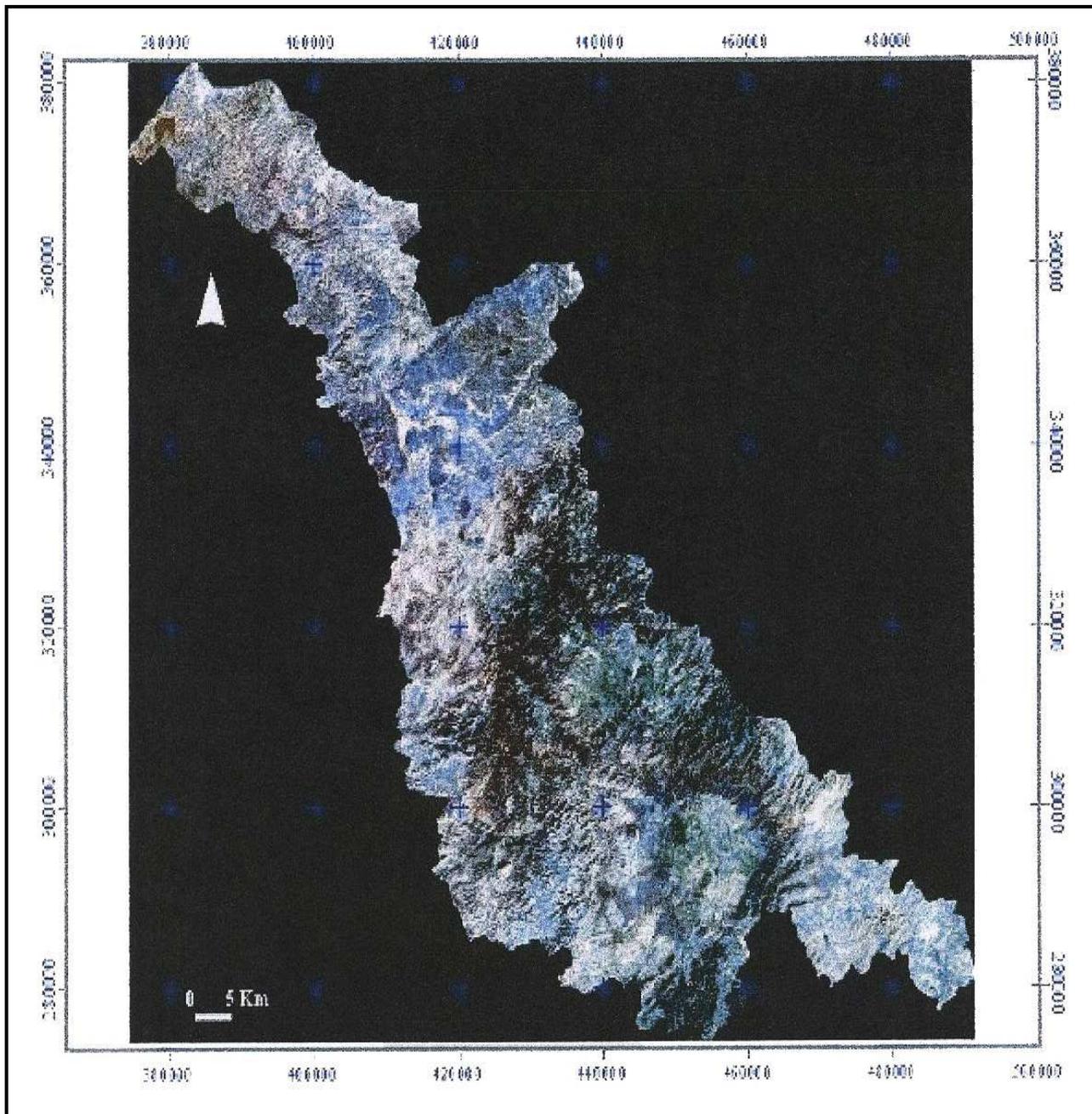
- ABDELLAOUI B., ABERKAN M., ALBERGEL J., & MERZOUK A., 2002.** *Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc)*. Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau 15/04 (2002), 737-748.
- A.B.H.B.C., 2004.** *Etude d'évaluation des eaux de surface de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia- Ben Slimane*. Mission 1 ; Analyse critique des données pluviométriques, actualisation des séries pluviométriques, établissement des cartes des isohyètes et détermination des courbes IDF ; 43 p.
- ADERGHAL M., 1993.** *Le Massif d'Oulmès et ses bordures : évolution agraire et organisation de l'espace dans le pays Zaïan Zemmour (Maroc du Nord-Ouest)*. ETUDES ARABO-ISLAMIQUES (ECONOMIE) 1993. 3 vol. (718 f.).
- A.E.F.C.S., 1998.** Schéma Directeur des Aires protégées. Administration des Eaux et Forêts de Conservation des sols).
- ALBERGEL J., GUEGUEN N., PEPIN Y., 1997.** *Comment faire le suivi hydrologique d'un petit barrage*, Note technique, ORSTOM-Tunis, Tunisie, 30 p.
- ARNOLDUS H.M.J., 1996.** *Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*. FAO Bulletin 34, p.39-48.
- BADRAOUI A., HAJJI A., 2001.** *Envasement des retenues de barrages*. Revue la Houille Blanche, n°6/7, pp. 72-75.
- BAGNOULS F. et GAUSSEN H., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, tome 88 : 193-239.
- BEAUDET G., 1969.** *Le plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique*. Thèse de Doctorat ès-lettres, FLSH Rabat : 478 p.
- BENAAMAR S., 2005.** *Usages, ressources biologiques, activités humaines et processus naturels du bassin hydrographique de Bouregreg*. Mémoire de fin d'études, ENFI, 122 p.
- BENMOHAMMADI A., 1991.** *Erosion et sédimentation dans le bassin versant de l'oued Bouregreg (S.L)*. Diplôme de spécialité de 3^{ème} cycle, option géologie, Université Mohammed V, faculté des Sciences : 222 p.
- BENSALAH N., 2008.** *Indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion en vue d'une gestion durable des eaux et sols (bassin versant de Bouregreg s.s)*. Thèse de Doctorat, option : géographie, Université Mohamed V, Faculté des lettres et des sciences humaines-RABAT : 159 p.
- BONNIN PH., 1998.** *Prospection par bathymétrie positionnée informatisée appliquée à la recherche archéologique subaquatique*. PDF/Adobe Acrobat.
- BOU KHEIR R., GIRARD M-CI., KHAWLIEET M., & ABADALLAH C., 2001.** *Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique*. pp : 231-241.
- BOUTAIEB M., 1988.** *Impacts économiques de l'envasement des barrages au Maroc*. Acte du séminaire international sur l'aménagement des bassins versants. Direction des Eaux et Forêts, Rabat.
- DEBRACH J., 1953.** *Notes sur les climats du Maroc occidental*. Maroc méridional ; 32 : 1122-34.
- DGH, 1998.** *Les grands barrages du Royaume*. M.A.E.E/D.E. Rabat. Maroc, 85 p.
- D.P.A de Khémisset, 1995.** *Etude pédologique au 1/100.000 en vue de la mise en valeur agricole dans le cercle d'Oulmès*, Province de Khémisset, 182 p.
- DPAE, 1996.** Recensement Général Agricole. Régions Rabat-Salé-Zemmours-Zaers.
- EL AGBANI M.A., 1984.** *Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Bouregreg (plateau central marocain) Essai de biotypologie*. Thèse. Doct. Univ. Claud Bernard, Lyon I : 132 p.
- EMBERGER L., 1955.** *Une classification biogéographique des climats*. Recueil Trav. Lab. Bot. Géol. Zool. Faculté des Sciences. Université Montpellier :3-43.
- GHANEM H., 1981.** *Contribution à la connaissance des sols au Maroc. Genèse, classification et répartition des sols des régions de Zaers, de la basse Chaouia et des Sehoulis (Meseta atlantique marocaine)*. Tome I : Notice explicative des cartes pédologiques. Cahiers de la recherche agronomique. INRA.
- HASNAOUI My. Driss., OULKACHA Laila., & TOUJI Mohamed., Juin 2009.** *L'envasement des barrages au Maroc*, 23^{ème} congrès des grands barrages, Commission Internationale des Grands Barrages, Brasilia-Brésil.
- LAHLOU A., 1982.** *Dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l'envasement des barrages*. Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1982). IAHS Publ. no. 137.
- LAHLOU A., 1990.** *Envasement du barrage Mohamed Ben Abdelkrim Al Khattabi et lutte anti-érosive*

- du bassin versant montagneux situe à l'amont. Hydrology in Mountainous Regions, n - Artificial Reservoirs; Water and Slopes (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 194, 1990.*
- LAHLOU A., 1994.** *Envasement des barrages au Maroc.* WALADA, Casablanca, 120 p.
- Le Comite Marocain des Grands Barrages (C.M.G.B). visite du chantier de la surélévation du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, Samedi 10 décembre 2005.** Organisée par sous l'égide du Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau. PDF/Adobe Acrobat.
- MAHFOUD J., 1989.** *Les barrages collinaires. Terre. Homme et Eau ; 74-75 ; 3^{ème} partie.*
- MARZOUKI T., 1992.** *Diagnostic de l'envasement des grands barrages au Maroc.* Revue marocaine du génie civil, 38, avril.
- MICHARD A., 1976.** *Eléments de géologie marocaine.* NMSGM n°252 Minis des Mines. Rabat. P : 422.
- PEPIN, Y., 1996.** *Méthodes utilisées pour les mesures de l'envasement d'un lac collinaire en Tunisie,* Document technique, IRD. Tunis.
- RAHDOU M., TOUNDAOUI F., 2007.** *Contribution à l'hydrologie en zone pluviométrique semi-aride l'exemple du bassin d'Issen en amont du barrage Abdelmoumen (Haut-Atlas occidental).* Mémoire de fin d'étude, Maitrise option : Hydrogéologie, Université CADI AYYAD, Faculté des Sciences et Technique- Marrakech : 68 p.
- REMINE B., & REMINE W., Juin 2003.** *La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord.* Département de Génie Rural, Université de Blida, pp : 45-54.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., McCool D.K., YORDER D.C., 1996.** *Predicating soil loss equation (RUSLE).* USDA/ARS. ARG. AG. Hand-book 703. Washington. DC.
- Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau., 21 et 22 novembre 2005.** Atelier régional sur le thème : "*Conception et gestion durable des barrages en Méditerranée*", Rabat-Maroc.
- SEMCHA A., MEKERTA B., & KAZI-AOUAL F., 2009.** *Conséquences du dragage du barrage de Fergoug (Algérie),* pp : 351-358.
- TAYAA M., 1997.** *Bassin versant de Nekhla : caractéristiques hydrologiques et estimation du taux d'érosion.* Ministère de l'environnement –USDA.WARS- Project. 60 p.
- WISHMEYER W.H., SMITH D.D., 1978.** *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning.* Arg. Handb., 53. USDA. Washington DC.

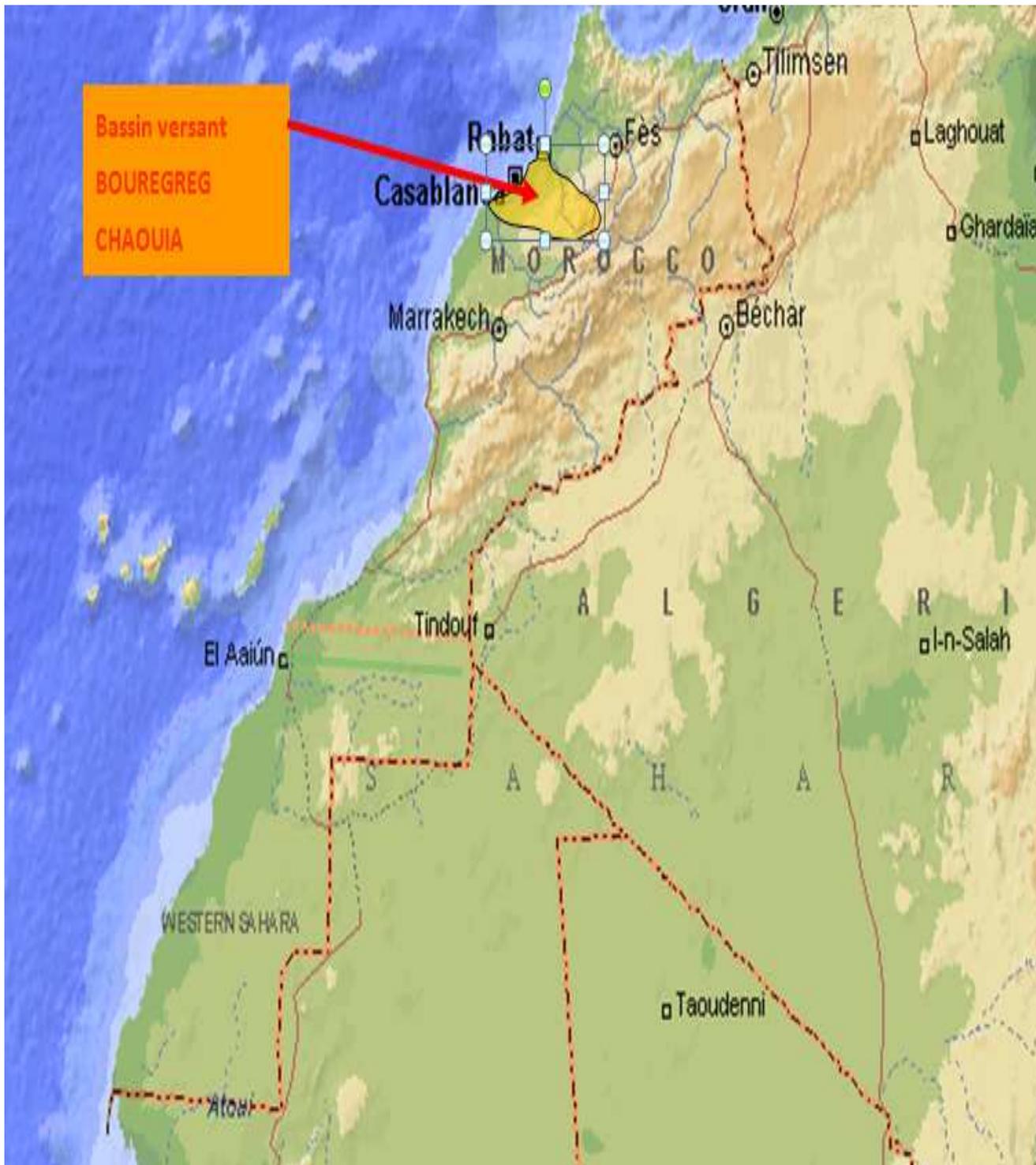


ANNEXES

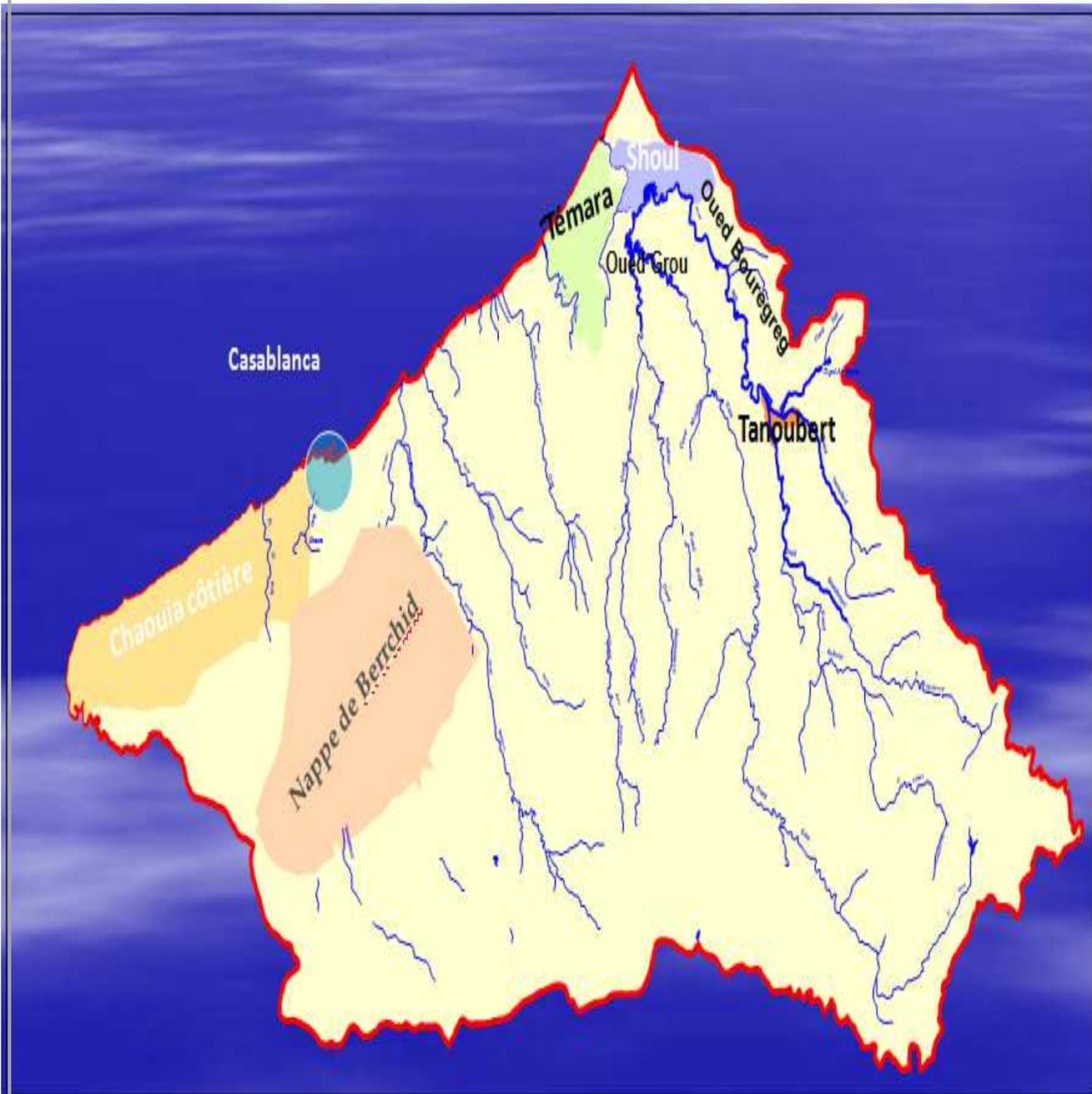
Annexe 1 : Image satellitaire du bassin versant de Bouregreg (s.s)



Annexe 2 : Carte de situation géographique de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique de Bouregreg Chaouia



Annexe 3 : Carte de la forme du bassin versant de Bouregreg (S.L)



Annexe 4 : Image satellitaire de la rencontre des deux principaux affluents du bassin versant Bouregreg (S.L)





Annexe 5. Fiche technique du barrage sidi mohamed ben abdellah

Caractéristiques principales de la retenue

- Altitude de la retenue normale : 50 avant surélévation, 65 NGM après.
- Aire de la retenue au niveau normal : 28.5 avant surélévation, 46 km² après
- Capacité à retenue normale : 480 avant surélévation, 1025 Mm³ après
- Niveau des PHE : 65.50NGM avant surélévation, 73.00 après

Caractéristiques principales des ouvrages

Barrage

- Type : Remblai zoné à noyau argileux
- Terrain de fondation : Schiste et quartzite
- Hauteur maximale sur fondation : 87.50 m avant surélévation, 95.00 m après
- Longueur en crête : 600 m
- Largeur en crête : 8.00 m
- Cote de la crête : 67.5 NGM, avant surélévation, 75 après
- Volume du corps du barrage : 2,5 Mm³ avant surélévation, 3,1Mm³ après

Evacuateurs de crue

Avant surélévation

- Type : Seuil libre implanté en rive gauche
- Après surélévation
- Type : 4 passes vannées et un seuil libre
- Dimension des passes : H=5.00 m, L=7.00 m
- Longueur du seuil déversant : 42.00 m
- Cote du seuil supérieur : 65.00 NGM
- Débit évacué au passage de la crue 1/10000 : 4 860 m³/s

Vidanges de fond

- Vidange existante
- Type : 1 pertuis vanné dans galerie souterraine
- Cote du seuil : 9.50 NGM
- Dimensions du pertuis : 2.30 x 2.60 m²
- Capacité maximale sous RN : 150 m³/s avant surélévation et 180m³/s après
- Vidange additionnelle
- Type : 1 pertuis vanné dans galerie souterraine
- Cote du seuil : 40.00 NGM
- Dimensions du pertuis : 3.40 x 4.80 m²
- Capacité sous retenue normale : 350 m³/s après surélévation

Prises d'eau

- Prises existantes
- Type : Tour de prise verticale
- Equipement : 7 pertuis identiques
- Débit maximum de prélèvement : 10 m³/s
- Prises additionnelles
- Type : Tour de prise verticale

Annexe 6. Les recommandations issues de l'atelier régional des pays méditerranéens.

Les recommandations proposées sont à l'issue des travaux de l'atelier régional sous le thème : "Conception et gestion durable des barrages en Méditerranée" organisé à Rabat en 21 et 22 novembre 2005, Sous le Haut Patronage de SA MAJESTE LE ROI MOHAMMED VI, le Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de



l'Environnement du Maroc et l'Institut Méditerranéen de l'Eau (IME) en collaboration avec Electricité de France (EDF).

Au cours de cet atelier, les représentants des pays de la méditerranée, ont examiné l'état des barrages dans leurs pays et ont proposé aux termes des réflexions et des débats, une série de recommandations en vue de faciliter l'élaboration de démarches intégrées et durables relatives à la conception et à la gestion de tels ouvrages. Les représentants de la méditerranée recommandent aux pays du pourtour méditerranéen de :

En matière de conception :

- Poursuivre les efforts de régularisation des eaux de surface pour faire face à la variabilité qui caractérise la disponibilité de l'eau dans ces pays, compte tenu de leur contexte hydrologique, caractérisé par l'irrégularité annuelle et la variabilité interannuelle très marquées des précipitations et l'hétérogénéité de leur distribution, ainsi que par l'alternance de séquences de forte hydraulité et de sécheresse d'intensité et de durée variable.
- Sensibiliser les décideurs et les donneurs d'ordres sur la nécessité d'étudier, dès le démarrage des études d'avant-projet sommaire, des solutions variantes en complément ou en remplacement de la construction des barrages, en examinant des solutions alternatives d'approvisionnement en eau, telles que l'exploitation et la recharge des nappes phréatiques, le transfert d'eau entre bassins et le dessalement de l'eau de mer pour les villes situées le long des côtes.

Il est à noter que le dessalement de l'eau de mer est actuellement encore trop cher pour pouvoir remplacer les barrages. Toutefois, une baisse significative des coûts suite à des avancées technologiques dans ce domaine pourrait rendre cette technique tout à fait compétitive, d'où l'intérêt d'instaurer un système de veille technologique et d'encourager la recherche scientifique en matière de dessalement.

- Bien cerner les données hydrologiques qui sont à la base du dimensionnement optimal des barrages, en accordant plus d'intérêt à l'entretien et la maintenance du réseau de mesures hydrologiques à la formation des agents et au contrôle périodique des mesures.
- Poursuivre l'exploitation des données climatologiques et hydrologiques engrangées au cours du temps. Les modèles de prévisions ne sont pas suffisants pour guider la conception des barrages : il faut continuer à exploiter les données du passé avec une vision réaliste.
- Prendre en considération la composante afférente aux changements climatiques dans les études de conception afin qu'elles soient appuyées et accompagnées par les expériences de chacun.
- Bien cerner les données relatives à l'estimation du volume utile des retenues de barrages, en se basant sur des données fiables sur le transport solide, et selon des hypothèses réalistes concernant les mécanismes d'envasement des retenues.
- Constituer des bases de données propres aux problèmes d'envasement et de protection des bassins versants qui puissent servir de référentiels pour la conception et la gestion des barrages ;
- Approfondir la réflexion sur les méthodes de dévasement dans les retenues de barrages et au voisinage des ouvrages annexes et la modélisation des transports solides dans les retenues de barrages, les méthodes innovantes de protection des bassins versants
- Donner plus de soin à la réalisation de l'analyse économique précédant la réalisation des



barrages, en veillant à éviter toute tentation de surestimer les bénéfices et de sous-estimer les coûts.

- Respecter des principes de bonne gestion, en termes de transparence, de recours aux approches participatives et responsabilisation de toutes les parties concernées, ce qui constitue une contribution importante pour garantir une conception optimale des barrages.
- Utiliser les barrages pour promouvoir la gestion intégrée des ressources en eau de surface et souterraines.

En matière d'impact sur l'environnement naturel et socio-économique :

- Prendre en compte les problèmes liés à l'environnement naturel et socio-économique, dès le début des études d'avant-projet, et au cours de toutes les phases de définition, de réalisation et d'exploitation du projet, en accordant une attention particulière aux effets sur la biodiversité ou sur l'habitat des espèces rares ou menacées, pour préparer le cas échéant un plan de développement qui permet de sauvegarder le milieu naturel et le revenu des populations affectées par la réalisation des barrages.
- Accorder un grand soin au déplacement des populations, dont le plan de réinstallation doit être basé sur des études sociales complètes et dont l'indemnisation devra être suffisante pour leur permettre d'améliorer leur niveau de vie de façon incontestable.
- Effectuer les lâchers d'eau périodiques pour maintenir dans les cours d'eau un débit minimal pour soutenir l'écosystème et les ressources aquatiques et d'atténuer les effets négatifs des barrages en exploitation.

En matière d'évaluation de l'efficacité des projets :

- Surveiller, dès la mise en service d'un aménagement, ses impacts, en les comparant avec la situation de référence, établie avant le début des travaux, afin d'acquiescer une meilleure connaissance des interactions entre l'aménagement et son environnement.
- Effectuer des études de poste évaluation des projets des grands barrages, qui doivent être désormais, une pratique courante pour mieux évaluer l'efficacité des barrages et déterminer le niveau de satisfaction des objectifs en comparant les différentes options préconisées en phase des études de conception et la réalité sur le terrain en termes de développement économique et social et d'impact sur l'environnement. Les résultats de ces études devront être publiés afin d'améliorer nos connaissances dans ce domaine, et pour en tenir compte dans les projets futurs.

En matière de gestion durable des barrages et d'économie d'eau :

- Disposer d'une définition commune de la gestion durable des barrages, à savoir :
"La gestion durable des barrages est celle qui leur permet de assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus, dans le respect des critères environnementaux et de sécurité du moment". Cette gestion durable doit également prendre en compte les usages émergents ou ré-émergents.
- Porter un plus grand intérêt à la gestion des barrages, pour préserver les ressources en eau, de plus en plus limitées ou difficiles d'accès, en améliorant l'utilisation de l'eau dans l'irrigation, l'alimentation en eau potable et industrielle, la production d'énergie électrique,



- Renforcer les mesures de lutte contre l'érosion en renforçant l'aménagement des bassins versants. Des mesures d'accompagnement sont recommandées, afin de réduire l'envasement des barrages et garantir à la retenue une vie utile aussi longue que possible, telles que des chasses d'eau périodique et le recours le cas échéant au dragage des retenues.
- Poursuivre et de renforcer les actions de réhabilitation et de maintenance des ouvrages hydrauliques et des systèmes d'irrigation.
- Prendre les dispositions nécessaires pour accélérer la résorption du décalage existant entre les superficies dominées par les barrages existants et les superficies équipées pour profiter des eaux régularisées au niveau des barrages construits qui continuent à se perdre en mer.
- Soutenir la recherche scientifique dans le domaine de l'économie de l'eau et encourager l'introduction de nouvelles technologies ;
- Consolider et poursuivre les actions visant le recouvrement des charges du service de l'eau tout en les accompagnant d'action d'incitation pour faire prévaloir progressivement une politique de subvention de l'économie de l'eau plutôt que de subvention du tarif de l'eau.

En matière de communication et concertation :

- Assurer une meilleure communication sur les questions ayant trait à la réalisation des grands projets de barrages et au mécanisme de prise de décision au cours de toutes les étapes de la conception, de la réalisation et de l'exploitation, à l'intention de tous les intervenants y compris les collectivités locales et les représentants de la société civile qui sont directement concernées par ces projets, afin d'éviter les polémiques et les incompréhensions. Les décisions prises en commun accord entre toutes les parties permettront de réduire les impacts négatifs des projets.
- Prendre les dispositions nécessaires à une meilleure communication sur la notion de gestion durable des barrages et des ressources en eau dans le souci de transparence, de cohérence, de valorisation des actions, d'écoute et de sensibilisation de tous les acteurs.
- A cet effet l'édition d'un guide référence de bonnes pratiques et de valeurs partagées de la gestion durable des barrages en Méditerranée, doit être réalisée dans les meilleurs délais.
- Promouvoir l'esprit de concertation, de civisme et de bonne gestion pour sensibiliser tous les intervenants (pouvoirs publics, collectivités locales, société civile, bailleurs de fonds, médias et utilisateurs d'eau), afin que les présentes recommandations puissent être mises en œuvre.
- Encourager la diffusion continue d'informations complètes et objectives par l'administration, en faveur des médias, collectivités locales, société civile, organisations non gouvernementales et surtout, des populations directement ou indirectement concernées.

En matière de promotion du partenariat et de la recherche scientifique :

- Renforcer la coopération entre les pays de la méditerranée dans le domaine de la conception et de la gestion des barrages pour un meilleur partage des connaissances et la mise en réseau des données, expériences et pratiques de bonne gouvernance.
- Susciter la mise en place d'un comité de suivi de l'application des différentes recommandations et d'évaluation de leurs efficacités dans diverses situations, pour les affiner le cas échéant.
- Pérenniser les rencontres au niveau du bassin Méditerranéen pour favoriser les échanges d'expériences dans la gestion durable des barrages, en identifiant les besoins de financement



associés et en prévoyant une structure de suivi des actions. Cette démarche doit être placée directement sous le pilotage de l'IME qui devra préciser entre autre un calendrier des rencontres.

- Créer un atelier spécifique ou un groupe de travail qui devra définir l'architecture, les méthodes et les moyens pour partager nos expériences positives et négatives en veillant à garder une forme souple rapide et efficace dans son fonctionnement.

- Etablir la liste des thématiques pouvant faire l'objet d'ateliers spécifiques qui seront organisés dans un objectif de partage d'expériences et de recherche d'innovation et d'actions concrètes.

- Pour chacun de ces thèmes, il est proposé de charger l'IME de rédiger un cahier des charges fixant le cadre de travail et de définir la priorité de traitement.

- Pour garantir la continuité et l'intérêt de ce partage, il est proposé d'engager dès que possible un atelier sur la problématique de la gestion des débits solides qui semble aujourd'hui incontournable, puis de traiter la thématique de la réglementation par l'échange de documentations et de textes réglementaires concernant la conception et la gestion des barrages.

- Promouvoir la recherche scientifique en matière de mobilisation, de gestion et d'utilisation des ressources en eau, par la mise en place de liens de partenariat entre les centres de recherches des différents pays de la méditerranée et l'octroi des aides au développement à ces instances.

En matière d'amélioration du cadre institutionnel et réglementaire :

- Réfléchir sur les aspects institutionnels et organisationnels à même d'assurer les meilleures intégrations au niveau :

- national
- intersectoriel
- intrasectoriel

- Considérer l'intégration de tous les aspects relatifs aux problèmes affectant les volumes d'eau fournis par les barrages et notamment :

- l'envasement
- l'évaporation
- l'échange entre eau des barrages et celle des nappes
- la qualité de l'eau

- Améliorer les cadres institutionnel et réglementaire en matière de conception et de gestion des barrages pour assurer un développement durable et intégré des projets prenant en compte les composantes économiques, humaines et environnementales.

- Mettre au point des critères, des lignes directrices et des normes acceptables à l'échelle régionale, concernant la planification, la conception, l'évaluation, la construction, l'exploitation et le contrôle des grands barrages, ou leur mise hors service.

- Unifier dans l'espace méditerranéen, les normes de qualité des déversements, écoulements, rejets et dépôts directs ou indirects dans les eaux superficielles ou souterraines.